



# 土 木 研 究 所 資 料

第 766 号

海岸堤防の水理に関する実験的研究

昭和 47 年 7 月

建設省土木研究所

海岸堤防の水理に関する実験的研究

第七六六号

昭和四十七年七月

建設省土木研究所

# 海岸堤防の水理に関する実験的研究

昭和47年7月

富永正照

(河川部海岸研究室長)

# 総 目 次

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第1章 序 論 .....                  | 1   |
| 第2章 越 波 量 .....                | 3   |
| 2.1 序 説 .....                  | 3   |
| 2.2 実験方法および実験条件 .....          | 3   |
| 2.3 1/30 海底こう配上の鉛直堤の越波量 .....  | 4   |
| 2.4 うちあげ高と越波量との相関 .....        | 6   |
| 2.5 のりこう配の影響 .....             | 10  |
| 2.6 波返の効果 .....                | 15  |
| 2.7 風の影響 .....                 | 18  |
| 2.8 結 論 .....                  | 25  |
| 第3章 波 圧 .....                  | 27  |
| 3.1 序 説 .....                  | 27  |
| 3.2 模型実験による波圧の測定 .....         | 27  |
| 3.3 砕波衝撃圧 .....                | 40  |
| 3.4 砕 波 圧 .....                | 51  |
| 3.5 波圧により表のり被覆中に生ずる応力の検討 ..... | 61  |
| 3.6 結 論 .....                  | 66  |
| 第4章 消波工および根固工 .....            | 69  |
| 4.1 序 説 .....                  | 69  |
| 4.2 透過性構造物による波の減衰 .....        | 69  |
| 4.3 消波工の規模と消波効果 .....          | 77  |
| 4.4 根固工法の検討 .....              | 93  |
| 4.5 結 論 .....                  | 101 |
| 第5章 既設堤防の特徴と問題点 .....          | 103 |
| 5.1 序 説 .....                  | 103 |
| 5.2 堤 防 高 .....                | 103 |
| 5.3 堤防の形状と被覆工 .....            | 109 |
| 5.4 波 圧 .....                  | 110 |
| 5.5 消波工および根固工 .....            | 113 |
| 5.6 結 論 .....                  | 118 |
| 第6章 結 論 .....                  | 119 |

# 第1章 序 論

## 第1章 序 論

日本は四囲海にかこまれており、古来からその恩恵に浴することも大きかったが、その反面、つねに、台風高潮、地震津波、冬季風浪などの脅威にさらされており、これらによる災害から海岸を守ることが必要であった。

日本の海岸の総延長は約 27,000 Km であるが、高潮、高波、津波などの侵入を防ぐために、何等かの保全施設を必要とする海岸の延長は約 13,000 Km と推定されている。その中、現在すでに保全施設がつくられている海岸は約 6,900 Km に達している。保全施設中の堤防・護岸の占める割合は非常に高く、その総延長は河口部も含まれるので約 7,000 Km となっている。

海岸事業が国の施策として行なわれるようになったのは昭和 25 年からなので、25 年から 44 年までの総事業費を調べてみると、約 3,370 億円となっている。また、同期間の災害復旧費は約 1,290 億円に達しており、災害が相当に多いことが認められる。

今後の海岸保全事業がどのように進展してゆくのか明確に予測することは困難であるが、日本の国土が狭小で山地が多く、海岸線に沿った狭い平野に産業と人口が集中し、それにともなう海岸の利用も今後とも一層高まると考えられるので、いままですり以上の投資によりその保全と利用をはかってゆくことになる。

45年度から発足した海岸事業 5 箇年計画では、約 3,200 億円の総枠が設定されている。また、60 年までには、一応の目安として約 1 兆円の投資が考慮されている。過去の実績では、堤防・護岸の建設費が総事業費の中に占める割合はきわめて高いので、今後多少その率が下ったとしてもなお相当な経費が堤防・護岸の築造にさかれることになる。したがって、これまで以上に、安全で、かつ、経済的な設計法を確立し、建設費の節減をはかるとともに、災害の発生を防止するようにしなければならない。

海岸堤防に関する研究が日本において始められるようになったのは、昭和 20 年代の後半以後のようである。この頃に新しい海岸工学的な手法が導入され、海岸堤防の設計法も著しく改善されることになった。とくに、昭和 28 年の 13 号台風による災害復旧において、堤防高を(計画潮位+波のうちあげ高)とする方式が初めて採用された。

それ以来、堤防高は基本的にはこの方式で定められてきたが、問題は波のうちあげ高のとり方である。その当時は、この値は沖波波高の 10~14 倍程度にとればよいと考えられていた。この数値は波のうちあげ高としては

必ずしも正しくはないが、堤防高としてはこの程度であればその機能も満足せしめられ、かつ、堤防自身も安全であろうという工学的判断から決められたようである。その後の多くの研究により、波のうちあげ高は沖波の 1.4 倍よりかなり大きくなる場合もあることが明らかとなった。

したがって、堤防高を上述の方式によって定めると、相当に高い堤防をつくる場合もでてくることになるが、現実には、沖波波高の 10~13 倍程度の値をとって堤防高を決めることが多い。この場合には、条件によっては、相当な越波を生ずることになる。

伊勢湾台風による災害後は、堤防は原則として 3 面張りとなったので、相当量の越波にも耐えられるようであるが、背後地が浸水して被害を生ずる例がみられるようになった。このような状況では、堤防自体が安全でも、機能的には不十分となるので、越波量も十分に考慮して高さを決める必要性が認められてきた。もちろん、このような議論は 28 年災害時から考えられてきたようであるが、越波量がうちあげ高より取扱いがめんどうな量であり、すぐに設計に結びつけることが困難であったため、一般に採用されるまでに至らなかったと推定される。

堤防は通常堤体を土砂でつくり、これをコンクリートアスファルトなどで被覆した形式のものが多く、最近の堤防は堤体の幅も大きく、表のり被覆もかなり厚いので、いわゆる波圧により堤防が破壊した例は少ないようである。しかし、海底こう配の急な場合、湾内で高潮の起り易い場合などは、波圧も相当に大きくなる可能性がある。過去においては、波圧で破壊する前に、越波、基礎の洗掘などで堤防が被災したのであるが、これらの点が強固になると、波圧による直接的な被災ということも十分に考えられるので、経験的な手法に頼るのではなく、力学的な検討を加える必要がある。

前述のように、既設の堤防高がやや低いこと、海岸の利用度の高まったことなどにより、最近では越波を小さくしたいという要求が強くなってきた。そのため、既設堤防の前に消波工を設置する例がしばしばみられる。異形コンクリートブロックを用いた消波工は施工も簡単であり、しかも、堤防の安定度も著しく高まるので一般に広く採用されている。しかし、その設計法については明確な指針がなく、なお、経験に頼る面が多い。ブロックによる消波工は工費がかかるので、その規模については十分な検討が必要である。

のり先洗掘による堤防の破壊は最近の堤防災害の主な

原因となっている。これは過去の大災害がいずれも高潮災害であったため、上部の補強に比し、下部の補強が若干軽視されてきたことに加えて、近年、海岸侵食の傾向が目立ってきたことが主たる要因と考えられる。

砂浜上につくられた堤防は、一般に平時は前浜があるので、基礎の根入れも少なく、根固工も省略される例が多かった。このような場合、季節的な影響などで、一時的に前浜が減少し始めると、のり先が洗掘され、基礎が移動したり、堤土が下部より流出し、きわめて簡単に破壊される。このような災害に対しては、基礎の根入を深くしたり、また、その下部に矢板をうって、堤土の吸い出しを防止する工法、あるいは、根固工を設けて、のり先洗掘をできるだけ防ぐ工法がとられる。のり先の洗掘現象、また、前浜の季節的な消長などはきわめて複雑な現象であって、その量的な説明は著しく困難である。したがって、一般に前者の方法のみで堤防の安全をはかることは容易ではない。そこで基礎の根入れ、矢板の長さなどは常識的な線に止め、根固工を設けてのり先洗掘を抑える工法が一般的である。

根固工法としては、通常、異形コンクリートブロックを用いることが多い。この工法は施工が容易であり、ブロックが沈下しても、さらにその上に積むことにより機能維持がはかれる。しかし、ブロックのみでは、底質の移動を抑える機能は小さく、また、ブロックを何層にも積むことは、経済的には必ずしも適切ではない。したがって、根固工法としては、ブロックの下部に適切なフィルターを設置し、底質の移動を抑えることが必要であろう。

以上のべてきたことから、堤防の水利設計においては、多くの問題が未解決のまま残されていることがわかる。この研究は、越波量、波圧、消波工および根固工の諸問題を取り上げ、実験的な手法を活用して検討を行い、堤防の設計法を一層合理的にすることを目的とする。研究の主要部は第2章から第5章にわたっているが、その概要はつぎのとおりである。

第2章の越波量では、まず、各種の水利条件において、無風時の鉛直堤の越波量を測定し、ついで、比較的限られた条件下で、海底こう配、堤防ののりこう配、風の影響、波返の効果などを明らかにした。さらに、広範囲の水利条件において越波量の推定を可能ならしめるため、うちあげ高の実験資料を活用して、うちあげ高と越波量との関係を検討した。

第3章の波圧では、模型実験により広範な波圧の測定を行ない、堤防ののり面に作用する最大波圧、波圧分布の特性を明らかにした。設計上とくに問題となる碎波後の波圧については、堤防が汀線より海側にある場合、または、陸側に設置された場合の両者について、それぞれ算定式を導いた。また、碎波衝撃圧についても若干の検討を加えた。さらに、堤防の表のり被覆工を簡単なモデルに置き換え、波圧により被覆中に生ずる応力を計算し、堤防の波圧に対する安全度を検討した。

第4章では、まず、透過性構造物内の波の減衰に対する簡単な理論式と、消波ブロックの抵抗特性に関する実験結果から、各種ブロックの消波効果を比較検討した。ついで、テトラポッド消波工について、その規模と透過率との関係を実験的に求め、碎波領域中の堤防については、この透過波高から、消波工を有する堤防へのうちあげ高が求められ、結局、与えられた消波工の効果を量的に見積る方法を示した。

根固工については、根固工の下部に敷く捨石フィルター、マットレスの効果を定常流で検討し、ついで、小型および大型模型で波が作用する場合の効果を調べた。

第5章では、建設省の補助事業として実施している多くの既設堤防の実例を収集し、上述の研究結果を適用し、その特徴と問題点を検討した。

まず、過去のうちあげ高の実験結果を用いて既設堤防のうちあげ高を算定し、これと堤防高との比較を行なった。ついで、第2章のうちあげ高と越波量との関係をもとにした越波量の算定法により各堤防の越波量を求めた。

堤防の形状についても統計的な考察を加えるとともに、第3章の波圧の算定式を用いて各堤防に作用する波圧を推定した。

消波工・根固工についても資料を収集し、その規模の選定頻度を調べた。さらに、消波工については、第4章の結果を利用して、各消波工の効果を概算してみた。

以下にのべる研究成果は、研究の目的からみて必ずしも満足すべきものではないが、このような総括的な研究はほとんどないようなので、堤防の水利設計上有益な資料となるものと思われる。

## 第2章 越波量

### 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 2.1 序 説 .....                 | 3  |
| 2.2 実験方法および実験条件 .....         | 3  |
| 2.3 1/30 海底こう配上の鉛直堤の越波量 ..... | 4  |
| 2.4 うちあげ高と越波量との相関 .....       | 6  |
| 〔1〕 碎波領域 .....                | 6  |
| 〔2〕 重複波領域 .....               | 8  |
| 2.5 のりこう配の影響 .....            | 10 |
| 2.6 波返の効果 .....               | 15 |
| 2.7 風の影響 .....                | 18 |
| 2.8 結 論 .....                 | 25 |

## 第2章 越 波 量

### 2.1 序 説

越波量は堤高、設置水深、表のりの形状、風の有無、沖波の性質、海底こう配などの種々の要素に左右されるので非常に複雑な現象である。したがって解析的な取扱いは困難で、一般に模型実験により研究されている。

越波に関する研究としては、1/10 海底こう配上の鉛直堤の越波量に関する京都大学の研究<sup>(1)(2)(3)</sup>、不規則波の越波量を取扱った合田、竹田の研究<sup>(4)</sup>、飛散分布に関する高田の研究などがあるが、うちあげ高に比べると計画に使える資料は少ない。

ここでは、海底こう配 1/30 の海浜上に種々の堤防を設置して越波量を測定し、実用的な資料の整備をはかるとともに、その適用性を広めるために、波のうちあげ高と越波量との相関を調べた。また、のりこう配の影響、波返の効果、風の影響などについても検討し、碎波帯中に設置された堤防の越波量の算定法を示した。

### 2.2 実験方法および実験条件

実験に用いた施設は、長さ 35 m、幅 0.6 m、深さ 1.2 m の風洞付造波水路と、長さ 110 m、幅 1.5 m、深さ 2.5 m の大型造波水路である。

水路の一端に 1/30 の海床をつくり、その上に種々の堤防を設置して波を当て越波量を測定した。図-1 に示

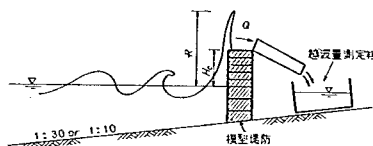


図-1 越波量の測定方法

すように堤防は適当な厚さの板を積み重ね、その枚数を変えることにより高さを加減する。越波量は堤防の背後に箱をおき、その中に流入した水量をメスシリンダーで測定した。1回の実験で5波程度越波させ、その平均値を越波量とした。越波量が著しく大きく、2~3波で箱が一ぱいになる場合は同一の実験を数回くり返して平均した。風速はピトー管およびアルコールを用いた傾斜式マノメーターにより測定した。風速は水槽内で鉛直方向にある分布をなすので、堤防の天ば上約 30 cm の位置で所要の風速に合せた。この風速分布の一例を図-2 に示す。風速の大きい場合は、越波水量が堤防背後に大きく飛散するので、飛散水量も完全に集められるようにとくに留意した。なお、風洞付水路では波を機械的に発生させたが、波の上に風を吹かせると波の不規則性が強くなるので、これを避けるために、堤防の位置から約 10 m 手前で風を入れるように送風口を配置した。

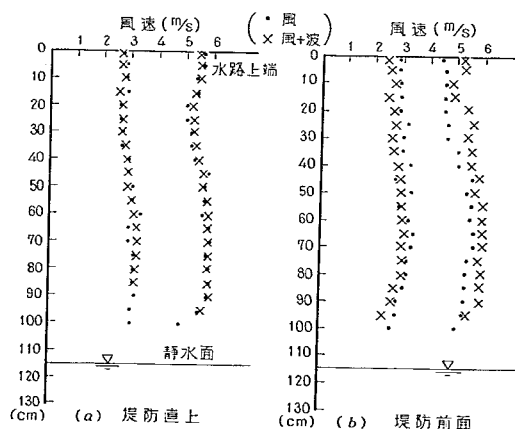


図-2 風洞内の風速分布

実験条件をまとめると表一のとおりである。大型水路における実験は周期の影響を調べるために行なったもので、大部分の実験は風洞付水路で実施した。海底こう配は 1/30 を主として行なったが 1/10 の場合にも若干実験を実施した。

表一 実験条件

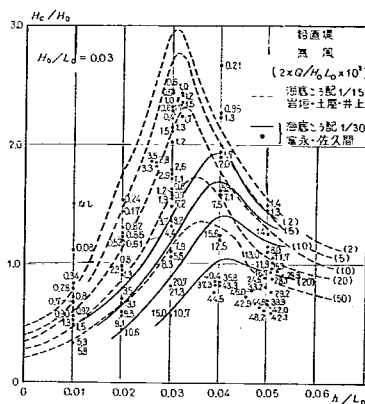
|                                      | 風洞付水路                                  | 大型水路      |
|--------------------------------------|----------------------------------------|-----------|
| 波 高 ( $H_0$ )                        | 5~25 cm                                | 20~60 cm  |
| 周 期 ( $T$ )                          | 11 15 19 sec                           | 20 30 sec |
| 波 形 係 数 ( $H_0/L_0$ )                | 0.02~0.06                              | 0.04      |
| 堤防のり先水深 ( $h$ )                      | 0~21 cm                                | 6~30 cm   |
| 比 水 深 ( $h/L_0$ )                    | 0~0.06                                 | 0.01~0.04 |
| 風 速 ( $V$ )                          | 0~10 m/s                               | 0         |
| 無次元された風速 ( $\frac{V}{\sqrt{gH_0}}$ ) | 0~8                                    |           |
| 堤 防 の 形 状                            | 鉛 直<br>波返しなし<br>5分~3割<br>波返し付<br>5分~3割 | 鉛 直       |
| 比 堤 高 ( $H_c/H_0$ )                  | 0.2~2.5                                | 0.4~2.5   |

### 2.3 1/30 海底こう配上の鉛直堤の越波量

図一3は無風時の鉛直堤の越波量を示したものである。越波量  $Q$  は堤防の単位幅当り、一浪当りの値で無次元化した形で与えられている。

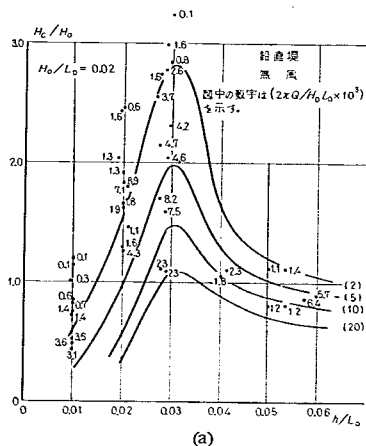
これらの図によると、越波量は堤防を進行波の砕波点付近においた場合に最大となり、設置水深がそれより浅くなくても深くなくても越波量は小さくなる。とくに、

砕波領域では減少の程度が大きい。したがって、越波量が問題となるのは、一般に設置水深が大きい場合である。しかし、海底こう配が著しく急で、波が大きい場合は、堤防が汀線より陸側にあっても越波量が問題となる場合がある。昭和41年9月の駿河湾奥の吉原海岸における災害はこの例で、堤防は汀線から 130m 陸側にあったが、越波により背後地が大きな被災を受けた。<sup>(6)</sup>この海岸の海底こう配は 1/4 ~ 1/5 という急こう配である。



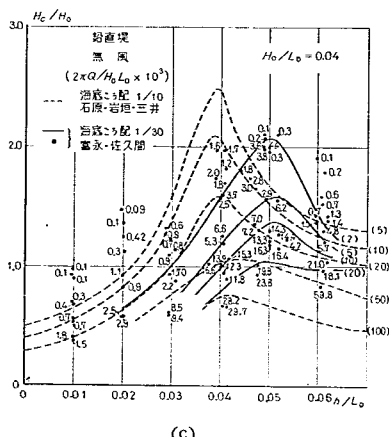
(b)

図一3



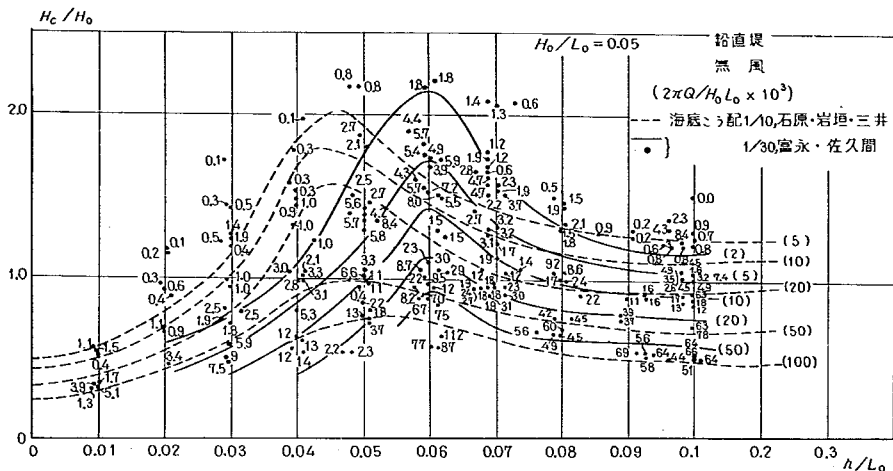
(a)

図一3 鉛直堤の越波量



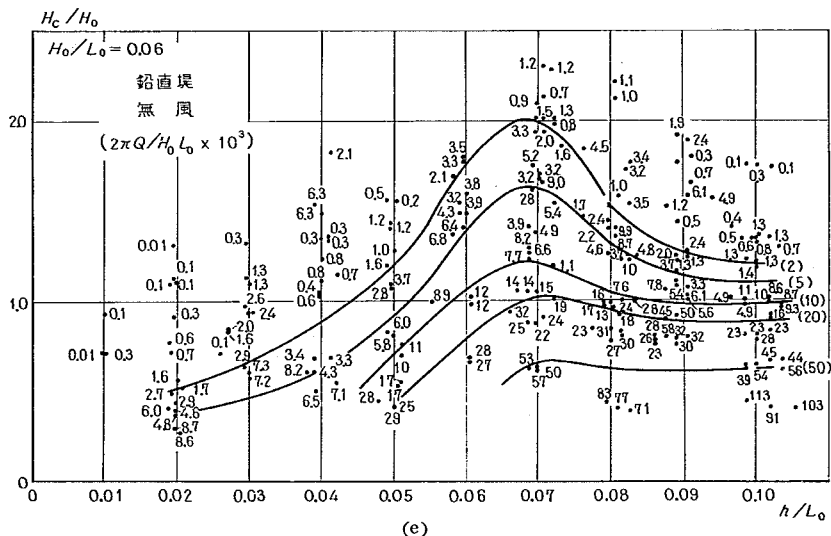
(c)

図一3



(d)

図—3



(e)

図—3

また、海底こう配が非常にゆるくなると、越波量の変化状況は図—3と若干異なった様相をとる。たとえば、岩崎・沼田の海底こう配 1/60 の場合の実験結果によると、設置水深を一定にして、波を大きくしてゆくと、越波量の極大値が2カ所あらわれる。第1のピークは図—

3に認められるものと同じであるが、第2のピークは波が沖で砕けているにもかかわらず発生する。これは海底こう配がゆるい場合は、波がいったん砕けても、ある距離進んだ後にふたたび浅海波として再生し、ちょうど砕けた状態で堤防に当たるからであろうと説明されている。

海底こう配が急になるとうちあげ高が大きくなるので堤防高などの条件が同一の場合、越波量も増大すると考えられる。図-3の中に示した点線は京都大学の海底こう配 1/10 および 1/15 の場合の実験結果である。これらの図をみると波形こう配が小さいほど両者の差は大きい。とくに、碎波領域において 1/10 こう配の場合の越波量が著しく大きい。一方重複波領域では両者の差は小さい。越波量のピーク値が発生する相対水深は、1/10 と 1/30 とではかなり異なっており、1/10 の方が浅い方にずれている。したがって、碎波点付近では 1/30 こう配の方が越波量が大きくなる場合があるので注意する必要がある。

## 2.4 うちあげ高と越波量との相関

越波は波のうちあげ高が堤防より高くなる時に生ずるものであるから、うちあげ高と越波量とはかなり密接な関係があるものと予想される。両者の間に簡単な相関があることがわかれば、うちあげ高の資料は相当に豊富なので、それが越波量の推定に生かされることも考えられる。

### (1) 碎波領域

波のうちあげ高は堤防前面の波の形態に左右される面が大きい。碎波後に堤防に当たる場合は、沖波の影響が小さくなり、堤防のり先水深のみによりほぼうちあげ高がきまると考えられる。一方、設置水深が大きく、重複波または部分重複波が生ずる場合には、沖波の影響が大きくなり、うちあげ係数は波形こう配の関数となる。

碎波領域では、図-1に示すように、越波量は堤防天ばより上に飛び出す部分の高さに密接に関係すると思われる。この高さは波のうちあげ高 (R) と堤防の高さ (He) との差にほぼ等しいので、 $R - H_e$  と越波量との関係を調べてみる。

表-2は土木研究所において実施したうちあげ高の実験にもとずいて作成したものである。<sup>(8)</sup>うちあげ高をこの表を用いて算定し、越波量との関係を調べた結果を図-4に示す。これを見ると、かなりばらつきはあるが、越波量は  $R - H_e$  のほぼ 2 乗に比例している。

$$Q = \alpha (R - H_e)^n \quad (1)$$

とにおいて、平均的に引いた実線について、 $\alpha$  と  $n$  を求めてみると、 $\alpha = 15 \times 10^{-2}$ 、 $n = 2$  となっている。

この式は具体的には、堤防より上に飛び出す部分の断面形状が、ほぼ三角形で、しかも、その単位幅当りの水量と越波量との比が一定であることを表わしていると考えられる。

以上の結果は風洞付造波水路で得られたもので、周期は 1.1 ~ 1.9 sec の範囲にあるが、大部分の実験で 1.5 sec の周期を用いた。碎波を含む領域では、周期が 2 sec 以下に

表-2 鉛直堤への波の打ちあげ高

| $\frac{h}{L_0}$ | $R/H_0$ |      |      |      |      |
|-----------------|---------|------|------|------|------|
|                 | 0.02    | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 |
| 0.01            | 15      | 1.05 | 0.85 | 0.77 | 0.70 |
| 0.02            | 4.0     | 2.1  | 1.4  | 1.1  | 0.95 |
| 0.03            | 4.2     | 3.0  | 1.9  | 1.4  | 1.2  |
| 0.04            | 2.3     | 3.3  | 2.9  | 2.0  | 1.6  |
| 0.05            | 1.5     | 2.2  | 3.4  | 2.7  | 1.8  |
| 0.06            | 1.3     | 1.65 | 2.2  | 3.0  | 2.3  |
| 0.07            |         |      | 1.7  | 2.15 | 2.65 |
| 0.08            |         |      | 1.5  | 1.8  | 2.1  |
| 0.09            |         |      |      | 1.6  | 1.8  |
| 0.10            |         |      |      | 1.5  | 1.65 |

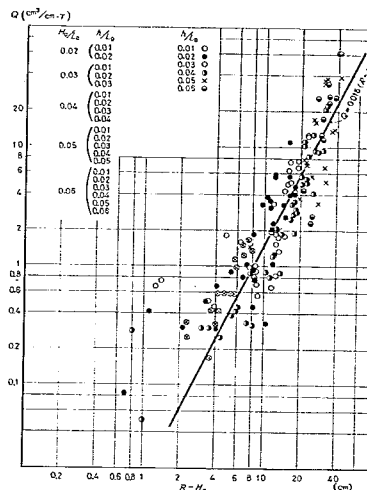
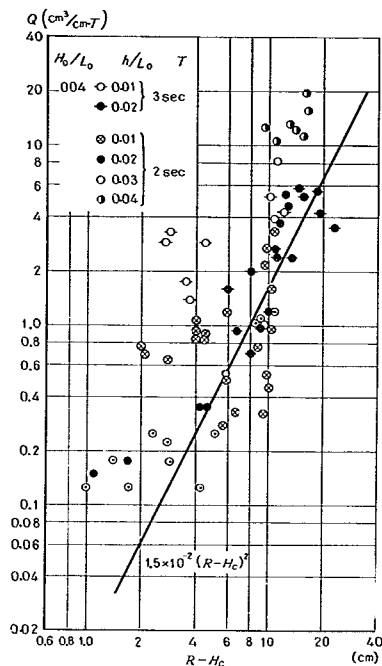


図-4 碎波領域におけるうちあげ高と越波量との相関

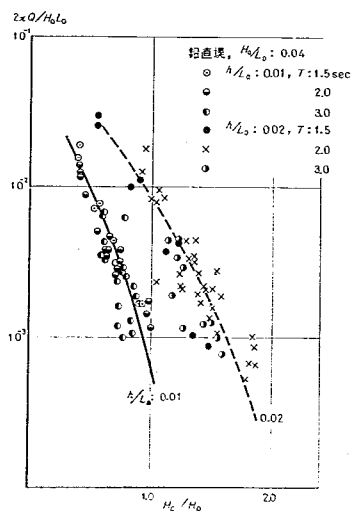
なると縮尺の影響が表われるといわれているので、大型水路で周期の長い波を用いてこの点を検討した。

図-5はこの結果を示したものである。この場合、うちあげ高の算定には実験値をそのまま用いた。実線は周期の短かい場合の結果であるが、相対水深の小さい場合に両者の差の大きいケースが多いが、一般的には、周期の影響は大きくないと考えてよからう。さらに、図-3と同じ表示で表わした結果を図-6に示す。周期は 1.5 sec、2 sec、3 sec の3種であるが、周期による系統的な差は認められず、周期が 1.5 sec 以上であればほとんど影響はないと考えてよからう。

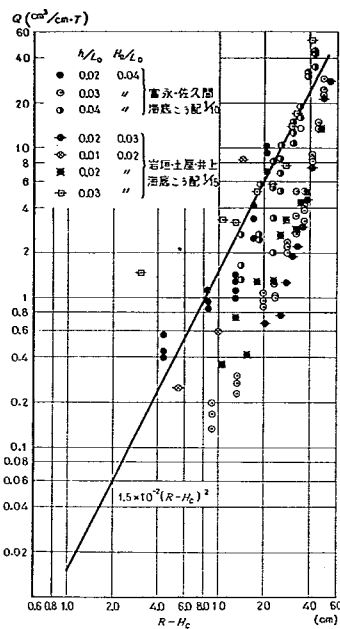
つぎに海底こう配 1/10 および 1/15 の場合について調べてみる。実験資料としては、京都大学防災研究所のも



図一五 うちあげ高と越波量との相関 (周期 2~3sec)



図一六 越波量に対する周期の影響



図一七 うちあげ高と越波量との相関 (海底こう配 1/10 および 1/15)

のも使用した。うちあげ高と越波量との相関は図一七のとおりである。これを見ると、二つのグループに分けて考えることができる。

一つは波が丁度砕けて堤防に衝突し、衝撃圧が作用する条件には近い場合である。これは、図一七においてつぎのケースである。

- (a)  $H_0/L_0 = 0.04$ ,  $h/L_0 = 0.03$
- (b)  $0.03$ ,  $0.02$
- (c)  $0.02$ ,  $0.02$

これらの場合は、うちあげ高が大きくても越波量は比較的小さい。越波量は  $(R-Hc)^2$  に比例するが、係数は、 $3 \times 10^{-3}$  程度で (1) 式における  $15 \times 10^{-2}$  に比較してかなり小さい。

残りのケースにおいては、越波量と  $R-Hc$  との関係は図にも示したように、ほぼ、1/30 とう配の場合に得られた結果と一致する。

図一四~五において、 $h/L_0$  が 0.01 の場合をみると、ほとんど  $\alpha$  が  $15 \times 10^{-2}$  より大きいことがわかる。この点をさらに詳細にしらべてみる。表一3 (a) は波形こう配が 0.03~0.05 で、相対水深が 0.01 の場合について  $\alpha$  の値

表一-3 相対水深の小さい場合の $\alpha$ 

(a) 海底勾配 1/30

| 実験No | $H/L_0$ | $h/L_0$ | $R/H_0$ | $H_0$ | $R$   | $H_c$ | $R-H_c$ | $Q$                      | $\frac{Q}{(R-H_c)^2}$ |
|------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|---------|--------------------------|-----------------------|
| 1    | 0.03    | 0.01    | 1.05    | 105cm | 11 cm | 7.5cm | 35cm    | 0.5cm <sup>3</sup> /cm.T | $4.1 \times 10^{-2}$  |
| 2    |         |         |         | 107   | 112   | 7.5   | 37      | 0.42                     | 31                    |
| 3    |         |         |         | 109   | 115   | 5.3   | 6.0     | 0.97                     | 27                    |
| 4    |         |         |         | 107   | 113   | 5.3   | 5.8     | 1.13                     | 34                    |
| 5    |         |         |         | 162   | 169   | 134   | 35      | 0.48                     | 39                    |
| 6    |         |         |         | 169   | 177   | 134   | 4.3     | 0.42                     | 23                    |
| 7    |         |         |         | 169   | 177   | 94    | 8.3     | 1.35                     | 20                    |
| 8    |         |         |         | 167   | 174   | 94    | 8.0     | 1.38                     | 22                    |
|      |         |         |         |       |       |       |         | (平均)                     | 30                    |
| 9    | 0.04    | 0.01    | 0.85    | 143   | 122   | 7.5   | 4.7     | 0.58                     | 26                    |
| 10   |         |         |         | 137   | 116   | 7.5   | 4.1     | 0.58                     | 35                    |
| 11   |         |         |         | 139   | 118   | 9.5   | 2.3     | 0.33                     | 6.3                   |
| 12   |         |         |         | 139   | 118   | 9.5   | 2.3     | 0.25                     | 4.7                   |
| 13   |         |         |         | 144   | 123   | 5.5   | 6.8     | 1.22                     | 27                    |
| 14   |         |         |         | 141   | 120   | 5.5   | 6.5     | 1.50                     | 36                    |
|      |         |         |         |       |       |       |         | (平均)                     | 39                    |
| 15   | 0.05    | 0.01    | 0.77    | 17.5  | 135   | 5.5   | 8.0     | 1.33                     | 2.1                   |
| 16   |         |         |         | 168   | 129   | 5.5   | 7.4     | 1.67                     | 30                    |
| 17   |         |         |         | 17.5  | 135   | 9.5   | 4.0     | 0.32                     | 20                    |
| 18   |         |         |         | 178   | 137   | 9.5   | 4.2     | 0.42                     | 24                    |
|      |         |         |         |       |       |       |         | (平均)                     | 24                    |

表一-3 (b) 海底勾配 1/10

| 実験No | $H/L_0$ | $h/L_0$ | $H_0$ | $R$   | $H_c$  | $R-H_c$ | $Q$                       | $\frac{Q}{(R-H_c)^2}$ |
|------|---------|---------|-------|-------|--------|---------|---------------------------|-----------------------|
| 1    | 0.02    | 0       | 11 cm | 189cm | 14.6cm | 43cm    | 0.58cm <sup>3</sup> /cm.T | $3.1 \times 10^{-2}$  |
| 2    |         |         | 12    |       | 8.9    | 10      | 30                        | 30                    |
| 3    | 0.03    | 0.01    | 18    | 247   | 188    | 5.9     | 3.1                       | 8.9                   |
| 4    |         |         | 16.9  |       | 16.8   | 7.9     | 5.6                       | 9.0                   |
| 5    |         |         | 17.8  |       | 13     | 11.7    | 11.4                      | 8.3                   |
| 6    |         | 0       | 17.6  | 17.7  | 13.1   | 4.6     | 4.3                       | 20.3                  |
| 7    |         |         | 17.7  |       | 8      | 9.7     | 13.2                      | 14                    |
| 8    |         |         | 19.2  |       | 10.9   | 6.8     | 4.8                       | 10.4                  |
| 9    |         | -0.005  | 16    | 14    | 10     | 4       | 14                        | 8.8                   |
| 10   |         |         | 17.3  |       | 8      | 6       | 3.6                       | 10                    |
| 11   |         |         | 16.8  |       | 6      | 8       | 4.9                       | 7.7                   |
|      |         |         |       |       |        |         | 平均                        | 9.4                   |

を計算した結果である。これによると、 $\alpha$ は $15 \times 10^{-2}$ より大きく、 $3 \sim 4 \times 10^{-2}$ 程度の値となっている。さらに、1/10 勾配の場合では表一-3(b)のように、 $\alpha$ の値は10<sup>1</sup>前後の値をとっていることがわかる。

このように、堤防の設置水深が浅くなると、 $R-H_c$ が小さくても越波量は大きくなり、しかも、その程度は海底勾配が急になるほど大きい。

以上のべてきたことから、砕波領域における鉛直堤の越波量は、ほぼ $(R-H_c)^2$ に比例するといえるが、係数の $\alpha$ は、砕波衝撃圧が作用する場合は0.015より小さくな

る。砕波衝撃圧は海底勾配が急なほど大きいので、この傾向も海底勾配が急なほど明瞭にみられる。ここでも、1/30 の場合はあまりはつきりした差は認められなかったが、1/10 と1/15 の場合は $\alpha$ は $3 \times 10^{-3}$ でかなり小さい値となった。一方、設置水深がとくに浅くなると $\alpha$ は逆に大きくなる。結局、堤防上にうちあがった水量のうち、どの程度のものが越波するかは、衝突波の形状にも関係するので、 $R-H_c$ のみでは規定できないようである。

しかし、実用的な見地からみると、砕波衝撃圧を生ずる領域に海岸堤防をおく場合には、鉛直堤をそのまま設置することはないので、とくに浅い領域における補正を考えれば、(1)式は有用であると考えられる。

## (2) 重複波領域

最初に、先にのべた砕波領域と同様、重複波領域における $Q$ と $(R-H_c)$ との関係を調べてみたが、その結果によるとばらつきが大きく、波高に対してのり先水深の大きい場合ほど越波量が大きくなっていることが見出された。これは重複波領域では、沖波の影響が強いので、うちあげ波形状はのり先水深、波形勾配などにより変化し、一定の形状にならないことによるものと考えられる。

重複波の波形は Tadj bakhsh と Keller の3次の近似式によると次のように表わされる。

$$\eta' = \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{256} (9\omega_0^{-8} + 6\omega_0^{-4} - 15 + 8\omega_0^4) \cos x \right.$$

$$\left. + \frac{1}{8} \varepsilon (\omega_0^{-2} + 3\omega_0^{-6}) \cos 2x \right. \\ \left. + \frac{3}{256} \varepsilon^2 (9\omega_0^{-12} + 6\omega_0^{-6} + 30\omega_0^{-4} - 16 + \omega_0^4 + 2\omega_0^8) \right. \\ \left. + \cos 3x \right) \quad (2)$$

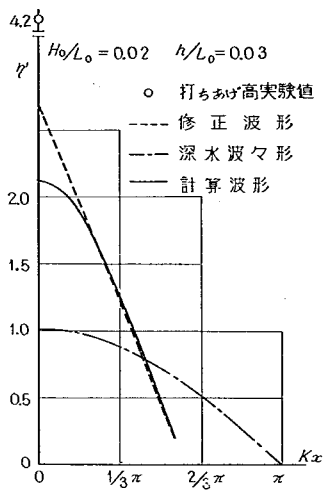
ここに、 $\varepsilon = ka$ ,  $\omega_0^2 = \tanh kh$ ,  $k = 2\pi/L$

$$\eta = a^{-1} \eta'$$

$a$  = 深海における重複波の振幅

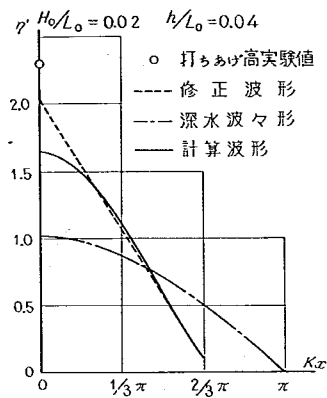
$\eta$  = ある水深における波峰高

上式を用いて計算した堤防前面部の重複波形状を波形勾配 0.02 の場合を例にとって示すと図一-8 のようになる。



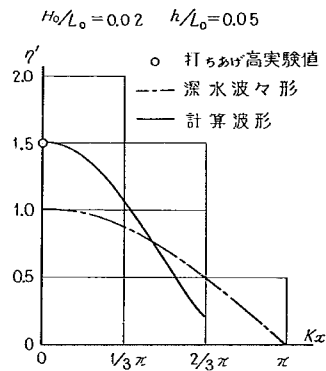
(a)

図-8 重複波のうちあげ波形



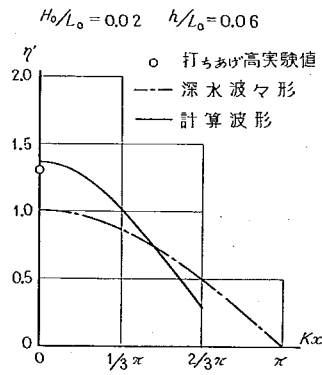
(b)

図-8 重複波のうちあげ波形



(c)

図-8 重複波のうちあげ波形



(d)

図-8 重複波のうちあげ波形

図中には同条件の波形こう配、比水深におけるうちあげ高の実験値 (○印) が記入されている。計算値と比較してみると、波高に対して水深の十分に大きい場合、すなわち、 $h/L_0 = 0.05, 0.06$  の場合は両者はよく一致しているが、水深の比較的小さい  $0.03, 0.04$  の場合は、実験値の方が大きい。これはこの領域では上式の近似度が十分

でなく、波もほとんど砕波しており、波形が堤防付近で下に凸のような形状をなしているためと考えられる。

以上の結果からみて、堤防前面の波形は上式で完全に表わせるものではないが、うちあげ高の実験値を参考にすれば、おおよその形状は推定されよう。これらの結果を利用することにより、堤防上に飛び出す単位幅当りの

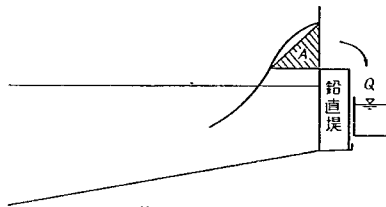


図-9 重複波のうちあげ水量の計算

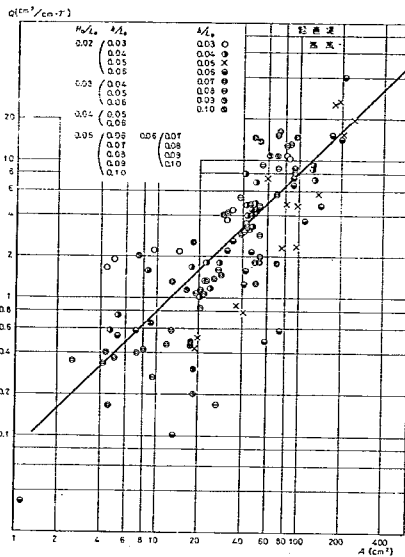


図-10 重複波領域におけるうちあげ水量と越波量との相関

水量を計算できるが、波形をそのまま生かして計算するのは、計算の複雑さ、精度の面で必ずしも適当ではないので、図-9 に示すように、三角形の面積  $A$  を計算し、これと越波量との関係を調べてみた。その場合、先にのべた波高に対し、のり先水深の小さい場合は、図-8 に示すように若干修正した波形を用いた。

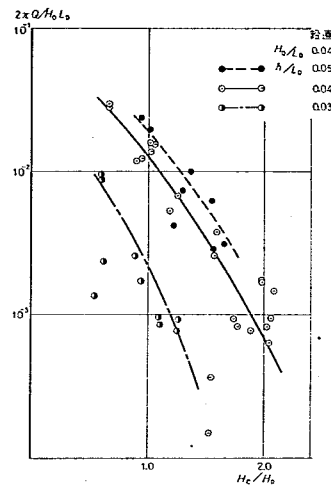
$Q$  と  $A$  との関係は図-10 のようになり、ほぼ、

$$Q = \beta A \quad (3)$$

とみなすことができよう。ここで、係数  $\beta$  は  $8 \times 10^2$  程度となっている。

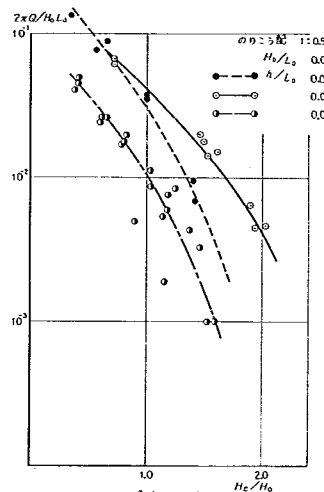
## 2.5 のりこう配の影響

うちあげ高の実験によると、堤防が砕波領域内にある場合は、鉛直堤のうちあげ高が最大で、のりこう配がゆるくなるとうちあげ高は小さくなる。一方、鉛直堤より



(a) 鉛直

図-11 堤防高による越波量の変化

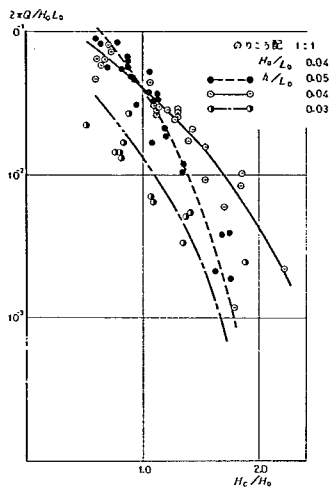


(b) 5分

図-11 堤防高による越波量の変化

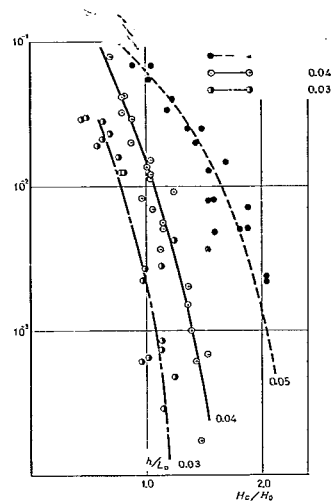
傾斜堤の方が当然越波しやすいので、越波量としては、鉛直堤より傾斜堤の方が大きい、うちあげ高が漸次小さくなるため、あるのりこう配でピークのことと予想される。

図-11は鉛直堤～3割堤の実験結果を整理したもので



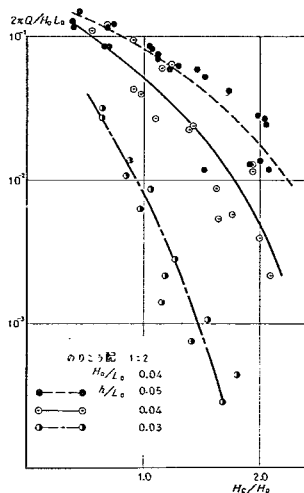
(c) 1割

図-11 堤防高による越波量の変化



(e) 3割

図-11 堤防高による越波量の変化



(d) 2割

図-11 堤防高による越波量の変化

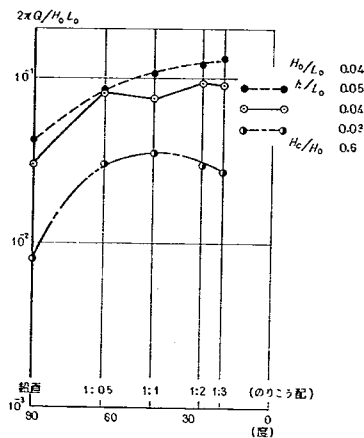
ある。波形こう配は 0.04 で、相対水深は 0.03～0.05 である。これらの図によると、鉛直堤と 5 分～1 割堤との間には若干の差が認められる。すなわち、鉛直堤の場合は、相対水深が 0.05 のときに越波量をもっとも大きくなって

いる。一方、5 分～1 割堤では、堤防高がとくに低い場合を除いて、相対水深が 0.04 の方が越波量は大きい。いずれの場合も、堤防上に飛び出す水量は、0.05 の場合より 0.04 の方が多いと思われるが、鉛直堤では垂直上方にうちあがるので、飛沫が多くて高く上る場合より、比較的形状のととのった厚い水脈でうちあがる方がより多く越波すると推定される。

2 割～3 割堤の場合は、0.05 でもっとも越波量が多い。この程度の傾斜になると、設置水深が大きくても、のり面上で波が砕けるようになり、また、衝撃的な圧力が作用して波が高くうちあがる現象もみられなくなって、急傾斜の場合とかなり異なった様相となる。この場合には、波がもっとも高くうちあがる相対水深は 0.04 より大きい方に移動し、0.03～0.05 の範囲内では、0.05 の場合が最大の越波量を与える。

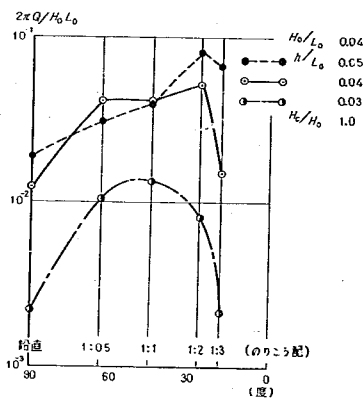
図-11 のままでは、のりこう配による越波量の変化状況が掴みにくいので、図-11 に示した平均的な線で実験結果を代表させ、横軸にのりこう配、縦軸に越波量をとってのりこう配の影響をしらべた。その結果を図-12 に示す。この図では、 $H_c/H_0$  が 0.6, 1.0, 1.5 の各ケースにわけて図示してあるが、どの場合も一般的な傾向にあまり差はない。

$h/L_0$  が 0.03 で、波が完全に砕けてから衝突する場合、1 割こう配でピークが表われている。 $h/L_0$  がさらに大きくなると、堤防高によって若干の差はあるが、2～3



(a)

図一12 のりこう配による越波量の変化



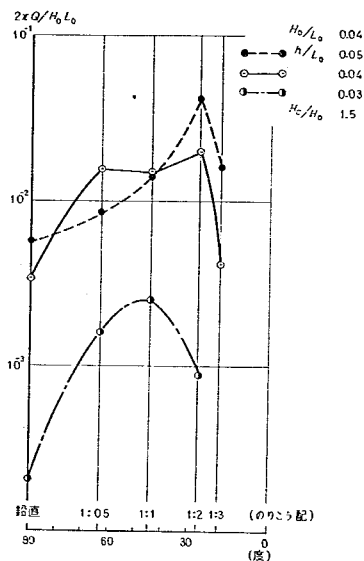
(b)

図一12 のりこう配による越波量の変化

割付近にピーク値がみられる。堤防高が高い場合は2割堤がもっとも越波量が大きく、 $H_c/H_0$ が0.6の場合は3割堤の越波量が大きくなる場合もある。

石原・岩垣・三井は1/10 海底こう配に種々のこう配をもった堤防を設置して越波量に対するのりこう配の影響をしらべた<sup>(1)</sup>。その結果、重複波領域では、傾斜角が30°前後で越波量がピークになるが、砕波領域では60°程度で最大となっており、図一12の結果とほぼ一致している。

5分、1割、2割、3割の各堤防について、無風時の



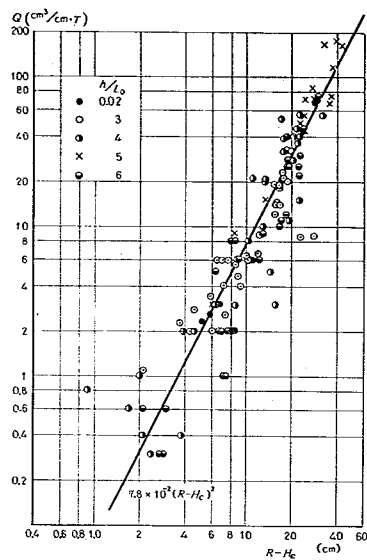
(c)

図一12 のりこう配による越波量の変化

越波量を測定した結果を(1)式のような形式で図示すると図一13のようになる。この場合、うちあげ高は土木研究所の実験結果から推定した。堤防が砕波領域の中にある場合について検討したので、波形こう配は0.04とし、比水深のみを変化させた。

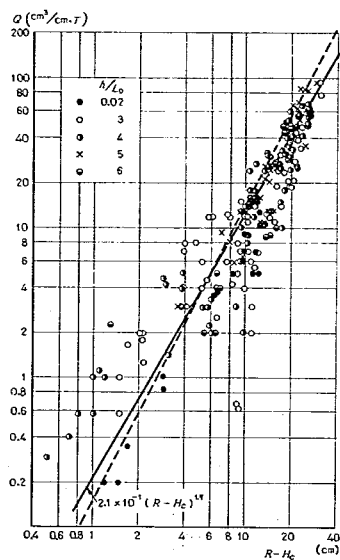
この結果をみると、 $R-H_c$ を一定とした場合は、のりこう配がゆるくなるにつれて越波量は著しく増大する。2~3割堤では、鉛直堤に比較して10倍程度の越波量となる。これを図一12と比較すると、異なった結果が得られているように見えるが、図一12の場合は、のりこう配のみが変化していて、他の条件は同一である。一方、図一13の場合は、同一の $R-H_c$ についてのりこう配による越波量変化を示しているの、波は同一でなく、のりこう配がゆるくなるにつれて、うちあげ高が大きくなる波を用いている。したがって、図一13は纯粹にのりこう配のみの影響を示すものではない。

図一13をみると、のりこう配がゆるくなると、 $n$ が2より小さくなる傾向がみられる。のりこう配がゆるい場合は、堤防より上に飛び出した水量は全部越波すると考えられる。したがって、鉛直堤の場合と同様に、のり面上のその水面がほぼ直線と示されるなら、 $n$ の値はやはり2となり、越波量は堤防上に飛び出す水量に等しくなるはずである。



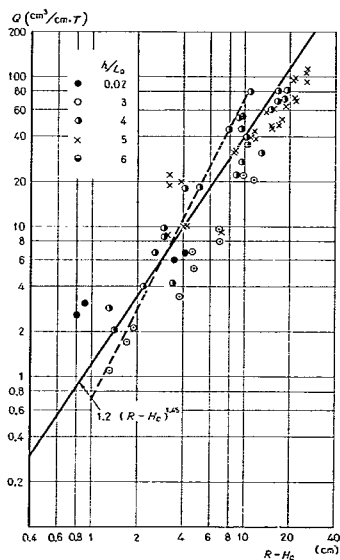
(a) 1 : 0.5

図-13 傾斜堤のうちあげ高と越波量との相関



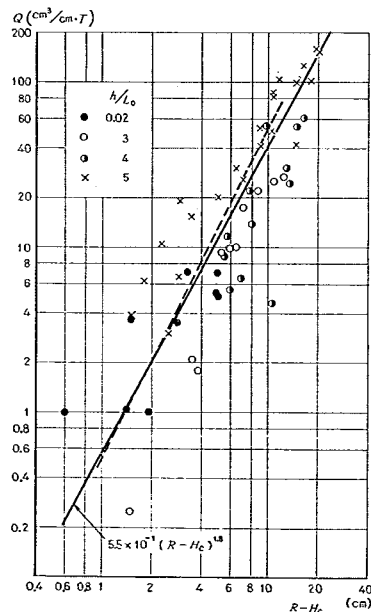
(b) 1 : 1

図-13 傾斜堤のうちあげ高と越波量との相関



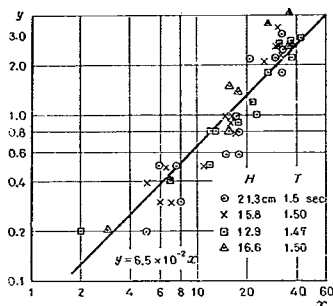
(c) 1 : 2

図-13 傾斜堤のうちあげ高と越波量との相関



(d) 1 : 3

図-13 傾斜堤のうちあげ高と越波量との相関



図一四 2割こう配をそ上する波の水面形

図一四は2割こう配の場合について、のり面上をそ上する水面形を調べたものである。これはのり面上のある位置における水脈の厚さをY、そ上波の頂点からその位置までののり面に沿う距離をXとして各実験値をプロットしたものである。

これによると、 $Y = 50\text{cm}$  程度の範囲では、YとXとの間には近似的に直線関係のあることが認められる。すなわち、

$$Y = m X \quad (4)$$

ここに、 $m = 6.5 \times 10^{-2}$

そこで、越波してもうちあげ高は不変として越波量を計算すると、

$$Q_c = \frac{1}{2} \times \sqrt{5} (R - H_c) \times 65 \times 10^{-2} \times \sqrt{5} (R - H_c) = 0.163 (R - H_c)^2 \quad (5)$$

この式による計算値と実験値とを比較すると、実験値の方が平均して数倍大きいことがわかる。越波する場合、とくに水脈が厚くなるとも考えられないので、越波水脈の長さが $\sqrt{5} (R - H_c)$ より相当に大きくなると推定される。また、nの値が2より小さくなることからみて、水脈の厚さは $(R - H_c)$ に比例するのではなく、のりこう配により $(R - H_c)$ の1/2～1乗に比例するものと考えられる。

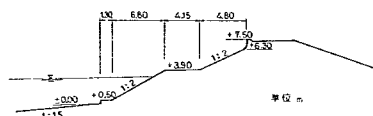
このように、Qと $(R - H_c)$ との関係は鉛直堤の場合に比較して複雑であるが、近似的に(1)式のような関係が成立するものとして、各こう配について $\alpha$ の値を求めると表一四のようになる。なお、図一13(b)～(d)における点線は、 $n=2$ とし、しかも、 $(R - H_c)$ が1～10の間で実験に近くなるように引いたものである。

つぎに、小段を有する複断面堤についてしらべてみる。

図一15は長良川河口左岸の城南海岸堤防の断面および海底の形状を示したものである。堤防はのりこう配2割

表一四 各種傾斜堤の $\alpha$

| のりよう配   | $\alpha$             |
|---------|----------------------|
| 1 : 0.5 | $7.8 \times 10^{-2}$ |
| 1 : 1   | $1.5 \times 10^{-1}$ |
| 1 : 2   | 12                   |
| 1 : 3   | $5 \times 10^{-1}$   |

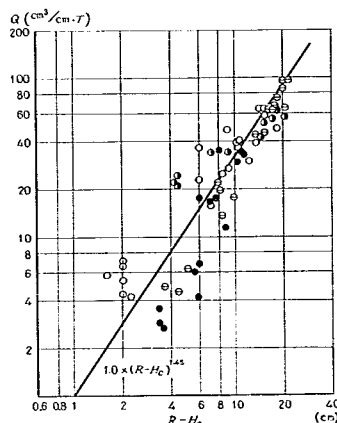


図一15 城南海岸堤防の形状

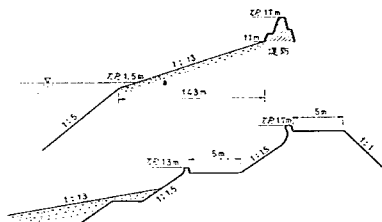
で、天は高T.p.39mの小段を有する。海底こう配はのり先から30m程度までは1/15、それより沖側ではほぼ水平である。

のり先水深は模型(縮尺1/25)で14～24cm、波高は10～19cmなので、波は堤防に達する前に砕けているか、または、堤防上で砕けることになる。このような条件で、越波量と $R - H_c$ との関係調べた結果を図一16に示す。図中の実線から $\alpha$ の値を求めると1.0となる。図一13(c)の場合 $\alpha=12$ なので両者はほぼ一致している。

堤防が汀線より相当に陸側にあり、しかも、越波量が多い例として、駿河湾の吉原海岸の実験結果をしらべてみる。<sup>(6)</sup>海底こう配および堤防の断面などは図一17のとおりである。海底こう配は1/5、海浜こう配1/13で、堤防



図一16 小段をもった堤防のうちあげ高と越波量の関係



図一 17 吉原海岸における海浜こう配および堤防の断面形

と汀線との距離は約 143m である。

吉原海岸では汀線においてこう配が変化するので、鉛直堤に対するうちあげ高の計算には次式を用いる。<sup>10)</sup>

$$R = 1.7 \tan \beta_2 \left\{ \frac{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}{2 \tan \beta_2} (H_0 L_0)^{\frac{1}{2}} - x \right\} \quad (4)$$

ここに、 $\beta_1$  : 汀線より海側の海底こう配が水平面となす角

$\beta_2$  : 汀線より陸側の海浜こう配が水平面となす角

x : 汀線と堤防との距離

実際の堤防ののりこう配は 1:1.5 であるが、汀線付近に設置された場合は、のりこう配によるうちあげ高は小さいようなので、<sup>10)</sup> ここでも、のりこう配による補正はせず鉛直堤の値をそのまま使用する。

うちあげ高と越波量との関係としては、堤防に波返があるもので鉛直堤の結果を使用する。なお、 $\alpha$  の値としては、平均こう配が 1/10 よりやや大きいので 0.1 を採用する。以上のようにして計算した結果と実験値とを比較すると表一 5 のようになる。

この表によると、堤防高 17m の場合は、実験値の方が一般に大きい。これはのりこう配の影響が波返のみでは十分に補なわれていないためであろう。いずれにし

ても、計算値と実験値との差はあまり大きくない。一方、堤防高が 13m の場合は、実験値の方がはるかに大きいので、図一 4 の関係を用いる計算法は有効ではなく、Q と R-Hc との間に上記のような関係が成立していないことになる。

堤防を設置した場合の地盤高上のうちあげ高 (R') と波頂高 ( $\eta$ , 水脈の厚さ) との比は、(4) 式では 1.89 になっているので、R' から  $\eta$  を求めて、堤高 (Hc') と比較した結果を表一 6 に示す。

この表をみると、堤防高が 17m の場合は、Hc' より  $\eta$  の方が小さいか、または、多少大きい程度である。一方、堤防高が 13m の場合は、Hc' よりいずれも  $\eta$  が相対的に大きいことがわかる。したがって、図一 4 のような R-Hc と Q との関係は、堤防前面の波頂高が堤防高と同程度以下の場合に成立し、堤防が波浪流にそのままのみとまれるような状態では越波量は著しく大きくなると推定される。

## 2.6 波返の効果

上述のように、傾斜堤の場合は鉛直堤に比して越波量が大きくなるので、堤防の上部に波返を設けて越波量を小さくすることが一般に行なわれている。しかし、伊勢湾台風による災害時には、波返の重量が大きく、しかも大きな波圧を受ける位置にあったため、かえって災害を助長する傾向が認められた。さらに、有風時の効果にも疑問があるので、その効用については疑問視する意見が強かったのであるが、現在でも、その効果については十分検討されぬまま、一般に採用されている状況である。

ここでは、5 分と 1 割堤については、図一 18 に示すような 3 種類の堤防を用いて波返の効果をしらべた。さらに、2 割堤と 3 割堤については、1 割堤のタイプⅢの波返を用いてその効果を検討した。

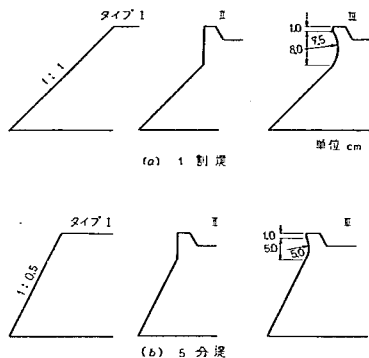
図一 19 は 1 割堤について波返の効果を検討したものである。まず、波形こう配 0.04 の場合についてしらべてみる。相対水深が 0.06 では、波返は

表一 5 吉原海岸堤防の越波量の推定

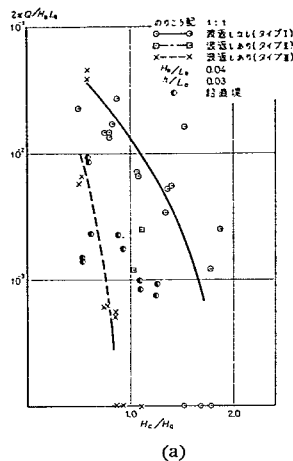
| 実験 No. | $H_0$ | $L_0$ | $H_0/L_0$ | R TP  | Hc  | R-Hc | $Q_{cal.}$ | $Q_{ex.}$ | $\frac{Q_{ex.}}{Q_{cal.}}$ |
|--------|-------|-------|-----------|-------|-----|------|------------|-----------|----------------------------|
| 221    | 17m   | 633m  | 0.027     | 19.3m | 17m | 2.3m | 0.52m/m.T  | 0.37m/m.T | 0.71                       |
| 223    |       |       |           |       | 13  | 6.3  | 29         | 14        | 4.8                        |
| 224    | 20.2  | 655   | 0.031     | 22    | 17  | 5    | 25         | 35        | 1.4                        |
| 226    |       |       |           |       | 13  | 9    | 8.1        | 38        | 4.7                        |
| 227    | 23.7  | 655   | 0.036     | 24.2  | 17  | 7.2  | 52         | 84        | 1.6                        |
| 229    |       |       |           |       | 13  | 11.2 | 125        | 100       | 8                          |
| 255    | 17.4  | 646   | 0.027     | 19.9  | 17  | 2.9  | 0.8        | 1.5       | 1.9                        |
| 257    |       |       |           |       | 13  | 6.9  | 4.8        | 20        | 4.2                        |
| 258    | 20.3  | 649   | 0.031     | 22    | 17  | 5    | 2.5        | 4.3       | 1.7                        |
| 260    |       |       |           |       | 13  | 9    | 8.2        | 70        | 8.5                        |
| 261    | 22.1  | 644   | 0.034     | 22.9  | 17  | 5.9  | 3.8        | 10.1      | 2.7                        |
| 263    |       |       |           |       | 13  | 9.9  | 10         | 100       | 10                         |

表一 6 堤防前面における波頂高

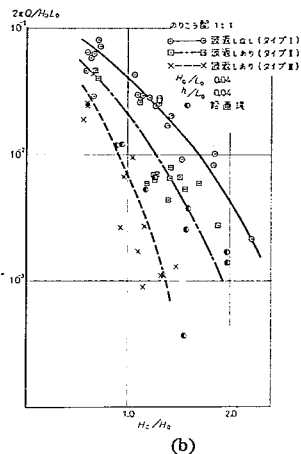
| 実験 No.  | $\eta$ |
|---------|--------|
| 221~223 | 4.4 m  |
| 224~226 | 5.8    |
| 227~229 | 7.0    |
| 255~257 | 4.7    |
| 258~260 | 5.8    |
| 261~263 | 6.3    |



図一18 波返の効果実験に用いた模型堤防



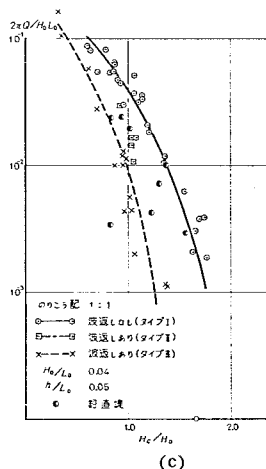
図一19 1割堤における波返の効果



図一19 1割堤における波返の効果

ほとんど効果はないが、0.05 以下では越波量かなり小さくなる事が認められる。タイプ II と III とでは、やはり III の方が効果的で、曲線部により波が沖の方に返される効果のあることが認められる。

図中には同条件の鉛直堤の越波量がプロットされている。相対水深が 0.03 の場合は、タイプ III の越波量と鉛直堤の越波量とはほぼ一致しているが、0.04 になると後者がやや大きくなる。さらに、0.05 では、鉛直堤の越波量は波返のない場合に近くなる。これは、図一11 から明らかなように、越波量が最大となる水理条件が鉛直堤の場合

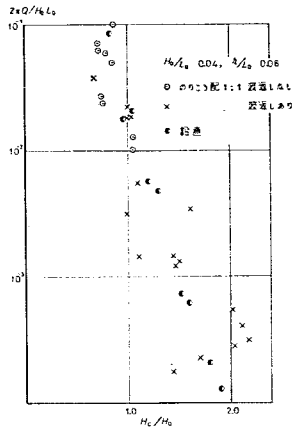


図一19 1割堤における波返の効果

と傾斜堤の場合とで異なるためである。相対水深がさらに大きくなって、部分重複波領域になると、越波量は堤防の形状に無関係となっている。

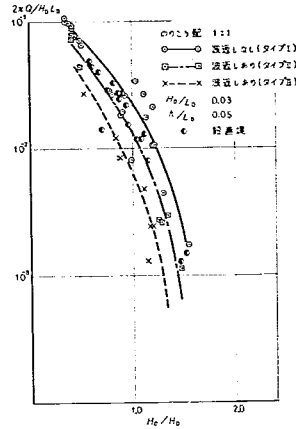
つぎに、波形こう配が 0.03 の場合であるが、部分重複波の領域において、波返の効果が若干認められることを除いては 0.04 の場合と同傾向にある。

波形こう配が 0.05 の場合についてもほぼ同様であるが設置水深が小さい場合でも、鉛直堤の越波量はタイプ III の越波量よりやや大きいこと、相対水深が 0.06 のときに鉛直堤の越波量がとくに大きくなっていることなどの点



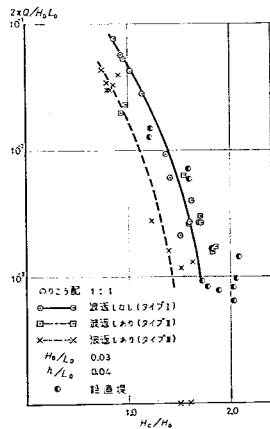
(d)

図一 19 1割堤における波返の効果



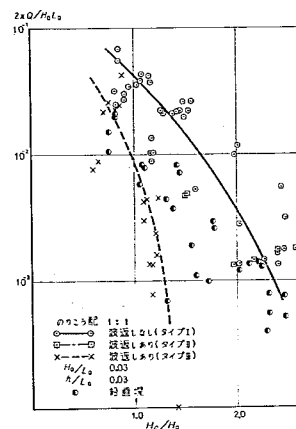
(e)

図一 19 1割堤における波返の効果



(f)

図一 19 1割堤における波返の効果



(g)

図一 19 1割堤における波返の効果

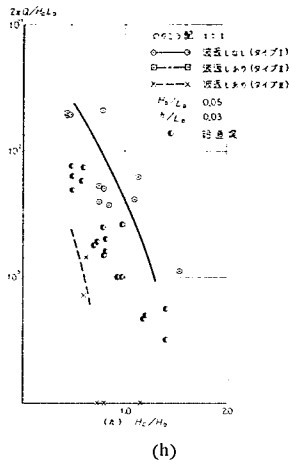
で若干の差がみられる。

つぎに、図一 20 は 5 分堤の実験結果を示したものである。5 分堤の場合は図一 18 からわかるように、1 割堤に比して波返が小さい。したがって、タイプ I とタイプ III の間に明確な差はみられるが、1 割堤に比してその差は小さい。しかし、1 割堤においてみられた一般的な傾向はほぼ 5 分堤の場合にも成立していることが認められる。

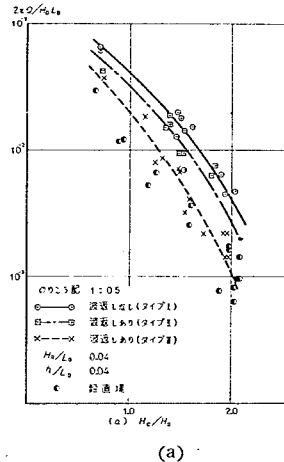
2 割堤については実験ケースは少ないが、波返が効果的に作用していること、鉛直堤の越波量はタイプ II の越

波量に近いことなどが示されている。

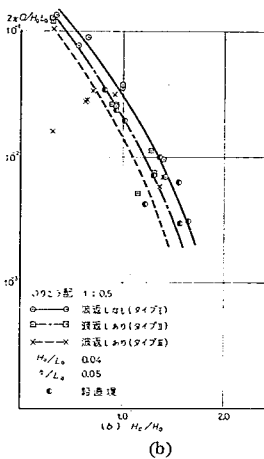
最後に 3 割堤では、相対水深が 0.04 の場合には波返の効果が明瞭に認められず、他のこう配と異なった結果となっている。一方、0.05 の場合には、タイプ I と III との間に明確な差がでているので、0.04 のケースについてもさらによく検討することが必要であるが、他のこう配に比較して波返による越波量の減少度が小さいことは事実のようである。また、相対水深が小さくなると越波量は急激に減少し、鉛直堤の越波量よりも小さくなる。0.04 の場合に、 $H_c/H_0$  が 1 の付近で、3 割堤と鉛直堤との越



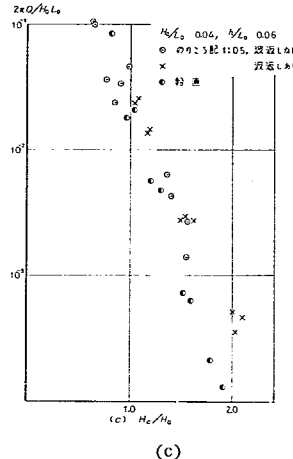
図一 19 1 割堤における波返の効果



図一 20 5 分堤における波返の効果



図一 20 5 分堤における波返の効果



図一 20 5 分堤における波返の効果

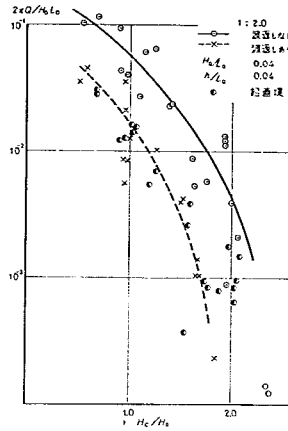
波量が一致しているが、これは、波返の下端と静水面との差が小さく、波返が直立堤のような役割を果しているからである。

以上の結果から、5 分～2 割堤では、設置水深が浅い場合にとくに波返の効果が著しく、越波量は鉛直堤の越波量に近くなるといえよう。しかし、部分重複波を生ずる場合には、2 割堤を除いて、もともと越波量が鉛直堤に比して大きくならないので、効果的とはいえないようである。また、水深が極端に小さくなった場合には、越波状況も異なってくるので、波返の効果の面でも上述の

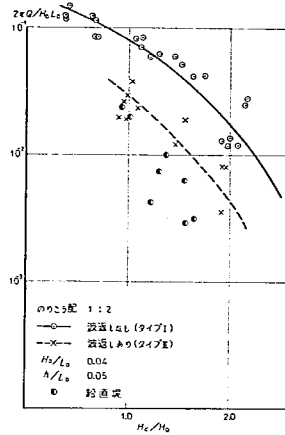
領域のように効果的であるかどうか疑問でありさらに検討を要する。

## 2.7 風の影響

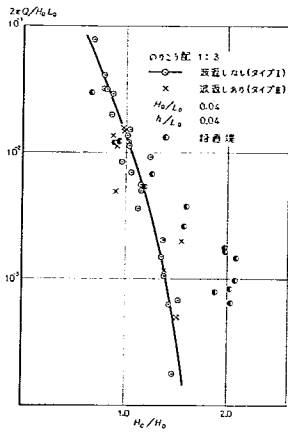
越波量は風の影響を強く受けるので、無風時の越波量のみを測定しても設計に使える資料とはならない。しかし、風を入れた実験を種々のケースについて実施することは非常に時間がかかるので、ここでは、いくつかのケースについて風の影響をしらべ、その結果と無風時の越



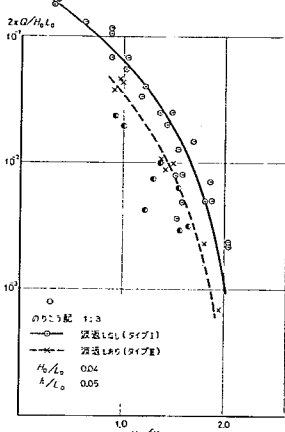
(a)  
図-21 2割堤における波返の効果



(b)  
図-21 2割堤における波返の効果



(a)  
図-22 3割堤における波返の効果



(b)  
図-22 3割堤における波返の効果

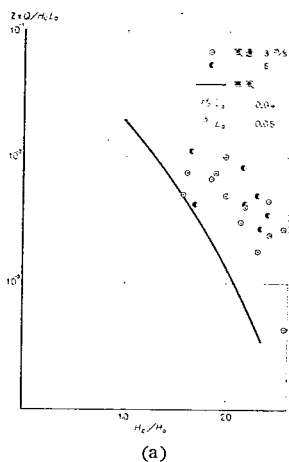
波量との結果を合せて有風時の越波量を推定することにした。

図-23は有風時の鉛直堤の越波量を測定し、無風時の結果と比較したものである。波形こう配は0.04であるが、無風時の越波量との差がもっとも大きいのは相対水深が0.04の場合である。堤防高が高く、無風時の越波量が小さい場合に風による増え方が大きく、有風時の越波量は無風時の10倍以上に達する。相対水深が小さくなるにつれて、風の影響は漸次小さくなり、 $h/L_0$ が0.02の場合には平均して2倍程度、0.01の場合には4～5割程度にす

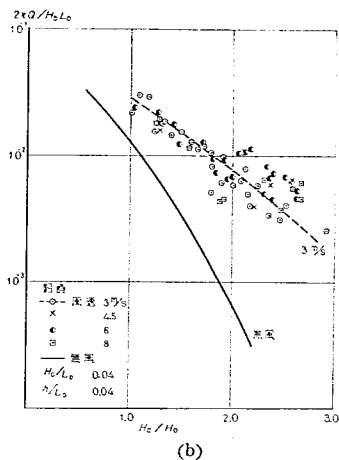
ぎない。また、設置水深が0の場合は図-24のように風の影響はほとんど認められない。

水深が大きくなって0.05になると風の影響は0.04の場合よりやや小さくなる。 $h/L_0$ が0.04の場合にその影響がとくに大きくなるのは、碎波衝撃圧が発生する条件に近いため、水塊が高くうちあげられるからである。水深の小さい場合は、飛沫が高く上るような状況ではなく、越流状態で波がこえるので風の影響も小さいと考えられる。

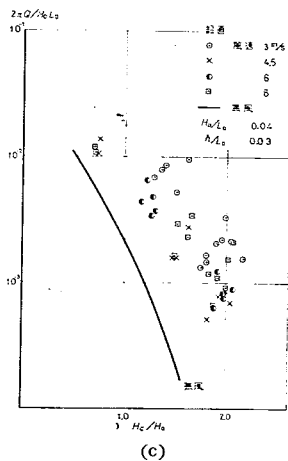
この図でもう一つ注目すべきことは、風速が大きくな



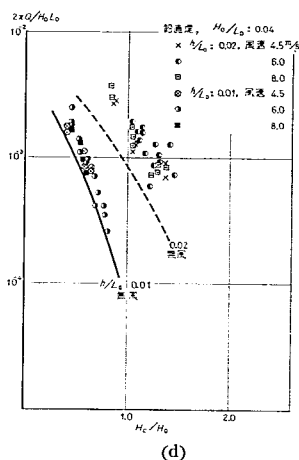
図一 23 有風時の鉛直堤の越波量



図一 23 有風時の鉛直堤の越波量



図一 23 有風時の鉛直堤の越波量



図一 23 有風時の鉛直堤の越波量

っても越波量は増加しないことである。すなわち、堤防上にうちあがった波は、水脈がうすく、半ば飛沫状態であるので、風により容易に堤内に運ばれる。したがって、風速が増加すれば飛散距離は増すが、全越波量は風速の大小にあまり関係しない。

つぎに、傾斜堤の場合についてしらべた結果を図一25に示す。波形こう配は0.04で、 $h/L_0$ が0.04の場合は、5分～1割堤では風速の影響はほとんどなく、また、 $h/L_0$ が0.05の場合は、有風時の越波量は無風時の場合よりやや大きい、全般的に風の影響は小さいと考えてよ

いであろう。

一方、2割堤の場合は有風時の越波量が無風時のものより小さくなっている。また、3割堤の場合も2割堤ほどではないが、やはり有風時の越波量が小さくなる場合がある。しかし、全般的には、0.05～1割堤に比べて有風時の方がやや小さくなるという差はあるが、風の影響はやはり小さいと考えてよいであろう。

前章では、無風時の波返し効果をしらべたが、ここでは、有風時の波返しの効果を検討する。図一26はのりこう配5分の場合である。相対水深が0.04の場合は、波返

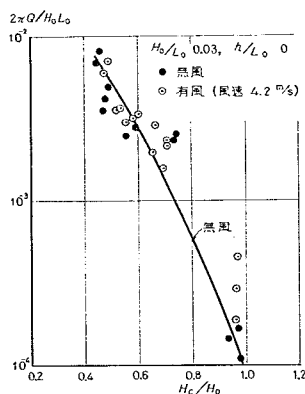
の効果により無風時の越波量は減少するが、 $6\text{ m/s}$  の風により、ほぼ、波返のない場合の越波量に戻る事がわかる。また、この図には、同風速の鉛直堤の越波量が示されているが、堤防高が  $H_c/H_0$  にして2以上の領域を除いてタイプⅢの越波量にはほぼ等しい。

相対水深が0.05の場合も同一傾向であるが、有風時の越波量がやや大きくなっている。さらに水深が深くなると、波返の効果もほとんどないのであるが、風の影響もやはり小さいことがわかる。ただこの場合、鉛直堤の有風時の越波量がかなり大きくなっているのが目につく現

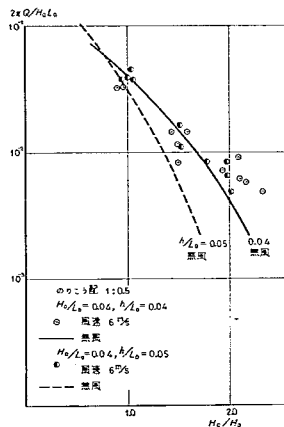
象である。

つぎに、1割こう配の場合であるが、相対水深が0.04と0.05については、5分堤とまったく同傾向である。しかし、0.06の場合は、風の影響がかなりみられ、5分堤の結果とは異なっている。

2割堤の場合もやはり同傾向にあるが、無風で波返のない場合より越波量は小さい。相対水深の大きい場合は、1割堤と同様、堤防高の高い部分で風の影響が大きくでている。3割堤については、相対水深が0.06の1ケースのみであるが、他のこう配とあまり変らない結果となっ

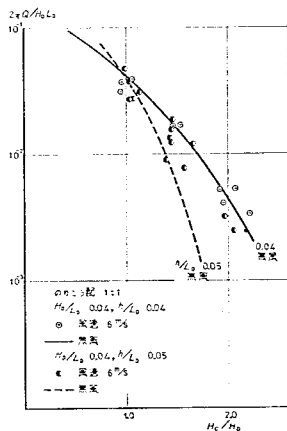


図一 24 有風時の鉛直堤の越波量  
(堤防の設置水深 0)



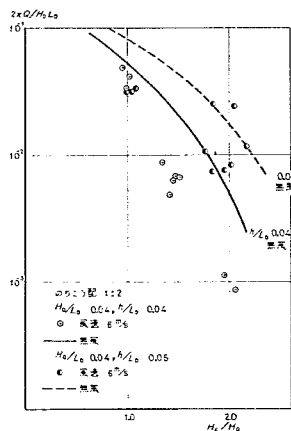
(a) 1:0.5

図一 25 有風時の傾斜堤の越波量



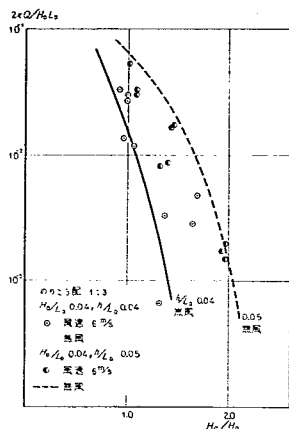
(b) 1:1

図一 25 有風時の傾斜堤の越波量



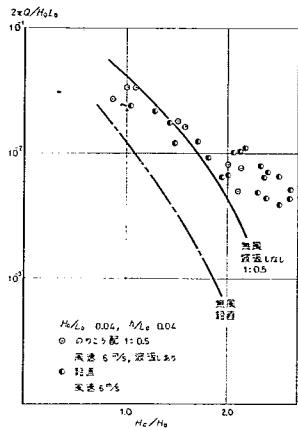
(c) 1:2

図一 25 有風時の傾斜堤の越波量



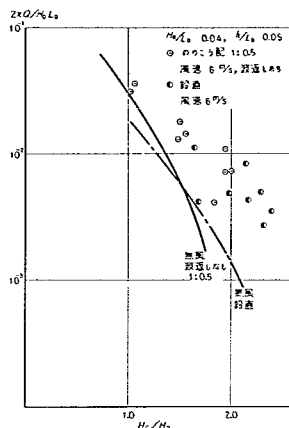
(d) 1:3

図一 25 有風時の傾斜堤の越波量



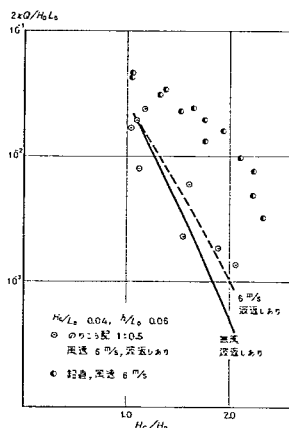
(b)

図一 26 有風時の波返の効果 (1:0.5)



(a)

図一 26 有風時の波返の効果 (1:0.5)



(c)

図一 26 有風時の波返の効果 (1:0.5)

ている。ただ、鉛直堤の有風時の場合より越波量は相当に小さい。

以上は比較的設置水深の大きい場合について検討した結果であるが、図一 24 によると、設置水深が 0 の場合は風の影響がほとんどないので、波返が有風時にも効果的になることが考えられる。図一 30 はのりこう配が 1 割で設置水深が 0 の場合についてこの点を調べたものである。無風時には波返により越波量は 1 オーダー程度小さくなる。一方、有風時にはその効果がうすれて、波返のある場合に比較して、越波量は半分程度に減るのみで

ある。しかし、設置水深の大きい場合に比較すると、波返は有効であるということができよう。また、先に指摘したように、波返のない場合の越波量は風の影響はなく、無風時にも有風時もほぼ等しい。

上述の結果を通観すると、砕波領域に設置された傾斜堤に波返を設けると、一般に無風時の越波量は著しく減少する。しかし、風の影響が加わるとその効果はほとんど失われる。ただし、設置水深の小さい場合は若干の効果が認められる。波返をもった堤防の有風時の越波量は無風時の波返のない堤防の越波量とほぼ等しくなる。こ

の場合、両者の一致の状況は1割以下と2割以上では若干の差がある。さらに、この越波量は鉛直堤の有風時の越波量にかなり近い値である。したがって、砕波領域における波返をもった傾斜堤の越波量は、無風時の波返のない堤防の越波量か、または、有風時の鉛直堤の越波量により代表させてもよいように思われる。

部分重複波の領域では、タイプⅢの有風時の越波量がタイプⅠの無風時の越波量より大きく、また、鉛直堤の有風時の越波量とも異なるので、上述のような便法をとることはできない。さらによく一般的な特性を検討すべ

きである。

上述のことから、越波量に対する風の定性的な影響について概略つかむことができたと考えられる。実際の設計に際しては、越波量を定量的に把握することが必要となる。有風時については、図-3に相当する資料がないので、これに代る資料として、砕波帯中の傾斜堤については図-13の傾斜堤の越波量とR-Heとの関係を利用することが考えられる。

もう一つの方法としては、鉛直堤の有風時の越波量を図-4の形式で整理し、無風時の結果と比較すると有用

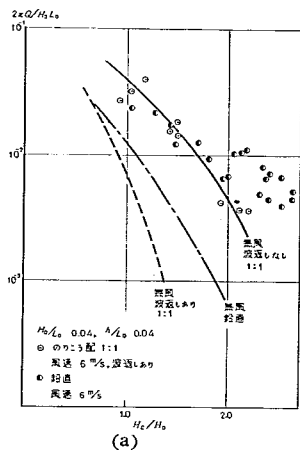


図-27 有風時の波返の効果 (1:1)

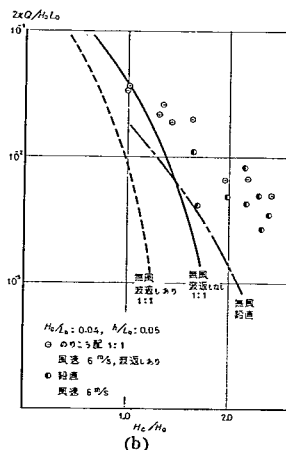


図-27 有風時の波返の効果 (1:1)

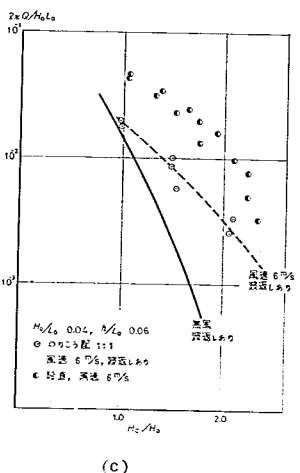


図-27 有風時の波返の効果 (1:1)

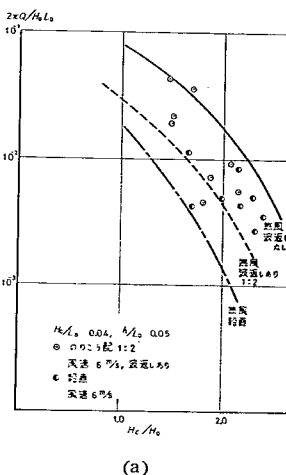
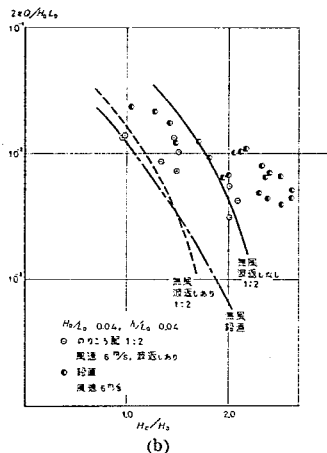
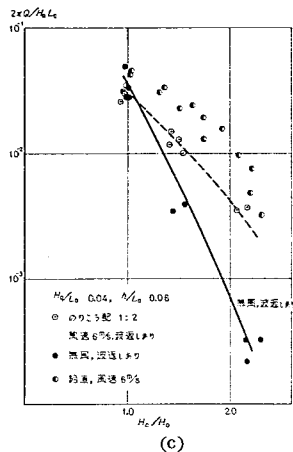


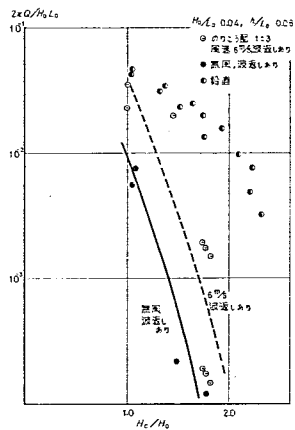
図-28 有風時の波返の効果 (1:2)



図一 28 有風時の波返しの効果 (1:2)



図一 28 有風時の波返しの効果 (1:2)

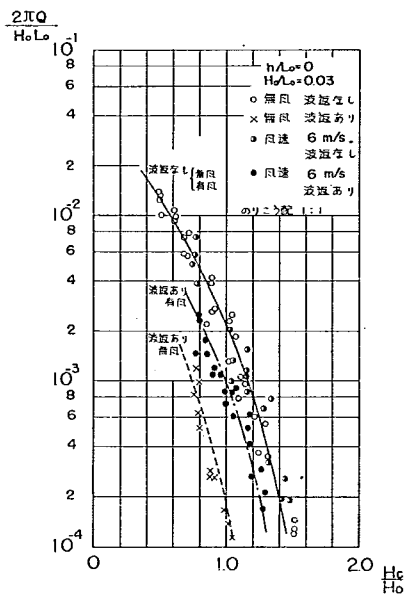


図一 29 有風時の波返しの効果 (1:3)

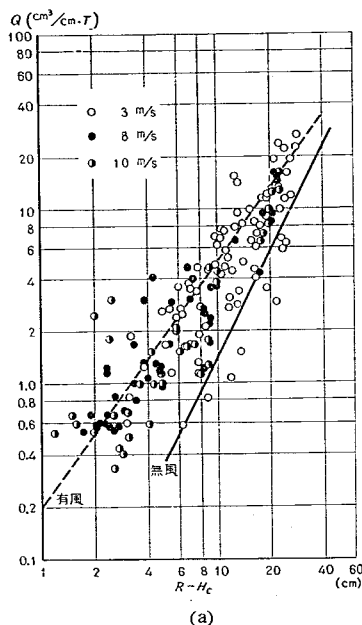
な資料が得られると思われる。

この結果を図一 31 に示す。これを見ると、越波量の小さいほど風の影響が大きいが、とくに、風速 6 m/s の場合で  $H_0/L_0 = 0.04$ ,  $h/L_0 = 0.04$ ,  $R - H_c < 8 \text{ cm}$  の条件においてこの傾向が著しい。風速 6 m/s の場合にのみとくにこのような現象が顕著になる原因ははっきりつかめないが、波が風により多少変化し、丁度、大きな衝撃圧が発生しやすい条件と一致するためであろうと考えられる。

図一 23 によれば、風の影響は相対水深により異なり、



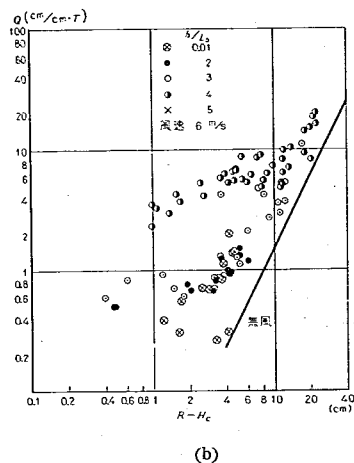
図一 30 有風時の波返しの効果  
(設置水深の小さい場合)



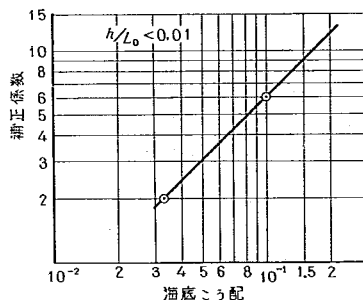
図一31 有風時におけるうちあげ高と越波量の相関

碎波衝撃圧を生ずる場合にもっと大きく、それよりやや深い場合、浅い場合がこれにつき、さらに設置水深が小さくなるとその影響は減少する。一方、 $R-H_c$  と  $Q$  との関係を見ると、同一の  $R-H_c$  に対し、碎波衝撃圧が生ずる場合は  $Q$  が最小で、これよりやや深い場合と浅い場合は  $\alpha$  が 0.015、さらに設置水深が浅くなると  $\alpha$  の値は大きくなる。図一31では  $h/L_0$  は 0.05~0.01 の範囲にわたっているが、風の影響と相対水深の影響とが上述のように丁度逆になるので、風の影響が相対水深により異なるにもかかわらず、図一31にこの影響がはっきりあらわれず、比較的うすれているのはこのためである。図一31(b)の場合は、風の影響がとくに大きく、有風時の平均的な値からはなれた結果となっている。

図一31(a)は、 $Q$  が  $(R-H_c)^2$  に比例せず、上述のような特殊現象もあるので、有風時と無風時との越波量の比を定量的におさえるのには満足すべきものではないが、特殊現象が起るような領域を無視すれば、波形こう配、相対水深などに無関係に使用できるので、碎波帯中に設置された堤防の有風時の越波量をおおよそ推定するのに有用である。



図一31 有風時におけるうちあげ高と越波量の相関



図一32 海底こう配による越波量の補正

## 2.8 結 論

以上、種々の場合について海岸堤防の越波量を実験的にしらべ、その特性を明らかにすることができたと考えられる。得られた主な成果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 1/30 海底こう配上の無風時の鉛直堤の越波量は図一3で与えられる。碎波点付近に堤防を設置した場合に越波量は最大となる。
- (2) 海底こう配が急なほど越波量は大きい。とくに、碎波領域においてその差が著しい。さらに、最大越波量を生ずる水深は海底こう配が急になるほど浅く

なる傾向がある。

- (3) 砕波領域中の鉛直堤防の無風時の単位幅当り、1波当りの越波量は次式で与えられる。

$$Q = \alpha (R - H_c)^2 \quad (1)$$

ここに、 $\alpha$ ：常数、一般に0.015であるが、砕波衝撃圧が作用する場合にはその値は小さくなり、また、相対水深が0.01以下になると大きくなる。後者の場合、その程度は海底こう配が急なほど大きい。

- (4) 重複波領域中における鉛直堤の無風時の単位幅当り、1波当りの越波量は次式で与えられる。

$$Q = \beta A \quad (3)$$

ここに、 $\beta$ ：常数、一般に0.08、 $A$ ：堤防上にうちあがる水量（図-9参照）

- (5) 越波量が最大となるのりこう配は水理条件により異なるが、設置水深の小さい場合は5分～1割程度、設置水深の大きい場合は2割程度となる。

- (6) 波返は無風時には効果的であるが、有風時にはほとんど効果はない。ただし、設置水深の小さい場合には若干の効果が期待される。

- (7) 鉛直堤の越波量は一般に有風時に著しく増加するが換型風速が3 m/s以上になると、それ以上は増加せず飛散距離が大きくなるのみである。風の影響の補正には図-31(a)を用いる。

- (8) 風の影響は設置水深が浅くなるほど小さくなり、 $h/L_0$ が0の場合は、有風時も無風時も越波量にほとんど差はない。

- (9) 傾斜堤の越波量に対する風の影響は小さく、無風時の越波量で有風時の越波量を代表させてよいと思われる。

- (10) 波返をもった傾斜堤の有風時の越波量は、鉛直堤の有風時の越波量か、または、波返のない傾斜堤の無風時の越波量で代用させてもよいと思われる。以上の結果を参照して、砕波帯中に設置された堤防の越波量の算定法をまとめてみると、つぎのようになる。

- (1) 鉛直堤の無風時の越波量を次式より求める。

$$Q = \alpha (R - H_c)^2 \quad (1)$$

ここに、 $\alpha = 0.015$

- (2)  $h/L_0$ が0.01より小さくなると、越波量は(1)式による値より大きくなるので補正が必要である。補正量は海底こう配により異なるので、ここでは、実験結果を参照してつくった図-32から $\alpha$ を求めることにする。

この場合、 $H_0/L_0 > 0.02$  の範囲では、 $h/L_0 < 0.01$  で図-32を用いるが、 $H_0/L_0 < 0.02$  では、 $h/H_0 < 0.5$  の条件で図-32を用いることにする。

- (3) 風による補正には図-31(a)を使用する。この場合、 $h/L_0 = 0.01$  では、越波量は無風時の2割増、 $h/L_0$ が0の場合は補正しない。

この方法を用いた越波量の計算は第5章において示すことにする。

今後の問題点として、波の不規則性の影響が残されている。さらに、現地との対比がなお不十分なので、できるだけ現地観測を実施してその相似性を確かめてみる必要がある。

## 参 考 文 献

- (1) 石原藤次郎、岩垣雄一、三井宏：海岸堤防の越波防止効果について、第4回海岸工学講演会講演集 昭32
- (2) 岩垣雄一、島 昭、井上雅夫：波高と潮位が越波と波のうちあげ高におよぼす影響、第11回海岸工学講演会講演集 昭39
- (3) 岩垣雄一、土屋義人、井上雅夫：海岸堤防の越波に及ぼす風の影響に関する研究(1)、(2)、京都大学防災研究所年報(8)、(9) 昭40～41
- (4) 合田良美、竹田英章：不規則波に対する護岸の期待越波流量について、第15回海岸工学講演会講演集 昭43
- (5) 高田彰：海岸堤防の越波の飛散分布について、第15回海岸工学講演会講演集 昭43
- (6) 富永正照、橋本宏、中村隆：吉原海岸模型実験報告書、土木研究所資料 No 360, No 369 昭42～43
- (7) 岩崎敏夫、沼田淳：消波工の越波防止効果に関する一実験、第14回海岸工学講演会講演集 昭42
- (8) 豊島修、富永正照、橋本宏：海岸堤防に関する研究(8)一波のうちあげ高一土木研究所報告 131号 昭42
- (9) Tadibakhsh, I. and Keller, J.B.: Standing surface waves of finite amplitude, Jour. Fluid Mech., Vol. 8, 1960
- (10) 富永正照、九津見生哲：海岸堤防に関する研究(10)、波圧、土木研究所報告 No 142 昭46
- (11) Shore protection, planning and design, P. 186. 1966. U.S. Army

## 第3章 波 圧

### 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3.1 序 説 .....                  | 27 |
| 3.2 模型実験による波圧の測定 .....         | 27 |
| (1) 実験装置および実験方法 .....          | 27 |
| (2) 鉛直堤に作用する波圧 .....           | 31 |
| (3) 傾斜堤の最大波圧と波圧分布 .....        | 34 |
| (4) 海底こう配の影響 .....             | 40 |
| 3.3 砕波衝撃圧 .....                | 40 |
| (1) 砕波衝撃圧の特性 .....             | 40 |
| (2) 壁体が移動する場合の砕波衝撃圧の変化 .....   | 46 |
| (3) 砕波衝撃圧の発生機構 .....           | 48 |
| (4) 消波工による砕波衝撃圧の減殺効果 .....     | 50 |
| 3.4 砕 波 圧 .....                | 51 |
| (1) 鉛 直 堤 .....                | 51 |
| (2) 傾 斜 堤 .....                | 58 |
| 3.5 波圧により表のり被覆中に生じる応力の検討 ..... | 61 |
| (1) 静 荷 重 .....                | 61 |
| (2) 動 荷 重 .....                | 63 |
| 3.6 結 論 .....                  | 66 |

## 第3章 波 圧

### 3.1 序 説

海岸堤防の構造設計を行なうためには、おもな外力である波圧について十分に知る必要がある。過去の高潮災害においては、表のり被覆が空石張りか薄いコンクリート張りであったため、表のりが破壊される例がしばしばみられた。このような災害を防止するため、表のりをコンクリート、アスファルトなどで強固に被覆し、さらに、波圧の大きい場合は、消波工を設置するようになったので、波圧による直接的な災害はかなり減少したように考えられる。

しかし、このような設計も大部分は経験的なもので、波圧の大きさ、堤防の構造などをよく吟味してなされたものではない。したがって、必ずしも経済的設計でない場合もあろうし、また、危険な設計になっていることも考えられる。

海岸堤防は通常堤体を土砂でつくり、それをコンクリート、アスファルトなどで被覆した形式のものが多い。したがって、波圧を吸収する機構も単純なものではないと推定されるが、外力としての波圧について十分に調べるのみでなく、波圧に対し安全であり、かつ、経済的な構造設計法を確立することが重要である。

波圧は堤防の設置水深と波高との関係により、重複波圧と碎波圧とにわけて取り扱われる。重複波圧については、理論的にはほぼ解明されており、その結果は実験値にもよく適合するのであまり問題はない。一方碎波圧は碎

波現象を含むので、一般に理論的取り扱いが困難であり、これまでも主として実験的な研究がなされてきた。特に、碎波衝撃圧の問題は、港湾の防波堤の設計において非常に重要なので、かなり以前から多くの人々により研究が進められ、その機構も次第に明らかになりつつある。

海岸堤防は通常比較的水深の浅いところ、または、汀線より陸側につくられることが多いので、波は砕けてから堤防に衝突する。このような場合に作用する碎波圧については、これまでに若干の研究が行なわれ、算定公式が発表されているが、なお、適用条件が限られているように思われる。

この研究では、堤防の構造設計に資するため、波圧について広範な実験を行なった。特に、碎波衝撃圧と碎波圧については詳細な検討を行ない、衝撃圧の特性を明らかにするとともに、碎波圧については、実験式を求めて、与えられた条件に対して容易に波圧が計算できるようにした。また、表のり被覆を簡単なモデルにおきかえ、波圧により被覆中に生じる応力についても検討した。

### 3.2 模型実験による波圧の測定

#### 〔1〕 実験装置および実験方法

##### (1) 水 路

実験は、土木研究所赤羽支所内にある屋内中型造波水路と、屋外大型造波水路の二本の水路で行なわれた。これらの水路の概略を図-1に示す。また、その諸元は次の

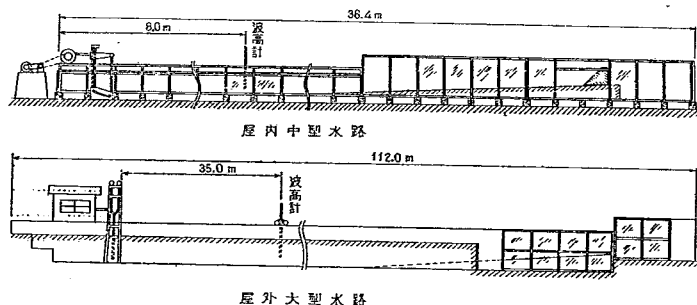


図-1 造 波 水 路

とおりである。

#### 屋内中型造波水路

水 路：長さ 36.4m 幅 0.6m 深さ 1.5m (水深 0.6~0.8) の鋼鉄の水路で、観測部は両面ガラス張りである。

造波板：ユニバーサルタイプの造波板である。波高はこの造波板の振幅と振幅角度を変えることによって任意に得られる。

電動機：造波板に接続している電動機は、安川電機製可変速 V S モーターで、容量は 3.7kw であ

る。この電動機は、出力主軸の回転数を変えることが可能で、周期はこの回転数を変えることによって連続的に得られる。

#### 屋外大型造波水路

水路：長さ 112m 幅 1.5m 深さ 2.5m (水深 1.4~1.7m) のコンクリート製の水路で、観測部は片面ガラス張りである。

造波板：ベンジュラム型の造波板である。波高はこの造波板の振幅を変えることによって任意に得られる。

電動機：屋内中型造波水路に用いられているものと同機種で、容量は 20kw である。

#### (2) 模 型

上記の水路の一端の観測部に模型を配し、他端の造波板で起波した波をあて、堤防のり面に作用する波圧、変位、加速度などを測定した。模型の材質は、水路の大きさや堤防のり面こう配によって異なる。中型水路で用いた模型は海床・堤防とも木製である。大型水路で用いた模型は、海床と鉛直堤はモルタル製で、5分、1割、2割の堤防は木製である。

なお、中型水路では、堤防のり面に作用する波圧とともに、堤防が移動する場合の波圧を調べたが、これに用いた堤防には、固定堤と移動堤の二種類あるが、いずれもモルタル製である。

これら一連の模型の概略を示すと、図-2、3および写真-1のようになる。

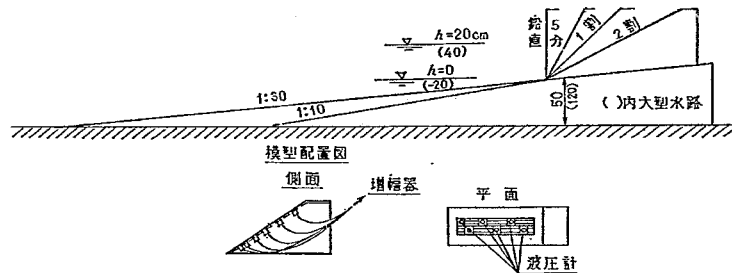


図-2 堤防のり面に作用する波圧の測定模型

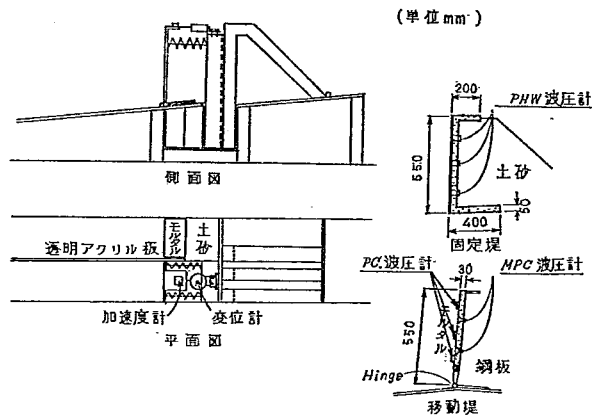
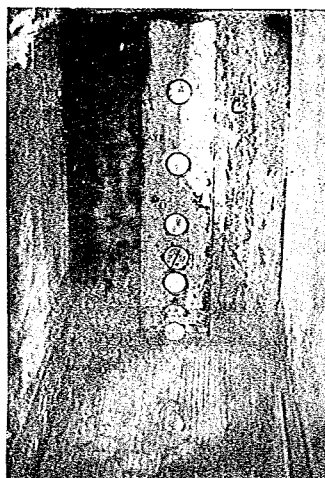


図-3 堤防が移動する場合の波圧変化の測定模型

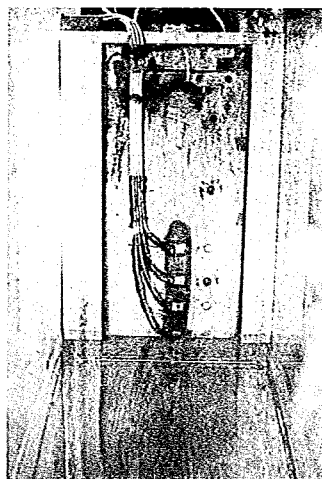
波圧計は、これらの図や写真からも明らかなように、木製の堤防では100×100×10mmの鋼板に波圧計をねじ込み、この鋼板を堤防のり面と同一面になるように取り

付けた。

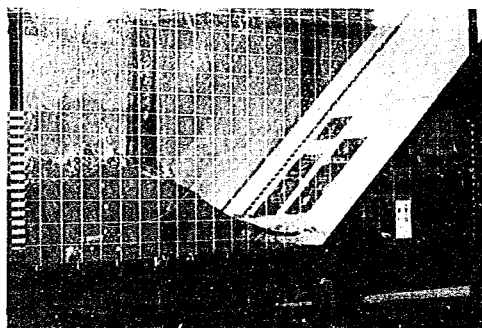
モルタル製の堤防では、波圧計を所定の位置にねじ込んだ大きな一枚の鋼板(300×550×6)をモルタル中に



(a) 固定堤(鉛直)



(b) 移動堤



(c) 傾斜堤

写真-1 波圧計の取り付け状況

埋め込み波圧計の受圧面と堤防のり面とが同一になるようにした。

堤防の移動と波圧の関係を調べるために用いた固定堤は、図-3に示すように厚さ50mmのモルタルを底版、のり面、天端を三者一体としてうち、モルタル面の背後に土砂を盛り、ビニールシートなどでおおい、越波によって土砂が流出しないようにした。移動堤は、底版とのり面との接続点がヒンヂになっている。このため、のり面の回転はここで吸収される。移動堤の上端は、バネに支えられている場合には、このバネが後方の固定された柱

に結合され、のり面の背後に土砂が盛られた場合には、自由端となり変位計に接している。なお、この場合には堤防のり面が前方に倒れないように、堤防のり面を約5厘のこう配で後方に傾むけてある。

### (3) 測定

測定装置、および測定方法を測定諸量別に列挙すると次のようになる。

波高：ピックアップに抵抗線式波高計を使用し、ピックアップからの入力由市販の増幅器で増幅し、直視式電磁オシログラフに記録した。整

理の対象とした波は、波を起こし始めた波高の小さい数波を除き、しかも、堤防からの反射波のはいらない波高の様な部分である。このうち5波ないし10波を読み取り、これを平均して入射波の波高および周期とした。

波 圧：波圧の測定に用いたピックアップは、ストレンゲージを利用したもの、半導体ゲージを利用したものの二種類があり、それぞれ次に示す特性を持っている。

#### ストレンゲージ型

| 型 名     | 容 量                    | 精 度 | 応答周波数        | 受圧面径 |
|---------|------------------------|-----|--------------|------|
| PW-1kg  | 1000gr/cm <sup>2</sup> | 2 % | 900~1,200c/s | 19mm |
| PHW-5g  | 500 "                  | "   | 600~ 800 "   | "    |
| PW 1g   | 100 "                  | "   | 200~ 300 "   | "    |
| 半導体ゲージ型 |                        |     |              |      |
| MPC 1g  | 300gr/cm <sup>2</sup>  | 2 % | 1000c/s以上    | 5mm  |
| P C 1kg | 1000gr/cm <sup>2</sup> | "   | "            | "    |

これらの波圧計を前述の方法によって堤防のり面に取り付け、この波圧計からの入力波高計と同様の増幅器で増幅し、電磁オシログラフで記録した。波圧を測定した波は、波高を読みとった範囲内で6~7波で、そのうち5波を整理の対象とした。

なお、砕波衝撃圧は非常に周波数の高い現象なので、波圧計から記録計までの一連の測定装置が、どの程度の周波数まで応答できるかは重要な問題である。仕様によると増幅器の発振および増幅応答周波数は、1,000c/s以上だと言われている。砕波衝撃圧の測定に用いたPW1kg PHW 5gの応答周波数は、600c/s以上と思われるので、この一連の測定装置は、電磁オシログラフのガルバノメーターの応答周波数によって決まる。測定に用いたガル

バノメーターの固有振動数は、300c/s、500c/s、1,000c/sであるので、この応答周波数はそれぞれ200c/s、300c/s、600c/sとなる。したがって、この範囲内の現象は十分追従することができる。

加速度：加速度は、ストレンゲージを利用した容量10g(98m/sec<sup>2</sup>)の加速度計を、移動堤先端にはりつけ堤体と一体に運動するようにして測定した。波圧と同一電磁オシログラフに同時記録した。

変 位：変位の測定には、鋼鉄のリングにストレンゲージをはりつけた変位計を用いた。したがって応答周波数は、このリングの固有振動数によって決まる。固有振動数は約90c/sであったので、追従可能なのは60c/s程度であろう。この変位計は、リングを利用していることから一方向の変位のみでなく、リング全体のひずみを測定することになる。そこで、できるだけ一方向の変位を取り出すようにリングにピンを取り付けこのピンの先端を堤防に接続した。

#### (4) 実験条件

実験条件は、堤防のり面に作用する波圧の実験と、堤防の移動と波圧の実験とは、多少異なる。前者では、波高をはば一定に保ち、周期と堤防設置水深を変えて、のり面に作用する波圧を測定した。後者は前者の実験結果から、最も顕著な砕波衝撃圧を生じる条件で、しかも波形こう配0.03の波を選んで実験した。

なお、大型水路の実験に用いた堤防や水理条件は、長さの縮率で、中型水路の2倍である。これらの実験条件は表-1に示すとおりである。各実験条件のもとで同一実験を3回繰り返し測定を行なった。

表-1 実験諸元一覧表

| 実 験 名     | 堤 防 の り 面 に 作 用 す る 波 圧              |                                                |                 | 堤 防 の 移 動 と 波 圧    |
|-----------|--------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|--------------------|
|           | 屋 内 中 型 水 路                          |                                                | 屋 外 大 型 水 路     |                    |
| 水 路       | 屋 内 中 型 水 路                          |                                                | 屋 外 大 型 水 路     | 屋 内 中 型 水 路        |
| 海 床 こ う 配 | 1/10                                 | 1/30                                           | 1/10            | 1/10               |
| 堤 防       | 鉛直堤 5分堤 1割堤 2割堤                      | 鉛直堤 5分堤 1割堤 2割堤                                | 鉛直堤 5分堤 1割堤 2割堤 | 鉛直堤 (5厘)           |
|           | 木 製                                  | バラベット設置堤                                       | 一部モルタル製         | 固定堤および移動堤          |
| 水 理 量     | 1/10 $H_0=15\text{cm}$               | $H_0=30\text{cm}$                              |                 | モルタルないし鋼板製         |
| 波 高       | 1/30 $H_0=13\text{cm}$               |                                                |                 | $H_0=15\text{cm}$  |
| 周 期       | 1/10 $T=1.2, 1.4, 1.8, 2.2\text{se}$ | $T=1.8, 2.25, 3.1\text{ sec}$                  |                 | $T=1.8\text{ sec}$ |
| 堤防設置水深    | 1/30 $T=1.1, 1.3, 1.45, 1.6$         |                                                |                 |                    |
| $H_0/L_0$ | $h=0\sim 20\text{cm}$ 3.0cm pitch    | $h=-20(\text{陸上})\sim 40\text{cm}$ 5.0cm pitch |                 | $h=12.5\text{cm}$  |
| $h/L_0$   | 0.02 0.03 0.04 0.06                  | 0.02 0.04 0.06                                 |                 | 0.03               |
| $h/H_0$   | 0 ~ 0.07                             | -0.02 ~ 0.07                                   |                 | 0.025              |
|           | 0 ~ 1.5                              | 0 ~ 1.3                                        |                 | 0.84               |

## 〔2〕鉛直堤に作用する波圧

### (1) 波の衝突状況と波圧の時間変化

堤防前面の波の形態により、のり面に作用する波圧は著しく変化する。図-4～6は波の衝突状況と波圧の時間変化を示したものである。

図-4は堤防の設置水深が浅く、波が砕けてから堤防に衝突する場合である。砕波後の波は、先端部に空気泡を巻き込んだ段波状の波となって斜面上をそそり堤防に衝

突する。鉛直面上6～7箇所において測定した波圧の時間変化を調べてみると、衝突初期に小さな振動を含みながら次第に大きくなりピークに達する。その大きさは沖波にあまり関係せず、設置水深によってほぼ規定される流速水頭のオーダーである。

$t_1 \sim t_4$ における各時刻の波圧の鉛直分布を 図-4(c)に示す。衝突初期の段階では、波圧は下部に集中し、矩形状をなすが、衝突水脈の上昇とともに上部にも波圧が作

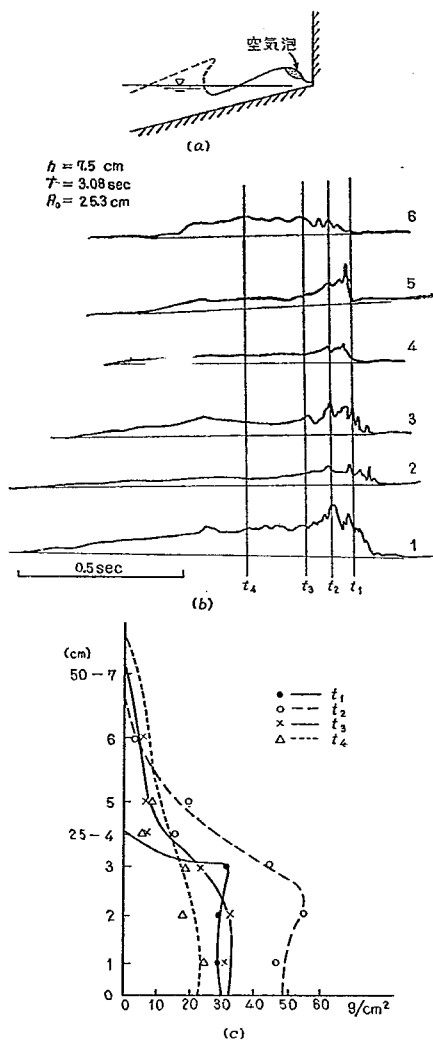


図-4 砕波圧領域における波の衝突状況と波圧の時間変化

用するようになり、全体としては台形状になる。 $t_1 \sim t_3$ の間では、波圧変動はかなり大きい、 $t_3$ 以後ではその変化はゆるやかとなる。波が衝突してから波圧がピークに達するまでの時間は、条件によって多少異なるが、この

例では0.1 secである。波の周期が3.08 secなので、周期との比をとると、0.032でかなり小さな値となっている。

図-5は巻き波形に砕波した波が、波の前面に空気を巻

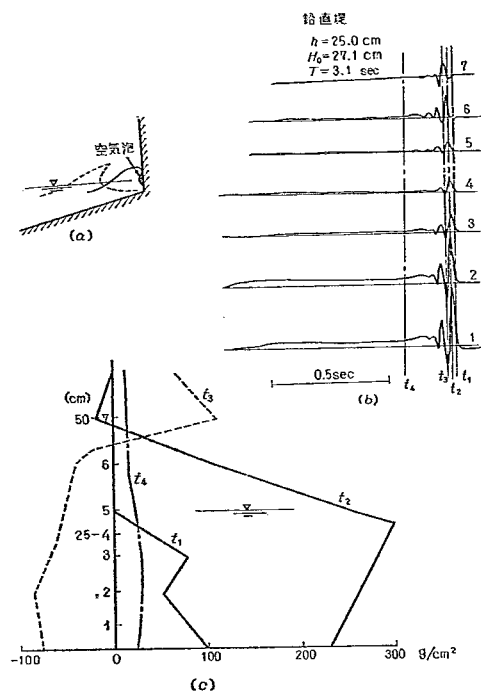


図-5 砕波衝撃圧領域における波の衝突状況と波圧の時間変化

き込むようにしながら堤防に衝突する場合である。衝突初期に作用時間の短い非常に大きな圧力を生じ、高周波の減衰振動をへて一様な圧力となる。この衝突初期にあらわれる圧力を衝撃波圧と呼び、引き続きあらわれる一様に近い圧力を腰掛部波圧と呼ぶ。この衝撃波圧は非常に大きく、波高の数10倍にも達するのが特徴である。またほぼ同一条件で圧力を測定しても、測定値のばらつきは著しく大きい。時間的な変化をみても、この例のように、高周波の減衰振動を生じる場合もあるし、ほとんど振動せずに、腰掛部波圧まで減少する場合もみられる。

各波圧計において得られたピーク値の発生時刻は、No.6とNo.7を除いては一致しているので、かなり広範囲に大きな圧力が作用する。しかも、非常に短時間でこの圧力は急激に減少し、時刻 $t_3$ では、堤体の大部分に陸側からの圧力がかかり、堤体を海側に押し出そうとする。

$t_4$ の場合は腰掛部圧力なので、その値も小さく、また、堤体全体にわたってほぼ一様である。

このような衝撃圧を発生する機構は明らかでないが、衝突する水塊の弾性圧縮力に起因するようである。この点についてはあとでやや詳細に述べることにする。

図-6は堤防の設置水深が大きく、重複波が生じる場合である。前2者に比較すると、波圧変化はなめらかであり、記録上にも小さな変動はほとんどあらわれていない。鉛直分布も静水面付近がややふくらんでいるが、一般的に一様分布に近い。

この場合にも、波形こう配と相対水深とにより、山が一つの単峯形と、山が二つの双峯形に分かれる。一般に波高が小さく、水深が深い場合は前者の形をとり、波高が大きく、水深の浅い場合は後者の形になる。双峯形の場合は、水位が最大のときに波圧がピークにならない。

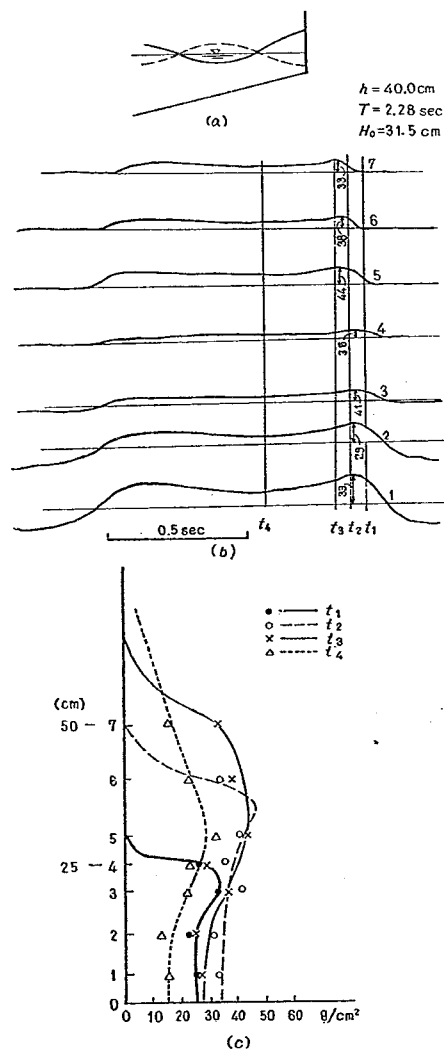


図-6 重複波圧領域における波の衝突状況と波圧の時間変化

その原因は明らかでないが、波形を調和分解して調べると、水深が浅い場合の高周波成分の影響が大きくなり、その位相が基本周波数成分のものと約 $180^\circ$ ずれることに起因するようである<sup>1)</sup>。

## (2) 最大波圧

図-7は堤防ののり面上7箇所にて測定した波圧のうち、最大値と設置水深との関係を波形こう配をパラメーター

として示したものである。完全な重複波領域は除いて、碎波に近い部分重複波領域から、堤防が陸上にある場合までの範囲がとられている。

この図によると、 $h/H_0$ が1.2~1.4程度までは、波圧は重複波圧より多少大きい程度であるが、 $h/H_0$ が1.1~0.6の範囲では衝撃圧が生じ、その最大値は沖波波高の数10倍に達する。 $h/H_0$ が0.5以下になると、波圧は

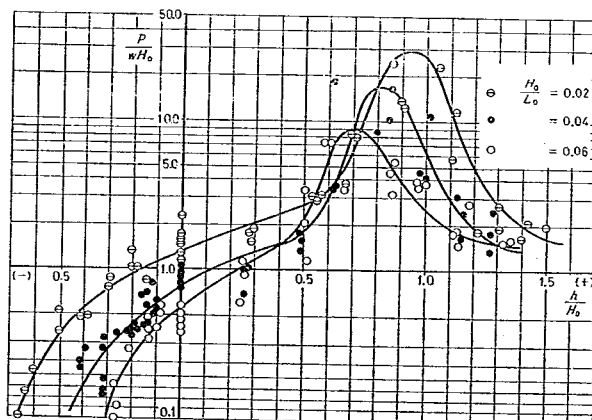


図-7 鉛直堤に作用する波圧

急激に小さくなり、水深が浅くなるにつれて指数関数的に減少する。

一般に、波形こう配が大きいと波圧は小さい。特に、その影響は衝撃圧の部分と、堤防が汀線より陸側にある場合に大きいようである。また、衝撃圧がピークになる水深は波形こう配により変化し、波形こう配が小さい方が大きい。

波形こう配の小さい波は砕波点付近で波高が急激に増大し、巻波となって砕波する。波形こう配の大きい波は波高の増加が小さく、くずれ波型に近い状況となって砕ける。砕波波高と砕波水深との関係は波形こう配にはあまり関係しないので、砕波水深は波形こう配の小さい方が大きい。

波圧のピーク値の大小は、砕波の形態に大きく左右される。巻波型の場合には大きな衝撃圧が作用し、くずれ波に近くなると圧力は小さくなる。波形こう配が0.06の場合も巻波型であるが、その程度が波形こう配0.02の場合に比較してはるかに弱い。

### (3) 鉛直分布

鉛直分布は図-4～6に示したように、一周期間に種々変化する。実用的な見地からは、壁面に沿って積分した波圧が最大値をとる時刻の分布を対象とすればよいと思われる。しかし、同時波圧の最大値を正確に求めることは簡単でなく、また、設計に用いるには過小になることも考えられる。そこで、ここでは、各測点の最大値の分布と同時波圧分布と両者について調べてみる。

図-8は波形こう配0.02の場合について、種々の相対水深に対する波圧分布を調べたものである。 $h/H_0$ が1.45～1.30の場合は重複波型で、静水面付近はややふくらんでいるが、全般的になめらかに変化している。最大波

圧分布と同時波圧分布との差はほとんどない。

$h/H_0$ が1.10～0.70の場合は、いわゆる衝撃圧が発生する。この場合は、よく知られているように、静水面付近の波圧が特に大きく、その上下ではかなり急激に小さくなる三角形分布をなす。最大同時波圧分布と最大波圧分布とを比較すると、水底から静水面付近まではほぼ等しいが、最大同時波圧は静水面より上では急激に小さくなり、最大波圧とかなりの差を生じる。

$h/H_0$ が0.56～0.3の場合は、波は完全に砕けてから堤防に衝突する。図-8(c)からわかるように、静水面付近の波圧と、水面下の波圧の差は比較的小さく、ほぼ一様とみなされる。静水面より上部では波圧は直線的に減少する。したがって、全般的には台形状の分布をなす。

最大同時波圧は最大波圧より全般的にやや小さい。特に、水底部における差が大きいようである。

堤防が汀線より陸側にある場合は、のり先部の波圧が最大となる三角形分布をなす。最大同時波圧はその作用範囲が、最大波圧に比較すると2/3程度となっている。

表-2～3は最大波圧と最大同時波圧を比較したものである。汀線より海側にある鉛直堤の場合、平均的に最大波圧は最大同時波圧より5割程度大きいことがわかる。一方、汀線より陸側にある場合は、両者の差は小さく、平均的に10%程度最大波圧が大きくなっているのみである。この表の中で両者の比が1以下になるケースがみられるが、これは、最大波圧の方は何回かの実験の平均値であり、最大同時波圧はその実験のうちの最大のものをとっているからである。

### 〔3〕傾斜堤の最大波圧と波圧分布

#### (1) 最大波圧

図-9は5分、1割、2割ののり面に作用する最大波圧

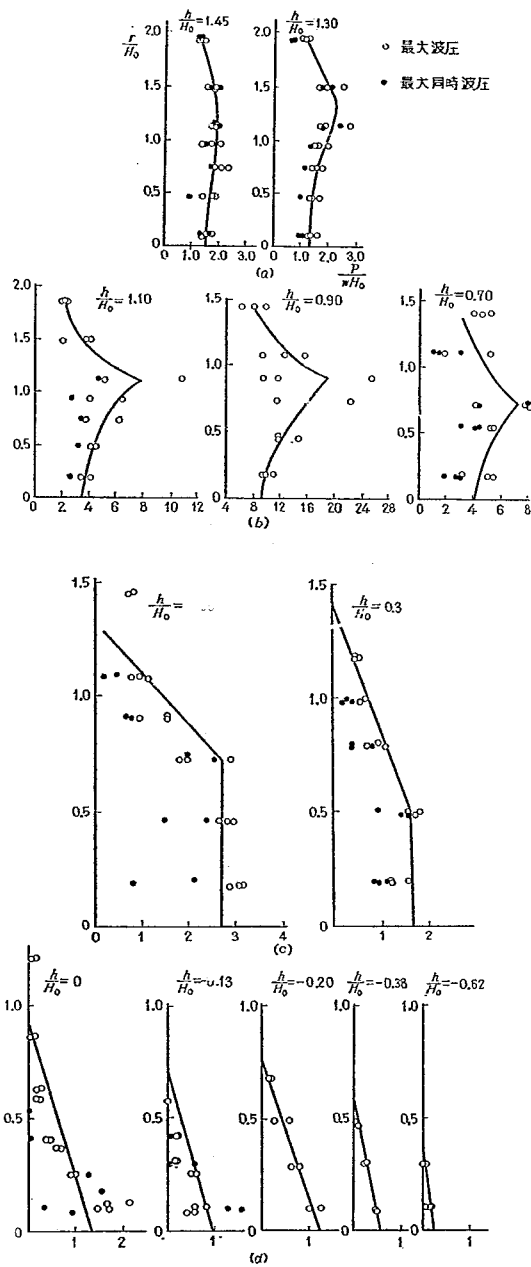


図-8 波 圧 の 鉛 直 分 布

表-2 汀線より海側に設置した堤防に作用する最大波圧と同時波圧の比較（全波圧）

## (a) 鉛 直 堤

| $h$       | $h/H_0$ | $H_0/L_0=0.06$ |             |      | $H_0/L_0=0.04$ |             |      | $H_0/L_0=0.02$ |             |      |
|-----------|---------|----------------|-------------|------|----------------|-------------|------|----------------|-------------|------|
|           |         | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 |
|           |         |                |             | 同時波圧 |                |             | 同時波圧 |                |             | 同時波圧 |
| cm<br>7.5 | 0.25    | g/cm<br>601    | g/cm<br>492 | 1.22 | g/cm<br>854    | g/cm<br>555 | 1.54 | g/cm<br>1185   | g/cm<br>648 | 1.83 |
|           |         | 455            | 383         | 1.19 | 576            | 378         | 1.52 | 1071           | 754         | 1.42 |
|           |         | 560            | 395         | 1.42 | 445            | 344         | 1.29 | 1078           | 658         | 1.64 |
| 15.0      | 0.50    | 2264           | 1530        | 1.48 | 1226           | 922         | 1.33 | 2508           |             |      |
|           |         | 1958           | 1400        | 1.40 | 1119           | 928         | 1.21 | 2193           | 1766        | 1.24 |
|           |         |                |             |      | 1135           | 810         | 1.40 | 2033           | 1131        | 1.80 |
| 20.0      | 0.60    | 5652           |             |      | 3832           | 2595        | 1.48 | 6853           | 3724        | 1.84 |
|           |         | 6981           | 5290        | 1.32 | 8529           | 3495        | 2.44 | 6044           | 2225        | 2.72 |
|           |         | 2991           | 2314        | 1.29 | 5044           | 3283        | 1.54 | 4025           | 2453        | 1.64 |
| 平         | 均       |                |             | 1.33 |                |             | 1.53 |                |             | 1.77 |

## (b) 5 分 堤

| $h$       | $h/H_0$ | $H_0/L_0=0.06$ |             |      | $H_0/L_0=0.04$ |             |      | $H_0/L_0=0.02$ |             |      |
|-----------|---------|----------------|-------------|------|----------------|-------------|------|----------------|-------------|------|
|           |         | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 |
|           |         |                |             | 同時波圧 |                |             | 同時波圧 |                |             | 同時波圧 |
| cm<br>7.5 | 0.25    | g/cm<br>629    | g/cm<br>544 | 1.16 | g/cm<br>492    | g/cm<br>785 | 0.63 | g/cm<br>904    | g/cm<br>578 | 1.56 |
|           |         | 442            | 430         | 1.03 | 609            | 594         | 1.03 | 784            | 697         | 1.12 |
|           |         |                |             |      | 492            | 668         | 0.74 | 1026           | 677         | 1.52 |
| 15.0      | 0.50    | 658            | 682         | 0.96 | 1626           | 826         | 1.97 | 1684           | 815         | 2.07 |
|           |         | 773            | 727         | 1.06 | 1389           | 899         | 1.55 | 2082           | 908         | 2.29 |
|           |         | 630            | 548         | 1.15 | 1161           | 755         | 1.54 | 1969           | 1091        | 1.80 |
| 20.0      | 0.65    | 1673           | 980         | 1.71 | 2410           | 1534        | 1.57 | 2946           | 2276        | 1.29 |
|           |         | 1845           | 927         | 1.99 | 3592           | 2907        | 1.24 | 5029           | 4670        | .08  |
|           |         | 1605           | 1236        | 1.30 | 3831           | 2448        | 1.56 | 4114           | 2726        | 1.51 |
| 25.0      | 0.85    | 3471           | 3643        | 0.95 | 4332           |             |      | 6600           |             |      |
|           |         | 1857           | 1523        | 1.22 | 3590           | 1729        | 2.08 | 5920           | 3624        | 1.63 |
|           |         | 2698           | 2638        | 1.02 | 4431           | 4216        | 1.05 | 5971           | 2506        | 2.38 |
| 30.0      | 1.00    | 2013           | 1362        | 1.48 | 3195           | 2288        | 1.4  | 3537           | 2085        | 1.70 |
|           |         | 1602           | 876         | 1.83 | 3219           | 2287        | 1.41 | 3206           | 2239        | 1.43 |
|           |         | 1709           | 1162        | 1.47 | 4413           | 2440        | 1.81 | 3379           | 2533        | 1.33 |
| 平         | 均       |                |             | 1.31 |                |             | 1.40 |                |             | 1.62 |
| 35.0      | 1.15    | 991            |             |      | 2196           | 1814        | 1.21 |                |             |      |
|           |         | 1148           | 1147        | 1.00 | 2210           | 1101        | 2.01 |                |             |      |
|           |         | 990            | 1047        | 0.95 | 2054           | 1451        | 1.42 |                |             |      |
| 40.0      | 1.35    | 1343           | 823         | 1.63 | 2419           | 2442        | 0.99 |                |             |      |
|           |         | 1389           | 1220        | 1.14 | 4216           | 2610        | 1.62 |                |             |      |
|           |         | 1671           | 1065        | 1.57 | 1859           | 2660        | 0.70 |                |             |      |

(c) 1 割堤

| $h$       | $h/H_0$ | $H_0/L_0=0.06$ |             |      | $H_0/L_0=0.04$ |             |      | $H_0/L_0=0.02$ |             |      |
|-----------|---------|----------------|-------------|------|----------------|-------------|------|----------------|-------------|------|
|           |         | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 | 最大波圧           | 同時波圧        | 最大波圧 |
|           |         |                |             | 同時波圧 |                |             | 同時波圧 |                |             | 同時波圧 |
| cm<br>7.5 | 0.25    | g/cm<br>580    | g/cm<br>390 | 1.49 | g/cm<br>713    | g/cm<br>511 | 1.40 | g/cm<br>701    | g/cm<br>420 | 1.67 |
|           |         | 518            | 368         | 1.41 | 624            | 492         | 1.27 | 686            | 618         | 1.11 |
|           |         | 509            | 354         | 1.44 | 622            | 503         | 1.24 | 981            | 522         | 1.88 |
| 15.0      | 0.50    | 771            | 619         | 1.25 | 2056           | 1165        | 1.76 | 2773           | 2283        | 1.21 |
|           |         | 680            | 584         | 1.16 | 1570           | 714         | 2.20 | 2681           |             |      |
|           |         | 1054           | 1112        | 0.95 | 1691           | 687         | 2.46 | 2353           | 1319        | 1.78 |
| 20.0      | 0.65    | 1973           | 1066        | 1.85 | 2831           | 1718        | 1.65 | 3830           | 1420        | 2.70 |
|           |         | 1911           | 1202        | 1.59 | 3009           | 2209        | 1.36 | 2843           | 1797        | 1.58 |
|           |         | 2008           | 1211        | 1.66 | 3035           | 752         | 4.04 | 2813           | 1783        | 1.58 |
| 25.0      | 0.80    | 2193           | 1448        | 1.51 | 2956           | 1928        | 1.53 | 3639           | 2072        | 1.90 |
|           |         | 1959           | 1089        | 1.80 | 2855           | 2349        | 1.22 | 3895           | 2404        | 1.62 |
|           |         | 2753           | 1790        | 1.54 | 3009           | 2192        | 1.37 | 4176           | 2823        | 1.48 |
| 30.0      | 1.10    | 1800           | 966         | 1.86 | 2872           | 1782        | 1.61 | 3384           | 2189        | 1.55 |
|           |         | 2114           | 1415        | 1.49 | 2028           | 1649        | 1.23 | 3476           | 2362        | 1.47 |
|           |         | 2007           | 1362        | 1.47 | 2434           | 1537        | 1.58 | 2920           | 1840        | 1.59 |
| 平         | 均       | 1.50           |             |      | 1.73           |             |      | 1.65           |             |      |
| 35.0      | 1.15    | 1351           | 890         | 1.52 | 1838           | 1233        | 1.49 | 2090           | 1377        | 1.52 |
|           |         | 1363           | 973         | 1.40 | 1844           | 1269        | 1.45 | 2397           | 2178        | 1.10 |
|           |         | 1437           | 916         | 1.57 | 1892           | 1377        | 1.37 | 2299           | 1995        | 1.15 |
| 40.0      | 1.35    | 1465           | 738         | 1.99 | 1649           | 1372        | 1.20 |                | 1376        |      |
|           |         | 1192           | 571         | 2.09 | 1732           | 1626        | 1.07 |                | 1434        |      |
|           |         |                |             |      | 1631           | 1424        | 1.15 |                |             |      |

を示したものである。表示方法は鉛直堤の場合と同じであるが、 $h/H_0$  は 0.2 より大きな範囲である。

一般的な傾向は鉛直堤の場合とほぼ同じであるが、のりこう配がゆるくなるにつれて、波圧は次第に小さくなる。衝撃的な作用は1割こう配まではなお認められるが、2割こう配になるとほとんど発生しない。

最大波高がピークとなる水深は、1割こう配までは小さくなるが、2割こう配になると逆に大きくなる。しかし、いずれの場合も、波形こう配が大きいほど波高がピークとなる水深は大きく、この点では鉛直堤の場合と同傾向にある。

## (2) 波压分布

図-10は波形こり配0.04の場合について、のり面に沿う波高分布を示したものである。 $h/H_0$ を変化させて、最大同時波高分布と最大波高分布を示した。一般的傾向は鉛直壁の場合に似ており、設置水深の浅い方から、台形、衝撃型波、重撃波型となっている。ただ、鉛直壁の場合には、 $h/H_0=0.3$ では台形分布であるが、傾斜

堤の場合には波圧が広く分布するので、 $h/H_0=0.24\sim 0.25$ でも台形分布と三角形分布の中間的な分布をなしている。

5分と1割の傾斜堤では、衝撃圧型の分布が認められるが、2割の場合はほとんど認められない。

最大波圧分布と最大同時波圧分布との比較も2割こう配の場合を除いて行なっている。(表2参照) これによると、三角形分布に近い場合は両者の差は小さい。しかし、台形の場合は底部で、衝撃圧型の場合は、底部と上部でかなり差がみられる。表2において、5分と1割の場合について両者の合力を比較したが、平均して50%以上最大波圧の力が大きい。

図-11は2割堤に作用する波圧の時間変化を示したものである。これをみると、時刻 $t_4$ においては、上部では正圧が作用しているが、下部では、初期の静水圧以下の波圧となっている。のり面の前後では静水圧はバランスしていると考えられるので、この場合は揚圧力が作用するところとなる。

表-3 汀線より陸側の鉛直堤防に作用する最大波圧と同時波圧の比較(全波圧)

| No.            | a  | $H_0$ | 最大波圧    | 同時波圧    | 最大波圧<br>同時波圧 |
|----------------|----|-------|---------|---------|--------------|
| $H_0/L_0=0.01$ | cm | cm    | g/cm    | g/cm    |              |
| 39-1           | 0  | 13.7  | 227.1   | 188.5   | 1.20         |
| 22-2           | 34 | 18.1  | 106.7   | 105.3   | 1.01         |
| 24-2           | 34 | 11.8  | 57.5    | 68.0    | 0.85         |
| $H_0/L_0=0.02$ |    |       |         |         |              |
| 14-1           | 0  | 30.4  | 570.5   | 405.5   | 1.41         |
| 36-3           | 0  | 14.2  | 142.3   | 112.5   | 1.26         |
| 37-1           | 0  | 24.5  | 86.3    | 76.0    | 1.14         |
| 38-2           | 0  | 19.5  | 381.2   | 325.2   | 1.17         |
| 16-2           | 34 | 29.4  | 430.5   | 371.1   | 1.16         |
| 23-1           | 34 | 24.0  | 100.3   | 198.3   | 0.51         |
| 25-2           | 34 | 15.1  | 28.6    | 27.2    | 1.05         |
| 42-3           | 68 | 22.6  | 119.8   | 125.2   | 0.96         |
| 43-1           | 68 | 13.6  | 45.8    | 39.5    | 1.16         |
| $H_0/L_0=0.03$ |    |       |         |         |              |
| 12-1           | 0  | 33.4  | 449.1   | 299.7   | 1.5          |
| 13-1           | 0  | 37.7  | 470.6   | 397.0   | 1.19         |
| 35-2           | 0  | 19.1  | 283.3   | 327.5   | 0.87         |
| 15-2           | 34 | 34.9  | 307.4   | 371.1   | 0.83         |
| 17-3           | 34 | 39.9  | 514.5   | 550.0   | 0.93         |
| 18-1           | 34 | 44.4  | 516.1   | 412.0   | 1.25         |
| 19-1           | 34 | 50.9  | 419.6   | 445.3   | 0.94         |
| 21-2           | 34 | 48.2  | 540.5   | 507.3   | 1.07         |
| 20-1           | 34 | 46.0  | 639.9   | 604.3   | 1.06         |
| 5-1            | 68 | 31.0  | 190.6   | 249.9   | 0.76         |
| 6-1            | 68 | 34.6  | 222.9   | 149.0   | 1.5          |
| 7-1            | 68 | 37.7  | 226.8   | 262.1   | 0.87         |
| $H_0/L_0=0.04$ |    |       |         |         |              |
| 8-1            | 0  | 43.3  | 732.9   | 1,144.9 | 0.64         |
| 9-2            | 0  | 45.2  | 2,177.3 | 2,387.7 | 0.91         |
| 11-1           | 0  | 51.0  | 791.1   | 397.0   | 1.99         |
| 31-1           | 0  | 24.1  | 194.9   | 200.4   | 0.97         |
| 32-1           | 0  | 27.0  | 344.6   | 194.0   | 1.78         |
| 26-3           | 34 | 28.0  | 171.5   | 159.8   | 1.07         |
| 30-2           | 34 | 23.3  | 137.7   | 176.9   | 0.78         |
| 1-3            | 68 | 49.1  | 185.6   | 139.4   | 1.33         |
| 2-1            | 68 | 51.0  | 120.3   | 85.6    | 1.41         |
| 3-3            | 68 | 43.5  | 195.6   | 179.7   | 1.09         |
| 4-1            | 68 | 47.0  | 232.6   | 196.8   | 1.18         |
| 45-2           | 68 | 26.8  | 243.5   | 44.2    | 5.51         |
| 48-3           | 68 | 21.6  | 50.8    | 52.9    | 0.96         |
| $H_0/L_0=0.05$ |    |       |         |         |              |
| 33-2           | 0  | 32.3  | 141.7   | 125.4   | 1.13         |
| 27-2           | 34 | 34.1  | 136.6   | 167.6   | 0.82         |
| 28-3           | 34 | 37.3  | 159.6   | 186.6   | 0.86         |
| $H_0/L_0=0.06$ |    |       |         |         |              |
| 46-1           | 68 | 33.9  | 121.0   | 124.4   | 0.97         |
| 47-1           | 68 | 36.6  | 211.4   | 197.1   | 1.07         |

a: 汀線から堤防までの距離 (cm)

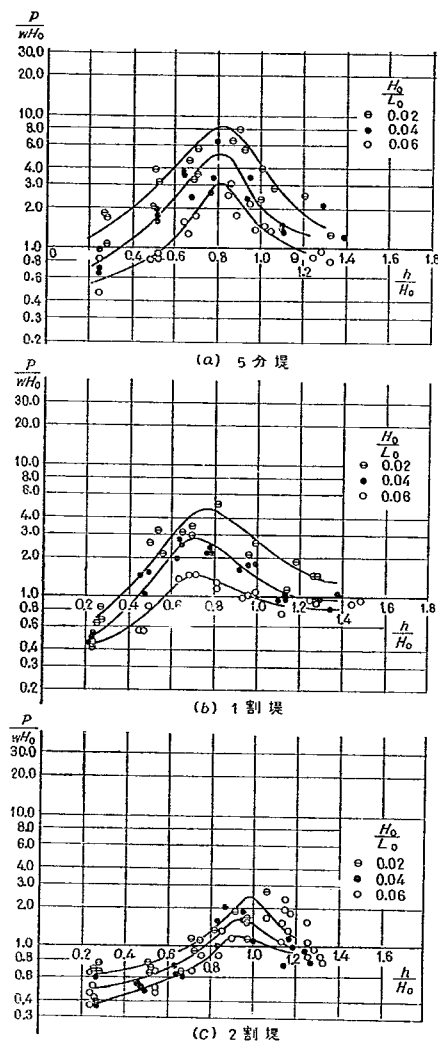


図-9 傾斜堤に作用する波圧

このような場合の同時波圧分布を海底こう配 1/10 と 1/30 の場合について示したものが図-12 である。このような波圧分布の場合、のり面に回転モーメントが作用し、下にずり落ちやすくなるので十分に注意しなければならない。1/10 こう配と 1/30 こう配との場合を比較すると、1/30 こう配の方が小さいのり先が深々このような現象のおきてることがわかる。各ケースにおける揚圧力の合

力とその作用範囲を表-4 に示す。揚圧力が 0 となる位置は当然のことではあるがほぼ静水面と一致している。静水面とのり面との交点を頂点とする仮想的な三角形揚圧力分布を考え、そのときのり先において得られる仮想揚圧力を  $P_0$  とすると、 $P_0$  はほぼ  $1/3wh$  に等しい。のり面と水平面とのなす角を  $\theta$  とすると、 $r = h \sec \theta$  であるから、全揚圧力は  $1/6wh^2 \sec \theta$  で与えられることになる。

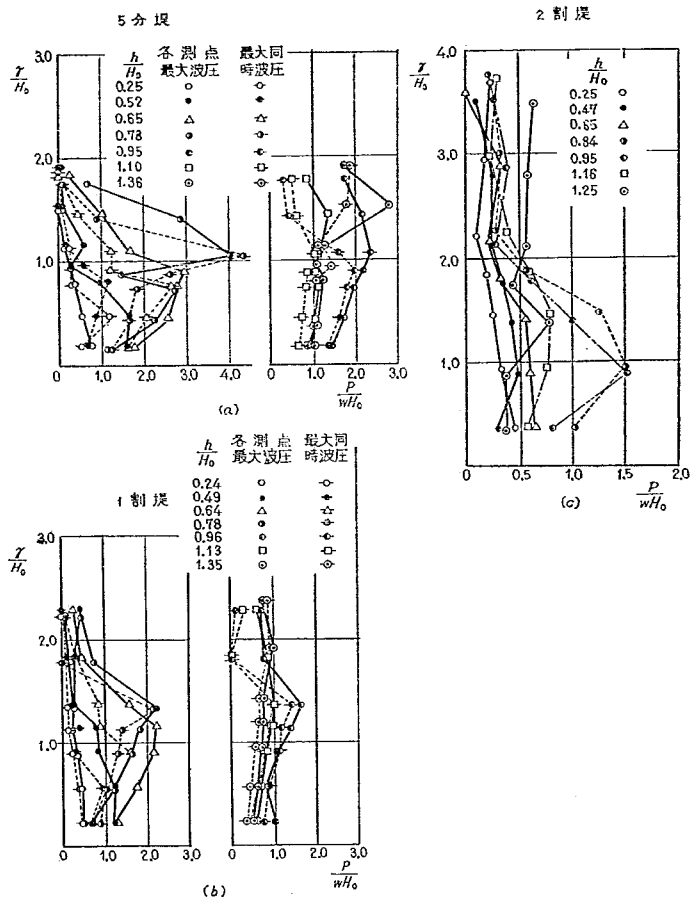


図-10 傾斜堤の波圧分布 (波高こう配0.04)

なお、一般に設置水深が深い場合は揚圧力が作用するが、2割こう配の場合は、上部に水脈が残っていて、のり面に正圧をかけていながら、下部では揚圧力が作用する。これは、実験の範囲内では2割こう配の場合にのみ認められた。傾斜がゆるくなると、このような波圧分布状況は一般に発生するものと思われる。

#### 〔4〕 海底こう配の影響

海底こう配がゆるくなると、のり面に作用する波圧は一般に小さくなる。図-13はこの点を示したもので、海底こう配1/10と1/30の場合について波圧を比較したものである。両者とも中型造波水路で実験した結果なので縮尺の影響のため絶対値は一般に過小である。これは

1/10の場合について、図-7の結果と比較すれば明らかである。したがって、これらの図は1/10と1/30の場合の相対的な差異を示す点においてのみ意味をもっている。

海底こう配の影響が特に顕著なのは、砕波圧および衝撃圧を生じる場合で、重複波圧の場合はあまり著しくないようである。

### 3.3 砕波衝撃圧

#### 〔1〕 砕波衝撃圧の特性

砕波衝撃圧は、砕波直後の波が空気を巻き込むような形で堤防に衝突する領域から砕波波頂が水面に落下するまでの領域に堤防が置かれた場合に生じる。その値の変

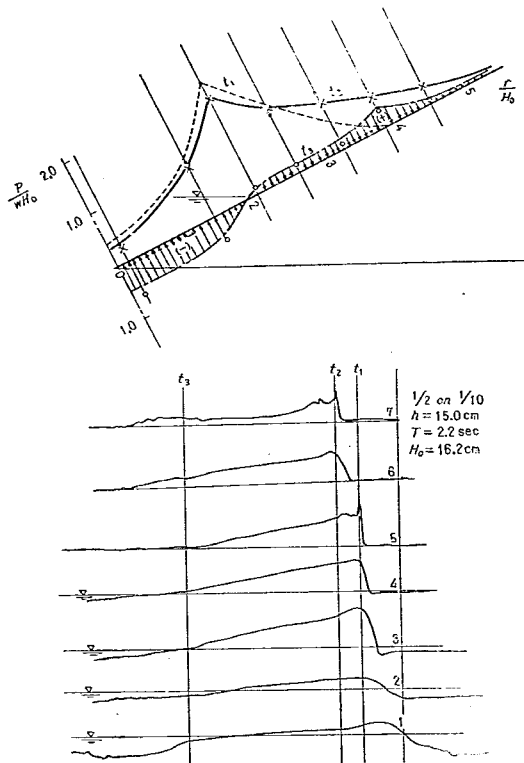


図-11 2割堤に作用する揚圧力

動は非常に大きく、碎波状況、衝突状況、空気の巻き込みの形態などが多少変化してもその値は著しく変わる。

もつとも大きな衝撃圧を生じる設置水深は波形こう配により変化する。図-14は本間・堀川・長谷<sup>(2)</sup>の調べた結果に、この実験結果を加えたものである。全般的な傾向は一致しているが、Rundgrenの1/10 こう配の値よりやや大きくなっている。

図-15は衝撃圧を生じる場合の衝突状況を示したものである。これは16mmのシネカメラにより高速撮影したフィルムからスケッチしたものである。

波形こう配が0.02の場合は、碎波波頂が前方に飛び出し、空気を大きく巻き込んで落下しながら堤防に衝突する。最も大きな衝撃圧を記録したのは、堤防の設置水深が30cm前後なので、②あるいは、その少し前の波形で衝突する場合と推定される。④の波形ではくずれすぎており、極端に大きな衝撃圧は記録されなかった。

波形こう配が大きくなると、巻波形ではあるが、空気

の巻き込みは小さく、下方からの水面上昇が早いため、空気泡は上方に押し上げられ、全体として扁平な形状となる。

衝撃圧の波形には、単発型、減衰振動型などのあることが指摘されている<sup>(3)</sup>。前者は図-16(a)のように、衝撃圧がピークに達したあと、振動なしに腰掛部波圧まで減少するが、後者は数10サイクルの減衰振動を伴いながら腰掛部波圧に移行する。

波形こう配が0.02の場合、減衰振動形が多くみられたが、設置水深が図-15の場合よりやや深くなって、30cm程度のときには単発形もみられるようになった。この水深の場合は圧力が非常に大きく、沖波波高の50倍程度に達した。

波形こう配が0.05の場合は、減衰振動形より単発形の方が多くみられる。光易<sup>(4)</sup>および合田<sup>(5)</sup>は、空気の巻き込みが多いときに減衰振動型が発生し、空気の巻き込みが小さいか、または、不十分なときに、単発型の発生し

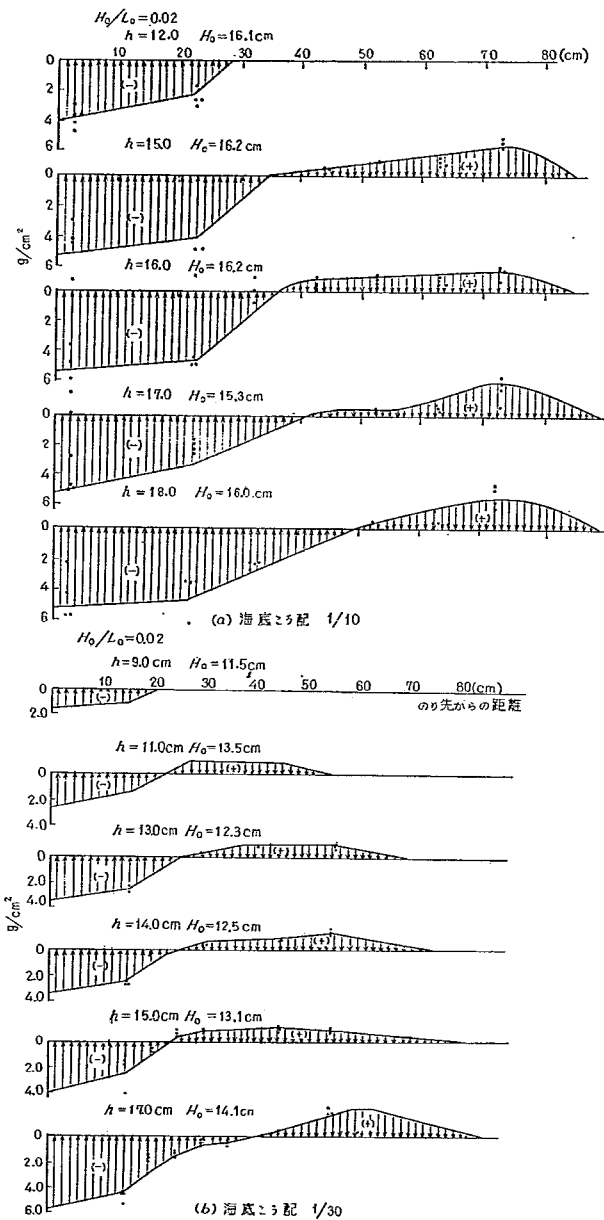


図-12 最大揚圧力を生じるときの波圧分布

表-4 2 割堤に作用する揚圧力

(a) 海底こう配 1/10

| の水深<br>先 $h$ | $H_0/L_0=0.02 (T=2.2 \text{ sec})$ |      |                    |              | $H_0/L_0=0.03 (T=1.8 \text{ sec})$ |      |                    |              | $H_0/L_0=0.04 (T=1.4 \text{ sec})$ |      |                    |              | $H_0/L_0=0.06 (T=1.2 \text{ sec})$ |      |                    |              |
|--------------|------------------------------------|------|--------------------|--------------|------------------------------------|------|--------------------|--------------|------------------------------------|------|--------------------|--------------|------------------------------------|------|--------------------|--------------|
|              | $H_0$                              | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ | $H_0$                              | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ | $H_0$                              | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ | $H_0$                              | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ |
| cm<br>9      | cm                                 | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        | cm                                 | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        | cm                                 | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        | cm                                 | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        |
| 12           | 16.1                               | 27.0 | 5.4                | 72.5         | 16.0                               | 27.0 | 4.4                | 60.0         | 15.2                               | 22.5 | 3.0                | 34.0         | 15.5                               | 17.0 | 3.0                | 25.5         |
| 13           |                                    |      |                    |              |                                    |      |                    |              | 15.9                               | 27.5 | 2.9                | 40.5         | 15.4                               | 27.5 | 3.7                | 51.0         |
| 14           |                                    |      |                    |              | 15.9                               | 31.0 | 5.8                | 90.0         |                                    |      |                    |              |                                    | 30.0 | 6.7                | 99.2         |
| 15           | 16.2                               | 33.0 | 7.1                | 117.5        |                                    |      |                    |              | 16.4                               | 34.0 | 6.2                | 106.0        | 15.1                               | 31.0 | 5.8                | 90.4         |
| 16           | 16.2                               | 37.0 | 7.8                | 145.0        |                                    |      |                    |              | 15.6                               | 34.0 | 5.8                | 98.0         |                                    |      |                    |              |
| 17           | 15.3                               | 39.0 | 6.3                | 122.2        | 14.8                               | 37.0 | 6.5                | 119.7        |                                    |      |                    |              |                                    |      |                    |              |
| 18           | 16.0                               | 48.0 | 5.2                | 173.3        |                                    |      |                    |              |                                    |      |                    |              | 14.9                               | 42.0 | 7.1                | 148.4        |

$$P_0 = \frac{2 \int_0^r p}{r}$$

(b) 海底こう配 1/30

| の水深<br>先 $h$ | $H_0/L_0=0.02 (T=1.7 \text{ sec})$ |      |                    |              | $H_0/L_0=0.03 (T=1.5 \text{ sec})$ |      |                    |              | $H_0/L_0=0.04 (T=1.35 \text{ sec})$ |      |                    |              | $H_0/L_0=0.06 (T=1.05 \text{ sec})$ |      |                    |              |
|--------------|------------------------------------|------|--------------------|--------------|------------------------------------|------|--------------------|--------------|-------------------------------------|------|--------------------|--------------|-------------------------------------|------|--------------------|--------------|
|              | $H_0$                              | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ | $H_0$                              | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ | $H_0$                               | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ | $H_0$                               | $r$  | $p_0$              | $\int_0^r p$ |
| cm<br>9      | cm                                 | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        | cm                                 | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        | cm                                  | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        | cm                                  | cm   | gr/cm <sup>2</sup> | gr/cm        |
| 11           | 11.5                               | 20.0 | 3.1                | 30.6         | 10.7                               | 20.0 | 3.0                | 29.5         |                                     |      |                    |              |                                     |      |                    |              |
| 12           |                                    |      |                    |              |                                    |      |                    |              | 12.7                                | 19.0 | 2.7                | 25.6         | 10.5                                | 18.0 | 2.6                | 23.8         |
| 13           | 13.5                               | 22.5 | 3.1                | 34.9         | 12.5                               | 22.0 | 3.3                | 35.7         | 12.8                                | 20.0 | 3.6                | 35.7         | 10.8                                | 20.0 | 3.6                | 35.7         |
| 14           |                                    |      |                    |              | 12.7                               | 22.0 | 4.1                | 44.6         | 12.6                                | 24.0 | 4.0                | 48.2         | 10.9                                | 20.0 | 3.8                | 38.4         |
| 15           | 12.3                               | 25.0 | 4.7                | 58.7         | 12.5                               | 23.0 | 6.6                | 75.7         | 12.5                                | 25.0 | 5.6                | 70.5         | 10.7                                | 23.0 | 5.2                | 60.2         |
| 17           | 13.1                               | 30.0 | 5.7                | 85.0         | 13.0                               | 30.0 | 5.1                | 75.9         | 14.0                                | 29.0 | 5.7                | 82.4         | 11.0                                | 23.0 | 5.1                | 59.1         |
| 20           | 14.1                               | 38.5 |                    | 109.7        | 14.0                               | 40.0 | 5.7                | 114.2        | 13.8                                | 36.0 | 4.7                | 84.6         | 12.0                                | 30.0 | 3.8                | 57.0         |
|              |                                    |      |                    |              | 14.8                               | 43.0 | 6.6                | 142.9        | 14.1                                | 45.0 | 5.0                | 116.5        |                                     |      |                    |              |

$$P_0 = \frac{2 \int_0^r p}{r}$$

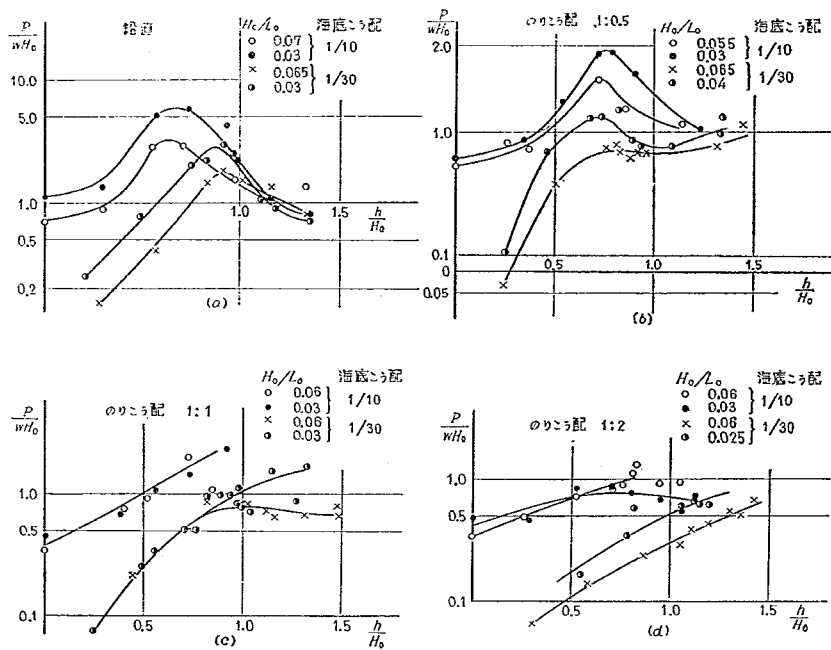


図-13 波圧に対する海底こう配の影響

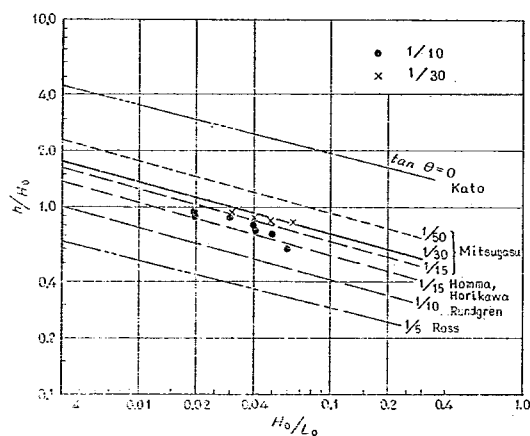


図-14 最大引張圧が発生する設置水深

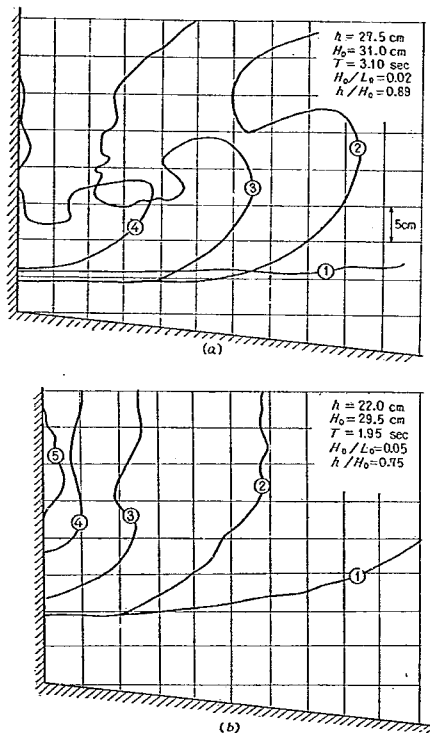


図-15 砕波衝撃圧発生時の波の衝突状況

やすいことを指摘しているが、この実験結果からも同様なことが認められた。

異常に大きな衝撃圧が静水面付近に発生することはよく知られている。図-17は波圧の鉛直分布を示したものであるが、やはり、静水面付近に大きな圧力が生じている。さらに、静水面より上部では波圧は急激に小さくなるが、水底部付近にはかなり大きな圧力が作用している。その大きさは、波形こう配が0.02の場合、 $P/WH_0$ で10程度であり、しかも、その値は実験ごとのばらつきが比較的小さい。したがって、異常に大きな衝撃圧は静水面付近に限られるが、10~20程度の波圧は相当に広範囲にわたって作用していることがわかる。

波形こう配0.02と0.04の場合について、鉛直壁の各部に作用する波圧のひん度分布を示すと図-18のようになる。波圧計の位置が水底から高くなるにつれて、次第に高い圧力がでるようになる。

以上の図からもわかるように、波形こう配が小さいほ

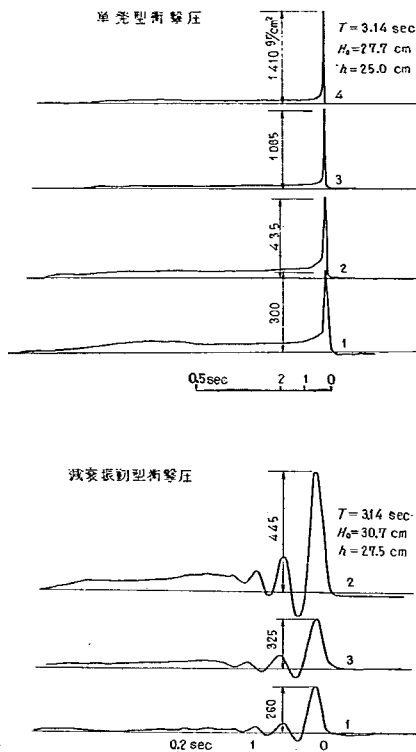


図-16 砕波衝撃圧の波形

ど衝撃圧が大きくなる傾向にある。表-5はこの実験により得られた波圧の最大値、平均値、最小値を各波形こう配ごとに示した。また、力積と沖波の運動量との比の平均値、水粒子の衝突速度、巻き込みの空気厚の概略値などを示してある。

波圧の平均値は波形こう配によりあまり差はないが、最大値には相当な差が認められる。水粒子の速度をみると、若干のばらつきはあるが、やはり、波形こう配の小さい方が大きい傾向にあり、衝突時に有する運動量の大小が波圧の最大値に影響しているように思われる。

砕波衝撃圧はそのピーク値が大きい場合は作用時間が短く、ピーク値が小さい場合は作用時間が長いので、その力積は一定値に近いことが指摘されている<sup>(6)</sup>。図-19に示すようにして各測点ごとに実験値から力積を求め、沖波の運動量との比をとってみると図-20のようになる。波形こう配による差はほとんど認められず、また、静水面より下方の値も、静水面付近の値もほとんど等しい。

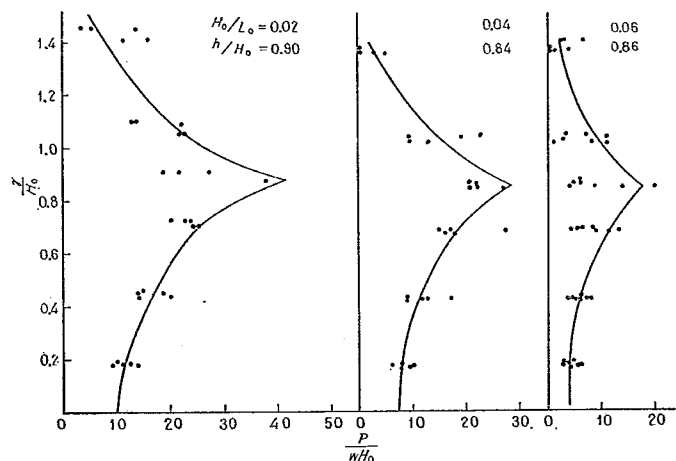


図-17 碎波衝撃圧の鉛直分布

表-5 碎波衝撃圧の諸量

|                                                  |            |       |       |       |
|--------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|
| $\frac{h}{H_0}$                                  | 0.9        | 0.87  | 0.75  | 0.70  |
| $\frac{H_0}{L_0}$                                | 0.02       | 0.03  | 0.04  | 0.05  |
| $\frac{P}{WH_0}$                                 | Max        | 49.5  | 32.4  | 27.2  |
|                                                  | Mean       | 13.0  | 14.3  | 9.2   |
|                                                  | Min        | 3.8   | 7.6   | 2.4   |
| $\frac{t}{T}$                                    | 0.013      | 0.008 | 0.014 | 0.015 |
| $\frac{\int_{t_1}^{t_2} p dt}{\rho U H_0}$ (静水面) | 0.38       | 0.29  | 0.32  | 0.33  |
| 水粒子の衝突速度                                         |            |       |       |       |
| (小 型)                                            | 1.85 m/sec | 1.97  |       | 1.81  |
| (大 型)                                            | 3.29       | 2.69  | 2.93  | 2.06  |
| 巻き込み空気厚                                          | 15 cm      | 10    | 8     | 6     |

各波形こう配に対する平均値(静水面付近)は表-5に示してあるが、全平均値は0.33で林のらが示した結果と一致している。

## 〔2〕 壁体が移動する場合の碎波衝撃圧の変化<sup>(8)</sup>

以上の実験結果では、測定値はほぼ固定壁に作用する波圧とみなし得る。海岸堤防の場合は、防波堤と異なり波覆壁が波圧により変形することが考えられる。このような条件では、極端に高い衝撃圧が作用しにくくなるこ

とが予想されるので、以下にこの点について調べた結果を述べる。実験装置などについては3.2を参照されたい。3.3〔1〕の結果は30cm程度の波高を用いて得られたものであるが、この実験では15cm程度の波高を使っている、その規模は約1/2となっている。

図-21は各種の移動堤に作用する波圧、変位、加速度などを示したものである。変位と加速度は堤体の上端で測定されたので、最も大きな力が作用する静水面付近の

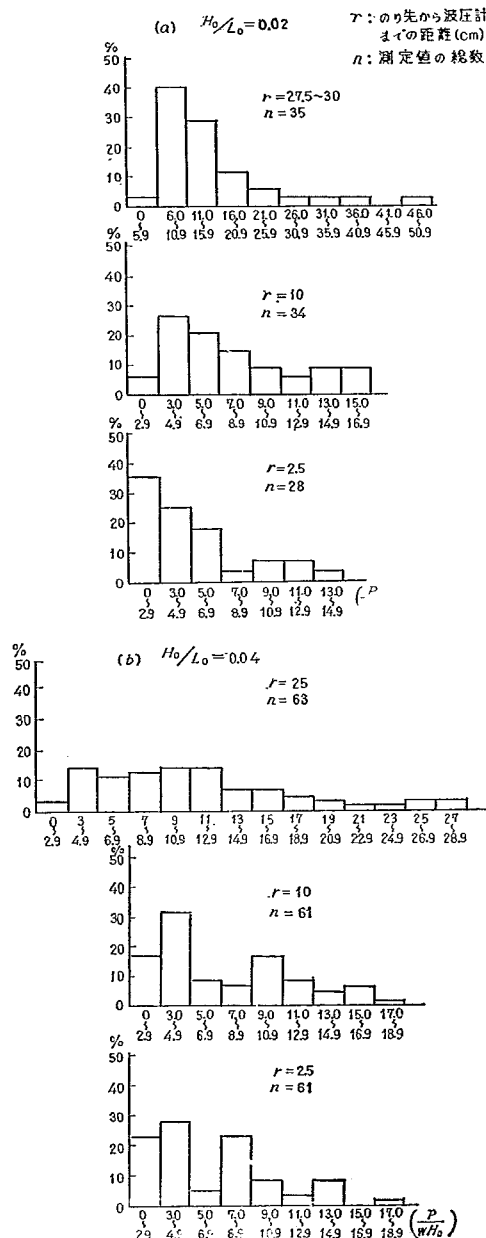


図-13 のり先から波圧計までの距離の分布

状態を直接表わすものではないが、ある程度の指標とはなりうるものと思われる。

バネで支持された銅板堤とモルタル堤とはほぼ似たような変形をする。波圧が作用すると堤体全体が陸側に移動し、波圧のピークよりやや遅れて変形もピークに達する。ピーク後はほぼ一定周期の減衰振動をしながら最初の位置にもどる。振動周期は、銅板堤で約0.025sec、モルタル堤で約0.035secとなっている。固定堤に作用する波圧の波形は針のように鋭くがっているが、バネで支持された場合には、先が二山になるケースがしばしばみられた。

鉄板またはモルタル板が砂で支持された場合は、変形状態が異なり、初期に波圧の作用しない上部は、一たん海側に変位し、波圧が上部に作用し始めるとともに陸側に押される。鉄板の場合にはかなりの振動がみられるが、高周波成分の影響で波形は相当に不規則となっている。モルタル堤の場合はほとんど振動せず、腰掛部波圧の作用がなくなると初期の位置にかえる。

表6～7は各ケースごとに、固定堤と移動堤との波圧（3～4測点中の最大波圧）の比較、変化、波圧のピーク値と変位のピークとの位相差などを示したものである。波圧および変位は各実験から50個の資料を取り出し整理したものであり、一方、位相差は15個の資料の平均値である。また、変位はピーク値を示すものであるが、かっこ内の数値は海側に変位した場合のピーク値で15個の資料の平均値である。

固定堤の波圧はかなりのばらつきはあるが平均値では各ケースの差は比較的少ない。最大値は669g/cm<sup>2</sup>であるが、沖波波高が約15cmなので、 $P/WH_0$ にすると46で著しく大きな衝撃圧である。

移動堤の波圧は、バネ支持の銅板堤が最小で、ついでバネ支持のモルタル堤、砂支持のモルタル堤、砂支持の鉄板堤の順序で大きくなっている。一方、変位をみると必ずしもこの逆の順序になっていない。位相差はケース1と3は小さく、ケース2と4は大きい。図-21からもわかるように、バネ支持の場合は波圧の作用によりただちに堤全体が陸側に変形するため、波圧のピーク値と堤の上端の変形のピーク値との位相差も小さく、上端の変形量に

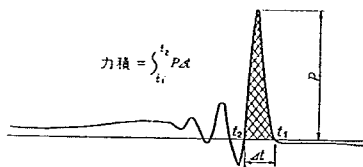


図-19 力積の計算説明

より最大の波圧が作用する部分の変形を代表させることができよう。一方、砂支持の場合は、波圧の作用により堤の上部は一たん海側に変位してから、陸側に変形しピークに達する。したがって、波圧の最大値が発生する時刻との位相差は、前2者より相当に大きく、鋼板堤の場合はバネ支持の約6倍、モルタル堤の場合は約3倍である。したがって、バネ支持における変位との比較の意味では、砂支持の変位を鋼板の場合には1/6、モルタルの場合には1/3位にみるのが妥当であろう。

以上のようにみえてくると、変形が起こりやすく、応答の早い系は波圧の減少が大きくなり、常識的な結果が得られていることになる。

波圧の最大値が作用する部分の変形量はよくわからないが、バネ支持の場合は1mm前後であろう。また、砂支持の場合は、0.1~0.5mm程度と推定される。表-6の結果から、バネ支持程度に動きやすい構造であっても、波圧は1/2~1/3に減少するのみである。確かに、極端に大きい圧力の発生は避けられるが、それでも、沖波波高の16~20倍の圧力が発生する。また、砂支持の場合、波

圧の作用時における変形が小さいため、波圧の減少度も小さく、モルタル堤でも5割程度の減少をみたにすぎない。現実の堤防では、砂支持の場合に近いと思われるので、堤体の変形による波圧の減少はあまり期待できないと考えてよいであろう。

### 〔3〕 碎波衝撃圧の発生機構

衝撃圧の発生機構としては、Bagnoldの空気の断熱圧縮説<sup>(9)</sup>が最も有名である。合田<sup>(10)</sup>は堤体の直前に電気接点を置き、碎波の波頂部が堤体に達する以前に波圧の

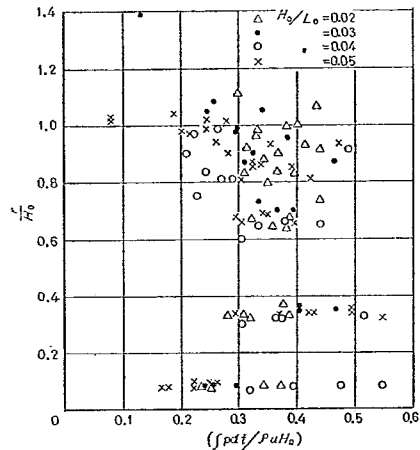


図-20 碎波衝撃圧の力積

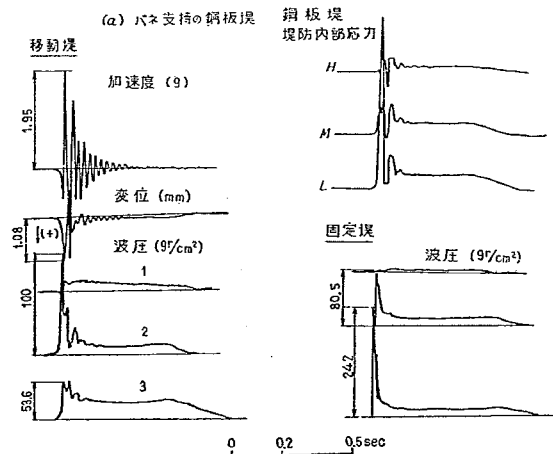


図-21(a) 堤防に作用する波圧、および変位、加速度、応力の時間変化

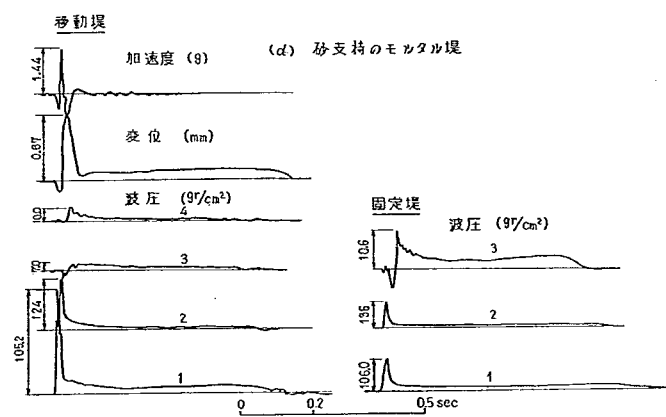
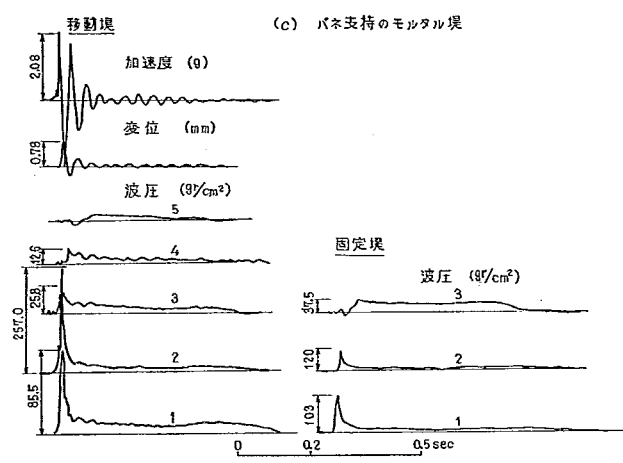
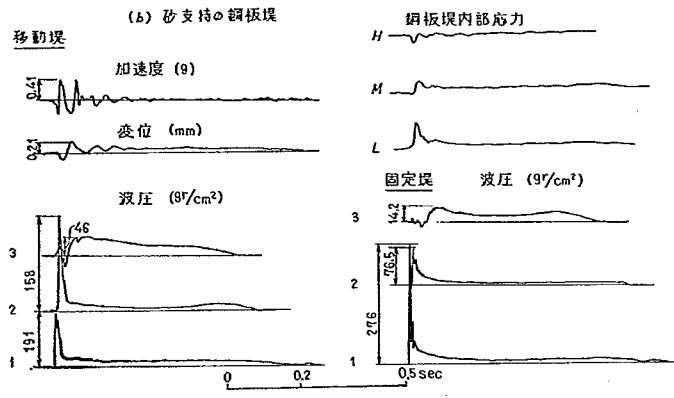


図-21 (b), (c), (d), 堤防に作用する波圧, および変位, 加速度, 応力の時間変化

表-6 堤防の種類と波圧変動

| 堤防の種類   | 固定堤波圧                |      |     |      | 移動堤波圧 |      |     |      |
|---------|----------------------|------|-----|------|-------|------|-----|------|
|         | max                  | mean | min | 標準偏差 | max   | mean | min | 標準偏差 |
| バネ—銅板   | 667g/cm <sup>2</sup> | 246  | 33  | 182  | 241   | 88   | 43  | 29   |
| 砂—銅板    | 596                  | 245  | 79  | 109  | 473   | 202  | 91  | 86   |
| バネ—モルタル | 669                  | 261  | 46  | 144  | 303   | 128  | 32  | 50   |
| 砂—モルタル  | 532                  | 265  | 48  | 115  | 355   | 173  | 22  | 77   |

表-7 堤防の変形と波圧変化

| 堤防の種類   | 固定堤波圧<br>移動堤波圧 | 変位             | 位相差              | 固有振動期    |
|---------|----------------|----------------|------------------|----------|
| バネ—銅板   | 2.8            | 0.89mm         | 0.006sec         | 0.025sec |
| 砂—銅板    | 1.2            | 0.36<br>(0.26) | 0.035<br>(0.012) | 0.048    |
| バネ—モルタル | 2.0            | 0.86           | 0.0057           | 0.036    |
| 砂—モルタル  | 1.5            | 1.2<br>(0.26)  | 0.018            | 0.039    |

ピークが起こるか、または、波頂部が堤体に衝突してから波圧のピークが起こるかを検証した。その結果、最も大きな衝撃圧を生じる場合については、この点を十分に確かめるに至らなかったが、空気巻き込みの大きい振動型波形を生じる場合は、波頂が壁面に達する以前に波圧のピークが起こることを明らかにした。この結果から衝撃圧が発生する場合には、壁面と衝突水塊の間に空気のはさみ込みがあり、その厚さの大小により圧力の大きさが異なることを指摘した。すなわち、衝撃圧の原動力は水の弾性圧縮であるが、それが air cushion により緩和され、その緩和の程度が空気層の厚さにより決定されることになる。

一方、Rundgren<sup>(11)</sup> は Bagnold の compression shock とともに、Hammer shock という考え方を示している。この考え方では、水の弾性圧縮力が波頂部に含まれる空気泡により弱められる。したがって、波頂部の乱れが大きければ衝撃圧も小さくなる。

波衰振動型の波形を生じる場合は、空気のはさみ込みが考えられるが、単発型の場合は Hammer shock の方が考えやすい。したがって、衝撃圧の発生機構としては、上述の二機構が最も有力であると考えられるが、この点についてはさらに十分な検討が必要である。

#### [4] 消波工による碎波衝撃圧の減殺効果

実際の海の場合、波は非常に乱れているので、大きな衝撃圧が起こる可能性は少ないと考えられている。<sup>(12)</sup> しかし、それが皆無であるとは言えない。衝撃圧は非常に大きいので、その値が仮に明確にされたとしても、それを用いて築堤堤防を設計することは非常に困難であろう。したがって、衝撃圧を生じるような比較的深い位置に堤防を設置する場合は、鉛直堤を避けるか、消波工な

どにより波圧を小さくする必要がある。

衝撃圧の発生には、波頂部の乱れと空気巻き込みが関係するので、消波ブロックを設置することにより、衝撃圧を相当に小さくできるものと考えられる。そこで、図-22のような消波工を設置してその効果を調べてみた。

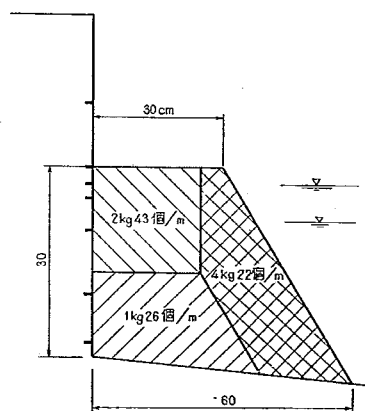


図-22 消波工の形状

ブロックは 1kg, 2kg, 4kg のテトラポッドで、それぞれ 1m 当たり 26個, 43個, 22個使用した。積み方は乱積みで、各重量のものを図-22 のように設置した。

図-23はこの消波工を設置して、最も大きな衝撃圧を生じる条件で波圧を測定した結果である。測定値はそれぞれの水理条件で、10~30波の平均値である。これによると、のり面に作用する波圧は、波高と同じ程度の値で、消波工のない場合に比較して著しく小さくなること

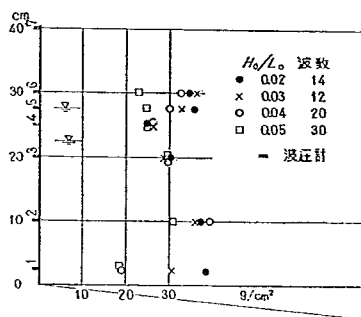


図-23 消波工の波圧減殺効果

がわかる。ブロックのある場合は、砕波波頂が直接壁面に衝突することがなく、また、ブロックの存在により乱れが著しく大きくなるので、砕波後の波圧と同程度の波圧に減少すると考えられる。

### 3.4 砕 波 圧

#### [1] 鉛 直 堤

図-7をみると、 $h/H_0$ が0.5付近において波圧の極大点がある。この点は砕波衝撃圧の発生領域と、波が完全に砕けてから衝突する、いわゆる、砕波圧の発生領域との境界点に当たる。堤防の設置水深がこれより浅くなると、波は段波状となって壁面に当たり、その圧力は流速水頭のオーダーと考えられている。したがって、堤防前面の流速が求められれば、壁面上の波圧の最大値を推定することができる。

砕波領域では、波頂部付近の流速はほぼ波速に等しく波速は水底から波頂までの高さによって与えられる。そこで、まず、砕波領域および汀線より陸側において、水底から波頂までの高さを調べてみる。

砕波帯中における波頂高は水深の1.6倍程度と見積もられているが、水深が小さくなると、wave set-upの影響がでてくるので、その補正をする必要がある。wave set-upの定量的な推定はある程度可能であるが<sup>(13)</sup>、1.6倍という数字が近似的なもので、ここでは、汀線における波頂高を実験的に求め、これを考慮して、砕波帯における波頂高を次式のようにおくことにする。

$$\eta = \eta_0 + 1.6h \quad (1)$$

ここに、 $\eta$ ：砕波帯における水底からの波頂高

$\eta_0$ ：汀線における水底からの波頂高

汀線における波頂高は、海底こう配が一定の場合は、沖波の波形こう配の関数で、1/10、1/30こう配の場合の実験結果を整理すると図-24のようになる。

表-8は(1)式の精度を検討したもので、汀線における

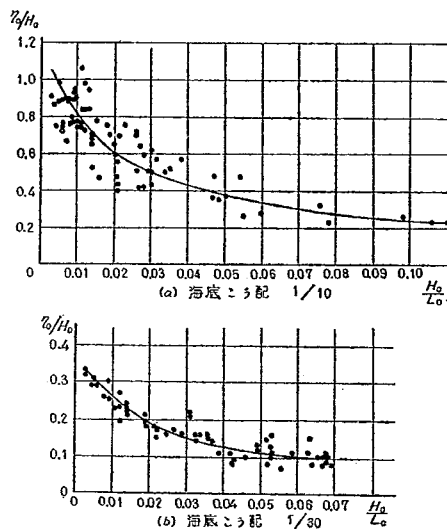


図-24 汀線における波頂高

波頂高(実験値)から、(1)式を用いて $\eta$ を計算し、実験値と比較したものである。また、この表には、砕波点における波頂高を求め、汀線における波頂高まで直線的に変化するものとして各位置における波頂高( $\eta_0$ )を求めた結果も入れてある。なお、砕波点における波頂高はHyperbolic waveの理論<sup>(14)</sup>を用いて計算した。

この表によると、 $\eta_0$ の方が実験値に近い。特に海底こう配1/10の場合はほぼ一致している。一方、 $\eta$ は全般的に実験値より大きく、1/10こう配の場合は約5~15%、1/30こう配の場合は15~25%高い。しかし、2箇所の波頂高を求めて比例配分することは手間もかかるし、また $\eta$ と実験値との差はあまり大きくないので、以下の計算では(1)式を用いることにする。

次に、汀線より陸側のそ上水脈の厚さを調べてみると図-25のとおりである。水面曲線は上に凹の形で、汀

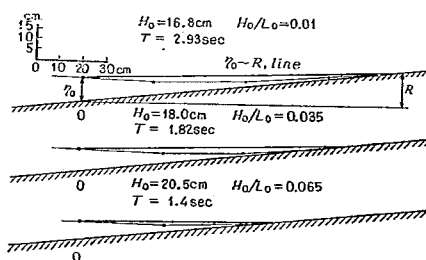


図-25 汀線より陸側におけるそ上水面形

表-8 波 頂 高 の 実 験 値 と 計 算 値 と の 比 較

海底こう配 1/10

 $H_0=19.2\text{cm}$ ,  $T=3.4\text{ sec}$   $H_0/L_0=0.0106$ 

| $\frac{h}{H_0}$ | 実験値<br>$\eta$ | 計 算 値      |            | $\frac{\eta}{\eta_1}$ | $\frac{\eta}{\eta_2}$ |
|-----------------|---------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------|
|                 |               | $\eta_1$   | $\eta_2$   |                       |                       |
| 0               | cm<br>12.2    | cm<br>12.2 | cm<br>12.2 |                       |                       |
| 0.26            | 18.4          | 20.2       | 18.9       | 0.91                  | 0.97                  |
| 0.52            | 28.6          | 28.2       | 25.6       | 1.01                  | 1.12                  |
| 0.78            | 31.9          | 36.2       | 32.3       | 0.88                  | 0.99                  |
| 1.04            | 39.3          | 44.2       | 39.0       | 0.89                  | 1.01                  |
| 1.30            | 48.9          | 52.2       | 45.7       | 0.94                  | 1.07                  |
| 平 均             |               |            |            | 0.926                 | 1.03                  |

 $H_0=24.4\text{cm}$ ,  $T=2.54\text{ sec}$   $H_0/L_0=0.024$ 

| $\frac{h}{H_0}$ | 実験値<br>$\eta$ | 計 算 値      |            | $\frac{\eta}{\eta_1}$ | $\frac{\eta}{\eta_2}$ |
|-----------------|---------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------|
|                 |               | $\eta_1$   | $\eta_2$   |                       |                       |
| 0               | cm<br>10.8    | cm<br>10.8 | cm<br>10.8 |                       |                       |
| 0.21            | 17.8          | 18.8       | 17.6       | 0.95                  | 1.01                  |
| 0.41            | 23.5          | 26.8       | 24.4       | 0.88                  | 0.96                  |
| 0.62            | 35.0          | 34.8       | 31.2       | 1.01                  | 1.12                  |
| 0.82            | 38.8          | 42.8       | 38.0       | 0.91                  | 1.02                  |
| 1.02            | 51.5          | 50.8       | 44.9       | 1.01                  | 1.14                  |
| 平 均             |               |            |            | 0.952                 | 1.05                  |

海底こう配 1/30

 $H_0=11.0\text{cm}$ ,  $T=2.08\text{ sec}$   $H_0/L_0=0.016$ 

| $\frac{h}{H_0}$ | 実験値<br>$\eta$ | 計 算 値      |            | $\frac{\eta}{\eta_1}$ | $\frac{\eta}{\eta_2}$ |
|-----------------|---------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------|
|                 |               | $\eta_1$   | $\eta_2$   |                       |                       |
| 0               | cm<br>2.66    | cm<br>2.66 | cm<br>2.66 |                       |                       |
| 0.18            | 5.30          | 5.86       | 5.70       | 0.90                  | 0.93                  |
| 0.36            | 7.54          | 9.06       | 8.90       | 0.83                  | 0.85                  |
| 0.55            | 10.4          | 12.3       | 12.0       | 0.85                  | 0.87                  |
| 0.73            | 13.7          | 15.5       | 15.2       | 0.88                  | 0.90                  |
| 0.91            | 16.1          | 18.7       | 18.3       | 0.86                  | 0.88                  |
| 平 均             |               |            |            | 0.864                 | 0.89                  |

 $H_0=20.8\text{cm}$ ,  $T=2.85\text{ sec}$   $H_0/L_0=0.016$ 

|      |      |      |      |       |       |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 0    | 12.0 | 12.0 | 12.0 |       |       |
| 0.24 | 16.0 | 20.0 | 18.7 | 0.80  | 0.86  |
| 0.48 | 25.3 | 28.0 | 25.5 | 0.90  | 0.99  |
| 0.72 | 31.3 | 36.0 | 32.2 | 0.87  | 0.97  |
| 0.96 | 39.5 | 44.0 | 39.0 | 0.90  | 1.01  |
| 1.20 | 49.5 | 52.0 | 45.7 | 0.95  | 1.08  |
| 平 均  |      |      |      | 0.884 | 0.982 |

 $H_0=33.8\text{cm}$ ,  $T=2.82\text{ sec}$   $H_0/L_0=0.027$ 

|      |      |      |      |       |       |
|------|------|------|------|-------|-------|
| 0    | 14.2 | 14.2 | 14.2 |       |       |
| 0.15 | 19.3 | 22.2 | 21.0 | 0.82  | 0.92  |
| 0.30 | 25.3 | 30.2 | 27.7 | 0.84  | 0.91  |
| 0.44 | 33.8 | 38.2 | 34.5 | 0.89  | 0.98  |
| 0.59 | 33.4 | 46.2 | 41.3 | 0.72  | 0.81  |
| 0.74 | 48.7 | 54.2 | 45.1 | 0.90  | 1.08  |
| 平 均  |      |      |      | 0.846 | 0.940 |

 $H_0=12.5\text{cm}$ ,  $T=1.1\text{ sec}$   $H_0/L_0=0.063$ 

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 0    | 2.9  | 2.9  | 2.9  |      |      |
| 0.16 | 5.34 | 6.1  | 5.5  | 0.88 | 0.97 |
| 0.32 | 7.54 | 9.3  | 8.1  | 0.81 | 0.93 |
| 0.48 | 9.56 | 12.5 | 10.7 | 0.77 | 0.89 |
| 0.64 | 10.4 | 15.7 | 13.8 | 0.66 | 0.78 |
| 0.80 | 13.8 | 18.9 | 16.0 | 0.73 | 0.86 |
| 平 均  |      |      |      | 0.77 | 0.89 |

$$\eta_1 = \eta_0 + 1.6h$$

$$\eta_2 = \eta_0 + \frac{\pi}{\ell}(\eta_0 - \eta_0), \ell: \text{汀線と碎波点との距離} \quad x: \text{汀線と計算点との距離}$$

線における波頂高とそ上高を結んだ線よりやや下にあるが、ここでは近似的に上記の直線で代表させることにする。

汀線における波頂高および波のそ上高は、波形こう配と海底こう配の関数になると思われる。Hunt<sup>(15)</sup>は波のそ上高を次のように表わした。

$$\frac{R}{H_0} = C_p \tan \beta \cdot (H_0/L_0)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、 $R$ : 静水面上のそ上高

$H_0$ : 沖波の波高

$C_p$ : 海浜の透過性による係数

$\beta$ : 海底が水平面となす角

$L_0$ : 沖波の波長

汀線における波頂高および波のそ上高の実験値をこの形で整理してみると、図-26、27のようになる。これら

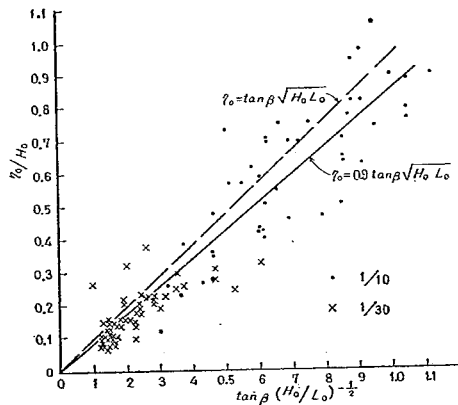


図-26 汀線における波頂高と波形こう配および海底こう配との関係

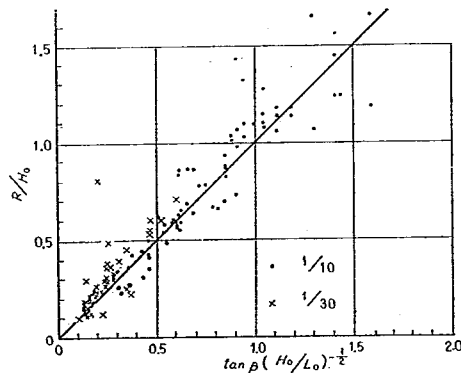


図-27 自然海浜における波のうちあげ高

の図を見ると、異なった海底こう配の実験値がほぼ一本の線にまとまり、(2)式のような表示がそ上高のみでなく、波頂高についても適切であることがわかる。

汀線における波頂高については、実験値にかなりのばらつきはあるが、平均的に引いた線の式を求めると次のようになる。

$$\frac{\eta_0}{H_0} = 0.9 \tan \beta \cdot (H_0/L_0)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

波のそ上高については、(2)式において  $C_p=1$  とした場合に実験値とよく一致することがわかる。実験は固定床であり、実際の海浜は砂れきからなっているため、 $C_p$  は少し小さくなることも考えられるが、ここでは、 $C_p=1$  をとることにする。

砕波圧の最大値を

$$\frac{P}{W} = \alpha \frac{u^2}{2g} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha$ : 係数 (実験から決める)

とおけるとすれば、以上の資料から堤防の設置位置における波頂高が計算されるので、波速は波頂高の平方根に比例し、さらに、流速は波速に比例すると仮定すれば、砕波圧が推定される。

汀線より海側においては、 $c$  を波速とし、

$c = \sqrt{g(\eta_0 + 1.6h)}$  で与えられるものとする、

$$\frac{P}{W} = \alpha \cdot \frac{\eta_0 + 1.6h}{2} \quad (5)$$

これに(3)式を代入すると、最大波圧は次式で与えられる。

$$\frac{P}{W} = \alpha \cdot \{0.45(H_0/L_0)^{\frac{1}{2}} \tan \beta + 0.8h\} \quad (6)$$

また汀線より陸側においては、

汀線より水平距離  $x$  の位置における波頂高は次式で与えられる。

$$\eta = 0.9 \tan \beta \{(H_0/L_0)^{\frac{1}{2}} - x\} \quad (7)$$

波速を  $\sqrt{g\eta}$  と仮定すると、(4)式は次のようになる。

$$\frac{P}{W} = \alpha \cdot 0.45 \tan \beta \{(H_0/L_0)^{\frac{1}{2}} - x\} \quad (8)$$

図-28は1/10こう配の場合について、 $P/WH_0$  の実験値と汀線より海側では、 $0.45 \tan \beta (H_0/L_0)^{-\frac{1}{2}} + 0.8h/H_0$

汀線より陸側では、 $0.45 \tan \beta \{(H_0/L_0)^{\frac{1}{2}} - x/H_0\}$  の値を比較したものである。汀線より陸側では  $\alpha=4$  程度の値であるが、海側ではこの値は過大である。

福井・中村・白石・佐々木<sup>(16)</sup>によると、段波の波速は次式で与えられる。

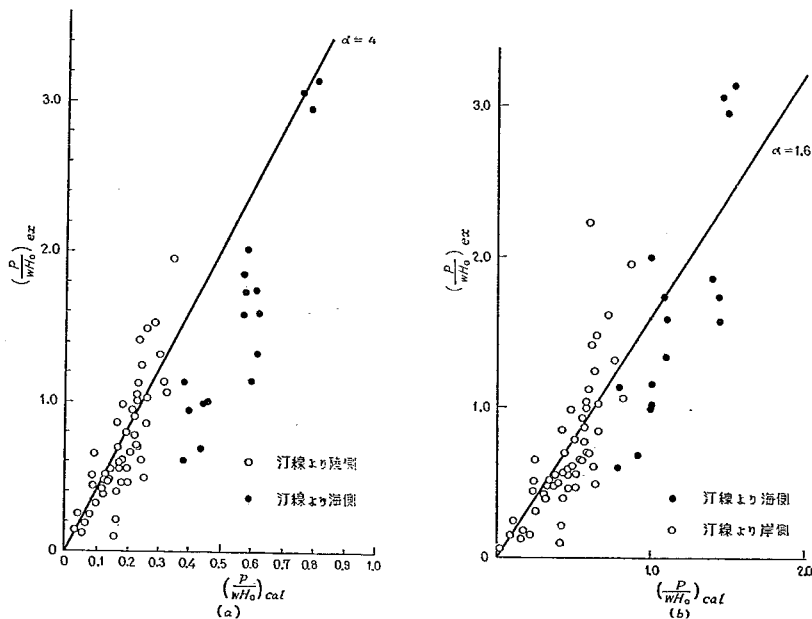


図-28 砕波圧の実験値と計算値との比較

$$c = \sqrt{\frac{g\eta(\eta+h)}{2\{\eta-f(\eta-h)\}}} \quad (9)$$

ここに、 $f$ : 流速分布と底面摩擦により決まる係数  
実験によると、 $f$ の値は、 $h/\eta$ が0.3より大きい領域ではほぼ1に近く、 $h/\eta$ が0.3より小さくなると次第に減少し、 $h/\eta=0$ で $f$ はほぼ0.8となる。

汀線より海側の領域では大部分 $f=1$ となるので、

$$c = \sqrt{\frac{g\eta}{2h}(\eta+h)} \quad (10)$$

(10)式において  $\eta=1.6h$ と仮定すると、 $c=\sqrt{1.3g\eta}$ となる。

一方、汀線より陸側では、 $f=0.8$ とすると、

$$c = \sqrt{2.5g\eta} \quad (11)$$

したがって、段波の波速は $\sqrt{g\eta}$ に比例するが、その比例常数は一定でなく、水深が大きい場合はほぼ $\sqrt{1.3}$ 、水深が浅くなると次第に大きくなり、水深が0になると約 $\sqrt{2.5}$ となる。

そこで、汀線より海側の場合は、波速を(10)式で、汀線より陸側の場合は、波速が(11)式で表わされるものとして、前と同様に波圧を計算し、実験値と比較すると、図-28(b)のようになる。

図-28(a)と(b)とを比較すると、(b)の方がまとま

りがよく、波速としては(10)、(11)式を用いるのが妥当のようである。図-28(b)から $\alpha'$ を求めると、1.6となる。汀線より陸側の場合は、結果的には $\alpha=2.5 \times 1.6=4$ で(8)式と一致する。しかし、汀線より海側の場合は、先に求めた(6)式と比較すると、計算波圧は20~30%小さい。

したがって、 $h/\eta$ の値により $\alpha$ を変えることが必要になるが、実用的には $\alpha$ の値を変えることは不便であり、また、ある程度水深のある場合は、条件の多少の変動により波圧が相当に変化するので、ここでは、 $h/H_0 < 0.5$ の全領域について、 $\alpha=4$ をとることにする。

通常の海岸では、汀線付近を境にして、海浜こう配が変わることが多い。このような場合には、汀線における波頂高はそれらのこう配の中間的なこう配に相当する値をとることが予想される。

表-9は汀線より海側のこう配が1/10、陸側のこう配が1/17.4の場合について、汀線における波頂高およびその高を調べたものである。波頂高については、1/10こう配と1/17.4こう配の波頂高の平均値に近いので、(3)式を用いてこの値を計算し、実験値と比較すると図-29(a)のようになる。計算値より実験値の方が10%程度大きい、こう配が変わる場合の波頂高は両こう配の平均波頂

表-9 汀線でこう配が変化する場合の  
波頂高とそ上高

| No   | H <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | (η <sub>0</sub> ) <sub>ex</sub> | R    | (η <sub>0</sub> ) <sub>m</sub> |
|------|----------------|----------------|---------------------------------|------|--------------------------------|
|      | cm             | cm             | cm                              | cm   | cm                             |
| 1-3  | 14             | 489            | 6.06                            | 5.98 | 5.87                           |
| 4    | 14             | 500            | 6.14                            | 6.09 | 5.87                           |
| 2-1  | 13             | 619            | 6.39                            | 6.44 | 6.34                           |
| 2    | 13             | 587            | 6.60                            | 6.78 | 6.19                           |
| 3    | 13             | 611            | 6.51                            | 6.72 | 6.32                           |
| 3-1  | 13             | 748            | 6.56                            | 6.67 | 6.98                           |
| 3    | 13             | 714            | 6.73                            | 7.06 | 6.82                           |
| 4    | 13             | 662            | 7.09                            | 7.36 | 6.57                           |
| 4-1  | 14             | 446            | 5.83                            | 6.10 | 5.60                           |
| 2    | 13             | 425            | 5.76                            | 6.03 | 5.28                           |
| 3    | 13             | 456            | 5.67                            | 6.21 | 5.46                           |
| 4    | 13             | 456            | 5.58                            | 6.32 | 5.46                           |
| 5-1  | 12             | 409            | 5.47                            | 5.80 | 4.97                           |
| 2    | 11             | 420            | 5.74                            | 5.92 | 4.81                           |
| 3    | 12             | 415            | 5.46                            | 5.86 | 5.00                           |
| 6-1  | 12             | 378            | 5.47                            | 5.75 | 4.78                           |
| 2    | 13             | 360            | 5.67                            | 5.63 | 4.85                           |
| 3    | 14             | 337            | 5.58                            | 5.75 | 4.86                           |
| 7-1  | 17             | 280            | 5.72                            | 5.63 | 4.89                           |
| 2    | 15             | 297            | 5.78                            | 5.81 | 4.67                           |
| 3    | 18             | 264            | 5.89                            | 5.46 | 4.67                           |
| 8-1  | 12             | 324            | 5.06                            | 5.23 | 4.43                           |
| 2    | 12             | 324            | 4.80                            | 5.40 | 4.43                           |
| 3    | 12             | 333            | 4.84                            | 5.40 | 4.48                           |
| 9-1  | 13             | 268            | 4.80                            | 5.06 | 4.18                           |
| 2    | 12             | 284            | 4.95                            | 5.12 | 4.14                           |
| 3    | 12             | 293            | 4.88                            | 5.06 | 4.21                           |
| 10-1 | 13             | 260            | 4.85                            | 4.88 | 4.13                           |
| 2    | 13             | 256            | 4.43                            | 4.72 | 4.08                           |
| 3    | 11             | 284            | 4.75                            | 5.00 | 3.96                           |
| 11-1 | 13             | 248            | 4.56                            | 4.42 | 4.02                           |
| 2    | 13             | 248            | 4.70                            | 4.48 | 4.03                           |
| 3    | 12             | 256            | 4.52                            | 4.66 | 3.93                           |
| 12-1 | 13             | 232            | 4.27                            | 4.48 | 3.90                           |
| 2    | 13             | 228            | 4.13                            | 4.42 | 3.86                           |
| 3    | 12             | 232            | 4.25                            | 4.42 | 3.73                           |
| 13-1 | 12             | 214            | 4.08                            | 4.14 | 3.59                           |
| 2    | 12             | 214            | 4.19                            | 4.31 | 3.59                           |
| 3    | 13             | 199            | 4.11                            | 4.03 | 3.60                           |
| 14-1 | 12             | 179            | 3.76                            | 3.68 | 3.29                           |
| 2    | 12             | 179            | 3.86                            | 3.85 | 3.29                           |
| 3    | 12             | 175            | 3.76                            | 3.79 | 3.25                           |
| 15-1 | 9              | 162            | 3.23                            | 3.22 | 2.71                           |
| 2    | 10             | 169            | 3.38                            | 3.33 | 2.92                           |
| 3    | 10             | 166            | 3.39                            | 3.51 | 2.89                           |

高三代用してもよいと思われる。

次に、汀線における波頂高とそ上高との関係を調べて

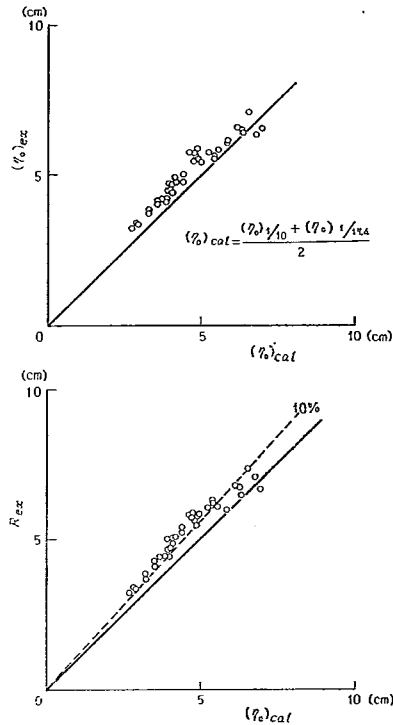


図-29 汀線においてこう配の変わる場合  
の波頂高とそ上高

みる。実測値をそのまま比較すると、表-9からわかるように両者の値はほぼ等しい。しかし、上に求めた平均波頂高をとってそ上高と比較すると、図-29 (b) のようにそ上高の方が10%程度大きく、一様こう配の場合に得られた結果と一致する。

碎波圧の推算法としては、本間・堀川・長谷の方法およびアメリカのBEBの方法<sup>(12)</sup>がある。

本間・堀川・長谷公式はある程度前面水深のある場合に使用されるもので、最大波圧は次式で与えられる。

$$P=2.8Wh \dots\dots\dots(12)$$

ここに、P：最大波圧（静水面において作用する。）

h：堤防の設置水深

W：海水の単位体積重量

また、BEB公式は主として汀線より陸側に堤防がある場合に用いられる。最大波圧は次式で与えられる。

$$P=0.5Wh_3 \left(1 - \frac{X_1}{X_2}\right)^2 + 0.7WH_3 \left(1 - \frac{X_1}{X_2}\right) \dots\dots(13)$$

ここに、h<sub>3</sub>：碎波水深

$H_b$  : 碎波波高

$X_1$  : 汀線から堤防までの距離

$X_2 : 2H_b \cos \beta$ , 汀線から仮想うちあげ限界まで

の水平距離

$\beta$  : 海底が水平面となす角

図-30は1/10 ころ配の場合の実験値と(6)式および

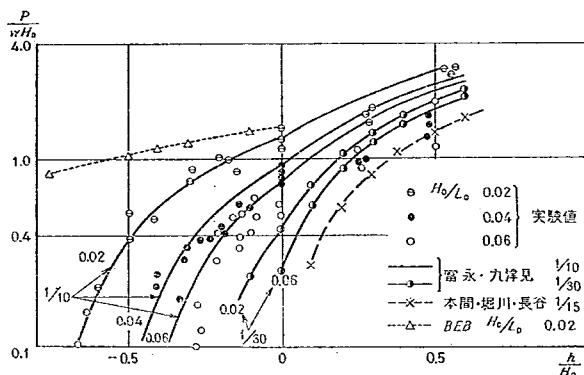


図-30 既存公式との比較

(8)式による計算値, 本間・堀川・長谷公式, BEB公式による計算値などを比較したものである。

これによると, BEB公式は過大な値を与えることがわかる。一方, 本間・堀川・長谷公式による計算値は実験値より小さい。この公式は海底ころ配1/15の実験値をもとにつくられているので, 1/10ころ配の実験値より小さいのは当然であるが, 全般的にやや過小のようである。この場合, 波圧は設置水深により決まるので, 汀線付近になると実験値との差が著しくなる。

先のべたように(6)式の計算値は若干過大であるが(8)式の計算値は全般的にみても満足すべきものと考えられる。

碎波圧の波圧分布は, 図-8に示したように, 堤防が陸上部にある場合は, のり先で最大となる三角形分布, 汀

線より海側にある場合は, のり先からある高さまでは一様分布でそれより上は直線的に減少する台形分布となる。

台形分布については一様部の高さが問題である。図-31によれば, 一様部の高さは設置水深より大きく, 1.3~1.5 $h$ 程度であるが, ここでは便宜的に, 一様部の高さ( $r$ )を次式で与えることにする。

$$r = 1.4h \quad (14)$$

波圧が0となる位置は, 波がうちあがる高さになると思われる。豊島・富永・橋本<sup>(18)</sup>によると, 碎波領域における鉛直壁のうちあげ高は近似的に次式で与えられる。

$$R = 2.5h \quad (15)$$

ここに,  $R$ : 碎波領域に設置された鉛直堤のうちあげ高  
 $h$ : のり先水深 (水深が浅い場合は wave sec-up を考慮する。)

ここでも, この方式を準用するが, 波頂部付近は水脈もろく, 波圧としてあまり有効に作用しないと思われるので, ここでは係数として2.0を用いることにする。

堤防が汀線より海側の場合は

$$R_0 = 3.0\{h + 0.56(H_b L_0)^{\frac{1}{2}} \tan \beta\} \quad (16)$$

とし, 汀線より陸側の場合は,

$$R_0 = 1.7 \tan \beta \{(H_b L_0)^{\frac{1}{2}} - x\} \quad (17)$$

ここに,  $R_0$ : 堤防ののり先からはかったうちあげ高により求めることにする。

汀線より陸側の場合, 静水面の位置が明瞭でないので実際は, うちあげ高と波頂高との比で考えるのが適当であろう。表-10は, うちあげ高の実験値<sup>(19)</sup>と波頂高との

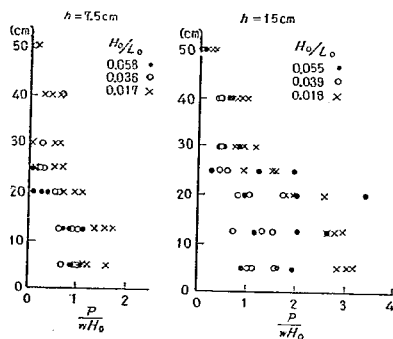


図-31 碎波圧の鉛直分布

表-10 うちあげ高と波頂高との比

(a) 堤防を汀線においた場合

| 海<br>こ<br>う<br>底<br>配 | $H_0/L_0$ | $\eta_0/H_0$ | $R/H_0$ | $R/\eta_0$ |
|-----------------------|-----------|--------------|---------|------------|
| 1/5*                  | 0.01      | 1.80         | 2.7     | 1.5        |
|                       | 2         | 1.27         | 2.3     | 1.8        |
|                       | 3         | 1.04         | 2.05    | 1.97       |
|                       | 4         | 0.90         | 1.8     | 2.0        |
|                       | 5         | 0.80         | 1.5     | 1.87       |
|                       |           |              |         | 平均 1.82    |
| 1/10**                | 0.01      | 0.90         | 1.45    | 1.60       |
|                       | 2         | 0.64         | 1.15    | 1.82       |
|                       | 3         | 0.52         | 0.95    | 1.82       |
|                       | 4         | 0.45         | 0.80    | 1.78       |
|                       |           |              |         | 平均 1.75    |
| 1/20                  | 0.01      | 0.45         | 0.80    | 1.78       |
|                       | 2         | 0.32         | 0.53    | 1.66       |
|                       | 3         | 0.26         | 0.42    | 1.62       |
|                       | 4         | 0.23         | 0.35    | 1.55       |
|                       | 5         | 0.21         | 0.31    | 1.51       |
|                       |           |              |         | 平均 1.62    |

\* 細井・三井のうちあげ高の実験値による。(堤防のりこう配1:1.5)

\*\* 堤防のりこう配 1:0.5

10-(b) 堤防を汀線より陸側においた場合

| No | $H_0$  | $L_0$ | $a$  | $\eta_{ex}$ | $R$    | $\eta_{cal}$ | $\eta_{ex}/\eta_{cal}$ | $R/\eta_{cal}$ |
|----|--------|-------|------|-------------|--------|--------------|------------------------|----------------|
| 3  | 11.8cm | 206cm | 10cm | 2.85cm      | 5.63cm | 3.54cm       | 0.81                   | 1.59           |
| 4  | 12.1   | 199   |      | 2.75        | 5.71   | 3.52         | 0.78                   | 1.62           |
| 7  | 10.1   | 276   |      | 2.94        | 6.96   | 3.87         | 0.76                   | 1.80           |
| 8  | 10.8   | 256   |      | 3.03        | 6.60   | 3.83         | 0.79                   | 1.72           |
| 11 | 8.4    | 365   |      | 3.21        | 7.15   | 4.08         | 0.79                   | 1.75           |
| 12 | 10.7   | 319   |      | 3.28        | 8.03   | 4.46         | 0.74                   | 1.80           |
| 15 | 10.2   | 365   |      | 3.48        | 7.50   | 4.60         | 0.76                   | 1.63           |
| 16 | 11.2   | 333   |      | 3.98        | 7.86   | 4.60         | 0.87                   | 1.71           |
| 19 | 12.4   | 399   |      | 3.95        | 9.46   | 5.43         | 0.73                   | 1.74           |
| 20 | 12.1   | 399   |      | 3.85        | 10.9   | 5.35         | 0.72                   | 2.02           |
|    |        |       |      |             |        | 平均           | 0.78                   | 1.74           |
| 5  | 11.8   | 206   | 20   | 2.17        | 4.82   | 2.69         | 0.81                   | 1.79           |
| 6  | 11.9   | 199   |      | 1.84        | 3.56   | 2.67         | 0.69                   | 1.33           |
| 9  | 9.40   | 280   |      | 1.93        | 3.56   | 2.82         | 0.69                   | 1.26           |
| 10 | 9.80   | 280   |      | 2.01        | 4.82   | 2.92         | 0.69                   | 1.65           |
| 13 | 8.60   | 365   |      | 2.39        | 4.82   | 3.24         | 0.74                   | 1.48           |
| 14 | 8.10   | 365   |      | 2.16        | 5.27   | 3.10         | 0.70                   | 1.70           |
| 17 | 12.4   | 328   |      | 3.0         | 6.34   | 3.94         | 0.76                   | 1.61           |
| 18 | 11.9   | 333   |      | 2.93        | 6.70   | 3.87         | 0.76                   | 1.73           |
| 21 | 11.2   | 401   |      | 2.96        | 5.90   | 4.28         | 0.69                   | 1.38           |
|    |        |       |      |             |        | 平均           | 0.72                   | 1.55           |
| 23 | 11.7   | 404   | 30   | 2.25        | 6.43   | 3.48         | 0.65                   | 1.82           |
| 24 | 11.9   | 399   |      | 2.34        | 5.81   | 3.51         | 0.67                   | 1.65           |
|    |        |       |      |             |        | 平均           | 0.66                   | 1.73           |

a: 汀線から堤防までの距離

比を調べたものである。

これによると、波頂高を(7)式から求めるかぎり、両者の比は1.5～1.8の範囲にある。一方(17)式ではこの値は1.89にとられているので、(17)式はやや大きいうちあげ高を与えることになる。

以上のようにして求めた波圧分布と実験により得られた波圧分布とを比較した結果を図-32に示す。当然予想

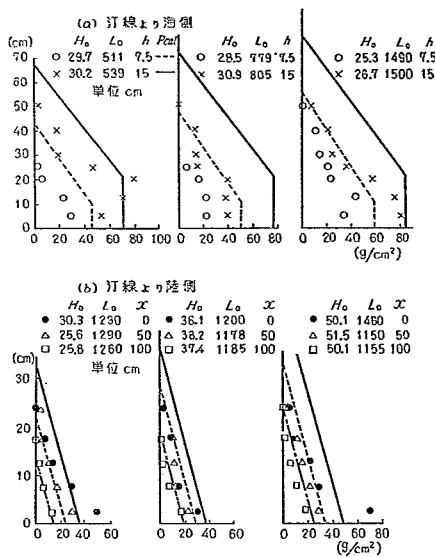


図-32 波圧分布の実験値と計算値との比較

されるように、一般に計算値の方が大きい、設計として用いるにはほぼ満足すべきものであると考えられる。

## 〔2〕傾斜堤

のりこう配がゆるくなると波圧は一般に小さくなる。通常、傾斜堤に作用する碎波圧の最大値は、鉛直堤の最大波圧に  $\sin^2 \theta$  ( $\theta$  はのり面と水平面とのなす角) をかけて求められる。この計算値と実験値とを比較したものを図-33に示す。これによるとのりこう配が5分と1割の場合は、計算値と実験値はほぼ一致するが、2割こう配の場合は、計算値が過小となるので  $\sin^2 \theta$  の代わりに0.35程度の係数をとるのが適当である。

波圧分布については、実験結果によると鉛直堤とはほぼ同じなので、汀線より海側については台形分布、岸側については三角形分布とする。一樣部の高さ、うちあげ高とも、1割こう配まではほぼ鉛直堤の場合に等しいと考えて差しつかえない。2割こう配の場合、うちあげ高は鉛直堤より若干小さくなるので、汀線より岸側の場合は Saville の複合断面法<sup>(20)</sup> などを用いて決める必要があ

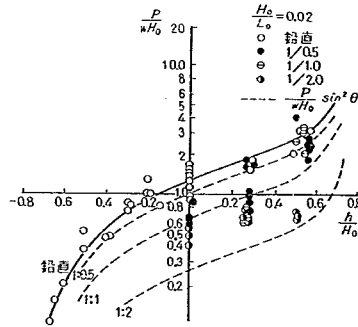


図-33 のりこう配による最大波圧の変化

る。しかし、鉛直堤の値を用いても誤差はあまり大きくないと思われる。鉛直堤の場合と同様に、実験波圧分布と計算波圧分布とを比較すると図-34のようになる。図-32と同様に計算値の方がかなり大きい。

傾斜堤の場合は一般に波返しが設けられる。波返し部に作用する波圧は、三角形分布として計算したもののより大きくなる場合がある。しかし、実験の結果では、堤防高がうちあげ高に比較して極端に低くない限りその差は小さい。

波返しをもった海岸堤防に作用する波圧の一例として蒲原海岸堤防の模型実験の結果を述べる。<sup>(21)</sup> 蒲原海岸は昭和41年9月の台風26号により災害を受けたので、堤防高をTP10mからTP15mにかさ上げすることになった。堤防と汀線との距離は約70mであるが、計画波浪が大きいので、堤体にかんりの波圧が作用することが推定され模型実験により波圧の測定を行なった。

模型は1/50で、海底こう配および堤防の断面は図-35のとおりである。いくつかの実験例につき、実験値と上述の方法による推定値とを比較した結果を図-36に示す。

のり先の最大波圧を鉛直堤の最大波圧に  $\sin^2 \theta$  をかけて求めると、先にも指摘したように、2割こう配の場合なので、実験値より相当に小さくなる。表-11は蒲原海岸堤防ののり面に作用する最大波圧の実験値と鉛直堤とした場合の計算値とを比較したものである。両者の比をとり平均すると0.64となる。この値は先に指摘した0.35に比較するとかなり大きい。蒲原海岸堤防の場合は、その波が堤防ののり先に衝突した瞬間の波圧より、その後ののり先水脈の厚さの増大による波圧の方が大きく、上記の実験値はこの値をとっているからである。このような現象は波返しが大きく、のり面上のそ上水脈を、早くしかも効果的にうち返すためと考えられる。

このように、比較的こう配のゆるい堤防の最大波圧はのり面形状の影響を受けやすいので、その推定には十分

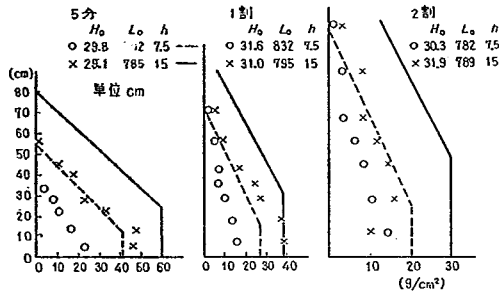


図-34 傾斜堤における砕波圧分布の実験値と計算値との比較

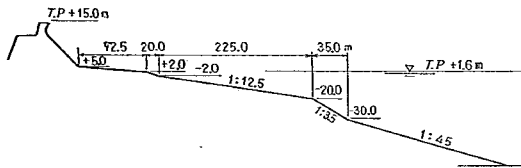


図-35 蒲原海岸の海底こう配および堤防断面

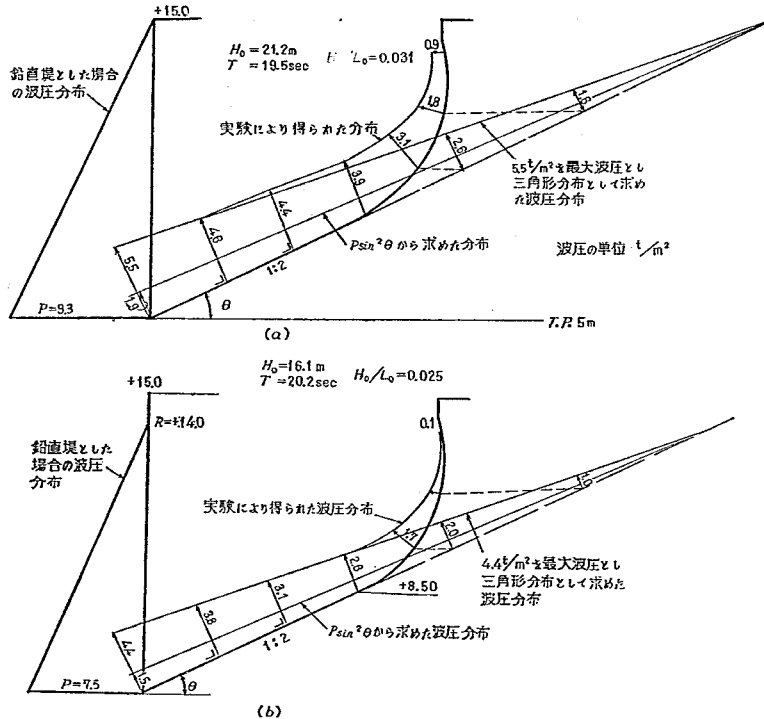


図-36 蒲原海岸の波圧実験値と計算値との比較例

注意しなければならない。

図-36 から波圧分布は三角形分布では表わされるようである。波返し部でもうちあげ高が堤防高以下であれば三角形分布として計算してもあまり問題はないようである。うちあげ高が堤防高より高くなる場合は、波返し部の圧力が三角形分布として計算した値より大きくなることも考えられるので、この点について検討してみる。

表-12 は実験の中から、うちあげ高が堤防高より大きくなる場合を選んで、波返し部の波圧、( $P_4 \sim P_7$ ) の実験値と、図-36 のように、三角形分布として計算した波圧とを比較したものである。これによると、かなりのばらつきはあるが、平均的にみると、 $P_4$  は両者はほぼ等しく、 $P_5 \sim P_7$  は実験値の方が小さい。 $P_6$  と  $P_7$  の実験値が計算値より大きくなったのはわずかに 2 例にすぎない。この結果から、

表-11 鉛直堤と2割堤の最大波圧の比

| No | $H_0$ | $L_0$ | $x$  | $P_{ex}$         | $P_{cat}$        | $\frac{P_{ex}}{P_{cat}}$ |
|----|-------|-------|------|------------------|------------------|--------------------------|
|    | m     | m     | m    | t/m <sup>2</sup> | t/m <sup>2</sup> |                          |
| 5  | 15.5  | 588   | 74.5 | 4.04             | 6.20             | 0.65                     |
| 6  | 19.4  | 594   |      | 4.72             | 7.92             | 0.60                     |
| 7  | 23.8  | 603   |      | 6.72             | 9.64             | 0.70                     |
| 8  | 20.4  | 577   |      | 5.27             | 8.06             | 0.66                     |
| 12 | 15.4  | 434   |      | 2.94             | 4.56             | 0.65                     |
| 13 | 19.6  | 488   |      | 4.14             | 6.76             | 0.61                     |
| 14 | 23.3  | 424   |      | 4.23             | 6.42             | 0.57                     |
| 21 | 21.4  | 334   |      | 2.51             | 5.06             | 0.50                     |
| 26 | 16.1  | 634   | 72.5 | 4.43             | 7.48             | 0.59                     |
| 27 | 19.5  | 572   |      | 5.52             | 8.10             | 0.68                     |
| 28 | 21.2  | 647   |      | 5.88             | 9.90             | 0.59                     |
| 29 | 24.2  | 594   |      | 7.19             | 9.90             | 0.73                     |
| 33 | 14.8  | 634   | 77.5 | 4.28             | 6.06             | 0.71                     |
| 34 | 18.0  | 598   |      | 5.45             | 7.00             | 0.78                     |
| 35 | 21.9  | 672   |      | 5.68             | 9.34             | 0.61                     |
| 36 | 24.2  | 735   |      | 5.89             | 10.98            | 0.54                     |
| 平均 |       |       |      |                  |                  | 0.64                     |

 $P_{ex}$ : 2割堤の実験値,  $P_{cat}$ : 鉛直堤の計算値 $x$ : 汀線から堤防までの距離

表-12 波返し部の波圧

| No | H <sub>0</sub>    | H <sub>0</sub> /L <sub>0</sub> | R                  | 実 験 値             |                                 |                |                | 三角形分布から求めた<br>計算値 |                |                |                | 実 験 値/計 算 値 |      |      |      |       |
|----|-------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|------|------|------|-------|
|    |                   |                                |                    | P <sub>4</sub>    | P <sub>5</sub>                  | P <sub>6</sub> | P <sub>7</sub> | P <sub>4</sub>    | P <sub>5</sub> | P <sub>6</sub> | P <sub>7</sub> | 4           | 5    | 6    | 7    |       |
| 5  | 15.5 <sup>m</sup> | 0.026                          | 16.5 <sup>TP</sup> | 17.9 <sup>m</sup> | 2.78 <sup>t/m<sup>2</sup></sup> | 1.85           | 0.58           | 0.095             | 2.8            | 2.3            | 1.6            | 1.0         | 0.99 | 0.80 | 0.35 | 0.095 |
| 6  | 19.4              | 33                             | 17.9               | 3.28              | 2.32                            | 1.61           | 0.58           |                   | 3.4            | 2.8            | 2.2            | 1.4         | 0.97 | 0.83 | 0.73 | 0.41  |
| 7  | 23.8              | 39                             | 20.2               | 5.40              | 4.60                            | 3.81           | 2.56           |                   | 5.2            | 4.4            | 3.7            | 2.8         | 1.04 | 1.05 | 1.30 | 0.91  |
| 8  | 20.4              | 35                             | 18.1               | 3.80              | 2.72                            | 1.68           | 0.81           |                   | 3.8            | 3.1            | 2.4            | 1.6         | 1.00 | 0.88 | 0.70 | 0.51  |
| 13 | 19.6              | 40                             | 16.8               | 2.60              | 1.80                            | 0.38           | 0.22           |                   | 2.5            | 2.2            | 1.6            | 0.8         | 1.04 | 0.82 | 0.24 | 0.28  |
| 14 | 23.3              | 55                             | 16.7               | 2.53              | 1.74                            | 0.41           | 0.28           |                   | 2.9            | 2.4            | 1.7            | 1.0         | 0.87 | 0.73 | 0.24 | 0.28  |
| 15 | 23.8              | 53                             | 17.7               | 4.02              | 3.56                            | 2.11           | 1.45           |                   | 3.7            | 3.0            | 2.4            | 1.6         | 1.08 | 1.18 | 0.88 | 0.91  |
| 21 | 21.4              | 64                             | 16.0               | 0.61              | 0.18                            | 0.02           | 0              |                   | 1.6            | 1.4            | 0.98           | 0.46        | 0.38 | 0.13 | 0.02 | 0     |
| 26 | 16.1              | 25                             | 16.9               | 2.56              | 1.72                            | 0.6            | 0.14           |                   | 3.1            | 2.6            | 1.8            | 1.1         | 0.83 | 0.66 | 0.33 | 0.13  |
| 28 | 21.2              | 32                             | 19.2               | 4.55              | 3.20                            | 2.18           | 0.85           |                   | 4.4            | 3.8            | 3.0            | 2.2         | 1.03 | 0.84 | 0.73 | 0.39  |
| 29 | 24.2              | 41                             | 20.5               | 7.30              | 6.29                            | 4.04           | 4.07           |                   | 5.5            | 4.8            | 4.0            | 3.0         | 1.32 | 1.31 | 1.01 | 1.36  |
| 33 | 14.8              | 23                             | 16.2               | 2.51              | 1.69                            | 0.72           | 0.13           |                   | 3.0            | 2.4            | 1.6            | 0.86        | 0.83 | 0.70 | 0.45 | 0.15  |
| 34 | 18.0              | 30                             | 16.7               | 3.53              | 2.93                            | 1.74           | 0.85           |                   | 3.8            | 3.1            | 2.4            | 1.5         | 0.93 | 0.95 | 0.73 | 0.57  |
| 36 | 24.2              | 33                             | 21.6               | 6.46              | 3.85                            | 2.51           | 1.43           |                   | 4.4            | 3.8            | 3.1            | 2.5         | 1.47 | 1.01 | 0.81 | 0.57  |
| 平均 |                   |                                |                    |                   |                                 |                |                |                   |                |                |                |             | 0.98 | 0.85 | 0.61 | 0.51  |

堤脚部の波圧を正しく推定すれば、うちあげ波頂高で波圧が0となる三角形分布により、のり面に作用する波圧を推定しても差しつかえないと思われる。

### 3.5 波圧により表のり被覆中に生じる応力の検討

堤防の表のり被覆に、以上述べたような波圧が作用した場合、被覆層中にどの程度の圧力が生じるか、また実際の堤防の安全性はどの程度のものであるかなどについて検討してみる。

通常の堤防は、堤体を土砂でつくり、その上をコンクリートなどで被覆する。表のり被覆は、基礎工、堤体、天ば工などで支持されており、力の伝達機構は単純なものではないと思われるが、ここでは、表のり被覆を一端ヒンジ、他端自由の弾性支持されたはりと考えて計算を進めることにする。

#### [1] 静荷重

まず、図-37に示すように、台形分布の波圧が、弾性支持ばりに作用する場合について考える。このような計算では次のような方法を用いる。(22)(図-38参照)

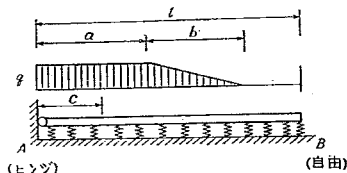


図-37 表のり被覆の計算モデル

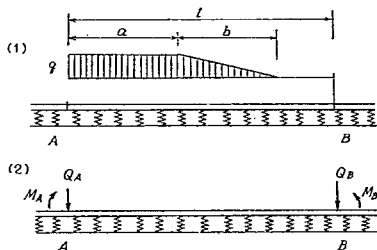


図-38 計算法の説明図

- (1) 無限に長いはりと考えて、与えられた波圧に対して A点とB点におけるたわみとモーメントを求める。
- (2) (1)の状態において、A点とB点に適切なモーメントとせん断力を作用させ、A点におけるたわみとモーメントを0とし、B点におけるモーメントとせん断力を0にする。
- (3) 与えられた波圧と、A点とB点におけるモーメント

とおよびせん断力から各点におけるたわみとモーメントを計算する。

(1)の状態におけるA点のたわみ ( $y_A'$ ) とモーメント ( $M_A'$ )、および、B点のモーメントと ( $M_B'$ )、せん断力 ( $Q_B'$ )は次式で与えられる。

$$y_A' = \frac{q}{2k} + \frac{q}{4b\beta^3} [\phi\{\beta(a+b)\} - \psi\{\beta a\}] \dots (18)$$

$$M_A' = \frac{q}{8b\beta^3} [\varphi\{\beta(a+b)\} - \varphi\{\beta a\}] \dots (19)$$

$$M_B' = \frac{q}{4\beta^2} \zeta(\beta\ell) + \frac{q}{4b\beta^3} [\varphi\{\beta(\ell-a)\} - \varphi\{\beta(\ell-a-b)\}] \dots (20)$$

$$Q_B' = \frac{q}{4\beta} \psi(\beta\ell) + \frac{q}{4b\beta^2} [\zeta\{\beta(\ell-a-b)\} - \zeta\{\beta(\ell-a)\}] \dots (21)$$

ここに、 $k$ : 堤体の地盤係数 ( $t/m^3$ )

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

$$\begin{cases} E: \text{コンクリートの弾性係数} \\ I: \text{断面2次モーメント} \end{cases} \dots (22)$$

$$\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \dots (23)$$

$$\psi(\beta x) = -e^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x) \dots (24)$$

$$\zeta(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x \dots (25)$$

次に、無限に長いはりにおいて、図-38に示すようにA点とB点に、 $M_A$ 、 $Q_A$ 、 $M_B$ 、 $Q_B$ が作用したとき、A点におけるたわみ ( $y_A''$ ) とモーメント ( $M_A''$ )、およびB点におけるモーメント ( $M_B''$ ) とせん断力 ( $Q_B''$ )は次式で表わされる。

$$y_A'' = \frac{Q_A \beta}{2k} + \frac{M_B \beta^2}{k} \zeta(\beta\ell) + \frac{Q_B \beta}{2k} \varphi(\beta\ell) \dots (26)$$

$$M_A'' = \frac{M_A}{2} + \frac{Q_A}{4\beta} + \frac{M_B}{2} \theta(\beta\ell) + \frac{Q_B}{4\beta} \psi(\beta\ell) \dots (27)$$

$$M_B'' = -\frac{M_A \beta}{2} + \frac{Q_A}{4\beta} + \frac{M_B}{2} \theta(\beta\ell) + \frac{Q_B}{4\beta} \psi(\beta\ell) \dots (28)$$

$$Q_B'' = -\frac{M_A \beta}{2} \varphi(\beta\ell) - \frac{Q_A}{2} \theta(\beta\ell) + \frac{M_B \beta}{2} + \frac{Q_A}{2} \dots (29)$$

ここに、 $\theta(\beta\ell) = e^{-\beta\ell} \cos \beta\ell \dots (30)$

$$y_A' + y_A'' = 0 \dots (31)$$

$$M_A' + M_A'' = 0 \dots (32)$$

$$M_B' + M_B'' = 0 \dots (33)$$

$$Q_B' + Q_B'' = 0 \dots (34)$$

とくと、 $M_A$ 、 $M_B$ 、 $Q_A$ 、 $Q_B$ に関する4元1次連立方程式が得られるので、これをとけば、 $M_A$ 、 $M_B$ 、 $Q_A$ 、 $Q_B$ の値が計算される。

これらの値が得られれば、次式によりはりの任意点 ( $c$ )におけるたわみ ( $y_c$ ) とモーメント ( $M_c$ )が計算され

る。

(1)  $0 \leq c \leq a$

$$y_c = \frac{Q_A \beta}{2h} \zeta(\beta c) + \frac{M_A \beta^2}{k} \zeta(\beta c) + \frac{Q_B \beta}{2k} \varphi\{\beta(\ell - c)\} + \frac{M_B \beta^2}{k} \zeta\{\beta(\ell - c)\} + \frac{q}{2k} [2 - \theta(\beta c)] \dots (35)$$

$$M_c = \frac{M_A}{2} \theta(\beta c) + \frac{M_B}{2} \theta\{\beta(\ell - c)\} + \frac{Q_A}{4\beta} \phi(\beta c) + \frac{Q_B}{4\beta} \phi\{\beta(\ell - c)\} + \frac{q}{4\beta^2} \zeta(\beta c) + \frac{q}{8b\beta^3} [\varphi\{\beta(a - c)\} - \varphi\{\beta(a + b - c)\}] \dots (36)$$

(2)  $a \leq c \leq a + b$

$$y_c = \frac{Q_A \beta}{2k} \varphi(\beta c) + \frac{M_A \beta^2}{k} \zeta(\beta c) + \frac{Q_B}{2k} \varphi\{\beta(\ell - c)\} + \frac{M_B \beta^2}{k} \zeta\{\beta(\ell - c)\} - \frac{q}{2k} \theta(\beta c) + \frac{q}{k} \cdot \frac{a + b - c}{b} + \frac{q}{4b\beta k} [\phi\{\beta(a + b - c)\} - \phi\{\beta(c - a)\}] \dots (37)$$

$$M_c = \frac{M_A}{2} \theta(\beta c) + \frac{M_B}{2} \theta\{\beta(\ell - c)\} + \frac{Q_A}{4\beta} \phi(\beta c) + \frac{Q_B}{4\beta} \phi\{\beta(\ell - c)\} + \frac{q}{4\beta^2} \zeta(\beta c)$$

$$+ \frac{q}{8b\beta^3} [\varphi\{\beta(c - a)\} - \varphi\{\beta(a + b - c)\}] \dots (38)$$

(3)  $a + b \leq c \leq \ell$

$$y_c = \frac{Q_A \beta}{2k} \varphi(\beta c) + \frac{M_A \beta^2}{k} \zeta(\beta c) + \frac{Q_B \beta}{2k} \varphi\{\beta(\ell - c)\} + \frac{M_B \beta^2}{k} \zeta\{\beta(\ell - c)\} - \frac{q}{2k} \theta(\beta c) - \frac{q}{4b\beta k} [\phi\{\beta(c - a)\} - \phi\{\beta(c - a - b)\}] \dots (39)$$

$$M_c = \frac{M_A}{2} \theta(\beta c) + \frac{M_B}{2} \theta\{\beta(\ell - c)\} + \frac{Q_A}{4\beta} \phi(\beta c) + \frac{Q_B}{4\beta} \phi\{\beta(\ell - c)\} + \frac{q}{4\beta^2} \zeta(\beta c) + \frac{q}{8b\beta^3} [\varphi\{\beta(c - a)\} - \varphi\{\beta(c - a - b)\}] \dots (40)$$

以上の諸式を用いて、一様部の波圧強度、被覆厚、堤体の地盤係数を種々変えて、たわみと曲げモーメントを計算し、さらに、曲げモーメントから被覆中に生じる応力を求めた。計算条件は表-13のとおりで、計算結果を表-14に示す。

この結果によると、地盤係数により応力はかなり異なる。コンクリートの許容曲げ引っ張り応力を10kg/cm<sup>2</sup>と

表-13 計 算 条 件

| No. | $\ell$<br>(m) | a<br>(m) | b<br>(m) | q<br>(t/m <sup>2</sup> ) | k<br>(t/m <sup>2</sup> ) | E<br>(t/m <sup>2</sup> ) | I<br>(m <sup>4</sup> ) | d<br>(m) |
|-----|---------------|----------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|----------|
| 1   | 10            | 4.0      | 3.0      | 10                       | 10 <sup>8</sup>          | 2.1×10 <sup>6</sup>      | 10 <sup>-2</sup>       | 0.5      |
| 2   | "             | "        | "        | "                        | 5×10 <sup>8</sup>        | "                        | "                      | "        |
| 3   | "             | "        | "        | "                        | 10 <sup>4</sup>          | "                        | "                      | "        |
| 4   | "             | "        | "        | "                        | 10 <sup>8</sup>          | "                        | 3.5×10 <sup>-2</sup>   | 0.75     |
| 5   | "             | "        | "        | "                        | "                        | "                        | 8.3×10 <sup>-2</sup>   | 1.0      |
| 6   | "             | "        | "        | "                        | "                        | "                        | 2.8×10 <sup>-1</sup>   | 1.5      |
| 7   | "             | "        | "        | 5                        | "                        | "                        | 10 <sup>-2</sup>       | 0.5      |
| 8   | "             | "        | "        | 2.5                      | "                        | "                        | "                      | "        |

表-14 計 算 結 果

| No. | $y_m$<br>(m) | $M_m$<br>(t-m) | $\sigma$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1   | 6.5          | 21.2           | 53.0                              |
| 2   | 1.8          | 8.24           | 20.6                              |
| 3   | 0.99         | 5.31           | 13.3                              |
| 4   | 4.5          | 35.4           | 37.9                              |
| 5   | 3.5          | 43.6           | 26.2                              |
| 6   | 4.0          | 49.9           | 13.4                              |
| 7   | 3.3          | 10.4           | 26.0                              |
| 8   | 1.6          | 5.2            | 13.0                              |

すると、 $k=1,000\text{t/m}^3$ では1~2t/m<sup>2</sup>の波圧に耐えう

るのみである。 $k=5,000\text{t/m}^3$ とすると、許容波圧は4~5t/m<sup>2</sup>、 $k=10,000\text{t/m}^3$ とすると7~8t/m<sup>2</sup>の波圧に耐えうることになる。 $k$ の値は明瞭でないが、一般の海岸堤防の場合、1m<sup>2</sup>当たり数トン程度の波圧は作用していると推定され、しかもその程度の波圧では破壊していないようなので、 $k$ の値は5,000t/m<sup>3</sup>程度は期待できるのであろう。

被覆厚を厚くすると当然応力は小さくなるが、これは $k$ の値が10<sup>8</sup>t/m<sup>3</sup>の場合で、この値が大きくなると、この計算ほど厚さの効果は表われてこない。

また、ケース1, 7, 8を比較すると、応力はほぼ荷重の減少に比例して小さくなっていることがわかる。

被覆中にどの程度の応力が発生したら危険なのかよくわからないので、この程度の計算では不十分であるが、地盤係数、端部の条件、被覆工の長さ、波圧分布などを種々変えて計算すれば、設計上相当参考になる資料が得られるであろう。

## 〔2〕動荷重

以上の取り扱いでは、波圧が静的に作用すると考えて応力を計算したが、波圧は時間的な変化が早いので、碎波圧の場合でも静荷重としての取り扱いでは不十分であることが考えられる。碎波衝撃圧が作用する場合は、傾斜堤として衝撃圧の緩和をはかることも一方法である。この場合、5分～1割堤としても、相当な波圧が作用することになるので、波圧の作用時間を考慮して、比較的急こう配の傾斜堤の設計の可能性を検討してみる必要がある。

図-39のように、最大値が $P_m$ で、時間的に三角形型

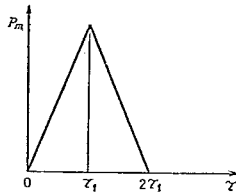


図-39 波圧の時間変化モデル

に変化する波圧を想定する。この場合、波圧分布は、碎波圧の場合は図-37と同じものとする。一方、碎波衝撃圧が作用する場合は、図-40のように、一様分布波圧と三角形分布波圧と同時に作用するものとする。

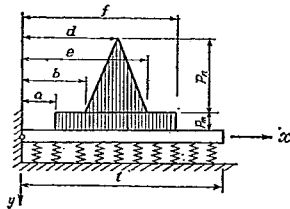


図-40 碎波衝撃圧分布モデル

必要な計算式は次のようにして導かれる。

- (1) 弾性支持されたはりの自由振動<sup>(23)</sup>

図-40のようにはりの自由振動は次式で表わされる。

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + ky = -\frac{A\gamma}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (41)$$

$$y = \sum X_i (A_i \cos p_i t + B_i \sin p_i t) \quad (42)$$

において、(41)式に代入すると、

$$\frac{d^4 X_i}{dx^4} = \alpha_i^4 X_i \quad (43)$$

ここに、

$$\alpha_i^4 = \frac{p_i^2}{a^2} - \frac{k}{EI}, \quad a^2 = \frac{gEI}{\gamma A} \quad (44)$$

上式の一般解は、

$$X_i = c_1 (\cos \alpha_i x + \cosh \alpha_i x) + c_2 (\cos \alpha_i x - \cosh \alpha_i x) + c_3 (\sin \alpha_i x + \sinh \alpha_i x) + c_4 (\sin \alpha_i x - \sinh \alpha_i x) \quad (45)$$

常数 $c_1 \sim c_4$ は境界条件から決められる。一端ヒンジ、一端自由の場合は、

$$x = 0, \quad X_i = 0, \quad \frac{d^2 X_i}{dx^2} = 0 \quad (46)$$

$$x = \ell, \quad \frac{d^2 X_i}{dx^2} = 0, \quad \frac{d^3 X_i}{dx^3} = 0 \quad (47)$$

以上の境界条件から常数を定めると、

$$X_i = c \{ \sin \alpha_i x - \sinh \alpha_i x + \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} (\sin \alpha_i x + \sinh \alpha_i x) \} \quad (48)$$

ここに、 $c$ は任意の常数であるが、一般に $\int_0^\ell X_i^2 \alpha_i dx = \ell$ となるように定められる。このようにして $c$ を決定すると、 $X_i$ は次式のようなになる。

$$X_i = \frac{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{2 \sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} \{ \sin \alpha_i x - \sinh \alpha_i x + \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} (\sin \alpha_i x + \sinh \alpha_i x) \} \quad (49)$$

また、 $\alpha_i$ は次式から決められる。

$$\tan \alpha_i \ell = \tanh \alpha_i \ell \quad (50)$$

上式をとくと、

$\alpha_1 \ell = 3.927, \alpha_2 \ell = 7.069, \alpha_3 \ell = 10.210, \alpha_4 \ell = 13.352$ などが得られる。

- (2) 強制振動<sup>(24)</sup>

図-41のように、 $x=c$ の点に集中荷重 $f(t)$ が作用す

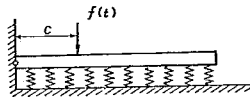


図-41 集中荷重による強制振動

る場合について考える。

この場合には、たわみを次式のように仮定する。

$$y = \sum \varphi_i X_i \quad (51)$$

ここに、 $\varphi_i$ は $t$ のみの関数であり、 $X_i$ は先に求めた正規関数で、 $x$ のみの関数である。

慣性力による仮設仕事、弾性力による仮設仕事、外力による仮設仕事を求め、その総和を0とすると、 $\varphi$ に関する微分方程式を求めることができる。

$$\ddot{\varphi}_i + p_i^2 \varphi_i = \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i \gamma A \ell} \cdot f(t) \dots \dots \dots (52)$$

これを解くと、

$$\varphi_i = A_i \cos p_i t + B_i \sin p_i t + \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i \gamma A \ell} \int_0^t f(t_i) \sin p_i (t-t_i) dt \dots \dots \dots (53)$$

ここに、 $A_i$ 、 $B_i$ は初期条件により決められる。

$f(t)$ を図-39のように三角形型とすると、

$$0 \leq \tau \leq \tau_1 \quad f(t) = \frac{P_n}{\tau_1} t \dots \dots \dots (54)$$

$$\tau_1 \leq \tau \leq 2\tau_1 \quad f(t) = \frac{P_n}{\tau_1} (\tau_1 - t) \dots \dots \dots (55)$$

$$\tau \geq 2\tau_1 \quad f(t) = 0 \dots \dots \dots (56)$$

ここに  $t$  は常に 0 と  $\tau_1$  の間の値をとる。初期条件として、

$$t = 0, \quad y = 0 \quad \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (57)$$

とすると、任意の点のたわみは次式ようになる。

(i)  $0 \leq \tau \leq \tau_1$

$$y = \Sigma X_i \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \left( t - \frac{\sin p_i t}{p_i} \right) \dots \dots \dots (58)$$

(ii)  $\tau_1 \leq \tau \leq 2\tau_1$

$$y = \Sigma X_i [A_i \cos p_i t + B_i \sin p_i t + \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \times \{ \tau_1 (1 - \cos p_i t) - (t - \frac{\sin p_i t}{p_i}) \}] \dots \dots \dots (59)$$

$$\text{ここに、} A_i = \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \left( \tau_1 - \frac{\sin p_i \tau_1}{p_i} \right) \dots \dots \dots (60)$$

$$B_i = \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} (1 - \cos p_i \tau_1) \dots \dots \dots (61)$$

(iii)  $\tau \geq 2\tau_1$

$$y = \Sigma X_i [C_i \cos p_i t + D_i \sin p_i t] \dots \dots \dots (62)$$

ここに、

$$C_i = A_i \cos p_i \tau_1 + B_i \sin p_i \tau_1 + \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \times \{ \tau_1 (1 - \cos p_i \tau_1) - (\tau_1 - \frac{\sin p_i \tau_1}{p_i}) \} \dots \dots \dots (63)$$

$$D_i = -A_i \sin p_i \tau_1 + B_i \cos p_i \tau_1 + \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \times \{ \tau_1 \sin p_i \tau_1 - \frac{1 - \cos p_i \tau_1}{p_i} \} \dots \dots \dots (64)$$

さらに、任意の点のモーメント  $M$  は

$$M = -EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dots \dots \dots (65)$$

で与えられるので、それぞれのたわみに対して、

(i)  $0 \leq \tau \leq \tau_1$

$$M = -EI \Sigma \ddot{X}_i \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \left( t - \frac{\sin p_i t}{p_i} \right) \dots \dots \dots (66)$$

ここに、

$$\ddot{X}_i = -\alpha_i^2 \frac{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{2 \sin \alpha_i \ell \cdot \sinh \alpha_i \ell} \{ \sin \alpha_i x + \sinh \alpha_i x$$

$$+ \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} (-\sin \alpha_i x - \sinh \alpha_i x) \} \dots \dots \dots (67)$$

(ii)  $\tau_1 \leq \tau \leq 2\tau_1$

$$M = -EI \Sigma \ddot{X}_i [A_i \cos p_i t + B_i \sin p_i t + \frac{(X_i)_{x=c} g}{p_i^2 \gamma A \ell} \cdot \frac{P_n}{\tau_1} \times \{ \tau_1 (1 - \cos p_i t) - (t - \frac{\sin p_i t}{p_i}) \}] \dots \dots \dots (68)$$

(iii)  $\tau \geq 2\tau_1$

$$M = -EI \Sigma \ddot{X}_i [C_i \cos p_i t + D_i \sin p_i t] \dots \dots \dots (69)$$

以上で集中荷重の場合のたわみとモーメントが求められたので、重ね合わせの原理が成り立つとすると、はりに沿うて波圧が分布している場合も、集中荷重の式を積分することにより求められる。

波圧分布として図-40のような形を考えると、 $x$  におけるたわみとモーメントは次式で与えられる。

$$0 \leq \tau \leq \tau_1, \quad 0 \leq t \leq \tau_1$$

$$y = \Sigma X_i \frac{g}{p_i^2 \gamma A \ell \tau_1} \left( t - \frac{\sin p_i t}{p_i} \right) \{ P_n (X_i)_{af} + \frac{P_n (CX)_{ise}}{d-b} \} \dots \dots \dots (70)$$

$$M = -EI \Sigma \ddot{X}_i \frac{g}{p_i^2 \gamma A \ell \tau_1} \left( t - \frac{\sin p_i t}{p_i} \right) \{ P_n (X_i)_{af} + \frac{P_n (CX)_{ise}}{d-b} \} \dots \dots \dots (71)$$

ここに、

$$(X_i)_{af} = \frac{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{2 \alpha_i \sin \alpha_i \ell \sinh \alpha_i \ell} \{ -\cos \alpha_i f - \cosh \alpha_i f + \cos \alpha_i a + \cosh \alpha_i a + \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} (-\cos \alpha_i f + \cosh \alpha_i f + \cos \alpha_i a - \cosh \alpha_i a) \} \dots \dots \dots (72)$$

$$(CX)_{ise} = \frac{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{2 \alpha_i^2 (d-b) \sin \alpha_i \ell \sinh \alpha_i \ell} \{ -2 \sin \alpha_i d - 2 \sinh \alpha_i d + \sin \alpha_i b + \sinh \alpha_i b + \sin \alpha_i e + \sinh \alpha_i e + \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} \times (-2 \sin \alpha_i d + 2 \sinh \alpha_i d + \sin \alpha_i b - \sinh \alpha_i b + \sin \alpha_i e - \sinh \alpha_i e) \} \dots \dots \dots (73)$$

これらの式を集中荷重の場合と比較すると、 $P_n(X_i)_{x=c}$  の項が、 $P_n(X_i)_{af} + P_n(CX)_{ise}/d-b$  に変わっているのみである。したがって、 $\tau_1 \leq \tau \leq 2\tau_1$ 、 $\tau \geq 2\tau_1$  の場合も、それぞれ、(59)、(62)、(68)、(69)において、 $P_n(X_i)_{x=c}$  の項を上述のように変えれば求める式が得られる。

次に、波圧分布が図-42のような場合について考える。

$$0 \leq \tau \leq \tau_1, \quad 0 \leq t \leq \tau_1$$

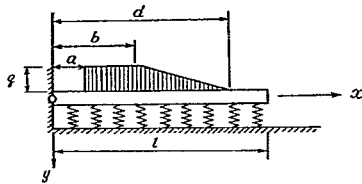


図-42 砕波圧分布モデル

$$y = \Sigma X_i \frac{g}{P_i^2 \gamma A \ell \tau_1} \left( t - \frac{\sin P_i t}{P_i} \right) \{ P_n(X_i)_{atd} \} \dots (74)$$

$$M = -EI \Sigma \ddot{X}_i \frac{g}{P_i^2 \gamma A \ell \tau_1} \left( t - \frac{\sin P_i t}{P_i} \right) \{ P_n(X_i)_{atd} \} \dots (75)$$

ここに,

$$\begin{aligned} (X_i)_{atd} = & \frac{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{2 \alpha_i \sin \alpha_i \ell \sinh \alpha_i \ell} \{ \cos \alpha_i a + \cosh \alpha_i a \\ & + \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} \{ \cos \alpha_i a - \cosh \alpha_i a \} \} \\ & + \frac{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{2 \alpha_i^2 (d-b) \sin \alpha_i \ell \sinh \alpha_i \ell} \{ -\sin \alpha_i d \\ & - \sinh \alpha_i d + \sin \alpha_i b + \sinh \alpha_i b \} \end{aligned}$$

(b) 計算 ケー ス

| ケースNo | A<br>(m <sup>2</sup> ) | I<br>(m <sup>4</sup> ) | k<br>(t/m <sup>3</sup> ) | $\tau_1$<br>(sec) | $\tau$<br>(sec) | d $\tau$<br>(sec) |
|-------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 1     | 0.5                    | 10 <sup>-2</sup>       | 5×10 <sup>3</sup>        | 0.01              | 0~0.04          | 0.002             |
| 2     | "                      | "                      | 10 <sup>4</sup>          | "                 | "               | "                 |
| 3     | "                      | "                      | 10 <sup>3</sup>          | "                 | "               | "                 |
| 4     | 1.0                    | 8.3×10 <sup>-2</sup>   | 5×10 <sup>3</sup>        | "                 | "               | "                 |
| 5     | 0.5                    | 10 <sup>-2</sup>       | "                        | 0.02              | 0~0.08          | 0.004             |
| 6     | "                      | "                      | "                        | 0.04              | 0~0.16          | 0.008             |
| 7     | "                      | "                      | "                        | 0.08              | 0~0.32          | 0.016             |

(c) 計算 結果

| ケース<br>No | y <sub>m</sub><br>(mm) | M <sub>n</sub><br>(t-m) | σ<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1         | 2.6                    | 12.7                    | 31.7                       |
| 2         | 1.5                    | 9.4                     | 23.7                       |
| 3         | 6.2                    | 24.1                    | 60.3                       |
| 4         | 1.4                    | 44.8                    | 26.4                       |
| 5         | 2.4                    | 13.4                    | 33.5                       |
| 6         | 2.0                    | 11.3                    | 28.2                       |
| 7         | 2.0                    | 12.0                    | 30.0                       |

この条件は波高3m程度の波が5分堤に衝撃圧を及ぼすような場合を想定している。図-43は5分堤に作用する波圧と作用時間の関係を示したものであ

$$\begin{aligned} & + \frac{\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell}{-\sin \alpha_i \ell + \sinh \alpha_i \ell} (-\sin \alpha_i d \\ & + \sinh \alpha_i d + \sin \alpha_i b - \sinh \alpha_i b) \} \dots (76) \end{aligned}$$

集中荷重の式と比較すると、 $P_n(X_i)_{x=c}$ が $P_n(X_i)_{atd}$ に変化しているのみである。したがって、 $\tau_1 \leq \tau \leq 2\tau_1$ 、 $\tau \geq 2\tau_1$ の場合も容易に求められる。

図-40のような砕波衝撃圧が作用した場合について、被覆中に生じる応力を計算してみる。計算に必要な常数および計算ケースは表-15(a)、(b)のとおりである。

表-15 衝撃圧が作用した場合の被覆内の応力

| (a) 計 算 常 数    |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| E              | 2.1×10 <sup>6</sup> t/m <sup>2</sup> |
| γ              | 2.2 t/m <sup>3</sup>                 |
| a              | 1 m                                  |
| b              | 2.5 "                                |
| d              | 4 "                                  |
| e              | 5.5 "                                |
| f              | 7 "                                  |
| ℓ              | 10 "                                 |
| P <sub>n</sub> | 5 t/m <sup>2</sup>                   |
| P <sub>n</sub> | 20 "                                 |

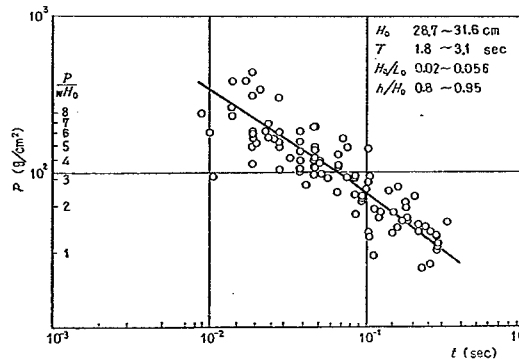


図-43 波圧強度と作用時間（5分堤）

る。これによると、 $P/WH_0$ が8程度の大きな圧力の作用時間は1/50~1/100sec程度である。この実験に用いた波高は約30cmなので、スケールを1/10と考えると、原型の作用時間は1/15~1/30sec程度と推定される。

ここでは、作用時間の影響を調べるため、作用時間を0.02sec~0.16secの範囲で変化させた。また、地盤係数は $10^3 \sim 10^4 \text{ t/m}^3$ とし、ケース4では被覆厚を1mにした場合を計算した。

計算結果を表-15(c)に示す。ケース1および5~7を比較すると、応力はいずれも30kg/cm<sup>2</sup>前後で大きな差異はなく、この程度の作用時間では、波圧の継続時間による差はあまりないことがわかる。これはこの振動系の基本振動数が約220c/sなので、応答が非常に早いためである。

地盤係数の影響は $10^3$ と $5 \times 10^3 \text{ t/m}^3$ の場合とでは相当に認められるが、それ以上大きくなってもその差は比較的小さい。また、被覆厚を倍にしても応力としては15%程度減少するにすぎない。

この結果を総合すると、作用時間が短いことによる応力の減少は期待できず、また、被覆厚の増加のみで応力を小さくすることも困難のようである。しかし、この程度の衝撃圧なら、引っ張り応力もあり大きくないので鉄筋により補強すれば十分設計可能であろう。また、のりこう配をさらにゆるくして1割こう配とすれば、同条件で $P_n$ が10t/m<sup>2</sup>程度になるので、設計はさらに容易になるであろう。

次に、図-37のような波圧分布で、これが動的に作用する場合について計算する。計算常数および計算ケースを表-16(a)および(b)に示す。 $P_n(q)$ が5t/m<sup>2</sup>となっている以外は静的な場合と同じである。作用時間の影響をみるため、4種の作用時間で計算を行なった。

計算結果は表-16(c)のとおりで、波圧の継続時間の最も短いケースのみがやや応力が大きい、その他の場

表-16 砕波圧(動荷重)が作用した場合の被覆内の応力  
(a) 計算 常 数

|        |                                 |
|--------|---------------------------------|
| $E$    | $2.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ |
| $I$    | $10^{-2} \text{ m}^4$           |
| $r$    | $2.2 \text{ t/m}^3$             |
| $A$    | $0.5 \text{ m}^2$               |
| $k$    | $5 \times 10^3 \text{ t/m}^3$   |
| $a$    | 0 m                             |
| $b$    | "                               |
| $d$    | 7 "                             |
| $\ell$ | 10 "                            |
| $P_n$  | 5 t/m <sup>2</sup>              |

(b) 計 算 ケ ー ス

| ケース No. | $\tau_1$<br>(sec) | $\tau$<br>(sec) | $\Delta \tau$<br>(sec) |
|---------|-------------------|-----------------|------------------------|
| 1       | 0.02              | 0~0.03          | 0.004                  |
| 2       | 0.04              | 0~0.16          | 0.008                  |
| 3       | 0.20              | 0~0.8           | 0.04                   |
| 4       | 0.50              | 0~2.0           | 0.1                    |

(c) 計 算 結 果

| ケース No. | $y_n$<br>(mm) | $M_n$<br>(t-m) | $\sigma$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|---------------|----------------|-----------------------------------|
| 1       | 0.96          | 4.6            | 11.5                              |
| 2       | 0.81          | 4.0            | 10.0                              |
| 3       | 0.76          | 4.1            | 10.2                              |
| 4       | 0.77          | 4.1            | 10.2                              |

合は、静的な計算値と同じである。静的な場合は $P_n$ を10t/m<sup>2</sup>としているので、表-14のケースと表-16(c)のケース2~4と比較すると、応力がちょうど半分になっており、作用時間が0.1secより長くなると、静的な場合と一致することがわかる。砕波圧の場合には、作用時間は0.1secより長いと推定されるので、動的な取り扱いをする必要はないことになる。

### 3.6 結 論

海岸堤防に作用する波圧、堤防の波圧の吸収機構などは非常に複雑なので、これらを十分に解明することは困難である。しかし、以上の研究により、これらの諸現象がかなり明らかにされたと思われる。研究のおもな成果を要約すると次のとおりである。

- (1) 砕波衝撃圧は、堤防が $h/H_0$ にして1.1~0.6の範囲に設置される場合に発生し、その最大値は沖波波高の数10倍に達する。この実験では、 $P/WH_0$ の最大値は49.5であった。しかし、のりこう配がゆるくなるにつれて、最大値は小さくなり、2割堤ではほとんど衝撃圧の発生は認められない。
- (2) 衝撃圧のピーク値が大きいほど作用時間は短く、すでに明らかにされているように、力積はほぼ一定である。
- (3) 最も大きな衝撃圧が作用するのは静水面付近に限られるが、 $P/WH_0$ にして10~20程度の波圧は静水面から水底まで相当広範囲に作用する。
- (4) 堤体の移動により、極端に大きな衝撃圧は緩和されるが、砂支持の場合、波圧作用時の変形は小さく、波圧は5割程度の減少をみたにすぎない。したがって、実際の堤防でも、堤体の変形による衝撃圧の減少はあまり期待できないと考えられる。
- (5) 消波工を設置することにより、衝撃圧は砕波圧と同程度まで減少する。

- (6) 堤防の設置水深が  $h/H_0$  にして 0.5 以下の場合には碎波圧が作用する。碎波圧は、堤防が汀線より海側にある場合は(6)式、汀線より陸側にある場合は(8)式で与えられる。
  - (7) 碎波圧の鉛直分布は、汀線より海側では台形分布、汀線より陸側では三角形分布をなす。台形分布の一樣部の高さは  $1.4h$  とする。また、波圧が 0 となる高さは、台形分布の場合は(6)式、三角形分布の場合は(8)式で与えられる。
  - (8) 5 分〜1 割の傾斜堤の最大碎波圧は、鉛直堤の最大波圧に  $\sin^2 \theta$  をかけて求められるが、2 割こう配の場合は、0.35 程度の係数をとるのが適当である。
  - (9) 波返しに作用する波圧を蒲原海岸堤防の模型実験結果により検討したところ、三角形分布から計算される波圧により表わしうることが見出された。
  - (10) 2 割堤の場合には、上部に正圧が作用していても、下部に揚圧力が作用する場合があることが認められた。揚圧力の合力の大きさは  $1/6wh^2 \sec \theta$  程度であるがこのような状態では表のりが破壊しやすいので注意する必要がある。
  - (11) 表のり被覆を弾性支持されたはり（一端ヒンジ、一端自由）と仮定して、碎波圧が静的に作用する場合について被覆中に生じる応力を検討した。その結果、被覆中の応力は、地盤係数により異なるが、地盤係数を  $5,000t/m^2$  と仮定すると、被覆圧 50cm の場合、許容圧力は  $4 \sim 5t/m^2$  程度である。
  - (12) 碎波圧の作用時間は 0.1sec 以上と推定されるので、波圧の時間変化を考慮して計算しても、その結果は静的な計算結果と一致する。
  - (13) 5 分堤を想定して、碎波衝撃圧が作用した場合の設計の可能性を検討したところ、沖波が 3 m の場合は一応設計可能と考えられる応力が得られる。
  - (14) この場合、振動系の基本振動数が 200c/s 以上なので、傾斜堤の衝撃圧の場合は、波圧を一定とすると、作用時間の長短による応力差はほとんど認められなかった。
- 今後の問題点としては、不規則波による波圧を検討する必要がある。また、どのような条件で堤防が破壊するかを調べなければならない。この点の現地模測などが必要であるが実際上は困難なので、機会があれば大型造波水路による模型実験で検討してみたいと考えている。

#### 参考文献

1. 合田良実、柿崎秀作「直横波における双峯型波圧の出現について」第12回海岸工学講演会講演集、1965
2. 本間仁、堀川清司、長谷直樹「護岸に働く波力について」第9回海岸工学講演会講演集、1962
3. 合田良実・原中祐人「衝撃碎波圧に関する一実験」港湾技研資料 No.32, 1967
4. Mitsuyasu, H "shock pressure of breaking wave", Proc 10th conf. coastal Eng., 1966
5. 前出 3.
6. 林泰造、服部昌太郎、林憲吉「碎波の波圧と力積」第5回海岸工学講演会講演集、1958
7. 前出 6.
8. 富永正照、伊藤生哲「海岸堤防に作用する波圧」土木研究所資料 No. 305, 1967
9. Bagnold, R. A. "Interim report on wave pressure research," Jour. Inst. Civil Eng. 1939. vol.12
10. 前出 3.
11. Lundgren, H. "Wave shock forces: An analysis of deformations and forces in the wave and in the foundation," Proc. symposium Research on wave action, 1969
12. Denny, D. F. "Further experiments on wave pressures", Jour. Inst. Civil Eng. 1951
13. Bowen, A. J., Inman D. L., and Simmons, V.P. "Wave set-down and set-up," Jour. Geoph. Res. Vol. 73. No. 8. 1968
14. 岩垣雄一、酒井哲郎「有限振幅波の shoaling について」第14回海岸工学講演会講演集、1967
15. Hunt, I. A. "Design of seawalls and breakwaters", U. S. Corps Eng., Lake Surv. Detroit, 1959
16. 福井芳朗、中村充、白石英彦、佐々木泰雄「堤防の津波対策に関する水理学的研究」農業土木試験場報告第1号、昭和38年2月
17. Beach Erosion Board "shore protection planning and design", Tech. Report No.4, 1961
18. 豊島修、富永正照、橋本宏「海岸堤防に関する研究(8). 波のうちあげ高」建設省土木研究所報告 No.131 1967
19. 細井正延、三井宏「碎波点より陸側にある堤防への波のうちあげ高」第9回海岸工学講演会講演集 昭和37年10月
20. Saville, T. Jr. "Wave run-up on composite slopes", Proc. 6th Conf. Coastal Eng., 1958
21. 富永正照、伊藤生哲「蒲原海岸模型実験報告書」土木研究所資料, No. 441. 1969
22. Timoshenko. S (北島 顕正, 片山健次訳「材料力学下巻」) P.1
23. Timoshenko. S (谷下市松, 渡辺茂訳)「工業振動学」P.297
24. 前出 21. P.333

## 第4章 消波工および根固工

### 目 次

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 4.1 序 説 .....                | 69  |
| 4.2 透過性構造物による波の減衰 .....      | 69  |
| (1) 微小振幅長波の減衰 .....          | 69  |
| (2) 礫および消波ブロックの抵抗特性 .....    | 71  |
| (3) 各種ブロックの消波効果の比較 .....     | 77  |
| 4.3 消波工の規模と消波効果 .....        | 77  |
| (1) 概 説 .....                | 77  |
| (2) 実験方法および実験条件 .....        | 77  |
| (3) 透過率とうちあげ高 .....          | 85  |
| (4) うちあげ高と越波量 .....          | 93  |
| 4.4 根固工法の検討 .....            | 93  |
| (1) フィルター材の粒径 .....          | 93  |
| (2) 捨石フィルターおよびマットレスの効果 ..... | 95  |
| (3) 大型模型実験による各種工法の比較検討 ..... | 97  |
| 4.5 結 論 .....                | 101 |

## 第4章 消波工および根固工

### 4.1 序 説

海岸堤防は一般に越波量が十分に小さくなるような高さにつくられるべきであるが、背後地の利用面から高さを制限したい場合、また、当初の堤防高が低すぎた場合、あるいは、堤体の沈下が著しい場合には、何等かの手段で越波量を制御する必要がある。このような場合、通常、堤防の前に消波工が設置される。消波工には、一般に異形ブロックが使用されるが、その消波機構が複雑で、消波工の規模と消波効果との関係が明らかでないため、重要な構造物については模型実験により消波工の規模が決定されている。しかし、多くの場合は、明確な指針がないまま経験的に消波工が設置されている状況である。

ここでは、簡単な理論解析とブロックの抵抗特性に関する水理実験から、各種消波ブロックの消波特性について若干の考察を加えるとともに、碎波領域を対象にして消波工の規模と効果との関係を明らかにするため、消波工による波の透過率、透過波と堤防への波のうちあげ高との関係を調べた。その結果、比較的大範囲の水理条件において、与えられた消波工の消波効果の見積りが可能となった。

前面洗掘による堤防の災害を防止するためには、まず基礎の根入れを十分に行なうことが考えられる。しかし、現段階では、洗掘量がよくわからないので、一般には、根入れは適当な深さに止め、その前に異形コンクリートブロックの根固工を設置することが多い。この方法の利点は、施工が容易であり、かつ、適切な重量のものを使用すれば波による散乱も小さいことである。また、沈下した場合でも、さらに上にブロックを補充することにより、容易にその機能維持をはかることができる。

以上の諸点から、この方法が一般的に用いられていると考えられるが、模型実験によると、波当りの強い場合は、砂の移動を防止する機能は小さく、堤防前面の洗掘量も、ブロックのある場合もない場合もほとんど差異はない。したがって、根入れが不十分な場合は堤体土の吸出を受ける恐れがある。また、ブロックの沈下も大きいので補充する数量も大きく、最終的には相当な経費を要することになる。

そこで、この欠点を補うためには、ブロックを直接砂の上に置かず、捨石、マットレスなどを敷いて、砂の移動、ブロックの沈下を防止することが考えられる。このような工法をとると、のり先の洗掘は防止されるが、根固工先端の洗掘が大きくなり、ブロックの海側への散乱

が大きくなる傾向がある。しかし、この点については、重量の大きいブロックを先端に設置することにより解決されるので、根固工法としてはもっとも適切なものと考えられる。

このような工法をとる場合、その粒径をどのように選定するか、また、マットレスと捨石との優劣、マットを用いた場合、透過性と不透透性とどちらが適切であるかなどの諸点が問題となる。ここでは、これらの諸点について検討し、具体的に根固工の設計指針を示すことにする。

### 4.2 透過性構造物による波の減衰

#### (1) 微小振幅長波の減衰

消波ブロック、礫などを主体にした透過性構造物内の波の運動に関しては、微小振幅表面波、長波などの理論を応用した解析<sup>(1),(2)</sup>が行なわれているが、微小振幅表面波による解析は取扱いが複雑となるので、ここでは、取扱いが簡単な長波理論により考察を進めることにする。

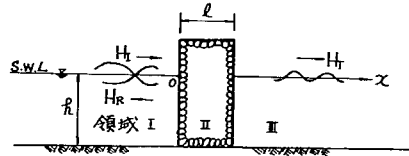


図-1 透過性構造物による波の変形

図-1のように、水深 $h$ の水平な海底に、幅 $l$ の鉛直な透過性構造物を設置した場合を考える。構造物を構成する材料の空隙率を $\lambda$ 、粒径を $d$ とする。構造物より沖側を領域I、構造物内を領域II、構造物より岸側を領域IIIと呼ぶことにする。

領域IIにおいては、波は透水体の抵抗を受けるので、図-1において、微小振幅長波の運動方程式はつぎのようになる。<sup>(3)</sup>

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{f}{d} |u|u \quad (1)$$

ここに、 $u$ :  $x$ 方向の断面平均流速

$\eta$ : 静水面上の波頂高

$f$ : 透水体の抵抗係数

$d$ : 透水体の代表径

$g$ : 重力の加速度

連続の方程式は、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -h \frac{\partial u}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式とを連立させて解を求めるわけであるが、(1)式中の抵抗項が流速の2乗に比例した形では、解析的な解を求めることができないので、抵抗項を線形化する必要がある。

抵抗項をつぎのようにおきかえることにする。

$$\frac{f}{d} |u| u = k u \quad \dots\dots\dots (3)$$

流速の変化を、 $u = u_0 \cos \omega t$  と仮定し、透水体の単位水平面積当り、1周期当りのエネルギー損失が、 $f/d|u|u$  の場合に等しくなるように  $k$  を定めると、

$$k = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{f}{d} \cdot u_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$u_0$  は透水体の各位置における最大流速であるから、場所によって変化する。したがって、 $k$  の値は透水体の各位置により異なることになる。

抵抗項に(3)式を用いると、運動方程式は線形化されて次のようになる。

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - k u \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2)式と(5)式とを解くと、領域Ⅱにおける流速変化、波形変化が求められる。

$\eta$ 、 $u$  が  $e^{i\sigma t}$  に比例すると仮定すると、(2)式と(5)式はつぎのように変形される。

$$i\sigma \eta = -\frac{\partial}{\partial x} (h u) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$i\sigma u = -g \lambda \frac{\partial \eta}{\partial x} - k \lambda u \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\sigma = 2\pi/T$  で、 $T$  は波の周期である。

(6)式と(7)式から

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K^2 u = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ここに、} K^2 = \frac{\sigma(\sigma - i k \lambda)}{g h \lambda} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$K = \alpha - i\beta \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\alpha = \frac{k \lambda \alpha_1}{\sqrt{2\sigma} \{ (\sigma^2 + k^2 \lambda^2)^{\frac{1}{2}} - \sigma \}^{\frac{1}{2}}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta = \frac{\alpha_1}{\sqrt{2\sigma} \{ (\sigma^2 + k^2 \lambda^2)^{\frac{1}{2}} - \sigma \}^{\frac{1}{2}}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{ここに、} \alpha_1^2 = \frac{\sigma^2}{g h \lambda} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(8)式の一級解を求めると、

$$u_2 = \frac{\sigma}{K h} (A_2 e^{-iKx} - B_2 e^{iKx}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $u_2$  : 領域Ⅱにおける流速

$A_2, B_2$  : 任意常数

(14) 式を(6)式に代入すると、

$$\eta_2 = A_2 e^{-iKx} + B_2 e^{iKx} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 $\eta_2$  : 領域Ⅱにおける波頂高

領域Ⅰにおいては、入射波と反射波とが存在し、領域Ⅲにおいては、透過波のみが存在するものとする、ⅠとⅢとでは、通常の長波理論より、流速と波形とが容易に求められる。

$$\eta_1 = A_1 e^{-i\alpha_0 x} + B_1 e^{i\alpha_0 x} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$u_1 = \frac{\sigma}{\alpha_0 h} (A_1 e^{i\alpha_0 x} - B_1 e^{-i\alpha_0 x}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $\eta_1, u_1$  : 領域Ⅰにおける波頂高と流速

$A_1, B_1$  : 任意常数

$$\alpha_0 = \frac{\sigma^2}{g h} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\eta_3 = A_3 e^{-i\alpha_0 x} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$u_3 = \frac{\sigma}{\alpha_0 h} A_3 e^{-i\alpha_0 x} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $\eta_3, u_3$  : 領域Ⅲにおける波頂高と流速

$A_3$  : 任意常数

(14)～(19) 中の任意常数は各領域における連続の条件より決定される。各境界において、水位と流速が連続するものとする、

$x = 0$  において、

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{\sigma}{\alpha_0} (A_1 - B_1) = \frac{\sigma}{K} (A_2 - B_2) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$x = \ell$  において、

$$A_2 e^{-iK\ell} + B_2 e^{iK\ell} = A_3 e^{-i\alpha_0 \ell} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{\sigma}{K} (A_2 e^{-iK\ell} - B_2 e^{iK\ell}) = \frac{\sigma}{\alpha_0} A_3 e^{-i\alpha_0 \ell} \quad \dots\dots\dots (23)$$

(20)～(23) において、 $A_1$  は既知であるから、残りの4個の常数を求めることができる。

$$B_1 = -\frac{(\alpha_0^2 - K^2)(e^{iK\ell} - e^{-iK\ell})}{(\alpha_0 + K)^2 e^{iK\ell} - (\alpha_0 - K)^2 e^{-iK\ell}} A_1 \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$A_2 = \frac{2K(\alpha_0 + K)e^{iK\ell}}{(\alpha_0 + K)^2 e^{iK\ell} - (\alpha_0 - K)^2 e^{-iK\ell}} A_1 \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$B_2 = \frac{2K(\alpha_0 + K)e^{-iK\ell}}{(\alpha_0 + K)^2 e^{iK\ell} - (\alpha_0 - K)^2 e^{-iK\ell}} A_1 \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$A_3 = \frac{4K\alpha_0 e^{i\alpha_0 \ell}}{(\alpha_0 + K)^2 e^{iK\ell} - (\alpha_0 - K)^2 e^{-iK\ell}} A_1 \quad \dots\dots\dots (27)$$

以上の諸式により、入射波と構造物の特性とが与えられれば、全領域の波の状況を知ることができる。しかし、

(4)式の中には、未知の流速が含まれているので、仮に  $f$  が与えられたとしても、 $u_0$ を仮定して計算を進めてゆかなければならない。また、 $u_0$ は場所により異なるので、ここでは、透水体の中央の流速を用いることにする。

後の計算に便利のように、 $x = \ell/2$  における流速と透過波高を求める式を導くことにする。

(14)に(25),(26)を代入すると、

$$u_2 = \frac{2\sigma A_1}{h} \cdot \frac{(\alpha_0 + K)e^{iK(\ell-K)} + (\alpha_0 - K)e^{-iK(\ell-x)}}{(\alpha_0 + K)^2 e^{iK\ell} - (\alpha_0 - K)^2 e^{-iK\ell}} \quad (28)$$

$x = \ell/2$  における  $u_2$  の絶対値を求めると、

$$|u_2|_{x=\ell/2} = \frac{2\sigma A_1}{h} \cdot \left( \frac{r^2 + s^2}{p^2 + q^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

ここに、

$$p = (a_1 e^{\beta\ell} - a_2 e^{-\beta\ell}) \cos \alpha\ell + (b_1 e^{\beta\ell} - b_2 e^{-\beta\ell}) \sin \alpha\ell \quad (30)$$

$$q = (a_1 e^{\beta\ell} - a_2 e^{-\beta\ell}) \sin \alpha\ell - (b_1 e^{\beta\ell} - b_2 e^{-\beta\ell}) \cos \alpha\ell \quad (31)$$

$$r = \left\{ (\alpha_0 + \alpha) e^{\frac{\beta\ell}{2}} + (\alpha_0 - \alpha) e^{-\frac{\beta\ell}{2}} \right\} \cos \frac{\alpha\ell}{2} + 2\beta \sin \frac{\alpha\ell}{2} \cos h \frac{\beta\ell}{2} \quad (32)$$

$$s = \left\{ (\alpha_0 + \alpha) e^{\frac{\beta\ell}{2}} - (\alpha_0 - \alpha) e^{-\frac{\beta\ell}{2}} \right\} \sin \frac{\alpha\ell}{2} - 2\beta \cos \frac{\alpha\ell}{2} \sin h \frac{\beta\ell}{2} \quad (33)$$

$$a_1 = (\alpha_0 + \alpha)^2 - \beta^2 \quad (34)$$

$$a_2 = (\alpha_0 - \alpha)^2 - \beta^2 \quad (35)$$

$$b_1 = 2\beta(\alpha_0 + \alpha) \quad (36)$$

$$b_2 = 2\beta(\alpha_0 - \alpha) \quad (37)$$

また、波の透過率は次式で与えられる。

$$\frac{|A_3|}{A_1} = \frac{4\alpha_0(\alpha^2 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}}{(p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (38)$$

## (2) 礫および消波ブロックの抵抗特性

透過性構造物による波の減衰状況を計算するためには、前節の(4)式からも明らかなように、透水体の抵抗係数を知る必要がある。このような構造物の水利的抵抗の表現法は、抵抗体モデル、管抵抗モデル、急拡縮モデル等が考えられているが<sup>(4)</sup>ここでは、管抵抗モデルを用いて、礫および消波ブロックの抵抗特性を求めてみる。

### (1) 礫の管抵抗モデル

(a) 透水体の構成粒径は均一であって、粒径  $d$  とする。

(b) 構成各粒は球形とみなされる。

(c) 各粒は等方的に詰め込まれているものとし、空隙率は  $\lambda$  とする。

以上の仮定にしたがって空隙の平均の大きさを求め、径深を計算してみる。

まず、一辺の長さ  $a$  の正方形断面をもった透水体を任意の断面で切断した場合、その切断面にあらわれる構成粒の個数を考えてみる。切断面には、大小各種の切断面があらわれるが、その断面は(b)の仮定よりすべて円形であるから、その平均の断面積を求めてみる。

$$A = a \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - x^2 \right] \quad (39)$$

切断面  $x$  は(c)の仮定により、等確率  $dx/d$  に分布するから、その期待できる平均の断面積  $\bar{A}$  はつぎようになる。

$$\bar{A} = 2 \int_0^{\frac{d}{2}} \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - x^2 \right] \pi \frac{dx}{d} = \frac{\pi}{6} d^2 \quad (40)$$

すなわち、その切断面における構成各粒の期待断面の直径は  $\sqrt{\frac{2}{3}} d$  となる。

$a \times a$  の断面において期待できる球の切断個数  $n$  はつぎのようになる。

$$\frac{\pi}{6} d^2 \times n = a^2 (1 - \lambda) \quad (41)$$

この切断面における空隙の総断面積を  $S$  とすると

$$S = a^2 \lambda \quad (42)$$

いま、球の切断個数  $n$  と空隙の数  $N$  との間に比例関係を設定すると、

$$N = mn \quad (43)$$

したがって、空隙一つ当りの平均面積  $S'$  は、

$$S' = \frac{S}{N} = \frac{\lambda}{m(1-\lambda)} \cdot \frac{\pi}{6} d^2 \quad (44)$$

切断面にあらわれる円の平均周長を  $L$  とすると、

$$L = \sqrt{\frac{2}{3}} \pi d \quad (45)$$

この周長を流体に接している潤辺長に等しいとすると、 $a \times a$  断面内における総潤辺長は  $n \times L$  であり、これが  $N = mn$  の空隙に接しているから、空隙一つ当りの潤辺長は、

$$\frac{nL}{N} = \frac{L}{m} \quad (46)$$

したがって、空隙一つの径深  $R_p$  は、

$$R_p = \frac{S'}{(L/m)} = \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{\sqrt{\frac{2}{3}}} \quad (47)$$

通常、管路の抵抗係数  $\xi'$ 、および透水体の抵抗係数  $\xi$  は  $d/h$  を損失水頭とするとつぎのように定義される。

$$dh = \xi' \cdot \frac{\ell}{4R} \cdot \frac{u_p^2}{2g} \quad (48)$$

$$dh = \xi \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (49)$$

透水体を空隙の連続した流管群として取り扱い、(47)式の $R_p$ を(48)式の $R$ に代入すると、空隙内の平均流速 $u_p$ は、

$$u_p = \left( \frac{8g}{\xi'} \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{6\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{dh}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (50)$$

したがって、流管1本当りの流量 $q_p$ 、および、全流量 $Q_p$ は、

$$q_p = u_p S' = \left( \frac{8g}{\xi'} \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{6\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{dh}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\lambda}{m(1-\lambda)} \cdot \frac{\pi}{6} d^2 \quad (51)$$

$$Q_p = mn q_p = \left( \frac{8g}{\xi'} \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{6\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{dh}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda a^2 \quad (52)$$

全断面の平均流速を求めると、

$$u = \frac{Q_p}{a^2} = \left( \frac{8g}{\xi'} \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{6\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{dh}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda \quad (53)$$

一方、(49)式より平均流速 $u$ を求めると、

$$u = \left( \frac{2gd}{\xi} \cdot \frac{dh}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

(53)式と(54)式とを等置すれば、

$$\xi = \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \cdot \xi' \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (55)$$

$\xi$ または $\xi'$ に関係すると考えられるレイノルズ数は、流管の流速と流管の大きさを代表する長さによるレイノルズ数をとるのが合理的と考えられる。(47)式と(50)式とからレイノルズ数 $Re$ をつくってみると、

$$Re = \frac{4R_p \cdot u_p}{\nu} = \frac{4}{\nu} \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{6\sqrt{\frac{2}{3}}} \left( \frac{8g}{\xi'} \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{d}{6\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{dh}{\ell} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (56)$$

(56)式中には、レイノルズ数の関数である $\xi'$ を含んでいるため、一義的には決めにくい。そこで、通常のレイノルズ数表示との関係をしらべてみる。

通常のレイノルズ数表示を、

$$Re' = \frac{ud}{\nu} \quad (57)$$

とすると、

$$\frac{Re'}{Re} = \frac{1}{1-\lambda} \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (58)$$

$$Re = \frac{1}{1-\lambda} \sqrt{\frac{2}{3}} Re' \propto \frac{ud}{(1-\lambda)\nu} \quad (59)$$

(55)式より

$$\frac{\lambda^3}{1-\lambda} \xi \propto \xi' = f(Re) \quad (60)$$

なる関係が得られるので、 $\xi \lambda^3 / (1-\lambda)$ と $ud / ((1-\lambda)\nu)$ との間には、ある関数関係にあることが考えられる。

以上の検討では均一粒径を仮定したが、実際の材料はある粒度分布をなすので、その場合の抵抗係数の算定に用いるべき代表径について考えてみる。

粒径 $d_i$ の全体に占める重量比を $W_i$ とすると、

$d_i$ に対応する個数は

$$N' = \frac{a^2(1-\lambda)}{\frac{\pi}{6} d_i^2} W_i \quad (61)$$

全体の個数は、

$$N = \frac{a^2(1-\lambda)}{\frac{\pi}{6}} \sum \frac{W_i}{d_i^2} \quad (62)$$

したがって、

$$\bar{d}^2 = \frac{1}{\sum \frac{W_i}{d_i^2}} \quad (63)$$

にとると、均一粒径の場合と同様の考察ができる。 $\bar{d}$ を等価直径と呼ぶことにする。

## (2) 礫の透水実験

礫の抵抗係数を求めるため、幅15mの水路内に図-2のような透水体の模型をつくり、透水実験を行なった。透水体は長さ2m、幅15m、高さ10mで閉水路で実験を実施した。実験に用いた礫の特性は表1のとおりである。また、混合砕石の粒度分布を示すと図-3のとおりである。

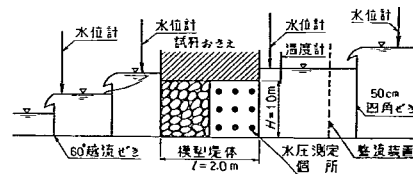


図-2 礫の透水実験装置

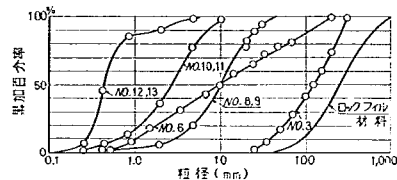


図-3 礫の粒度分布

表-1 実験に使用した礫の特性

| 実験番号  | 粒径 (公称) mm                                 | 等価粒径 $\bar{d}$ cm           | 空隙率   |
|-------|--------------------------------------------|-----------------------------|-------|
| Na 1  | 2号碎石 40~60 mm                              | 4.90                        | 0.465 |
| Na 2  | 100 mm 碎石                                  | 10.93                       | 0.445 |
| Na 3  | 碎石混合粒径<br>$d_{50}=120$ $d_{50}/d_{10}=3.3$ | 8.79                        | 0.383 |
| Na 4  | 1号 60~80 60%<br>5号 10~20 40%               | 2.30                        | 0.320 |
| Na 5  | 2号 40~60 70%<br>3号 30~40 30%               | 4.36                        | 0.433 |
| Na 6  | 混合粒径 $d_{50}=10.2$                         | 0.270                       | 0.240 |
| Na 7  | 40 mm 玉砂利                                  | 4.13                        | 0.361 |
| Na 8  | $d_{50}=2.6$ $d_{50}/d_{10}=4.1$           | 細粒部分の粒<br>度分布の開き            | 0.544 |
| Na 9  | "                                          | が大きく、正<br>確な計算が不            | 0.380 |
| Na 10 | $d_{50}=2.6$ $d_{50}/d_{10}=5.5$           | 可能 $\bar{d}=d_{50}$ で<br>代用 | 0.393 |
| Na 11 | "                                          |                             | 0.360 |
| Na 12 | $d_{50}=0.43$ $d_{50}/d_{10}=1.6$          |                             | 0.518 |
| Na 13 | "                                          |                             | 0.504 |

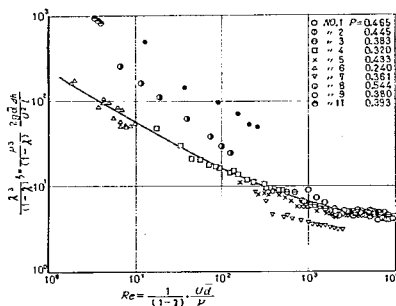


図-4 レイノルズ数による礫の抵抗係数の変化

実験結果を整理すると表-2 のとおりであり、これから、(60)式の形式で図示すると図-4 のようになる。碎石の場合は、大部分一本の曲線上にのることが認められる。しかし、Na 8~Na 13 の資料は、細粒分布の開きが大きく、 $\bar{d}$  の正確な計算が困難なため、 $d_{50}$  で代用させたので、抵抗係数がかなり大きくなっており、等価直径としてはもっと小さい粒径をとる必要があることを示している。また、玉砂利の場合は、明らかに抵抗係数が小さく、形状、表面状態の相違を考慮する必要のあることが認められる。

碎石についての実験式をつくると、つぎのようになる。

$$\frac{\lambda^3}{1-\lambda} \cdot \frac{2gd}{u^2} \cdot \frac{\Delta h}{\ell} = \frac{1000}{Re} + \frac{29.3}{\sqrt{Re}} + 4.3 \quad (64)$$

### (3) 消波ブロックの透水実験

(64)式の特徴は、空隙率と粒径の効果が分離された形で表示されていることである。この式を導くに当たっての主な仮定は、礫の各粒は球形とみなされ、等方的に詰め込まれているという点にあった。消波ブロックの形は複雑であり、必ずしも等方的に詰め込まれていないので、上記の理論を当てはめることには問題はあるが、ここでは、消波ブロックの場合にも拡張して適用し、それぞれのブロックの透水実験の結果から各ブロックの代表径を算出してみた。

実験施設は、図-2 の場合とほぼ同じであるが、規模がやや小さく、透水体部の長さ 1m、幅 60cm または 30cm、高さ 30cm である。この部分に異形ブロックを詰め込み、ゴムマットお

よび試料おさえをのせて、閉水路として実施した。

ブロックの重量は約 250g のものを用いたが、一部のものは縮尺効果の影響をみるために 500g のブロックを使用した。

ブロックの積み方は、層積と乱積との 2 種にした。層積の場合は、一般にもっともよく用いられる積み方を用いた。また、側面には切り欠いたブロックを入れて大きな空隙を生じないようにした。測定項目は、流量、水位差、空隙率、水温、ブロックの体積などで、ブロックの体積の算定は 20 個の平均をとった。使用ブロックの種類、および、体積は表-3 のとおりである。

実験結果を表-4 に示す。この結果から、 $u$ 、 $\ell$ 、 $\Delta h$ 、 $\lambda$ 、 $\nu$  を知って、礫の実験曲線 (64) 式に合うように代表径  $\bar{d}$  を求め、その平均値を表-5 に示す。

表-5 によれば、同一重量であれば、各ブロックとも代表径は大きなことがわかる。しかし、6脚ブロックのみは、他のブロックが乱積より層積の方が代表径が大きいのにに対して、乱積の方が大きく、他のブロックと傾向が異なっている。これは 6脚ブロックの層積はブロックの面と面との接触が多く、著しく透水を阻害することによるものと思われる。

代表径は長さの次元をもつものであるから、ブロックの寸法と比例的な関係にあるはずである。テトラポッドの 250g と 500g では、長さの比にすると、 $\sqrt[3]{V_2/V_1} = 1.267$  であり、それに対応する代表径の比も層積の場合  $7.77/6.25 = 1.243$ 、乱積の場合  $5.85/4.87 = 1.202$  とほぼ一致している。他のブロックについても同様である。乱積と層積の代表径の比  $d_2/d_1$  は同一ブロックでは重量が異なってもほぼ同一の値を示していて、層積と乱積で

表-2 透水に関する実験資料一覧表

| 実験<br>番号 | $\frac{\Delta h}{\ell}$ | $R'_e = \frac{U \bar{d}}{\nu}$ | $\xi = \frac{2g\bar{d}}{U^2} \cdot \frac{\Delta h}{\ell}$ | $\frac{1}{(1-\lambda)} R'_e$ | $\frac{\lambda^3}{(1-\lambda)} \xi$ |
|----------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| No. 1    | 0.00701                 | $5.43 \times 10^2$             | $4.82 \times 10^1$                                        | $1.016 \times 10^3$          | 9.07                                |
|          | 0.0082                  | 6.83 "                         | 3.914 "                                                   | 1.277 "                      | 7.37                                |
|          | 0.0108                  | 8.42 "                         | 3.310 "                                                   | 1.574 "                      | 6.38                                |
|          | 0.01937                 | $1.293 \times 10^3$            | 2.54 "                                                    | 2.415 "                      | 4.78                                |
|          | 0.03095                 | 1.589 "                        | 2.73 "                                                    | 2.970 "                      | 5.14                                |
|          | 0.0528                  | 2.050 "                        | 2.80 "                                                    | 3.830 "                      | 5.27                                |
|          | 0.0674                  | 2.425 "                        | 2.56 "                                                    | 4.530 "                      | 4.82                                |
|          | 0.0972                  | 2.738 "                        | 2.76 "                                                    | 5.100 "                      | 5.19                                |
|          | 0.1270                  | 3.131 "                        | 2.75 "                                                    | 5.850 "                      | 5.17                                |
|          | 0.1528                  | 3.488 "                        | 2.66 "                                                    | 6.520 "                      | 5.01                                |
|          | 0.1865                  | 3.700 "                        | 2.67 "                                                    | 6.920 "                      | 5.03                                |
| No. 2    | 0.2032                  | 4.064 "                        | 2.67 "                                                    | 7.600 "                      | 5.03                                |
|          | 0.000562                | $4.97 \times 10^2$             | $4.25 \times 10^1$                                        | $8.95 \times 10^2$           | 6.74                                |
|          | 0.000625                | 5.50 "                         | 3.84 "                                                    | 9.90 "                       | 6.07                                |
|          | 0.001187                | 9.15 "                         | 3.38 "                                                    | $1.650 \times 10^3$          | 5.20                                |
|          | 0.00162                 | $1.110 \times 10^3$            | 3.08 "                                                    | 1.985 "                      | 4.82                                |
|          | 0.00200                 | 1.176 "                        | 3.10 "                                                    | 2.120 "                      | 4.72                                |
|          | 0.00638                 | 1.887 "                        | 2.99 "                                                    | 3.420 "                      | 4.73                                |
|          | 0.01582                 | 2.935 "                        | 2.98 "                                                    | 5.290 "                      | 4.71                                |
|          | 0.02763                 | 4.040 "                        | 2.76 "                                                    | 7.260 "                      | 4.35                                |
|          | 0.0403                  | 4.910 "                        | 2.70 "                                                    | 8.850 "                      | 4.28                                |
|          | 0.0624                  | 6.040 "                        | 2.63 "                                                    | 1.087 "                      | 4.18                                |
| No. 3    | 0.0963                  | 7.590 "                        | 2.64 "                                                    | 1.367 "                      | 4.21                                |
|          | 0.1227                  | 8.730 "                        | 2.72 "                                                    | 1.573 "                      | 4.13                                |
|          | 0.001182                | $3.36 \times 10^2$             | $9.85 \times 10^1$                                        | $5.46 \times 10^2$           | 8.89                                |
|          | 0.00180                 | 4.25 "                         | 9.63 "                                                    | 6.90 "                       | 8.74                                |
|          | 0.00228                 | 5.44 "                         | 7.34 "                                                    | 8.83 "                       | 6.79                                |
|          | 0.00290                 | 6.50 "                         | 6.62 "                                                    | $1.054 \times 10^3$          | 6.03                                |
|          | 0.00395                 | 7.37 "                         | 6.81 "                                                    | 1.196 "                      | 6.21                                |
|          | 0.00576                 | 8.24 "                         | 5.86 "                                                    | 1.527 "                      | 5.44                                |
|          | 0.01375                 | 1.337 "                        | 5.98 "                                                    | 2.170 "                      | 5.46                                |
|          | 0.0355                  | 2.170 "                        | 5.54 "                                                    | 3.540 "                      | 5.06                                |
|          | 0.0685                  | 3.045 "                        | 5.54 "                                                    | 4.940 "                      | 4.97                                |
| No. 4    | 0.1123                  | 4.190 "                        | 5.28 "                                                    | 6.800 "                      | 4.82                                |
|          | 0.1623                  | 4.910 "                        | 5.25 "                                                    | 7.970 "                      | 4.79                                |
|          | 0.1914                  | 5.210 "                        | 5.14 "                                                    | 8.450 "                      | 4.69                                |
|          | 0.00185                 | $1.19 \times 10^1$             | $1.304 \times 10^3$                                       | $1.754 \times 10^1$          | $4.85 \times 10^1$                  |
|          | 0.00350                 | 2.22 "                         | $8.05 \times 10^2$                                        | 3.27 "                       | 2.995 "                             |
|          | 0.00504                 | 3.07 "                         | 5.69 "                                                    | 4.52 "                       | 2.118 "                             |
|          | 0.01130                 | 4.77 "                         | 4.81 "                                                    | 7.02 "                       | 1.791 "                             |
|          | 0.02095                 | 6.63 "                         | 4.33 "                                                    | 9.76 "                       | 1.612 "                             |
|          | 0.0319                  | 9.23 "                         | 3.75 "                                                    | $1.358 \times 10^2$          | 1.397 "                             |
|          | 0.04475                 | $1.353 \times 10^2$            | 3.21 "                                                    | 1.993 "                      | 1.195 "                             |
|          | 0.0711                  | 1.654 "                        | 2.86 "                                                    | 2.435 "                      | 1.065 "                             |
| No. 4    | 0.1033                  | 2.21 "                         | 2.62 "                                                    | 3.255 "                      | 9.76                                |
|          | 0.1372                  | 2.52 "                         | 2.44 "                                                    | 3.71 "                       | 9.09                                |

| 实验<br>番号 | $\frac{\Delta h}{\ell}$ | $R'_e = \frac{U \bar{d}}{\nu}$ | $\xi = \frac{2g\bar{d}}{U^2} \frac{\Delta h}{\ell}$ | $\frac{1}{(1-\lambda)} R'_e$ | $\frac{\lambda^3}{(1-\lambda)} \xi$ |
|----------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
|          | 0.1790                  | $3.05 \times 10^2$             | $2.32 \times 10^2$                                  | $4.89 \times 10^2$           | 8.64                                |
|          | 0.2073                  | 3.30 "                         | 2.34 "                                              | 4.86 "                       | 8.71                                |
| No. 5    | 0.00060                 | $9.5 \times 10^1$              | $7.47 \times 10^1$                                  | $1.68 \times 10^2$           | $1.07 \times 10^1$                  |
|          | 0.00100                 | $1.47 \times 10^2$             | 5.61 "                                              | 2.60 "                       | 8.03                                |
|          | 0.0027                  | 2.00 "                         | 5.60 "                                              | 3.53 "                       | 8.02                                |
|          | 0.00375                 | 2.61 "                         | 5.51 "                                              | 4.61 "                       | 7.89                                |
|          | 0.0049                  | 3.07 "                         | 5.21 "                                              | 5.41 "                       | 7.46                                |
|          | 0.0078                  | 4.24 "                         | 4.06 "                                              | 7.45 "                       | 5.81                                |
|          | 0.0106                  | 5.22 "                         | 4.06 "                                              | 9.21 "                       | 5.81                                |
|          | 0.0228                  | 7.21 "                         | 3.58 "                                              | $1.272 \times 10^3$          | 5.13                                |
|          | 0.0518                  | $1.020 \times 10^3$            | 3.38 "                                              | 1.800 "                      | 4.84                                |
|          | 0.0944                  | 1.404 "                        | 3.27 "                                              | 2.480 "                      | 4.68                                |
|          | 0.1464                  | 1.725 "                        | 3.26 "                                              | 3.045 "                      | 4.67                                |
|          | 0.1958                  | 2.140 "                        | 3.20 "                                              | 3.770 "                      | 4.58                                |
| No. 6    | 0.02580                 | 1.37                           | $9.102 \times 10^3$                                 | 1.80                         | $1.638 \times 10^2$                 |
|          | 0.03685                 | 1.53                           | 9.750 "                                             | 2.01                         | 1.755 "                             |
|          | 0.06510                 | 2.83                           | 4.784 "                                             | 3.72                         | $8.613 \times 10^1$                 |
|          | 0.09265                 | 4.16                           | 3.404 "                                             | 5.47                         | 6.12 "                              |
|          | 0.1050                  | 3.29                           | 5.788 "                                             | 4.33                         | $1.042 \times 10^2$                 |
|          | 0.1233                  | 3.70                           | 5.344 "                                             | 4.87                         | $9.619 \times 10^1$                 |
|          | 0.1381                  | 5.62                           | 2.789 "                                             | 7.40                         | 5.021 "                             |
|          | 0.15365                 | 5.12                           | 3.214 "                                             | 6.74                         | 5.785 "                             |
|          | 0.1927                  | 4.94                           | 4.721 "                                             | 6.50                         | 8.498 "                             |
|          | 0.20425                 | 5.26                           | 4.503 "                                             | 6.92                         | 8.107 "                             |
|          | 0.2144                  | 6.75                           | 2.808 "                                             | 8.88                         | 5.055 "                             |
|          | 0.2522                  | 7.36                           | 3.026 "                                             | 9.69                         | 5.448 "                             |
| No. 7    | 0.00387                 | $1.600 \times 10^2$            | $1.141 \times 10^2$                                 | $2.50 \times 10^2$           | 8.40                                |
|          | 0.00531                 | 2.036 "                        | $9.39 \times 10^1$                                  | 3.18 "                       | 6.91                                |
|          | 0.00706                 | 2.945 "                        | 6.30 "                                              | 4.61 "                       | 4.64                                |
|          | 0.01156                 | 3.66 "                         | 6.32 "                                              | 5.93 "                       | 4.65                                |
|          | 0.02268                 | 5.23 "                         | 5.44 "                                              | 8.18 "                       | 4.05                                |
|          | 0.03300                 | 6.49 "                         | 5.13 "                                              | $1.015 \times 10^3$          | 3.78                                |
|          | 0.0450                  | 7.31 "                         | 4.88 "                                              | 1.142 "                      | 3.59                                |
|          | 0.061                   | 8.35 "                         | 4.96 "                                              | 1.305 "                      | 3.65                                |
|          | 0.0881                  | $1.027 \times 10^3$            | 4.71 "                                              | 1.597 "                      | 3.47                                |
|          | 0.1086                  | 1.158 "                        | 4.54 "                                              | 1.805 "                      | 3.34                                |
|          | 0.1520                  | 1.462 "                        | 4.39 "                                              | 2.285 "                      | 3.23                                |
|          | 0.1878                  | 1.636 "                        | 4.32 "                                              | 2.560 "                      | 3.18                                |
| No. 8    | 0.005                   | 5.74                           | $1.41 \times 10^3$                                  | $1.26 \times 10$             | $4.98 \times 10^2$                  |
|          | 0.006                   | 5.89                           | 1.60 "                                              | 1.29 "                       | 5.65 "                              |
|          | 0.013                   | $1.68 \times 10$               | $4.06 \times 10^2$                                  | 3.68 "                       | 1.43 "                              |
|          | 0.051                   | 4.11 "                         | 2.80 "                                              | 9.01 "                       | 9.88 "                              |
|          | 0.133                   | 6.90 "                         | 2.01 "                                              | $1.51 \times 10^2$           | 7.10 "                              |
|          | 0.147                   | 9.47 "                         | 1.51 "                                              | 2.08 "                       | 5.33 "                              |
|          | 0.207                   | $1.16 \times 10^2$             | 1.42 "                                              | 2.54 "                       | 5.01 "                              |

| 实验<br>序号 | $\frac{\Delta h}{\ell}$ | $R'_c = \frac{U d_{50}}{\nu}$ | $\xi = \frac{2g d_{50}}{U^2} \frac{\Delta h}{\ell}$ | $\frac{1}{1-\lambda} R'_c$ | $\frac{\lambda^3}{1-\lambda} \xi$ |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 8        | 0.005                   | 5.74                          | $1.41 \times 10^3$                                  | $1.26 \times 10$           | $4.98 \times 10^2$                |
|          | 0.006                   | 5.89                          | 1.60 "                                              | 1.29 "                     | 5.65 "                            |
|          | 0.013                   | $1.68 \times 10$              | $4.06 \times 10^2$                                  | 3.68 "                     | 1.43 "                            |
|          | 0.051                   | 4.16 "                        | 2.80 "                                              | 9.01 "                     | $9.88 \times 10$                  |
|          | 0.013                   | 6.90 "                        | 2.01 "                                              | $1.51 \times 10^2$         | 7.10 "                            |
|          | 0.147                   | 9.47 "                        | 1.51 "                                              | 2.08 "                     | 5.33 "                            |
|          | 0.207                   | $1.16 \times 10^2$            | 1.42 "                                              | 2.54 "                     | 5.01 "                            |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |
| 9        | 0.006                   | 4.12                          | $2.90 \times 10^3$                                  | 6.65                       | $2.58 \times 10^2$                |
|          | 0.011                   | 7.02                          | 1.83 "                                              | $1.13 \times 10$           | 1.63 "                            |
|          | 0.021                   | $1.17 \times 10$              | 1.25 "                                              | 1.89 "                     | 1.11 "                            |
|          | 0.051                   | 2.48 "                        | $6.81 \times 10^2$                                  | 4.00 "                     | $6.06 \times 10$                  |
|          | 0.101                   | 4.55 "                        | 4.21 "                                              | 7.34 "                     | 3.75 "                            |
|          | 0.147                   | 6.19 "                        | 3.31 "                                              | 9.98 "                     | 2.95 "                            |
|          | 0.191                   | 7.70 "                        | 2.78 "                                              | $1.24 \times 10^2$         | 2.47 "                            |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |
| 10       | 0.008                   | $1.03 \times 10^{-2}$         | $1.86 \times 10^7$                                  | $1.70 \times 10^{-2}$      | $1.86 \times 10^6$                |
|          | 0.013                   | 1.78 "                        | 1.01 "                                              | 2.93 "                     | 1.01 "                            |
|          | 0.041                   | 6.21 "                        | $2.79 \times 10^6$                                  | $1.02 \times 10^{-1}$      | $2.79 \times 10^5$                |
|          | 0.052                   | 7.97 "                        | 2.15 "                                              | 1.31 "                     | 2.15 "                            |
|          | 0.101                   | 1.70 "                        | 1.09 "                                              | 2.80 "                     | 1.09 "                            |
|          | 0.201                   | 3.69 "                        | 4.82 "                                              | 6.08 "                     | $4.82 \times 10^4$                |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |
| 11       | 0.006                   | $3.34 \times 10^{-2}$         | $1.56 \times 10^6$                                  | $5.22 \times 10^{-2}$      | $1.14 \times 10^5$                |
|          | 0.021                   | $1.55 \times 10^{-1}$         | $2.83 \times 10^5$                                  | $2.42 \times 10^{-1}$      | $2.06 \times 10^4$                |
|          | 0.102                   | 9.22 "                        | $5.00 \times 10^4$                                  | 1.44                       | $3.65 \times 10^3$                |
|          | 0.202                   | 1.97 "                        | 1.94 "                                              | 3.08                       | 1.41 "                            |
|          | 0.015                   | $1.34 \times 10^{-1}$         | $2.57 \times 10^5$                                  | $2.09 \times 10^{-1}$      | $1.87 \times 10^4$                |
|          | 0.039                   | 4.62 "                        | $6.29 \times 10^4$                                  | 7.22 "                     | $4.59 \times 10^3$                |
|          | 0.071                   | 9.08 "                        | 3.28 "                                              | 1.42                       | $2.39 \times 10^3$                |
|          | 0.090                   | 1.17 "                        | 2.58 "                                              | 1.83                       | 1.88 "                            |
|          | 0.121                   | 1.54 "                        | 1.94 "                                              | 2.41                       | 1.41 "                            |
|          | 0.139                   | 1.81 "                        | 1.62 "                                              | 2.83                       | 1.18 "                            |
|          | 0.170                   | 2.21 "                        | 1.32 "                                              | 3.45                       | $9.62 \times 10^2$                |
|          | 0.190                   | 2.49 "                        | 1.16 "                                              | 3.89                       | 8.46 "                            |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |
| 12       | 0.005                   | $4.17 \times 10^{-4}$         | $1.74 \times 10^7$                                  | $8.65 \times 10^{-4}$      | $5.01 \times 10^6$                |
|          | 0.012                   | $1.53 \times 10^{-3}$         | $3.31 \times 10^6$                                  | $3.17 \times 10^{-3}$      | $9.53 \times 10^5$                |
|          | 0.029                   | 4.59 "                        | $9.46 \times 10^5$                                  | 9.52 "                     | 2.72 "                            |
|          | 0.054                   | $1.21 \times 10^{-2}$         | 2.35 "                                              | $2.51 \times 10^{-2}$      | $7.29 \times 10^4$                |
|          | 0.099                   | 1.84 "                        | 2.24 "                                              | 3.82 "                     | 6.45 "                            |
|          | 0.141                   | 2.94 "                        | 1.38 "                                              | 6.10 "                     | 3.97 "                            |
|          | 0.198                   | 4.10 "                        | 1.01 "                                              | 8.51 "                     | 2.91 "                            |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |
| 13       | 0.016                   | $1.54 \times 10^{-3}$         | $4.07 \times 10^6$                                  | $3.10 \times 10^{-3}$      | $1.05 \times 10^6$                |
|          | 0.031                   | 3.39 "                        | 1.63 "                                              | 6.83 "                     | $4.21 \times 10^5$                |
|          | 0.042                   | 4.95 "                        | 1.11 "                                              | 9.98 "                     | 2.86 "                            |
|          | 0.061                   | 7.80 "                        | $6.51 \times 10^5$                                  | $1.57 \times 10^{-2}$      | 1.68 "                            |
|          | 0.020                   | 2.21 "                        | $2.35 \times 10^6$                                  | $4.46 \times 10^{-3}$      | 6.06 "                            |
|          | 0.081                   | $1.08 \times 10^{-2}$         | $4.52 \times 10^5$                                  | $2.18 \times 10^{-2}$      | 1.17 "                            |
|          | 0.102                   | 1.51 "                        | 3.26 "                                              | 3.04 "                     | $8.41 \times 10^4$                |
|          | 0.125                   | 1.82 "                        | 2.75 "                                              | 3.67 "                     | 7.01 "                            |
|          | 0.143                   | 2.16 "                        | 2.35 "                                              | 4.35 "                     | 6.06 "                            |
|          | 0.163                   | 2.51 "                        | 1.99 "                                              | 5.06 "                     | 5.13 "                            |
|          | 0.180                   | 2.84 "                        | 1.77 "                                              | 5.73 "                     | 4.57 "                            |
|          | 0.201                   | 3.24 "                        | 1.51 "                                              | 6.53 "                     | 3.90 "                            |
|          |                         |                               |                                                     |                            |                                   |

表-3 実験に用いたブロックの種類と体積

| 消波ブロックの種類 | 体積 ( $V_1$ )<br>250 g | 体積 ( $V_2$ )<br>500 g | $(\frac{V_2}{V_1})^{\frac{1}{3}}$ |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| テトラポッド    | 99.17 $cm^3$          | 218.60                | 1.267                             |
| 6脚        | 108.43                | 196.51                | 1.220                             |
| 中空三角      | 104.13                | 209.90                | 1.263                             |
| ホロースケアー   | 114.08                |                       |                                   |
| 三連        | 146.02                |                       |                                   |

は代表径の異なることがわかる。テトラポッドは他のブロックに比べて多少代表径が大きいようである。

### [3] 各種ブロックの消波効果の比較

表-5により各種ブロックの消波効果がある程度推定しうるのであるが、代表径と空隙率との兼ね合となるので、消波効果をもう少しはっきりさせるために、適当な水理条件の下に、各種ブロックで同一の規模につくった消波工を設定し、その透過率を(38)式を用いて計算してみる。

設定条件は、海底こう配 1/30、消波工のり先水深10 cmとし、沖波の波形こう配が0.02と0.06となるよう波高、周期を定めた。実験の結果、水深10 cmにおける波高は、周期2 secの場合7.8 cm、周期1 secの場合5.5 cmなので、この波高、周期を入射波の波高、周期とした。

計算に用いたブロックは、テトラポッド、6脚、中空三角、三連、ホロースケアーの5種類で、重量は約250 gである。積み方は乱積および層積とする。

消波工の長さ(上辺と下辺との平均値)は波形こう配0.02の場合は36.8 cm、0.06の場合は29.8 cmである。また、後出の実験値との比較のため、ブロックの長さとの比を求めると、波形こう配0.02の場合2.05、0.06の場合1.86となっている。全計算ケースは、ブロック5種類、積み方2、波の数2で、合計20ケースである。

各ケースについての計算結果は表-6のとおりである。この表をみると、テトラポッド乱積の場合の透過率は、0.173と0.255であるが、後に出てくる図-8からわかるように、計算値は実験値の1/2程度である。この差は波が崩れ波の状態で消波工に衝突するので、線形長波理論を当てはめることに問題のあること、消波工前面が鉛直でないことなどが原因と考えられる。したがって、この計算では透過率を十分な精度で求められないが、各種ブロックの効果の比較という点では一応の意味を有すると期待される。

各種ブロックの透過率を比較すると、乱積の場合は、代表径と空隙率からも予想されるように、ホロースケアーのみが透過率がやや大きく、他の4種のブロックについては、透過率はあまり変わらない。一方、層積の場合は

とくに6脚ブロックの透過率が小さく、他の4種のブロックの場合はあまり変わらないことがわかる。

以上の結果からみて、各種ブロックの抵抗特性を、表-5の代表径と空隙率で評価する限り、層積における6脚ブロック、乱積におけるホロースケアーを除いて、各種ブロックの消波効果に著しい差はないと考えてよさう。

また、表-6から多少ではあるが各種ブロックの特性がうかがわれる。例えば、テトラポッド、中空三角の場合、乱積でも層積でもその効果の差は小さいが、6脚ブロック、三連ブロック、ホロースケアーは、積み方により消波効果に若干の差がみられる。

## 4.3 消波工の規模と消波効果

### (1) 概説

通常の海岸堤防の場合、設置水深は比較的小さいので波は砕波してから堤防に衝突するが多い。したがって、ここでも、砕波領域における消波工の効果について検討する。

砕波領域においては、波は段波状になるので、堤防への波のうちあげ高の見積りには、近似的に段波理論が適用される。したがって、消波工がある場合でも、堤防がない場合の透過波から、段波理論により計算される反射波頂高は堤防のうちあげ高とかなり近い値であることが考えられる。もしこのことが確かめられれば、消波工による砕波の透過率を知れば、任意の条件における消波工の効果を推定することができよう。

以上の見地から、砕波領域における波の変形、消波構造物による砕波の透過率、消波工をもった堤防への波のうちあげ高、越波量などを模型実験により測定し、これらの結果を組合せて、任意の消波工の効果を推定する方法を検討してみる。

### (2) 実験方法および実験条件

実験に使用した水路は、長さ35 m、幅0.6 m、高さ1.5 mの造波水路と、長さ5.0 m、幅0.8 m、高さ1.5 mの造波水路である。これらの水路の一端に、図-5に示すように、1/10および1/30の海底こう配をつくり、その上に、種々の消波工、堤防を設置して実験を行なった。

測定項目は、自然海浜における砕波帯の波高および波頂高の変化状況、消波工による透過波高、水位上昇量、堤防への波のうちあげ高、越波量などである。

消波ブロックは主として約250 gのテトラポッドを用いたが、一部の試験では、約110 gのテトラポッドおよび約250 gの6脚ブロックを用いた。各ブロックの実重量と体積は表-7のとおりである。テトラポッドの積み方は下層の1~2層は層積に近いが、全体としては乱積

表-4 ブロックの透水実験資料一覧表

| 実験<br>番号 | 使<br>用<br>方<br>法 | 空<br>率<br>% | 流<br>積<br>cm <sup>3</sup> | 流<br>量<br>ℓ/sec | 水<br>位<br>差<br>cm | 透<br>水<br>体<br>の<br>長<br>さ<br>(cm) | 水<br>温<br>(°C) | 実験<br>番号 | 使<br>用<br>方<br>法 | 空<br>率<br>% | 流<br>積<br>cm <sup>3</sup> | 流<br>量<br>ℓ/sec | 水<br>位<br>差<br>cm | 透<br>水<br>体<br>の<br>長<br>さ<br>(cm) | 水<br>温<br>(°C) |
|----------|------------------|-------------|---------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|----------------|----------|------------------|-------------|---------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|----------------|
| 1        | 中空三角             | 54.1        | 568                       | 6.69            | 7.84              | 100                                | 10             | 45       | 六脚               | 53.0        | 372                       | 4.12            | 18.84             | 100                                | 10             |
| 2        | 250 $\phi$       |             |                           | 6.77            | 7.48              |                                    |                | 46       | 250 $\phi$       |             |                           | 3.85            | 17.13             |                                    |                |
| 3        | 層積               |             |                           | 5.18            | 5.04              |                                    |                | 47       | 層積               |             |                           | 2.68            | 9.48              |                                    |                |
| 4        |                  |             |                           | 2.27            | 1.30              |                                    |                | 48       |                  |             |                           | 1.86            | 4.37              |                                    |                |
| 5        |                  |             |                           | 3.73            | 2.80              |                                    |                | 49       |                  |             |                           | 1.14            | 2.64              |                                    |                |
| 6        |                  |             |                           | 10.54           | 16.40             |                                    |                | 50       |                  |             |                           | 0.53            | 1.06              |                                    |                |
| 7        |                  |             |                           | 10.32           | 15.63             |                                    |                | 51       |                  |             |                           | 1.01            | 2.22              |                                    |                |
| 8        |                  |             |                           | 7.43            | 8.78              |                                    |                | 52       |                  |             |                           | 1.10            | 2.46              |                                    |                |
| 9        |                  |             |                           | 5.08            | 4.73              |                                    |                | 53       |                  |             |                           | 1.56            | 4.02              |                                    |                |
| 10       |                  |             |                           | 1.92            | 1.39              |                                    |                | 54       |                  |             |                           | 2.00            | 5.83              |                                    |                |
| 11       |                  |             |                           | 0.70            | 0.53              |                                    |                | 55       |                  |             |                           | 2.46            | 7.92              |                                    |                |
| 12       |                  |             |                           | 2.03            | 1.40              |                                    |                | 56       |                  |             |                           | 1.53            | 3.99              |                                    |                |
| 13       |                  |             |                           | 1.87            | 1.19              |                                    |                | 57       |                  |             |                           | 1.56            | 3.91              |                                    |                |
| 14       |                  |             |                           | 1.81            | 1.16              |                                    |                | 58       | 六脚               | 62.1        | 540                       | 6.41            | 4.89              | 100                                | 8.1            |
| 15       |                  |             |                           | 0.66            | 0.48              |                                    |                | 59       | 250 $\phi$       |             |                           | 5.39            | 3.52              |                                    |                |
| 16       |                  |             |                           | 0.61            | 0.41              |                                    |                | 60       | 乱積               |             |                           | 4.41            | 2.49              |                                    |                |
| 17       | テトラポッド           | 48.4        | 465                       | 6.49            | 6.19              | 100                                | 10.3           | 61       |                  |             |                           | 2.17            | 1.49              |                                    |                |
| 18       | 250 $\phi$       |             |                           | 5.21            | 4.44              |                                    |                | 62       |                  |             |                           | 1.58            | 0.50              |                                    |                |
| 19       | 層積               |             |                           | 3.54            | 2.34              |                                    |                | 63       |                  |             |                           | 1.08            | 0.22              |                                    |                |
| 20       |                  |             |                           | 2.26            | 1.17              |                                    |                | 64       |                  |             |                           | 0.34            | 0.02              |                                    |                |
| 21       |                  |             |                           | 1.60            | 0.68              |                                    |                | 65       |                  |             |                           | 1.69            | 0.45              |                                    |                |
| 22       |                  |             |                           | 0.84            | 0.33              |                                    |                | 66       |                  |             |                           | 2.39            | 0.80              |                                    |                |
| 23       |                  |             |                           | 0.85            | 0.36              |                                    |                | 67       |                  |             |                           | 3.22            | 1.90              |                                    |                |
| 24       |                  |             |                           | 0.84            | 0.26              |                                    |                | 68       |                  |             |                           | 4.12            | 2.14              |                                    |                |
| 25       |                  |             |                           | 1.82            | 0.76              |                                    |                | 69       |                  |             |                           | 4.83            | 2.85              |                                    |                |
| 26       |                  |             |                           | 2.93            | 1.52              |                                    |                | 70       |                  |             |                           | 2.79            | 1.09              |                                    |                |
| 27       |                  |             |                           | 3.76            | 2.19              |                                    |                | 71       |                  |             |                           | 1.74            | 0.79              |                                    |                |
| 28       |                  |             |                           | 4.32            | 2.63              |                                    |                | 72       |                  |             |                           | 1.68            | 0.49              |                                    |                |
| 29       |                  |             |                           | 5.16            | 3.86              |                                    |                | 73       | 六脚               | 61.2        | 1193                      | 6.09            | 1.28              | 100                                | 7.5            |
| 30       |                  |             |                           | 5.91            | 5.09              |                                    |                | 74       | 500              |             |                           | 5.59            | 1.02              |                                    |                |
| 31       | 六脚               | 50.9        | 886                       | 5.54            | 5.14              | 100                                | 9.8            | 75       | 乱積               |             |                           | 4.91            | 0.83              |                                    |                |
| 32       | 500 r            |             |                           | 5.75            | 5.25              |                                    |                | 76       |                  |             |                           | 4.26            | 0.65              |                                    |                |
| 33       | 層積               |             |                           | 4.76            | 3.86              |                                    |                | 77       |                  |             |                           | 3.26            | 0.36              |                                    |                |
| 34       |                  |             |                           | 3.40            | 2.70              |                                    |                | 78       |                  |             |                           | 2.76            | 0.26              |                                    |                |
| 35       |                  |             |                           | 2.97            | 1.75              |                                    |                | 79       |                  |             |                           | 1.92            | 0.13              |                                    |                |
| 36       |                  |             |                           | 2.09            | 1.00              |                                    |                | 80       |                  |             |                           | 1.50            | 0.08              |                                    |                |
| 37       |                  |             |                           | 1.53            | 0.60              |                                    |                | 81       |                  |             |                           | 0.93            | 0.02              |                                    |                |
| 38       |                  |             |                           | 0.85            | 0.26              |                                    |                | 82       |                  |             |                           | 1.84            | 0.10              |                                    |                |
| 39       |                  |             |                           | 1.34            | 0.49              |                                    |                | 83       |                  |             |                           | 2.27            | 0.18              |                                    |                |
| 40       |                  |             |                           | 2.42            | 1.28              |                                    |                | 84       |                  |             |                           | 2.76            | 0.20              |                                    |                |
| 41       |                  |             |                           | 2.82            | 1.68              |                                    |                | 85       |                  |             |                           | 3.52            | 0.31              |                                    |                |
| 42       |                  |             |                           | 3.81            | 2.58              |                                    |                | 86       |                  |             |                           | 4.72            | 0.56              |                                    |                |
| 43       |                  |             |                           | 4.41            | 3.38              |                                    |                | 87       |                  |             |                           | 5.25            | 0.70              |                                    |                |
| 44       |                  |             |                           | 5.44            | 4.72              |                                    |                |          |                  |             |                           |                 |                   |                                    |                |

(表-4のつづき)

| 実験<br>番号 | 使<br>用<br>ブロックと<br>積み方 | 空隙率<br>% | 流 積<br>cm <sup>3</sup> | 流 量<br>l/sec | 水位差<br>cm | 透水体<br>の長さ<br>(m) | 水 温<br>(°C) | 実験<br>番号 | 使<br>用<br>ブロックと<br>積み方 | 空隙率<br>% | 流 積<br>cm <sup>3</sup> | 流 量<br>l/sec | 水位差<br>cm | 透水体<br>の長さ<br>(m) | 水 温<br>(°C) |
|----------|------------------------|----------|------------------------|--------------|-----------|-------------------|-------------|----------|------------------------|----------|------------------------|--------------|-----------|-------------------|-------------|
| 88       | 中空三角                   | 61.8     | 779                    | 4.17         | 1.73      | 100               | 6.5         | 127      | テトラ                    | 49.7     | 313                    | 2.04         | 0.88      | 100               | 6.0         |
| 89       | 250 $\phi$             |          |                        | 2.57         | 0.74      |                   |             | 128      | 500 $\phi$             |          |                        | 2.46         | 1.24      |                   |             |
| 90       | 乱 積                    |          |                        | 2.11         | 0.51      |                   |             | 129      | 層 積                    |          |                        | 2.79         | 1.52      |                   |             |
| 91       |                        |          |                        | 1.69         | 0.37      |                   |             | 130      |                        |          |                        | 3.29         | 1.94      |                   |             |
| 92       |                        |          |                        | 1.34         | 0.22      |                   |             | 131      |                        |          |                        | 0.66         | 0.15      |                   |             |
| 93       |                        |          |                        | 0.73         | 0.06      |                   |             | 132      | テトラ                    | 54.7     | 386                    | 1.16         | 0.33      | 100               | 7.0         |
| 94       |                        |          |                        | 1.20         | 0.18      |                   |             | 133      | 500 $\phi$             |          |                        | 2.17         | 0.86      |                   |             |
| 95       |                        |          |                        | 1.67         | 0.36      |                   |             | 134      | 乱 積                    |          |                        | 2.50         | 1.15      |                   |             |
| 96       |                        |          |                        | 1.86         | 0.41      |                   |             | 135      |                        |          |                        | 1.65         | 0.56      |                   |             |
| 97       |                        |          |                        | 2.39         | 0.48      |                   | 7.0         | 136      |                        |          |                        | 1.36         | 0.43      |                   |             |
| 98       |                        |          |                        | 2.64         | 0.76      |                   |             | 137      |                        |          |                        | 0.97         | 0.26      |                   |             |
| 99       |                        |          |                        | 3.21         | 1.07      |                   |             | 138      |                        |          |                        | 1.87         | 0.69      |                   |             |
| 100      |                        |          |                        | 3.76         | 1.38      |                   |             | 139      |                        |          |                        | 2.21         | 0.87      |                   |             |
| 101      |                        |          |                        | 4.45         | 1.87      |                   |             | 140      |                        |          |                        | 2.68         | 1.24      |                   |             |
| 102      | テトラ                    | 51.1     | 521                    | 8.12         | 6.11      | 100               | 7.0         | 141      |                        |          |                        | 3.21         | 1.63      |                   |             |
| 103      | 250 $\phi$             |          |                        | 4.55         | 2.15      |                   |             | 142      |                        |          |                        | 2.69         | 1.18      |                   |             |
| 104      | 乱 積                    |          |                        | 2.24         | 0.64      |                   |             | 143      |                        |          |                        | 2.51         | 1.03      |                   |             |
| 105      |                        |          |                        | 1.56         | 0.33      |                   |             | 144      |                        |          |                        | 0.56         | 0.11      |                   |             |
| 106      |                        |          |                        | 1.21         | 0.19      |                   |             | 145      |                        |          |                        | 2.40         | 1.02      |                   |             |
| 107      |                        |          |                        | 0.90         | 0.13      |                   |             | 146      | 三連ブロック                 | 41       | 610                    | 1.49         | 2.30      | 110               | 18          |
| 108      |                        |          |                        | 0.65         | 0.03      |                   |             | 147      | 250 $\phi$             |          |                        | 1.91         | 3.49      |                   |             |
| 109      |                        |          |                        | 1.16         | 0.17      |                   |             | 148      | 層 積                    |          |                        | 1.85         | 3.34      |                   |             |
| 110      |                        |          |                        | 1.59         | 0.30      |                   |             | 149      |                        |          |                        | 2.38         | 6.05      |                   |             |
| 111      |                        |          |                        | 2.08         | 0.50      |                   |             | 150      |                        |          |                        | 2.63         | 6.08      |                   |             |
| 112      |                        |          |                        | 2.66         | 0.72      |                   |             | 151      |                        |          |                        | 3.11         | 7.90      |                   |             |
| 113      |                        |          |                        | 3.21         | 0.99      |                   |             | 152      |                        |          |                        | 3.45         | 9.13      |                   |             |
| 114      |                        |          |                        | 2.44         | 0.59      |                   |             | 153      |                        |          |                        | 3.86         | 11.25     |                   |             |
| 115      |                        |          |                        | 1.18         | 0.22      |                   |             | 154      |                        |          |                        | 4.39         | 14.01     |                   |             |
| 116      |                        |          |                        | 2.53         | 0.80      |                   |             | 155      |                        |          |                        | 4.80         | 16.29     |                   |             |
| 117      |                        |          |                        | 2.94         | 1.03      |                   |             | 156      |                        |          |                        | 5.00         | 17.93     |                   |             |
| 118      | テトラ                    | 49.7     | 313                    | 1.06         | 0.32      | 100               | 6.0         | 157      |                        |          |                        | 5.70         | 21.63     |                   |             |
| 119      | 500 $\phi$             |          |                        | 2.23         | 1.09      |                   |             | 158      |                        |          |                        | 6.10         | 24.87     |                   |             |
| 120      | 層 積                    |          |                        | 2.25         | 1.10      |                   |             | 159      | 三連ブロック                 | 55.8     | 840                    | 1.38         | 0.44      | 110               | 19          |
| 121      |                        |          |                        | 3.08         | 1.84      |                   |             | 160      | 乱 積                    |          |                        | 2.74         | 0.95      |                   |             |
| 122      |                        |          |                        | 2.65         | 1.40      |                   |             | 161      | 250 $\phi$             |          |                        | 2.75         | 1.39      |                   |             |
| 123      |                        |          |                        | 1.99         | 0.88      |                   |             | 162      |                        |          |                        | 3.47         | 2.12      |                   |             |
| 124      |                        |          |                        | 1.46         | 0.52      |                   |             | 163      |                        |          |                        | 4.47         | 4.08      |                   |             |
| 125      |                        |          |                        | 1.14         | 0.37      |                   |             | 164      |                        |          |                        | 6.49         | 6.92      |                   |             |
| 126      |                        |          |                        | 0.76         | 0.22      |                   |             | 165      |                        |          |                        | 7.35         | 8.48      |                   |             |

(表-4のつづき)

| 実験<br>番号 | 使<br>用<br>ブロックと<br>積み方 | 空隙率<br>% | 流 積<br>cm <sup>3</sup> | 流 量<br>ℓ/sec | 水位差<br>cm | 透水体<br>の長さ<br>(cm) | 水 温<br>(°C) | 実験<br>番号 | 使<br>用<br>ブロックと<br>積み方 | 空隙率<br>% | 流 積<br>cm <sup>3</sup> | 流 量<br>ℓ/sec | 水位差<br>cm | 透水体<br>の長さ<br>(cm) | 水 温<br>(°C) |
|----------|------------------------|----------|------------------------|--------------|-----------|--------------------|-------------|----------|------------------------|----------|------------------------|--------------|-----------|--------------------|-------------|
| 166      |                        |          |                        | 7.92         | 8.70      |                    |             | 205      |                        |          |                        | 17.95        | 4.75      |                    |             |
| 167      |                        |          |                        | 8.36         | 8.63      |                    |             | 206      |                        |          |                        | 21.00        | 6.05      |                    |             |
| 168      |                        |          |                        | 9.10         | 12.24     |                    |             | 207      |                        |          |                        | 25.40        | 8.20      |                    |             |
| 169      |                        |          |                        | 10.34        | 15.94     |                    |             | 208      | 乱 積                    | 40       | 2280                   | 5.80         | 0.77      | 95                 | 13          |
| 170      |                        |          |                        | 11.73        | 19.61     |                    |             | 209      |                        |          |                        | 8.48         | 1.28      |                    |             |
| 171      |                        |          |                        | 13.26        | 23.74     |                    |             | 210      |                        |          |                        | 10.15        | 1.78      |                    |             |
| 172      | ホロースケー<br>(乱 積)        | 63.3     | 450                    | 1.56         | 1.03      | 97                 | 17          | 211      |                        |          |                        | 11.52        | 2.28      |                    |             |
| 173      | 264φ                   |          |                        | 1.56         | 0.93      |                    |             | 212      |                        |          |                        | 13.84        | 3.31      |                    |             |
| 174      |                        |          |                        | 2.14         | 1.56      |                    |             | 213      |                        |          |                        | 15.64        | 3.85      |                    |             |
| 175      |                        |          |                        | 2.76         | 2.41      |                    |             | 214      |                        |          |                        | 17.43        | 4.63      |                    |             |
| 176      |                        |          |                        | 3.14         | 2.97      |                    |             | 215      |                        |          |                        | 17.93        | 5.08      |                    |             |
| 177      |                        |          |                        | 3.94         | 4.35      |                    |             | 216      |                        |          |                        | 21.40        | 7.23      |                    |             |
| 178      |                        |          |                        | 5.08         | 6.95      |                    |             | 217      |                        |          |                        | 24.40        | 8.71      |                    |             |
| 179      |                        |          |                        | 5.26         | 7.65      |                    |             | 218      |                        |          |                        | 25.40        | 10.49     |                    |             |
| 180      |                        |          |                        | 5.50         | 8.20      |                    |             | 219      | 中空三角                   | 55       | 570                    | 1.23         | 1.06      | 110                | 10          |
| 181      |                        |          |                        | 5.75         | 10.56     |                    |             | 220      | 乱 積                    |          |                        | 2.15         | 2.51      |                    |             |
| 182      |                        |          |                        | 6.78         | 11.87     |                    |             | 221      | 460φ                   |          |                        | 2.55         | 3.16      |                    |             |
| 183      |                        |          |                        | 7.92         | 16.01     |                    |             | 222      |                        |          |                        | 3.65         | 4.61      |                    |             |
| 184      |                        |          |                        | 9.24         | 20.28     |                    |             | 223      |                        |          |                        | 4.06         | 7.86      |                    |             |
| 185      |                        |          |                        | 10.52        | 26.46     |                    |             | 224      |                        |          |                        | 5.39         | 10.81     |                    |             |
| 186      | ホロースケー<br>(層 積)        | 49.4     | 345                    | 0.91         | 0.95      | 94                 | 17          | 225      |                        |          |                        | 6.28         | 13.46     |                    |             |
| 187      | 264φ                   |          |                        | 1.56         | 2.66      |                    |             | 226      |                        |          |                        | 7.09         | 17.61     |                    |             |
| 188      |                        |          |                        | 1.97         | 3.87      |                    |             | 227      |                        |          |                        | 7.93         | 21.26     |                    |             |
| 189      |                        |          |                        | 2.72         | 6.74      |                    |             | 228      |                        |          |                        | 8.84         | 25.76     |                    |             |
| 190      |                        |          |                        | 3.37         | 9.98      |                    |             | 229      |                        |          |                        | 0.71         | 0.51      |                    |             |
| 191      |                        |          |                        | 3.65         | 11.20     |                    |             | 230      |                        |          |                        | 1.50         | 1.16      |                    |             |
| 192      |                        |          |                        | 4.36         | 14.89     |                    |             | 231      | (層 積)                  | 51       | 570                    | 1.36         | 0.96      | 100                | 12          |
| 193      |                        |          |                        | 4.73         | 17.37     |                    |             | 232      |                        |          |                        | 2.27         | 2.11      |                    |             |
| 194      |                        |          |                        | 5.22         | 20.42     |                    |             | 233      |                        |          |                        | 2.90         | 2.96      |                    |             |
| 195      |                        |          |                        | 5.87         | 24.70     |                    |             | 234      |                        |          |                        | 4.06         | 5.21      |                    |             |
| 196      | テトラポット                 | 45       | 2340                   | 6.71         | 0.80      | 100                | 13          | 235      |                        |          |                        | 4.63         | 6.56      |                    |             |
| 197      | 1700φ                  |          |                        | 7.35         | 0.92      |                    |             | 236      |                        |          |                        | 5.18         | 8.16      |                    |             |
| 198      | 層 積                    |          |                        | 9.25         | 1.40      |                    |             | 237      |                        |          |                        | 5.76         | 9.76      |                    |             |
| 199      |                        |          |                        | 10.15        | 1.60      |                    |             | 238      |                        |          |                        | 6.10         | 10.66     |                    |             |
| 200      |                        |          |                        | 10.70        | 0.98      |                    |             | 239      |                        |          |                        | 8.13         | 18.23     |                    |             |
| 201      |                        |          |                        | 11.95        | 2.16      |                    |             | 240      |                        |          |                        | 8.48         | 18.96     |                    |             |
| 202      |                        |          |                        | 12.95        | 2.65      |                    |             | 241      |                        |          |                        | 9.53         | 23.78     |                    |             |
| 203      |                        |          |                        | 12.95        | 2.83      |                    |             | 242      |                        |          |                        | 11.10        | 28.81     |                    |             |
| 204      |                        |          |                        | 15.24        | 3.50      |                    |             |          |                        |          |                        |              |           |                    |             |

表-5 ブロックの代表径と空隙率

| 消波ブロックの種<br>類    | 積み方   | 空隙率  | 代表径(d)<br>(cm) | $\frac{d_2}{d_1}$ |
|------------------|-------|------|----------------|-------------------|
| テトラポッド<br>(250g) | 層 積   | 0.48 | $d_1 = 6.25$   | 0.78              |
|                  | 乱 積   | 0.51 | $d_2 = 4.87$   |                   |
| 6<br>(250g)      | 脚 層 積 | 0.53 | 1.20           | 2.54              |
|                  | 乱 積   | 0.62 | 3.05           |                   |
| 中空三角<br>(250g)   | 層 積   | 0.54 | 3.43           | 0.62              |
|                  | 乱 積   | 0.62 | 2.12           |                   |
| テトラポッド<br>(500g) | 層 積   | 0.49 | 7.77           | 0.75              |
|                  | 乱 積   | 0.55 | 5.85           |                   |
| 6<br>(500g)      | 脚 層 積 | 0.51 | 1.77           | 2.03              |
|                  | 乱 積   | 0.61 | 3.59           |                   |
| 中空三角<br>(460g)   | 層 積   | 0.51 | 4.46           | 0.61              |
|                  | 乱 積   | 0.55 | 2.71           |                   |
| ホロスケーヤ<br>(263g) | 層 積   | 0.49 | 7.69           | 0.75              |
|                  | 乱 積   | 0.63 | 5.78           |                   |
| 三<br>(307g)      | 層 積   | 0.41 | 6.69           | 0.77              |
|                  | 乱 積   | 0.56 | 5.16           |                   |

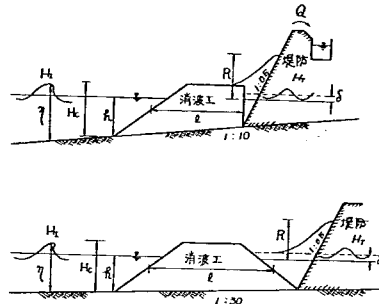


図-5 消波工実験装置の概要

消波工背後の水位上昇高も測定したが、これには、サイフォンとマンノメーターを組合せて測定した。水位上昇は10波程度では一定となるので、それ以後の一定値を上昇量として読みとった。

海底こう配1/10の場合の実験ケースを表-8に示す。波高13~16cm, 周期1.3~2.3sec程度に変化させて、波形こう配を0.02および0.06として実験を行なった。消波工の設置水深は、10cm, 6.5cm, 3cmと変化させて、透過率に対する設置水深の影響をしらべた。

消波工の高さは、静水面、設置水深における波頂高、反射波頂高などを一応の目安とした。この場合、消波工の高さがかなり高くなる場合もあるので、図-6に示すように、消波工の陸側を垂直にし、実際の消波工に

表-6 各種ブロックの消波効果の比較

| 消波ブロックの<br>積　　み　　方 | 消波ブロックの<br>種　　　　類 | 代表径<br>(cm) | 空隙率  | 透　　過　　率                               |       |
|--------------------|-------------------|-------------|------|---------------------------------------|-------|
|                    |                   |             |      | H <sub>0</sub> /L <sub>0</sub> . 0.02 | 0.06  |
| 乱　　　積              | テトラポッド            | 4.87        | 0.51 | 0.173                                 | 0.255 |
|                    | 6　　　　　脚           | 3.05        | 0.62 | 0.231                                 | 0.284 |
|                    | 中　空　三　角           | 2.12        | 0.62 | 0.188                                 | 0.238 |
|                    | 三　　　　　連           | 4.82        | 0.56 | 0.238                                 | 0.296 |
|                    | ホロスケーヤ            | 5.78        | 0.63 | 0.355                                 | 0.43  |
| 層　　　積              | テトラポッド            | 6.25        | 0.48 | 0.178                                 | 0.266 |
|                    | 6　　　　　脚           | 1.20        | 0.53 | 0.084                                 | 0.092 |
|                    | 中　空　三　角           | 3.43        | 0.54 | 0.168                                 | 0.192 |
|                    | 三　　　　　連           | 6.25        | 0.41 | 0.135                                 | 0.187 |
|                    | ホロスケーヤ            | 7.69        | 0.49 | 0.226                                 | 0.286 |

状態とした。6脚ブロックの場合は透過率の小さくなる層積とした。

一様水深部における波高測定には、抵抗線式波高計を使用した。砕波領域における波高、波頂高は水路中央に標尺を置いて目視により測定した。また、堤防へのうちあげ高は堤防上に目盛りをつけて目視した。越波量は堤防の背後に箱を置き、そこに流入した水量をメスシリンダーで測定した。これらの各量はいずれも5波程度の平均値で、同一の実験は3回繰返して実施した。また、

表-7 使用ブロックの諸元

| 消波ブロックの<br>種類    | 重 量<br>g | 体 積<br>cm <sup>3</sup> | 比 重  |
|------------------|----------|------------------------|------|
| テトラポッド<br>(250g) | 213      | 100                    | 2.13 |
| テトラポッド<br>(110g) | 121      | 45                     | 2.70 |
| 6<br>(250g)      | 240      | 115                    | 2.09 |

10個のブロックの平均値

表-8 実験ケース一覧表(実験A, B, 海底こう配 1/10)

(a)  $H_0/L_0 = 0.02$ 

| 実験<br>番号 | 消波工の<br>のり先水深 | $H_c/7$ | 消波工<br>天板の列数 | 消波工の<br>長さ | 消波工の<br>高さ | 消波工の<br>天板の長さ | 消波工の<br>容 積            | ブロックの<br>個 数 | 空隙率<br>(%) | 堤 防 の<br>のり先水深 | ブロックの<br>種類と積み方         |
|----------|---------------|---------|--------------|------------|------------|---------------|------------------------|--------------|------------|----------------|-------------------------|
| A-1      | 10cm          | 0.7     | 2            | 23.2 cm    | 14 cm      | 14 cm         | 275cm <sup>3</sup> /cm | 98           | 55         | 6.8 cm         | テトラポッド<br>乱 積<br>(250枚) |
| 2        |               |         | 4            | 37.2       | 14         | 28            | 410                    | 140          | 57         | 5.2            |                         |
| 3        |               |         | 6            | 51.2       | 14         | 42            | 530                    | 194          | 54         | 4.0            |                         |
| 4        |               | 1.0     | 2            | 27.2       | 20         | 14            | 465                    | 168          | 55         | 5.8            |                         |
| 5        |               |         | 4            | 41.2       | 20         | 28            | 675                    | 240          | 56         | 4.5            |                         |
| 6        |               |         | 6            | 55.2       | 20         | 42            | 860                    | 330          | 52         | 3.0            |                         |
| 7        |               | 1.2     | 2            | 30.0       | 24         | 14            | 625                    | 238          | 52         | 5.5            |                         |
| 8        |               |         | 4            | 44.0       | 24         | 28            | 885                    | 324          | 54         | 4.0            |                         |
| 9        |               |         | 6            | 58.0       | 24         | 42            | 1130                   | 430          | 52         | 2.5            |                         |
| 10       | 10            | 0.7     |              | 37.2       | 14         | 28            | 410                    | 125          | 55         | 5.2            | テトラポッド                  |
| 11       |               | 1.0     | 4            | 41.2       | 20         | 28            | 675                    | 170          | 54         | 4.5            | 2 層 積                   |
| 12       |               | 1.2     |              | 44.0       | 24         | 28            | 885                    | 203          | 54         | 4.0            | 中詰碎石                    |
| 13       | 10            | 0.7     |              | 37.2       | 14         | 28            | 410                    | 140          | 51         | 5.2            | 6 脚<br>(250枚)           |
| 14       |               | 1.0     | 4            | 41.2       | 20         | 28            | 675                    | 230          | 51         | 4.5            |                         |
| 15       |               | 1.2     |              | 44.0       | 24         | 28            | 885                    | 300          | 51         | 4.0            |                         |
| 16       | 6.5           | 0.7     | 2            | 21.0       | 10.5       | 14.0          | 179                    | 68           | 53         |                | テトラポッド<br>乱 積<br>(250枚) |
| 17       |               |         | 4            | 35.0       | 10.5       | 28.0          | 277                    | 112          | 59         |                |                         |
| 18       |               |         | 6            | 49.0       | 10.5       | 42.0          | 354                    | 142          | 50         |                |                         |
| 19       |               | 1.0     | 2            | 24.0       | 15.0       | 14.0          | 301                    | 112          | 53         |                |                         |
| 20       |               |         | 4            | 38.0       | 15.0       | 28.0          | 448                    | 164          | 54         |                |                         |
| 21       |               |         | 6            | 52.0       | 15.0       | 42.0          | 578                    | 217          | 53         |                |                         |
| 22       |               | 1.2     | 2            | 26.0       | 18.0       | 14.0          | 395                    | 160          | 59         |                |                         |
| 23       |               |         | 4            | 40.0       | 18.0       | 28.0          | 590                    | 220          | 53         |                |                         |
| 24       |               |         | 6            | 54.0       | 18.0       | 42.0          | 772                    | 307          | 50         |                |                         |
| 25       | 3.0           | 1.0     | 2            | 20.6       | 10.0       | 14.0          | 165                    | 58           | 57         |                | テトラポッド                  |
| 26       |               |         | 4            | 34.6       | 10.0       | 28.0          | 260                    | 98           | 52         |                |                         |
| 27       |               | 1.2     | 2            | 22.0       | 12.0       | 14.0          | 215                    | 80           | 53         |                | 乱 積<br>(250枚)           |
| 28       |               |         | 4            | 36.0       | 12.0       | 28.0          | 335                    | 127          | 53         |                |                         |
| 29       |               |         | 6            | 50.0       | 12.0       | 42.0          | 430                    | 163          | 53         |                |                         |
| 30       |               | 1.0     |              | 20.6       | 10.0       | 14.0          | 165                    | 135          | 54         |                | テトラポッド                  |
| 31       |               |         |              | 34.6       | 10.0       | 28.0          | 260                    | 210          | 55         |                |                         |
| 32       |               |         |              | 48.6       | 10.0       | 42.0          | 320                    | 275          | 52         |                |                         |
| 33       |               | 1.2     |              | 22.0       | 12.0       | 14.0          | 215                    | 190          | 50         |                | 乱 積<br>(110枚)           |
| 34       |               |         |              | 36.0       | 12.0       | 28.0          | 335                    | 295          | 50         |                |                         |
| 35       |               |         |              | 50.0       | 12.0       | 42.0          | 430                    | 380          | 50         |                |                         |

表-8(b)  $H_0/L_0 = 0.06$

| 実験<br>番号 | 消波工の<br>のり先水深 | $\frac{H_c}{\eta}$ | 消波工<br>天板の列数 | 消波工の<br>長さ | 消波工の<br>高さ | 消波工の<br>天板の長さ | 消波工の<br>容 積            | ブロックの<br>個 数 | 空隙率<br>(%) | 堤 防 の<br>のり先水深 | ブロックの<br>種類と積み方         |
|----------|---------------|--------------------|--------------|------------|------------|---------------|------------------------|--------------|------------|----------------|-------------------------|
| B-1      | 10.0cm        | 0.7                | 2            | 23.0cm     | 13.3cm     | 14.0cm        | 260cm <sup>3</sup> /cm | 105          | 50         | 6.8            | テトラポッド<br>乱 積<br>(250g) |
| 2        |               |                    | 4            | 37.0       | 13.3       | 28.0          | 395                    | 166          | 47         | 5.3            |                         |
| 3        |               |                    | 6            | 51.0       | 13.3       | 42.0          | 505                    | 210          | 48         | 4.0            |                         |
| 4        |               | 1.0                | 2            | 26.8       | 19.0       | 14.0          | 425                    | 172          | 50         | 6.0            |                         |
| 5        |               |                    | 4            | 40.8       | 19.0       | 28.0          | 615                    | 280          | 43         | 4.7            |                         |
| 6        |               |                    | 6            | 54.8       | 19.0       | 42.0          | 790                    | 320          | 50         | 3.3            |                         |
| 7        |               | 1.2                | 2            | 29.3       | 23.0       | 14.0          | 565                    | 220          | 51         | 5.5            |                         |
| 8        |               |                    | 4            | 43.2       | 23.0       | 28.0          | 805                    | 340          | 47         | 4.1            |                         |
| 9        |               |                    | 6            | 57.2       | 23.0       | 42.0          | 1030                   | 395          | 52         | 2.8            |                         |
| 10       | 6.5           | 0.7                | 2            | 21.0       | 10.5       | 14.0          | 179                    | 75           | 48         |                |                         |
| 11       |               |                    | 4            | 35.0       | 10.5       | 28.0          | 277                    | 118          | 47         |                |                         |
| 12       |               |                    | 6            | 49.0       | 10.5       | 42.0          | 354                    | 162          | 47         |                |                         |
| 13       |               | 1.0                | 2            | 24.0       | 15.0       | 14.0          | 301                    | 125          | 48         |                |                         |
| 14       |               |                    | 4            | 38.0       | 15.0       | 28.0          | 448                    | 170          | 52         |                |                         |
| 15       |               |                    | 6            | 52.0       | 15.0       | 42.0          | 578                    | 235          | 49         |                |                         |
| 16       |               | 1.2                | 2            | 26.0       | 18.0       | 14.0          | 395                    | 168          | 47         |                |                         |
| 17       |               |                    | 4            | 40.0       | 18.0       | 28.0          | 590                    | 235          | 50         |                |                         |
| 18       |               |                    | 6            | 54.0       | 18.0       | 42.0          | 772                    | 300          | 51         |                |                         |
| 19       | 3.0           | 0.7                |              | 17.6       | 5.6        | 14.0          | 75                     | 32           | 47         |                |                         |
| 20       |               | 1.0                | 2            | 19.3       | 8.0        | 14.0          | 120                    | 50           | 48         |                |                         |
| 21       |               | 1.2                |              | 20.3       | 9.6        | 14.0          | 152                    | 65           | 47         |                |                         |

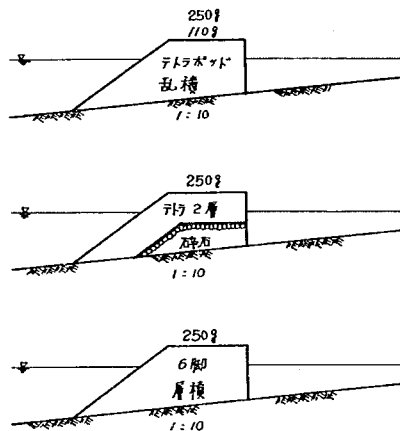


図-6 消波工の形状

近い形状とした。

さらに、消波工の形式としては、同じく図-6に示すように、テトラポッドの乱積を主としたが、比較のため、中詰に捨石を用い、上層をテトラポッドで覆う形式、また、6脚ブロックの層積形式のものを採用した。

実験-Cはうちあげ高のみを測定したものである。この場合の消波工の形式は、ブロックはテトラポッドで2層積で横に長いものと、幅を小さくした縦長のものである。(表-9)

海底こう配 1/30 の場合の実験ケースを表-10に示す。波高は10cm程度で、周期は1.1secと2secである。波形こう配は0.02と0.06とした。消波ブロックの設置水深は10cmで、消波工の高さ、幅を変化させた。その形は梯形状で図-5に示すとおりであるが、一部の試験では、図-6と同形状とし、テトラポッドも110gのものを用いた。

つぎに、表-11に越波量に関する実験ケースを示す。この実験では、波高を10cm、周期を1.8sec程度とし

表-9 実験ケース一覧表(実験C, 海底こう配1/10)

| 実験番号 | 波形こう配 | 消波工の形状             | 消波工のり先水深 | 堤防のり先水深 |
|------|-------|--------------------|----------|---------|
| C-1  | 0.02  | 2層5列               | 4.3cm    | 0.8     |
| 2    |       | Hc=9.5cm           | 6.3      | 2.8     |
| 3    |       | $\ell=28\text{cm}$ | 8.3      | 4.8     |
| 4    |       |                    | 10.3     | 6.8     |
| 5    |       |                    | 12.3     | 8.8     |
| 6    |       | Hc=20cm            | 2.3      | 0.8     |
| 7    |       | $\ell=15\text{cm}$ | 4.3      | 2.8     |
| 8    |       |                    | 6.3      | 4.8     |
| 9    |       |                    | 8.3      | 6.8     |
| 10   |       |                    | 10.3     | 8.8     |
| 11   | 0.04  | 2層5列               | 4.3      | 0.8     |
| 12   |       | Hc=9.5cm           | 6.3      | 2.8     |
| 13   |       | $\ell=28\text{cm}$ | 8.3      | 4.8     |
| 14   |       |                    | 10.3     | 6.8     |
| 15   |       |                    | 12.3     | 8.8     |
| 16   |       | Hc=20cm            | 2.3      | 0.8     |
| 17   |       | $\ell=15\text{cm}$ | 4.3      | 2.8     |
| 18   |       |                    | 6.3      | 4.8     |
| 19   |       |                    | 8.3      | 6.8     |
| 20   |       |                    | 10.3     | 8.8     |
| 21   | 0.06  | 2層5列               | 4.5      | 1.0     |
| 22   |       | Hc=9.5cm           | 6.5      | 3.0     |
| 23   |       | $\ell=28\text{cm}$ | 8.5      | 5.0     |
| 24   |       |                    | 10.5     | 7.0     |
| 25   |       |                    | 12.5     | 9.0     |
| 26   |       | Hc=20cm            | 2.5      | 1.0     |
| 27   |       | $\ell=15\text{cm}$ | 4.5      | 3.0     |
| 28   |       |                    | 6.5      | 5.0     |
| 29   |       |                    | 8.5      | 7.0     |
| 30   |       |                    | 10.5     | 9.0     |

表-10 実験ケース一覧表(海底こう配1/30)

(a) 実験D, E

| 実験番号 | 波形こう配 | 消波工の高さ | 消波工の長さ |
|------|-------|--------|--------|
| D-1  | 0.02  | 10cm   | 18cm   |
| 2    |       |        | 27.3   |
| 3    |       |        | 34.3   |
| 4    |       |        | 42.8   |
| 6    |       |        | 59.8   |
| 7    |       | 15     | 16.5   |
| 9    |       |        | 34.3   |
| 10   |       |        | 41.0   |
| 11   |       |        | 49.3   |
| 14   |       | 18     | 24.3   |
| 15   | 0.04  |        | 33.3   |
| 16   |       |        | 40.0   |
| 18   |       |        | 56.0   |
| 20   |       | 20     | 21.3   |
| 21   |       |        | 27.8   |
| E-1  | 0.06  | 10     | 18.0   |
| 2    |       |        | 27.3   |
| 3    |       |        | 34.3   |
| 4    |       |        | 42.8   |
| 6    |       | 14     | 17.0   |
| 7    |       |        | 25.8   |
| 8    |       |        | 32.5   |
| 10   |       |        | 58.5   |
| 11   |       | 16     | 15.0   |
| 12   |       |        | 24.3   |
| 13   | 0.08  |        | 33.3   |
| 14   |       |        | 40.0   |
| 15   |       |        | 47.8   |
| 17   |       | 18     | 23.3   |
| 18   |       |        | 31.3   |
| 19   |       |        | 38.5   |
| 20   |       |        | 46.8   |

表-10(b) 実験F ( $H_0/L_0=0.02$ )

| 実験番号 | 消波工のり先水深 | $\frac{H_c}{\eta}$ | 消波工の長さ | 消波工の高さ | 消波工の天ば長 | 消波工の容積                 | ブロックの個数 | 空隙率(%) | 堤防のり先水深 | ブロックの種類と積み方                |
|------|----------|--------------------|--------|--------|---------|------------------------|---------|--------|---------|----------------------------|
| F-1  | 10cm     | 0.7                | 18cm   | 11cm   | 11cm    | 179cm <sup>3</sup> /cm | 160     | 50     | 9.1cm   | テトラポッド<br>110 $\phi$<br>乱積 |
| 2    |          |                    | 29     | 11     | 22      | 300                    | 270     | 49     | 8.7     |                            |
| 3    |          |                    | 39.5   | 11     | 33      | 420                    | 395     | 47     | 8.4     |                            |
| 4    | 10       | 1.0                | 21.2   | 16     | 11      | 347                    | 290     | 53     | 8.9     |                            |
| 5    |          |                    | 32.2   | 16     | 22      | 512                    | 435     | 52     | 8.5     |                            |
| 6    |          |                    | 43.2   | 16     | 33      | 672                    | 590     | 51     | 8.1     |                            |
| 7    | 10       | 1.2                | 23     | 19     | 11      | 450                    | 400     | 50     | 8.7     |                            |
| 8    |          |                    | 34     | 19     | 22      | 648                    | 560     | 51     | 8.4     |                            |
| 9    |          |                    | 45     | 19     | 33      | 840                    | 785     | 50     | 8.0     | 230個は86 $\phi$ 使用          |

表-11 越波量実験ケース

(海底こう配 1/10)

| 実験番号 | 消波工の<br>のり先水深 | 堤防高     |
|------|---------------|---------|
| 1    | 10 cm         | 42.4 cm |
| 2    |               | 37.9    |
| 3    |               | 33.0    |
| 4    |               | 26.9    |
| 5    |               | 22.0    |
| 6    |               | 18.0    |
| 7    | 8.0           | 20.0    |
| 8    |               | 15.0    |
| 9    |               | 10.2    |
| 10   |               | 24.6    |
| 11   |               | 28.9    |
| 12   |               | 33.9    |
| 13   | 6.0           | 17.0    |
| 14   |               | 12.0    |
| 15   |               | 9.0     |
| 16   |               | 3.9     |
| 17   | 4.0           | 5.7     |
| 18   |               | 8.7     |
| 19   |               | 11.4    |
| 20   |               | 13.4    |
| 21   | 2.0           | 7.8     |
| 22   |               | 10.3    |
| 23   |               | 5.8     |

て波形こう配を 0.02 に固定し、堤防の設置水深を 10 ~ 2 cm の範囲で変化させた。消波工は 250 g テトラポッドの 3 層 4 列 (使用数 86 個) とし、まず、うちあげ高を測定し、ついで堤防高を少しづつ下げて越波量を測定した。

以上の実験に用いた堤防ののりこう配はすべて 5 分である。5 分こう配はうちあげ高が鉛直堤にほぼ等しく、また、測定も比較的容易である。さらに越波量がある風時のものとはほぼ一致するなどの利点がある。

### (3) 透過率とうちあげ高

海底こう配 1/10、

および、1/30 の場合の波頂高と波高変化を測定した結果を図-7 に示す。海底こう配と波形こう配により碎波の形態が異なるため、碎波後の波の変形状態が異なる。こう配が 1/10 で、波形こう配が 0.02 の場合は、巻波となって落下するため、落下点付近に極小値を生ずる。波形こう配 0.06 の場合は崩れ波型の碎波形状に近い。

海底こう配が 1/30 の場合は、いずれも崩れ波型となり、碎波してからしだいに波高は小さくなるが、波形こう配の大きい方が、早く波が減衰する傾向が認められる。

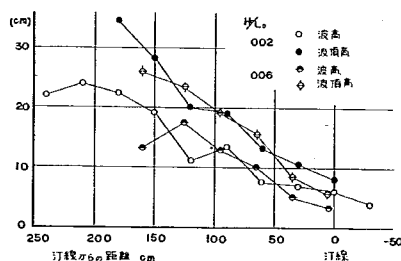
これらの波をくり返して発生させ、種々の形の消波工の透過率、消波工をもつ場合の堤防へのうちあげ高を測定した結果を表-12 に示す。この表で、透過率は入射波高 ( $H_1$ ) で透過波高 ( $H_2$ ) を割った値であるが、入射波高は消波工ののり先水深における波高を、また、透過波高は消波工から 5 ~ 10 cm 岸側の位置において測定した波高を採用した。1/10 こう配と 1/30 こう配の一部の実験では、消波工背後の水位上昇量も測定したので、この値も表中に記入してある。

透過率は多くの要素に支配される複雑な量なので、海

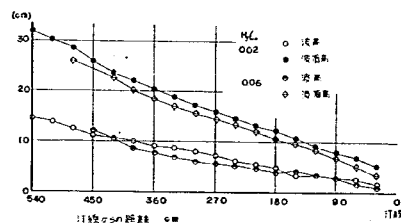
底こう配、波形こう配、消波工ののり先水深を固定し、消波工の長さ、高さの影響を検討した。消波工の長さは上辺と下辺の長さの平均値とし、消波工先端の海底からの高さ ( $H_c$ ) との比で表わした。一方、高さは消波工ののり先における波頂高 ( $\eta$ : 海底から波頂までの高さで示す。) との比をとることとする。

透過率を  $H_c/\eta$  をパラメーターにして、 $l/\eta$  に対してプロットした結果と図-8 に示す。これらの図をみると、透過率は、消波工の長さが長いほど、また、天板が高いほど小さくなり、常識的な結果が得られている。しかし、条件により透過率がかなり異なることが認められる。例えば、設置水深の大きい場合は、1/10 こう配では波形こう配 0.02 の方が 0.06 のときより透過率大きい。この点は、岩崎・沼田<sup>(5)</sup>・河上・時川<sup>(6)</sup>の実験でも指摘されている。一方、1/30 こう配では、250 g テトラポッドの場合には波形こう配による透過率の差は小さい。

1/10 こう配について、設置水深による透過率の変化をしらべてみる。波形こう配 0.02 の場合、 $h/H_0$  が小さくなるにつれて透過率が大きくなる。 $h/H_0$  が 0.2 の場合には、テトラポッドの重量を 250 g のものと 110 g のものを用いて測定した。この結果をみると、当然のことであるが、110 g の場合の透過率は 250 g の場合の透過率



(a) 海底こう配 1/10



(b) 海底こう配 1/30

図-7 碎波後の波高変化

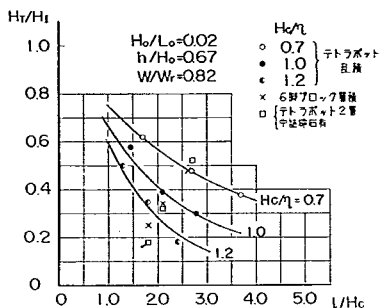


図 8-a 消波工の規模と波の透過率  
実験 A (海底こう配 1/10)

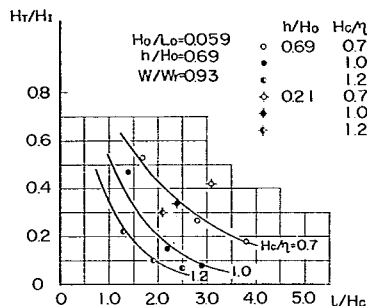


図 8-b 実験 B (海底こう配 1/10)

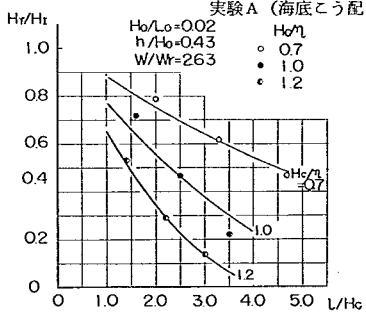


図 8-c 実験 A (海底こう配 1/10)

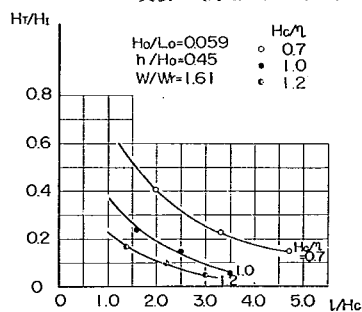


図 8-d 実験 B (海底こう配 1/10)

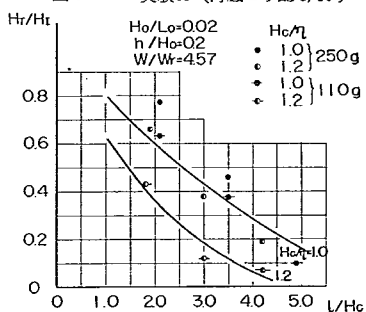


図 8-e 実験 A (海底こう配 1/10)

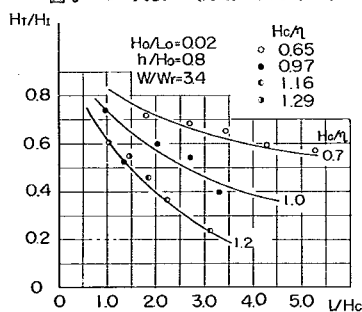


図 8-f 実験 D (海底こう配 1/30)

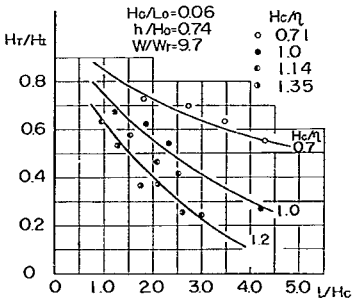


図 8-g 実験 E (海底こう配 1/30)

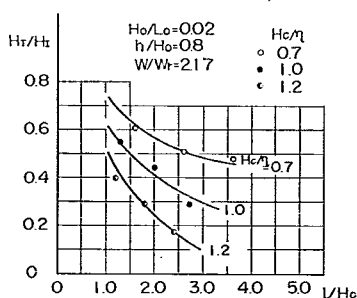


図 8-h 実験 F (海底こう配 1/30)

表-12 透過率、うちあげ高、水位上昇量の測定結果

(a)

| 実験<br>番号 | $\frac{h}{H_0}$ | $\frac{H_c}{\eta}$ | $\frac{\ell}{H_c}$ | 入射波高<br>$H_I$ | 透過波高<br>$H_T$ | $\frac{H_T}{H_I}$ | うちあげ高<br>$R_e$ | 水位上昇高<br>$\delta$ | $\frac{\delta}{H_T}$ |
|----------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------------|
| A-1      | 0.67            | 0.7                | 1.7                | 12.5 cm       | 7.7 cm        | 0.62              | 26.4 cm        | 3.6 cm            | 0.47                 |
| 2        |                 |                    | 2.7                |               | 6.0           | 0.48              | 23.7           | 3.7               | 0.62                 |
| 3        |                 |                    | 3.7                |               | 4.8           | 0.38              | 18.1           | 4.0               | 0.83                 |
| 4        |                 | 1.0                | 1.4                | 12.5          | 7.3           | 0.58              | 18.5           | 3.0               | 0.41                 |
| 5        |                 |                    | 2.1                |               | 4.9           | 0.39              | 14.3           | 2.8               | 0.57                 |
| 6        |                 |                    | 2.8                |               | 3.7           | 0.30              | 9.7            | 2.5               | 0.68                 |
| 7        |                 | 1.2                | 1.3                | 12.5          | 6.3           | 0.50              | 14.6           | 2.3               | 0.37                 |
| 8        |                 |                    | 1.8                |               | 4.4           | 0.35              | 10.8           | 2.0               | 0.45                 |
| 9        |                 |                    | 2.4                |               | 2.3           | 0.18              | 7.1            | 1.8               | 0.78                 |
| 10       | 0.67            | 0.7                | 2.7                | 12.5          | 6.5           | 0.52              | 22.5           | 3.8               | 0.58                 |
| 11       |                 | 1.0                | 2.1                |               | 4.0           | 0.32              | 11.3           | 3.2               | 0.80                 |
| 12       |                 | 1.2                | 1.8                |               | 2.2           | 0.18              | 8.8            | 4.2               | 1.90                 |
| 13       | 0.67            | 0.7                | 2.7                | 12.5          | 6.0           | 0.48              | 21.4           | 2.5               | 0.42                 |
| 14       |                 | 1.0                | 2.1                |               | 4.3           | 0.34              | 11.7           | 1.6               | 0.37                 |
| 15       |                 | 1.2                | 1.8                |               | 3.1           | 0.25              | 8.0            | 1.3               | 0.42                 |
| 16       | 0.43            | 0.7                | 2.0                | 8.5           | 6.7           | 0.79              |                | 4.8               | 0.72                 |
| 17       |                 |                    | 3.3                |               | 5.3           | 0.62              |                | 5.0               | 0.94                 |
| 18       |                 |                    | 4.7                |               | 4.0           | 0.47              |                | 4.9               | 1.22                 |
| 19       |                 | 1.0                | 1.6                | 8.5           | 6.1           | 0.72              |                | 3.6               | 0.59                 |
| 20       |                 |                    | 2.5                |               | 4.0           | 0.47              |                | 3.6               | 0.90                 |
| 21       |                 |                    | 3.5                |               | 1.9           | 0.22              |                | 3.4               | 1.79                 |
| 22       |                 | 1.2                | 1.4                | 8.5           | 4.5           | 0.53              |                | 2.9               | 0.65                 |
| 23       |                 |                    | 2.2                |               | 2.5           | 0.29              |                | 3.0               | 1.20                 |
| 24       |                 |                    | 3.0                |               | 1.2           | 0.14              |                | 3.2               | 2.67                 |
| 25       | 0.20            | 1.0                | 2.1                | 6.8           | 5.3           | 0.78              |                | 4.9               | 0.92                 |
| 26       |                 |                    | 3.5                |               | 3.1           | 0.46              |                | 4.9               | 1.58                 |
| 27       |                 | 1.2                | 1.8                | 6.8           | 4.5           | 0.66              |                | 4.5               | 1.00                 |
| 28       |                 |                    | 3.0                |               | 2.6           | 0.38              |                | 4.6               | 1.77                 |
| 29       |                 |                    | 4.2                |               | 1.3           | 0.19              |                | 4.8               | 3.00                 |
| 30       |                 | 1.0                | 2.1                | 6.8           | 4.3           | 0.63              |                | 4.9               | 1.14                 |
| 31       |                 |                    | 3.5                |               | 2.6           | 0.38              |                | 5.2               | 2.00                 |
| 32       |                 |                    | 4.9                |               | 0.7           | 0.10              |                | 5.8               | 8.30                 |
| 33       |                 | 1.2                | 1.8                | 6.8           | 2.9           | 0.43              |                | 6.3               | 2.17                 |
| 34       |                 |                    | 3.0                |               | 0.8           | 0.12              |                | 4.0               | 5.00                 |
| 35       |                 |                    | 4.2                |               | 0.5           | 0.07              |                | 4.6               | 9.22                 |

表-12 (b)

| 実験<br>番号 | $\frac{h}{H_0}$ | $\frac{H_c}{\eta}$ | $\frac{\ell}{H_c}$ | 入射波高<br>$H_I$ | 透過波高<br>$H_T$ | $\frac{H_T}{H_I}$ | うちあげ高<br>$R_e$ | 水位上昇高<br>$\delta$ | $\frac{\delta}{H_T}$ |
|----------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------------|
| B-1      | 0.69            | 0.7                | 1.7                | 12 cm         | 6.4 cm        | 0.53              | 18.1 cm        | 2.6 cm            | 0.41                 |
| 2        |                 |                    | 2.8                |               | 3.2           | 0.27              | 14.3           | 2.4               | 0.75                 |
| 3        |                 |                    | 3.8                |               | 2.1           | 0.18              | 12.5           | 2.1               | 1.0                  |
| 4        |                 | 1.0                | 1.4                | 12            | 5.6           | 0.47              | 13.9           | 1.5               | 0.27                 |
| 5        |                 |                    | 2.2                |               | 1.8           | 0.15              | 4.8            | 1.1               | 0.61                 |
| 6        |                 |                    | 2.9                |               | 1.0           | 0.08              | 3.8            | 1.1               | 1.1                  |
| 7        |                 | 1.2                | 1.3                | 12            | 2.6           | 0.22              | 8.4            | 1.3               | 0.50                 |
| 8        |                 |                    | 1.9                |               | 1.2           | 0.10              | 3.9            | 1.0               | 0.83                 |
| 9        |                 |                    | 2.5                |               | 0.8           | 0.07              | 2.6            | 0.8               | 1.0                  |
| 10       |                 | 0.45               | 2.0                | 10            | 4.1           | 0.41              |                | 2.6               | 0.63                 |
| 11       |                 |                    | 3.3                |               | 2.3           | 0.23              |                | 2.8               | 1.22                 |

表-12 (b) のつづき

| 実験<br>番号 | $\frac{h}{H_0}$ | $\frac{H_c}{\eta}$ | $\frac{\ell}{H_c}$ | 入射波高<br>$H_I$ | 透過波高<br>$H_T$ | $\frac{H_T}{H_I}$ | うちあげ高<br>$R_e$ | 水位上昇高<br>$\delta$ | $\frac{\delta}{H_T}$ |
|----------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------------|
| B-12     |                 |                    | 4.7                |               | 1.5           | 0.15              |                | 2.5               | 1.66                 |
| 13       |                 | 1.0                | 1.6                | 10            | 2.4           | 0.24              |                | 2.1               | 0.88                 |
| 14       |                 |                    | 2.5                |               | 1.5           | 0.15              |                | 2.0               | 1.33                 |
| 15       |                 |                    | 3.5                |               | 0.6           | 0.06              |                | 2.1               | 3.50                 |
| 16       |                 | 1.2                | 1.4                | 10            | 1.7           | 0.17              |                | 2.0               | 1.17                 |
| 17       |                 |                    | 2.2                |               | 1.0           | 0.10              |                | 2.0               | 2.00                 |
| 18       |                 |                    | 3.0                |               | 0.5           | 0.05              |                | 2.0               | 4.00                 |
| 19       | 0.21            | 0.7                | 3.1                | 5             | 2.1           | 0.42              |                |                   |                      |
| 20       |                 | 1.0                | 2.4                |               | 1.7           | 0.34              |                |                   |                      |
| 21       |                 | 1.2                | 2.1                |               | 1.5           | 0.3 <sup>c</sup>  |                |                   |                      |

表-12 (c)

| 実験<br>番号 | $\frac{h}{H_0}$ | $\frac{H_c}{\eta}$ | $\frac{\ell}{H_c}$ | 入射波高<br>$H_I$ | 透過波高<br>$H_T$ | $\frac{H_T}{H_I}$ | うちあげ高<br>$R_e$ |
|----------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|----------------|
| D-1      | 0.8             | 0.65               | 1.8                | 7.8 cm        | 5.7 cm        | 0.73              | 20.6 cm        |
| 2        |                 |                    | 2.7                |               | 5.2           | 0.67              | 16.4           |
| 3        |                 |                    | 3.4                |               | 5.0           | 0.64              | 19.8           |
| 4        |                 |                    | 4.3                |               | 4.5           | 0.58              | 16.2           |
| 6        |                 |                    | 6.0                |               | 4.3           | 0.55              | 13.8           |
| 7        |                 | 0.97               | 1.1                |               | 5.6           | 0.72              | 14.5           |
| 9        |                 |                    | 2.3                |               | 4.6           | 0.59              | 12.0           |
| 10       |                 |                    | 2.7                |               | 4.2           | 0.54              | 8.6            |
| 11       |                 |                    | 3.3                |               | 3.2           | 0.41              | 5.7            |
| 14       |                 | 1.16               | 1.4                |               | 4.0           | 0.51              | 13.4           |
| 15       |                 |                    | 1.9                |               | 3.5           | 0.45              | 8.5            |
| 16       |                 |                    | 2.2                |               | 2.8           | 0.36              | 5.0            |
| 18       |                 |                    | 3.1                |               | 1.8           | 0.23              | 3.3            |
| 20       |                 | 1.29               | 1.1                |               | 4.6           | 0.59              | 11.5           |
| 21       |                 |                    | 1.4                |               | 4.2           | 0.54              | 9.3            |
| E-1      | 0.74            | 0.71               | 1.8                | 5.5           | 4.0           | 0.73              | 12.4           |
| 2        |                 |                    | 2.7                |               | 3.8           | 0.69              | 10.5           |
| 3        |                 |                    | 3.4                |               | 3.5           | 0.64              | 8.6            |
| 4        |                 |                    | 4.3                |               | 3.0           | 0.55              | 8.3            |
| 6        |                 | 1.0                | 1.2                |               | 3.7           | 0.67              | 8.9            |
| 7        |                 |                    | 1.8                |               | 3.5           | 0.64              |                |
| 8        |                 |                    | 2.4                |               | 3.0           | 0.55              |                |
| 9        |                 |                    | 4.2                |               | 2.0           | 0.26              |                |
| 11       |                 | 1.14               | 0.94               |               | 3.5           | 0.64              | 7.3            |
| 12       |                 |                    | 1.5                |               | 3.2           | 0.58              | 6.8            |
| 13       |                 |                    | 2.1                |               | 2.6           | 0.46              | 6.7            |
| 14       |                 |                    | 2.5                |               | 2.3           | 0.42              | 2.9            |
| 15       |                 |                    | 3.0                |               | 1.4           | 0.25              | 1.4            |
| 17       |                 | 1.35               | 1.3                |               | 3.0           | 0.54              | 8.3            |
| 18       |                 |                    | 1.7                |               | 2.0           | 0.36              |                |
| 19       |                 |                    | 2.1                |               | 2.1           | 0.37              | 3.7            |
| 20       |                 |                    | 2.6                |               | 1.4           | 0.25              | 2.4            |

表-12 (d)

| 実験<br>番号 | $\frac{h}{H_0}$ | $\frac{H_c}{\eta}$ | $\frac{\ell}{H_c}$ | 入射波<br>高<br>$H_I$ | 透過<br>波高<br>$H_T$ | $\frac{H_T}{H_I}$ | うちあ<br>げ高<br>$R_e$ | 水位上<br>昇高<br>$\delta$ | $\frac{\delta}{H_T}$ |
|----------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| F-1      | 0.8             | 0.7                | 1.6                | 7.3 cm            | 4.5 cm            | 0.61              | 15.1 cm            | 1.3 cm                | 0.29                 |
| 2        |                 | 0.7                | 2.6                |                   | 3.8               | 0.52              | 13.5               | 1.3                   | 0.34                 |
| 3        |                 | 0.7                | 3.6                |                   | 3.5               | 0.48              | 11.6               | 1.4                   | 0.40                 |
| 4        |                 | 1.0                | 1.3                |                   | 4.0               | 0.55              | 9.2                | 0.9                   | 0.22                 |
| 5        |                 | 1.0                | 2.0                |                   | 3.2               | 0.44              | 6.0                | 0.7                   | 0.22                 |
| 6        |                 | 1.0                | 2.7                |                   | 2.1               | 0.29              | 3.3                | 0.6                   | 0.29                 |
| 7        |                 | 1.2                | 1.2                |                   | 2.9               | 0.40              | 7.8                | 0.6                   | 0.21                 |
| 8        |                 | 1.2                | 1.8                |                   | 2.1               | 0.29              | 4.8                | 0.4                   | 0.19                 |
| 9        |                 | 1.2                | 2.4                |                   | 1.3               | 0.18              | 3.3                | 0.3                   | 0.23                 |

表-13 入射波高とブロックの代表径との比

| 海底こう配 | $\frac{H_0}{L_0}$ | $\frac{h}{H_0}$ | $\frac{H_I}{H_0}$<br>(cm) | $\frac{d}{H_0}$<br>(cm) | $\frac{H_I}{d}$ |
|-------|-------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|
| 1/10  | 0.02              | 0.67            | 12.5                      | 4.87                    | 2.57            |
|       |                   | 0.43            | 8.5                       | 4.87                    | 1.74            |
|       |                   | 0.20            | 6.8                       | 4.87                    | 1.39            |
|       |                   | 0.20            | 6.8                       | 3.73                    | 1.82            |
|       |                   | 0.67            | 12.0                      | 4.87                    | 2.46            |
|       |                   | 0.43            | 10.0                      | 4.87                    | 2.05            |
| 1/30  | 0.02              | 0.20            | 5.0                       | 4.87                    | 1.03            |
|       |                   | 0.8             | 7.8                       | 4.87                    | 1.60            |
|       |                   | 0.8             | 7.3                       | 3.73                    | 1.96            |
|       | 0.06              | 0.7             | 5.5                       | 4.87                    | 1.13            |

り透過率が小さくなる現象があらわれている。この点を示すパラメーターとして、入射波高とブロックの代表径との比を導入し、各設置水深の場合について計算すると表-13のようになる。

$H_I/d$  の値は、 $h/H_0$  が小さくなるにつれて減少している。このことは、波の規模に対してブロックの空隙が大きくなり、波が通過しやすくなると考えてよいと思われる。したがって、透過率を正しく評価するためには、 $H_c/\eta$ 、 $\ell/H_c$  のほかに、 $H_I/d$  というパラメーターも考慮する必要がある。この例でも、たまたま、 $h/H_0=0.43$  でブロック重量 250 g の場合と、 $h/H_0=0.2$  でブロックの重量

より小さい。ブロックの重量が小さくなると、空隙率は変化しないが、代表径が小さくなり、抵抗は大きくなると推定される。佐藤、三橋、秦<sup>(7)</sup>は透過式潜堤の透過率をブロックの重量を変化させて測定しているが、その結果をみるとブロックの重量がある程度小さくなるとやは

110 ㄱの場合とについて比較すると、 $H_1/d$  の値はほぼ等しく、透過率もほとんど一致していることがわかる。このことから、消波工の設置水深はあまり重要な要素ではなく、海底こう配 波形こう配  $H_1/d$  の値が固定された場合には、透過率は、 $H_c/\eta$  と  $\ell/H_c$  とによりほぼ決まり、 $h/H_0$  の値によってはあまり大きく変らないと考えてよいであろう。

$H_0/L_0$  が 0.06 の場合は、 $h/H_0$  0.69 と 0.45 とで透過率はほとんど変らない。 $H_1/d$  を比較してみると、それぞれ、2.46 と 2.05 となっており、0.02 の場合に比してその差は小さい。さらに、 $h/H_0$  が 0.69 の図中には、 $h/H_0$  が 0.2 の場合がプロットされているが、透過率がかなり大きくなっている。この場合の  $H_1/d$  の値は 1.03 となっている。

ブロックの重量は一般に入射波高から適当な算定式を用いて決定される。この実験の場合、 $h/H_0$  が 0.67 では、ブロックは多少不安定であった。ハドソン公式において  $K_D$  を 7.5 としてブロックの重量を計算すると 255 ㄱとなるので、実際にはもう少し大きいブロックを用いる必要があると思われる。したがって、原型で透過率を算定する場合には、図-8(a)ではやや過小であり、 $H_1/d$  に応じて  $h/H_0$  が 0.67 と 0.43 の透過率から内挿して求める必要がある。

1/30 こう配の場合について、 $H_1/d$  を計算してみると、波形こう配 0.02 で 1.60、0.06 で 1.13 となっており、使用ブロックが大きすぎるため、原型の透過率としては過大になっていると考えられる。

波形こう配 0.02 の場合について、必要重量を前と同様に計算してみると 61.8 ㄱとなる。1/10 こう配の場合と比較すると、 $h/H_0$  が 0.43 と 0.2 の場合の必要重量が 80 ㄱと 46 ㄱなので、条件としては両者の中間にある。実際にこれらと比較してみると、図-8(c)の透過率よりやや大きく、図-8(e)の 250 ㄱの場合の透過率より小さいことが認められる。したがって、図-8(f)の場合、海底こう配の影響で、図-8(a)に比較して透過率が大きいと考えるよりも、過大なブロックを使用したため、見掛け上透過率が大きくなっており、適当な重量のものを使用すれば、1/10 こう配の図-8(a)の結果にかなり近くなると考えられる。

1/30 こう配で 110 ㄱのテトラポッドを用いた実験はこの点を確かめるために実施したものである。

この場合、 $H_1/d$  の値は 1.96 で 250 ㄱを用いた場合に比較すると 1/10 こう配の実験条件に近い。図-8(a)と図-8(h)とを比較してみると両者の透過率はほぼ等しいことがわかる。レイノルズ数の差による抵抗変化を考慮すると、この結果は先の推論を裏付けるものと考えてよいであろう。

波形こう配 0.06 の場合も、0.02 とほぼ同じ透過率を示

しているが、これは  $H_1/d$  が小さいことが相当に影響しているように思われる。1/10 こう配で、波形こう配 0.06、 $h/H_0$  が 0.69 の場合は、多少小さいが、ほぼ適切なブロック重量(必要重量  $W_r = 225$  ㄱに対して  $W = 213$  ㄱ使用)となっているので、図-8(h)の透過率は原型としてもほぼ適切なものと考えられる。

砕波帯中に設置された堤防のうちはげ高は、段波の衝突高に近い値であることが見出されている。消波工のある場合にも、このようなことが成立するものとして、上記の透過波高と堤防ののり先水深から、段波の反射波頂高を求め、うちはげ高の実験値と比較してみる。

福田・中村・白石・佐々木<sup>(8)</sup>によると、図-9において、段波の反射波頂高は次式により与えられる。

$$\frac{8\eta}{2\eta^2} m(m-1)(m^2-1) + m^2 - 2m - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (65)$$

ここに、 $\eta$ : 水底からはかった入射段波の波頂高

$u$ : 流速

$m$ : 水底からはかった反射段波の波頂高 ( $R$ ) と入射段波の波頂高の比

$g$ : 重力の加速度

また、流速は次式で表わされる。

$$u = H_T \sqrt{\frac{g(\eta+h)}{2\eta(\eta-aH_T)}} \quad \dots\dots\dots (66)$$

ここに、 $H_T$ : 入射段波の波高。ここでは透過波高を用いる。

$h$ : 堤防の設置水深

$a$ : 擾乱の状態、底面の抵抗によりきまる係数であるが、ここでは 1 とする。

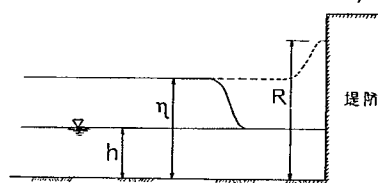


図-9 段波の反射

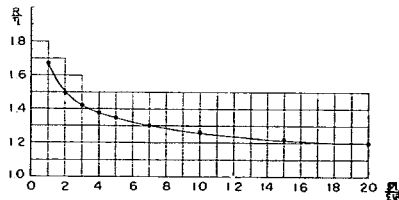


図-10 段波の反射波頂高計算図

表-14 うちあげ高の実験値と計算値との比較

(a) 実験A, B, 海底こう配 1/10

| No  | H <sub>T</sub><br>(cm) | h<br>(cm) | h <sub>1</sub><br>(cm) | h <sub>2</sub><br>(cm) | R <sub>1</sub><br>(cm) | R <sub>2</sub><br>(cm) | Re<br>(cm) | $\frac{Re}{R_1}$ | $\frac{Re}{R_2}$ | $\frac{Re}{H_0}$ |
|-----|------------------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------|------------------|------------------|------------------|
| A-1 | 7.7                    | 6.8       | 7.7                    | 10.5                   | 17.8                   | 20.3                   | 26.4       | 1.48             | 1.30             | 1.76             |
| 2   | 6.0                    | 5.2       | 6.0                    | 8.9                    | 14.0                   | 16.9                   | 23.7       | 1.69             | 1.40             | 1.58             |
| 3   | 4.8                    | 4.0       | 4.8                    | 8.0                    | 11.4                   | 14.3                   | 18.1       | 1.59             | 1.26             | 1.20             |
| 4   | 7.3                    | 5.8       | 7.3                    | 8.8                    | 17.6                   | 18.4                   | 18.5       | 1.05             | 1.01             | 1.23             |
| 5   | 4.9                    | 4.5       | 4.9                    | 7.3                    | 11.2                   | 13.6                   | 14.3       | 1.28             | 1.05             | 0.95             |
| 6   | 3.7                    | 3.0       | 3.7                    | 5.5                    | 8.8                    | 10.6                   | 9.7        | 1.10             | 0.92             | 0.65             |
| 7   | 6.3                    | 5.5       | 6.3                    | 7.8                    | 14.6                   | 15.6                   | 14.6       | 1.0              | 0.94             | 0.97             |
| 8   | 4.4                    | 4.0       | 4.4                    | 6.0                    | 10.1                   | 11.5                   | 10.8       | 1.07             | 0.95             | 0.72             |
| 9   | 2.3                    | 2.5       | 2.5                    | 4.3                    | 4.7                    | 6.8                    | 7.1        | 1.51             | 1.04             | 0.47             |
| 10  | 6.5                    | 5.2       | 6.5                    | 9.0                    | 14.9                   | 16.6                   | 22.5       | 1.51             | 1.35             | 1.50             |
| 11  | 4.0                    | 4.5       | 4.5                    | 7.7                    | 8.5                    | 11.9                   | 11.3       | 1.33             | 0.95             | 0.75             |
| 12  | 2.2                    | 4.0       | 4.0                    | 8.2                    | 4.7                    | 8.4                    | 8.8        | 1.87             | 1.05             | 0.59             |
| 13  | 6.0                    | 5.2       | 6.0                    | 7.7                    | 14.0                   | 15.4                   | 21.4       | 1.53             | 1.39             | 1.43             |
| 14  | 4.3                    | 4.5       | 4.5                    | 6.1                    | 9.6                    | 10.9                   | 11.7       | 1.22             | 1.07             | 0.78             |
| 15  | 3.1                    | 4.0       | 4.0                    | 5.3                    | 6.7                    | 7.9                    | 8.0        | 1.19             | 1.01             | 0.53             |
| B-1 | 6.4                    | 6.8       | 8.1                    | 9.4                    | 15.1                   | 16.4                   | 18.1       | 1.20             | 1.10             | 1.21             |
| 2   | 3.2                    | 5.3       | 5.3                    | 7.6                    | 6.9                    | 9.3                    | 14.3       | 2.07             | 1.54             | 0.95             |
| 3   | 2.1                    | 4.0       | 4.0                    | 6.1                    | 4.6                    | 6.7                    | 12.5       | 2.71             | 1.86             | 0.83             |
| 4   | 5.6                    | 6.0       | 7.1                    | 7.5                    | 13.2                   | 13.5                   | 13.9       | 1.05             | 1.03             | 0.93             |
| 5   | 1.8                    | 4.7       | 4.7                    | 5.8                    | 4.0                    | 5.1                    | 4.8        | 1.20             | 0.94             | 0.53             |
| 6   | 1.0                    | 3.3       | 3.3                    | 4.4                    | 2.3                    | 3.4                    | 3.8        | 1.65             | 1.11             | 0.39             |
| 7   | 2.6                    | 5.5       | 5.5                    | 6.8                    | 5.7                    | 7.0                    | 8.4        | 1.47             | 1.20             | 0.56             |
| 8   | 1.2                    | 4.1       | 4.1                    | 5.1                    | 2.7                    | 3.8                    | 3.9        | 1.44             | 1.02             | 0.26             |
| 9   | 0.8                    | 2.8       | 2.8                    | 3.6                    | 1.8                    | 2.7                    | 2.6        | 1.45             | 0.96             | 0.17             |

表-14(b) 実験C, 海底こう配 1/10

| No  | H <sub>T</sub><br>(cm) | h<br>(cm) | $\delta$<br>(cm) | h <sub>1</sub><br>(cm) | h <sub>2</sub><br>(cm) | R <sub>1</sub><br>(cm) | R <sub>2</sub><br>(cm) | Re<br>(cm) | $\frac{Re}{R_1}$ | $\frac{Re}{R_2}$ | $\frac{Re}{H_0}$ |
|-----|------------------------|-----------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------|------------------|------------------|------------------|
| C-1 | 3.8                    | 0.8       | 2.9              | 3.8                    | 3.7                    | 11.4                   | 11.2                   | 8.8        | 0.77             | 0.79             | 0.84             |
| 2   | 4.5                    | 2.8       | 3.0              | 4.5                    | 5.8                    | 11.5                   | 12.8                   | 14.1       | 1.21             | 1.10             | 1.26             |
| 3   | 5.6                    | 4.8       | 2.5              | 5.6                    | 7.3                    | 13.0                   | 14.6                   | 15.5       | 1.19             | 1.06             | 1.36             |
| 4   | 6.5                    | 6.8       | 1.5              | 6.8                    | 8.3                    | 14.5                   | 15.6                   | 34.1       | 2.35             | 2.18             | 3.02             |
| 5   | 8.9                    | 8.8       | 1.4              | 8.9                    | 10.2                   | 19.4                   | 20.8                   | 52.8       | 2.75             | 2.54             | 4.32             |
| 6   | 1.8                    | 0.8       | 1.6              | 1.8                    | 2.4                    | 4.9                    | 5.5                    | 9.1        | 1.86             | 1.65             | 0.78             |
| 7   | 3.1                    | 2.8       | 1.3              | 3.1                    | 4.1                    | 7.1                    | 8.1                    | 10.2       | 1.44             | 1.26             | 0.86             |
| 8   | 4.0                    | 4.8       | 1.1              | 4.8                    | 5.9                    | 8.7                    | 9.8                    | 11.7       | 1.34             | 1.19             | 0.99             |
| 9   | 5.3                    | 6.8       | 0.6              | 6.8                    | 7.4                    | 11.5                   | 12.0                   | 28.1       | 2.44             | 2.34             | 2.36             |
| 11  | 2.3                    | 0.8       | 4.4              | 2.6                    | 5.2                    | 6.8                    | 9.5                    | 10.8       | 1.59             | 1.14             | 0.71             |
| 12  | 3.8                    | 2.8       | 4.4              | 4.3                    | 7.2                    | 9.7                    | 12.6                   | 15.2       | 1.57             | 1.20             | 1.05             |
| 13  | 5.0                    | 4.8       | 3.7              | 5.6                    | 8.5                    | 11.6                   | 14.5                   | 18.2       | 1.57             | 1.26             | 1.20             |
| 14  | 5.8                    | 6.8       | 3.2              | 6.8                    | 10.0                   | 12.6                   | 15.8                   | 23.5       | 1.86             | 1.49             | 1.57             |
| 15  | 7.1                    | 8.8       | 2.6              | 8.8                    | 11.4                   | 15.4                   | 17.8                   | 36.2       | 2.35             | 2.03             | 2.58             |
| 16  | 1.1                    | 0.8       | 2.5              | 1.3                    | 3.3                    | 2.9                    | 5.0                    | 7.03       | 2.42             | 1.40             | 0.58             |
| 17  | 2.2                    | 2.8       | 2.2              | 2.8                    | 5.0                    | 4.9                    | 7.1                    | 9.03       | 1.84             | 1.27             | 0.73             |
| 18  | 3.1                    | 4.8       | 2.0              | 4.8                    | 6.8                    | 6.7                    | 9.1                    | 13.8       | 2.06             | 1.51             | 1.01             |
| 19  | 4.3                    | 6.8       | 1.3              | 6.8                    | 8.1                    | 9.3                    | 10.6                   | 24.5       | 2.64             | 2.31             | 2.13             |
| 20  | 4.5                    | 8.8       | 1.2              | 8.8                    | 10.0                   | 9.8                    | 11.1                   | 27.7       | 2.83             | 2.49             | 2.00             |
| 21  | 2.4                    | 1.0       | 3.1              | 3.1                    | 4.1                    | 7.3                    | 8.3                    | 7.6        | 1.04             | 0.92             | 0.50             |
| 22  | 2.9                    | 3.0       | 3.0              | 3.7                    | 6.0                    | 6.9                    | 9.3                    | 9.8        | 1.42             | 1.05             | 0.62             |

表-14(b)のつづき

| N <sub>a</sub> | H <sub>T</sub><br>(cm) | h<br>(cm) | $\delta$<br>(cm) | h <sub>1</sub><br>(cm) | h <sub>2</sub><br>(cm) | R <sub>1</sub><br>(cm) | R <sub>2</sub><br>(cm) | R <sub>E</sub><br>(cm) | $\frac{R_E}{R_1}$ | $\frac{R_E}{R_2}$ | $\frac{R_E}{H_0}$ |
|----------------|------------------------|-----------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| C-23           | 4.1                    | 5.0       | 2.8              | 5.2                    | 7.8                    | 9.0                    | 11.7                   | 14.7                   | 1.63              | 1.26              | 0.91              |
| 24             | 5.7                    | 7.0       | 1.9              | 7.2                    | 8.9                    | 12.4                   | 14.2                   | 18.8                   | 1.52              | 1.32              | 1.17              |
| 25             | 7.6                    | 9.0       | 1.0              | 9.0                    | 10.0                   | 16.9                   | 17.4                   | 19.5                   | 1.15              | 1.12              | 1.27              |
| 26             | 1.3                    | 1.0       | 2.2              | 1.7                    | 3.2                    | 3.4                    | 5.0                    | 7.4                    | 2.18              | 1.48              | 0.48              |
| 27             | 2.3                    | 3.0       | 2.2              | 3.0                    | 5.2                    | 5.1                    | 7.2                    | 7.8                    | 1.53              | 1.08              | 0.49              |
| 28             | 3.4                    | 5.0       | 2.1              | 5.0                    | 7.1                    | 8.3                    | 9.5                    | 9.6                    | 1.15              | 1.01              | 0.58              |
| 29             | 4.4                    | 7.0       | 2.1              | 7.0                    | 9.1                    | 9.4                    | 11.6                   | 11.3                   | 1.20              | 0.97              | 0.80              |
| 30             | 5.6                    | 9.0       | 1.4              | 9.0                    | 10.4                   | 12.0                   | 13.6                   | 19.1                   | 1.59              | 1.40              | 1.24              |

表-14(c) 実験D, E 海底こう配 1/30

| N <sub>a</sub> | H <sub>T</sub><br>(cm) | h<br>(cm) | R <sub>C</sub><br>(cm) | R <sub>E</sub><br>(cm) | $\frac{R_E}{R_C}$ | $\frac{R_E}{H_0}$ |
|----------------|------------------------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| D-1            | 5.7                    | 9.5       | 12.1                   | 20.6                   | 1.70              | 1.65              |
| 2              | 5.2                    | 9.3       | 11.3                   | 16.4                   | 1.45              | 1.31              |
| 3              | 5.0                    | 9.1       | 10.9                   | 19.8                   | 1.82              | 1.58              |
| 4              | 4.5                    | 8.9       | 10.6                   | 16.2                   | 1.53              | 1.30              |
| 6              | 4.4                    | 8.0       | 9.5                    | 13.8                   | 1.45              | 1.10              |
| 7              | 5.6                    | 9.5       | 12.1                   | 14.5                   | 1.20              | 1.16              |
| 9              | 4.6                    | 9.1       | 10.0                   | 12.0                   | 1.20              | 0.96              |
| 10             | 4.2                    | 8.9       | 8.9                    | 8.6                    | 0.97              | 0.69              |
| 11             | 3.2                    | 8.4       | 7.0                    | 5.7                    | 0.81              | 0.46              |
| 14             | 4.0                    | 9.3       | 8.8                    | 13.4                   | 1.52              | 1.07              |
| 15             | 3.5                    | 9.1       | 7.7                    | 8.5                    | 1.10              | 0.68              |
| 16             | 2.8                    | 8.9       | 6.2                    | 5.0                    | 0.81              | 0.40              |
| 18             | 1.8                    | 8.0       | 4.1                    | 3.3                    | 0.8               | 0.26              |
| 20             | 4.6                    | 9.3       | 10                     | 11.5                   | 1.15              | 0.92              |
| 21             | 4.2                    | 9.1       | 9.1                    | 9.3                    | 1.02              | 0.74              |
| E-1            | 4.0                    | 9.5       | 8.7                    | 12.4                   | 1.42              | 0.95              |
| 2              | 3.9                    | 9.3       | 8.5                    | 10.5                   | 1.23              | 0.81              |
| 3              | 3.5                    | 9.1       | 7.7                    | 8.6                    | 1.12              | 0.66              |
| 4              | 3.0                    | 8.9       | 6.7                    | 8.3                    | 1.23              | 0.64              |
| 6              | 3.7                    | 9.5       | 8.1                    | 8.9                    | 1.10              | 0.69              |
| 11             | 3.5                    | 9.5       | 7.7                    | 7.3                    | 0.95              | 0.56              |
| 12             | 3.2                    | 9.3       | 7.1                    | 6.8                    | 0.95              | 0.52              |
| 13             | 2.6                    | 9.1       | 5.8                    | 6.7                    | 1.16              | 0.51              |
| 14             | 2.3                    | 8.9       | 5.2                    | 2.9                    | 0.56              | 0.21              |
| 15             | 1.4                    | 8.4       | 3.2                    | 1.4                    | 0.42              | 0.11              |
| 17             | 3.0                    | 9.3       | 6.6                    | 8.3                    | 1.25              | 0.64              |
| 19             | 2.1                    | 8.9       | 4.8                    | 3.7                    | 0.77              | 0.28              |
| 20             | 1.4                    | 8.4       | 3.3                    | 2.4                    | 0.71              | 0.18              |

表-14(d) 実験F 海底こう配 1/30

| N <sub>a</sub> | H <sub>T</sub><br>(cm) | h<br>(cm) | $\delta$<br>(cm) | h'<br>(cm) | R <sub>C</sub><br>(cm) | R <sub>E</sub><br>(cm) | $\frac{R_E}{R_C}$ |
|----------------|------------------------|-----------|------------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| F-1            | 4.5                    | 9.1       | 1.3              | 10.4       | 11.2                   | 15.1                   | 1.35              |
| 2              | 3.8                    | 8.7       | 1.3              | 10.0       | 9.7                    | 13.5                   | 1.39              |
| 3              | 3.5                    | 8.4       | 1.4              | 10.2       | 9.6                    | 11.6                   | 1.21              |
| 4              | 4.0                    | 8.9       | 0.9              | 9.8        | 8.5                    | 9.2                    | 1.08              |
| 5              | 3.2                    | 8.5       | 0.7              | 9.2        | 7.7                    | 6.0                    | 0.78              |
| 6              | 2.1                    | 8.1       | 0.6              | 8.7        | 5.3                    | 3.3                    | 0.62              |
| 7              | 2.9                    | 8.7       | 0.6              | 9.3        | 7.1                    | 7.8                    | 1.10              |
| 8              | 2.1                    | 8.4       | 0.4              | 8.8        | 5.1                    | 4.8                    | 0.94              |
| 9              | 1.3                    | 8.0       | 0.3              | 8.3        | 3.3                    | 3.3                    | 1.00              |

表-14 うちあげ高の実験値と計算値との比較

(e) 実験D, E (水位上昇を考慮した場合)

| N <sub>a</sub> | H <sub>T</sub><br>(cm) | h<br>(cm) | $\frac{h}{H_C}$ | $\delta$<br>(cm) | h'<br>(cm) | R <sub>C</sub><br>(cm) | R <sub>E</sub><br>(cm) | $\frac{R_E}{R_C}$ |
|----------------|------------------------|-----------|-----------------|------------------|------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| D-1            | 5.7                    | 9.5       | 1.8             | 1.4              | 10.9       | 13.7                   | 20.6                   | 1.50              |
| 2              | 5.2                    | 9.3       | 2.7             | 1.6              | 10.9       | 12.9                   | 16.4                   | 1.27              |
| 3              | 5.0                    | 9.1       | 3.4             | 1.8              | 10.9       | 12.5                   | 19.8                   | 1.58              |
| 4              | 4.5                    | 8.9       | 4.3             | 1.8              | 10.7       | 11.6                   | 16.2                   | 1.40              |
| 6              | 4.4                    | 8.0       | 6.0             | 2.0              | 10         | 11.7                   | 13.8                   | 1.18              |
| 7              | 5.6                    | 9.5       | 1.1             | 1.1              | 10.6       | 13.2                   | 14.5                   | 1.10              |
| 9              | 4.6                    | 9.1       | 2.3             | 1.3              | 10.4       | 11.3                   | 12.0                   | 1.06              |
| 10             | 4.2                    | 8.9       | 2.7             | 1.3              | 10.2       | 10.5                   | 8.6                    | 0.82              |
| 11             | 3.2                    | 8.4       | 3.3             | 1.1              | 9.5        | 8.2                    | 5.7                    | 0.70              |
| 14             | 4.0                    | 9.3       | 1.4             | 0.8              | 10.1       | 9.6                    | 13.4                   | 1.40              |
| 15             | 3.5                    | 9.1       | 1.9             | 0.9              | 10         | 8.6                    | 8.5                    | 0.99              |
| 16             | 2.8                    | 8.9       | 2.2             | 0.8              | 9.7        | 7.0                    | 5.0                    | 0.71              |
| 18             | 1.8                    | 8.0       | 3.1             | 0.6              | 8.6        | 4.7                    | 3.3                    | 0.70              |
| 20             | 4.6                    | 9.3       | 1.1             | 0.9              | 10.2       | 11.0                   | 11.5                   | 1.05              |
| 21             | 4.2                    | 9.1       | 1.4             | 0.9              | 10         | 10.1                   | 9.3                    | 0.92              |
| E-1            | 4.0                    | 9.5       | 1.8             | 1.0              | 10.5       | 9.8                    | 12.4                   | 1.27              |
| 2              | 3.9                    | 9.3       | 2.7             | 1.2              | 10.5       | 9.9                    | 10.5                   | 1.06              |
| 3              | 3.5                    | 9.1       | 3.4             | 1.2              | 10.3       | 9.0                    | 8.6                    | 0.96              |
| 4              | 3.0                    | 8.9       | 4.3             | 1.2              | 10.1       | 9.2                    | 8.3                    | 0.90              |
| 6              | 3.7                    | 9.5       | 1.2             | 0.7              | 10.2       | 8.9                    | 8.9                    | 1.0               |
| 11             | 3.5                    | 9.5       | 0.94            | 0.6              | 10.1       | 8.3                    | 7.3                    | 0.88              |
| 12             | 3.2                    | 9.3       | 1.5             | 0.7              | 10         | 7.7                    | 6.8                    | 0.88              |
| 13             | 2.6                    | 9.1       | 2.1             | 0.7              | 9.8        | 6.5                    | 6.7                    | 1.03              |
| 14             | 2.3                    | 8.9       | 2.5             | 0.7              | 9.6        | 5.9                    | 2.9                    | 0.49              |
| 15             | 1.4                    | 8.4       | 3.0             | 0.4              | 8.8        | 3.6                    | 1.4                    | 0.39              |
| 17             | 3.0                    | 9.3       | 1.3             | 0.6              | 9.9        | 7.2                    | 8.3                    | 1.15              |
| 19             | 2.1                    | 8.9       | 2.1             | 0.6              | 9.5        | 5.4                    | 3.7                    | 0.69              |
| 20             | 1.4                    | 8.4       | 2.7             | 0.6              | 8.8        | 3.6                    | 2.4                    | 0.67              |

計算の便利のため、(65)式をとり、 $R/\eta$ と $g\eta/2u^2$ との関係を図示すると図-10のようになる。砕波帯中の波は完全な段波ではなく、波頂高 $\eta$ は $(H_T+h)$ より小さいと思われるが、その差はあまり大きくないと思われるので、この計算では $\eta = H_T+h$ で代用することにする。

表-14は以上の方法により計算したうちあげ高と実験により測定したうちあげ高を比較したものである。この場合、1/10 こう配では、消波工背後の水位上昇量 $\delta$ も測定しているので、水深として $\delta$ を加へたものと、加へないものとの両者について計算を行なった。表中の添字1

は水位上昇量を加えない場合であり、添字2は水位上昇を加えた場合を意味する。

また、添字1の場合も、水位上昇を多少補う意味で、透過波高が存在する水深を用いた。例えば、波形こう配0.02の場合は、 $h/H_T$ の値として1を採用し、0.04では1.12、0.06では1.27とした。この値は砕波水深と砕波波高との比を参照して定めたものである。

これらの表のうち、C-4,5,9,14,15,19,20はいわゆる衝撃圧が作用する領域に属し、しかも、消波工の高さが低く、その効果が著しく小さい場合なので、ここでは除外して考える。

実験A,B,Cについてみると、実験値と計算値の総平均は、 $Re/R_1$ の場合1.52、 $Re/R_2$ の場合1.17となっており、水位上昇を考慮した方がよい結果が得られている。一般に実験値と計算値との比が大きくなるのは、消波工の規模が小さく、うちあげ高が比較的大きい場合である。豊島・富永・橋本に<sup>(9)</sup>よると、砕波領域（衝撃圧の発生域を除く。）では、うちあげ高と段波の反射波頂高との比は1.3程度になることが指摘されている。

表中には、うちあげ高と沖波波高との比が計算されているが、 $Re/R_2$ が1.2より大きくなるのは、ほとんど、 $Re/H_0$ の値が1以上の場合である。消波工を設置する場合には、一般に、うちあげ係数を1以下にすることが多いと思われるので、少くとも有効な消波工の場合には、段波の反射波頂高を10～20%増すことにより、うちあげ高を推定し得ると考えてよいであろう。

海底こう配1/30の場合は、実験D,Eは水位上昇量は測定されていない。一方、実験Fは水位上昇量が測定されている。両者について実験値と計算値との比を求めてみると、前者では総平均で1.12、後者では1.10で、その差は比較的小さい。これは1/30こう配の場合は水位上昇が小さいためである。

以上の検討により、消波工を有する堤防のうちあげ高は、消波工のみの場合の透過波高が求められれば、段波の反射波頂高を計算することによりおよそその推定が可能であることが明らかとなった。この場合、堤防ののり先水深は、消波工の存在のため、相当に増加する場合があるので、この補正をする必要がある。

消波工による水位上昇量は、越波量と消波工の抵抗の大きさによりほぼ決定されると思われる。越波量は非常に複雑な量なので、その代りに、透過波高をとり、水位上昇量と透過波高との比をとれば、この値は消波工の規模に密接な関係があると思われる。

図-11は1/10と1/30こう配の場合について、 $\delta/H_T$ と $\ell/H_c$ との関係調べたものである。まず1/10こう配の場合は、堤防ののり先水深( $h$ )が $h/H_0$ にして0.1より大きい場合は、実験値は比較的真実がよく、平均的には図-11に示すような関係が得られる。一方、堤防の

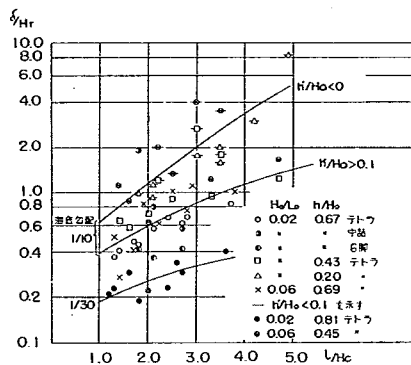


図-11 消波工による水位上昇量

位置が汀線付近か、または、汀線より陸側にある場合には、 $\delta/H_T$ の値は相当に大きくなり、かつ、かなりのばらつきがみられる。とくに、消波工が長くなるとこの傾向が強い。この場合には、水位上昇量そのものはあまり大きくないが、透過波高が著しく小さくなり、その結果、相対的な上昇量も大きくなる。 $h/H_0 > 0.1$ の場合でも、消波工の形状によりかなりの差がみられる。中詰消波工の場合は一般に上昇量が大きく、6脚ブロックの場合は、テトラポットの場合よりやや小さい値となっている。

1/30こう配の場合は、水位上昇量は1/10こう配の場合よりかなり小さい。第3章において汀線における波頂高は海底こう配がゆるくなると、それに比例して小さくなることを示した。ここでは、設置水深の小さい場合については実験していないが上述の結果から類推して、1/10こう配の場合の1/3程度になると考えてよいと思われる。実験D,Eについて図-11の結果から水位上昇量を推定し、これを考慮してうちあげ高を推定してみる。その結果を表-14(e)に示す。実験Dの $Re/R_2$ の平均値が1.09、実験Eの場合は0.87となっている。実験値が大きくなるのはやはりうちあげ高が大きい場合で、計算値がとくに大きくなるのは、うちあげ高が極端に小さい場合である。この場合には、波も段波状ではなく、通常の重複波形状をなすと考えられるので、重複波の波頂高を求める計算をすれば実験値に一層近い値が得られると推定される。

図-8には、6脚ブロック消波工と中詰捨石の上を二層積テトラポットで覆った消波工（以後中詰消波工と呼ぶ。）の透過率がプロットされている。同規模のテトラポット消波工と比較すると、 $H_0/\eta$ が0.7の場合には、透過率にほとんど差はないが、天ば高が高くなるにつれて、テトラポット、6脚ブロック、中詰消波工の順で透過率が小さくなるのがわかる。

一方、うちあげ高をみると、表-12(a)からわかる

ように、消波工による差はあまり大きくないが、テトラポッドの乱積、中詰消波工、6脚ブロック層積の順となっている。ブロックのみの場合は、一般に透過率の小さい方がうちあげ高も小さくなるといえるのであるが、中詰捨石を有する場合は、捨石内の透過が小さいため、透過率は小さくなるが、水流がブロック内に集中するので、うちあげ高はそれほど小さくならない。天ば高が高い場合についてみると、透過率は中詰消波工が最低であるが、うちあげ高は6脚ブロック層積の方がやや小さくなっている。

#### (4) うちあげ高と越波量

うちあげ高と越波量との測定結果を表-15に示す。この表をみると、うちあげ高が堤防高と一致する場合でも、無次元化した越波量  $2\pi Q/H_0 L_0$  ( $Q$  は堤防の単位幅当り、1波当りの越波量を示す。) は  $1 \sim 2 \times 10^{-3}$  程度の値である。 $2\pi Q/H_0 L_0$  が  $10^{-3}$  程度の越波量は、通常の堤防では越波量の許容限界と考えられている。

さらに、越波量  $Q$  と堤防上に飛び出した水脈の高さ ( $R-H_c$ ) との関係調べてみると図-12 のようになる。第2章において、5分堤防の場合、 $Q$  と  $R-H_c$  との間に近似的に次式のような関係のあることを示した。

$$Q = 7.8 \times 10^{-2} (R-H_c)^2 \quad (67)$$

この関係が図中の実線である。これをみると、消波工の

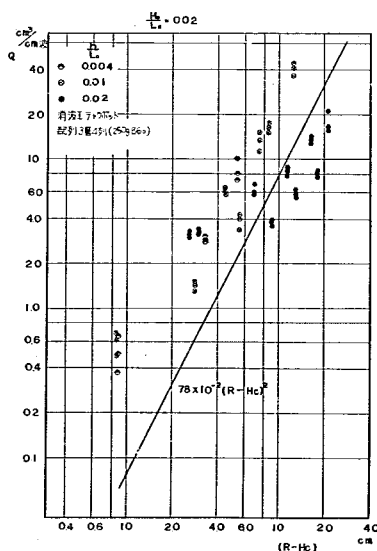


図-12 打ちあげ高と越波量との関係

ある場合でも、 $Q$  と  $R-H_c$  との関係はおおよそ(67)式で示される実線と一致する。しかし、水深の浅い場合、 $R-H_c$  が小さい場合は、越波量は(67)式から計算される値よりかなり大きくなっている。

(67)式において、 $R-H_c$  が1mの場合の越波量を計算すると、 $Q = 0.078 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{T}$  となる。図-12から越波量を求めると、この値の5~6倍にも達し、 $0.5 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{T}$  程度の値となる。この値は通常の堤防の許容越波量をはるかに超えるものである。

以上の実験結果を参照すると、消波工を設けて越波量を規制しようとする場合なので、越波量を少くとも、通常の許容越波量 ( $2\pi Q/H_0 L_0 < 10^{-3}$ , あるいは、 $Q < 0.1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{T}$ ) 以下におさえることにすると、堤防高としては、うちあげ高に等しい高さをとる必要があることになる。

もし、越波量の許容値が大きければ、図-12から堤防高をうちあげ高よりどの程度低くとり得るか推定しうるのであろう。しかし、一般的には、うちあげ高より堤防高を低くできる量は小さいと考えてよいであろう。

## 4.4 根固工法の検討

### (1) フィルター材の粒径

海浜砂と捨石、あるいは、捨石と消波ブロックの粒径比があまり大きいと、砂は捨石の空隙の間を、捨石は消波ブロックの間を通過して移動できるため、いわゆる、波による吸出し現象が生ずるものと考えられる。しかし、粒径比を小さくしてゆくと、空隙を通過して移動することはしだいに困難となり、ついに物理的に移動が不可能となる限界の粒径比に達するはずである。

この粒径比を例えば図-13に示すように、粒子の形が球で、しかも、単層におかれていと仮定すれば、単純な配置の場合は簡単に求まり、大きい粒径を  $R$ 、小さい粒径を  $r$  とすれば、移動阻止限界粒径比はつぎのようになる。

$$\frac{r}{R} = 0.414 \text{ (Aの配置の場合)} \quad (68)$$

$$\frac{r}{R} = 0.155 \text{ (Bの配置の場合)} \quad (69)$$

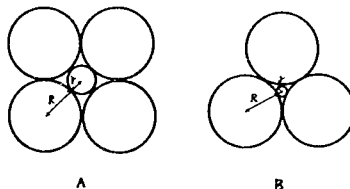


図-13 底質の移動阻止限界粒径比

表 15 越波量の測定結果

| 実験<br>番号 | $\frac{h}{L_0}$ | $\frac{H_c}{H_0}$ | $\frac{Q}{cm/波}$ | $\frac{2\pi Q}{H_0 L_0}$ | R<br>cm | R-Hc<br>cm | 実験<br>番号 | $\frac{h}{L_0}$ | $\frac{H_c}{H_0}$ | $\frac{Q}{cm/波}$ | $\frac{2\pi Q}{H_0 L_0}$ | R<br>cm | R-Hc<br>cm |
|----------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------------|---------|------------|----------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------------|---------|------------|
| 1-1      | 0.020           | 4.28              | 0.417            | $0.535 \times 10^{-3}$   | 35.9    |            | 13-1     | 0.012           | 1.64              | 1.35             | $1.52 \times 10^{-3}$    | 16.46   |            |
| 2        |                 | 4.28              | 0.434            | 0.545                    |         |            | 2        |                 | 1.68              | 1.40             | 1.64                     |         |            |
| 3        |                 | 4.08              | 0.334            | 0.403                    |         |            | 3        |                 | 1.65              | 1.35             | 1.59                     |         |            |
| 2-1      |                 | 3.91              | 1.17             | 1.47                     |         |            | 14-1     |                 | 1.17              | 6.37             | 7.44                     |         | 4.46       |
| 2        |                 | 3.91              | 1.20             | 1.49                     |         |            | 2        |                 | 1.12              | 5.83             | 6.41                     |         |            |
| 3        |                 | 3.79              | 1.47             | 1.87                     |         |            | 3        |                 | 1.15              | 6.08             | 7.10                     |         |            |
| 3-1      |                 | 3.44              | 3.17             | 4.13                     |         | 2.91       | 15-1     |                 | 0.87              | 12.16            | 14.51                    |         | 7.46       |
| 2        |                 | 3.33              | 3.33             | 4.23                     |         |            | 2        |                 | 0.87              | 15.41            | 17.83                    |         |            |
| 3        |                 | 3.33              | 3.24             | 4.07                     |         |            | 3        |                 | 0.85              | 13.33            | 15.27                    |         |            |
| 4-1      |                 | 2.64              | 3.97             | 4.94                     |         | 9.01       | 16-1     |                 | 0.36              | 41.66            | 47.41                    |         | 12.56      |
| 2        |                 | 2.69              | 3.60             | 4.48                     |         |            | 2        |                 | 0.37              | 36.33            | 42.12                    |         |            |
| 3        |                 | 2.69              | 3.80             | 4.73                     |         |            | 3        |                 | 0.36              | 44.33            | 51.52                    |         |            |
| 5-1      |                 | 2.16              | 6.17             | 7.52                     |         | 13.91      | 17-1     | 0.079           | 0.55              | 15.00            | 17.93                    | 14.25   | 8.55       |
| 2        |                 | 2.16              | 5.54             | 6.67                     |         |            | 2        |                 | 0.55              | 16.78            | 19.83                    |         |            |
| 3        |                 | 2.16              | 5.92             | 7.29                     |         |            | 3        |                 | 0.55              | 17.33            | 20.66                    |         |            |
| 6-1      |                 | 1.75              | 7.88             | 9.51                     |         | 17.91      | 18-1     |                 | 0.79              | 7.60             | 8.63                     |         | 5.55       |
| 2        |                 | 1.73              | 8.43             | 10.17                    |         |            | 2        |                 | 0.87              | 4.27             | 5.37                     |         |            |
| 3        |                 | 1.71              | 8.35             | 9.89                     |         |            | 3        |                 | 0.85              | 3.93             | 4.59                     |         |            |
| 7-1      | 0.016           | 1.92              | 10.40            | 12.44                    | 31.51   | 11.51      | 4        |                 | 0.85              | 3.40             | 4.01                     |         |            |
| 2        |                 | 1.90              | 8.87             | 10.38                    |         |            | 19-1     |                 | 1.13              | 1.53             | 1.89                     |         | 2.85       |
| 3        |                 | 1.89              | 7.60             | 8.63                     |         |            | 2        |                 | 1.11              | 1.42             | 1.67                     |         |            |
| 8-1      |                 | 1.50              | 13.33            | 16.58                    |         | 16.51      | 3        |                 | 1.14              | 1.33             | 1.64                     |         |            |
| 2        |                 | 1.46              | 14.33            | 16.86                    |         |            | 20-1     |                 | 1.28              | 0.68             | 0.813                    |         | 0.85       |
| 3        |                 | 1.50              | 13.33            | 16.58                    |         |            | 2        |                 | 1.28              | 0.48             | 0.562                    |         |            |
| 9-1      |                 | 1.02              | 21.17            | 26.33                    |         | 21.31      | 3        |                 | 1.34              | 0.62             | 0.763                    |         |            |
| 2        |                 | 1.02              | 16.08            | 20.00                    |         |            | 21-1     | 0.0039          | 0.74              | 2.80             | 3.24                     | 11.17   | 3.37       |
| 3        |                 | 0.99              | 16.60            | 20.49                    |         |            | 2        |                 | 0.72              | 2.93             | 3.43                     |         |            |
| 10-1     |                 | 2.39              | 5.80             | 6.92                     |         | 6.91       | 3        |                 | 0.75              | 2.96             | 3.50                     |         |            |
| 2        |                 | 2.37              | 6.87             | 7.94                     |         |            | 22-1     |                 | 0.98              | 0.500            | 0.585                    |         | 0.87       |
| 3        |                 | 2.41              | 6.00             | 7.23                     |         |            | 2        |                 | 1.00              | 0.367            | 0.450                    |         |            |
| 11-1     |                 | 2.78              | 3.23             | 3.87                     |         | 2.61       | 3        |                 | 0.97              | 0.65             | 0.753                    |         |            |
| 2        |                 | 2.78              | 3.23             | 3.74                     |         |            | 23-1     |                 | 0.56              | 8.00             | 9.53                     |         | 5.37       |
| 3        |                 | 2.81              | 3.00             | 3.58                     |         |            | 2        |                 | 0.55              | 10.11            | 11.86                    |         |            |
| 12-1     |                 | 3.20              | 1.89             | 2.15                     |         | 2.61       | 3        |                 | 0.57              | 7.22             | 8.71                     |         |            |
| 2        |                 | 3.26              | 1.01             | 1.22                     |         |            |          |                 |                   |                  |                          |         |            |
| 3        |                 | 3.39              | 0.90             | 1.11                     |         |            |          |                 |                   |                  |                          |         |            |
| 4        |                 | 3.32              | 0.867            | 1.07                     |         |            |          |                 |                   |                  |                          |         |            |

粒径比は粒子の配列の仕方によっても異なるものであることがわかる。実際には、砂、捨石、消波ブロックとも球とはかなり異なった形をしており、しかも、何層にも重なっている場合もあるから、単純にこの数値を採用できないが、一つの目安を与えるものであろう。

つぎに、簡単な根固工の模型により、波による根固工の下底質移動量および移動阻止限界比を検討した。図-14のように、小砂利を堤防前面に薄く散布し、その上に根固ブロックとして平均粒径(d) 40mm、重さ30~35gの碎石を1層および2層に積み重ねて根固工とした。この根固工に波を当てて小砂利の移動状況を観測した。さらに、根固工より飛び出した小砂利の重量を測定した。実験方法はつぎのとおりである。

造波水路は、長さ17m、幅0.6m、高さ0.8mで、その一端に、木製の1/10こう配の海床を設け、その上に上述のような模型を設置した。実験波は、波高3~10cm、周期は1.0~1.6secである。底質材料としては、2.8mm、4.0mm、4.8mm、5.8mmのはほぼ均一の小砂利を用いた。

根固ブロックが1層および2層の場合の小砂利の移動量を図-15に示す。小砂利の移動量は、根固ブロックより飛び出し、根固工前面を波の運動につれて移動しているものを、実験終了時に集めて測定した。実験時間はいずれも15分間である。

これらの図によるとつぎのことがわかる。

- (i) 沖波波高が大きいほど飛び出し量が多い。
- (ii) 小砂利の粒径が小さいほど飛び出し量が多い。
- (iii) 粒径が4mm以上的小砂利の飛び出し量はちたばりが大きい。これは根固ブロックと小砂利との粒径比が小さくなるため、空隙の間を通過しての移動が阻止される場合があることを示していると考えられる。

以上の考察と実験結果より、粒径比  $r/R=0.1$  以上のときは、上層の大粒径のものによる下層の小粒径の砂の移動をおさえる効果を期待してよいように思われる。

## [2] 捨石フィルターおよびマットレスの効果

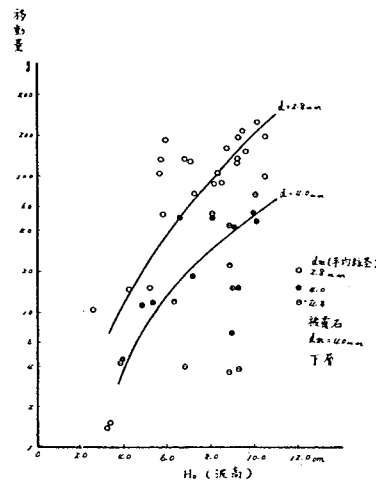
捨石フィルター層からの底質の飛び出し機構は複雑で単純なものではないと思われるが、フィルター下の底質に作用する掃流力を、底質の限界掃流力以下になるようフィルターを設計することも一つの方法と考えられる。波による捨石層内の流れ(とくに砕波している場合)は著しく複雑なので、ここではまず定常流で捨石フィルター層下の底質に作用する掃流力をしらべてみる。

捨石フィルター内の流れのモデルとして、2節と同様なモデルを考えると、捨石内の仮想流管の径深は(47)式で示されるので、動水こう配  $I$  を受けるフィルター層内の間隙部分に働く摩擦応力  $\tau$ 、および摩擦速度  $u_{*}$  は次式で示されると推定される。

$$\tau = \rho B R_p I = \rho u_{*}^2 \quad (70)$$

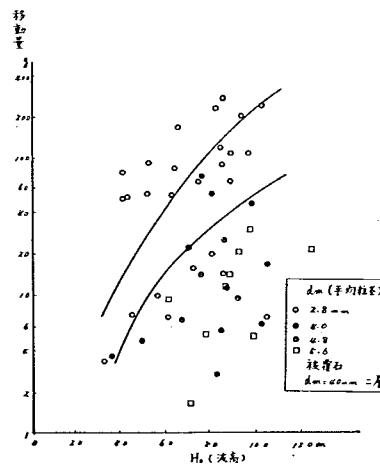


図-14 移動阻止限界粒径比の検討に関する模型



(a) 根固工1層

図-15 根固工下部の底質の移動量



(b) 根固工2層

図-15 根固工下部の底質の移動量

一方、砂の移動限界摩擦底力  $\tau_c$  および移動限界摩擦速度  $u_{*c}$  は粒径と比重で定まり、 $\tau \geq \tau_c$  の場合に砂の移動が起る。水路内に図-16 に示すような模型をつくり、水深、動水こう配、砂の粒径などを变化させて、上式の妥当性を検討した。なお、碎石の平均粒径は 3.67 cm、空隙率  $\lambda$  は 0.513 であった。

実験結果を表-16 に示す。(70)式により計算した摩擦速度  $u_*$ 、砂の移動限界摩擦速度  $u_{*c}$  (岩垣公式による)、および、砂の移動状況を併記してある。これによると、はば (70) 式が成立し、このような考え方で捨てフィルター下の砂の移動限界を推定できることがわかる。なお、表-16 には、通常の摩擦速度の算定式  $u_* = \sqrt{ghI}$  より求めた値も付記してあるが、 $u_{*c}$  と比較するとオーダーが異なりこのような計算は適用できないことがわかる。

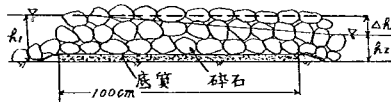


図-16 定常流下のフィルター模型

以上は定常流の場合であるが、波が作用する根固工模型の場合についてさらに検討してみる。長さ 20 m、幅 0.3 m、深さ 0.6 m の造波水路の一端に、1/15 の木製海床をつくり、その上に、図-17 に示すような根固工模型を設置した。堤防は鉛直堤とし、その前面の幅 25 cm の区間のみに砂を入れ、その上に、平均粒径 8 mm の玉砂利を敷いてフィルターとし、さらに、30 号の 6 脚ブロックを 1~2 層設置して根固工とした。底質の粒径および比重は表-17 のとおりである。

堤防の堤脚水深は 0 とし、水路一様部の水深は 45 cm である。波は波高 2~7 cm、周期 1~2 sec 程度の範囲で变化させた。

以上の条件で、根固工および堤防に波を当てて、堤防への波のうちあげ高と同時刻の根固工前面の水位とを目測し、水面こう配を求めた。この値と碎石の粒径から摩擦速度を計算し、一方、側面より底質の移動状況を観察した。摩擦速度が小さく、底質が移動しない状況から実験を始め、徐々に波を増大させ、底質の移動限界および移動限界以上の状況が発生させた。それぞれの状況に対応する摩擦速度と、底質の移動限界摩擦速度および、底質の移動状況との関係をしらべた。その結果を図-18 に

表-16 捨てフィルター下の砂の移動限界

| 実験<br>番号 | 底質          | 粒径<br>d(mm) | 比重    | dh<br>(cm) | $\frac{h_1+h_2}{2}$<br>(cm) | I      | $u_*'$<br>(cm/sec) | $u_*$<br>(cm/sec) | $u_{*c}$<br>(cm/sec) | 底質移動状況                                |
|----------|-------------|-------------|-------|------------|-----------------------------|--------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 1        | 砂(A)        | 0.76        | 2.700 | 1.99       | 15.05                       | 0.0199 | 17.13              | 1.64              | 2.04                 | 中央部より下流でかなり移動                         |
| 2        | "           | "           | "     | 2.77       | 12.30                       | 0.0277 | 18.27              | 1.93              | "                    | (下流側 2/3 はかなり移動、巻き上げも発生、粒数もかなり多い)     |
| 3        | "           | "           | "     | 2.07       | 15.20                       | 0.0207 | 17.56              | 1.67              | "                    | やや移動状態                                |
| 4        | "           | "           | "     | 1.56       | 16.40                       | 0.0156 | 15.83              | 1.45              | "                    | ほとんど移動なし                              |
| 5        | "           | "           | "     | 3.41       | 9.55                        | 0.0341 | 17.86              | 2.14              | "                    | (上流側より 1/3 の点付近から移動開始かなり移動、下流側巻き上げ状態) |
| 6        | "           | "           | "     | 1.36       | 7.15                        | 0.0136 | 9.76               | 1.35              | "                    | 全く移動なし                                |
| 7        | 砂(B)        | 0.86        | 2.675 | 2.17       | 15.45                       | 0.0217 | 18.13              | 1.71              | 2.17                 | 安定 下流端で数粒が微動                          |
| 8        | "           | "           | "     | 4.99       | 18.10                       | 0.0499 | 29.75              | 2.58              | "                    | 中央部より下流でわずかに移動                        |
| 9        | "           | "           | "     | 6.55       | 12.61                       | 0.0655 | 28.45              | 2.97              | "                    | 上流側 1/3 付近より下流側にかへかなり移動               |
| 10       | "           | "           | "     | 4.27       | 11.00                       | 0.0427 | 28.45              | 2.39              | "                    | ほぼ安定                                  |
| 11       | 砂(C)        | 0.49        | 2.747 | 1.77       | 15.00                       | 0.0177 | 16.13              | 1.54              | 1.73                 | 全く移動なし                                |
| 12       | "           | "           | "     | 4.15       | 17.45                       | 0.0415 | 26.64              | 2.36              | "                    | 上流端より 1/3 付近から下流側にかへ移動                |
| 13       | "           | "           | "     | 6.34       | 11.45                       | 0.0634 | 26.67              | 3.22              | "                    | 上流側より 1/3 付近から下流側で移動                  |
| 14       | "           | "           | "     | 4.96       | 11.45                       | 0.0496 | 23.59              | 2.58              | "                    | ほぼ移動なし                                |
| 15       | 砂(D)        | 1.30        | 2.768 | 3.83       | 17.03                       | 0.0383 | 26.36              | 2.28              | 2.76                 | 全く安定状態                                |
| 16       | "           | "           | "     | 6.25       | 19.20                       | 0.0625 | 34.29              | 2.39              | "                    | (中央部より下流側において数ヶ所限界状態に達した所あり)          |
| 17       | "           | "           | "     | 9.15       | 21.15                       | 0.0915 | 43.55              | 3.51              | "                    | 上流端から下流端まで粒径の 1 倍~2 倍の層になって移動         |
| 18       | "           | "           | "     | 9.61       | 14.97                       | 0.0961 | 37.62              | 3.59              | "                    | 限界状態寸前                                |
| 19       | "           | "           | "     | 12.63      | 14.95                       | 0.1263 | 43.10              | 4.13              | "                    | ほぼ全面にわたって限界状態                         |
| 20       | 砂(G)        | 0.413       | 2.737 | 4.45       | 13.55                       | 0.0445 | 24.31              | 2.43              | 1.68                 | 限界状態、粒子 1 つぐらいの層で移動                   |
| 21       | 砂(G)        | "           | "     | 3.28       | 12.55                       | 0.0328 | 20.09              | 2.09              | "                    | 移動なし                                  |
| 22       | アンバー<br>ライト | 0.255       | 1.300 | 1.08       | 18.60                       | 0.0108 | 14.03              | 1.20              | 0.79                 | 限界状態寸前、1カ所わずかに巻き上げ状態あり                |
| 23       | "           | "           | "     | 1.46       | 19.30                       | 0.0146 | 16.62              | 1.40              | "                    | 完全移動状態                                |
| 24       | 石灰粉         | 0.233       | 1.580 | 0.81       | 18.65                       | 0.0081 | 12.17              | 1.04              | 1.01                 | 限界状態寸前、中央部に一部浮動あり                     |
| 25       | "           | "           | "     | 1.35       | 19.60                       | 0.0135 | 16.10              | 1.34              | "                    | 完全移動状態                                |
| 26       | 砂(I)        | 0.210       | 2.673 | 1.76       | 19.65                       | 0.0176 | 18.41              | 1.54              | 1.49                 | 中央部に一部限界状態に達した所あり                     |
| 27       | "           | "           | "     | 3.17       | 21.00                       | 0.0317 | 25.54              | 2.06              | "                    | 中央部より下流は完全に粒状状態、上流端では移動なし             |
| 28       | 砂(F)        | 0.30        | 2.787 | 2.02       | 19.90                       | 0.0202 | 19.15              | 1.65              | 1.59                 | 移動なし                                  |
| 29       | "           | "           | "     | 2.87       | 17.25                       | 0.0287 | 22.13              | 1.96              | "                    | 下流側より 1/3 ぐらいの点まで限界状態                 |
| 30       | "           | "           | "     | 1.59       | 16.10                       | 0.0159 | 15.84              | 1.46              | "                    | 完全に安定状態                               |
| 31       | アンバー<br>ライト | 0.255       | 1.300 | 0.80       | 18.40                       | 0.0080 | 12.01              | 1.03              | 0.79                 | 限界状態                                  |

表-17 ブロックの積み方と底質の特性

| 実験番号      | ブロック | 砂の粒径   | 砂の比重  |
|-----------|------|--------|-------|
| 34 ~ 46   | 2層   | 0.26mm | 2.70  |
| 47 ~ 59   | 2    | 0.49   | 2.747 |
| 60 ~ 69   | 1    | 0.49   | 2.747 |
| 70 ~ 90   | 1    | 0.86   | 2.675 |
| 91 ~ 95   | 2    | 0.86   | 2.675 |
| 96 ~ 98   | 2    | 0.86   | 2.675 |
| 99 ~ 108  | 2    | 0.26   | 2.700 |
| 109 ~ 115 | 1    | 0.49   | 2.747 |
| 116 ~ 130 | 1    | 0.49   | 2.747 |

つぎに、マットレスの底質移動抑止効果をしらべるために、図-16において、フィルター層と砂との間に種々のマットレスを敷き、砂の移動限界に対する影響をしらべた。マットレスは透過性のものを3種類、不透過性のものを1種類用いた。

実験結果を表-18に示す。透過性マットレスを敷いた場合は、 $u_{*c}$ が $u_{*c}$ よりかなり大きくなると砂の移動が起らないことがうかがえる。また、不透過性マットレスの場合は、この程度の動水こう配ではまったく砂移動は起らず、相当に効果的であることが認められた。

### (3) 大型模型実験による各種工法の比較検討

以上の検討により、適当な捨石フィルター、マットレスにより底質の移動が抑止されることが明らかとなった。そこで、これらの結果を活用し、さらに、大型模型実験により有効な根固工法について検討してみる。

#### (1) 実験方法

大型造波水路(長さ80m, 幅2m, 深さ4m)中に平均粒径0.8mmの砂を約1/15こう配に敷き、まず、無堤で波高60cm, 周期5secの波を当てて堆積型の平衡海浜をつくった。ついで、その海浜のほぼ汀線付近に鉛直堤を置いて、波高60cm, 周期3.5secの波を当ててのり先の洗掘状況をしらべた。さらに、種々の根固工を設置してその効果を検討した。

根固ブロックとしては30kgの6脚ブロックを使用し、捨石フィルターとしては適当な大きさの碎石を用いた。根固工の概要図は図-19の

示す。

これによると、かなりのばらつきはあるが、上述のような考え方で計算した移動限界摩擦速度より大きい場合に移動が起ると考えてよいようである。

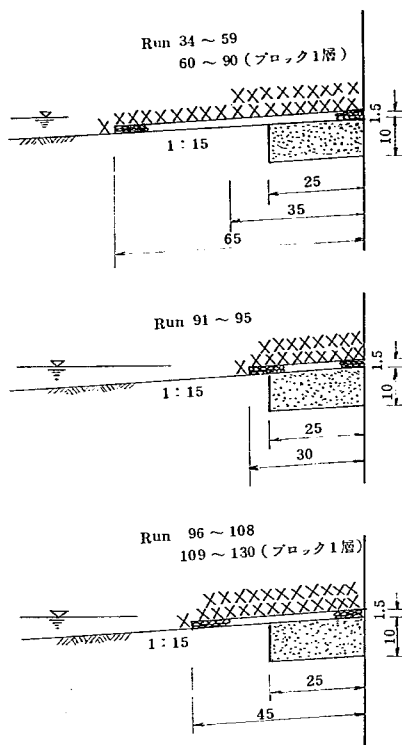


図-17 波による砂の移動限界の検討模型

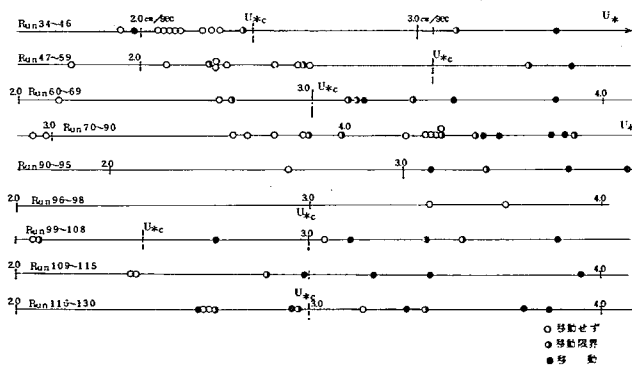


図-18 フィルター下部の波の移動限界の検討

表-18 マットを敷いた場合の砂の移動限界

| 実験<br>番号 | マッ<br>ト | 底 質  | 粒 径<br>$d$ (cm) | 比 重    | $\Delta h$<br>(cm) | $\frac{h_1+h_2}{2}$<br>(cm) | $I$    | $u_{*c}$<br>(cm/sec) | $u_{*c}$<br>(cm/sec) | $u_{*c}$<br>(cm/sec) | 底 質 移 動 状 況        |
|----------|---------|------|-----------------|--------|--------------------|-----------------------------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 1        | A       | 砂(E) | 0.26            | 2.7000 | 7.10               | 19.70                       | 0.0710 | 37.02                | 4.06                 | 1.55                 | 移動せず               |
| 2        | "       | "    | "               | "      | 10.15              | 22.35                       | 0.1015 | 47.15                | 4.85                 | "                    | 局部的にやや移動           |
| 3        | "       | "    | "               | "      | 11.04              | 23.10                       | 0.1104 | 49.99                | 5.06                 | "                    | 完全移動               |
| 4        | B       | "    | "               | "      | 6.56               | 19.65                       | 0.0656 | 35.54                | 3.90                 | "                    | 移動せず               |
| 5        | "       | "    | "               | "      | 11.19              | 24.20                       | 0.1119 | 51.52                | 5.09                 | "                    | 移動限界, 下流側 1/3 限界状態 |
| 6        | "       | "    | "               | "      | 14.64              | 27.10                       | 0.1464 | 62.36                | 5.83                 | "                    | かなり移動              |
| 7        | C       | "    | "               | "      | 4.26               | 17.60                       | 0.0426 | 27.11                | 3.14                 | "                    | 全く移動せず             |
| 8        | "       | "    | "               | "      | 10.42              | 23.75                       | 0.1042 | 49.25                | 4.92                 | "                    | 下流側 1/3 付近で若干移動    |
| 9        | "       | "    | "               | "      | 12.74              | 26.45                       | 0.1274 | 57.47                | 5.44                 | "                    | "                  |
| 10       | "       | "    | "               | "      | 14.15              | 28.47                       | 0.1415 | 61.47                | 5.73                 | "                    | 移動限界               |
| 11       | D       | "    | "               | "      | 8.54               | 21.40                       | 0.0854 | 42.32                | 4.45                 | "                    | 全く移動せず             |
| 12       | "       | "    | "               | "      | 16.28              | 28.75                       | 0.1628 | 67.73                | 6.14                 | "                    | "                  |
| 13       | "       | "    | "               | "      | 20.15              | 32.50                       | 0.2015 | 80.11                | 6.84                 | "                    | 移動せず               |
| 14       | A       | 砂(B) | 0.86            | 2.6749 | 9.19               | 22.00                       | 0.0919 | 44.51                | 4.62                 | 2.17                 | "                  |
| 15       | "       | "    | "               | "      | 16.25              | 28.65                       | 0.1625 | 67.78                | 6.14                 | "                    | "                  |
| 16       | "       | "    | "               | "      | 21.10              | 33.25                       | 0.2110 | 82.92                | 7.00                 | "                    | "                  |
| 17       | B       | "    | "               | "      | 13.56              | 26.25                       | 0.1356 | 59.06                | 5.61                 | "                    | "                  |
| 18       | "       | "    | "               | "      | 20.56              | 33.35                       | 0.2056 | 81.97                | 6.90                 | "                    | 若干移動               |
| 19       | C       | "    | "               | "      | 20.01              | 32.15                       | 0.2001 | 79.40                | 6.81                 | "                    | 移動せず               |
| 20       | "       | "    | "               | "      | 22.64              | 35.25                       | 0.2264 | 88.44                | 7.25                 | "                    | "                  |
| 21       | D       | "    | "               | "      | 12.81              | 25.35                       | 0.1281 | 56.41                | 5.45                 | "                    | "                  |
| 22       | "       | "    | "               | "      | 23.90              | 34.25                       | 0.2390 | 89.57                | 7.44                 | "                    | "                  |
| 23       | A       | 砂(C) | 0.49            | 2.7469 | 14.61              | 26.90                       | 0.1461 | 62.06                | 5.82                 | 1.73                 | "                  |
| 24       | "       | "    | "               | "      | 18.99              | 31.50                       | 0.1899 | 76.57                | 6.64                 | "                    | "                  |
| 25       | "       | "    | "               | "      | 21.66              | 33.80                       | 0.2166 | 84.70                | 7.09                 | "                    | 下流端より移動開始, 限界状態になる |
| 26       | B       | "    | "               | "      | 9.93               | 22.15                       | 0.0993 | 46.43                | 4.80                 | "                    | 移動せず               |
| 27       | "       | "    | "               | "      | 14.71              | 26.40                       | 0.1471 | 61.69                | 5.84                 | "                    | 下流端より若干移動          |
| 28       | "       | "    | "               | "      | 18.57              | 29.30                       | 0.1857 | 73.02                | 6.56                 | "                    | 移動限界               |
| 29       | C       | "    | "               | "      | 9.18               | 21.70                       | 0.0918 | 44.18                | 4.61                 | "                    | 全く移動せず             |

A: 透過性マット (フェルト状厚さ 7mm) B: 透過性マット (市状厚さ 120g/m<sup>2</sup>) C: 透過性マット (市状厚さ 166g/m<sup>2</sup>)  
D: 不透透性マット (厚さ 1mm)

とおりである。実験 7, 9, 11 の場合も実験 8 の形状とはほぼ同じである。また、マットレスとしては不透透なもの(塩化ビニール製, 厚さ 1mm)を使用した。

主な測定項目は、  
 海岸形状の変化、  
 根固工周辺の変化、  
 うちあげ高、根固工前面の水位などである。また、測定時間は、実験開始後 30分、1時間、2時間、4時間、8時間、10時間としたが、なかには、15時間継続したものもある。

表-19 根固工大型実験ケース一覧表

| 実験番号 | 実 験 目 的          | 初期海岸の形状等                         | 根 固 工 の 形 状                                    | 波 高   | 周 期     |
|------|------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-------|---------|
| 1    | 堆積型海岸の作製         | 初期こう配 1/15<br>堤防なし               | 根固工なし                                          | 60 cm | 5 sec   |
| 2    | 堤防のみの場合の前面洗掘の把握  | 実験 1 の 10 時間後の 海岸<br>堤防汀線付近に設置   | "                                              | 60    | 5<br>35 |
| 3    | ブロックのみを用いた根固工の効果 | 実験 2 の 8 時間後の 海岸<br>堤防のり先水深 8 cm | ブロック 3 列 2 層積                                  | 60    | 35      |
| 4    | 捨石フィルターの効果       | "                                | ブロックの下に粒径 6~8 cm<br>の碎石を 10 cm 厚に設置            | "     | "       |
| 7    | "                | "                                | 粒径 6~8 cm の碎石 10 cm 厚<br>粒径 3~4 cm の碎石 5 cm 厚  | "     | "       |
| 8    | "                | "                                | 粒径 6~8 cm の碎石 10 cm 厚<br>粒径 2 cm の碎石 5 cm 厚    | "     | "       |
| 9    | "                | "                                | 粒径 6~8 cm の碎石 10 cm 厚<br>粒径 1 cm の碎石 5 cm 厚    | "     | "       |
| 11   | マットレスの効果         | "                                | 粒径 6~8 cm の碎石 10 cm 厚<br>不透透のマットレス 1mm 厚       | "     | "       |
| 14   | 捨石フィルターの効果       | "                                | 粒径 5~6 cm の碎石 20 cm 厚<br>粒径 6~8 mm の碎石 10 cm 厚 | "     | "       |

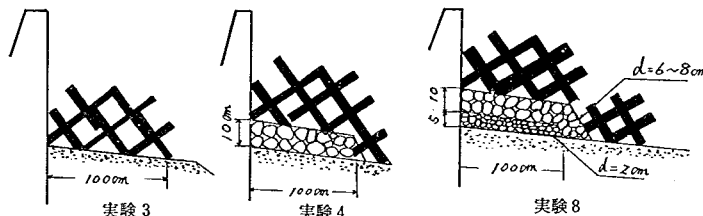


図-19 根固工模型の概要

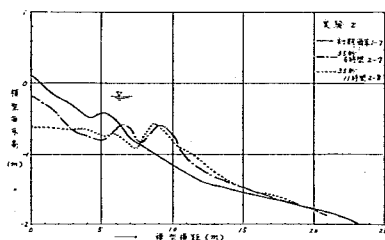


図-20 堤防のみを設置した場合の海岸変化

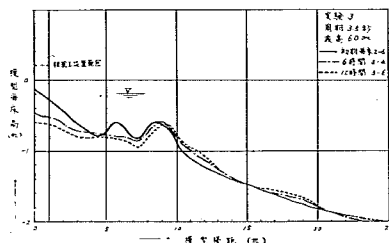


図-21 異形ブロックのみの根固工を設置した場合の海岸変化

海岸とした。この場合、鉛直堤のり先水深は-8 cmである。以後の実験はすべてこの初期条件を採用した。

堤防前面に3列2層積の根固工を設置してその効果をしらべたが、ブロックの下砂移動を阻止できず、砂はブロックの空隙を通過して吸出され、ブロックは沈下し、図-21に示すように、海岸変化の様相は実験2の場合とほとんど同じである。

実験4～9は種々の粒径の碎石を用いて捨石フィルターをつくり、その効果を検討したものである。実験4の場合には捨石粒径6～8 cmであるが、10時間後の洗掘状況(図-22)は実験3に比較すると、堤防のり先でやや小さくなっているようであるが、全般的に実験3の結果に近く、フィルターとしての作用を十分に果していない。

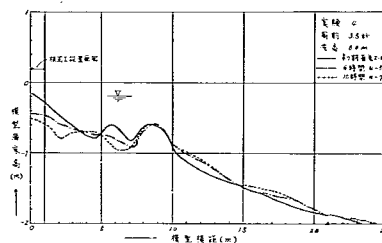


図-22 捨石フィルターをもった根固工を設置した場合の海岸変化 (d=6～8 cm)

実験ケースは表-19のとおりである。実験7, 8, 9は捨石の粒径をだいに小さくしてその効果をしらべたものであり、また、11は不透性マットレスの効果を検討したものである。実験14はやや特殊な例で、根固工先端の洗掘がある程度以上にならないようにして、捨石フィルターの効果をしらべる目的で実施した。

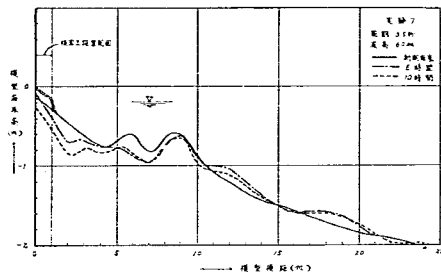
#### (2) 実験結果およびその検討

図-20は実験2の結果を示したものである。実験1の10時間後の海岸上のはぼ汀線付近に鉛直堤をおいて波を当て、根固工のない場合の洗掘状況をしらべた。当初実験1と同じ波を当てたが、洗掘が小さく根固工の効果の判定に不適当なので、途中から周期を3.5 secにした。11時間後の状況でのり先高は-60 cmとなった。

実験3では、実験1の10時間後の海岸に、周期3.5 sec 波高60 cmの波を4時間作用させた後の海岸を初期

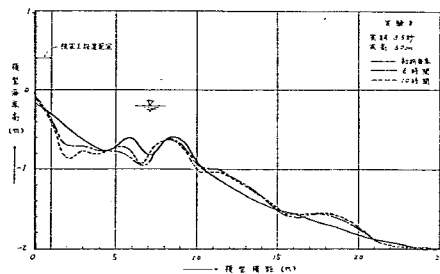
実験7, 8, 9は碎石を2層にし、上層は一定の大きさにして、下層の粒径を3～4 cm, 2 cm, 1 cmにしたものである。図-23をみると、いずれもフィルターとしての効果が表われ、のり先洗掘は小さくなっている。とくに、下層の粒径が1 cmの実験9の場合、図-24に根固工付近の状況を示したがのり先洗掘はほとんど起っていないことがわかる。

一方、根固工の先端部は著しく洗掘されているが、量的には、実験7, 8, 9ともほぼ同じである。図-24によれば捨石フィルターは全般的に薄くなり、その分だけ長くなった状態で前傾している。前面の洗掘部にはあらかじめ捨石の前面保護用においたブロックが沈下し、捨石のこれ以上の散乱を防止している。事実、ブロックより沖側への捨石の散乱は認められなかった。フィルター上部のブロックは一般にやや前方にずり落ち、当初堤防に接して



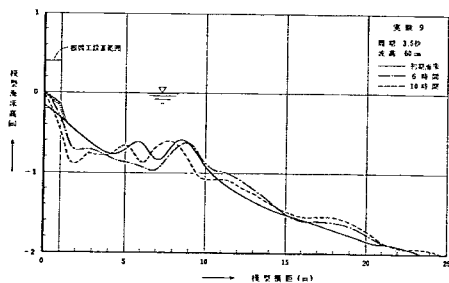
(a)  $d = 3 \sim 4 \text{ cm}$

図-23 捨石フィルターをもった根固工を設置した場合の海浜変化



(b)  $d = 2 \text{ cm}$

図-23 捨石フィルターをもった根固工を設置した場合の海浜変化



(c)  $d = 1 \text{ cm}$

図-23 捨石フィルターをもった根固工を設置した場合の海浜変化

いたブロックが最終的には堤防を数10cm離れる状況を示した。このように、のり先洗掘により根固工全体が急こう配で前に傾き、著しく不安定のように見えるが、実際には、ブロックの押え効果がよく効いており、全般的には、安定した状態であった。もちろん、このためには、根固工先端部のブロックは重量の十分に大きいものであ

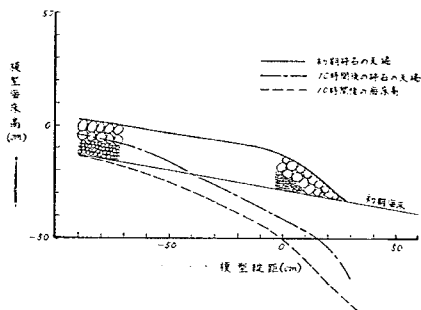


図-24 捨石フィルターをもった根固工を設置した場合の根固工付近の海浜変化

ることが必要である。

表-20は実験4~9において測定したうちあげ高、堤防より2mの位置のうちあげ高測定時における水位、および、両者から計算した水面こう配を示したものである。これによると、水面こう配は0.03~0.05となっている。この水面こう配により捨石中に流れが生ずるものとして、これによる掃流力を限界掃流力以下におさえるのに必要な粒径を(70)式から計算すると、表-21のようになる。これによると、捨石フィルター材の粒径は2~3cm程度あればよいことになり、実験8,9の場合にフィルター効果が大きいことと比較的よく一致している。

表-20 実験4~9におけるうちあげ高および堤防前面の水面勾配

| 実験番号 | 実験時間 (hr) | うちあげ高 (cm) | 2mの位置における水位 | 水面勾配  |
|------|-----------|------------|-------------|-------|
| 4    | 2         | 25         |             |       |
|      | 6         | 25         |             |       |
|      | 10        | 35         |             |       |
| 7    | 2         | 23         | 17          | 0.03  |
|      | 6         | 25         | 17          | 0.04  |
|      | 10        | 25         | 17          | 0.04  |
| 8    | 2         | 23         | 16          | 0.035 |
|      | 6         | 24         | 15          | 0.045 |
|      | 10        | 24         | 15          | 0.045 |
| 9    | 2         | 24         | 15          | 0.045 |
|      | 6         | 24         | 17          | 0.035 |
|      | 10        | 25         | 15          | 0.05  |

表-21 砂の移動をおさえるのに必要な砕石の粒径

| I    | R <sub>p</sub> | d (cm) |
|------|----------------|--------|
| 0.03 | 0.164          | 4.02   |
| 0.04 | 0.123          | 3.02   |
| 0.05 | 0.0988         | 2.42   |

$\lambda = 0.4$

実験 11 は不透性マットレスの効果を調べたものである。この場合には、砂の流出状況をしらべるため、マットレスの先端部、中央、のり先の各部にそれぞれ、緑、赤、青の着色砂を入れた。実験結果を図-25 に示す。図-25(b) は 15 時間後の根固工付近の変化状況であるが、堤防から 60 cm の地点まではほとんど完全に砂の移動がなく、それから先が、根固工先端部の洗掘により沈下している様相がうかがえる。この場合の碎石の粒径 7 cm、空隙率を 0.4、動水こう配を 0.05 として  $u_*$  を計算すると 3.7 cm/sec となる。表-18 からこの程度の摩擦速度ではマットレスの下に砂の移動はないと推定される。

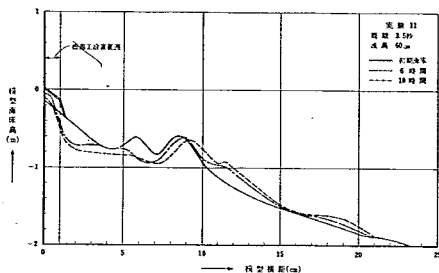


図-25(a) マットを敷いた根固工を設置した場合の海浜変化 (実験 11)

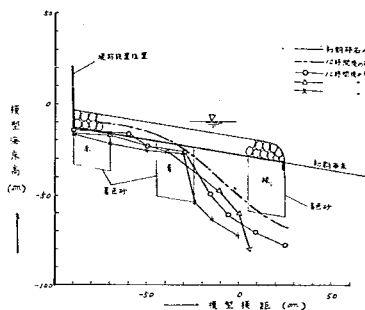


図-25(b) 根固工周辺の変化状況 (実験 11)

実験 14 はさらに小粒径の碎石を用いた場合の効果をしらべるとともに、ある深さのところには不透性のマットレスを敷いて、根固工先端部の洗掘を -0.8 m 以上起らないようにした場合について検討したものである。実験の結果を図-26 に示す。図-26 によると、実験開始後 6 時間で根固工先端部の洗掘は -0.8 m に達し、それ以後はほぼ安定状態になっているようにみられる。図-27 は根固工付近の変形状況を詳細にしらべたもので、15 時間後の結果である。赤と青の着色砂はほとんどそのまま残り、小粒径の碎石が実験 11 のマットレスとはほぼ同様な効果をあげ

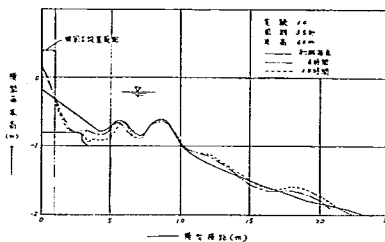


図-26(a) 捨石フィルターをもった根固工を設置した場合の海浜変化 (実験 14)

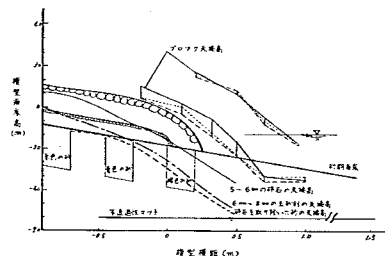


図-26(b) 根固工周辺の変化状況 (実験 14)

ていることがわかる。この実験のもう一つの狙いは先端部の洗掘深をおさえた場合、碎石、あるいは、海底砂がどの程度のこう配で落着くかをみるためであったが、やはり、砂の安息角よりはかなり急こう配となり、35°~40°程度で安定していることがわかる。

#### 4.5 結論

海岸堤防の消波工と根固工に関する水理現象は非常に複雑であるから、なお、不明な点も多いが、以上の検討により、両者の水理特性がある程度明らかとなり、設計上有用な指針が得られたと考えられる。上述の諸結果を要約するとつぎようになる。

- (1) 透過性構造物内における微小振幅長波の透過率は (38) 式により求められた。
- (2) 礫の抵抗係数とレイノルズ数との関係は (64) 式で与えられる。
- (3) 各種消波ブロックの抵抗特性は表-5 で示される。
- (4) 各種ブロックの消波効果を (1) の理論と (3) の抵抗特性を用いて比較検討してみると、6 脚ブロックの層積とホースケヤーの乱積を除いては、あまり差のないことが示された。6 脚ブロック層積の消波効果は他のブロックよりも大きい、空隙率が 5.3 割と小さいことが原因で、一般に施工されているように、60% 程度の

空隙率の場合には、他のブロックの消波効果と大差ないと思われる。

- (5) 砕波領域に設置されたテトラポッドを用いた消波工の規模と透過率との関係は図-8で与えられる。この関係は、海底こう配と設置水深によってはあまり変わらないと考えられるが、波形こう配、入射波高とブロックの大きさとの相対関係などにより変化すると推定される。
  - (6) 消波工をもった堤防のうちあげ高は、堤防のない場合の透過波高と堤防の設置水深とから、段波の反射波頂高を求めることにより推定される。この場合、消波工による水位上昇量を考慮することが必要である。
  - (7) うちあげ高と越波量との関係から、一般には、堤防高をうちあげ高より低くする余地は非常に小さいと考えられる。
  - (8) この実験では、6脚ブロック層積消波工の消波効果はテトラポッド消波工より大きい。とくに、消波工の高さが高くなるとこの傾向が大きくなる。この結果は6脚ブロック層積の空隙率を50%程度にした場合であることに注意しなければならない。
  - (9) 中詰捨石をもったテトラポッド消波工の透過率は、中詰捨石のない場合より小さい。しかし、うちあげ高は両者ともほとんど差はない。
  - (10) 定常流下の捨石フィルター内の掃流力は(70)式で与えられる。
  - (11) 捨石フィルター下部の砂の移動は掃流力が限界掃流力以上になると起るが、マットレスを敷くと、掃流力がある程度限界値をこえても移動が起らないことが認められた。この実験において得られた掃流力の範囲内では、透過性のマットレスの場合は掃流力が大きくなると砂の移動が起るが、不透過性マットレスの場合は、最大の掃流力が作用しても砂の移動が起らなかった。
- 以上の結果から根固工の設計上とくに注意すべき事項をあげるとつぎのとおりである。
- (12) 異形ブロック根固工の下部には、捨石フィルターをおくことが有効であるが、底質との粒径比は7~8程度にすべきである。
  - (13) 底質の粒径が小さい場合は、捨石フィルターを有効

にするためには、数層に分ける必要があり、施工が面倒になるので、このような場合には不透過性のマットレスを用いるのが適当である。

- (14) マットレスを用いる場合は、強度に問題があるので、ブロックを直接のせることは避け、適当な捨石をしてからブロックをのせるのがよいと思われる。また、マットレスの継目は十分に重ね合わせる必要がある。
- (15) 捨石フィルター または、マットレスを用いた場合は、根固工の先端が掘れるので、先端部には十分に重量の大きいブロックをおいて根固工の安定をはかることが必要である。

#### 参 考 文 献

- (1) 富永正照、坂本忠彦：透過性構造物による波の変形に関する研究(1)、鉛直捨石堤による波の反射率と透過率について、第16回海岸工学講演会講演集、昭和44年
- (2) 近藤叙郎：透過性防波堤の伝達波、第16回海岸工学講演会講演集、昭和44年
- (3) Lean, G.H. : A simplified theory of permeable wave absorbers, Jour. of Hydraulic Research, Vol-5, No1, 1967
- (4) 首藤伸夫：消波ブロックの抵抗について、第16回海岸工学講演会講演集、昭和44年
- (5) 岩崎敏夫、沼田淳：透過性防波堤の波高伝達率に関する実験的研究、第16回海岸工学講演会講演集、昭和44年
- (6) 鴻上雄三、時川和夫：6脚ブロック堤に関する研究、第23回年次学術講演会、昭和43年
- (7) 佐藤稔夫、三橋宏次、秦免樹：透過式潜堤に関する研究、第14回海岸工学講演会講演集、昭和42年
- (8) 福井芳朗、中村充、白石英彦、佐々木泰雄：堤防の津波対策に関する水理学的研究、農業土木試験場報告第1号、昭和38年
- (9) 豊島修、富永正照、橋本宏：海岸堤防に関する研究
- (10) 波のうちあげ高、土木研究所報告131、昭和42年

## 第5章 既設堤防の特徴と問題点

### 目 次

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 5.1 序 説 .....       | 103 |
| 5.2 堤 防 高 .....     | 103 |
| 5.3 堤防の形状と被覆工 ..... | 109 |
| 〔1〕 形式と表のりこう配 ..... | 109 |
| 〔2〕 天ば幅と被覆工 .....   | 109 |
| 〔3〕 波 返 工 .....     | 110 |
| 5.4 波 庄 .....       | 110 |
| 5.5 消波工および根固工 ..... | 113 |
| 5.6 結 論 .....       | 118 |

## 第5章 既設堤防の特徴と問題点

### 5.1 序 説

全国各地の海岸において、種々のタイプの海岸堤防がつくられているが、その高さ、形状、構造などについて統計的に調べた資料がないので、その実態が必ずしも明らかでない。45年度の海岸統計によると、建設省所管の海岸堤防の総延長は855,458 mに達し、個所数も相当に多いので、これらを全部調査することは著しく困難である。そこで、ここでは、堤防全般については、昭和44年度の補助事業個所の中から約140個所、さらに、消波工と根固工については45年度の資料から約80個所を選定して検討を加へた。

調査項目はつぎのとおりである。

#### (1) 堤 防 高

#### (2) 堤防の断面形状および構造

表のりの形状、波返の有無、天ば幅、表のり被覆厚など

#### (3) 消波工、根固工

さらに、これらの一部について、前章までの研究結果を利用して、うちあげ高、越波量、波圧、消波工の効果などを推定し、堤防高の適否、波圧に対する安全性、消波工、根固工などの設計上の問題点をさぐってみることにする。

### 5.2 堤 防 高

約100個の堤防について、堤防高( $H_c$ )、沖波波高( $H_0$ )との比を調べた結果を図-1～3に示す。 $H_c/H_0$ の値が

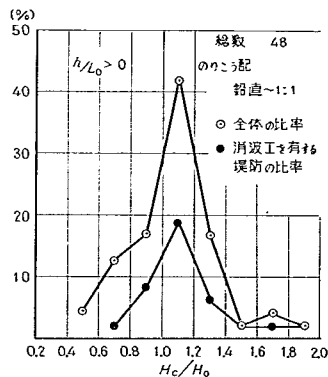
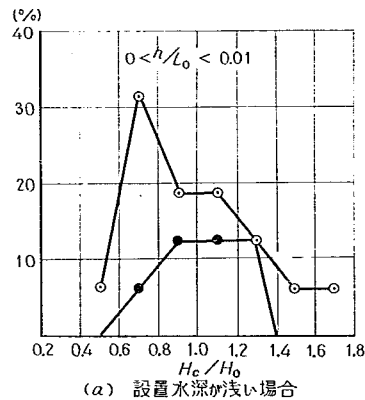


図-1 堤防高の分布状況 (堤防が汀線より海側にある場合)



(a) 設置水深が浅い場合

図-2 堤防高の分布状況

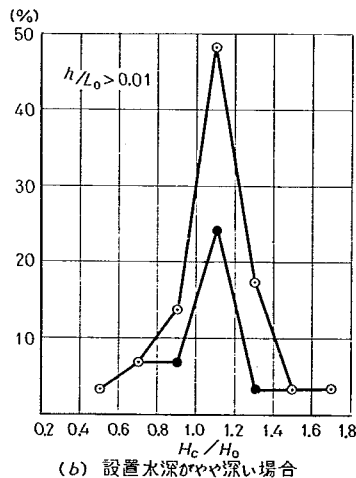


図-2 堤防高の分布状況

0.4～0.59, 0.6～0.79等の間に入る数を調べ、それらの全数に対する比(%)を計算してプロットしたものである。堤防が汀線より海側に設置された場合は、 $H_c/H_0$ が1.0～1.4のケースが全体の約60%を占めている。堤防ののりこ配が鉛直～1割の場合は、海岸保全施設築造基準(

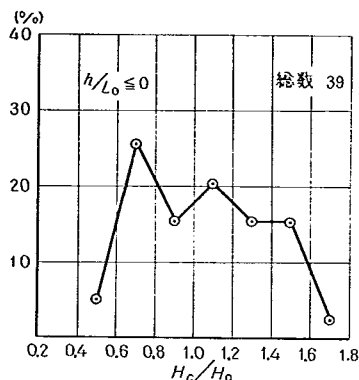


図-3 堤防高の分布状況 (堤防が汀線より陸側にある場合)

昭和35年版)によると、 $H_c$ は波高の1.0～1.3倍にとるように規定されている。したがって、一応、基準に沿った設計がなされているといえよう。

一方、消波工を有する堤防の数を調べてみると、図-1に黒丸で示してあるように、約半数近くの堤防に消波工が設置されている。地形、背後地の状況などから、堤防を高くできない場合もあるが、一般に、当初設定した堤防高が低すぎたため、後から消波工を設置するケースが多いようである。

図-1を相対水深によりさらに分類してみると図-2のようになる。設置水深が小さい場合は、 $H_c/H_0$ が1より小さいケースが多く、堤防高の決定に設置水深の影響がある程度考慮されていることが認められる。設置水深の大きい場合は、図-1とはほぼ同様な傾向を示す。

堤防が汀線より陸側に設置されている場合には、全体の傾向は図-2(a)に近く、 $H_c/H_0$ は1より小さくとられる場合が多い。また、全般的に $H_c/H_0$ としては、比較的広い範囲の値が同程度に用いられている。

以上はどの程度の高さの堤防が採用されてきたかを概観したものであるが、つぎに、これらの堤防高が、模型実験の結果を用いて算定したうちあげ高と比較してどのようなになっているかを調べてみた。

表-1は実験結果を利用して各堤防のうちあげ高を算定し、堤防高と比較したものである。この表におけるうちあげ高の計算に用いた資料および方法はつぎのとおりである。

(1) 海底こう配 1/20 および 1/30

土木研究所における実験結果<sup>1)</sup>を利用して算定する。

(2) 海底こう配 1/10

図-4を用いて算定する。これは 1/10 こう配上の種々の位置に5分堤防を設置して波のうちあげ高を調べたものである。

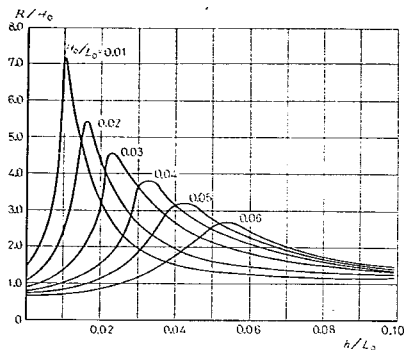


図-4 5分堤防への波のうちあげ高 (海底こう配 1/10)

(3) 海底こう配 1/5

熊野海岸を対象にした細井・三井の実験結果<sup>2)</sup>を用いて計算する。堤防ののりこう配は 1 : 1.5 である。

(4) 汀線より陸側にある場合

次式を用いて計算する。

$$R = 1.7 \tan \beta \{ (H_0 L_0)^{\frac{1}{2}} - x \} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $R$ ：堤防ののり先からはかったうちあげ高

$\beta$ ：海底が水平面となす角

$H_0$ ：沖波の波高

$L_0$ ：沖波の波長

$x$ ：汀線から堤防までの水平距離

(5) 海底こう配が 1/30 よりゆるい場合は 1/30 の実験結果を用いる。また、1/30 より急な任意の海底こう配の場合は、上記の実験結果から内挿して求める。

(6) 砕波領域では、堤防ののりこう配が鉛直～1割の場合は、うちあげ高は鉛直堤の場合に等しいと仮定する。また、2割堤の場合は鉛直堤のうちあげ高より10%小さくする。

計算したうちあげ高と堤防高との比を海底こう配に対してプロットしてみると図-5のようになる。図-5(a)は堤防が汀線より海側にある場合であるが、大部分の  $R/H_0$  は 1 より大きい。海底こう配が小さい場合は  $R/H_0$  は 1～1.5 の範囲にあり、うちあげ高は堤防高より大きい、その程度は比較的小さいので、消波工は設置されていない。

海底こう配が急になると、 $R/H_0$ の値はしだいに大きくなる。とくに、1/10 より急こう配になると、1.5～3.0 の範囲に大部分の点がちらばっている。極端な場合には 5 以上の値となっている。この領域では、消波工を設置するケースが非常に多く、堤防高が低すぎるため、背後地が越波による被害を受けたものと推定される。

堤防が汀線より陸側に設置されている場合は、 $R/H_0$ が

表一 うちあげ高の計算

| 堤防<br>No | 海<br>底<br>こう配<br>$\tan \beta$ | のり<br>水<br>深<br>$h$ | 先<br>深<br>$h_0$ | 計<br>波<br>高<br>$H_0$ | 計<br>周<br>期<br>$T$ | 計<br>画<br>長<br>$L_0$ | 堤防高<br>$H_c$ | $h$<br>$L_0$ | $H_0$<br>$L_0$ | 堤防の<br>のり<br>こう配 | $R$<br>$H_0$ | うち<br>あげ高<br>$R$ | $R$<br>$H_c$ | $H_c$<br>$H_0$ | 消<br>有波<br>無工 |
|----------|-------------------------------|---------------------|-----------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------|--------------|----------------|------------------|--------------|------------------|--------------|----------------|---------------|
| 1        | 0.03                          | -1.2 m              | 3.8 m           | 9.6 sec              | 144 m              | 4.2 m                | -0.0083      | 0.027        | 1:0.5          | 0.46             | 1.74 m       | 0.42             | 1.1          | 1.1            | ×             |
| 2        | 0.017                         | -2.0                | 3.8             | 9.6                  | 144                | 4.2                  | -0.014       | 0.027        | 1:0.5          | 0                | 0            | 0                | 1.1          | 1.1            | ○             |
| 3        | 0.08                          | 2.0                 | 4.3             | 12.3                 | 236                | 4.7                  | 0.0085       | 0.018        | 1:1            | 2.5              | 11           | 2.3              | 1.1          | 1.1            | ○             |
| 4        | 0.12                          | -1.5                | 4.3             | 12.3                 | 236                | 4.0                  | -0.0063      | 0.018        | 1:0.5          | 0.98             | 3.9          | 0.98             | 0.93         | 0.93           | ○             |
| 5        | 0.14                          | 0.5                 | 4.3             | 12.3                 | 236                | 3.5                  | 0.0021       | 0.018        | 1:0.7          | 1.5              | 6.5          | 1.9              | 0.82         | 0.82           | ○             |
| 6        | 0.1                           | 0                   | 4.5             | 12                   | 225                | 4.0                  | 0            | 0.02         | 1:1            | 1.1              | 5.0          | 1.3              | 0.89         | 0.89           | ○             |
| 7        | 0.2                           | 1.5                 | 4.3             | 12                   | 225                | 5.8                  | 0.0066       | 0.019        | 1:0.5          | 2.7              | 11.6         | 2.0              | 1.3          | 1.3            | ○             |
| 8        | 0.17                          | 2.4                 | 3.0             | 10                   | 156                | 2.5                  | 0.0077       | 0.019        | 1:0.5          | 2.8              | 8.4          | 3.4              | 0.83         | 0.83           | ○             |
| 9        | 0.05                          | 2.4                 | 2.8             | 8.9                  | 124                | 3.3                  | 0.019        | 0.023        | 1:0.5          | 2.1              | 5.9          | 1.8              | 1.2          | 1.2            | ×             |
| 10       | 小                             | 4.1                 | 2.2             | 4.0                  | 25                 | 3.2                  | 0.16         | 0.088        | 1:1.6          | 1.5              | 3.3          | 1.0              | 1.5          | 1.5            | ×             |
| 11       | 小                             | 1.25                | 2.6             | 9.5                  | 141                | 2.3                  | 0.0089       | 0.018        | 1:3            | 1.1              | 2.9          | 1.3              | 0.88         | 0.88           | ×             |
| 12       | 0.02                          | 1.7                 | 3.2             | 11                   | 189                | 2.3                  | 0.009        | 0.017        | 1:3            | 1.1              | 3.5          | 1.5              | 0.89         | 0.89           | ×             |
| 13       | 0.08                          | 3.8                 | 2.8             | 8.9                  | 124                | 3.3                  | 0.031        | 0.023        | 1:0.5          | 2.7              | 7.6          | 2.3              | 1.2          | 1.2            | ○             |
| 14       | 0.03                          | -1.4                | 9.0             | 13.9                 | 303                | 5.5                  | -0.0046      | 0.03         | 1:2            | 0.024            | 0.22         | 0.04             | 0.61         | 0.61           | ×             |
| 15       | 0.02                          | 3.0                 | 9.0             | 13.9                 | 303                | 2.5                  | 0.0099       | 0.03         | 1:0.5          | 1.1              | 9.9          | 0.28             | 0.28         | 0.28           | ×             |
| 16       | 0.07                          | 2.0                 | 5.2             | 13                   | 264                | 4.1                  | 0.0076       | 0.02         | 1:0.5          | 1.5              | 7.8          | 1.9              | 0.79         | 0.79           | ○             |
| 17       | 0.1                           | 2.7                 | 1.2             | 4.5                  | 31.5               | 1.2                  | 0.086        | 0.038        | 1:0.4          | 1.4              | 1.7          | 1.4              | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 18       | 0.08                          | 1.5                 | 1.6             | 5.2                  | 42.5               | 1.6                  | 0.035        | 0.038        | 1:1            | 3.1              | 5.0          | 3.1              | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 19       | 0.1                           | 1.5                 | 1.6             | 5.3                  | 44                 | 1.7                  | 0.034        | 0.037        | 1:0.5          | 3.6              | 5.4          | 3.2              | 1.1          | 1.1            | ×             |
| 20       | 0.1                           | -0.5                | 1.7             | 5.2                  | 42.5               | 2.2                  | -0.012       | 0.04         | 1:2.5          | 0.35             | 0.6          | 0.27             | 1.3          | 1.3            | ×             |
| 21       | 0.08                          | 2.3                 | 2.1             | 5.6                  | 49                 | 2.1                  | 0.047        | 0.043        | 1:1            | 2.7              | 5.7          | 2.7              | 1.0          | 1.0            | ×             |
| 22       | 0.08                          | 2.6                 | 1.6             | 5.2                  | 42.5               | 1.6                  | 0.061        | 0.038        | 1:1            | 1.9              | 3.0          | 1.9              | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 23       | 0.23                          | 1.0                 | 2.3             | 5.2*                 | 42.5               | 2.6                  | 0.024        | 0.054        | 1:0.5          | 2.2              | 5.1          | 2.0              | 1.1          | 1.1            | ○             |
| 24       | 0.06                          | 1.0                 | 2.0             | 5.2                  | 42.5               | 2                    | 0.024        | 0.047        | 1:0.33         | 1.5              | 3.0          | 1.5              | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 25       | 0.13                          | 1.0                 | 1.6             | 5.2                  | 42.5               | 2.5                  | 0.024        | 0.038        | 1:0.3          | 2.6              | 4.2          | 1.7              | 1.6          | 1.6            | ○             |
| 26       | 0.075                         | 2.6                 | 1.2             | 4.5                  | 31.5               | 1.2                  | 0.083        | 0.038        | 1:0.4          | 1.4              | 1.7          | 1.4              | 1.0          | 1.0            | ×             |
| 27       | 0.13                          | -0.5                | 2.0             | 5.2                  | 42.5               | 2.0                  | -0.012       | 0.047        | 1:0.5          | 0.65             | 1.3          | 0.65             | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 28       | 0.10                          | 2.0                 | 1.6             | 5.2                  | 42.5               | 1.6                  | 0.047        | 0.038        | 1:0.3          | 2.6              | 4.2          | 2.6              | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 29       | 0.06                          | 1.4                 | 3.6             | 5.6                  | 49                 | 4.4                  | 0.029        | 0.073        | 1:0.5          | 1.0              | 3.6          | 0.82             | 1.2          | 1.2            | ×             |
| 30       | 0.07                          | 0                   | 3.6             | 5.6                  | 49                 | 4.2                  | 0            | 0.073        | 1:0.5          | 0.4              | 1.4          | 0.33             | 1.2          | 1.2            | ×             |
| 31       | 0.1                           | 1.2                 | 1.3             | 4.0                  | 25                 | 1.3                  | 0.048        | 0.052        | 1:0.5*         | 2.9              | 3.8          | 2.9              | 1.0          | 1.0            | ×             |
| 32       | 0.12                          | 0                   | 2.5             | 7.0                  | 76.5               | 3.5                  | 0            | 0.033        | 1:0.5          | 1.4              | 3.5          | 1.0              | 1.4          | 1.4            | ×             |
| 33       | 0.18                          | 0.2                 | 2.5             | 7.0*                 | 76.5               | 3.5                  | 0.0026       | 0.033        | 1:0.5          | 2.1              | 5.3          | 1.5              | 1.4          | 1.4            | ×             |
| 34       | 0.06                          | 0                   | 2.5             | 7.0*                 | 76.5               | 3.5                  | 0            | 0.033        | 1:1            | 0.6              | 1.5          | 0.43             | 1.4          | 1.4            | ×             |
| 35       | 0.06                          | 0.4                 | 2.5             | 7.0*                 | 76.5               | 4.0                  | 0.0052       | 0.033        | 1:0.6          | 0.8              | 2.0          | 0.5              | 1.6          | 1.6            | ×             |
| 36       | 0.12                          | -1.0                | 4.0             | 8.0*                 | 100                | 5.6                  | -0.01        | 0.04         | 1:3            | 0.72             | 2.9          | 0.52             | 1.4          | 1.4            | ○             |
| 37       | 小                             | 0                   | 2.5             | 8.0                  | 100                | 3.5                  | 0            | 0.025        | 1:0.5          | 0.3              | 0.75         | 0.21             | 1.4          | 1.4            | ×             |
| 38       | 0.1                           | -0.3                | 3.0             | 6.0                  | 56                 | 4.2                  | -0.0054      | 0.053        | 1:2.5          | 0.43             | 1.3          | 0.42             | 1.4          | 1.4            | ×             |
| 39       | 小                             | 0.7                 | 3.1             | 7.0                  | 76.5               | 2.0                  | 0.0091       | 0.04         | 1:0.5          | 0.7              | 2.2          | 1.1              | 0.65         | 0.65           | ×             |
| 40       | 0.12                          | -1.7                | 2.5             | 5.8                  | 52.5               | 3.9                  | -0.032       | 0.048        | 1:1            | 0                | 0            | 0                | 1.6          | 1.6            | ×             |
| 41       | 0.05                          | 0.4                 | 3.0             | 6.0                  | 56                 | 3.0                  | 0.0071       | 0.054        | 1:0.25         | 0.55             | 1.65         | 0.55             | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 42       | 0.06                          | -0.4                | 3.5             | 8.0                  | 100                | 3.7                  | -0.004       | 0.035        | 1:0.5          | 0.34             | 1.2          | 0.32             | 1.0          | 1.0            | ○             |
| 43       | 0.04                          | -0.2                | 2.7             | 7.0                  | 76.5               | 3.0                  | -0.0026      | 0.035        | 直              | 0.24             | 0.64         | 0.21             | 1.1          | 1.1            | ×             |
| 44       | 0.01                          | -0.3                | 2.4             | 8.0                  | 100                | 2.6                  | -0.003       | 0.024        | 1:0.5          | 0                | 0            | 0                | 1.1          | 1.1            | ×             |
| 45       | 0.05                          | -1.0                | 8.0             | 15.0                 | 351                | 5.2                  | 0            | 0.023        | 直 *            | 0.33             | 2.6          | 0.5              | 0.65         | 0.65           | ○             |
| 46       | 0.07                          | 2.5                 | 1.5             | 5.0                  | 39                 | 1.5                  | 0.064        | 0.039        | 1:2.4          | 2.0              | 3.0          | 2.0              | 1.0          | 1.0            | ×             |
| 47       | 0.026                         | 3.4                 | 1.8             | 6.0                  | 51.2               | 2.2                  | 0.066        | 0.035        | 1:0.5          | 1.5              | 2.7          | 1.2              | 1.2          | 1.2            | ×             |
| 48       | 0.006                         | 2.7                 | 1.9             | 4.0                  | 25                 | 1.9                  | 0.11         | 0.076        | 1:1.5          | 1.5              | 2.9          | 1.5              | 1.0          | 1.0            | ×             |
| 49       | 0.12                          | 2.9                 | 1.8             | 5.0                  | 39                 | 2.3                  | 0.074        | 0.046        | 1:0.3          | 2.0              | 3.6          | 1.6              | 1.3          | 1.3            | ×             |
| 50       | 0.16                          | 3.3                 | 2.2             | 5.0*                 | 39                 | 0.8                  | 0.085        | 0.056        | 1:1.5          | 2.2              | 4.4          | 5.5              | 0.36         | 0.36           | ○             |

○: 消波工あり    ×: 消波工なし    \*: 推定値

| 堤防<br>No | 海 底<br>こう配<br>$\tan \beta$ | のり先<br>水深<br>h | 計 画<br>波 高<br>$H_0$ | 計 画<br>周 期<br>T | 計 画<br>波 長<br>$L_0$ | 堤防高<br>$H_c$ | $h$<br>$L_0$ | $H_0$<br>$L_0$ | 堤防の<br>のり<br>こう配 | $R$<br>$H_0$ | うち<br>あげ高<br>R | $R$<br>$H_c$ | $H_c$<br>$H_0$ | の消<br>有波<br>無工 |
|----------|----------------------------|----------------|---------------------|-----------------|---------------------|--------------|--------------|----------------|------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| 51       | 0.08                       | 0.2m           | 6.5m                | 10 sec          | 156m                | 4.7m         | 0.0013       | 0.042          | 1:0.5            | 0.6          | 3.9m           | 0.82         | 0.72           | ×              |
| 52       | 0.06<br>0.15               | -1.8           | 6.0                 | 13              | 264                 | 4.4          |              |                | 直 *              | 0.95         | 4.2            | 0.96         | 0.73           |                |
| 53       | 0.18                       | -1.2           | 6.5                 | 10              | 156                 | 4.7          | -0.0072      | 0.042          | 直 *              | 1.3          | 8.2            | 1.7          | 0.72           | ×              |
| 54       | 0.11                       | -2.6           | 6.5                 | 10              | 156                 | 4.7          |              | 0.042          | 1:0.5            | 0.23         | 1.5            | 3.2          | 0.72           | ×              |
| 55       | 0.07<br>0.13               | -6.5           | 8.0                 | 12              | 225                 | 10.2         |              |                |                  |              | 0              |              | 1.3            | ×              |
| 56       | 0.2                        | 0.5            | 4.0                 | 12              | 225                 | 4.9          | 0.0022       | 0.018          | 1:0.8            | 2.3          | 9.2            | 1.9          | 1.2            | ○              |
| 57       | 0.14                       | 0.3            | 4.0                 | 12              | 225                 | 4.9          | 0.0013       | 0.018          | 1:2              | 1.6          | 6.4            | 1.3          | 1.2            |                |
| 58       | 0.2                        | 2.8            | 3.2                 | 11              | 188                 | 3.5          | 0.015        | 0.017          | 1:1              | 3.1          | 9.9            | 2.8          | 1.1            | ○              |
| 59       | 0.12                       | 0              | 3.8                 | 11              | 188                 | 5.8          | 0            | 0.02           | 1:0.5            | 1.7          | 6.5            | 1.1          | 1.5            | ○              |
| 60       | 0.06<br>0.14               | -3.8           | 8.0                 | 12              | 225                 | 8.2          |              |                | 1:2              | 0.13         | 1.0            | 0.12         | 1.0            | ×              |
| 61       | 0.14                       | 0.7            | 8.0                 | 12              | 225                 | 5.4          | 0.0031       | 0.036          | 1:0.5            | 1.5          | 12             | 2.2          | 0.68           |                |
| 62       | 0.20                       | 2.0            | 4.0                 | 12              | 225                 | 4.4          | 0.009        | 0.018          | 1:0.5*           | 3.0          | 12             | 2.7          | 1.1            |                |
| 63       | 0.16                       | 2.5            | 4.8                 | 12              | 225                 | 4.4          | 0.011        | 0.022          | 1:0.5            | 2.8          | 13.5           | 3.1          | 0.92           | ○              |
| 64       | 0.05                       | 3.3            | 1.8                 | 5.2*            | 42.3                | 2.4          | 0.078        | 0.043          | 1:2              | 2.2          | 4.0            | 1.7          | 1.3            | ×              |
| 65       | 0.05*                      | 3.5            | 2.3                 | 5.5*            | 42.3                | 2.2          | 0.074        | 0.049          | 1:0.5            | 1.8          | 4.1            | 1.9          | 0.96           | ×              |
| 66       | 小                          | 3.6            | 1.8                 | 5.2             | 42.3                | 1.8          | 0.085        | 0.043          | 1:0.2            | 1.6          | 2.9            | 1.6          | 1.0            | ×              |
| 67       | 小*                         | 5.4            | 1.5                 | 4.5             | 31.5                | 1.5          | 0.12         | 0.048          | 1:0.5            | 1.3          | 2.0            | 1.3          | 1.0            | ×              |
| 68       | 0.12                       | -1.3           | 5.0                 | 11              | 188                 | 4.7          |              |                | 1:2.5            | 0.64         | 3.2            | 0.68         | 0.94           | ×              |
| 69       | 0.05                       | 1.0            | 4.2                 | 8.2             | 105                 | 3.3          | 0.0095       | 0.04           | 1:0.4            | 0.8          | 3.4            | 2.8          | 0.79           | ×              |
| 70       | 0.06                       | 1.2            | 5.0                 | 11              | 188                 | 4.0          | 0.0064       | 0.027          | 1:0.5*           | 0.89         | 4.5            | 1.1          | 0.8            | ×              |
| 71       | 0.16                       | -1.0           | 6.8                 | 11              | 188                 | 5.1          |              |                | 1:0.4            | 1.2          | 8.0            | 1.6          | 0.75           | ×              |
| 72       | 0.05                       | 0              | 5.0                 | 11              | 188                 | 4.5          | 0            | 0.027          | 1:0.5            | 0.52         | 2.6            | 0.58         | 0.9            | ○              |
| 73       | 0.10                       | -0.7           | 3.1                 | 7.0             | 76.5                | 3.4          |              |                | 1:0.6            | 0.45         | 1.4            | 0.41         | 1.1            | ×              |
| 74       | 0.02                       | 1.3            | 6.5                 | 12              | 225                 | 3.3          | 0.0058       | 0.029          | 1:1              | 0.6          | 3.9            | 1.2          | 0.51           | ×              |
| 75       | 0.06                       | 2.0            | 6.2                 | 10.1            | 159                 | 3.9          | 0.013        | 0.039          | 1:2              | 0.84         | 5.2            | 1.3          | 0.63           | ○              |
| 76       | 0.09                       | 2.5            | 6.8                 | 15.5            | 375                 | 6.3          | 0.0066       | 0.018          | 1:2              | 1.6          | 11             | 1.7          | 0.93           | ×              |
| 77       | 0.05<br>0.14               | -4.5           | 5.8                 | 9.6             | 142                 | 6.9          |              |                |                  |              |                |              | 1.2            |                |
| 78       | 0.1                        | 1.5            | 5.8                 | 9.6             | 142                 | 5.9          | 0.01         | 0.04           | 1:1              | 1.0          | 5.8            | 0.98         | 1.0            | ×              |
| 79       | 0.04                       | 3.5            | 3.8                 | 7.5             | 88                  | 2.9~3.9      | 0.04         | 0.043          | 1:1              | 2.0          | 7.6            | 1.9          | 0.92           | ○              |
| 80       | 0.1                        | 1.75           | 2.8                 | 7.0             | 76.5                | 1.3          | 0.023        | 0.037          | 1:0.6            | 2.6          | 7.3            | 5.6          | 0.46           | ×              |
| 81       | 0.18                       | 2.5            | 3.1                 | 7.5             | 88                  | 5.6          | 0.028        | 0.035          | 1:0.5*           | 3.5          | 11             | 2.0          | 1.8            | ○              |
| 82       | 0.14                       | 1.7            | 3.1                 | 7.5             | 88                  | 1.9          | 0.019        | 0.035          | 1:0.5            | 2.6          | 8.1            | 4.3          | 0.61           | ○              |
| 83       | 0.036                      | 0.4            | 4.2                 | 12.5            | 224                 | 4.8          | 0.0016       | 0.017          | 1:1              | 0.5          | 2.1            | 0.44         | 1.1            | ×              |
| 84       | 0.045                      | 1.7            | 4.2                 | 11              | 188                 | 4.9          | 0.009        | 0.022          | 1:1 *            | 1.1          | 4.6            | 0.94         | 1.2            | ×              |
| 85       | 0.05*                      | 0              | 4.1                 | 12.5            | 244                 | 4.9          | 0            | 0.017          | 1:1              | 0.65         | 2.7            | 0.55         | 1.2            |                |
| 86       | 0.14                       | 1.0            | 1.6                 | 5.3             | 43.8                | 1.8          | 0.023        | 0.037          | 1:1              | 3.0          | 4.8            | 2.7          | 1.1            |                |
| 87       | 0.1                        | 0              | 4.8                 | 11.6            | 210                 | 3.5          | 0            | 0.023          | 1:0.5            | 1.0          | 4.8            | 1.4          | 0.73           | ○              |
| 88       | 0.16                       | 0              | 3.3                 | 8.1             | 102                 | 2.8          | 0            | 0.032          | 1:0.5            | 1.5          | 5.0            | 1.8          | 0.85           | ×              |
| 89       | 0.08                       | 1.2            | 3.4                 | 7.7             | 92.5                | 2.8          | 0.012        | 0.036          | 1:0.5            | 1.2          | 4.1            | 1.5          | 0.82           | ×              |
| 90       | 0.10                       | 0              | 4.8                 | 11.6            | 210                 | 3.5          | 0            | 0.023          | 1:1              | 1.05         | 5.0            | 1.4          | 0.73           |                |
| 91       | 0.03                       | 0.5            | 2.2                 | 6.0             | 56                  | 2.5          | 0.009        | 0.039          | 1:0.5*           | 0.8          | 1.8            | 0.72         | 1.1            |                |
| 92       | 0.02                       | -0.9           | 5.7                 | 11.6            | 210                 | 3.75         |              |                |                  |              | 0              | 0            | 0.66           |                |
| 93       | 0.033<br>0.16              | -1.3           | 5.8                 | 12              | 225                 | 3.3          |              | 0.026          | 直 *              | 0.73         | 4.2            | 1.3          | 0.57           | ×              |
| 94       | 0.08<br>0.35               | -3.5           | 8.6                 | 13.5            | 284                 | 5.2          |              |                | 直 *              |              |                |              | 0.6            |                |
| 95       | 0.037<br>0.16              | -1.7           | 8.6                 | 13.5            | 284                 | 5.2          |              |                | 直 *              | 0.63         | 5.4            | 1.0          | 0.6            | ○              |
| 96       | 0.022<br>0.10              | -1.8           | 8.6                 | 13.5            | 284                 | 3.7          |              |                | 直 *              | 0.28         | 2.4            | 0.65         | 0.43           | ×              |
| 97       |                            |                |                     |                 |                     |              |              |                |                  |              |                |              |                |                |
| 98       | 0.08                       | -0.6           | 8.6                 | 12.0            | 225                 | 5.2          |              |                | 直 *              | 0.58         | 5.0            | 1.0          | 0.6            | ×              |

○:消波工あり ×:消波工なし \*:推定値

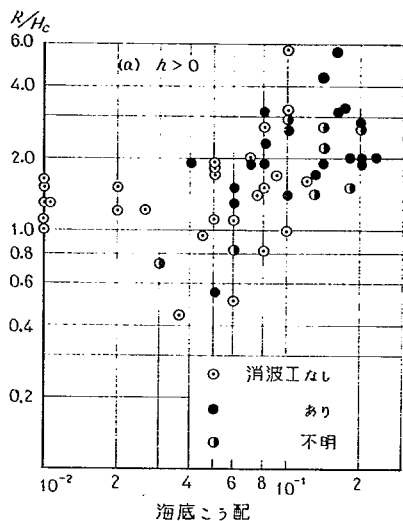


図-5(a) 計算うちあげ高と堤防高の比

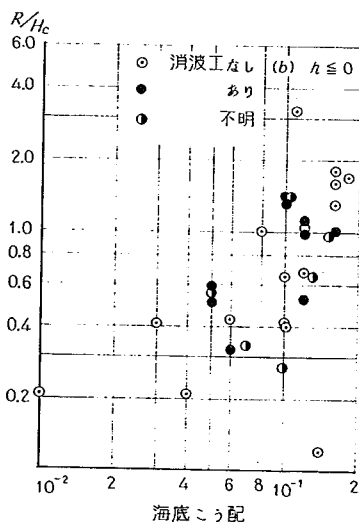


図-5(b) 計算うちあげ高と堤防高の比

1以下であるケースが多い。しかし、海底こう配が急な場合は  $R/H_c$  が1よりかなり大きくなる場合もみられる。

堤防高をどの程度に止めるか、消波工をおくのが適切であるかの判断は、地形、背後地の条件、経済性などによりきまるので、一般には論じ難い。しかし、堤防高の

決め方において、計画潮位+波のうちあげ高という考え方がとられておりながら、海岸堤防の一般的な高さが、うちあげ高より比較的低い水準にあることは恐らく事実であろう。それが、消波工の多用にもつながっているものと思われる。

約10年前に、築造基準が設定された時点におけるうちあげ高の実験値は、先にのべたように、正確にうちあげ高を表わしておらず、多少越波しても、堤防が破壊しなければよいという見地から決められてきたように考えられる。築造基準の10～1.3Hという堤防高の決め方には、そのような思想が根本にあるので、条件によっては実際上かなりの越波のあることが推定される。その当時は海岸の利用も現在のように進んでおらず、また、一般の民衆の要求も波の直接的来襲を防げばよいという程度のものであったこと、急激には堤防高を高くしたくないという行政的配慮なども加わっていたと考えられる。

しかし、近年、堤防自体は破壊せず、越波による背後地の被害が各所に出るに及んで、越波量を考慮して堤防高を決めるという考え方が一般的になってきた。もちろんこのような考え方は、10数年前からあったわけであるが、越波現象が複雑で、十分な資料がなく、一般的な取扱いが困難であったので、広く採用されるに至らなかった。

ここでは、第2章の実験結果をもとにして、各堤防の越波量を推定してみる。越波量の計算方法は第2章の結論に示したとおりである。

(1) 波返をもった傾斜堤の有風時の越波量は、鉛直堤の有風時の越波量により代表させる。

(2) 鉛直堤の無風時の越波量を次式から求める。

$$Q = 0.015 (R - H_c)^2 \quad \text{.....(2)}$$

(3)  $h/L_0$  が小さくなると、上式中の係数は0.015より大きくなる。この補正には、第2章の図-32を用いるが、 $H_0/L_0 > 0.02$  では、 $h/L_0 < 0.01$  で、 $H_0/L_0 < 0.02$  では、 $h/H_0 < 0.5$  という条件で補正を行なう。

(4) 風による補正には第2章の図-31(a)を使用する。この場合、 $h/L_0 = 0.01$  では、越波量は無風時の2割増、 $h/L_0$  が0の場合は補正をしない。

(5) この計算法は堤防が碎波領域に設置された場合に適用される。

以上の計算においては、うちあげ高を求めることが必要である。その方法は先にのべたとおりであるが、ここでは、より正確を期するため、のりこう配による補正を図-6を用いて行なった。<sup>(1)</sup>

越波量の計算結果を表-2に示す。この表には消波工の有無が記入されているが、これと越波量との大小を比較すると、大部分の場合、越波量が大いときに消波工が設置されていることがわかる。計算越波量からみて、消波工の有無に問題のある例については\*印がつけられている。

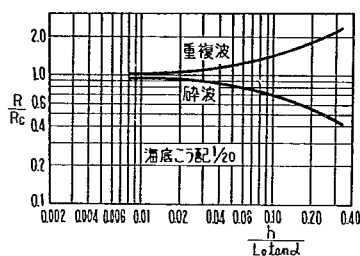


図-6 のりこう配によるうちあげ高の補正

これを見ると、越波量が小さいのに消波工が設置してある例が3、越波量が多いのに消波工が設置されていない例が1となっている。越波量の計算法はなお精度が十分でないと思われるが、以上の結果からみてある程度の信頼性はあると考えられる。

表-2から、 $R-Hc$ と $Q$ との関係を図示してみると図-7のようになる。多少のばらつきはあるが、越波量は $(R-Hc)^2$ に比例し、比例係数は0.1~0.2程度の値である。この図から、越波量を $0.3m/m \cdot T$ まで許容すれば、堤防高はうちあげ高より15m下げられることがわかる。また、許容値を $1m/m \cdot T$ とすれば3m程度の低下が可能となる。一

表-2 既設海岸堤防の越波量

| 海岸堤防<br>No | 堤防高<br>$H_c$ | うちあげ高<br>$R$ | $R-Hc$ | $0.015 \times (R-Hc)^2$ | $\frac{h}{L_0}$ | $\frac{H_0}{L_0}$ | 海底こう配 | 補正係数<br>$a \times b$ | 越波量<br>$Q$ | 消波工<br>有無 |
|------------|--------------|--------------|--------|-------------------------|-----------------|-------------------|-------|----------------------|------------|-----------|
| 3          | 4.7m         | 11m          | 6.3m   | 0.59m/m.T               | 0.0085          | 0.018             | 0.08  | 4.8×1.2              | 3.4m/m.T   | ○         |
| 5          | 3.5          | 0.5          | 3      | 0.14                    | 0.0021          | 0.018             | 0.14  | 8.5×1                | 1.2        | ○         |
| 6*         | 4.0          | 5.0          | 1      | 0.015                   | 0               | 0.02              | 0.1   | 6×1                  | 0.08       | ○         |
| 8          | 2.5          | 8.4          | 5.9    | 0.56                    | 0.0077          | 0.019             | 0.17  | 10×1.2               | 6.6        | ○         |
| 9          | 3.3          | 5.9          | 2.6    | 0.1                     | 0.019           | 0.023             | 0.05  | 1×8                  | 0.8        | ×根        |
| 12         | 2.3          | 3.5          | 1.2    | 0.022                   | 0.007           | 0.017             | 0.02  | 2×1.1                | 0.048      | ×         |
| 13         | 3.3          | 7.6          | 4.3    | 0.28                    | 0.031           | 0.023             | 0.08  | 1×5                  | 1.4        | ○         |
| 16         | 4.1          | 7.8          | 3.7    | 0.21                    | 0.0076          | 0.02              | 0.07  | 4.3×1.2              | 1.1        | ○         |
| 18         | 1.6          | 5.0          | 3.4    | 0.17                    | 0.035           | 0.038             | 0.08  | 1×6                  | 1.0        | ○         |
| 21         | 2.1          | 5.7          | 3.6    | 0.19                    | 0.047           | 0.043             | 0.08  | 1×6                  | 1.1        | ×離        |
| 22         | 1.6          | 3.0          | 1.4    | 0.029                   | 0.061           | 0.038             | 0.08  |                      |            |           |
| 24         | 2.0          | 3.0          | 1.0    | 0.015                   | 0.024           | 0.047             | 0.06  | 1×13                 | 0.2        | ×         |
| 25         | 2.5          | 4.2          | 1.7    | 0.044                   | 0.024           | 0.038             | 0.13  | 1×10                 | 0.44       | ○         |
| 28         | 1.6          | 4.2          | 2.6    | 0.1                     | 0.047           | 0.038             | 0.10  | 1×7                  | 0.7        | ○         |
| 31         | 1.3          | 3.8          | 2.5    | 0.094                   | 0.048           | 0.052             | 0.10  | 1×7                  | 0.66       |           |
| 33         | 3.5          | 5.3          | 1.8    | 0.049                   | 0.026           | 0.033             | 0.18  | 11×1.1               | 0.59       |           |
| 46         | 1.5          | 3.0          | 1.5    | 0.034                   | 0.064           | 0.039             | 0.07  |                      |            | ×         |
| 53         | 4.7          | 8.2          | 3.5    | 0.18                    | -0.0072         | 0.042             | 0.18  | 11×1                 | 2.0        | ×根        |
| 56         | 4.9          | 9.2          | 4.3    | 0.28                    | 0.0022          | 0.018             | 0.2   | 12×1                 | 3.4        | ○         |
| 57         | 4.9          | 6.4          | 1.5    | 0.034                   | 0.0013          | 0.018             | 0.14  | 8.5×1                | 0.29       |           |
| 58         | 3.5          | 9.9          | 6.4    | 0.61                    | 0.015           | 0.017             | 0.2   | 1×4.5                | 2.7        | ○         |
| 59*        | 5.8          | 6.5          | 0.7    | 0.0074                  | 0               | 0.022             | 0.12  | 7.2×1                | 0.053      | ○         |
| 61         | 5.4          | 12           | 6.6    | 0.65                    | 0.0031          | 0.036             | 0.14  | 8.5×1.1              | 6.1        |           |
| 64         | 2.4          | 4.0          | 1.6    | 0.038                   | 0.0078          | 0.043             | 0.05  | 3×1.2                | 0.14       | ×         |
| 71*        | 5.1          | 8.0          | 2.9    | 0.13                    | -0.0053         | 0.036             | 0.16  | 9.5×1                | 1.2        | ×         |
| 75*        | 3.9          | 5.2          | 1.3    | 0.025                   | 0.013           | 0.039             | 0.06  | 1×10                 | 0.25       | ○         |
| 76         | 6.3          | 11           | 4.7    | 0.33                    | 0.0066          | 0.018             | 0.09  | 5.5×1.1              | 2.0        | ×根        |
| 80         | 1.3          | 7.3          | 6.0    | 0.54                    | 0.023           | 0.037             | 0.1   | 1×4.5                | 2.4        | ○         |
| 82         | 1.9          | 8.1          | 6.2    | 0.58                    | 0.019           | 0.035             | 0.14  | 1×4.5                | 2.6        | ○         |
| 86         | 1.8          | 4.8          | 3.0    | 0.14                    | 0               | 0.037             | 0.14  | 8.5×1                | 1.2        |           |
| 88         | 2.8          | 5.0          | 2.2    | 0.073                   | 0               | 0.032             | 0.16  | 9.5×1                | 0.7        | ○         |

○：消波工あり ×：消波工なし 根：根固工あり 離：離岸堤あり

a：設置水深による補正係数 b：風による補正係数

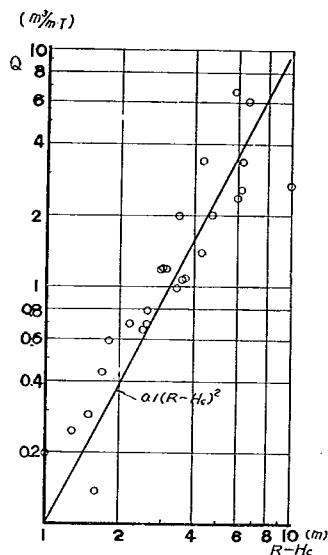


図-7 越波量とうちあげ高の相関

般にいわれているように、 $0.1 \text{ m/m} \cdot \text{T}$ 程度を越波量の許容限界とすると、うちあげ高より堤防高を低くする余地は非常に少なくなることが理解されよう。

### 5.3 堤防の形状と被覆工

#### (1) 形式と表のりこう配

堤防の形式には種々のものがあるが、この調査では、重力式、よう壁式、扶壁式、傾斜式、階段式の5形式の堤防がみられた。よう壁式は築造基準の形式分類には用いられていないが、先に石積みをして盛土を行ない、後から石積みの表面にコンクリート被覆した形式をいうようである。

各形式の使用頻度を115箇所の堤防について調べてみると、表-3のようになる。傾斜式がもっとも多く用いられており、扶壁式がこれについている。両者の合計が83.4%で、大部分が両形式に属することがわかる。

つぎに、傾斜式（階段式を含む）、扶壁式、重力式（よう壁式を含む）の各形式について、どのような表のりこう配が用いられているか調べてみる。

傾斜式の場合は、5分から4割3分まで広範囲のりこう配が用いられているが、表-4によると、5分～1割の比較的急こう配のものが50.9%で約半数に達している。ついで、1.5～2割が多く、2割以上の緩こう配のものは極めて少ない。

表-3 形式の選定

| 堤防形式 | 使用頻度 |
|------|------|
| 重力式  | 3%   |
| よう壁式 | 7    |
| 扶壁式  | 35.6 |
| 傾斜式  | 47.8 |
| 階段式  | 7.8  |
| 総数   | 115個 |

表-4 形式と表のりこう配の選定

| 形式<br>のりこう配 | 傾斜式   | 扶壁式 | 重力式 |
|-------------|-------|-----|-----|
| 直～0.4割      | 0     | 20% | 60% |
| 0.5         | 13.2% | 80  | 20  |
| 0.6～0.9     | 6.6   |     | 20  |
| 1.0         | 31.1  |     |     |
| 1.5         | 14.7  |     |     |
| 2.0         | 19.8  |     |     |
| 2.5～3.0     | 11.5  |     |     |
| 3.1以上       | 3.3   |     |     |
| 総数          | 61    | 40  | 10  |

扶壁式、重力式は原則的に直立形式として用いられるので、当然表のりこう配は急で、直～7分の範囲に分布している。扶壁式では5分こう配が圧倒的に多く、全体の80%を占めている。重力式の場合は、全数が10個で少ないが、4分以下のりこう配が多い。

表-5は全形式を含めて、表のりこう配の採用頻度をしらべたものであるが、5分こう配が最大で、ついで1割こう配の順になっている。直～1割こう配の使用頻度は73%で、比較的急こう配の堤防が一般につくられていることがわかる。

表-5 のりこう配の選定

| のりこう配   | 選定頻度  |
|---------|-------|
| 直～0.4   | 13.3% |
| 0.5     | 38.3  |
| 0.6～0.9 | 5     |
| 1.0     | 16.7  |
| 1.1～1.9 | 7.5   |
| 2.0     | 10    |
| 2.0以上   | 9.1   |

#### (2) 天ば幅と被覆工

堤防の天ば幅は原則として3m程度に規定されているが、表-6によると、3～4mの場合は78%を占めており、基準に沿った設計がなされているようである。天ば幅が

表-6 天ば幅の選定

| 天 ば 幅     | 選定頻度   |
|-----------|--------|
| 1 ~ 1.9 m | 0.92 % |
| 2 ~ 2.9   | 6.5    |
| 3 ~ 3.9   | 77.8   |
| 4 ~ 4.9   | 5.5    |
| 5 ~ 5.9   | 4.6    |
| 6 ~ 6.9   | 3.7    |
| 7 ~ 7.9   | 0.92   |

2 m程度のものの中には、重式式か、こう配のゆるいものが多かった。

被覆工について調査したところでは、堤体が盛土形式の場合は例外なく3面張りとなっている。被覆材料は、表のり、天ば、裏のりで若干の差がみられた。表-7に示すように、全般的にコンクリートが大部分を占めているが、天ばについては、アスファルト被覆が14.3%でやや多くなっている。これは堤体の沈下になじみ易いこと、補修が容易であることなどのためであろう。

表-7 被覆工の選定

| 被覆工<br>材料      | 表のり   | 天 ば   | 裏のり   |
|----------------|-------|-------|-------|
| コンクリート         | 91.4% | 85.7% | 81.8% |
| コンクリート<br>と石積み | 3.8   |       | 11.4  |
| 石積みその他         | 4.8   |       | 2.3   |
| アスファルト         |       | 14.3  | 4.6   |

裏のりについても、コンクリート以外の被覆工が約20%を占め、やはり、堤体の変形に対処する姿勢がうかがえる。

表のり被覆工の厚さに関する調査結果は表-8のとおりである。等厚の場合についてみると、用いられている厚さは、40 cm, 50 cm, 60 cm の3種のみでかなり限られている。50 cm厚が83.5%で、天ば幅と同様、基準に沿った設計がなされている。

表-8 被覆工の厚さの選定

| (a) 等厚の場合 |        | (b) 厚さの異なる場合 |        |
|-----------|--------|--------------|--------|
| 被覆工の厚さ    | 選定頻度   | 被覆工の平均厚      | 選定頻度   |
| 40 cm     | 15.3 % | 40 ~ 59 cm   | 10.5 % |
| 50        | 83.5   | 50 ~ 59 cm   | 15.8   |
| 60        | 1.2    | 60 ~ 69      | 52.6   |
|           |        | 70 ~ 79      | 15.8   |
|           |        | 80 ~ 89      | 5.3    |

厚さが上下異なる場合の平均厚は、60~70 cmがもっとも多く、等厚の場合に比して厚くなっており、また、そ

の選択の範囲も広がっている。これは、等厚の場合は傾斜式で、波力を堤体にもたせる考え方が強く、一方、厚さの異なる場合は、自立式ないしはそれに近い形式のため、被覆工自身により強い波力を受持せることを考えているからであろう。

天ば、裏のりの場合、コンクリート被覆厚は20~40 cmの範囲で、大部分が20 cmとなっている。アスファルトの場合はやや厚く、下層処理も含めて30~40 cmの範囲で、40 cm程度のものが多い。

### (3) 波 返 工

この調査の範囲では、大部分の堤防に波返が設けられている。波返のない堤防は、表のりが2割以上の緩傾斜の堤防に若干みられたのみである。波返工の高さについて調べた結果を表-9に示す。全般的にあまり高い波返は用いられておらず、1 m前後のものが多く、すなわち、0.75 ~ 1.25 mの範囲に入るものが74%に達している。

表-9 波返工の高さの選定

| 波返工の高さ      | 選定頻度  |
|-------------|-------|
| 0 ~ 0.49 m  | 3.5 % |
| 0.5 ~ 0.74  | 14.2  |
| 0.75 ~ 0.99 | 21.2  |
| 1.0 ~ 1.24  | 53.1  |
| 1.25 ~ 1.49 | 3.6   |
| 1.5 以上      | 4.4   |

## 5.4 波 圧

海岸堤防の設計においては、一般に波圧を考慮した構造計算はほとんど行なわれていない。傾斜堤の場合は、表のり被覆工の厚さは50 cm程度にとられ、自立式の場合でも、平均的な厚みは60~70 cm程度である。このような被覆工が実際上どの程度の波圧に耐えてきているかを検討しておくことはやはり設計上大切なことである。

表-10は実際の海岸堤防にどの程度の波圧が作用しているかを、第3章において求めた実験公式を用いて計算したものである。この表では、堤防が汀線より海側につくられている場合、汀線より陸側にあり海底こう配が一樣な場合、同条件で海底こう配が汀線付近で変化している場合の3ケースに分けて計算してある。なお、最後のケースの計算には次式を使用する。

$$\frac{P_0}{W} = 18 \tan \beta_2 \left\{ \frac{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}{2 \tan \beta_2} (H_0 L_0)^{\frac{1}{2}} - x \right\} \cdots (3)$$

ここに、 $P_0$  : 鉛直堤に作用する最大波圧

$W$  : 海水の単位体積重量

$H_0$  : 沖波の波高

$L_0$  : 沖波の波長

表-10 波圧の計算

(a) 堤防が汀線より海側にある場合

| 海堤<br>No | 海岸<br>防 | 海<br>底<br>こう配<br>$\tan \beta$ | のり<br>水<br>深<br>h | 計<br>波<br>高<br>$H_0$ | 計<br>波<br>長<br>$L_0$ | $(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}}$ | $18$<br>$(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}}$<br>$\times \tan \beta$ | 3.2 h | $\frac{P_0}{W}$ | 堤防<br>のり<br>こう配 | 補<br>係<br>正<br>数 | $\frac{P}{W}$ | $W_0$ |
|----------|---------|-------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|-------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|-------|
| 3        |         | 0.08                          | 2.0 m             | 4.3 m                | 236 m                | 31.8 m                    | 4.6 m                                                    | 6.4 m | 11 m            | 1:1             | 0.5              | 5.5 m         | 6 t   |
| 5        |         | 0.14                          | 0.5               | 4.3                  | 236                  | 31.8                      | 8.0                                                      | 1.6   | 9.6             | 1:0.7           | 0.67             | 6.4           | 3.4   |
| 7        |         | 0.2                           | 1.5               | 4.3                  | 225                  | 31.2                      | 11.2                                                     | 4.8   | 16              | 1:0.5           | 0.8              | 13            | 8     |
| 8        |         | 0.17                          | 1.2               | 3.0                  | 156                  | 21.6                      | 6.6                                                      | 3.8   | 10.4            | 1:0.5           | 0.8              | 8.3           | 2     |
| 12       |         | 0.02                          | 1.7               | 3.2                  | 189                  | 24.6                      | 0.89                                                     | 5.5   | 6.4             | 1:3             | 0.24             | 1.5           |       |
| 16       |         | 0.07                          | 2.0               | 5.2                  | 264                  | 37.0                      | 4.6                                                      | 6.4   | 11              | 1:0.5           | 0.8              | 8.8           | 5     |
| 23       |         | 0.23                          | 1.0               | 2.3                  | 42.5                 | 9.9                       | 4.1                                                      | 3.2   | 7.3             | 1:0.5           | 0.8              | 5.8           | 3.5   |
| 24       |         | 0.06                          | 1.0               | 2.0                  | 42.5                 | 9.5                       | 1.0                                                      | 3.2   | 4.2             | 1:0.33          | 0.90             | 3.8           |       |
| 33       |         | 0.18                          | 0.2               | 2.5                  | 76.5                 | 13.8                      | 4.5                                                      | 0.6   | 5.1             | 1:0.5           | 0.8              | 4.1           |       |
| 35       |         | 0.06                          | 0.4               | 2.5                  | 76.5                 | 13.8                      | 1.5                                                      | 1.3   | 2.8             | 1:0.6           | 0.74             | 2.1           |       |
| 41       |         | 0.05                          | 0.4               | 3.0                  | 56                   | 13.0                      | 1.2                                                      | 1.3   | 2.5             | 1:0.25          | 0.94             | 2.4           |       |
| 51       |         | 0.08                          | 0.2               | 6.5                  | 156                  | 31.8                      | 4.6                                                      | 1.6   | 6.2             | 1:0.5           | 0.8              | 5.0           | 4     |
| 56       |         | 0.2                           | 0.5               | 4.0                  | 225                  | 30                        | 10.8                                                     | 1.6   | 12              | 1:0.8           | 0.73             | 7.3           | 5     |
| 57       |         | 0.14                          | 0.3               | 4.0                  | 225                  | 30                        | 7.6                                                      | 1.0   | 8.6             | 1:2             | 0.32             | 2.7           | 5     |
| 61       |         | 0.14                          | 0.7               | 8.0                  | 225                  | 42.4                      | 10.7                                                     | 2.2   | 13              | 1:0.5           | 0.8              | 10            | 5     |
| 69       |         | 0.05                          | 1.0               | 4.2                  | 105                  | 21                        | 1.9                                                      | 3.2   | 5.1             | 1:0.4           | 0.86             | 4.4           | 2     |
| 70       |         | 0.06                          | 1.2               | 5.0                  | 188                  | 30.7                      | 3.3                                                      | 3.8   | 7.1             | 1:0.5           | 0.8              | 5.7           | 4     |
| 74       |         | 0.02                          | 1.3               | 6.5                  | 225                  | 38.3                      | 1.4                                                      | 4.2   | 5.6             | 1:1             | 0.5              | 2.8           |       |
| 75       |         | 0.06                          | 2.0               | 6.2                  | 159                  | 31.4                      | 3.4                                                      | 6.4   | 9.8             | 1:2             | 0.32             | 3.1           | 3.5   |
| 76       |         | 0.09                          | 2.5               | 6.8                  | 375                  | 50.5                      | 8.2                                                      | 8.0   | 16.2            | 1:2             | 0.32             | 5.2           |       |
| 78       |         | 0.1                           | 1.5               | 5.8                  | 142                  | 28.7                      | 5.2                                                      | 4.8   | 10              | 1:1             | 0.5              | 5.0           |       |
| 83       |         | 0.036                         | 0.4               | 4.2                  | 244                  | 32                        | 2.1                                                      | 1.3   | 3.4             | 1:1             | 0.5              | 1.7           | 3.5   |
| 84       |         | 0.045                         | 1.7               | 4.2                  | 188                  | 28.1                      | 2.3                                                      | 5.4   | 7.7             | 1:1             | 0.5              | 3.9           | 4     |
| 89       |         | 0.08                          | 1.2               | 3.4                  | 92.5                 | 17.8                      | 2.6                                                      | 3.8   | 6.4             | 1:0.5           | 0.8              | 5.1           |       |
| 91       |         | 0.03                          | 0.5               | 2.2                  | 56                   | 11.1                      | 0.6                                                      | 1.6   | 2.2             | 1:0.5           | 0.8              | 1.8           | 2     |

$P_0$ : 鉛直堤に作用する波圧  $P$ : のりこう配による補正をした波圧  $W_0$ : コンクリートブロックの重量

表-10 波圧の計算

(b) 堤防が汀線より陸側にある場合 (海底こう配一様)

| 海堤<br>No | 海岸<br>防 | 海<br>底<br>こう配<br>$\tan \beta$ | のり<br>水<br>深<br>h | 計<br>波<br>高<br>$H_0$ | 計<br>波<br>長<br>$L_0$ | $(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}}$ | x      | $(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}}$<br>-x | $\frac{P_0}{W}$ | 堤防<br>のり<br>こう配 | 補<br>係<br>正<br>数 | $\frac{P}{W}$ | $W_0$ |
|----------|---------|-------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|-------|
| 4        |         | 0.12                          | -1.5 m            | 4.3 m                | 236 m                | 31.8 m                    | 12.5 m | 19.3 m                          | 4.2 m           | 1:0.5           | 0.8              | 3.4 m         | 5 t   |
| 6        |         | 0.1                           | 0                 | 4.5                  | 225                  | 31.8                      | 0      | 31.8                            | 5.7             | 1:1             | 0.5              | 2.9           | 6.3   |
| 14       |         | 0.03                          | -1.4              | 9.0                  | 303                  | 52.2                      | 46.7   | 5.5                             | 0.3             | 1:2             | 0.32             | 0.096         |       |
| 20       |         | 0.1                           | -0.5              | 1.7                  | 42.5                 | 8.4                       | 5      | 3.4                             | 0.61            | 1:2.5           | 0.27             | 0.17          |       |
| 27       |         | 0.13                          | -0.5              | 2.0                  | 42.5                 | 9.2                       | 3.8    | 5.4                             | 1.3             | 1:0.5           | 0.8              | 1.0           |       |
| 30       |         | 0.07                          | 0                 | 3.6                  | 49                   | 13.3                      |        | 13.3                            | 1.7             | 1:0.5           | 0.8              | 1.4           |       |
| 32       |         | 0.12                          | 0                 | 2.5                  | 76.5                 | 13.8                      |        | 13.8                            | 3.0             | 1:0.5           | 0.8              | 2.4           |       |
| 34       |         | 0.06                          | 0                 | 2.5                  | 76.5                 | 13.8                      |        | 13.8                            | 1.5             | 1:1             | 0.5              | 0.75          | 2     |
| 36       |         | 0.12                          | -1.0              | 4.0                  | 100                  | 20                        | 8.3    | 11.7                            | 2.5             | 1:3             | 0.24             | 0.6           |       |
| 38       |         | 0.1                           | -0.3              | 3.0                  | 56                   | 13                        | 3      | 10                              | 1.8             | 1:2.5           | 0.27             | 0.49          |       |
| 42       |         | 0.06                          | -0.4              | 3.5                  | 100                  | 18.7                      | 6.7    | 12                              | 1.3             | 1:0.5           | 0.8              | 1.0           | 2     |

| 海堤<br>No | 海岸<br>防 | 海底<br>こう配<br>$\tan \beta$ | のり先<br>水深<br>$h$ | 計画<br>波高<br>$H_0$ | 計画<br>波長<br>$L_0$ | $(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}}$ | $x$  | $(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}} - x$ | $\frac{P_0}{W}$ | 堤防<br>のり<br>こう配 | 補正<br>係数 | $\frac{P}{W}$ | $W_0$ |
|----------|---------|---------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|------|-------------------------------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-------|
| 43       |         | 0.04                      | -0.2m            | 2.7m              | 76.5m             | 14.4m                     | 5.0m | 9.4m                          | 0.68m           | 直*              | 1.0      | 0.68m         |       |
| 45       |         | 0.05                      | -1.0             | 8.0               | 351               | 53                        | 20   | 33                            | 4.8             | 直*              | 1.0      | 4.8           | 4     |
| 53       |         | 0.18                      | -1.2             | 6.5               | 156               | 31.8                      | 6.7  | 25.1                          | 8.2             | 直*              | 1.0      | 8.2           | 4     |
| 54       |         | 0.11                      | -2.6             | 6.5               | 156               | 31.8                      | 23.6 | 8.2                           | 1.6             | 1:0.5           | 0.8      | 1.3           | 4     |
| 59       |         | 0.12                      | 0                | 3.8               | 188               | 26.8                      |      | 26.8                          | 5.8             | 1:0.5           | 0.8      | 4.6           | 5     |
| 68       |         | 0.12                      | -1.3             | 5.0               | 188               | 30.7                      | 10.8 | 19.9                          | 4.3             | 1:2.5           | 0.27     | 1.2           |       |
| 71       |         | 0.16                      | -1.0             | 6.8               | 188               | 35.8                      | 6.3  | 29.5                          | 8.5             | 1:0.4           | 0.86     | 7.3           |       |
| 72       |         | 0.05                      | 0                | 5.0               | 188               | 30.7                      |      | 30.7                          | 2.8             | 1:0.5           | 0.8      | 2.2           | 4     |
| 73       |         | 0.10                      | -0.7             | 3.1               | 76.5              | 15.4                      | 7.0  | 8.4                           | 1.5             | 1:0.6           | 0.74     | 1.1           |       |
| 85       |         | 0.05                      | 0                | 4.1               | 244               | 31.6                      |      | 31.6                          | 2.8             | 1:1             | 0.5      | 1.4           |       |
| 87       |         | 0.1                       | 0                | 4.8               | 210               | 31.5                      |      | 31.5                          | 5.7             | 1:0.5           | 0.8      | 4.5           | 5.5   |
| 88       |         | 0.16                      | 0                | 3.3               | 102               | 18.4                      |      | 18.4                          | 5.3             | 1:0.5           | 0.8      | 4.2           | 3     |
| 90       |         | 0.1                       | 0                | 4.8               | 210               | 31.5                      |      | 31.5                          | 5.7             | 1:1             | 0.5      | 2.9           | 2     |
| 98       |         | 0.08                      | -0.6             | 8.6               | 225               | 44.0                      | 7.5  | 36.5                          | 5.3             | 直*              | 1.0      | 5.3           |       |

表-10 波圧の計算

(c) 堤防が汀線より陸側にある場合 (汀線で海底こう配が変化する場合)

| 海堤<br>No | 海岸<br>防 | 海底<br>こう配<br>$\tan \beta$ | のり先<br>水深<br>$h$ | 計画<br>波高<br>$H_0$ | 計画<br>波長<br>$L_0$ | (1)<br>$(H_0 L_0)^{\frac{1}{2}}$ | (2)<br>$\frac{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}{2 \tan \beta_2}$ | $x$  | (3)<br>(1)×(2) | (3)-x | $\frac{P_0}{W}$ | 堤防<br>のり<br>こう配 | 補正<br>係数 | $\frac{P}{W}$ |
|----------|---------|---------------------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|------|----------------|-------|-----------------|-----------------|----------|---------------|
| 52       |         | 0.06<br>0.15              | -1.8m            | 6.0m              | 264m              | 39.8                             | 1.75                                                        | 30m  | 69.7m          | 39.7m | 4.3m            | 直*              | 1.0      | 4.3m          |
| 60       |         | 0.06<br>0.14              | -3.8             | 8.0               | 225               | 42.5                             | 1.67                                                        | 63.3 | 71.0           | 6.7   | 0.73            | 1:2             | 0.32     | 2.3           |
| 93       |         | 0.033<br>0.16             | -1.3             | 5.8               | 225               | 36.2                             | 2.92                                                        | 39.4 | 106            | 66.6  | 4.0             | 直*              | 1.0      | 4.0           |
| 95       |         | 0.037<br>0.16             | -1.7             | 8.6               | 284               | 49.4                             | 2.66                                                        | 46   | 132            | 86    | 5.7             | 直*              | 1.0      | 5.7           |
| 96       |         | 0.028<br>0.10             | -1.8             | 8.6               | 284               | 49.4                             | 2.29                                                        | 64.2 | 113            | 48.8  | 2.5             | 直*              | 1.0      | 2.5           |

(上の数字: 汀線から上のこう配, 下の数字: 汀線より下のこう配)

$\beta_1$ : 汀線より海側の海底こう配が水平面となす角

$\beta_2$ : 汀線より陸側の海底こう配が水平面となす角

$x$ : 汀線から堤防までの水平距離

波圧の計算式は鉛直堤の最大波圧を求めるものであるから、傾斜堤の場合にはのりこう配による補正を必要がある。ここでは、この補正に図-8を用いる。

ケース(1)の場合について、波圧の発生頻度を計算すると図-9のとおりである。4~5 t/m<sup>2</sup>の波圧を受ける場合がもっとも多いが、13 t/m<sup>2</sup>に達する場合もある。この最高値の発生するケースは、海底こう配が1/5と急こう配で、しかも、のり先水深が15mとかなり大きいことが原因となっている。

一方、ケース(2),(3)の場合は、図-11(b)からわかるように、波圧の小さい場合が多い。最高値も8.2 t/m<sup>2</sup>とケース(1)に比較してかなり小さい。

表のり被覆に表-10のような波圧が作用した場合、被覆中に生ずる応力を計算することは構造系が複雑なため

(補正係数)

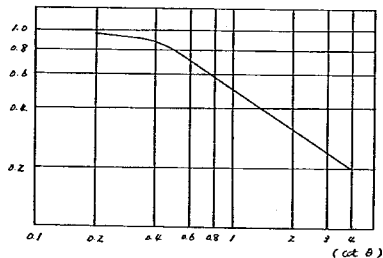


図-8 のりこう配による波圧の補正

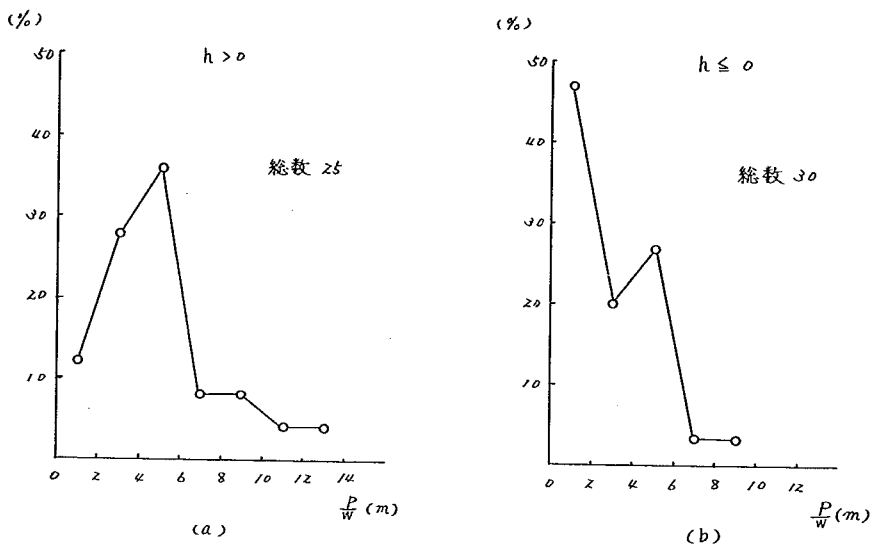


図-9 堤防に作用する計算波圧の度数分布

かなり困難である。第3章の計算結果によると、50cmの被覆厚の場合、コンクリートの許容曲げ引張り応力を10 kg/cm<sup>2</sup>とすると、 $k = 1000 \text{ t/m}^2$ では1~2 t/m<sup>2</sup>の波圧に耐えるのみである。 $k = 5000 \text{ t/m}^2$ とすると、許容波圧は4~5 t/m<sup>2</sup>、 $k = 10,000 \text{ t/m}^2$ とすると、7~8 t/m<sup>2</sup>の波圧に耐えることになる。 $k$ の値は明瞭ではないが表-10から4~5 t/m<sup>2</sup>程度の波圧が作用するケースは多いと考えられ、しかも、この程度の波圧では破壊していないようなので、5,000 t/m<sup>2</sup>以上は期待できるのであろう。しかし、一応の目安としては、50cm程度のコンクリート被覆の場合、7~8 t/m<sup>2</sup>以下におさえた方がよいと思われる。

表-10によると、ケース(2)、(3)では、波圧はほとんどこの値以下となっているが、ケース(1)では、この限界値程度に達する例がいくつかみられる。このように波圧が大きい場合は、詳細に検討して、波圧に対する安全性を十分に確かめた方がよいと思われる。

表-10から7 t/m<sup>2</sup>以上の波圧が生ずる場合について調べてみると、ケース(1)の場合はいずれも堤防高が低すぎるため消波工が設置されている。消波工によって波圧を減少させることは容易であるが、工費がかかるので、設計があまり安全になりすぎないように注意する必要がある。

### 5.5 消波工および根固工

昭和44年度の資料から、総数138個所の堤防について、消波工、根固工の施工の有無をしらべた結果によると、

消波工の施工してある堤防は33%、根固工の施工してある堤防は25%で両者合せて約60%に達している。消波工と根固工とは明確には区別できず、両者を兼ねているケースも多いと思われる。

44年度の資料では、堤防全般についてその特性をしらべたため、消波工と根固工について必ずしも十分な資料を収集できなかったため、45年度の資料を用いて、消波工と根固工の特性を調べてみた。表-11は収集した資料の一覧表である。

第4章でのべたように、消波工では、とくに高さや幅が問題であるが、波の規模に対する相対的な値をみる必要があるため、消波工の水底からの高さを $H_c$ 、天ば幅と底幅との平均値を $\ell$ 、海底からはかった入射波の波頂高を $\eta$ として、 $H_c/\eta$ 、 $\ell/H_c$ の値がどのようになっているかを調べてみる。このためには、 $\eta$ の値が必要であるが、ここでは、 $\eta$ をつぎのようにして求めた。

- (1) 沖波の波高( $H_0$ )、波長( $L_0$ )、海底こう配から、砕波波高( $H_b$ )、砕波水深( $h_b$ )を求める。この場合には、水理公式集の新砕波指標<sup>3)</sup>を用いる。
- (2)  $h_b/L_0$ から砕波点における波頂高( $\eta_0$ )を求める。この計算にも、水理公式集の $h_b/L_0$ と $\eta_b/h_b$ との関係を示した図を用いる。(1)(2)の計算においては、海底こう配の急な場合に外挿を必要とするので、水理公式集の各図を図-10のように書き直し計算にはこれらの図を使用した。
- (3) 第3章の(3)式から汀線における波頂高( $\eta_0$ )を求める。

表-11 堤防、消波工、根固工の諸元一覧表

| 堤防<br>No | 計画<br>潮位 | 計画波    |         | のり先<br>水深 | 海底<br>勾配       | 堤防    |          | ブロック       |     |     | 消波工または根固工 |        |        |
|----------|----------|--------|---------|-----------|----------------|-------|----------|------------|-----|-----|-----------|--------|--------|
|          |          | 波高     | 周期      |           |                | 高さ    | のり<br>勾配 | 種類         | 重量  | 積り方 | 長さ        | 高さ     | 設置水深   |
| 1        | 1.73 m   | 2.83 m | 8.9 sec | 1.7 m     | 0.05           | 5.0 m | 1:0.45   | 6 脚        | 2 t | 乱   | 6.0 m     | 2.75 m | 2.0m×  |
| 2        | 1.20     | 5.5    | 10      | 0.7       | 0.11           | 5.5   | 1:0.5    | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.0       | 2.70   | 1.2    |
| 3        | 1.30     | 6.5    | 10      | -0.4      | 0.15           | 6.0   | 1:1      | 6 脚        | 4.0 |     | 6.2       | 2.30   | -0.2   |
| 4        | 1.20     | 5.5    | 8       | 0.4       | 0.10           | 5.5   | 1:0.5    | テトラ        | 3.0 | 乱   | 4.7       | 3.0    | 1.2 ×  |
| 5        | 1.30     | 6.5    | 10      | -0.6      | 0.06           | 6.0   | 1:0.5    |            |     |     | 6.2       | 1.7    | -0.6 × |
| 6        | 1.20     | 5.5    | 10      | 0.3       | 0.06           | 5.5   | 1:0.5    | 中空三角       | 3.0 | 層   | 7.5       | 2.3    | 1.0    |
| 7        | 1.20     | 5.5    | 8       | -1.0      | 0.08           | 5.5   | 1:0.5    | 6 脚        | 4.0 | 層   | 8.2       | 2.75   | 0      |
| 8        | 1.20     | 5.5    | 10      | -0.4      | 0.08           | 5.5   | 1:1      | アクモン       | 3.0 | 層   | 6.0       | 2.0    | 0      |
| 9        | 1.10     | 6.0    | 11      | -3.0      | 0.06           | 6.2   | 1:0.5    | ホロー<br>キャー | 2.0 | 層   | 4.4       | 0.5    | -2.4 × |
| 10       | 1.30     | 6.5    | 10      | -0.5      | 0.05           | 6.0   | 1:0.5    |            | 4.0 |     | 6.0       | 2.3    | 0      |
| 11       | 1.30     | 6.5    | 10      | -0.8      | 0.09           | 6.0   | 1:0.5    | 三 基        | 4.0 | 層   | 4.8       | 3.4    | 0      |
| 12       | 1.30     | 8.6    | 13.5    | 0.7       | 0.07           | 5.0   | 1:0.5    | 6 脚        | 3.5 | 乱   | 5.3       | 2.9    | 1.3    |
| 14       | 1.30     | 8.6    | 13.5    | -2.0      | 0.08<br>0.26   | 5.0   | 1:1.5    | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.7       | 2.8    | 0.4    |
| 15       | 1.30     | 8.6    | 13.5    |           |                | 5.0   |          | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.7       | 2.8    | 0.6    |
| 16       | 1.30     | 8.6    | 13.5    |           |                |       |          | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.7       | 2.8    | 1.3    |
| 17       | 1.30     | 8.6    | 13.5    | -1.5      | 0.08           | 6.5   | 1:1      | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.7       | 2.8    | 0.3    |
| 18       | 2.84     | 2.0    | 5.7     | 1.4       |                | 4.84  |          |            |     | 乱   | 3.6       | 2.8    | 2.8    |
| 19       | 1.30     | 5.0    | 10      | 1.5       | 0.028          | 4.7   | 1:0.6    | テトラ        | 4.0 | 層   | 4.2       | 2.6    | 1.7 ×  |
| 20       | 1.30     | 5.0    | 10      | -0.5      | 0.068          | 4.7   | 1:1      | 四方錐        | 4.0 | 層   | 5.0       | 2.5    | 0 ×    |
| 22       | 0.70     | 5.0    | 10      |           |                | 4.7   |          | 6 脚        |     | 層   | 5.7       | 2.8    | 1.2    |
| 23       | 0.85     | 2.8    | 11      | -1.2      | 0.076<br>0.045 | 4.5   | 1:0.5    | 6 脚        | 4.0 | 層   | 5.7       | 1.9    | 0 ×    |
| 24       | 0.86     | 2.8    | 11      | 0         | 0.035          | 4.5   | 1:1      | 6 脚        | 2.0 | 層   | 4.0       | 2.0    | 0.7    |
| 25       | 0.96     | 1.2    |         | -0.2      | 0.035          | 3.1   |          |            |     |     | 3.2       | 1.9    | -0.2   |
| 26       | 1.2      | 3.8    | 9.6     | 0         | 0.03           | 5.4   | 1:0.5    | 6 脚        | 2.0 | 層   | 4.3       | 2.0    | 0      |
| 30       | 0.9      | 5.0    | 11      | 0.3       | 0.05           | 5.0   | 1:0.7    | 6 脚        | 4.0 | 層   | 4.7       |        |        |
| 31       | 0.7      | 4.2    | 8.2     | 0         | 0.08           | 4.0   | 1:0.4    | 6 脚        | 2   | 層   | 4.5       | 2.0    | 1.0 ×  |
| 32       | 1.0      | 2.2    | 6.0     | 1.0       | 0.095          | 3.5   | 1:1.2    |            |     |     | 4.5       | 1.5    | 0.8    |
| 33       | 1.4      | 9.7    | 16.1    | -0.4      |                | 6.0   | 1:1      | 中空三角       | 3.0 |     | 6.5       | 2.0    | 0 ×    |
| 34       | 1.2      | 3.3    | 8.1     | -0.2      | 0.12           | 4.0   | 1:0.5    |            |     |     | 5.5       | 2.8    | 0.8    |
| 35       | 1.2      | 3.3    | 8.1     | 0.2       | 0.07           | 4.0   | 1:0.5    | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.5       | 2.8    | 0.8    |
| 36       | 1.2      | 3.3    | 8.1     | 0         | 0.14           | 4.0   | 1:0.5    | 三 連        | 3.0 | 層   | 5.9       | 2.2    | 1.1    |
| 37       | 1.0      | 1.8    | 6.0     | 0.4       | 0.1            | 3.0   | 1:0.5    | 6 脚        | 1.0 | 層   | 2.7       |        | 0.5 ×  |
| 39       | 2.95     | 1.8    |         | 3.7       | 0.09           | 5.5   | 1:0.5    | 三 連        | 2.0 | 乱   | 7.0       | 4.5    | 3.0    |
| 40       | 3.0      | 2.3    | 7.3     | 4.0       | 0.1            | 5.3   | 1:0.5    | 中空三角       | 3.0 | 乱   | 7.5       | 6.3    | 5.0    |
| 42       | 2.85     | 1.75   | 5.0     | 2.1       | 0.14           | 5.0   | 1:0.5    | 6 脚        | 3.5 | 層   | 3.8       | 2.5    | 3.3    |
| 43       | 2.49     | 3.2    | 11.0    | 2.2       | 0.05           | 6.0   | 1:1      | テトラ        | 5.0 | 乱   | 5.3       | 4.5    | 2.7    |
| 44       | 4.52     | 2.1    | 6.0     | 5.0       | 0.05           | 7.5   | 1:2      | 三 連        |     |     | 7.4       | 2.5    | 1.0    |
| 45       | 2.99     | 3.8    | 11.0    | 0.6       | 0.075          | 8.8   | 1:0.5    | 6 脚        | 5.0 | 乱   |           |        |        |
| 46       | 2.65     | 7.0    | 11.0    | 1.65      | 0.14           | 7.0   | 1:2.5    | 三 連        | 5.0 |     | 6.5       | 5.8    | 1.5    |
| 47       | 2.65     | 4.8    | 12.0    | 1.8       | 0.14           | 7.0   | 1:0.8    | 6 脚        | 5.0 |     | 6.7       | 4.8    | 2.8    |
| 48       | 2.26     | 2.5    | 6.0     | 2.0       |                | 4.0   | 1:0.4    | テトラ        | 4.0 | 乱   | 5.0       | 4.0    | 2.8    |
| 49       | 1.79     | 3.5    |         | -0.3      | 0.24           | 6.0   | 1:0.5    | 6 脚        | 3.5 | 層   | 5.5       | 2.9    | 1.8 ×  |
| 50       | 1.02     | 4.3    | 12.3    | -0.7      | 0.036          | 4.5   | 1:0.7    | 6 脚        | 3.5 | 層   | 6.8       | 1.2    | -0.3   |
| 51       | 1.02     | 4.3    | 12.3    | 0.5       | 0.14           | 5.7   | 1:1      | テトラ        | 6.0 | 乱   | 12.5      | 6.2    | 3.6    |
| 52       | 1.02     | 3.0    | 10      | 1.0       | 0.14           | 3.5   | 1:0.5    | 6 脚        | 2.0 | 層   | 5.2       | 2.2    | 1.1    |

×印 根固工を示す。

| 堤防<br>No | 計画<br>潮位  | 計画波   |          | のり先<br>水深 | 海底<br>どう配     | 堤防       |           | ブロック        |       |     | 消波工または根固工 |       |        |
|----------|-----------|-------|----------|-----------|---------------|----------|-----------|-------------|-------|-----|-----------|-------|--------|
|          |           | 波高    | 周期       |           |               | 高さ       | のり<br>こう配 | 種類          | 重量    | 積み方 | 長さ        | 高さ    | 設置水深   |
| 53       | TP 1.02 m | 4.3 m | 12.3 sec | -0.7 m    | 0.14          | TP 6.8 m | 1:0.5     | テトラ         | 6.3 t | 乱   | 11.0 m    | 5.8 m | 3.0    |
| 55       | 2.65      | 3.1   | 7.5      | 1.4       | 0.084         | 4.5      | 1:0.5     | テトラ         | 2.0   |     | 4.5       | 1.9   | 2.0    |
| 56       | 2.65      | 3.1   | 7.5      | 1.0       | 0.17          | 4.95     |           | テトラ         | 4.0   |     | 6.0       | 5.2   | 3.5    |
| 60       | 2.2       | 9.1   | 16.8     | -1.7      | 0.1           | 10.0     | 1:0.5     | ホロース<br>キャー | 6.0   | 層   | 4.7       | 3.0   | -1.3 × |
| 61       | 2.2       | 8.8   | 14.2     | -1.3      | 0.13          | 8.5      | 1:0.5     | 三連          | 8.0   |     | 7.0       | 2.6   | 0      |
| 62       | 1.4       | 4.2   | 12.5     | -1.6      | 0.1           | 6.2      | 1:0.5     | 6脚          | 3.5   | 層   | 6.5       | 3.7   | 0 ×    |
| 63       | 1.3       | 4.1   | 12.5     | -2.0      |               | 6.2      | 1:1       | 中空三角        | 2.0   |     | 7.2       | 0.8   | 0.2 ×  |
| 64       | 1.3       | 4.1   | 12.5     | -1.5      | 0.03<br>0.024 | 6.2      | 1:1       | 6脚          | 3.5   | 層   | 5.8       | 2.7   | -0.7 × |
| 65       | 1.4       | 4.2   | 12.5     | 0         | 0.05          | 6.2      |           | 6脚          | 3.5   | 層   | 5.8       | 2.75  | 0.3    |
| 66       | 1.3       | 4.1   | 12.5     | 1.6       | 水平            | 6.2      | 1:1       | 中空三角        | 2.0   | 乱   | 5.8       | 2.6   | -0.5 × |
| 67       | 1.5       | 4.5   |          | -2.1      | 0.036         | 6.2      | 1:2       | アクモン        | 4.0   | 層   | 6.7       | 2.5   | 0 ×    |
| 69       | 2.62      | 5.8   | 9.6      | 0.7       | 0.056         | 6.52     | 1:2       | 6脚          | 3.5   | 層   | 5.6       | 2.8   | 1.4 ×  |
| 70       | 2.65      | 5.8   | 9.6      | 1.5       | 0.064         | 8.5      | 1:1       | 6脚          | 3.5   | 層   | 4.3       | 2.4   | 2.0 ×  |
| 72       | 1.66      | 9.0   | 16.0     | -3.0      | 0.1           | 7.3      | 1:1.5     | 6脚          | 8.0   | 層   | 7.7       | 3.7   | -1.4 × |
| 73       | 2.2       | 5.2   | 13.0     | 2.2       | 0.12          | 6.3      | 1:0.5     | テトラ         | 5.0   | 乱   | 7.1       | 5.1   | 3.0    |
| 74       | 1.6       | 9.0   | 16.0     | 0         | 0.10          | 9.8      | 1:1.5     | 6脚          | 8.0   |     | 8.2       | 2.4   | 0.5 ×  |
| 75       | 2.3       | 8.0   | 15.0     | -1.0      | 0.064         | 7.5      |           | 6脚          | 4.0   | 層   |           |       |        |
| 79       | 3.16      | 3.0   | 7.0      | 0.3       | 0.02          | 6.5      | 1:0.5     | 6脚          | 3.5   | 層   | 4.5       | 1.4   | 1.8    |

×印 根固工を示す。

表-12 波頂高と消波工の規模

| 堤防<br>No | H <sub>0</sub><br>(m) | L <sub>0</sub><br>(m) | H <sub>b</sub><br>L <sub>0</sub> | h<br>(m) | H <sub>c</sub><br>(m) | ℓ<br>(m) | tan β        | h <sub>b</sub><br>(m) | η <sub>b</sub><br>(m) | η <sub>0</sub><br>(m) | η<br>(m) | H <sub>c</sub><br>η | ℓ<br>H <sub>c</sub> |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------|-----------------------|----------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|---------------------|---------------------|
| 1        | 2.83                  | 123                   | 0.023                            | 2.0      | 2.75                  | 5.0      | 0.05         | 4.3                   | 7.2                   | 0.84                  | 3.80     | 0.72                | 2.18                |
| 5        | 6.5                   | 156                   | 0.042                            | -0.6     | 1.7                   | 6.2      | 0.06         | 8.78                  | 14.5                  | 1.72                  | 1.0      | 1.70                | 3.65                |
| 7        | 5.5                   | 100                   | 0.055                            | 0        | 2.75                  | 8.2      | 0.08         | 7.13                  | 11.6                  | 1.69                  | 1.69     | 1.63                | 2.91                |
| 11       | 6.5                   | 156                   | 0.042                            | 0        | 3.4                   | 4.8      | 0.091        | 7.93                  | 13.6                  | 2.61                  | 2.61     | 1.30                | 1.41                |
| 16       | 8.6                   | 283                   | 0.03                             | 1.3      | 2.8                   | 5.7      | 0.025        | 13.3                  | 21.5                  | 1.11                  | 2.10     | 1.33                | 2.04                |
| 17       | 8.6                   | 283                   | 0.03                             | 0.3      | 2.8                   | 5.7      | 0.08         | 11.3                  | 19.8                  | 3.56                  | 3.99     | 0.70                | 2.04                |
| 20       | 5.0                   | 156                   | 0.032                            | 0        | 2.5                   | 5.0      | 0.07         | 6.75                  | 11.5                  | 1.71                  | 1.71     | 1.46                | 2.0                 |
| 22       | 5.0                   | 156                   | 0.032                            | 1.2      | 2.8                   | 5.7      | 0.1          | 6.55                  | 11.5                  | 2.01                  | 3.75     | 0.75                | 2.04                |
| 23       | 2.8                   | 188                   | 0.015                            | 0        | 1.9                   | 5.7      | 0.076        | 3.98                  | 7.28                  | 1.57                  | 1.57     | 1.21                | 3.0                 |
| 25       | 1.2                   | 143                   | 0.0084                           | -0.2     | 1.9                   | 3.2      | 0.029        | 2.29                  | 3.89                  | 0.33                  | 0.19     | 12.7                | 1.68                |
| 26       | 3.8                   | 143                   | 0.027                            | 0        | 2.0                   | 4.3      | 0.03         | 5.91                  | 9.60                  | 0.63                  | 0.63     | 3.18                | 2.15                |
| 31       | 4.2                   | 105                   | 0.04                             | 1.0      | 2.0                   | 4.5      | 0.08         | 5.46                  | 9.18                  | 1.51                  | 2.92     | 0.69                | 2.25                |
| 32       | 2.2                   | 56                    | 0.039                            | 0.8      | 1.5                   | 4.5      | 0.1          | 2.75                  | 4.76                  | 1.0                   | 2.09     | 0.72                | 3.0                 |
| 44       | 2.1                   | 56                    | 0.038                            | 1.0      | 2.5                   | 7.4      | 0.05         | 3.03                  | 4.94                  | 0.49                  | 1.96     | 1.28                | 2.96                |
| 60       | 9.1                   | 439                   | 0.021                            | -1.3     | 3.0                   | 4.7      | 0.1          | 11.8                  | 21.7                  | 5.69                  | 4.52     | 0.66                | 1.57                |
| 62       | 4.2                   | 243                   | 0.017                            | 0        | 3.7                   | 6.5      | 0.05         | 6.64                  | 11.3                  | 1.44                  | 1.44     | 2.57                | 1.76                |
| 64       | 4.1                   | 243                   | 0.017                            | -0.7     | 2.7                   | 5.8      | 0.03         | 6.85                  | 11.4                  | 0.86                  | 0.23     | 11.7                | 2.15                |
| 66       | 4.1                   | 243                   | 0.017                            | -0.5     | 2.6                   | 5.8      |              | 6.97                  | 11.5                  | 0.57                  | 0.12     | 21.6                | 2.23                |
| 67       | 4.5                   | 243                   | 0.018                            | 0        | 2.5                   | 6.7      | 0.036        | 7.4                   | 12.2                  | 1.06                  | 1.06     | 2.36                | 2.68                |
| 70       | 5.8                   | 143                   | 0.04                             | 2.0      | 2.4                   | 4.3      | 0.065        | 7.77                  | 13.0                  | 1.68                  | 4.59     | 0.52                | 1.79                |
| 72       | 9.0                   | 398                   | 0.023                            | -1.4     | 3.7                   | 7.7      | 0.03<br>0.10 | 14.4                  | 23.6                  | 1.63                  | 0.37     | 10                  | 2.08                |
| 74       | 9.0                   | 398                   | 0.023                            | 0.5      | 2.4                   | 8.2      | 0.10         | 11.5                  | 21.1                  | 5.39                  | 6.07     | 0.40                | 2.05                |

- (4)  $\eta_b$  と  $\eta_0$  の間は直線変化するものとして、消波工の  
のり先水深  $h$  における  $\eta$  を計算する。

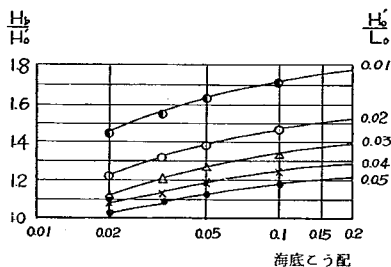


図-10(a) 碎波波高

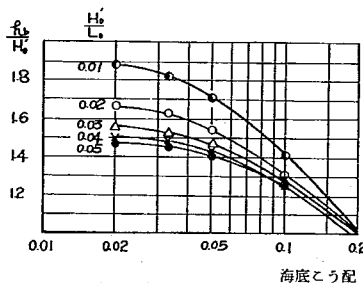


図-10(b) 碎波水深

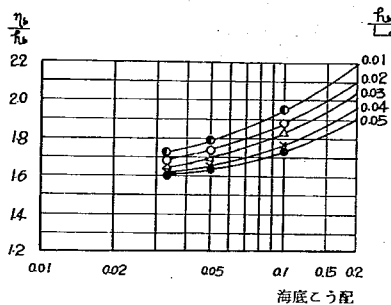


図-10(c) 碎波点における波頂高

各資料につき、上記の計算を行ない、 $H_c/\eta$  の値を求めた。さらに、 $\ell/H_c$  の値も求め、表-12 および表-14 に示した。これから、 $H_c/\eta$  については 0.2 間隔で、 $\ell/H_c$  については 0.5 間隔で、その範囲に入る資料を集めてみると表-13 のようになる。

この表をみると、 $H_c/\eta$  の値は大部分 0.5 ~ 1.5 の範囲にあるが、もっとも使用頻度の高いのは 0.7 ~ 0.9 程度の値

表-13(a) 消波工・根固工の高さの選定状況

| 高さの区分       | $\frac{H_c}{\eta}$ (消) | $\frac{H_c}{\eta}$ (根) |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 0.5 以下      | 10 %                   | 5.3 %                  |
| 0.51 ~ 0.7  | 20                     | 21.1                   |
| 0.71 ~ 0.9  | 30                     | 15.7                   |
| 0.91 ~ 1.1  | 10                     | 5.3                    |
| 1.11 ~ 1.30 | 13.4                   | 5.3                    |
| 1.31 ~ 1.50 | 10                     | 5.3                    |
| 1.51 ~ 1.70 | 3.3                    | 0                      |
| 1.71 ~ 1.90 | 0                      | 10.5                   |
| 1.91 以上     | 3.3                    | 31.5                   |

表-13(b) 消波工・根固工の長さの選定状況

| 長さの区分     | $\frac{\ell}{H_c}$ (消) | $\frac{\ell}{H_c}$ (根) |
|-----------|------------------------|------------------------|
| 0.5 以下    | 0 %                    | 0 %                    |
| 0.6 ~ 1.0 | 2.4                    | 0                      |
| 1.1 ~ 1.5 | 26.2                   | 3.7                    |
| 1.6 ~ 2.0 | 19.0                   | 33.3                   |
| 2.1 ~ 2.5 | 26.2                   | 29.6                   |
| 2.6 ~ 3.0 | 14.3                   | 11.1                   |
| 3.1 ~ 3.5 | 9.5                    | 7.5                    |
| 3.6 ~ 4.0 | 0                      | 3.7                    |
| 4.1 以上    | 2.4                    | 11.1                   |

である。しかし、上記の計算では、 $\eta_0$  がやや過大の値を与へるようなので、実際には、1 よりやや小さい程度の高さがもっとも多く使用されていると考えてよいようである。

$\ell/H_c$  については、0.5 ~ 3.5 と散らばりの範囲が大きい。1.1 ~ 1.5, 1.6 ~ 2.0, 2.1 ~ 2.5 の範囲に入るものが大部分を占めている。

消波工の場合には、堤防高、水理条件、背後地の状況などから適切な規模が決定されるので、上記の数字のみではあまり意味がないので、ここでは、第4章の実験結果を利用して、消波工の効果を概略推定し、その規模が適切であるかどうかを検討してみる。その検討の方法を以下に示す。

- (1) 上述の方法により、 $H_c/\eta$  と  $\ell/H_c$  を計算し、これを第4章の図-8に適用して、透過波高を求める。入射波高は海底こう配が 1/10 よりゆるい場合は中村、白石、佐々木の実験結果<sup>(4)</sup>を用いて計算し、海底こう配が 1/10 より急な場合は、 $H_b/\eta$  が  $H_b/\eta_b$  に等しいとして、計算した。この場合、図-8の適用に当たっては、海底こう配、設置水深、ブロックの形状による影響などは無視する。

表-14 消波効果の推定

| 堤防<br>No | H <sub>0</sub><br>(m) | L <sub>0</sub><br>(m) | H <sub>0</sub><br>L <sub>0</sub> | h<br>(m) | H <sub>c</sub><br>(m) | ℓ<br>(m) | tanβ  | ブロック<br>の種類 | ブ<br>ロ<br>ッ<br>ク<br>の<br>積<br>量 | ブ<br>ロ<br>ッ<br>ク<br>の<br>方<br>向 | d<br>(m) | h'<br>(m) | 堤防の<br>のり<br>こう配 | η<br>(m) | H <sub>c</sub><br>η | ℓ<br>H <sub>c</sub> | H <sub>r</sub><br>(m) | W <sub>r</sub><br>(t) | W<br>W <sub>r</sub> | H <sub>r</sub><br>H <sub>i</sub> | H <sub>r</sub><br>(m) | δ<br>H <sub>r</sub> | δ<br>(m) | R<br>(m)   | H <sub>c</sub> '<br>(m) | R<br>H <sub>c</sub> ' |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------|-----------------------|----------|-------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|-----------|------------------|----------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------|----------|------------|-------------------------|-----------------------|
| 2        | 5.5                   | 156                   | 0.035                            | 1.2      | 2.7                   | 5.0      | 0.11  | 6 脚         | 3.5t                            | 層                               | 0.29     | 0.7       | 1:0.45           | 4.54     | 0.59                | 1.85                | 1.76                  | 0.8                   | 4.4                 | 0.8                              | 1.41                  | 0.57                | 0.81     | 3.9 (55)   | 4.3                     | 0.91                  |
| 3        | 6.5                   | 156                   | 0.042                            | -0.2     | 2.3                   | 6.2      | 0.17  | "           | 4.0                             |                                 |          | -0.4      | 1:1              |          |                     |                     |                       |                       |                     |                                  |                       |                     |          |            |                         |                       |
| 4        | 5.5                   | 100                   | 0.055                            | 1.2      | 3.0                   | 4.7      | 0.10  | テトラ<br>ポッド  | 3.0                             | 乱                               | 1.14     | 0.4       | 1:0.5            | 3.73     | 0.80                | 1.57                | 1.35                  | 0.3                   | 10                  | 0.72                             | 0.97                  | 0.6                 | 0.58     | 2.7 (3.9)  | 4.3                     | 0.63                  |
| 6        | 5.5                   | 156                   | 0.035                            | 1.0      | 2.3                   | 7.5      | 0.06  | 中空三角        | 3.0                             | 層                               | 0.79     | 0.3       | 1:0.5            | 2.92     | 0.79                | 3.26                | 1.15                  | 0.2                   | 15                  | 0.70                             | 0.81                  | 1.5                 | 1.20     | 2.9 (28)   | 4.3                     | 0.68                  |
| 8        | 5.5                   | 156                   | 0.035                            | 0        | 2.0                   | 6.0      | 0.08  | アクモン        | 3.0                             | "                               |          | -0.4      | 1:1              | 2.10     | 0.95                | 3.0                 | 1.0                   | 0.13                  | 23                  | 0.60                             | 0.60                  | 2.0                 | 1.20     | 2.5 (37)   | 4.3                     | 0.58                  |
| 10       | 6.5                   | 156                   | 0.042                            | 0        | 2.3                   | 6.0      | 0.08  |             | 4.0                             |                                 |          | -0.5      | 1:0.5            | 2.29     | 1.0                 | 2.61                | 1.2                   | 0.16                  | 25                  | 0.60                             | 0.72                  | 1.6                 | 1.15     | 2.7 (3.5)  | 4.7                     | 0.53                  |
| 12       | 8.6                   | 283                   | 0.03                             | 1.3      | 2.9                   | 5.3      | 0.07  | 6 脚         | 3.5                             | 乱                               | 0.74     | 0.7       | 1:0.5            | 4.99     | 0.58                | 1.83                | 1.9                   | 1.0                   | 3.5                 | 0.75                             | 1.43                  | 0.57                | 0.82     | 3.9 (67)   | 3.7                     | 1.05                  |
| 14       | 8.6                   | 283                   | 0.03                             | 0.4      | 2.8                   | 5.7      | 0.035 | "           | 3.5                             | 層                               | 0.29     | 0.2       | 1:1.5            | 2.19     | 1.28                | 2.04                | 0.95                  | 0.12                  | 29                  | 0.8                              | 0.76                  | 1.2                 | 0.91     | 2.7 (34)   | 3.7                     | 0.73                  |
| 19       | 5.0                   | 156                   | 0.032                            | 1.7      | 2.6                   | 4.2      | 0.028 | テトラ<br>ポッド  | 4.0                             | "                               | 1.23     | 1.5       | 1:0.6            | 3.27     | 0.80                | 1.62                | 1.12                  | 0.16                  | 25                  | 0.85                             | 0.95                  | 0.52                | 0.50     | 2.6 (4.0)  | 3.4                     | 0.77                  |
| 24       | 2.8                   | 188                   | 0.015                            | 0.7      | 2.0                   | 4.0      | 0.035 | 6 脚         | 2.0                             | "                               | 0.24     | 0         | 1:1              | 1.79     | 1.12                | 2.0                 | 0.60                  | 0.03                  | 67                  | 0.75                             | 0.45                  | 1.2                 | 0.54     | 1.5 (20)   | 3.6                     | 0.42                  |
| 33       | 9.7                   | 403                   | 0.024                            | 0        | 2.0                   | 6.5      | 0.033 | 中空三角        | 3.0                             | "                               | 0.79     | -0.4      | 1:1              | 1.86     | 1.08                | 3.25                | 0.89                  | 0.09                  | 33                  | 0.6                              | 0.53                  | 2.3                 | 1.22     | 2.3 (32)   | 4.6                     | 0.50                  |
| 34       | 3.3                   | 102                   | 0.032                            | 0.8      | 2.8                   | 5.5      | 0.12  | 6 脚         | 3.5                             | "                               | 0.29     | -0.2      | 1:0.5            | 3.03     | 0.93                | 1.96                | 1.09                  | 0.17                  | 21                  | 0.8                              | 0.87                  | 1.1                 | 0.96     | 2.9 (36)   | 2.8                     | 0.97                  |
| 35       | 3.3                   | 102                   | 0.032                            | 0.8      | 2.8                   | 5.5      | 0.07  | "           | "                               | "                               | 0.29     | 0.2       | 1:0.5            | 2.32     | 1.21                | 1.96                | 0.88                  | 0.09                  | 39                  | 0.6                              | 0.53                  | 1.0                 | 0.53     | 1.7 (21)   | 2.8                     | 0.61                  |
| 36       | 3.3                   | 102                   | 0.032                            | 1.1      | 2.2                   | 5.9      | 0.14  | 3 連         | 3.0                             | "                               | 1.39     | 0         | 1:0.5            | 3.72     | 0.59                | 2.68                | 2.42                  | 1.84                  | 1.63                | 0.5                              | 1.21                  | 0.8                 | 0.97     | 3.6 (44)   | 2.8                     | 1.29                  |
| 43       | 3.2                   | 188                   | 0.017                            | 2.7      | 4.5                   | 5.3      | 0.05  | テトラ<br>ポッド  | 5.0                             | 乱                               | 1.33     | 2.2       | 1:1              | 5.10     | 0.88                | 1.18                | 2.19                  | 1.37                  | 3.65                | 0.82                             | 1.80                  | 0.4                 | 0.72     | 4.6 (58)   | 4.4                     | 1.04                  |
| 46       | 7.0                   | 188                   | 0.037                            | 1.5      | 5.8                   | 6.5      | 0.14  | 3 連         | "                               | 層                               |          | 0.5       | 1:2.5            | 6.54     | 0.89                | 1.12                | 4.0                   | 8.0                   | 0.63                | 0.6                              | 2.40                  | 0.4                 | 0.96     | 6.3 (90)   | 4.4                     | 1.46                  |
| 47       | 4.8                   | 225                   | 0.021                            | 2.8      | 4.8                   | 6.7      | 0.14  | 6 脚         | "                               | 乱                               |          | 1.80      | 1:0.8            | 7.59     | 0.63                | 1.40                | 4.98                  | 16.0                  | 0.31                | 0.6                              | 2.99                  | 0.47                | 1.40     | 7.9 (11.1) | 4.4                     | 1.8                   |
| 48       | 2.5                   | 56                    | 0.045                            | 2.8      | 4.0                   | 5.0      | 0.2   | テトラ<br>ポッド  | 4.0                             | "                               |          | 2.0       | 1:0.4            |          |                     | 1.25                |                       |                       |                     |                                  |                       |                     |          |            |                         |                       |
| 50       | 4.3                   | 235                   | 0.018                            | 1.3      | 2.8                   | 6.8      | 0.056 | 6 脚         | 3.5                             | 層                               | 0.29     | 0.5       | 1:0.7            | 3.58     | 0.78                | 2.43                | 1.74                  | 0.70                  | 5.0                 | 0.8                              | 1.39                  | 0.7                 | 0.97     | 3.4 (37)   | 3.3                     | 1.03                  |
| 51       | 4.3                   | 235                   | 0.018                            | 3.0      | 6.0                   | 10.5     | 0.14  | テトラ<br>ポッド  | 6.0                             | "                               | 1.83     | 0.5       | 1:1              | 7.60     | 0.79                | 1.75                | 4.92                  | 15.6                  | 0.38                | 0.5                              | 2.46                  | 0.56                | 1.38     | 6.8 (81)   | 4.7                     | 1.45                  |
| 52       | 3.0                   | 156                   | 0.019                            | 1.1      | 2.2                   | 5.2      | 0.14  | 6 脚         | 2.0                             | "                               | 0.24     | 1.0       | 1:0.5            | 4.05     | 0.55                | 2.36                | 2.62                  | 2.3                   | 0.87                | 0.6                              | 1.57                  | 0.7                 | 1.1      | 4.3 (66)   | 2.5                     | 1.72                  |
| 53       | 4.3                   | 225                   | 0.019                            | 3.0      | 5.8                   | 11.0     | 0.14  | テトラ<br>ポッド  | 6.3                             | "                               |          | 1.0       | 1:0.5            | 7.57     | 0.77                | 1.90                | 4.90                  | 15.3                  | 0.41                | 0.5                              | 2.45                  | 0.58                | 1.42     | 6.8 (85)   | 5.8                     | 1.17                  |
| 55       | 3.1                   | 87.5                  | 0.036                            | 2.0      | 1.9                   | 4.5      | 0.084 | "           | 2.0                             | "                               |          | 1.4       | 1:0.5            | 4.18     | 0.46                | 2.36                | 2.0                   | 1.04                  | 1.92                | 0.75                             | 1.50                  | 0.7                 | 1.05     | 4.3 (4.5)  | 1.9                     | 2.26                  |
| 56       | 3.1                   | 87.5                  | 0.036                            | 3.5      | 5.2                   | 6.0      | 0.17  | "           | 4.0                             | "                               |          | 1.5       | 1:2              | 6.35     | 0.82                | 1.15                | 3.94                  | 8.3                   | 0.48                | 0.6                              | 2.46                  | 0.42                | 1.06     | 5.1 (7.3)  | 2.3                     | 2.21                  |
| 61       | 8.8                   | 314                   | 0.028                            | 0        | 2.6                   | 7.0      | 0.13  | 3 連         | 8.0                             | "                               |          | -1.3      | 1:0.5            | 6.15     | 0.42                | 2.70                | 3.72                  | 6.7                   | 1.2                 | 0.57                             | 2.12                  | 1.7                 | 3.60     | 8.2 (9.4)  | 6.3                     | 1.30                  |
| 65       | 4.2                   | 243                   | 0.017                            | 0.3      | 2.75                  | 5.8      | 0.05  | 6 脚         | 3.5                             | 層                               | 0.29     | 0         |                  | 1.89     | 1.46                | 2.11                | 0.9                   | 0.095                 | 37                  | 0.4                              | 0.36                  | 1.2                 | 0.43     | 1.2 (27)   | 4.8                     | 0.25                  |
| 69       | 6.2                   | 159                   | 0.039                            | 1.4      | 2.8                   | 5.6      | 0.056 | "           | 3.5                             | "                               | 0.29     | 0.7       | 1:2              | 3.64     | 0.77                | 2.0                 | 1.86                  | 0.83                  | 4.2                 | 0.7                              | 1.30                  | 0.6                 | 0.78     | 2.9 (3.1)  | 3.9                     | 0.75                  |
| 73       | 5.2                   | 263                   | 0.020                            | 3.5      | 5.1                   | 7.1      | 0.12  | テトラ<br>ポッド  | 5.0                             | "                               | 1.70     | 1.5       | 1:0.5            | 7.94     | 0.65                | 1.39                | 4.95                  | 15.7                  | 0.32                | 0.7                              | 3.46                  | 0.47                | 1.63     | 9.0 (9.4)  | 5.3                     | 1.70                  |

H<sub>c</sub>: 静水面上の堤防高  
W<sub>r</sub>: ブロックの必要重量  
( ) 内の数字は消波工のない場合のうねり高

(2) ブロックの大きさと波高との関係により透過率は変化するので、使用ブロックの重量と必要重量との比を計算し、これを考慮して第4章の図-8を使い分けることが必要である。

(3) 透過波高と堤防の設置水深とから、段波の反射理論を用いてうちあげ高を計算する。この場合、消波工による水位上昇量を求め、水深を補正することが必要である。この計算には第4章の図-11を用いる。

(4) うちあげ高の計算値は鉛直堤に対する値なので、のりこう配がゆるい場合はその補正をすべきである。

以上の方法により計算した結果を表-14に示す。この表をみると、適切な消波工が施工されている例は少ないようである。海底こう配がゆるい場合はうちあげ高が堤防高より低くなっているケースが多いが、必ずしも、消波工が有効ではなく、もともと消波工を必要としないケースもかなりみられる。一方、海底こう配の急な場合は、うちあげ高が堤防高より高く、消波工が有効でない場合が多い。また、前者のケースでは、使用ブロックの重量が大きすぎて、消波工の効果を減殺している例が多くみられた。

これらの計算例では、 $H_c/\eta$ の値は1以下の場合が多く一般に消波工の高さが低すぎる傾向がみられた。これは $\eta$ の計算値がやや過大であることにも起因するが、 $H_c/\eta$ が1程度になると非常に効果的にみられた。

いずれにしても、消波工の機能が必要、かつ、十分に生かされるようには設計されておらず、ここにのべたような計算法をさらに高精度のものにし、設計の段階で十分な検討を行なうことが望まれる。

根固工においては、高さよりもある程度の長さが必要である。消波工の場合と同様に、 $H_c/\eta$ と $\ell/H_c$ の値を求めてみると表-13のようになる。この表をみると、 $H_c/\eta$ の値が1.91以上のものが31.5%ある。これは根固工の場合、汀線より陸側にあることが多くこの場合には $\eta$ が小さくなるからである。 $\ell/H_c$ についてみてみると特徴はなく、1.0~2.0程度の長さのものが多く用いられている。

根固工では大部分異形コンクリートブロックをそのまま堤防の前に設置する工法がとられている。しかし、この工法では、経済的にも、安全性の面でも不十分なので、基礎処理と先端部の洗掘を十分に考慮した設計をなすべきである。このような設計例は非常に少なく、この調査では数箇所においてみられるのみであった。

## 5.6 結 論

以上限られた数の堤防調査であり、不十分な面も多くみられるが、全国的につくられている堤防の概況は把握

できたと考えられる。この調査で明らかとなった堤防の特徴と問題点を要約するとつぎのとおりである。

(1) 当初計画された堤防高が低く、後から消波工を設置して越波を防止している例が相当に認められた。この点については、前の築造基準の規定に不十分な面があり止むを得なかったと考えられるが、現在では、うちあげ高、越波量の量的取扱いも可能になったので、今後は、防災効果の面からみた堤防高を十分に検討し、海岸利用その他の面から、堤防高をおさえる必要のあるときにのみ消波工の利用を考えてゆくのが適切と思われる。

(2) 現在の堤防がどの程度の波圧に耐えられるのか十分には掴めないが、ここにのべた波圧計算によりかなり大きな圧力を受ける堤防もみられるので、このような場合には経験的に被覆厚を決めるのではなく、波圧についてもある程度の検討を加えてゆくことが必要である。

(3) 消波工については、この調査例でみる限り、ほとんど消波効果についての検討がなされず、適当に消波ブロックを積んだ例が多いように思われる。今後はできるだけ消波効果の検討を行なって、適切な規模を定めてゆく必要がある。

(4) 根固工については、基礎工、先端の洗掘防止などがとくに重要であるが、この点についてはほとんど考慮されておらず、沈下すればその上にさらにブロックを積むという工法が一般的ようである。しかし、経済性、安全性の面から、この工法についても再検討してゆくことが必要である。

(5) 表のりこう配は、鉛直~1割が73%、1割以上2割が18%、2割以上が9%となっており、比較的急こう配の堤防が多くつくられている。

(6) 堤防には一般に波返が設けられているが、その高さは大部分1m程度である。

## 参 考 文 献

- (1) 豊島修、富永正照、橋本宏、：海岸堤防に関する研究(8)、波のうちあげ高、土木研究所報告131、昭和42年。
- (2) 細井正延、三井宏：砕波点より陸側にある堤防への波のうちあげ高、第9回海岸工学講演会講演集、昭和37年。
- (3) 土木学会：水理公式集、P、506~507、昭和46年。
- (4) 中村充、白石英彦、佐々木泰雄：砕波による波の変形に関する研究、第13回海岸工学講演会講演集、昭和41年。

## 第6章 結 論

## 第6章 結 論

以上の研究により、主として碎波領域中に設置された堤防について、越波量、波圧の算定法、および、消波工、根固工の設計指針が示されるとともに、これらの成果を既設堤防に適用することにより、その設計上の問題点を探ることができた。その諸成果については、各章において、結論として詳述しているので、ここでは、それらを反復してのべることは避け、研究成果を引用しながら、堤防の水理設計上の諸問題を総括的に論じて結論とする。

(1) 第5章の結果から、既設の堤防高が一般に低く、そのために消波工に頼るケースの多いことが認められた。

これは、設計基準にも問題があり止むを得なかったと考えられるが、今後は、うちあげ高、越波量の量的な算定が一応可能となったので、その成果を活用することにより、防災面からみた堤防の機能を十分に満足するような高さを設定することが必要である。海岸の利用上、どうしても、堤防高を低くしなければならない場合にのみ消波工を設置すべきである。この場合には第4章の結果を利用して、消波工の適切な規模を定めることが必要である。

(2) 堤防ののりこう配については、第5章の調査から、比較的急こう配のものが多く用いられていることがわかる。碎波領域に設置された堤防の場合には、うちあげ高はのりこう配がゆるくなれば小さくなる。越波量は水理条件により異なるが、1割～2割程度のこう配でピークになる。また、のり面に作用する最大波圧は、のり面と水平面のなす角を $\theta$ とすると、鉛直堤の波圧に $\sin^2\theta$ をかけて求められるので、のりこう配がゆるくなれば小さくなる。したがって、水理的にみれば、のりこう配をゆるくする方が有利であるが、その効果は、3割程度までゆるくしないと明瞭には表われないと思われる。ここまでゆるくしても、一般には根固工を省略することは危険なので、結局、5分～1割程度の堤防に比して、工費がかさむことになる。そのため、海岸利用の面から、例へば、階段式にして海浜をレクリエーション地域として利用するような別の利点がなければ、一般に採用することは困難であろう。

鉛直堤は波圧が著しく大きくなるので一般には適当ではない。

5分～1割程度のこう配は、越波量からみると必ずしも有利ではないが、波圧は鉛直堤に比べてかなり小さくなり、しかも、工費は比較的安くすむところからみると

多く採用されてきたが、今後も、一般にはこの程度ののりこう配が適当と考えられる。なお、このこう配の場合にも、条件によっては波圧が相当に大きくなることもあるので、第3章の結果を利用してその点は十分に検討すべきである。

(3) 高さ1m前後の波返はほとんどすべての堤防に設置されている。第2章の結果から、越波量に対する風の影響が強い場合には、強風時の効果はほとんど期待できない。しかし、堤防の設置水深が浅くなり、風の影響が小さい場合は、強風時にも若干の効果が期待される。したがって、汀線付近かそれより陸側に設置される堤防には波返を設けた方がよい。また、あまり風の強くない時に高波の来襲が予想される地方では、波返は効果的に作用すると考えられる。

(4) 消波工の効果の算定法については、第4章のべたとおりであるが、第5章の計算結果からみて、一般に見落されていることは、入射波に対して必要以上に大きな重量を用いている例が多いことである。これは消波効果を損うことになるので十分に注意すべきである。ただ、消波工全体の安定をはかるために、条件によっては先端に大きなブロックをおくなどの考慮は必要であろう。

また、消波工の天ば高は、条件によって異なるので一概にはいえないが、計算例では、入射波の波頂高程度は必要のようである。また、長さは、高さの2倍程度にするのがもっとも効果的のようである。

(5) 根固工は、堤防の前面に前浜のある場合は省略される例がしばしばみられるが、これは非常に危険なので、三面張りと同様に、根固工を設置することを原則とすべきである。

第4章において、根固工には、その下部に捨石フィルター、マットレスなどを設置すべきことを推奨したが、根固工の洗掘防止機能は、主として、これらの下部工にもたせて、上部のブロックはこれらの散乱を防止する押へと考えた方がよい。根固ブロックの場合は、消波効果よりも反射率を小さくすることを重視すべきで、このためには、空隙の大きくなるものを用いるべきである。あるいは、重量の大きいものを用いてもよいであろう。

捨石フィルター、あるいは、マットレスの押えとしての捨石の天ばは、若干の手間を要するが基礎の天ばと一致させた方がよいと思われる。

この研究で触れなかった問題でとくに重要なものは、

波の不規則性の影響である。この点については、現在、いくつかの研究機関で検討されており、一部研究結果も発表されている。これらの研究成果を設計に取り入れるには、なお、若干の時間が必要と思われるが、ここで取扱ったような、砕波帯中に設置された堤防に関しては、前面波高が一樣化するため、波の不規則性の影響は小さいように思われる。

設置水深の大きい堤防については、ここではあまり触れなかった。この領域については、ほとんどの場合消波工が必要となるので、その規模の選定法がとくに重要と

考えられる。この点に関しては、なお資料が不足しているようなので、今後の検討が必要であろう。

最後に、この研究については、東京大学堀川清司教授より種々の御指導をいただいたこと、および、土木研究所海岸研究室の橋本宏主任研究員、佐久間襄、松村圭二、坂本忠彦の各前研究員、ならびに、九津見生哲、折敷秀雄、末吉一成、小林貞夫の各前技官、および、山下忠技官の御援助を得たことを付記し、ここに深く感謝の意を表するしだいである。