

# 土 木 研 究 所 資 料

## スリット型消波構造物の 消波および波力特性 に関する実験的研究

平成2年8月

建設省土木研究所  
河川部海岸研究室

Copyright ©(1990)by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# スリット型消波構造物の 消波および波力特性 に関する実験的研究

建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多高明  
研究員 小俣 篤  
部外研究員 川村 哲也

## 要 旨

スリット型消波構造物の消波および波力特性について、スリットの空隙率と部材形状に着目しつつ検討した。角柱列から成るスリットの消波・波力特性に関しては、スリットの空隙率を0.3より小さくすると碎波力が急激に増大することが見出された。碎波が作用する場合、空隙率を小さくしても透過率は低下せず、逆に波力は増大することから、構造物に碎波が作用しうる条件下では空隙率を0.3以上とすることが望ましいことが指摘された。円柱列スリットは角柱列スリットに比べ重複波領域では波力は同等であるが消波効果が高く、また碎波領域ではほぼ同等の消波効果を有するにもかかわらず、作用波力が小さいことが分かった。横スリットは角柱列スリットと作用波力が同程度であるが、大きなエネルギー損失を生じさせうることとも指摘された。横スリットでは空隙が鉛直方向に並んでいるので、個々のスリットより生ずる剥離渦は一樣でなく、このため流体の鉛直混合が激しく、大きなエネルギー損失が生ずると考えられる。さらに、服部(1971)の消波効果算定モデルを改良し、種々の空隙率・形状を有するスリット型構造物の透過率、反射率、作用波力を計算する方法を導いた。本研究で開発したモデルによれば、消波・波力の実験結果の合理的な説明が可能である。

キーワード：海域制御構造物，水理模型実験，消波機能，波力特性，波力算定モデル

# 目 次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第1章 まえがき .....                  | 1  |
| 第2章 実験方法 .....                  | 2  |
| 第3章 消波および波力に関する実験結果 .....       | 6  |
| 3.1 波力の測定精度 .....               | 6  |
| 3.2 スリットの空隙率と消波・波力特性の関係 .....   | 7  |
| (1) 角柱列 ( $D/d = 1$ ) の場合 ..... | 7  |
| (2) 円柱列の場合 .....                | 10 |
| 3.3 部材形状と消波・波力特性の関係 .....       | 10 |
| (1) 角柱列, 円柱列, 横スリットの相互比較 .....  | 10 |
| (2) スリットの部材幅と消波・波力特性の関係 .....   | 11 |
| 第4章 スリット型構造物へ作用する波力の算定モデル ..... | 15 |
| 4.1 モデルの概要 .....                | 15 |
| 4.2 空隙を通過する流れの取扱い .....         | 17 |
| 4.3 実験と計算の比較 .....              | 19 |
| (1) 角柱列 ( $D/d = 1$ ) の場合 ..... | 19 |
| (2) 円柱列と横スリットの場合 .....          | 22 |
| 第5章 結 論 .....                   | 24 |
| 参考文献 .....                      | 25 |
| 付録-I .....                      | 27 |
| 付録-II .....                     | 35 |

## 1. まえがき

近年、筆者らは外洋に面した海岸において波・流れ・漂砂を制御し、静穏域を創出するための海域制御構造物の研究開発を進めている（土木研究所，1987；1988；1989）。海域制御構造物の型式は多岐にわたるが、それらの中にスリット型消波構造物がある。その研究開発の最終目標は消波効果、波力特性、施工性、経済性等に配慮した総合的設計法を示すことである。このためには、消波効果と波力特性の関係を明らかにし、部材形状や空隙率の最適値の選択を可能とする必要がある。スリット型消波構造物に関する過去の研究を調べると、特定の部材形状や空隙率を有する構造物に関して消波・波力特性を検討したり、あるいはそのモデル化を試みている。例えば、角野・小田（1985）は縦スリット、角柱列、円柱列に関して漸近展開接合法を適用して消波特性のモデル化を行い、堀口ら（1977）は、均一な円孔を有する多孔壁を対象として構造物の沖側、岸側のポテンシャルをエネルギー方程式により接合して多孔壁に作用する波力をモデル化した。また、井田・久保（1975）は角柱部材で構成される縦スリットと横スリットの空隙率を変化させてそれらの消波特性を実験的に調べている。しかしながら、既往の研究ではスリットの部材形状・空隙率と構造物の消波効果および波力特性との相互関係についての総合的な検討は不十分である。そこで、本研究では種々の空隙率、部材形状のスリット型消波構造物に関して、消波効果および波力特性を実験により調べ、空隙率および部材形状の違いがこれらに及ぼす効果を比較した。さらに透過率、反射率および作用波力を計算する方法を導き、実験値との比較検討を行った。

## 2. 実験方法

実験には全長52m、幅0.6mの造波水路を用いた(図-1)。水路床は、造波板より25m離れた地点より5m間を1/10勾配の斜面とし、それより岸側15mを水平床とした。模型は水平床端部より35cmの位置に設置し、設置水深 $h$ は30cmとした。波高測定には容量式波高計を用い、入・反射波高は沖側2台の波高計データより合田ら(1976)の分離推定法を用いて計算した。また、透過波高は岸側2台の波高計のデータを平均して求めた。

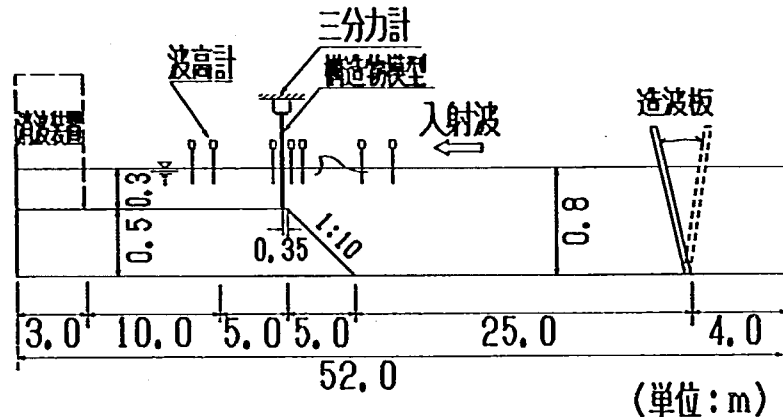


図-1 実験装置

模型は角柱列、円柱列および横スリットの3種類とした(表-1)。まず、空隙率 $\varepsilon$ ( $b/(D+b)$ 、 $D$ :部材幅、 $b$ :空隙幅)と消波・波力特性の関係を調べるために、角柱列と円柱列について $\varepsilon$ を変化させた。また、各々のタイプについて、部材幅 $D$ 、厚さ $d$ 、空隙幅 $b$ などを変化させ、消波・波力特性の違いを調べた(表-1参照)。ここで、部材幅 $D$ は、 $D/L = 0.01 \sim 0.07$ ( $L$ :模型位置での波長)の範囲に設定した。一例として角柱列のS2模型の形状を図-2に示す。模型は木製とし、波力測定部の剛性を確保するために側面を鋼製治具により補強した(図-2参照)。なお、本研究では越波が生じないように各模型の天端高は十分高とした。

最初に、模型を設置しない状態で波浪検定を行い、波浪条件を選定した。波浪検定結果を図-3に示す。非碎波の場合には、模型位置での波高は造波カウント値にほぼ比例して増加するが、造波カウント値がさらに大きくなると模型位置の波高は碎波により低下する。そこで、本研究では高橋ら(1986)と同様に模型位置での仮想通過波高 $H$ (図-3参照)をデータ解析に用いた。波浪検定の結果より、模型位置の仮想通過波高 $H$ を15, 20, 30cm、周期 $T$ を1.6, 2.0, 2.4sとした。実験に用いた波浪条件をまとめて表-2に示す。ただし、S2B, C2, C5, C2B, H2Bの5模型(表-1参照)については、波浪No1, 3, 7, 9の4波浪条件で実験を行った。なお、模型位置での表面波形の観察結果によると、 $H = 15\text{cm}$ と $20\text{cm}$ のケースは重複波領域に、 $H = 30\text{cm}$ のケースは碎波領域に属する(表-2参照)。

波力は模型上部に取り付けた3分力計により測定した(図-1参照)。さらに、模型の岸側と沖側のそれ

表-1 模型諸元一覧

| 形状    | 模型No  | 空隙率<br>$\varepsilon$ | $D/h$ | $D/d$ | $d/b$ | 備考                 |
|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 角柱列   | S 1   | 0.1                  | 0.2   | 1     | 9.23  | $d = 6\text{ cm}$  |
|       | S 2   | 0.2                  | 0.2   | 1     | 4     |                    |
|       | S 3   | 0.3                  | 0.2   | 1     | 2.35  |                    |
|       | S 5   | 0.5                  | 0.2   | 1     | 1     |                    |
|       | S 2 B | 0.2                  | 0.6   | 3     | 1.5   |                    |
| 円柱列   | C 2   | 0.2                  | 0.2   | 1     | 4     | $D = 6\text{ cm}$  |
|       | C 5   | 0.5                  | 0.2   | 1     | 1     | $D = 18\text{ cm}$ |
|       | C 2 B | 0.2                  | 0.6   | 1     | 4     | $D = 6\text{ cm}$  |
| 横スリット | H 2   | 0.2                  | 0.133 | 0.67  | 5     | $d = 6\text{ cm}$  |
|       | H 2 B | 0.2                  | 0.4   | 2     | 1.82  |                    |

<記号>

|      |                           |                           |                           |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|      | 角柱列                       | 円柱列                       | 横スリット                     |
| (平面) | $\frac{D}{b}$<br>○●●●●●●● | $\frac{D}{b}$<br>○●●●●●●● | $\frac{d}{D}$<br>○●●●●●●● |
| (正面) |                           |                           |                           |
|      |                           |                           | (側面)                      |

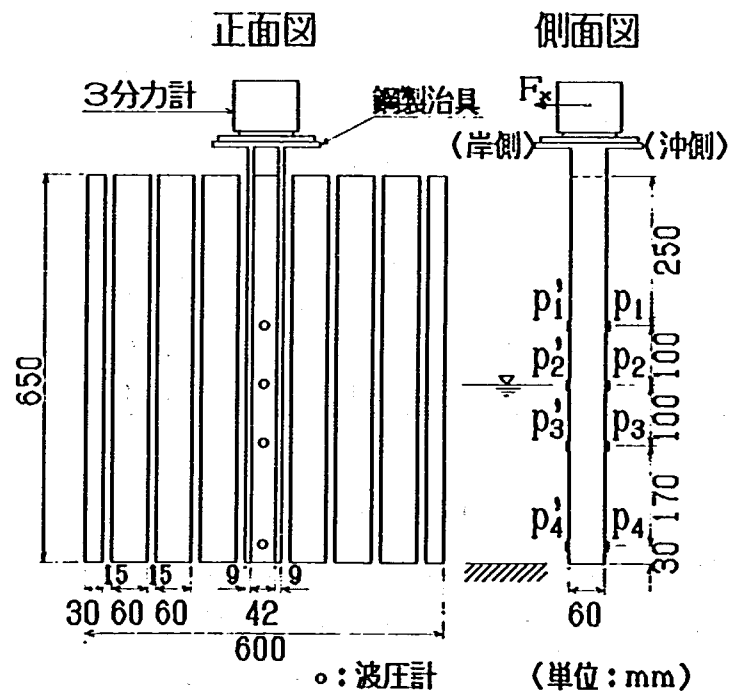


図-2 模型形状の一例 (S 2 模型)

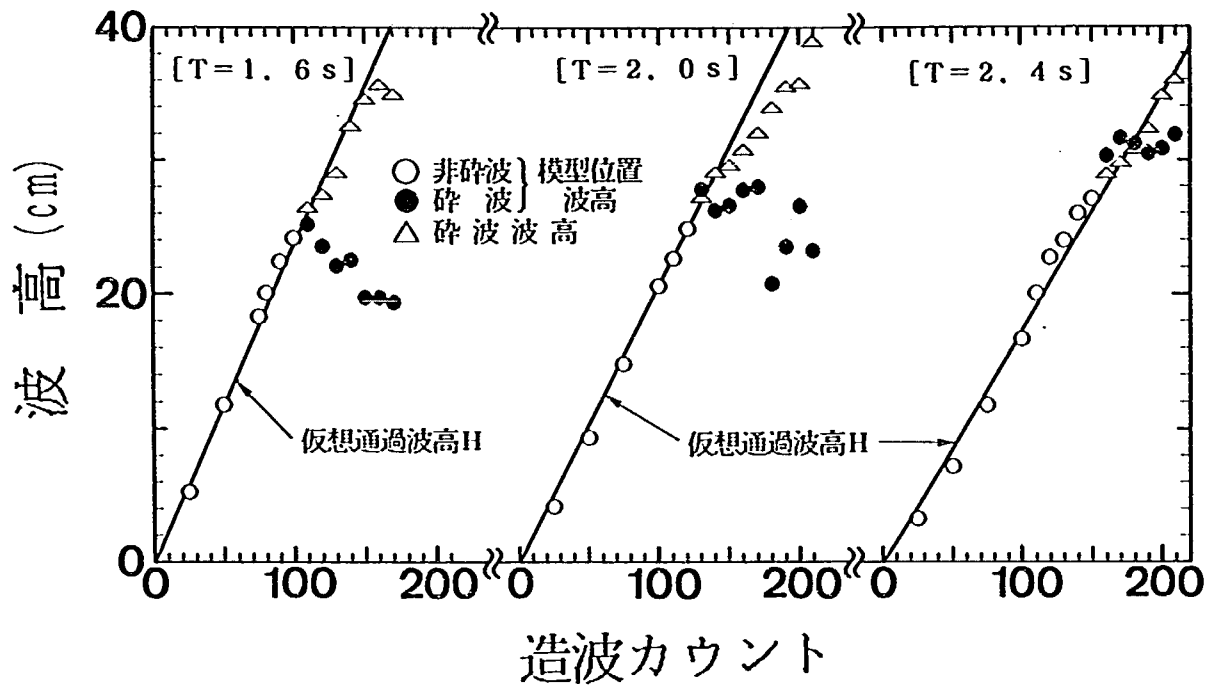


図-3 波浪検定結果

表-2 波浪条件

| 波浪<br>No | 沖波波高<br>$H_0$ (cm) | 仮想通過波高<br>$H$ (cm) | 周 期<br>$T$ (sec) | 備 考       |
|----------|--------------------|--------------------|------------------|-----------|
| 1        | 12.8               | 15.0               | 1.6              | 重複波<br>領域 |
| 2        | 11.5               | 15.0               | 2.0              |           |
| 3        | 10.8               | 15.0               | 2.4              |           |
| 4        | 17.2               | 20.0               | 1.6              |           |
| 5        | 15.0               | 20.0               | 2.0              |           |
| 6        | 13.3               | 20.0               | 2.4              |           |
| 7        | 28.8               | 30.0               | 1.6              | 砕波<br>領域  |
| 8        | 27.4               | 30.0               | 2.0              |           |
| 9        | 25.2               | 30.0               | 2.4              |           |

ぞれ静水面上の高さ10, 0, -10, -27 cmの位置に波圧計 ( $p_1 \sim p_4$ ,  $p_1' \sim p_4'$ ) を貼り付け (図-2 参照), 模型の岸側および沖側に作用する波圧を測定した。波力, 波圧データのサンプリング間隔は 2 ms である。全水平波力  $F_x$  および波圧のデータ処理に当っては, 電気的なノイズを除去するため 50 Hz 以上の高周波変動を除去した。また, 砕波領域では, 衝撃的な波力が作用すると模型の固有振動数付近の周波数成分が大きくなるため (図-4 参照), 模型の共振成分の 90% 以上を除去できるようにカットオフ周波数を 20 Hz に設定した。衝撃的な波力が作用した場合の全水平波力  $F_x$  について, 生データと処理後データの時間波形の

一例を図-5に示す。20Hzのカットオフ周波数により共振成分が除去されたことが明らかである。

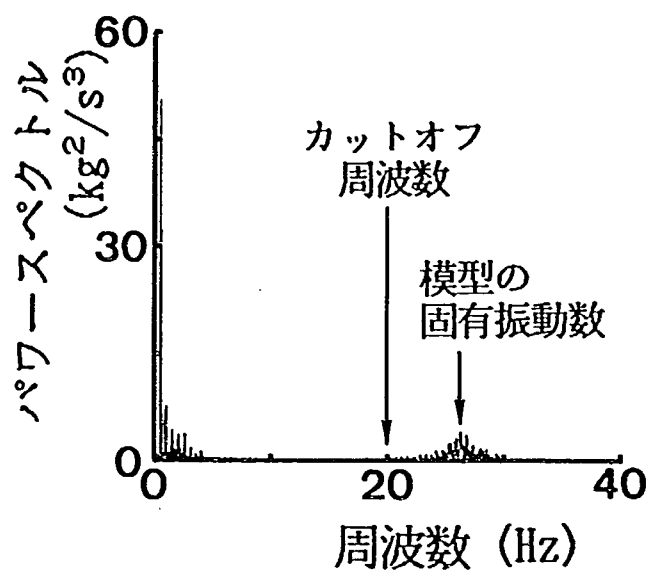


図-4 模型の固有振動数とカットオフ周波数の関係

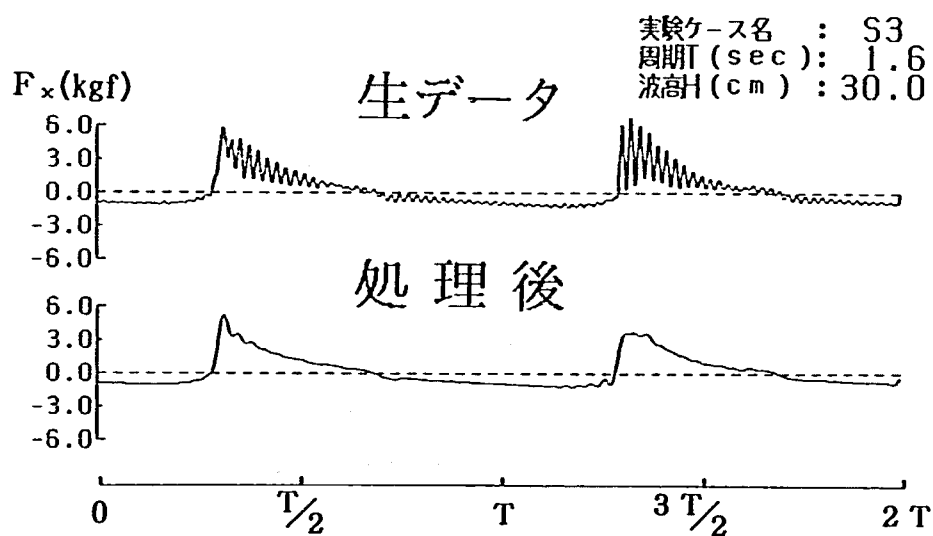


図-5 波力(生データ, フィルター処理後データ)の時間波形

### 3. 消波および波力に関する実験結果

#### 3.1 波力の測定精度

波力データを解析する場合、波力および波圧データの測定精度の検討が必要である。そこで、 $F_x$ がピークとなる位相について各点の波圧（ $p_1 \sim p_4$ 、 $p_1' \sim p_4'$ 、図-2参照）を積分して得られる全波力と3分力計から得られる全水平波力 $F_x$ とを比較した（図-6）。ただし、波圧を積分する際には、岸側・沖側各4点の波圧測定値より差圧 $\Delta p$ を求め、 $\Delta p$ を直線で結んだ分布形を仮定した（図-7参照）。非碎波のケースでは波圧積分値と全水平波力とは非常に良い一致を示しており、両者のデータの信頼性は高い。一方、碎波のケースではデータが多少ばらついてはいるが、両者の適合性は高く、碎波の場合でもデータの精度に問題はないと考えられる。ばらつきの原因は、 $\Delta p_1 > \Delta p_2$ の場合、 $z = 10\text{cm}$ より上の波圧を図-7に示す分布形に仮定したものの、それが実験値とずれを生じたためと考えられる。

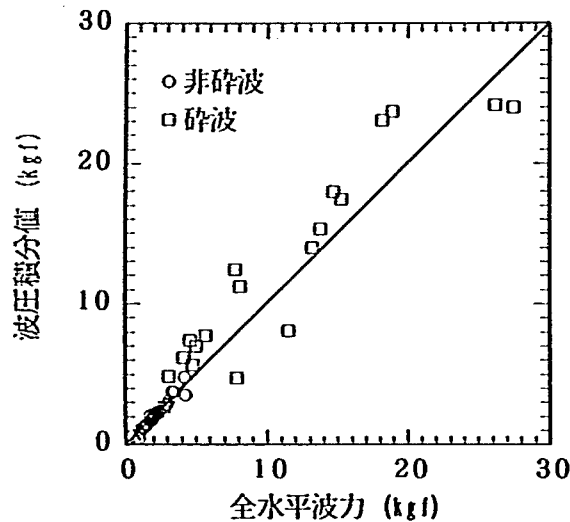


図-6 波圧積分値と全波力測定値との比較

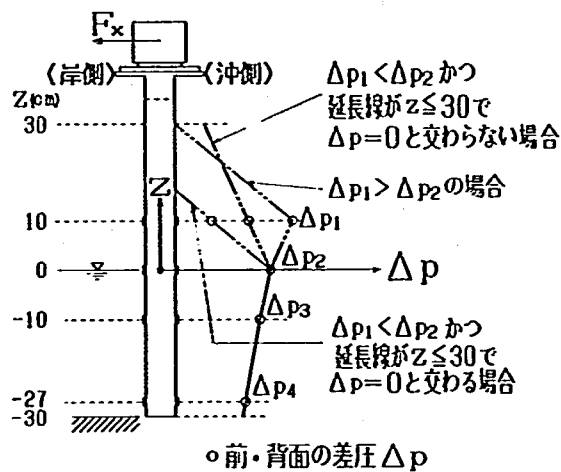


図-7 仮定した波圧分布

### 3.2 スリットの空隙率と消波・波力特性の関係

#### (1) 角柱列 ( $D/d = 1$ ) の場合

部材幅  $D$  と厚さ  $d$  の比が  $D/d = 1$  の角柱列について、周期  $T = 1.6$  s の場合における空隙率  $\epsilon$  と透過率  $K_t$ 、反射率  $K_r$  の関係を図-8, 9 に示す。重複波領域に属する  $h/H \geq 1.5$  の条件下では、 $\epsilon$  が大きくなると  $K_t$  は増加し、逆に  $K_r$  は減少する。特に  $\epsilon < 0.3$  の範囲ではそれらの変化が著しい。また、 $h/H = 1.5$  の  $K_t$  は  $h/H = 2.0$  のそれよりも小さく、 $\epsilon$  が大きいと両者の差は拡大する (図-8 参照)。これに対し、 $K_r$  はどちらの場合も減少傾向を示すが、 $\epsilon$  が増加したとき  $h/H = 1.5$  の場合の方が  $h/H = 2.0$  のそれよりもわずかに大きくなる。また、同様な結果は服部 (1971)、樺木・岩田 (1973) らの実験でも得られている。以上のことから、重複波領域では、 $\epsilon$  が小さい範囲 ( $\epsilon < 0.3$ ) での消波効果は  $\epsilon$  に支配され、 $\epsilon$  が大きい範囲 ( $\epsilon \geq 0.3$ ) では消波効果に及ぼす  $\epsilon$  の影響が弱まり波高の影響が強くなることが分かる。

一方、碎波領域に属する  $h/H = 1$  の条件下での  $K_t$  は、 $0.3 \sim 0.4$  とほぼ一定である (図-8 参照)。 $\epsilon \geq 0.3$  における重複波領域と碎波領域の  $K_t$  の差は著しく、スリットによるエネルギー損失のみにより、これだけの差が生ずるとは考えにくい。したがって、図-8 の結果は碎波に伴うエネルギー損失がかなり大きいことを意味する。また、 $K_r$  も碎波によるエネルギー損失により全体的に重複波領域に属する他の2種類のデータに比べ小さい (図-9)。

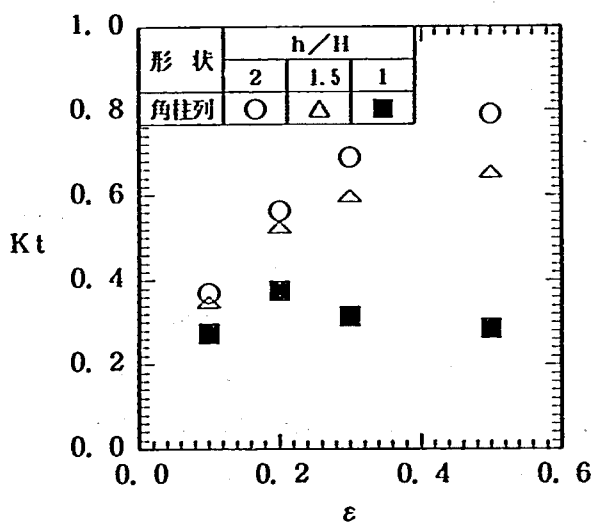


図-8  $K_t$  と  $\epsilon$  の関係  
(角柱列,  $D/d = 1$ ,  $T = 1.6$  s)

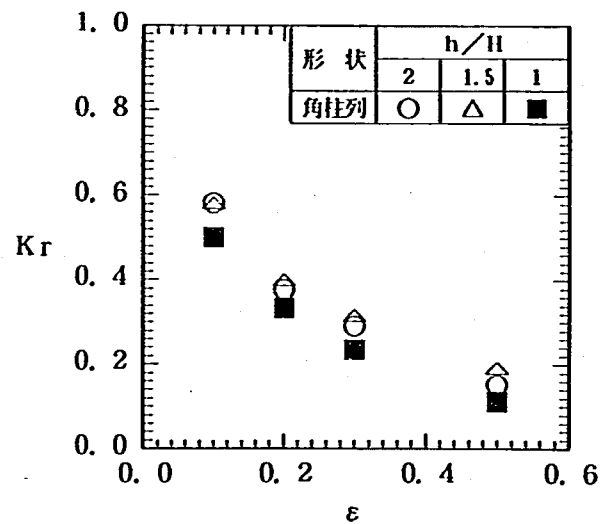


図-9  $K_r$  と  $\epsilon$  の関係  
(角柱列,  $D/d = 1$ ,  $T = 1.6$  s)

次に、作用波力と空隙率の関係として  $f_x$  と  $\epsilon$  の関係を図-10 に示す。ここに、 $f_x$  は単位幅当りの波力である。 $f_x$  は  $\epsilon$  の増加とともに減少し、その変化率は  $\epsilon$  が小さい所ほど大きい。特に、碎波領域に属する  $h/H = 1$  の条件下では、 $\epsilon < 0.3$  において  $f_x$  は急激に増大している。この原因は、 $\epsilon$  の減少に伴う  $K_r$  の増大により、

模型沖側の碎波波高が高くなるとともに、碎波位置が変化して波面と壁面のなす角度が碎波力を増すように変わったことによると考えられる。

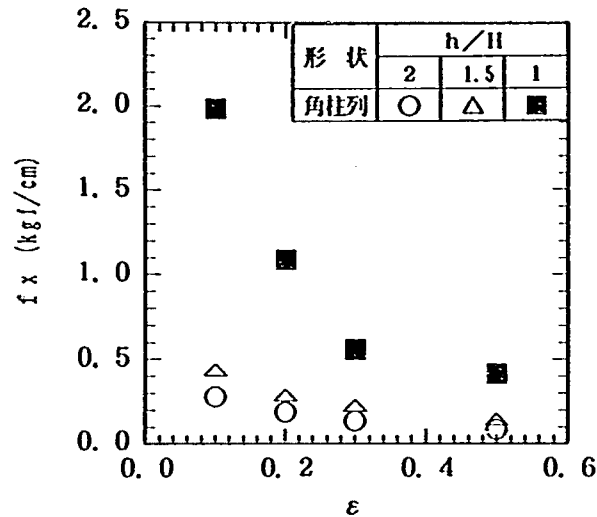


図-10  $f_x$ と $\epsilon$ の関係(角柱列,  $D/d = 1$ ,  $T = 1.6$  s)

以上の実験結果によれば、スリット型構造物の機能設計において、所定の $K_t$ ,  $K_r$ を満足する $\epsilon$ を選択する場合、重複波領域では $\epsilon$ による波力の変化はあまり大きくないので特に問題が生ずることはない。一方、碎波領域では $\epsilon$ による $K_t$ の変化が小さいにもかかわらず、 $K_r$ と波力は $\epsilon < 0.3$ で急激に増大することから、 $\epsilon$ は0.3以上とする必要がある。この点が角柱列から成るスリット型構造物の $\epsilon$ を選択する場合の設計上の留意点である。

次に、周期および波高による消波・波力特性の変化について、波形勾配 $H/L$ と $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$ の関係を調べた(図-11~14)。ここに、 $L$ は模型位置での波長である。ただし、 $T = 2.4$  sの波浪条件では反射率の低いケースで入射分離計算の精度が低かったため、これらのケースのデータは除外した。まず、重複波領域に属する $h/H \geq 1.5$ の条件下においては、 $\epsilon$ が0.3より小さい場合、 $K_t$ は $H/L$ に係わらずほぼ一定であるのに対し、 $\epsilon \geq 0.3$ では $H/L$ の増加に伴い $K_t$ は減少する傾向を示す(図-11)。井田・久保(1975)、土木研究所(1987)では、 $H/L$ が増加すると $K_t$ が減少するとしているが、図-11によると $\epsilon$ が0.3より小さい場合、 $K_t$ に及ぼす $H/L$ の影響は小さいと言える。さらに、 $H/L$ が増加したとき $K_r$ は増加傾向を示すものの、その変化は緩やかであり(図-12)、また $f_x$ は $H/L$ によりほとんど変化しない(図-13)。以上の点より、 $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$ に及ぼす $H/L$ の影響は、 $\epsilon$ によるそれと比較してはるかに小さいと言える。したがって、 $h/H \geq 1.5$ の条件下では、 $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$ の波形勾配または周期への依存度は低く、図-8~10に示した $T = 1.6$  sの場合の実験結果は、周期が異なってもほぼ同様に成立すると思われる。事実、周期が異なる実験データを整理したところ、同様な結果が得られた。ただし、ここでは結果の図示は省略した。

一方、碎波領域に属する $h/H = 1$ の条件下では、 $H/L$ が小さくなると $f_x$ が急激に増大する(図-14)。これは、周期が長くなると、模型近くで碎波が起こり、波面と壁面の成す角度が小さくなることに起因する。このような波力の変化傾向は全ての模型タイプに共通して見られた。

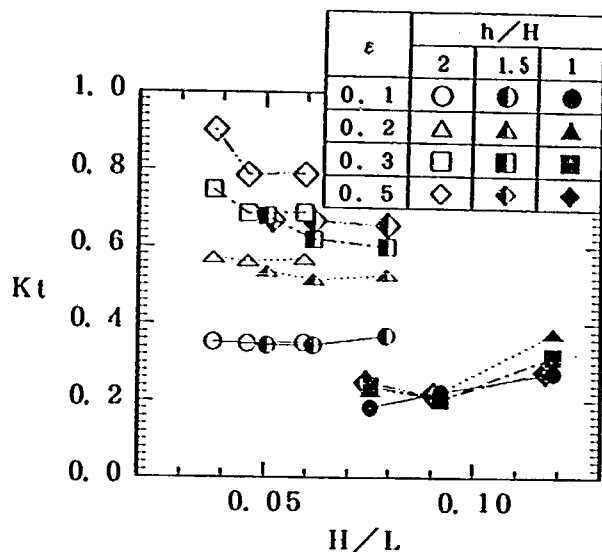


図-11  $K_t$ と $H/L$ の関係  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

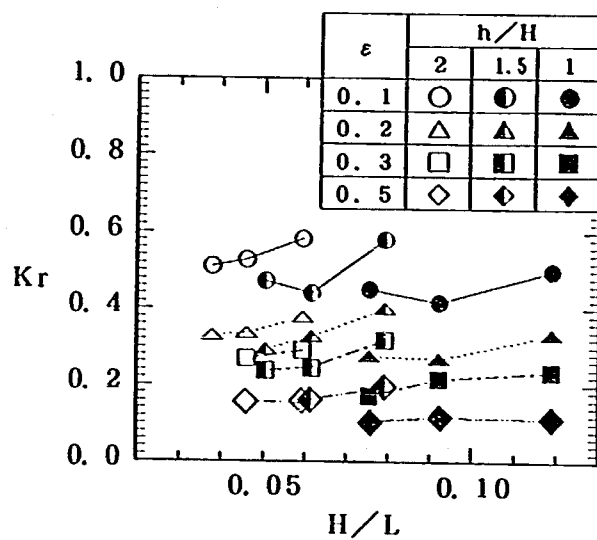


図-12  $K_r$ と $H/L$ の関係  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

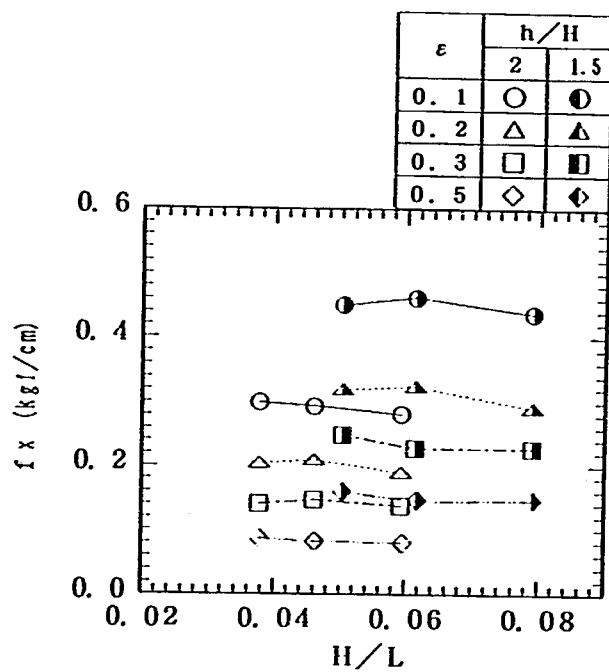


図-13  $f_x$ と $H/L$ の関係  
(角柱列,  $D/d = 1$ , 重複波領域)

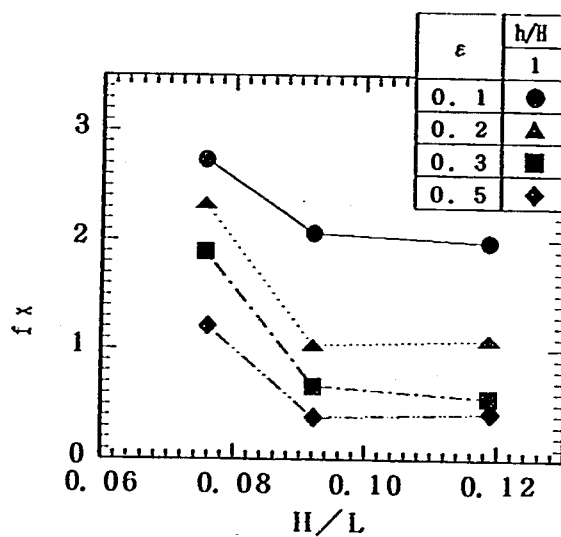


図-14  $f_x$ と $H/L$ の関係  
(角柱列,  $D/d = 1$ , 碎波領域)

## (2) 円柱列の場合

直径が一定 ( $D/h = 0.2$ ) の円柱列に関し、 $\varepsilon$  と  $K_t$ ,  $K_r$  および  $f_x$  の関係を図-15, 16に示す。これらの場合も周期は  $T = 1.6$  s に固定している。重複波領域に属する  $h/H = 2$  の条件下では  $\varepsilon$  が大きいほど  $K_t$  も大きく、逆に  $K_r$  は小さい。一方、碎波領域に属する  $h/H = 1$  の条件下では、 $K_t$  は  $\varepsilon$  にほぼ独立であるのに対し、 $K_r$  は  $\varepsilon$  の増加に伴って減少傾向を示す。また、 $\varepsilon$  が小さいと  $f_x$  は大きい。以上の傾向は、角柱列の場合と同様であり、 $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$  の  $\varepsilon$  への依存傾向は、部材の断面形状に係わらず同様であることが確認された。

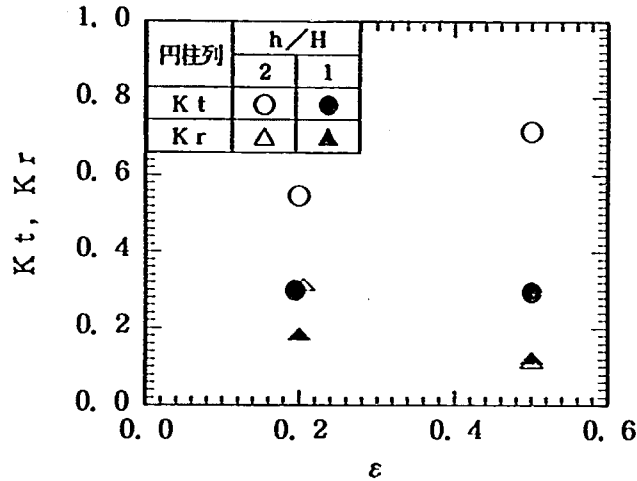


図-15  $K_t$ ,  $K_r$  と  $\varepsilon$  の関係  
(円柱列,  $D/h = 0.2$ ,  $T = 1.6$  s)

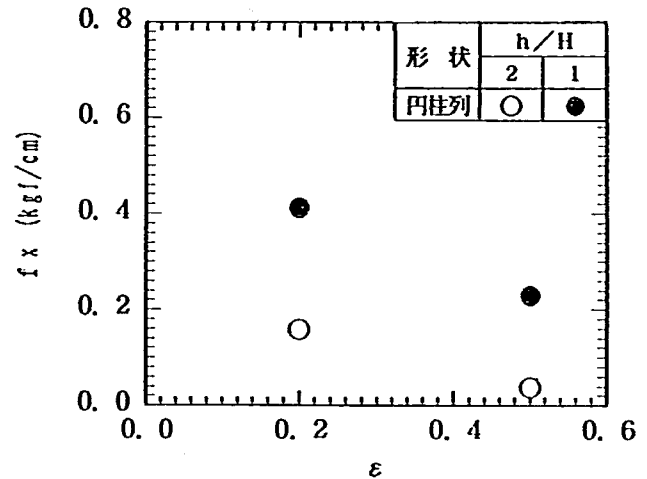


図-16  $f_x$  と  $\varepsilon$  の関係  
(円柱列,  $D/h = 0.2$ ,  $T = 1.6$  s)

## 3.3 部材形状と消波・波力特性の関係

### (1) 角柱列, 円柱列, 横スリットの相互比較

$\varepsilon = 0.2$  のケースについて、3種の部材形状ごとの  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$  と  $H/L$  の関係を図-17~19に示す。重複波領域に属する  $h/H \geq 1.5$  の条件下では、角柱列の  $K_t$  (△, ▲印) と円柱列の  $K_t$  (○印) はほぼ同じ値をとる (図-17)。また、碎波領域に属する  $h/H = 1$  の条件下では、 $H/L$  の小さい場合角柱列 (▲印) の  $K_t$  は円柱列 (●印) よりも小さく、 $H/L$  が大きいと逆の傾向になる。これは、碎波位置の変動に起因すると考えられるが、 $K_t$  の値は 0.3 前後と小さく、有意な差とは言えない。一方、 $K_r$  はどのケースでも円柱列の方が角柱列に比べ小さい (図-18)。また、 $f_x$  は  $h/H \geq 1.5$  の条件下で両者に差はなく、 $h/H = 1$  の条件下では円柱列の方が小さい (図-19)。したがって、角柱列に比べ円柱列は重複波領域に属する  $h/H \geq 1.5$  の条件下では波力が同じでありながら  $K_r$  は小さい。また  $K_t$  はほぼ同程度の値を持っている。これらのことから、円柱列の方が角柱列よりも消波効果が高いと言える。さらに、円柱列は碎波領域に属する  $h/H = 1$  ではほぼ同程度の消波効果を持ちながら、角柱列に比べ作用波力が小さい。以上のことは、円柱列の空隙形状が、角柱列のそれよりも流体混合を促進し、エネルギーを効率的に逸散させることを示唆する。

再び図-17~19を参照して横スリットの場合の特性を調べると、重複波領域に属する  $h/H \geq 1.5$  の条件下では (図中の□, ■印), 角柱列 (△, ▲印) に比べ  $K_t$  がかなり小さく (図-17),  $K_r$  はやや大きい (図

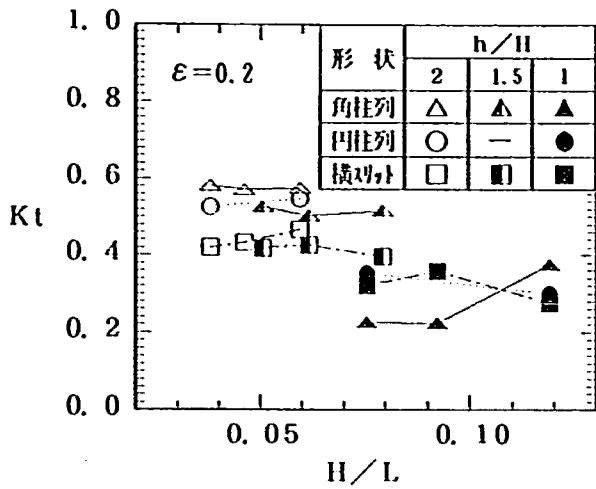


図-17  $K_t$ と $H/L$ の関係

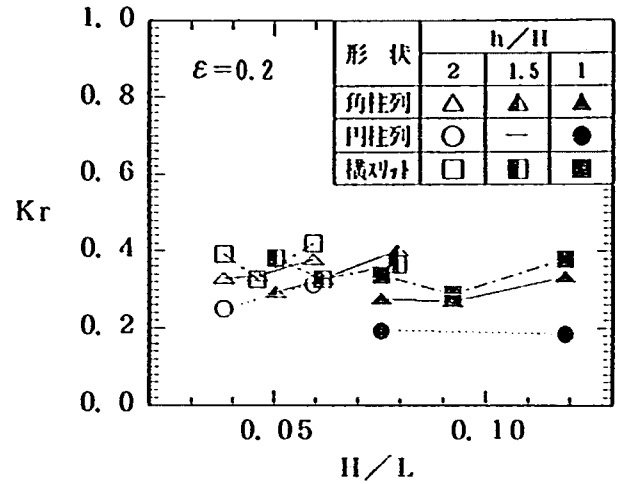


図-18  $K_r$ と $H/L$ の関係

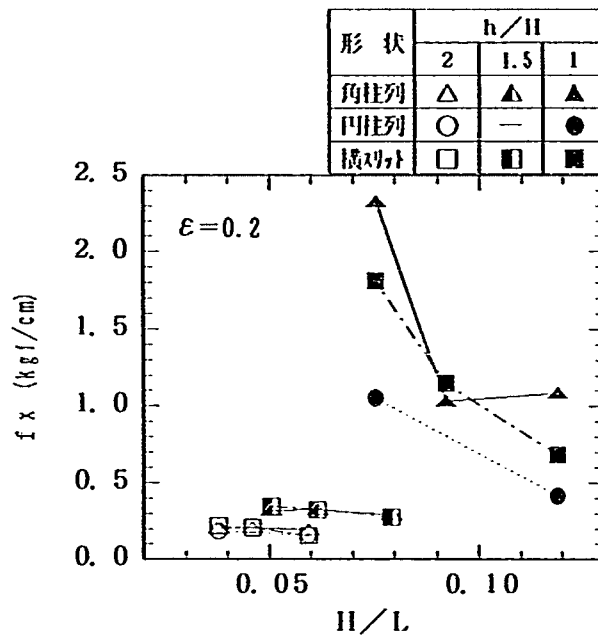


図-19  $f_x$ と $H/L$ の関係

—18)。また、 $f_x$ はほとんど変わらない(図-19)。横スリットでは、水平方向に軸を持つ剥離渦が複数個同時にしかも水面近くほど強い渦度で発生するため、隣合う渦の運動は異なる。一方、角柱列では、部材を挟んで対称の剥離渦が生じる。したがって、横スリットでは渦運動による混合が激しく、角柱列より大きなエネルギー損失が生じたと考えられる。すなわち、重複波が作用する場合スリット構造として横スリットの方が角柱列より優れていることを示す。一方、砕波領域に属する $h/H=1$ の条件下では元々の砕波に伴う混合現象が卓越するために、両者の $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ に顕著な差は見られず、スリット構造による差は明瞭でなくなる。

## (2) スリットの部材幅と消波・波力特性の関係

角柱列の部材厚 $d$ を一定として部材幅 $D$ を変化させた場合について、 $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ と $H/L$ の関係を図-20

～22に示す。重複波領域に属する $h/H \geq 1.5$ の条件下では、 $D/d$ が大きいと $K_t$ は小さく、 $K_r$ は大きくなる。また、 $f_x$ にはほとんど差がない。一方、碎波領域に属する $h/H = 1$ の条件下では、 $D/d$ が増加しても $K_t$ 、 $K_r$ は明瞭な変化傾向を示さず、また $f_x$ にも差はほとんど見られない。したがって、 $D/d = 1 \sim 3$ の範囲内では角柱列の $D/d$ を変えることにより作用波力の増大を招くことなく、消波効果を調整できることが分かる。

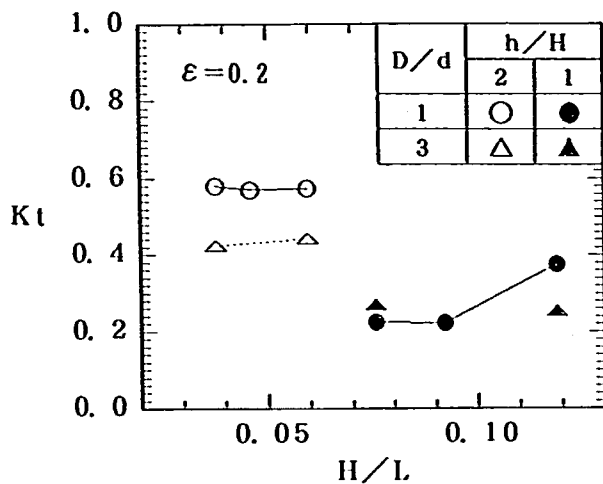


図-20  $K_t$ と $H/L$ の関係（角柱列）

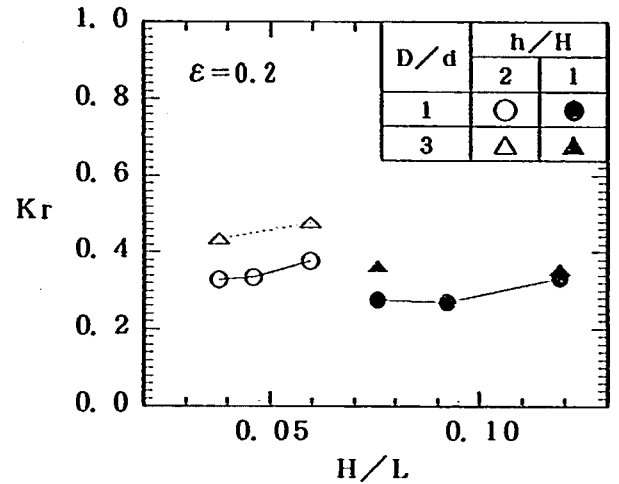


図-21  $K_r$ と $H/L$ の関係（角柱列）

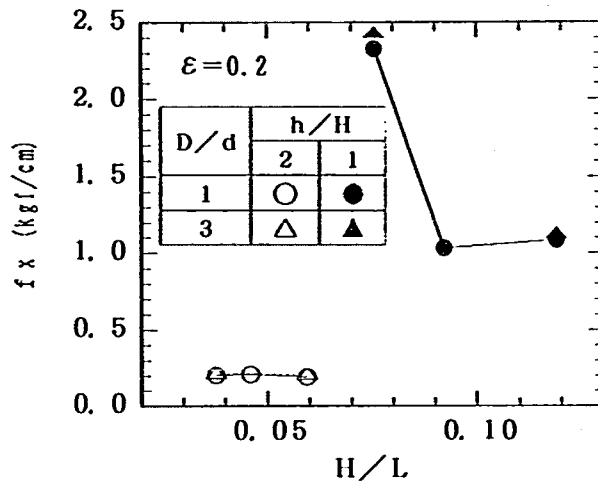


図-22  $f_x$ と $H/L$ の関係（角柱列）

次に、横スリットに関し、角柱列と同様 $D/d$ をパラメータとして、 $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ の変化を調べた（図-23～25）。重複波領域に属する $h/H = 2$ の条件下においては、 $D/d$ が大きいと $K_t$ は小さくなるが、 $K_r$ は逆である。また、 $f_x$ に差はない。さらに、碎波領域に属する $h/H = 1$ の条件下では、 $D/d$ が大きいとわずかに $K_t$ 、 $K_r$ が小さく（図-23、24）、 $f_x$ が大きい（図-25）のみである。したがって、 $D/d$ による $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ の変化傾向は角柱列の場合と同様である。すなわち、部材の配置方向に係わらず、実験条件の範囲内では $\epsilon$

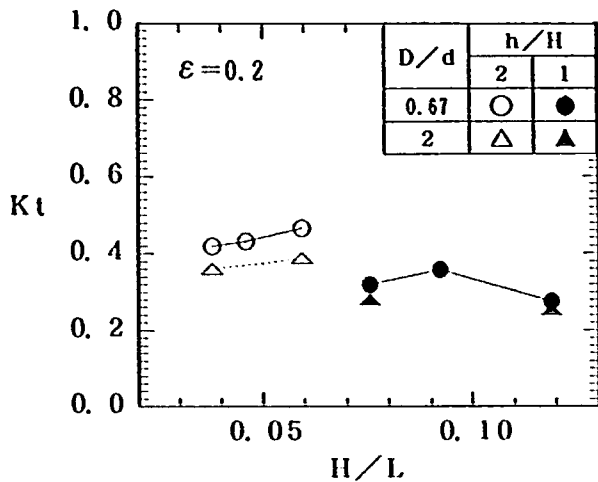


図-23 KtとH/Lの関係(横スリット)

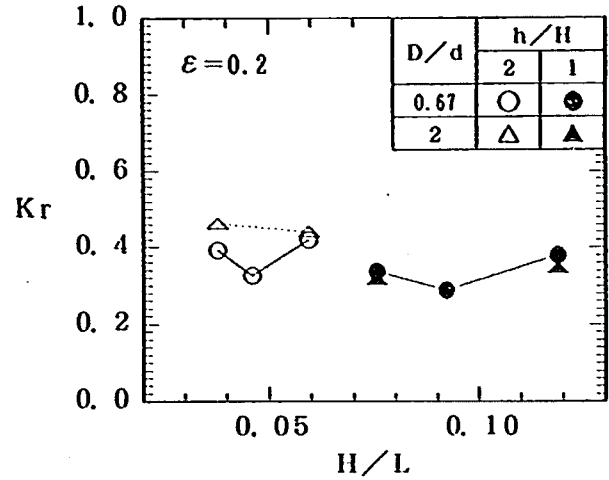


図-24 KrとH/Lの関係(横スリット)

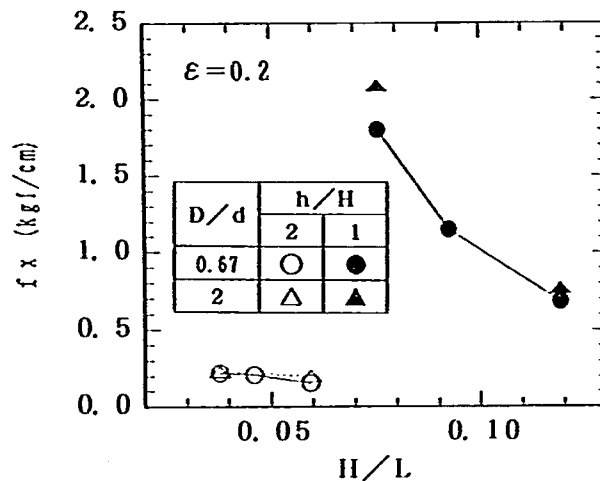


図-25 fxとH/Lの関係(横スリット)

を一定としてD/dを変えることで、作用波力を変化させることなく消波効果を調整できることが分かる。

円柱の径Dの変化が消波・波力特性に及ぼす影響を知るために、円柱列のKt, Kr, fxとH/Lの関係を図-26~28に示す。KtおよびfxにはD/hによる差はほとんどないが、KrはD/hが大きいと大きくなる。一般に、構造物によるエネルギー損失率 $K_L^2$ は次式で評価される。

$$K_L^2 = 1 - K_t^2 - K_r^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

上述の実験データではD/hを大きくしたとき、Ktが同じでKrが大きくなる。したがって、式(1)の関係によれば、D/hが大きい時に模型でのエネルギー損失が小さくなり、消波効果が悪くなる。また、角野(1987)の実験結果よりD/hが0.1と0.3のケースを比べると、Ktはあまり変化せず、KrはD/h=0.1の方が小さい。これらの点から、円柱列の場合、D/h $\geq$ 0.1の範囲ではD/hの小さい方が消波効果が高いことが分かる。

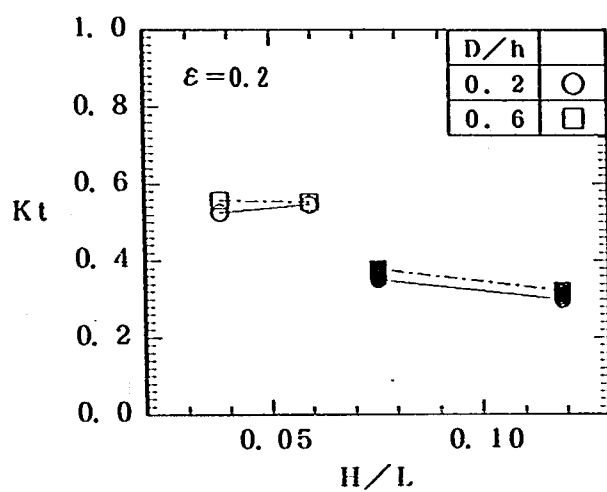


図-26  $K_t$ と $H/L$ の関係(円柱列)

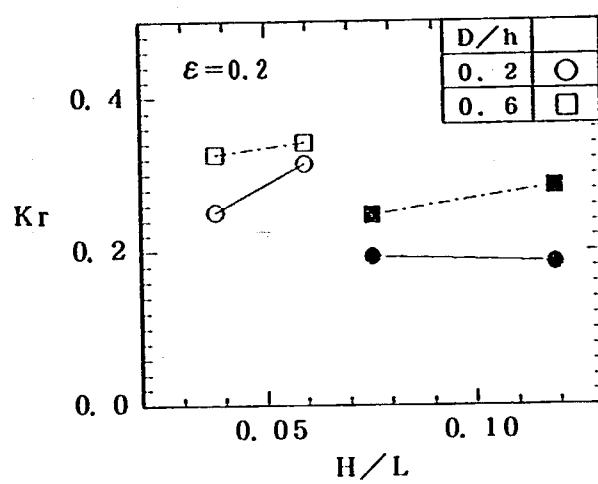


図-27  $K_r$ と $H/L$ の関係(円柱列)

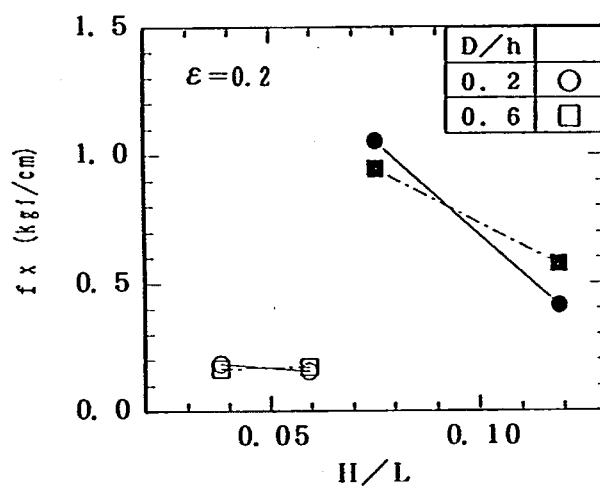


図-28  $f_x$ と $H/L$ の関係(円柱列)

## 4. スリット型構造物へ作用する波力の算定モデル

### 4.1 モデルの概要

透過性消波構造物の消波・波力特性に関する従来の計算モデルは大きく4つに分けられる。これらは、構造物の沖側・岸側の速度ポテンシャルをエネルギー方程式により接続する方法（堀口ら、1977）、速度ポテンシャルの重ね合わせにより構造物周辺の波動場を解析的に解く方法（角野・小田、1985）、波力をモリソン式の形式で抗力と慣性力に分離し算定する方法（近藤・佐藤、1979）、連続式、運動量方程式、エネルギー方程式を連立させて解く方法（林ら、1966）である。本研究では空隙を通過する流れの、部材形状および空隙率の違いによる変化を水理学的にモデル化する手法が必要とされる。そこで、空隙を通過する流れの変化を評価し易い、林らの方法を用いることにした。この方法には以下に示すいくつかの仮定を含むが、空隙を通過する流れや部材形状の変化をモデルに取り込み易い利点がある。ここでは、重複波領域のみを対象としてモデル化を行った。本モデルの基本構成については、服部（1971）に詳しいので、ここではモデルの概略と服部の方法との相違点を示す。

透過および反射側に微小振幅波理論を適用すると、入射・反射・透過波の速度ポテンシャル  $\phi_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_t$  は次式により与えられる（図-29参照）。以下、添字  $i$ ,  $r$ ,  $t$  は、入射波、反射波、透過波に関する諸量を示す。

$$\phi_i = \frac{a_i g}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\sigma t - kx) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_r = \frac{a_r g}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\sigma t + kx) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi_t = \frac{a_t g}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\sigma t - kx) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $a$ ：波の振幅、 $g$ ：重力加速度、 $k = 2\pi/L$ ,  $\sigma = 2\pi/T$ ,  $L$ ：波長、 $T$ ：周期、 $t$ ：時間、 $x$ ：構造物からの沖向き距離、 $h$ ：水深、 $z$ ：静水面からの鉛直距離である。まず、速度ポテンシャル  $\phi$  を微分することにより流速の水平方向成分  $u$  を求め、次式により鉛直方向に平均し、水深方向の平均流速  $U$  を求める。

$$U = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 u \, dz \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、図-29に示すように、空隙を通過する噴流の流速  $V$  を導入して流量に関する連続式を立てると次式となる。

$$U_i + U_r = U_t = C_c A_p / (A_s + A_p) \cdot V \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $A_s$ ,  $A_p$ ：スリット壁を鉛直断面に投影した時の空隙または部材の占める面積、 $C_c$ ：縮脈係数である。服部は時間的に変化する諸量については半周期の時間平均値を用いたが、ここでは特にピーク波力を重視し、林ら（1966）、榎木・岩田（1973）と同様にピーク位相の諸量を用いてモデル化を行う。そこで、式（6）の  $V$ ,  $U_i$ ,  $U_r$ ,  $U_t$  には全てピーク時の値を用いる。したがって、式（6）では入射波と透過波

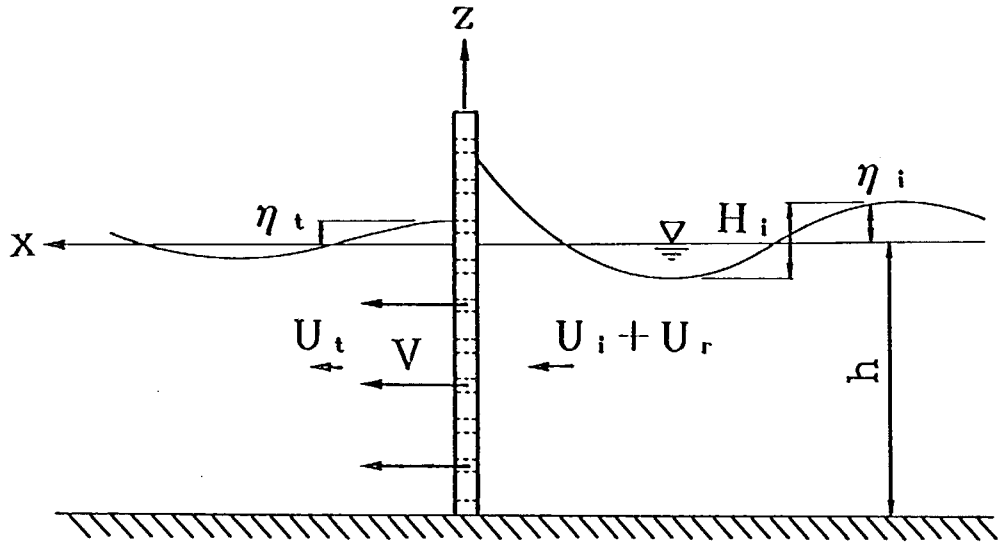


図-29 計算に用いた記号の定義

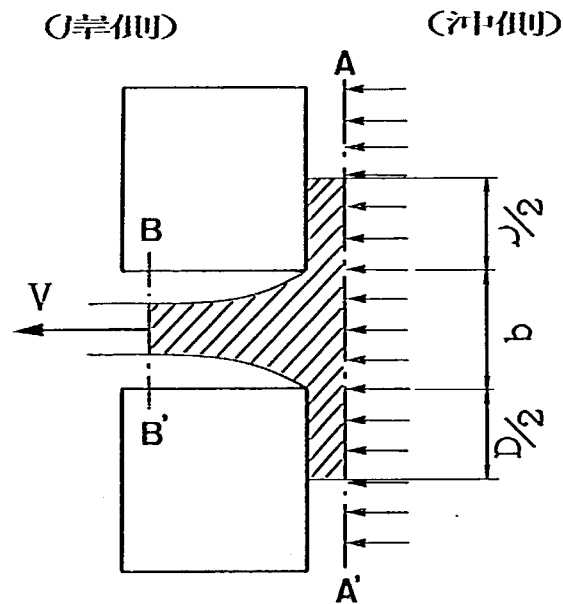


図-30 支配断面の模式図

に位相差がないと仮定したことになる。次に、空隙を通過する流れをモデル化するため、流れの剥離を考慮して図-30に示す支配断面を定め、A-A'断面とB-B'断面の間でベルヌーイ式を適用する。ここに、構造物の厚さは波長に比べ十分に小さいので、無視できるものとする。また、A-A'断面は構造物のごく近傍なので、流速、水位、速度ポテンシャルには、 $x = 0$ の入射側で評価された諸量を用いる。

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{p_{BB'}}{\rho g} = \frac{\alpha}{2g} (U_i + U_r)^2 + \eta_i + \eta_r - \frac{\beta}{g} \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{\partial \phi_r}{\partial t} \right) + \zeta_1 \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 $\rho$ ：水の密度、 $\alpha$ ：エネルギー補正係数、 $\beta$ ： $\partial \phi / \partial t$ の鉛直平均に係わる補正係数(服部, 1971)、 $\eta$ ：静水面からの水位、 $p$ ：圧力、 $\zeta_1$ ：A-A'断面とB-B'断面間でのエネルギー損失水頭である。圧力

$p_{BB'}$ については、服部(1971)の方法に準じ、B-B'断面と透過側の断面の間で次の運動量方程式を適用して求めた。

$$\rho C_c \epsilon V^2 - \rho U_i^2 = p_{BB'} - \rho g \eta_i \left\{ 1 + \beta \frac{\tanh kh}{kh} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって、式(8)に式(6)を代入すると、

$$p_{BB'} = \rho g \eta_i \left\{ 1 + \beta \frac{\tanh kh}{kh} \right\} + \rho U_i^2 \left( \frac{1}{C_c \epsilon} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに、 $\epsilon$  : 空隙率 ( $A_p / (A_s + A_p)$ ) である。

$K_t = H_t / H_i$ ,  $K_r = H_r / H_i$  ( $H$  : 波高) と定義し、式(7)に式(9)を代入すると、噴流の流速  $V$  は次式で与えられる。

$$V = C_v \cdot \frac{\sqrt{g K_r H_i \{ 1 + (\beta \tanh kh / kh) \}}}{\sqrt{1 + 2(C_c \epsilon - C_c^2 \epsilon^2) - \alpha C_c^2 \epsilon^2}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、エネルギー損失を表わす  $\alpha$  は流速係数  $C_v$  の形に書き換えた。

$K_r$  は連続式(6)より

$$K_r = 1 - K_t \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。 $K_t$  は式(6)と式(10)を連立させて解くと

$$K_t = \frac{4h}{\theta H_i} \left( \beta + \frac{kh}{\tanh kh} \right) \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{\theta H_i}{2h(kh/\tanh kh + \beta)}} \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

$$\theta = \frac{1}{C_v^2} \left[ \frac{1}{C_c^2 \epsilon^2} - \alpha + 2 \left( \frac{1}{C_c \epsilon} - 1 \right) \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。

$V$  と同じ支配断面内 ( $A-A'$  断面と  $B-B'$  断面 ; 図-30 参照) で運動量方程式を適用すると、作用波力  $F_x$  は

$$F_x = \int_{AA'} p dA - \int_{BB'} p dA - \rho \left\{ \int_{BB'} V^2 dA - \int_{AA'} (U_i + U_r)^2 dA \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。ここに、 $A$  は断面積を表わす変数である。

式(14)を解くと単位幅当りの水平方向波力  $f_x$  は次式となる。

$$f_x = \frac{F_x}{D+b} = \frac{C_c^2 \theta - \epsilon C_c (1 - \epsilon C_c)}{C_c^2 \theta} \rho g (1 - K_t) \frac{H_i^2}{2} \left[ \frac{2h}{H_i} + 1 \right] \left[ 1 + \frac{\tanh kh}{kh} \beta \right] \quad (15)$$

## 4.2 空隙を通過する流れの取扱い

式(6), (10)中の縮脈係数  $C_c$ , 流速係数  $C_v$  は空隙を通過する流れの特性を表わす係数である。 $C_c$  は流れの剥離に伴う流下断面の減少を、 $C_v$  は空隙での混合現象による流速の低下を表わす。 $C_c$ ,  $C_v$  の物

理的意味は以上のとおりであるが、これらは本来、互いに独立なものではない。従来の研究（林ら，1966；服部，1971；榎木・岩田，1973）では、 $C_c$ 、 $C_v$ を流量係数という一つの係数で代表させて実験結果からその値を求めている。しかし、部材形状や空隙率の影響を定式化するためには、物理現象をなるべく直接的に反映する係数を用いる必要がある。そこで、本研究では $C_c$ と $C_v$ をそのまま用いる。 $C_v$ は小型オリフィスの場合、一般に0.95～0.99の範囲にあるが、本実験ではより大きなエネルギー損失が生じることから、実験範囲の $\varepsilon \geq 0.1$ で $C_v = 0.9$ とおく。また、空隙率が小さい場合には、空隙を通過する流速が極端に減少し、 $\varepsilon \rightarrow 0$ では $V \rightarrow 0$ となると考えられる。そこで、 $\varepsilon \leq 0.1$ では $C_v$ が直線的に減少すると仮定し、 $C_v$ を $\varepsilon$ の関数とする（図-31）。以上の $C_v$ を用いて角柱列（ $D/d = 1$ ）の全実験ケースについて $K_t$ の実験値と計算値が最も良く一致するよう式（9）より $C_c$ を逆算した（図-31）。この結果、 $C_c$ は $\varepsilon$ とともに減少する傾向を示した。この傾向は榎木・岩田（1973）の実験結果と一致する。

次に、 $C_c$ に及ぼす波浪条件の影響を調べるために、角柱列、横スリット、円柱列について $K_t$ の実験値より $C_c$ を逆算し、 $H/L$ との関係として図-32に示す。図中の一点鎖線は図-31から求めた角柱列の $C_c$ の値（ $\varepsilon = 0.2$ ）である。 $C_c$ は波浪条件にあまり影響を受けず、部材形状ごとにほぼ一定となる。すなわち、 $C_c$ は空隙での混合現象が、 $\varepsilon$ や部材形状により異なることを表現可能な係数であると考えられる。したがって、ここで $C_c$ は $\varepsilon$ のみの関数とし、部材形状ごとに設定することにする。服部（1971）、榎木・岩田（1973）によると、流量係数は空隙率、部材形状のほかに、レイノルズ数にも影響される。しかし、レイノルズ数の大小を決める空隙の流速 $V$ 自体も空隙率や部材形状に支配されるので、本実験の範囲では部材形状ごとに $\varepsilon$ のみの関数として $C_c$ 、 $C_v$ を設定することは可能と考えられる。

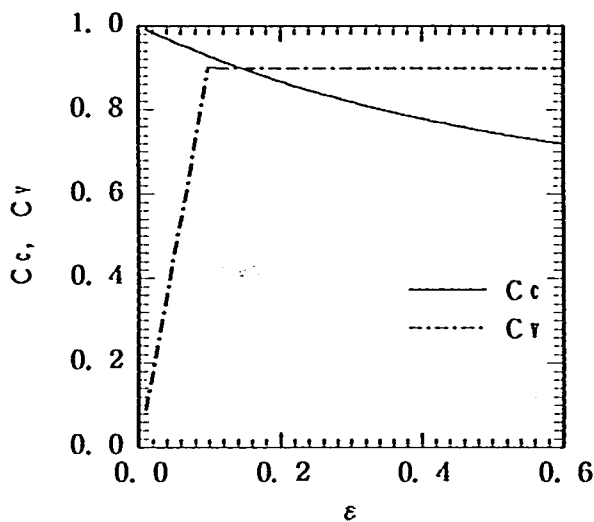


図-31  $C_c$ 、 $C_v$ と $\varepsilon$ の関係（角柱列）

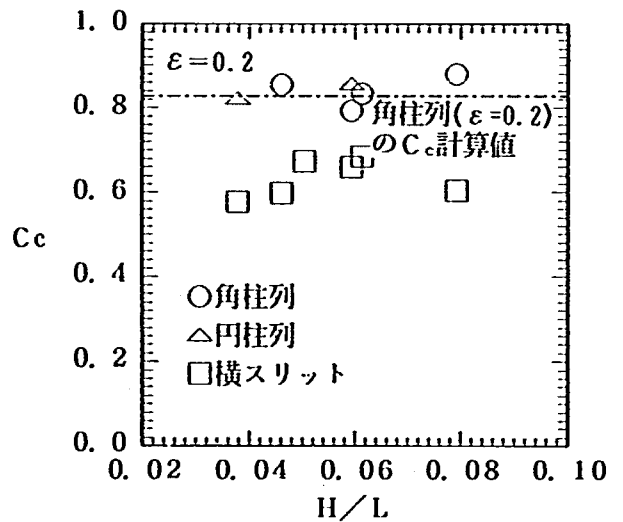


図-32  $H/L$ と縮脈係数 $C_c$ の関係

部材形状および空隙率の違いによる $C_c$ の差を調べるため、 $C_c$ の逆算結果をまとめて表-3に示す。表によると、同一の $d$ と $D/d$ に対し、角柱列と円柱列の $C_c$ はほぼ同じ値をとっている。また、横スリットの $C_c$ は角柱列のそれより小さい。さらに、同じ部材形状では角柱列と横スリットの場合に見られるように、 $D/d$ を大きくすると $C_c$ は減少する。本研究では、各模型の $C_v$ を同一と仮定して $C_c$ を $K_t$ から逆算して求め

ているため、部材形状の差違が $C_c$ の違いとして表われている。

表-3 縮脈係数 $C_c$ の逆算結果 ( $\varepsilon = 0.2$ )

| 形状  | 模型No  | d<br>(cm) | D/d  | d/b  | $C_c$ |
|-----|-------|-----------|------|------|-------|
| 角柱列 | S 2   | 6         | 1.0  | 4.0  | 0.83  |
|     | S 2 B | 6         | 3.0  | 1.5  | 0.60  |
| 円柱列 | C 2   | 6         | 1.0  | 4.0  | 0.84  |
|     | C 2 B | 18        | 1.0  | 4.0  | 0.89  |
| 横列  | H 2   | 6         | 0.67 | 5.0  | 0.63  |
|     | H 2 B | 6         | 2.0  | 1.82 | 0.49  |

### 4.3 実験と計算の比較

#### (1) 角柱列 ( $D/d = 1$ ) の場合

角柱列 ( $D/d = 1$ ) について、 $T = 1.6$  s の場合の  $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$  の計算結果を図-33~35に示す。ここで、 $C_c$ ,  $C_v$  は図-31に示した関数形を用いた。 $\varepsilon$  の変化に伴う  $K_t$ ,  $K_r$  の全体的変化はよく表現されている。しかし、詳細に見ると  $K_r$  の計算値は実験値よりもやや大きい傾向がある。この原因としては、連続式(6)で入射波と透過波に位相差がないと仮定したことと無理があること、および  $C_v$  の設定上の問題などが考えられる。一方、 $\varepsilon$  による  $f_x$  の変化傾向は良く一致しているが、 $\varepsilon$  が大きい範囲で計算値の方がやや小さい(図-35)。

次に、角柱列 ( $D/d = 1$ ) の全ての実験ケースについて、 $K_t$ ,  $K_r$ ,  $f_x$  の計算値と実験値を図-36~38に示す。これらの図によれば、当然のことながら  $K_t$  はよく一致する。また、 $K_r$  は全体的にやや大きくなっている。さらに、 $f_x$  は  $\varepsilon$  が大きくなるほど計算値と実験値の適合性が悪くなる。すなわち、全実験ケースについて、図-33~35に示した  $T = 1.6$  s のケースと同様の傾向が確認される。ここで、 $f_x$  の計算値と実験値に

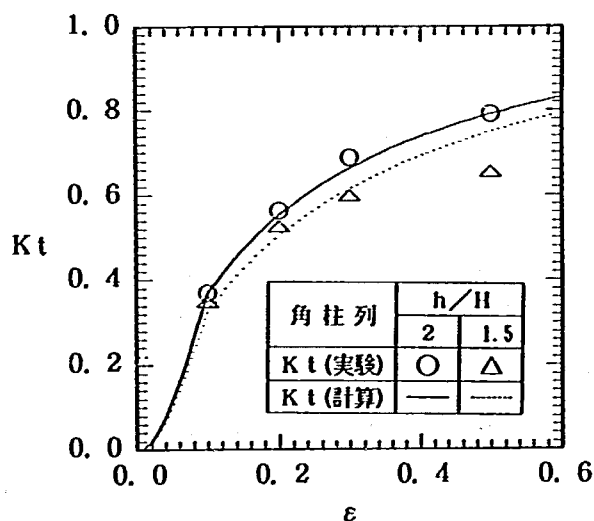


図-33  $K_t$  の計算値と実験値の比較  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

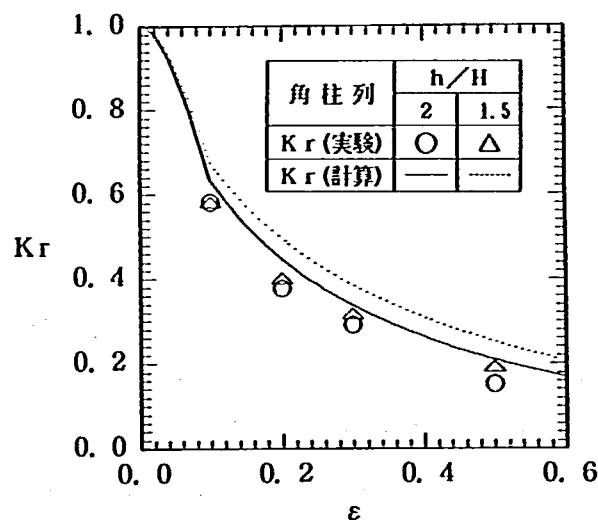


図-34  $K_r$  の計算値と実験値の比較  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

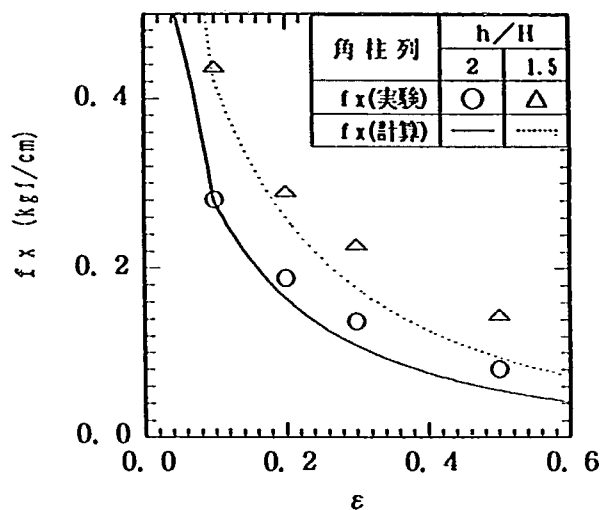


図-35  $f_x$ の計算値と実験値の比較  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

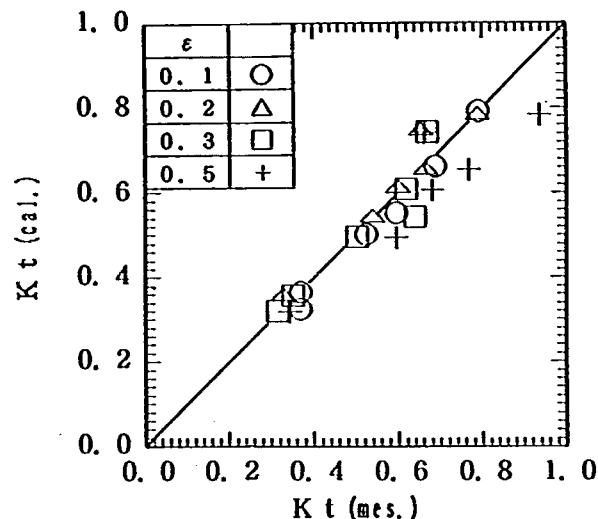


図-36  $Kt$ の計算値と実験値の比較  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

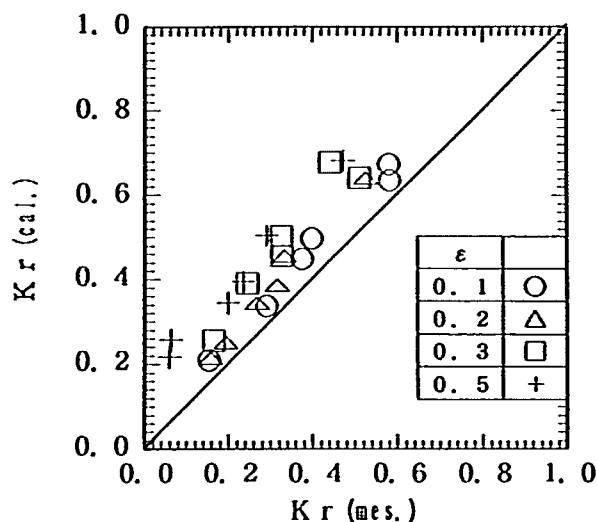


図-37  $Kr$ の計算値と実験値の比較  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

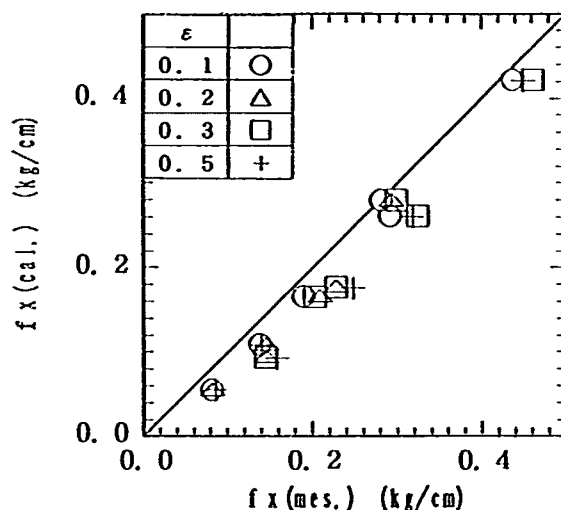


図-38  $f_x$ の計算値と実験値の比較  
(角柱列,  $D/d = 1$ )

差が生じた原因を調べるために、一例として $H = 15\text{cm}$ ,  $T = 1.6\text{s}$ の波浪条件について、水平波力が最大となる時刻における波圧の鉛直分布を図-39に示す。図中の曲線は $Kt$ と $Kr$ の実測値を用いて計算した微小振幅波の重複波圧である。模型の沖側に作用する波圧の分布形は、計算値と実験値で全体的にはほぼ一致しており、計算に微小振幅波理論を用いる妥当性を裏付けている。一方、岸側の測定波圧は計算値よりもかなり小さい。特に、 $\varepsilon$ が小さいほどその差が大きくなっている。観察によれば、沖側水位がピークとなる時刻に空隙を流れる水流は、構造物の岸側から見て空隙背後で高く、部材背後で低い水面形となった(写真-1, 2)。この高低差は $\varepsilon$ が小さいほど大きい。空隙では部材背後に比較して水位が高いが、これは部材背面へ

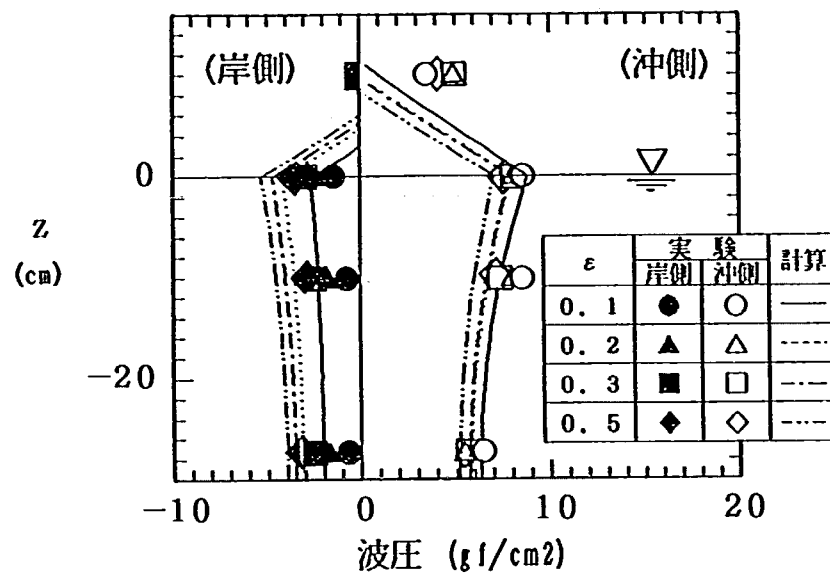


図-39 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $D/d = 1$ ,  $H = 15\text{cm}$ ,  $T = 1.6\text{s}$ )

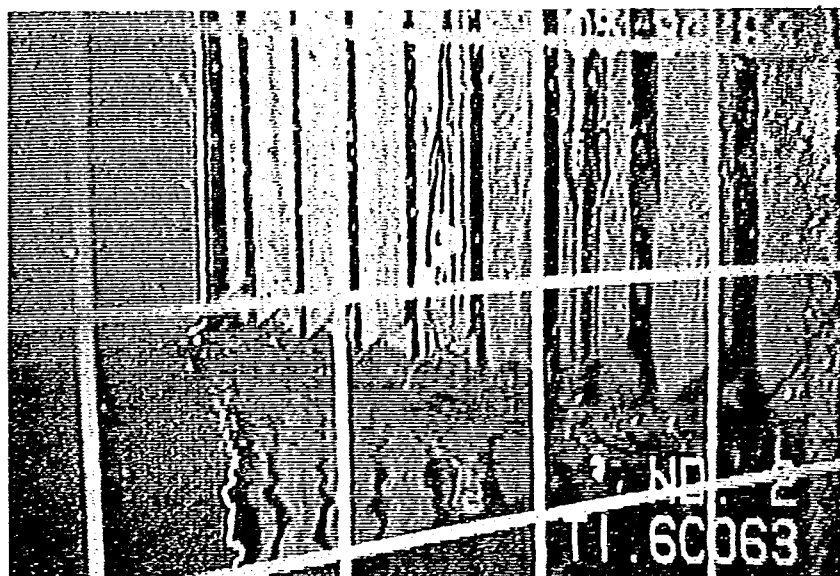


写真-1 スリット背後の水面形(角柱列,  $\varepsilon = 0.2$ ,  $D/d = 1$ ,  $h/H = 2$ ,  $T = 1.6\text{s}$ , 背面水位上昇時)

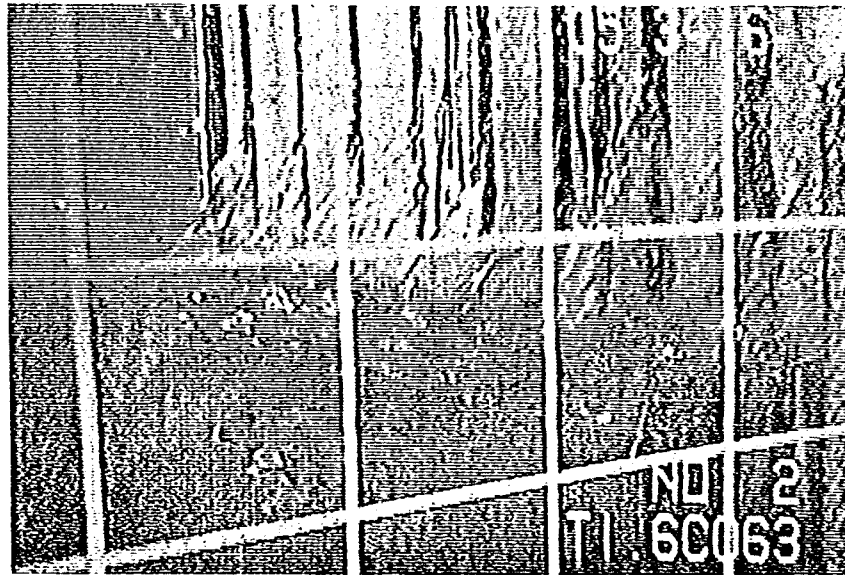


写真-2 スリット背後の水面形（角柱列， $\epsilon = 0.2$ ， $D/d = 1$ ， $h/H = 2$ ， $T = 1.6$  s，背面水位最大時）

水圧として作用しないことから、部材背面の水圧は実質的には部材背後の低い水位に支配されるはずである。しかし、計算モデルは現象を2次元的に扱っているので、空隙の高い水位分も含めて計算される。このため、岸側の水位は実際より過大に評価され、したがって岸側の波圧が計算では過大に評価されたと考えられる。一方、沖側での静水面上の計算波圧は $\epsilon$ が大きくなるほど小さくなっている。しかし、実験値にはその傾向が見られず、計算による波圧は $\epsilon$ が大きいほど過小となる。以上の岸側と沖側の波圧に見られる計算と実験との差が、図-39で見られた波力の差の原因と考えられる。 $\epsilon$ が大きいほど $f_x$ の差が大きいのは、静水面より上の岸側波圧を過小評価したことが大きく影響していることを意味する。

## (2) 円柱列と横スリットの場合

円柱列および横スリットについて、 $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ の計算値と実験値の比較を図-40～42に示す。 $K_t$ は全体的に良く一致している。しかし、 $K_r$ と $f_x$ は計算値が実験値よりも大きい。この理由は2つ考えられる。第一は、連続式で入射波と透過波に位相差がないと仮定したことに無理があること、第二は流速係数 $C_v$ を全ての模型に対し一定（0.9）と仮定したため、部材形状が異なるときのエネルギー損失の差異を十分表現し得なかったことである。したがって、モデルの推定精度をより向上させるには、 $C_v$ を正確に評価することが今後必要とされる。

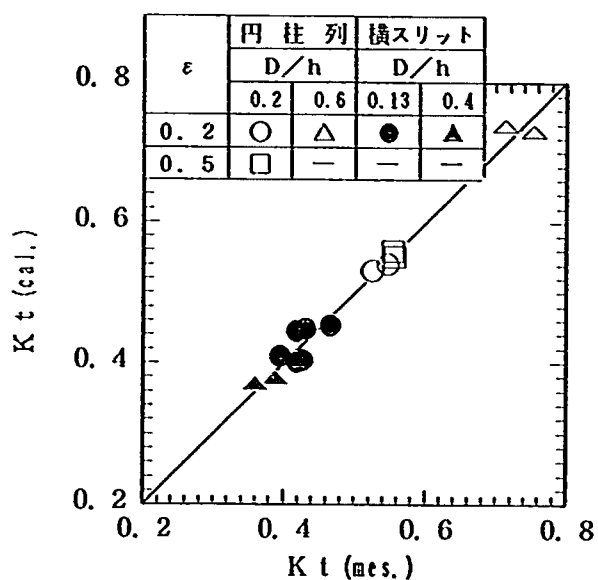


図-40  $K_t$ の計算値と実験値の比較  
(円柱列, 横スリット)

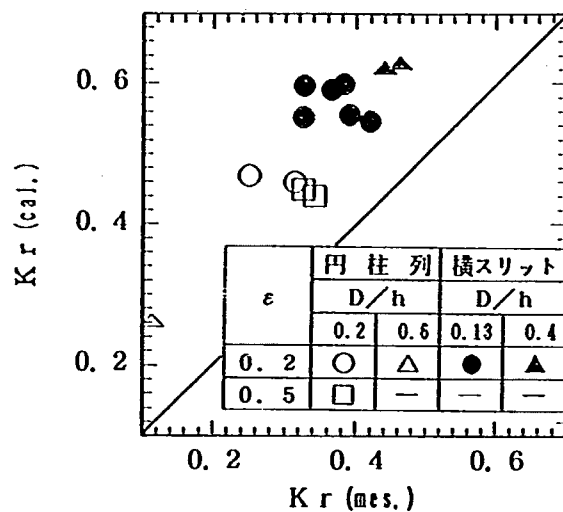


図-41  $K_r$ の計算値と実験値の比較  
(円柱列, 横スリット)

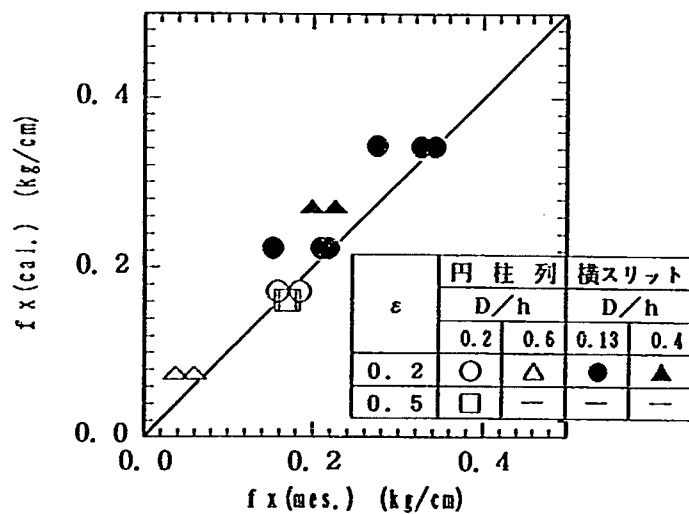


図-42  $f_x$ の計算値と実験値の比較  
(円柱列, 横スリット)

## 5. 結 論

①角柱列から成るスリットの消波・波力特性に関しては、スリットの空隙率を0.3より小さくすると碎波力が急激に増大することが見出された。碎波が作用する場合、空隙率を小さくしても透過率は低下せず、逆に波力は増大することから、構造物に碎波が作用しうる条件下では空隙率を0.3以上とすることが望ましいことが指摘された。

② $d$ と $D/d$ が同一の場合、円柱列は角柱列に比べ、重複波領域では同じ波力で消波効果が高く、碎波領域ではほぼ同等の消波効果で作用波力が小さくなった。これらの点より円柱列の方が角柱列より部材形状として優れている。また、横スリットでは重複波の作用する場合、角柱列と同程度の作用波力で大きなエネルギー損失が生ずることが分かった。

③部材の配置方向に係わらず、 $\varepsilon$ を一定として $D/d$ を大きくすると、 $K_t$ は減少し、 $K_r$ は増大した。このとき、 $f_x$ はあまり変化しない。これらより、 $\varepsilon$ を一定として $D/d$ を変えることで作用波力を変化させることなく消波効果を調整できる。

④実験条件の範囲では、波力算定モデルにおける流速係数 $C_v$ および縮脈係数 $C_c$ は $\varepsilon$ の関数として部材形状ごとに決定された。すなわち、本モデル中の係数 $C_c$ 、 $C_v$ は、空隙率および部材形状により定まる空隙の混合現象の差違を表現している。

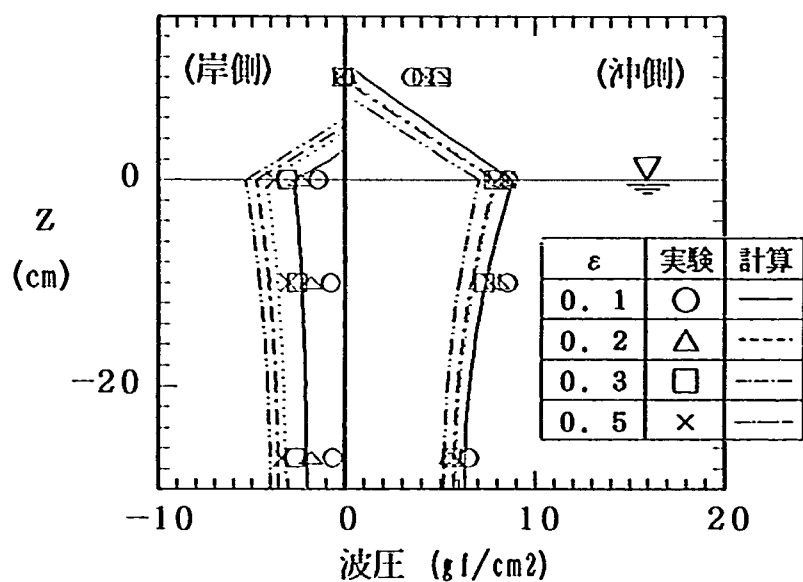
⑤開発したモデルにより、種々の空隙率・形状を有するスリット型構造物の $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ を計算し、実験値と比較した。詳細に見た場合には、 $K_r$ および $f_x$ に関して計算値と実験値の適合性に問題が残るものの、 $\varepsilon$ の変化に伴う $K_t$ 、 $K_r$ 、 $f_x$ の全体的変化はよく表現されている。結局、本モデルによりスリット型構造物の消波・波力特性をほぼ把握できると考えられる。

## 参 考 文 献

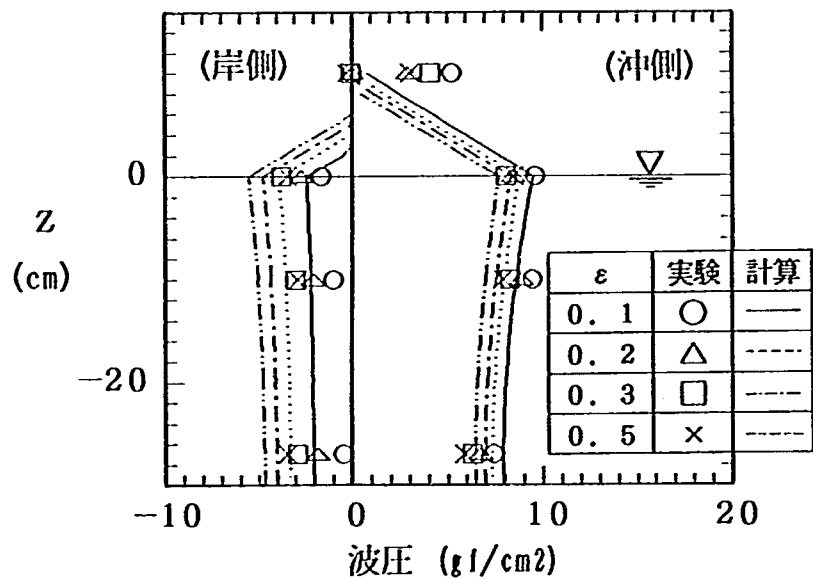
- 井田康雄・久保弘一(1975):スリット構造による波浪減衰作用について,第22回海岸工学講演会論文集, pp.545~549.
- 角野昇八・小田一紀(1985):任意断面柱体列周辺波動場の境界値問題解析,第32回海岸工学講演会論文集, pp.589~593.
- 角野昇八(1987):鉛直のスリットを有する海岸・海洋構造物の周辺波動場に関する研究,大阪市立大学博士論文, 171p.
- 建設省土木研究所海岸研究室(1987):海域制御構造物に関する共同研究報告書(1), (2), (3), 土木研究所資料, 第2454号, 第2510号, 第2511号.
- 建設省土木研究所海岸研究室(1988):海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(4), (5), (6), (7), 土木研究所資料, 第2577号, 第2609号, 第2658号, 第2661号.
- 建設省土木研究所海岸研究室(1989):海域制御構造物に関する共同研究報告書(8), (9), 土木研究所資料, 第2701号, 第2788号.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治(1976):不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 近藤俊郎・佐藤隆一(1979):多孔壁の損失係数と見かけのオリフィス長さの推定, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.333~337.
- 榎本亨・岩田好一朗(1973):多孔壁式鉛直消波岸壁の水理特性に関する二, 三の考察, 土木学会論文報告集, 第220号, pp.53~63.
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司(1986):直立壁に作用する衝撃砕波力の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第22巻, 第4号, pp.3~31.
- 服部昌太郎(1971):多孔壁式防波堤の水理特性, 第18回海岸工学講演会論文集, pp.115~120.
- 林泰造・服部昌太郎・白井増次郎(1966):透過性鋼管防波堤の水理, 第13回海岸工学講演会講演集, pp.97~101.
- 堀口孝男・布施敬一郎・上原正晴(1977):両面多孔壁消波構造の水理解析, 第24回海岸工学講演会論文集, pp.276~280.

# 付 録 — I

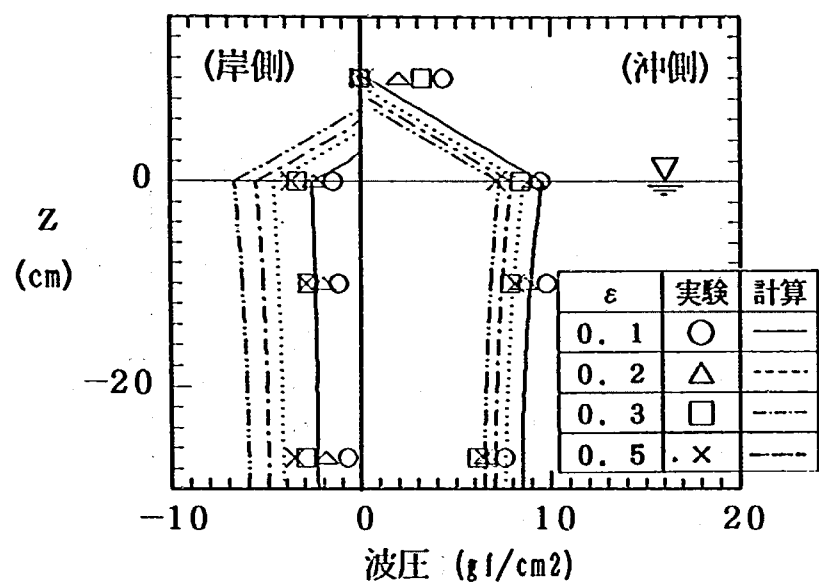
## 波圧分布の測定結果



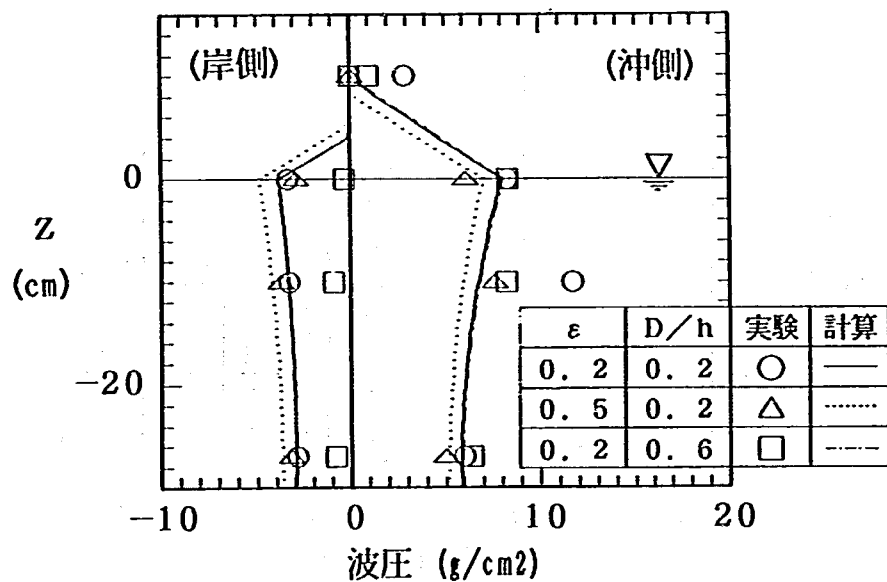
付図-1 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $h/H = 2$ ,  $T = 1.6 \text{ s}$ )



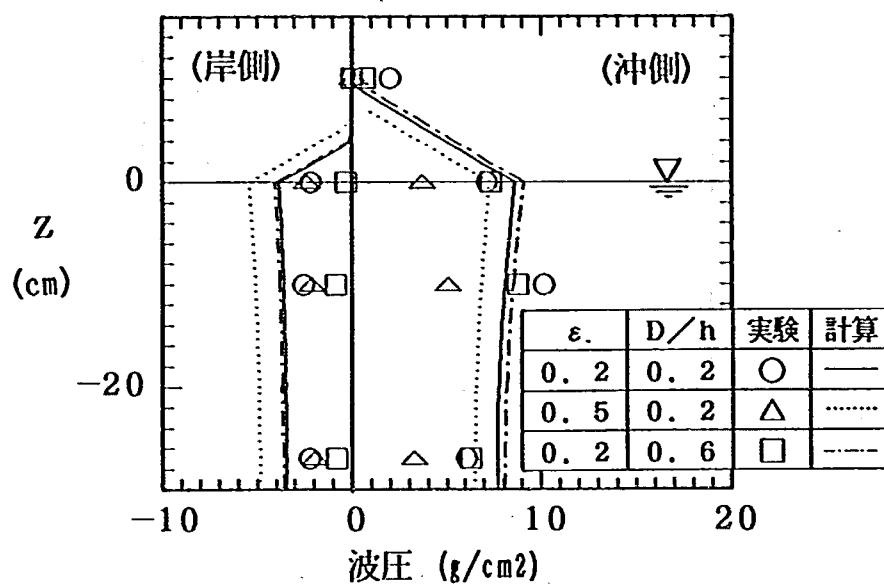
付図-2 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $h/H = 2$ ,  $T = 2.0 \text{ s}$ )



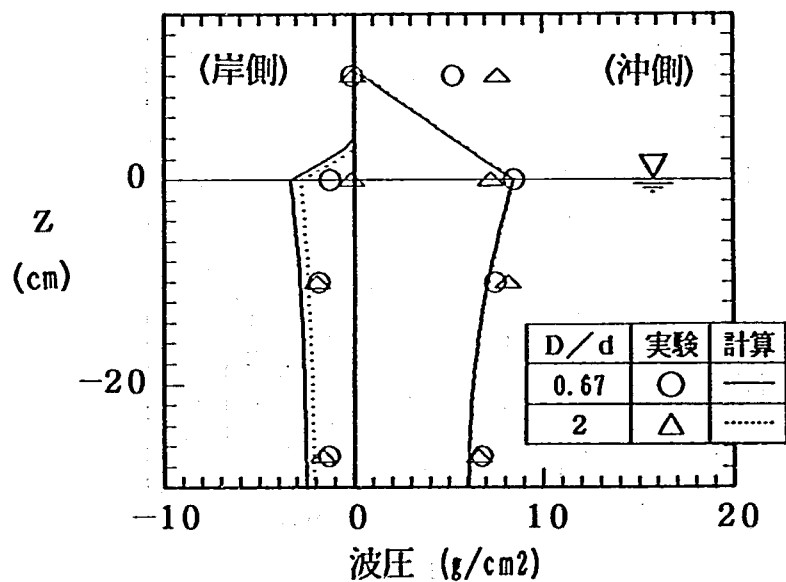
付図-3 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $h/H = 2$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ )



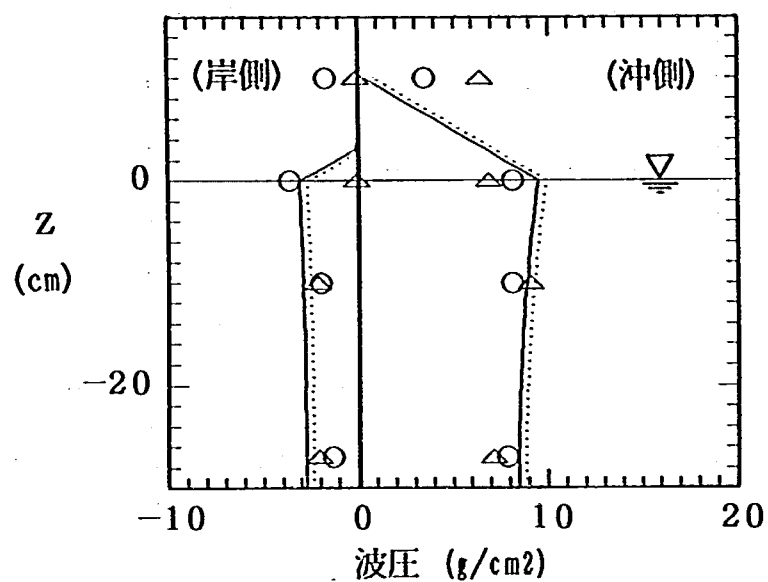
付図-4 波圧分布の測定値  
(円柱列,  $h/H = 2$ ,  $T = 1.6 \text{ s}$ )



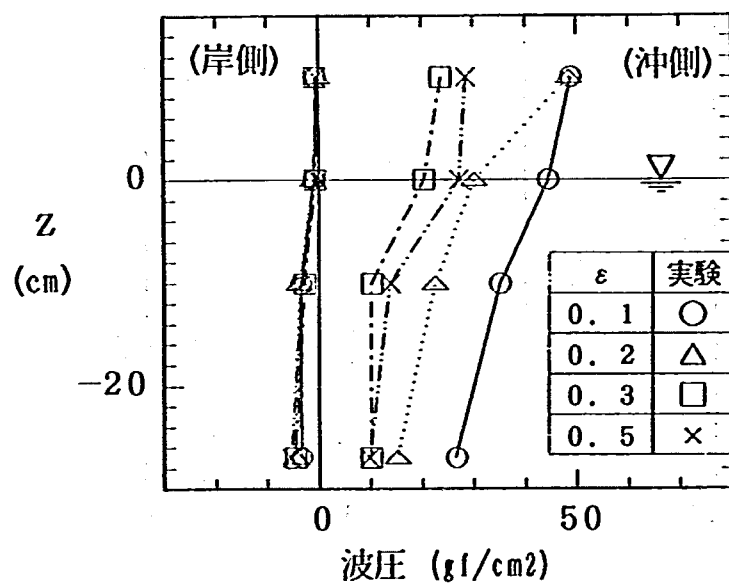
付図-5 波圧分布の測定値  
(円柱列,  $h/H = 2$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ )



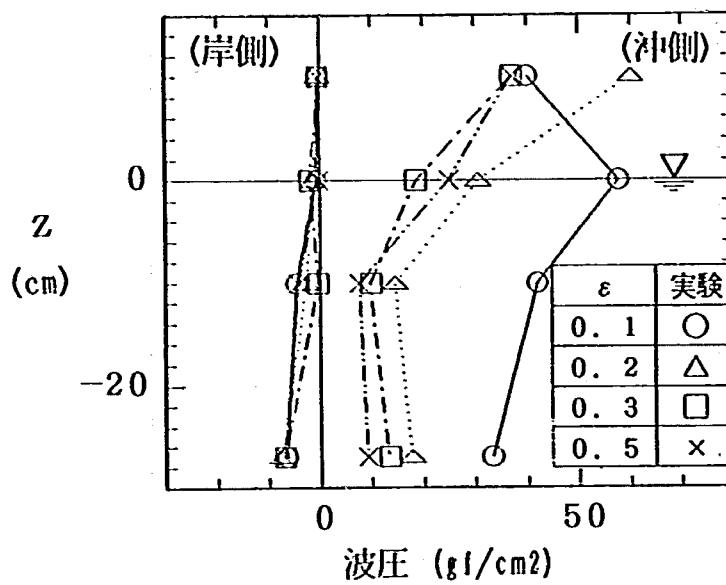
付図-6 波圧分布の測定値  
(横スリット,  $h/H = 2$ ,  $T = 1.6 \text{ s}$ )



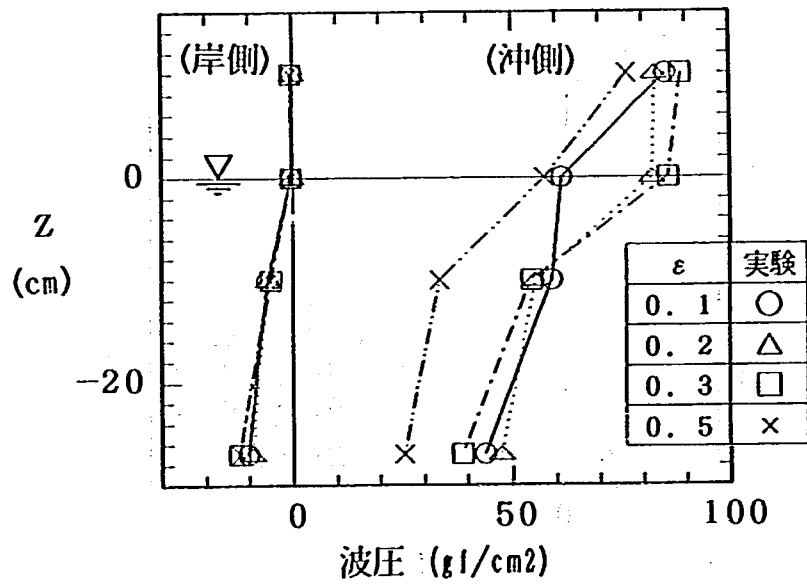
付図-7 波圧分布の測定値  
(横スリット,  $h/H = 2$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ )



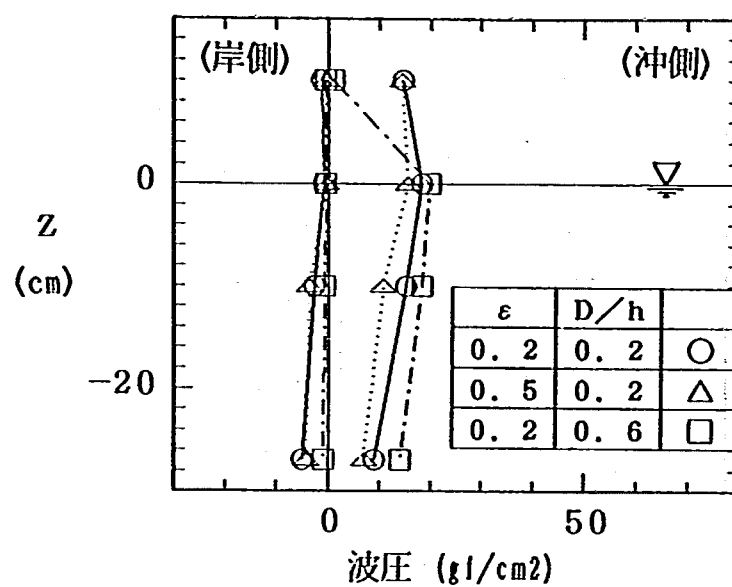
付図-8 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $h/H = 1$ ,  $T = 1.6 \text{ s}$ )



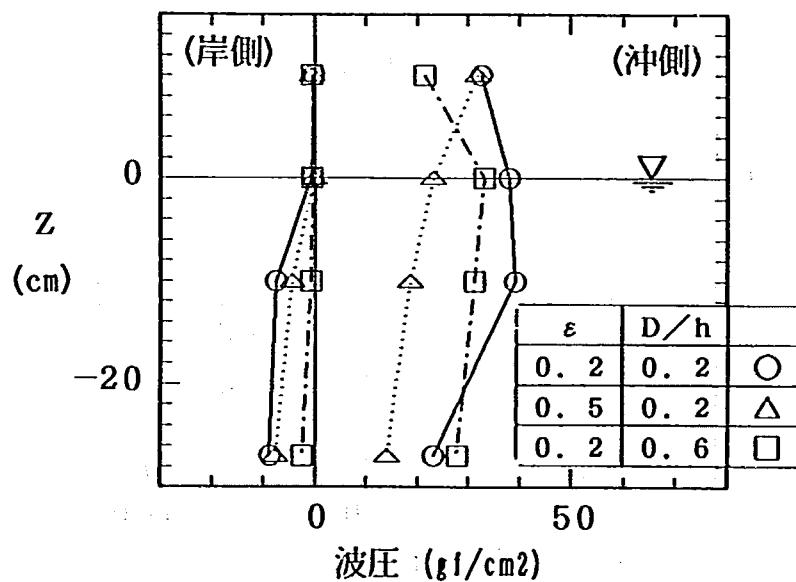
付図-9 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $h/H = 1$ ,  $T = 2.0 \text{ s}$ )



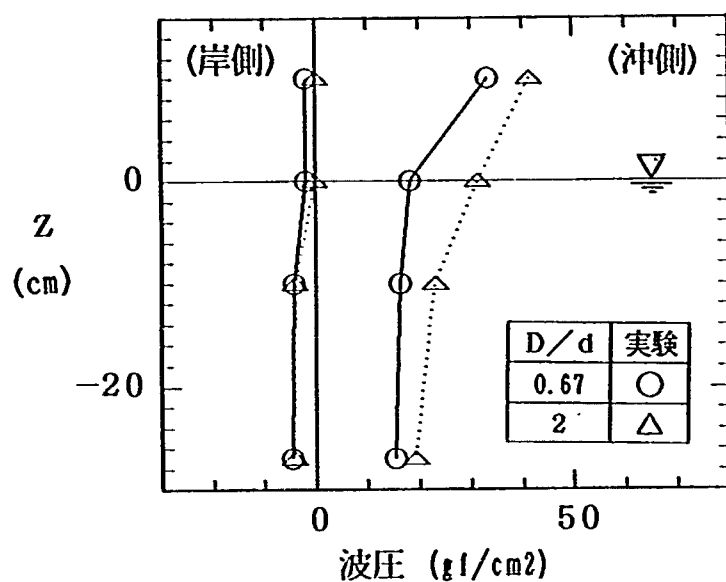
付図-10 波圧分布の測定値  
(角柱列,  $h/H = 1$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ )



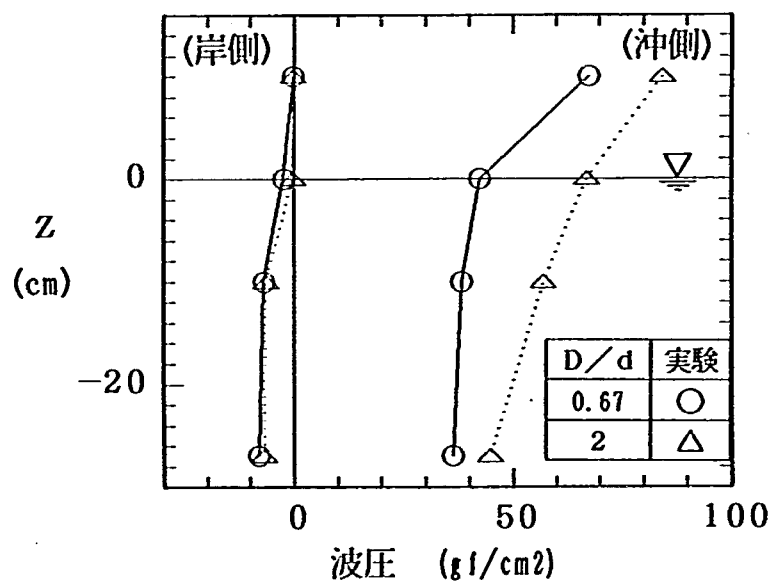
付図-11 波圧分布の測定値  
(円柱列,  $h/H = 1$ ,  $T = 1.6 \text{ s}$ )



付図-12 波圧分布の測定値  
(円柱列,  $h/H = 1$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ )



付図-13 波圧分布の測定値  
(横スリット、 $h/H = 1$ ,  $T = 1.6 \text{ s}$ )



付図-14 波圧分布の測定値  
(横スリット、 $h/H = 1$ ,  $T = 2.4 \text{ s}$ )

## 付 録 — II

### 水位・波力・波圧の時間波形

#### [記号の説明]

$\eta_{in}$  : 1/10勾配斜面の沖端から1.4m沖での水位

$\eta_f$  : 模型前面の水位

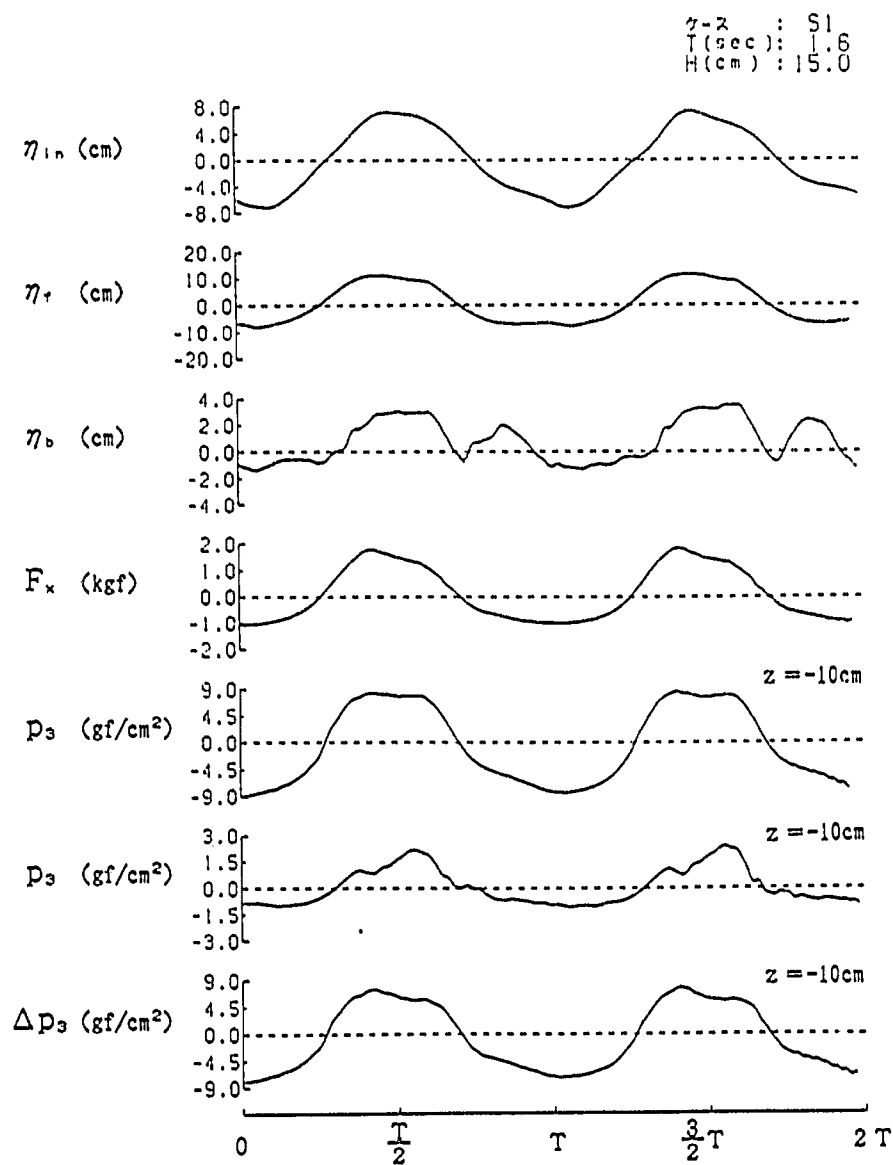
$\eta_b$  : 模型背面の水位

$F_x$  : 3 分力計により測定された全水平波力

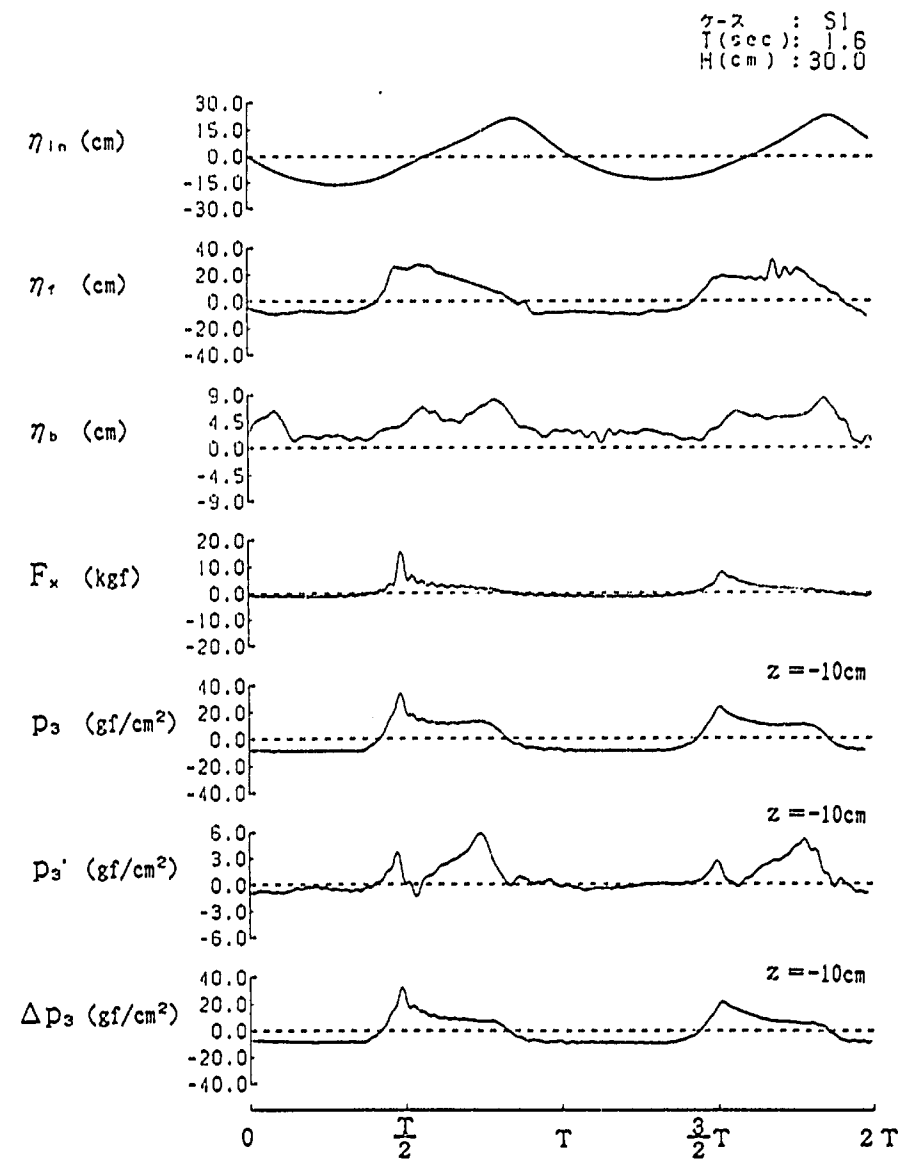
$p_3$  :  $z = -10\text{cm}$ での模型前面波圧

$p_3'$  :  $z = -10\text{cm}$ での模型背面波圧

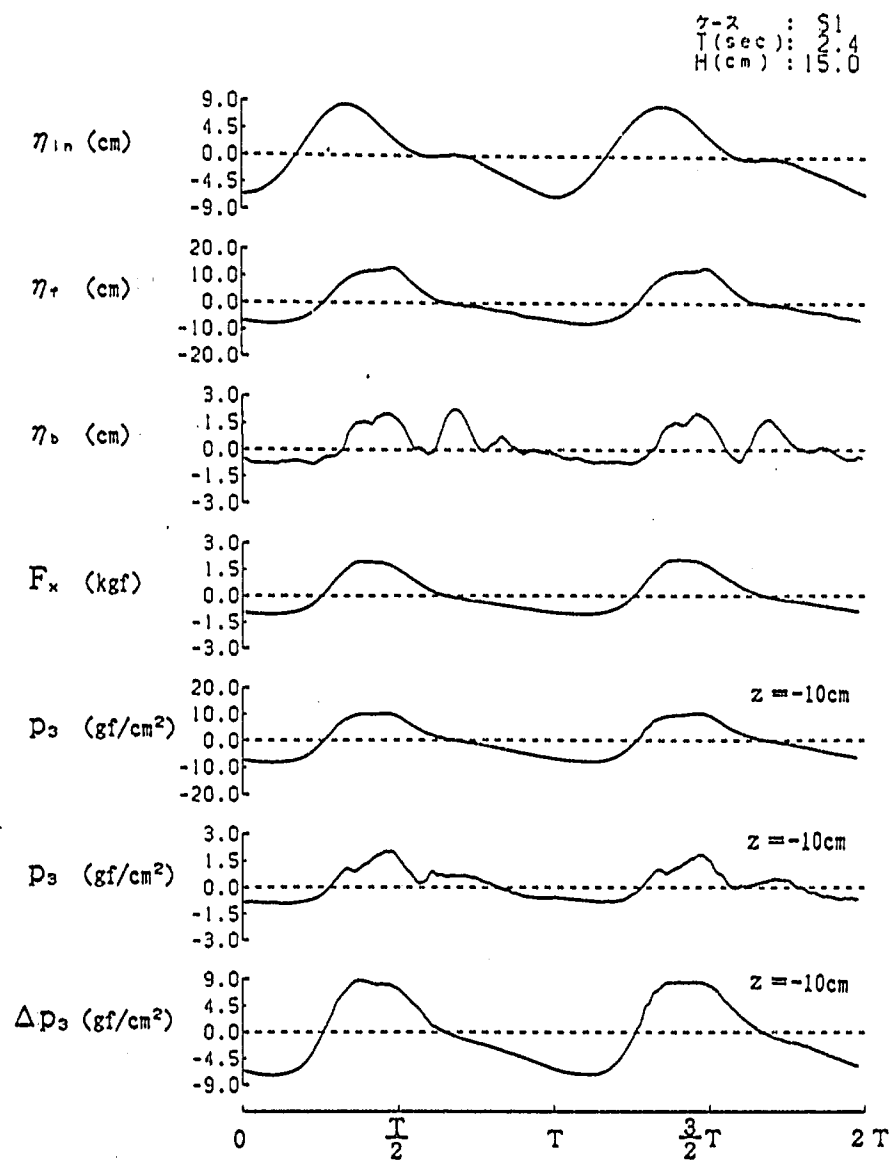
$\Delta p_3$  :  $z = -10\text{cm}$ での差圧 ( $p_3 - p_3'$ )



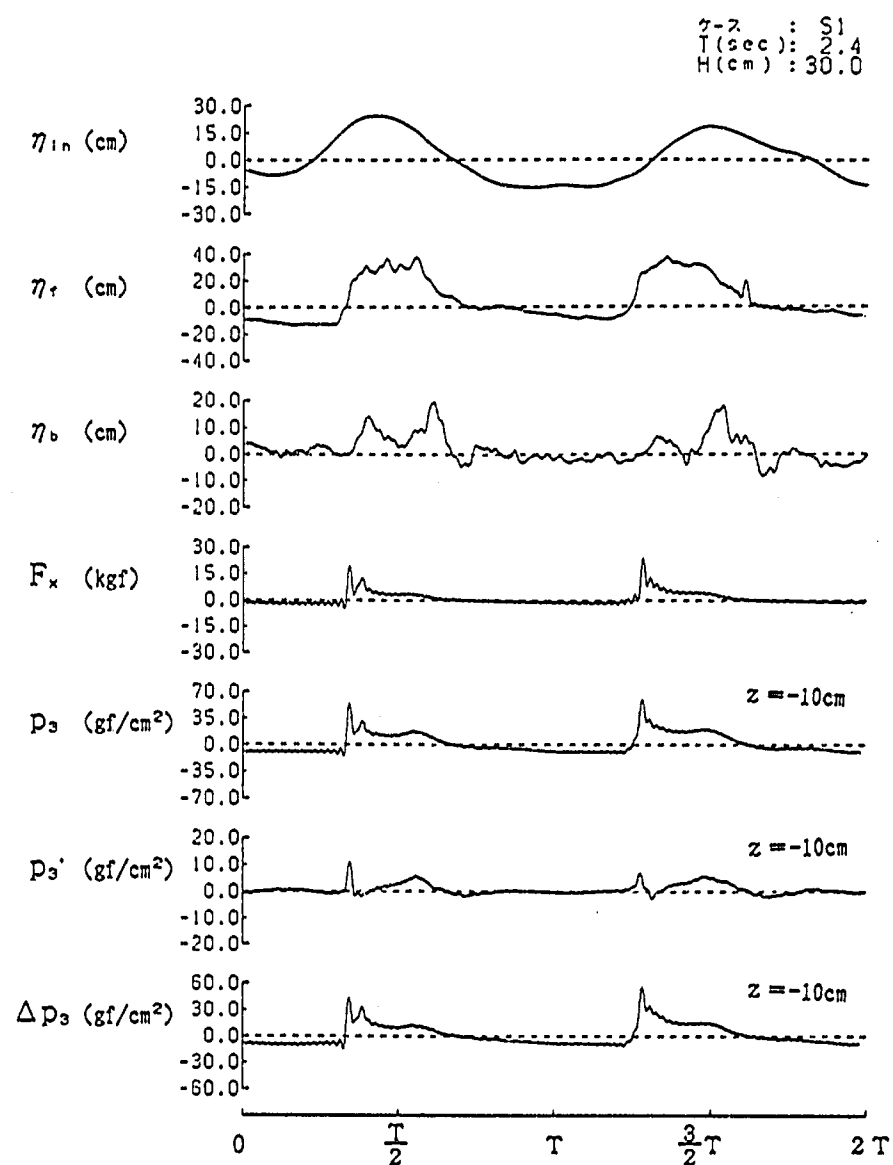
付図-15  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S1 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



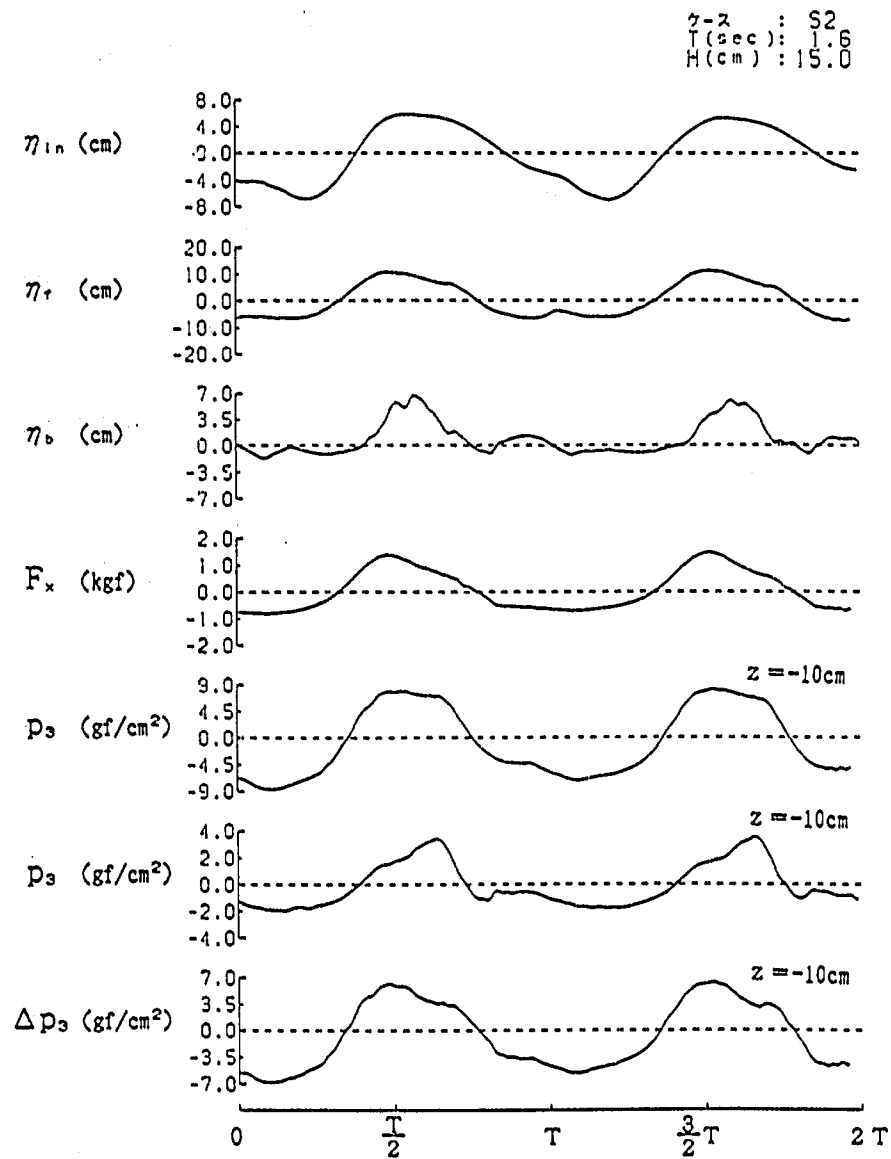
付図-16  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S1 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



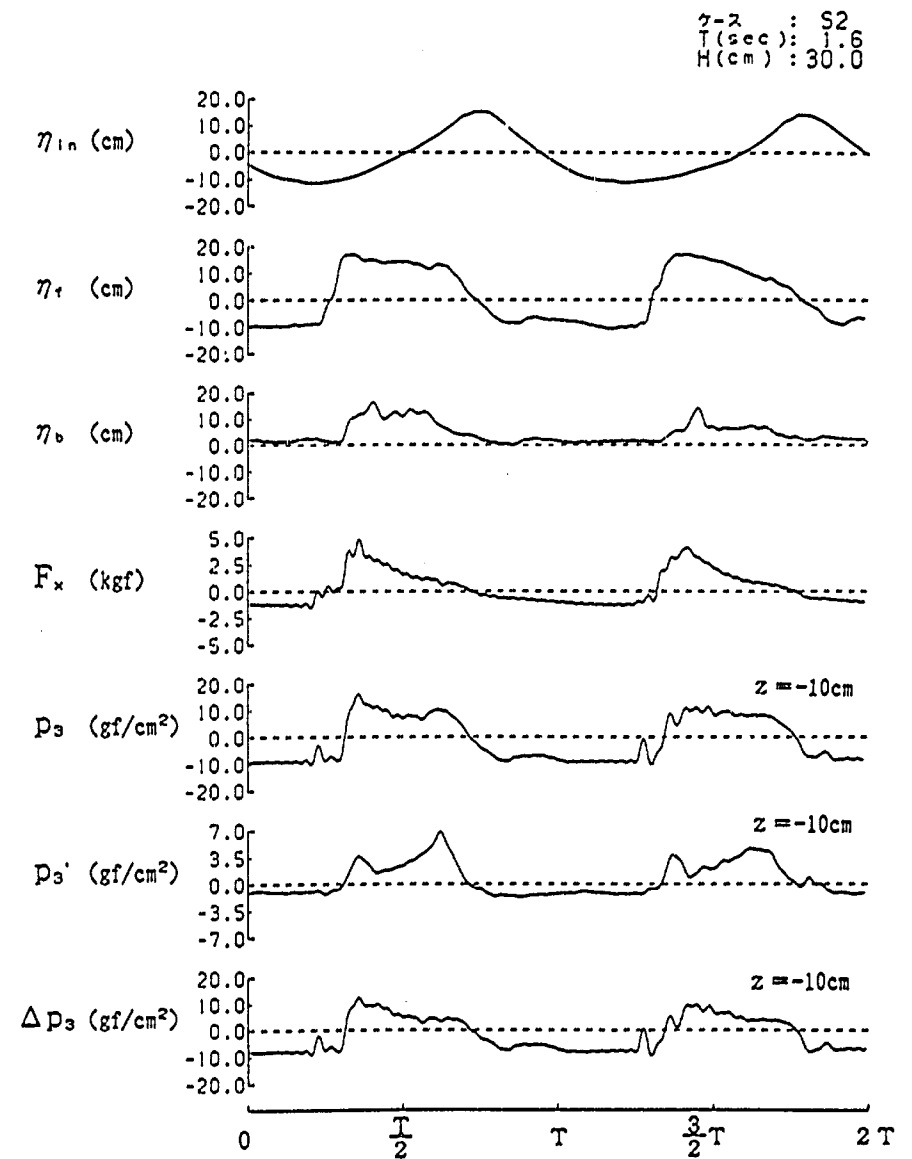
付図-17  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S1 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



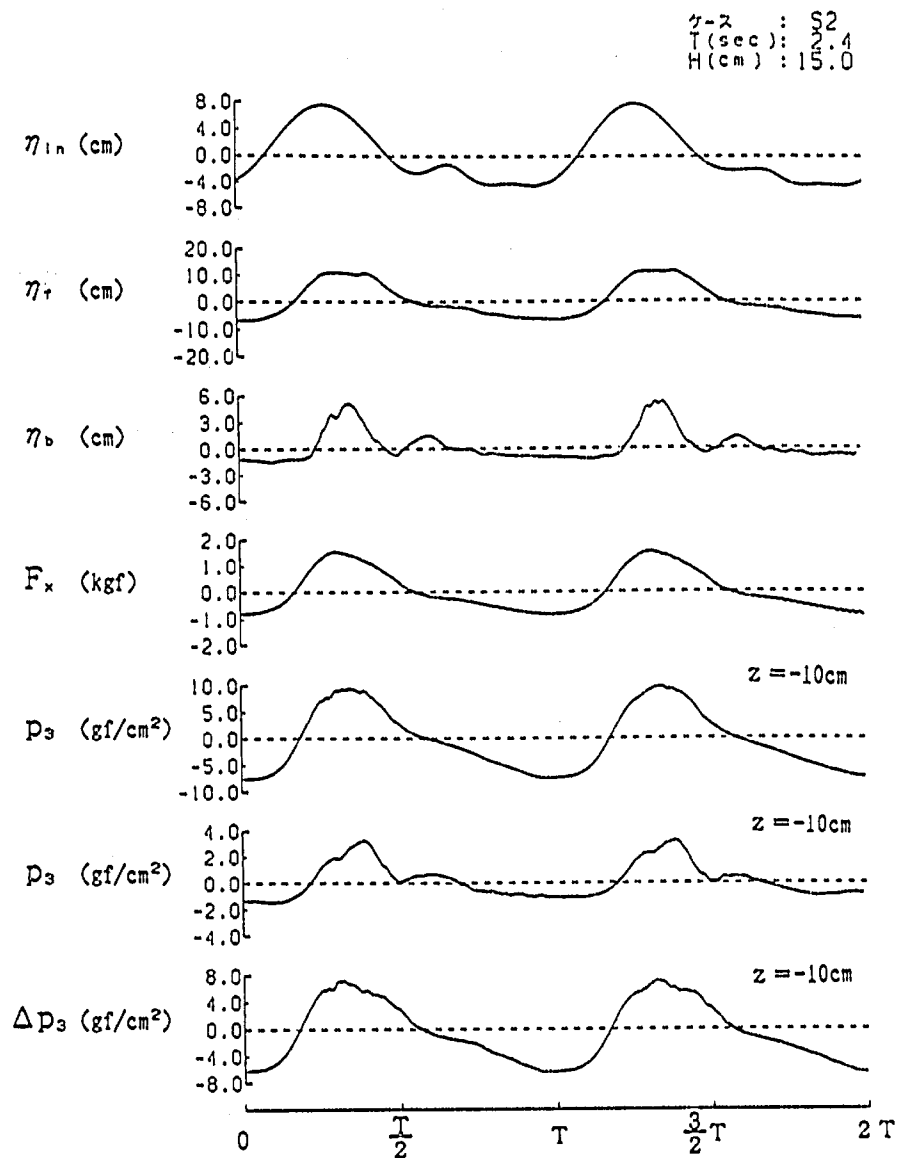
付図-18  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S1 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



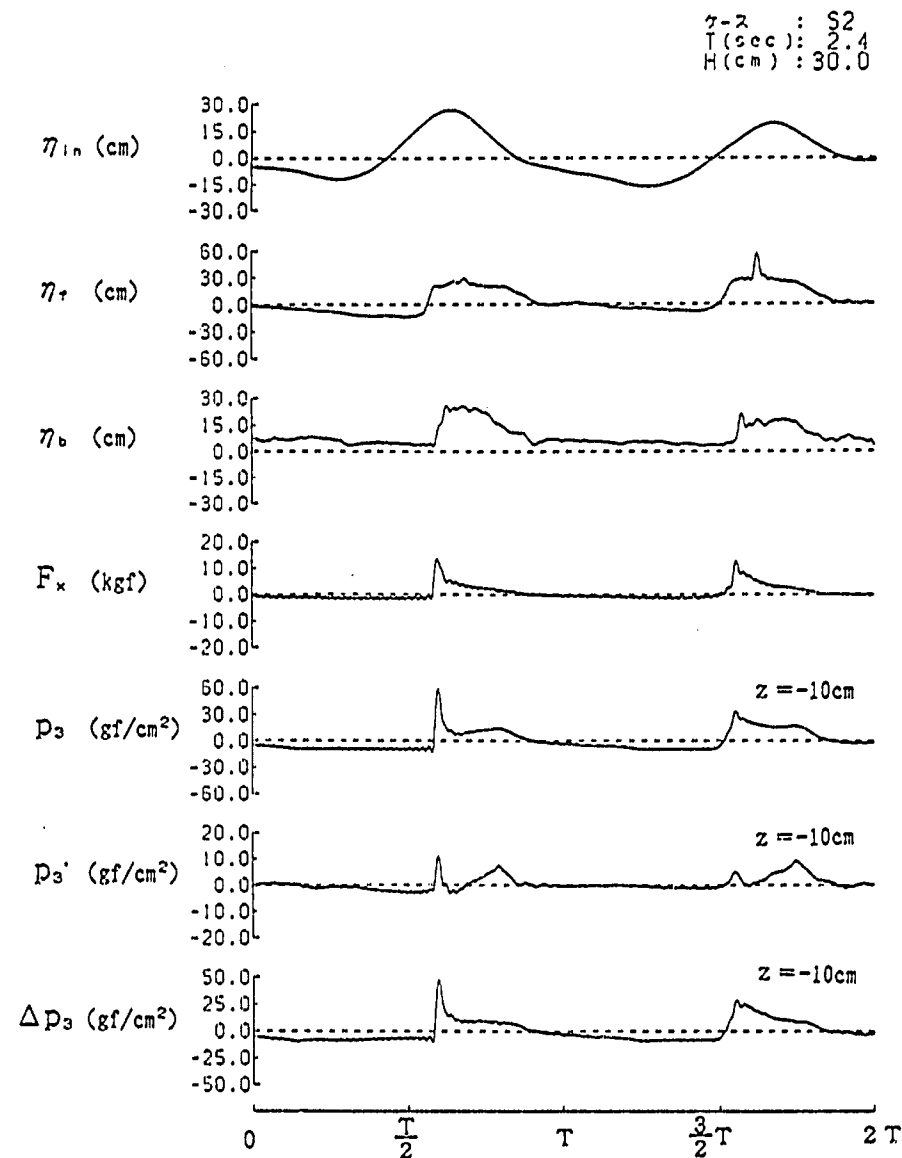
付図-19  $\eta_{in}$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S2 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



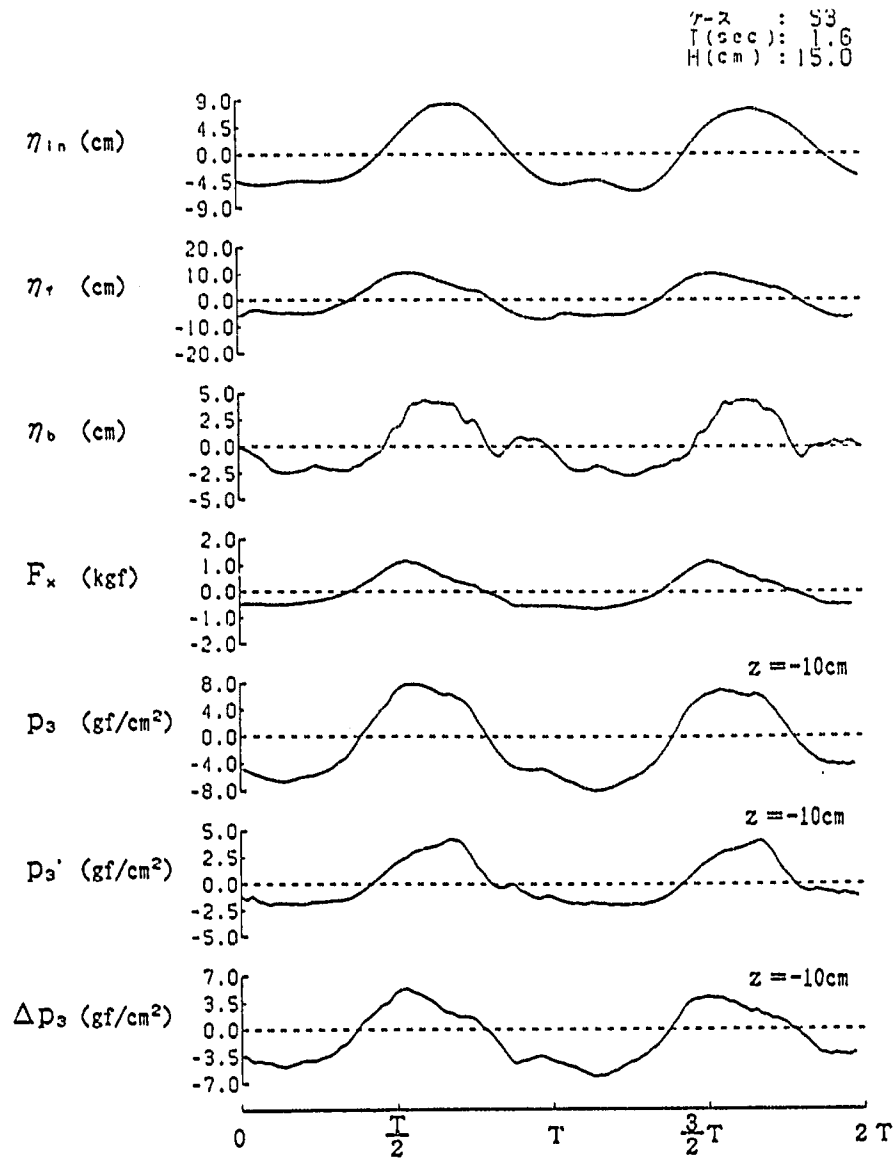
付図-20  $\eta_{in}$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S2 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



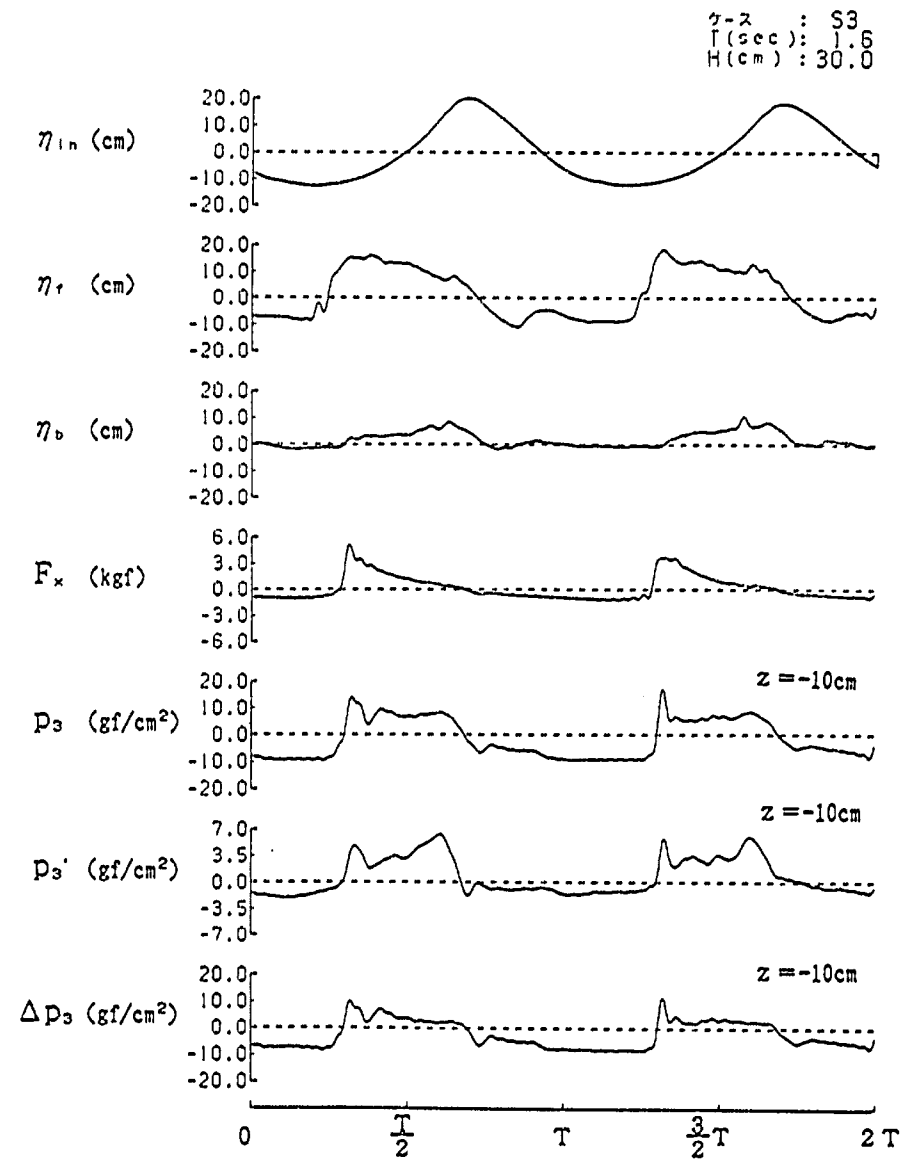
付図-21  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S2 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



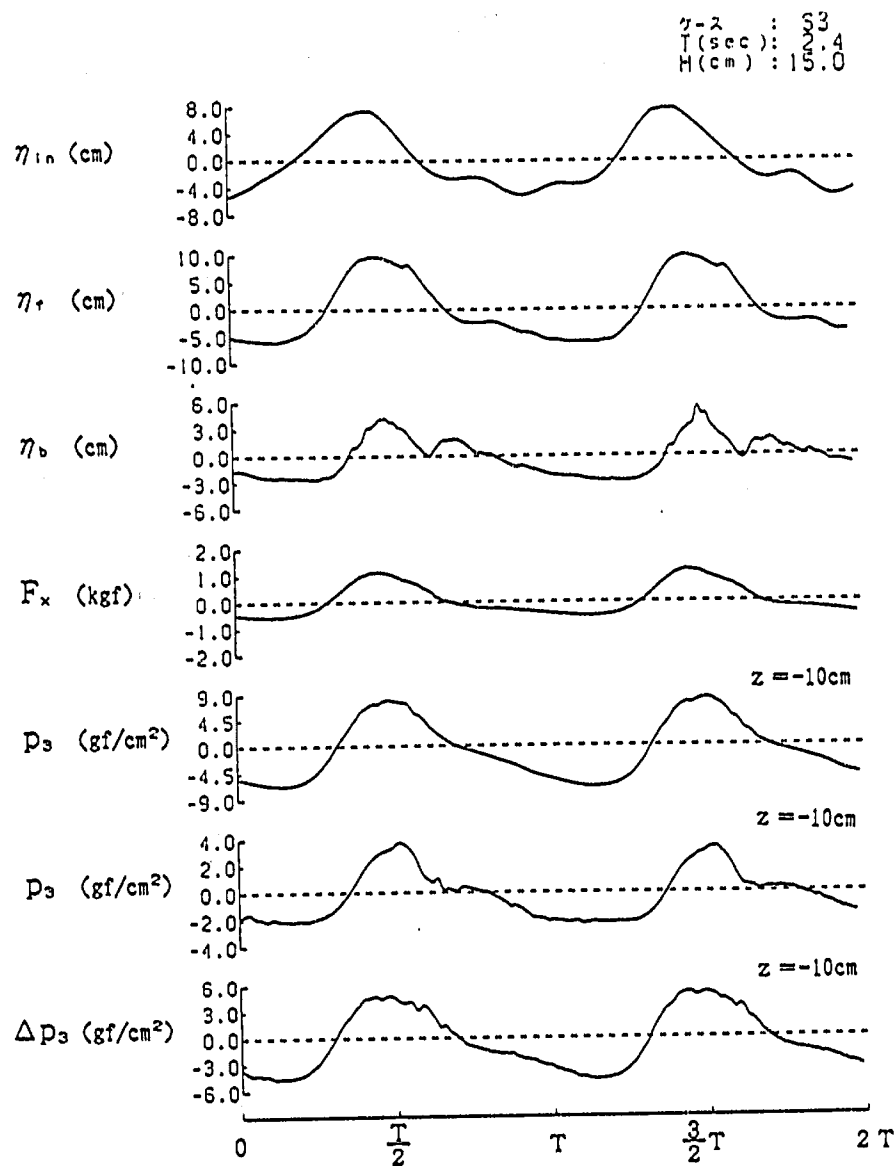
付図-22  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S2 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



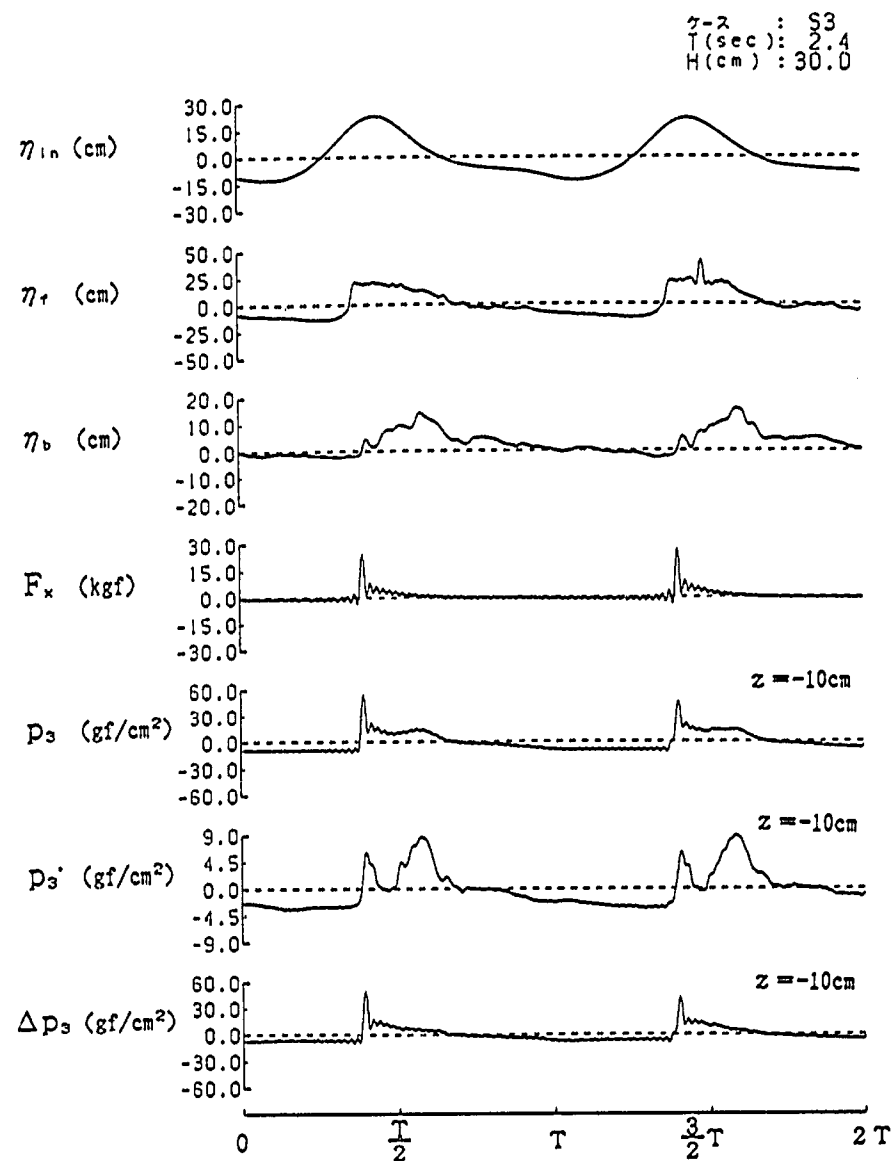
付図-23  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S3 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



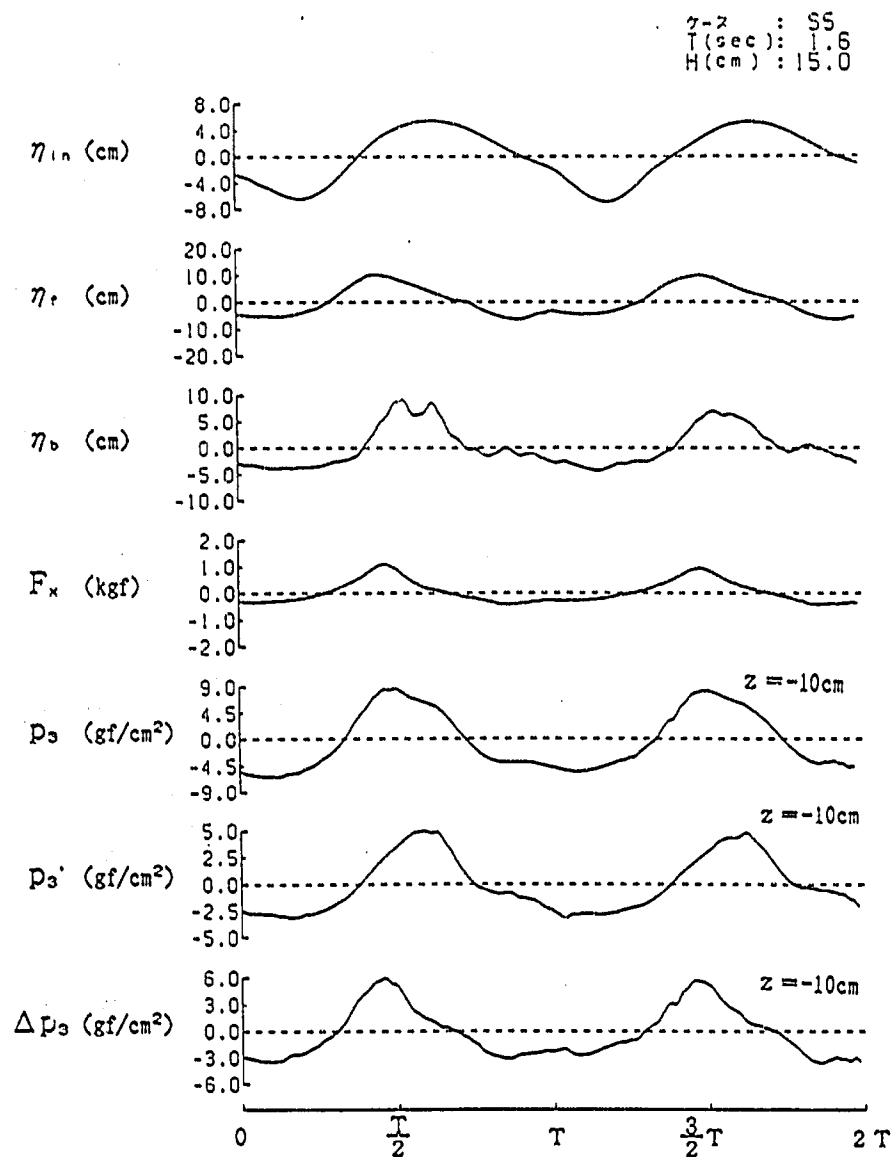
付図-24  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S3 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



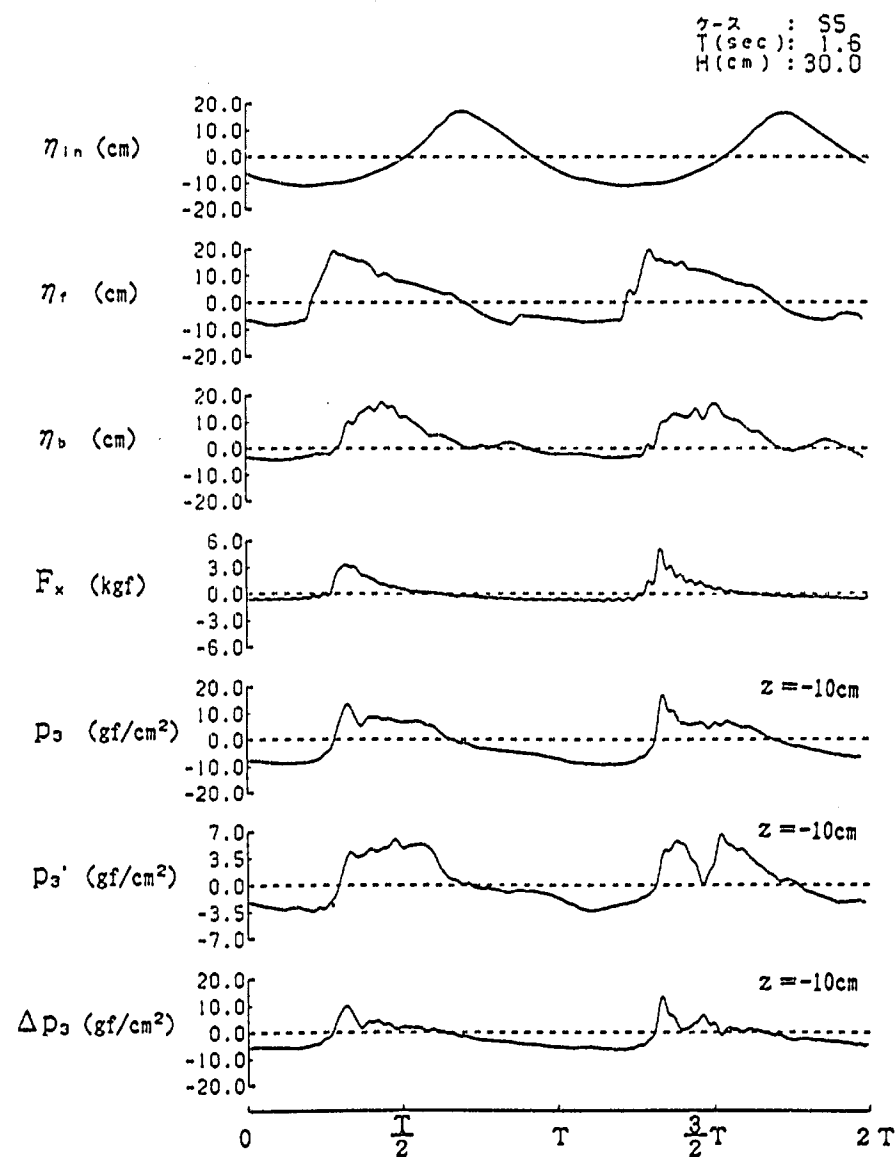
付図-25  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S3 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



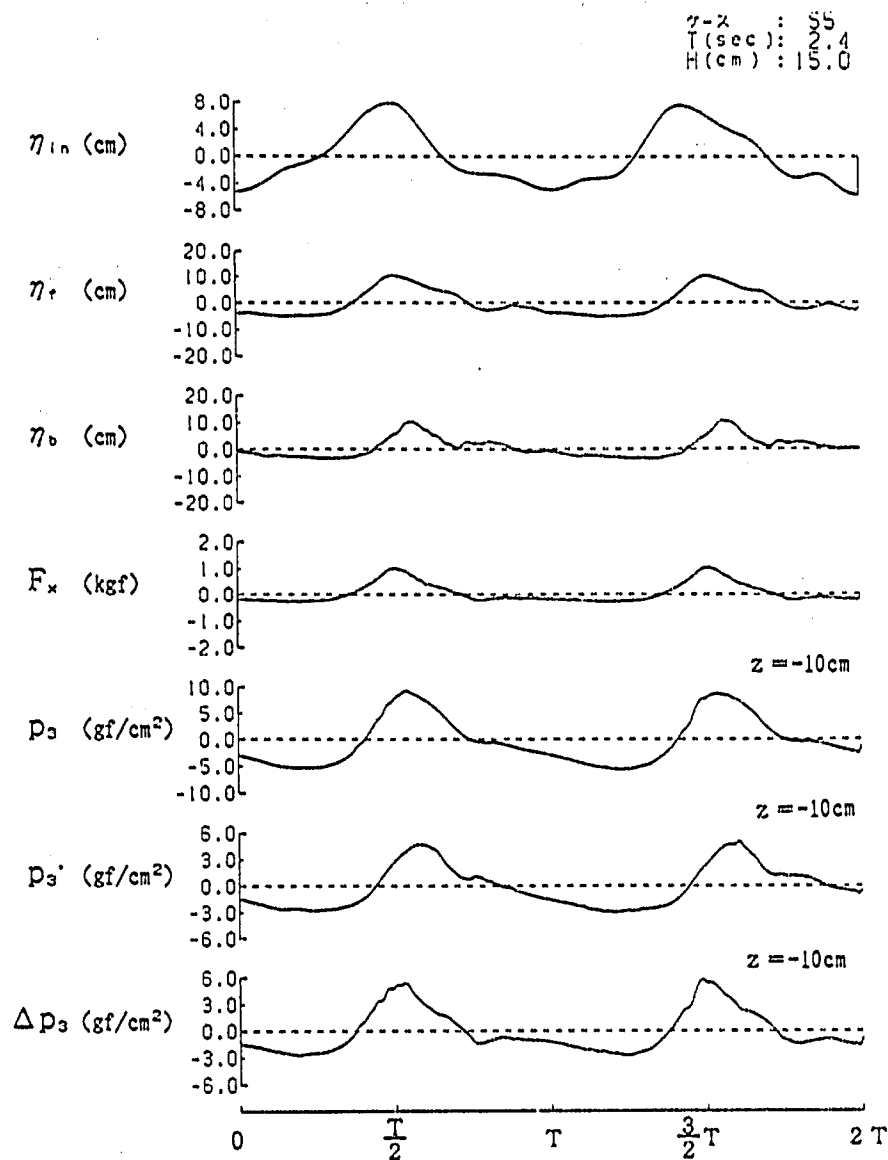
付図-26  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S3 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



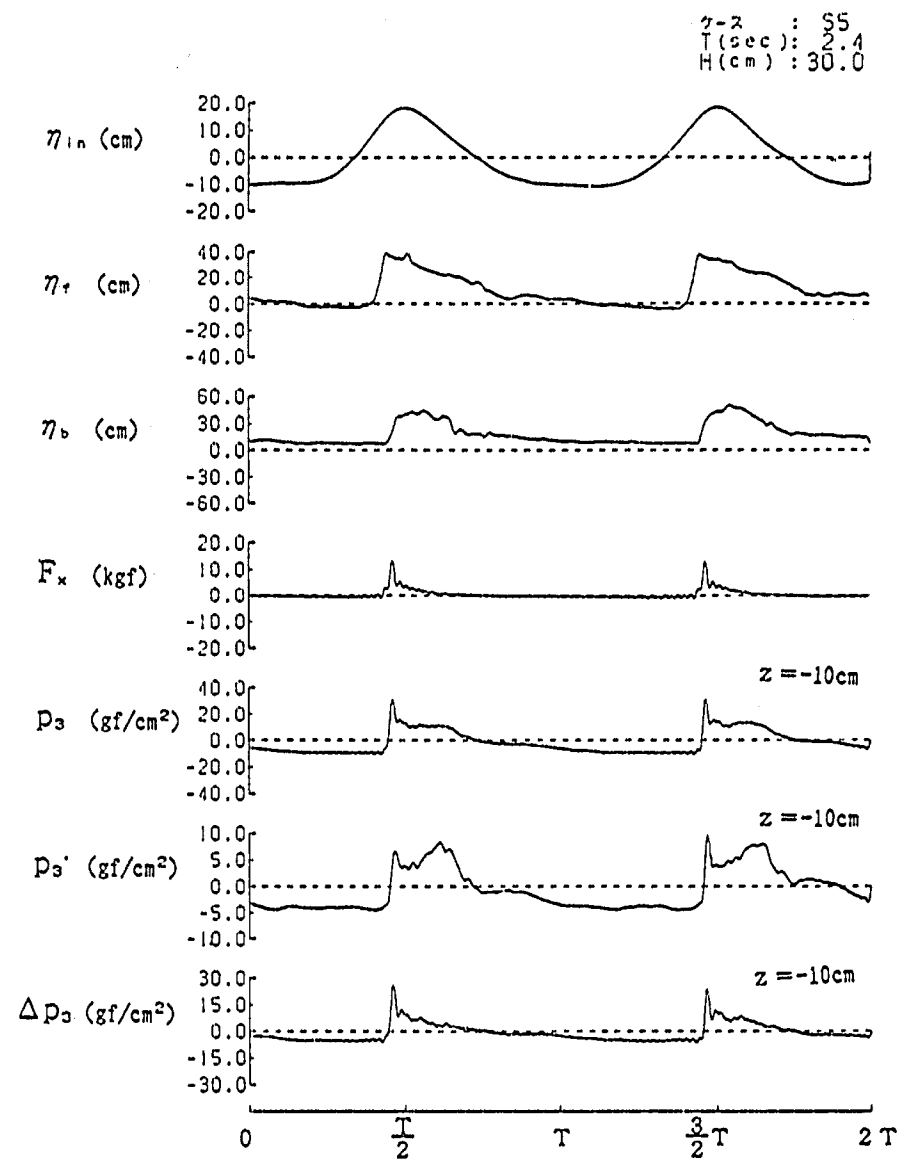
付図-27  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
( S 5 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$  )



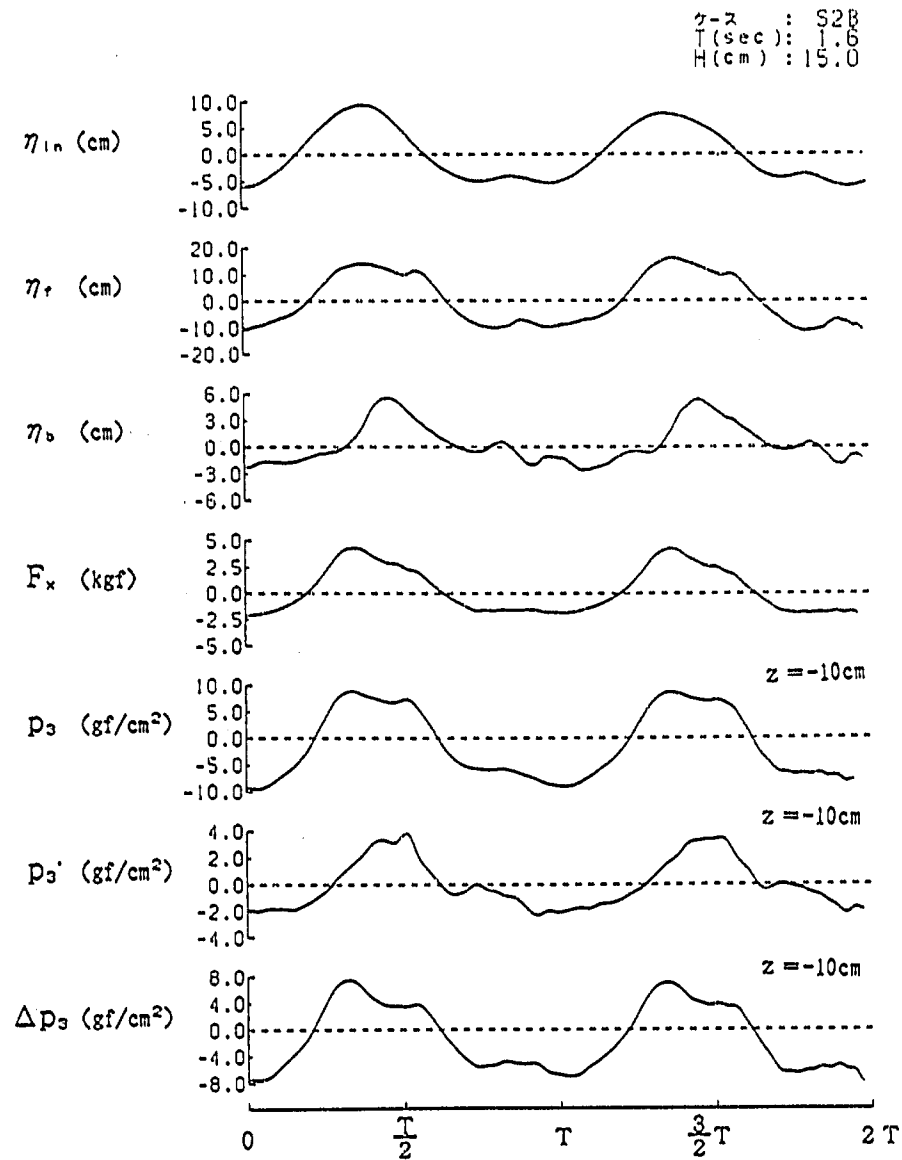
付図-28  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
( S 5 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$  )



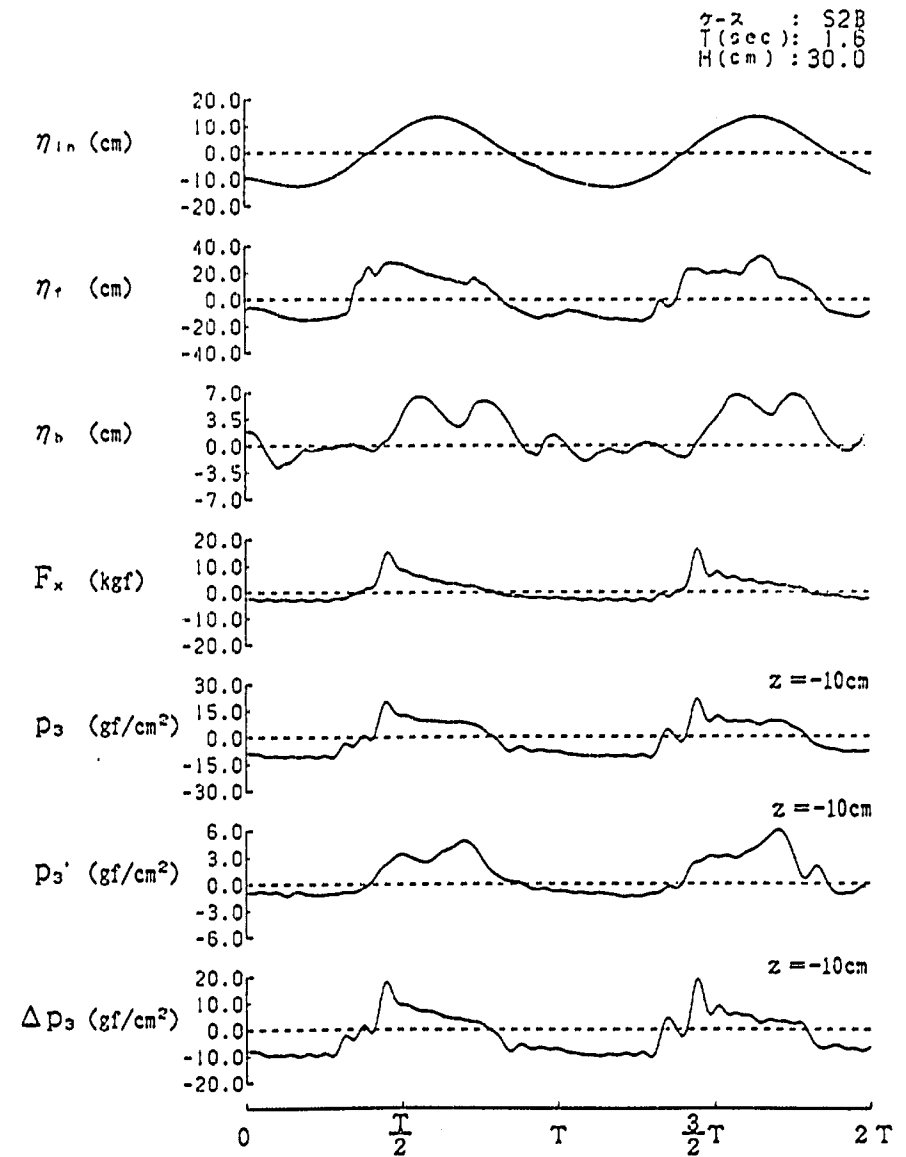
付図-29  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
 ( S 5 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$  )



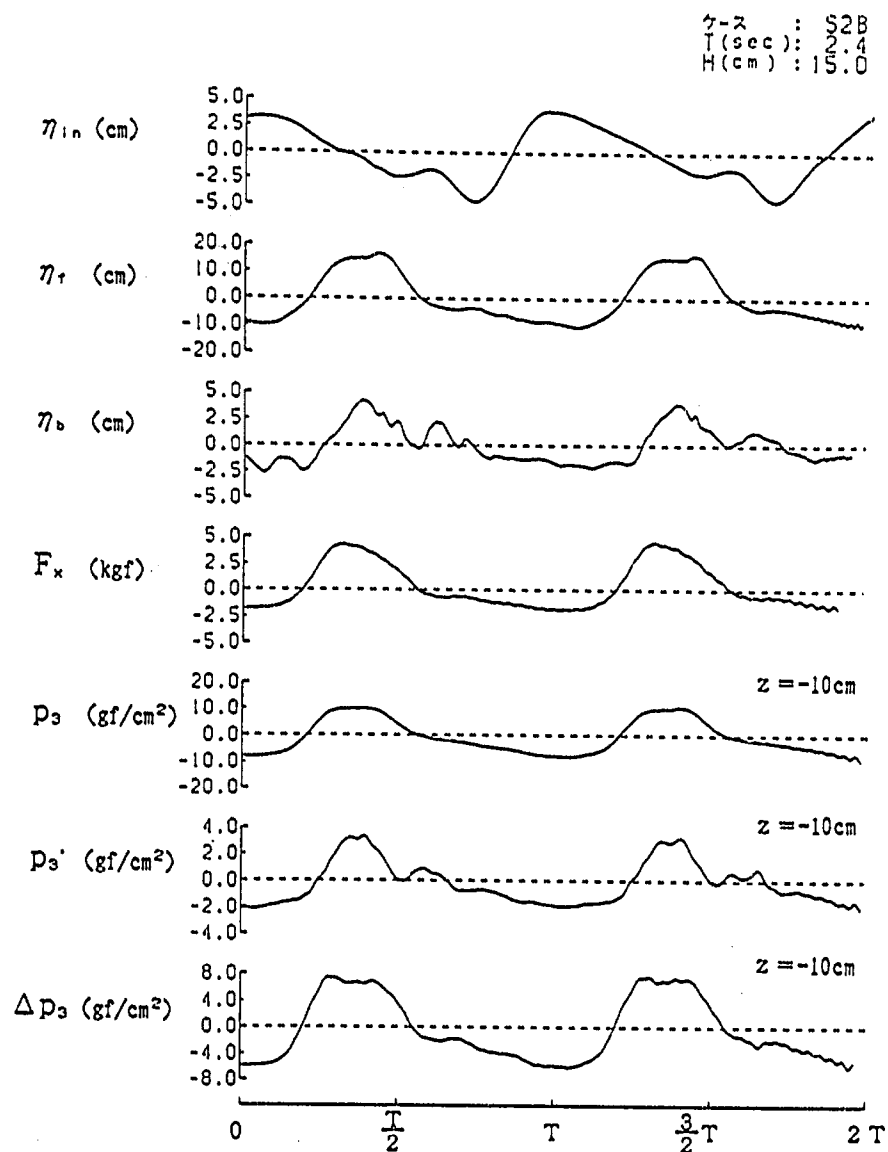
付図-30  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
 ( S 5 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$  )



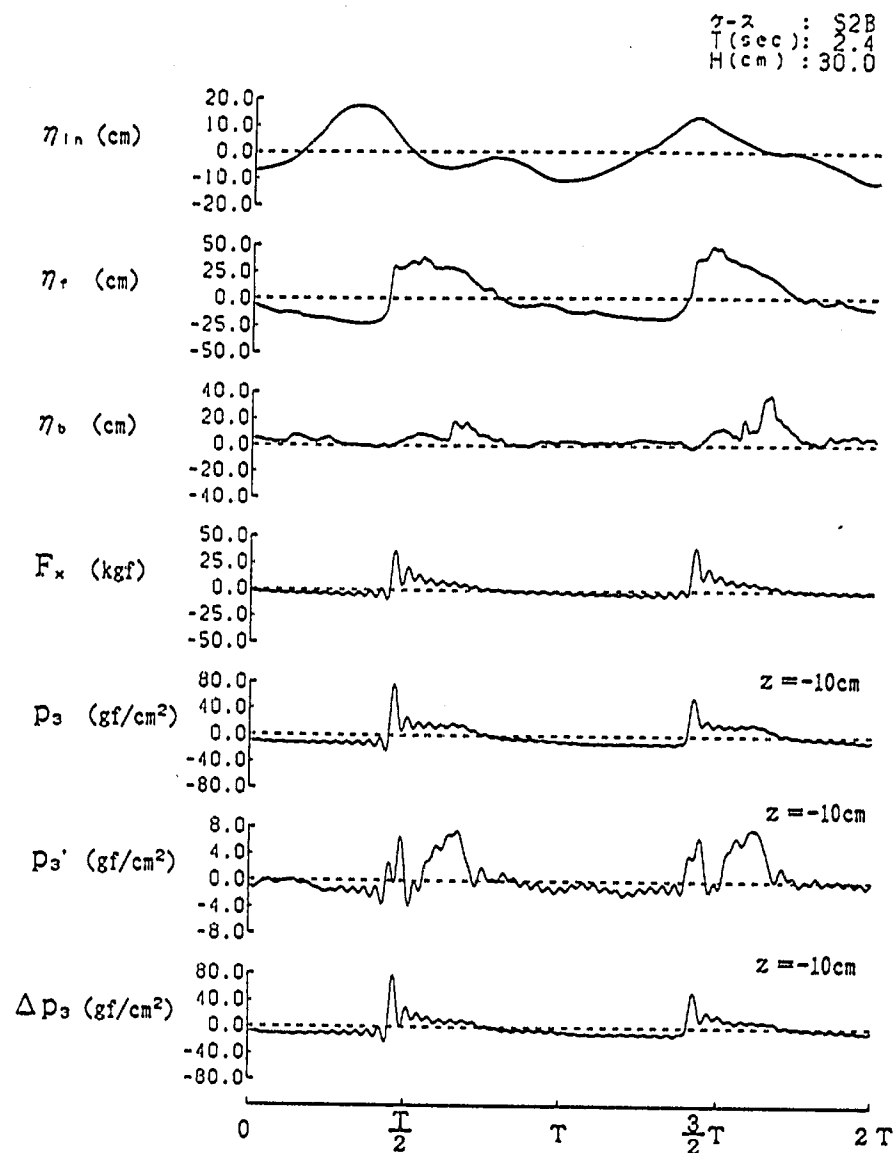
付図-31  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S2B模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



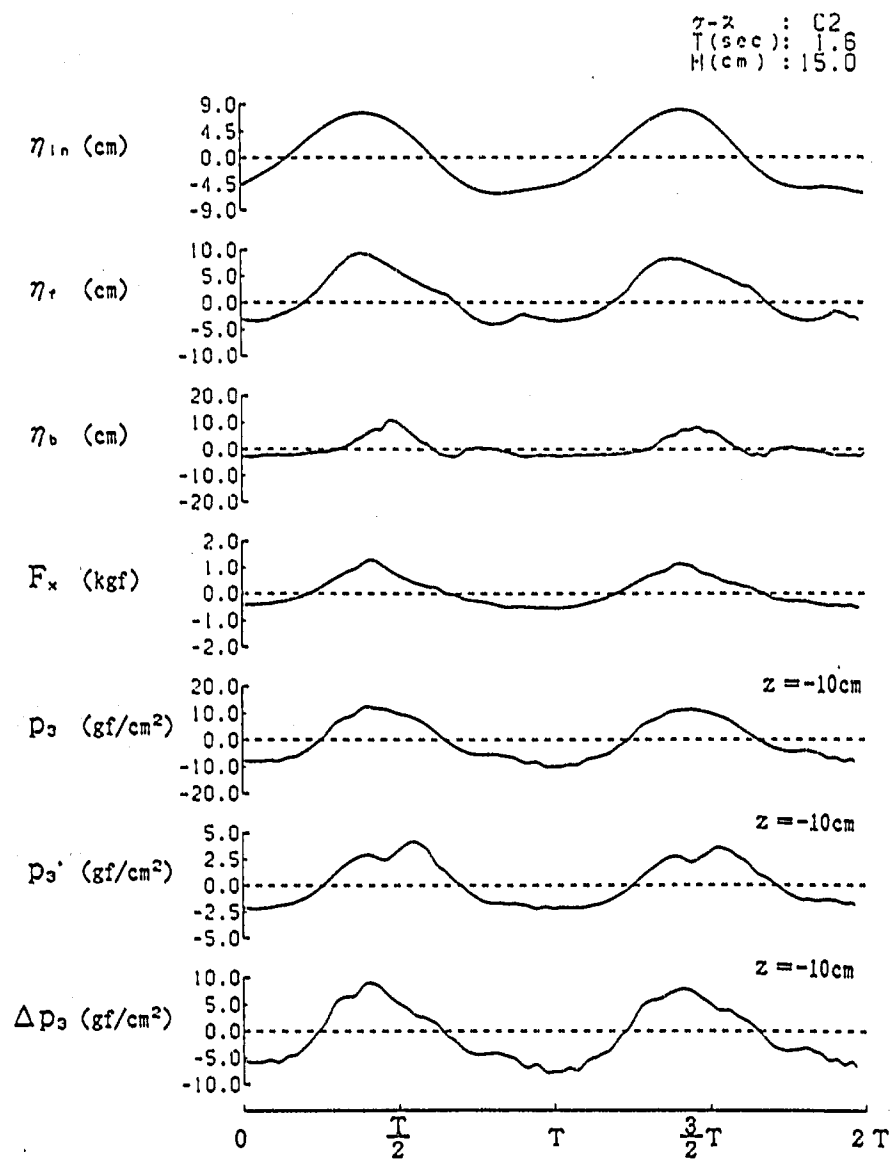
付図-32  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(S2B模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



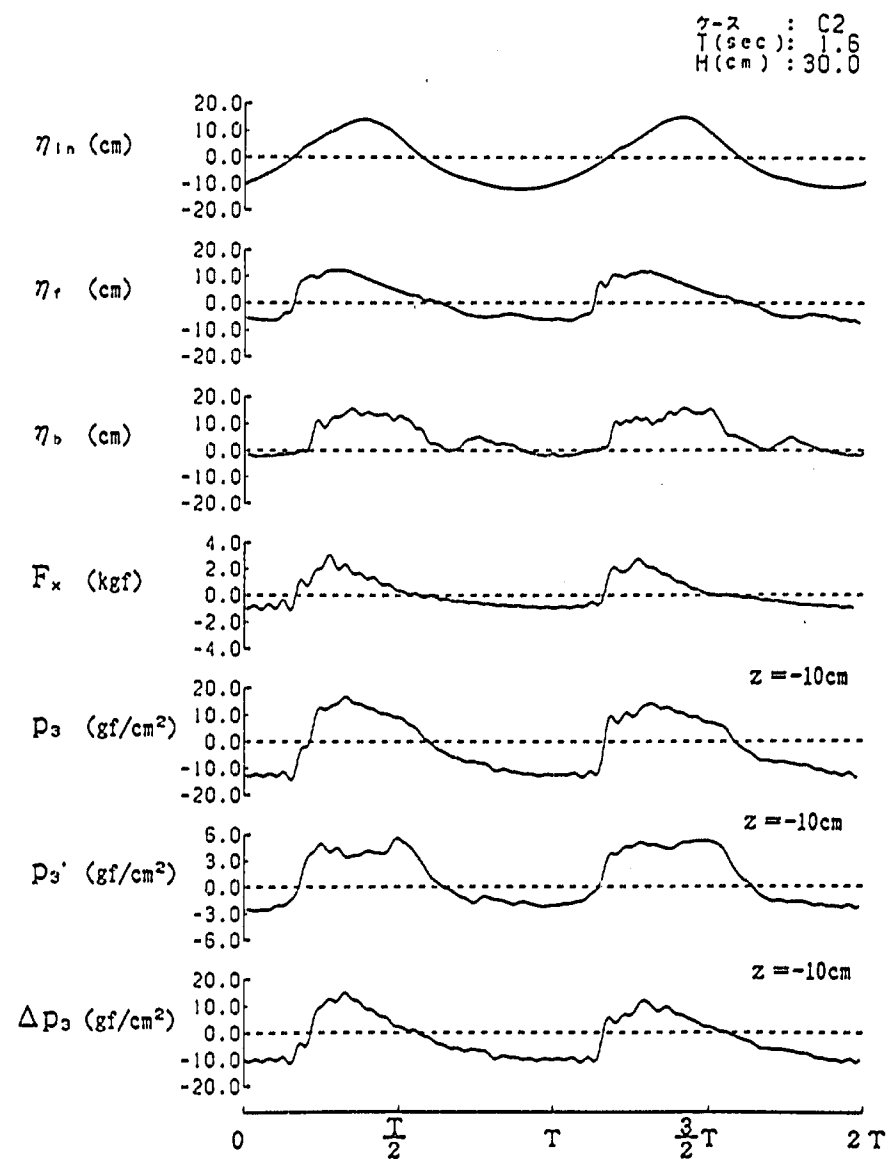
付図-33  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(S2B模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



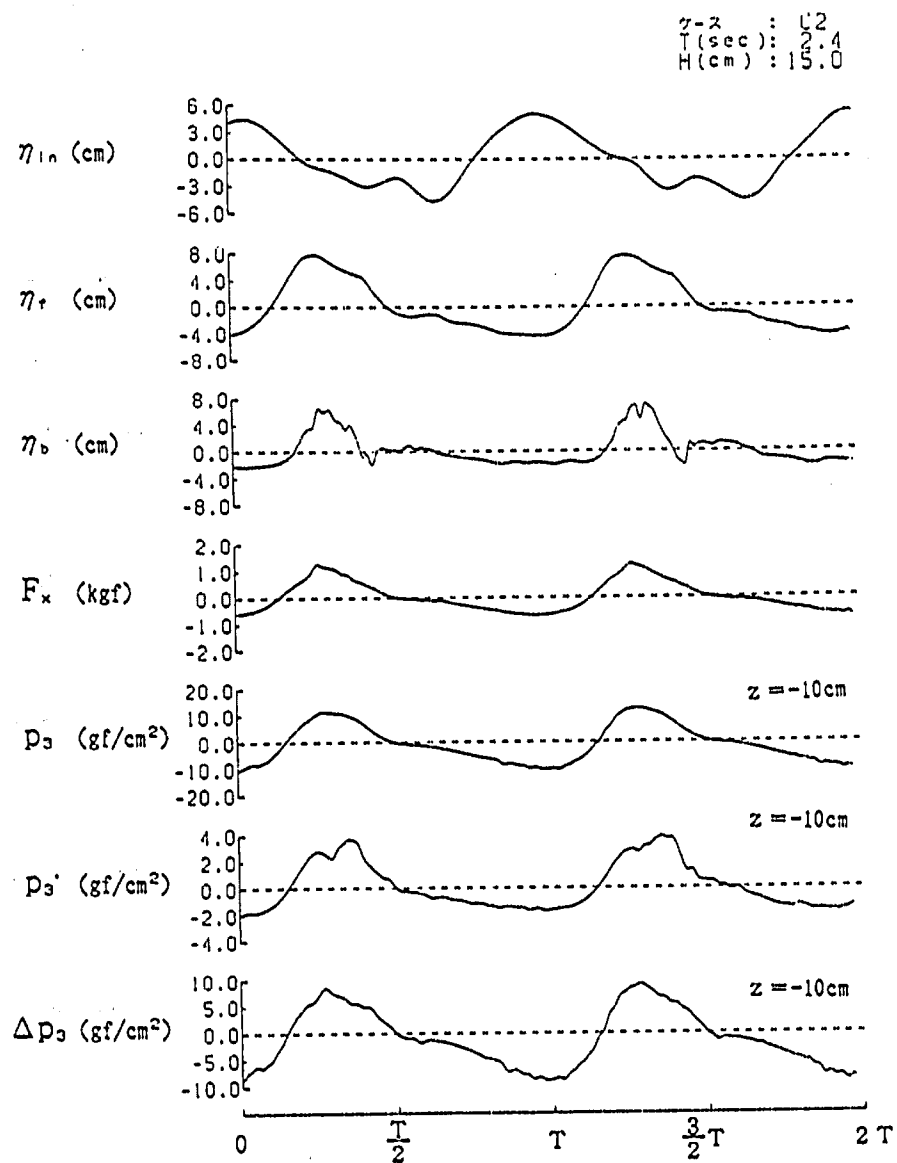
付図-34  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(S2B模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



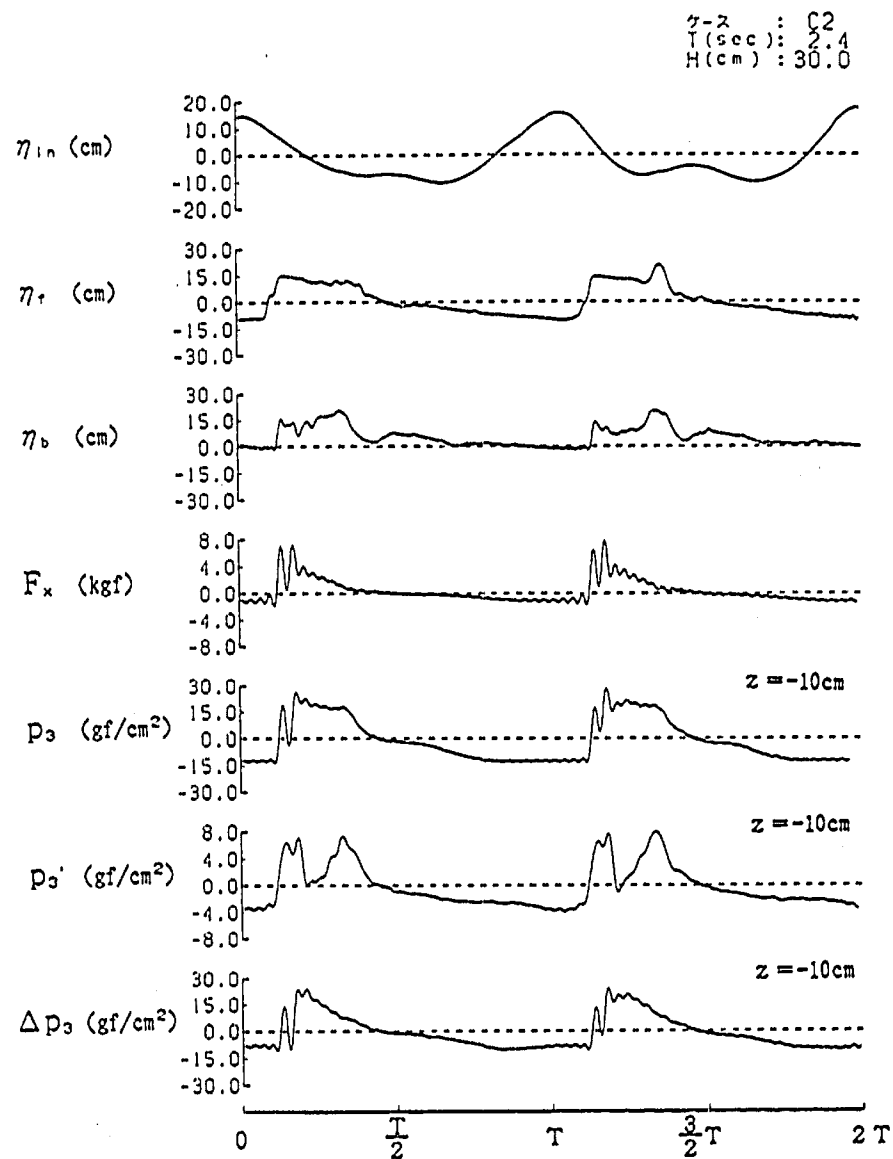
付図-35  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C2模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



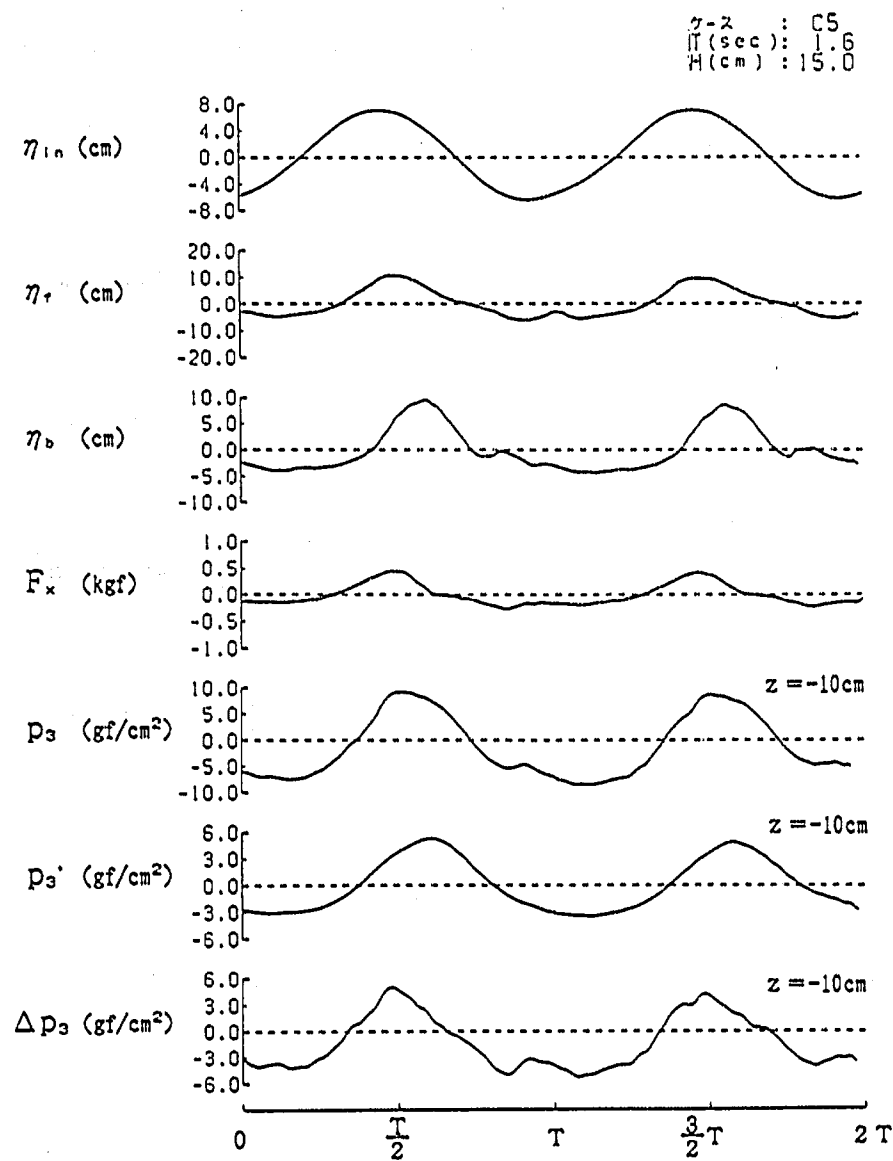
付図-36  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C2模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



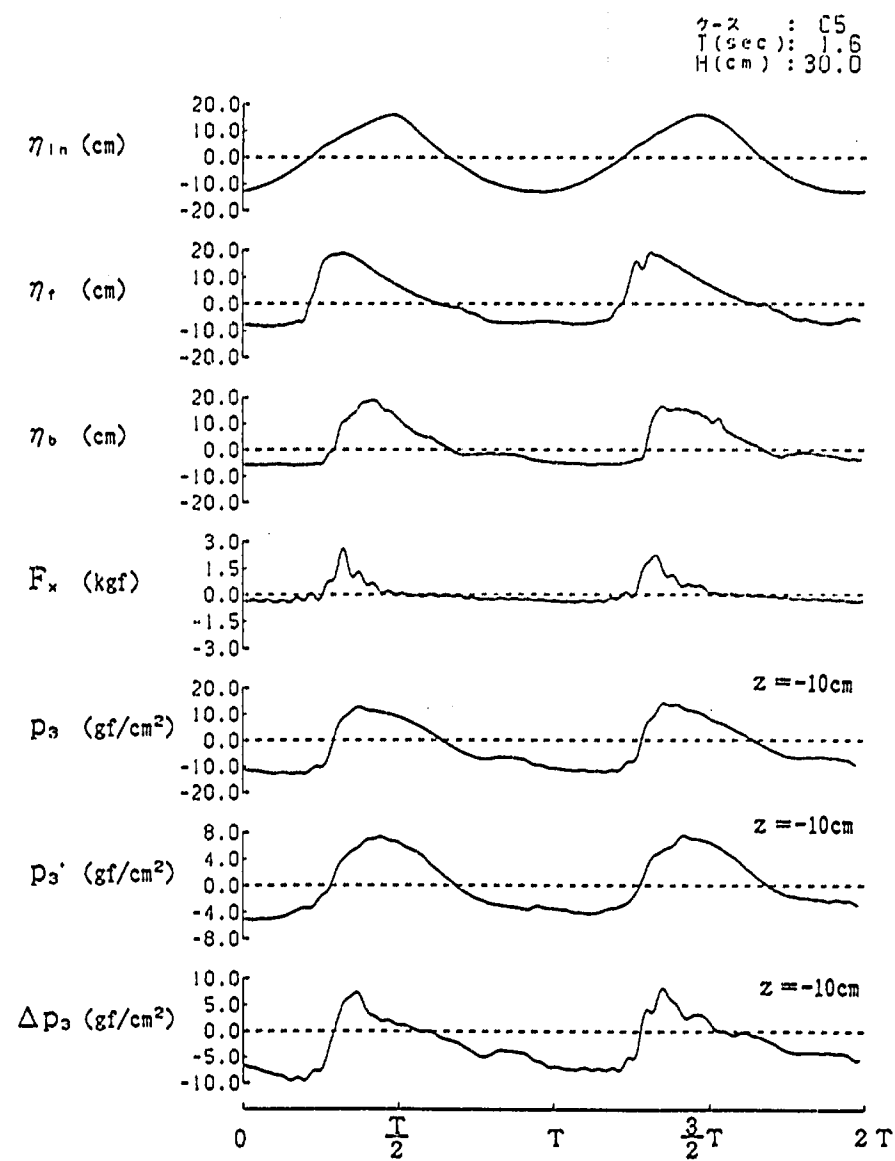
付図-37  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(C2 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



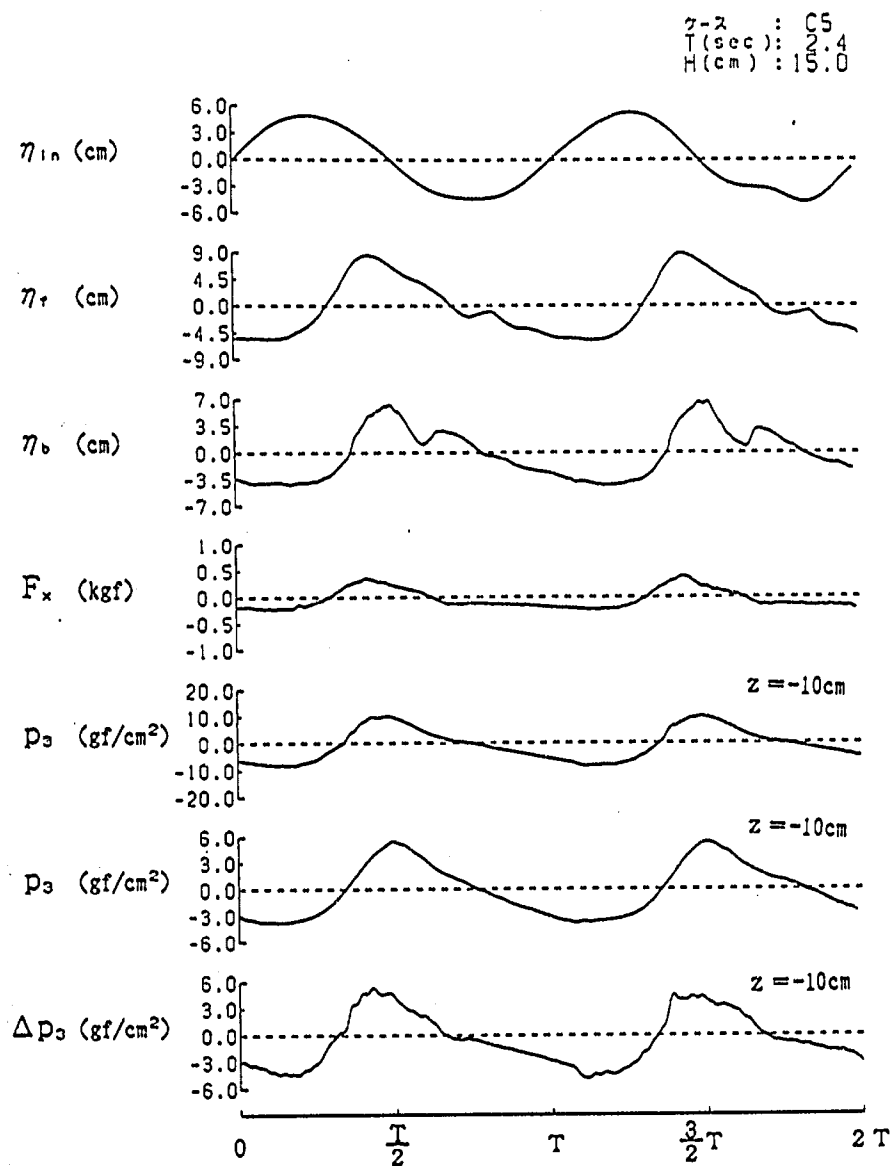
付図-38  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(C2 模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



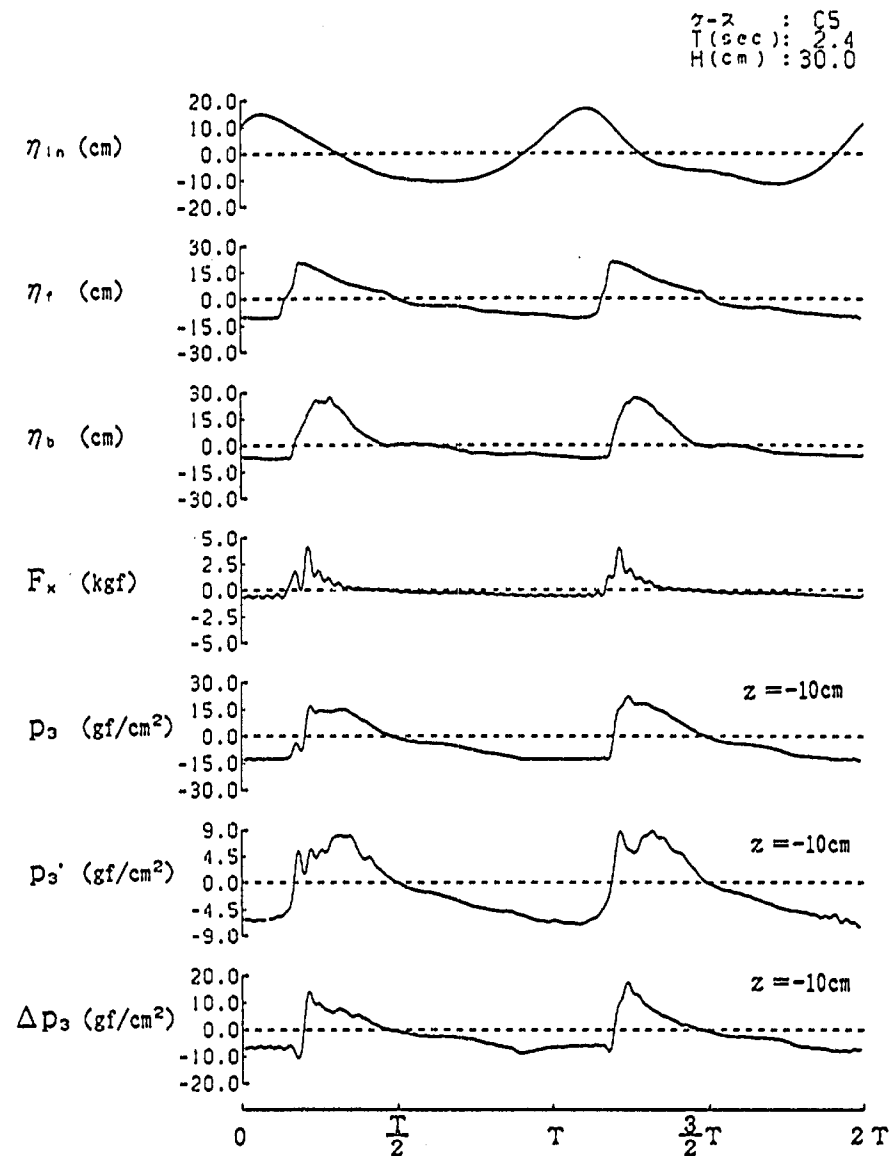
付図-39  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C5 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



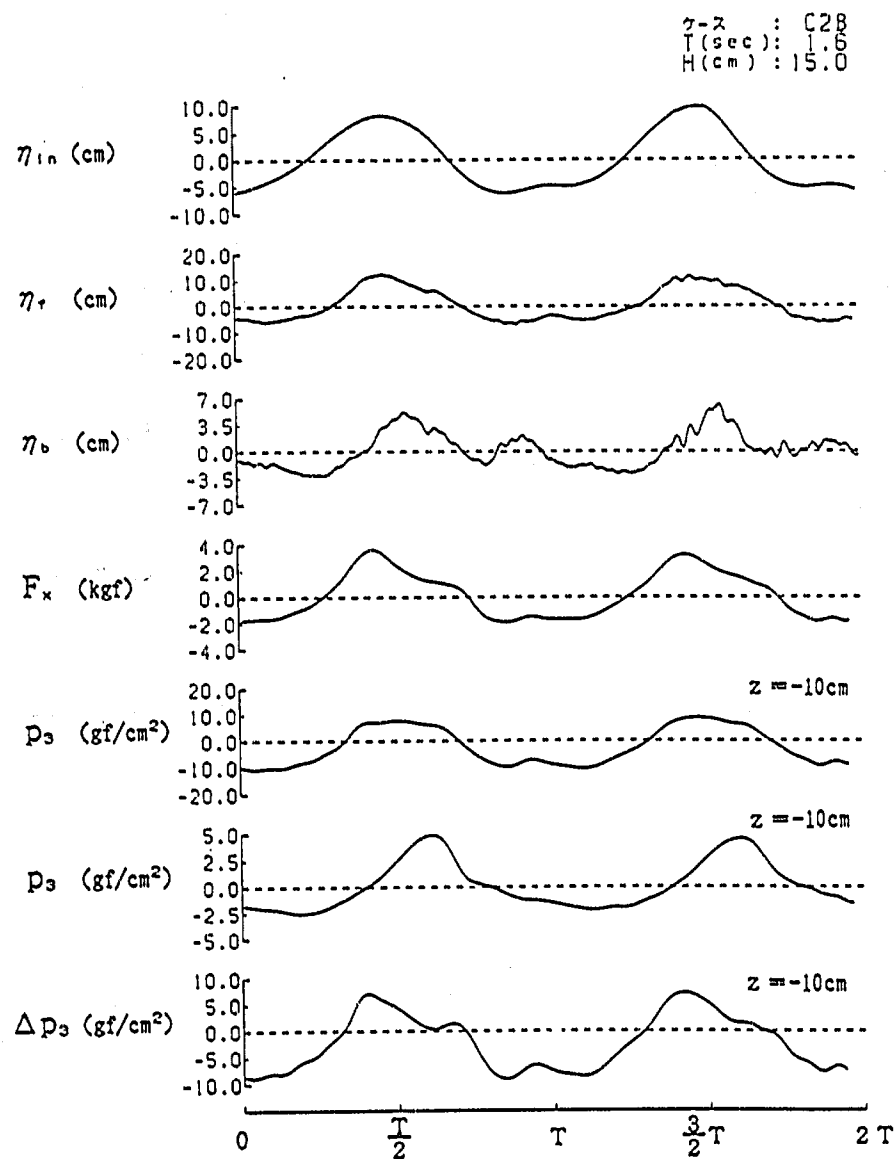
付図-40  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C5 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



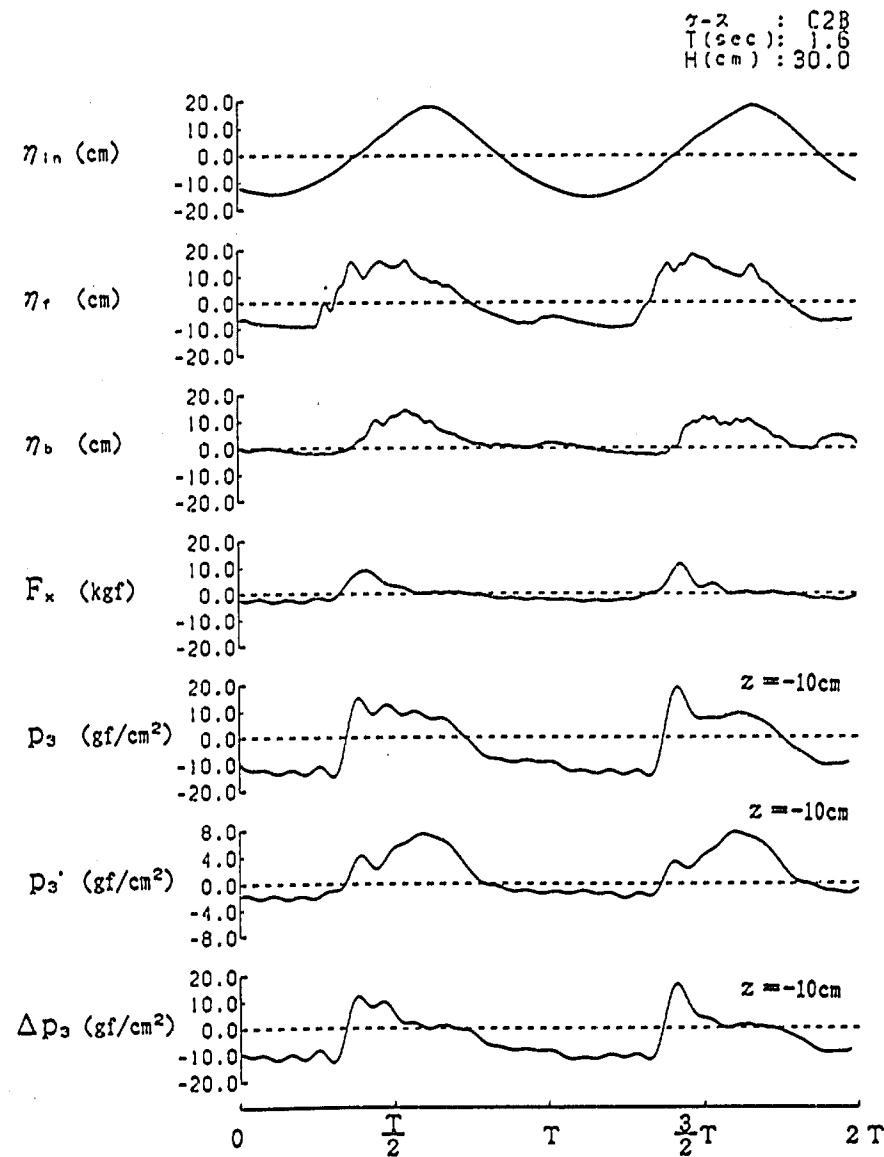
付図-41  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C5模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



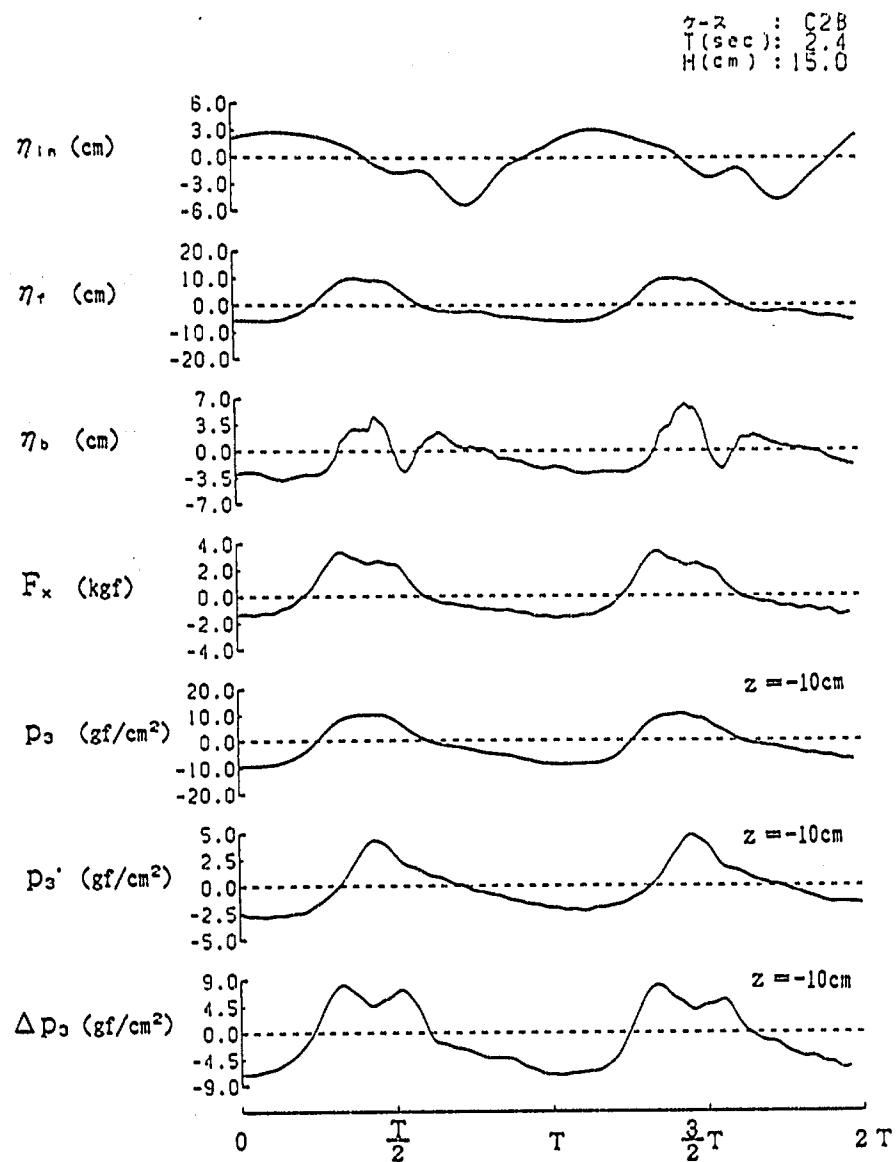
付図-42  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C5模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



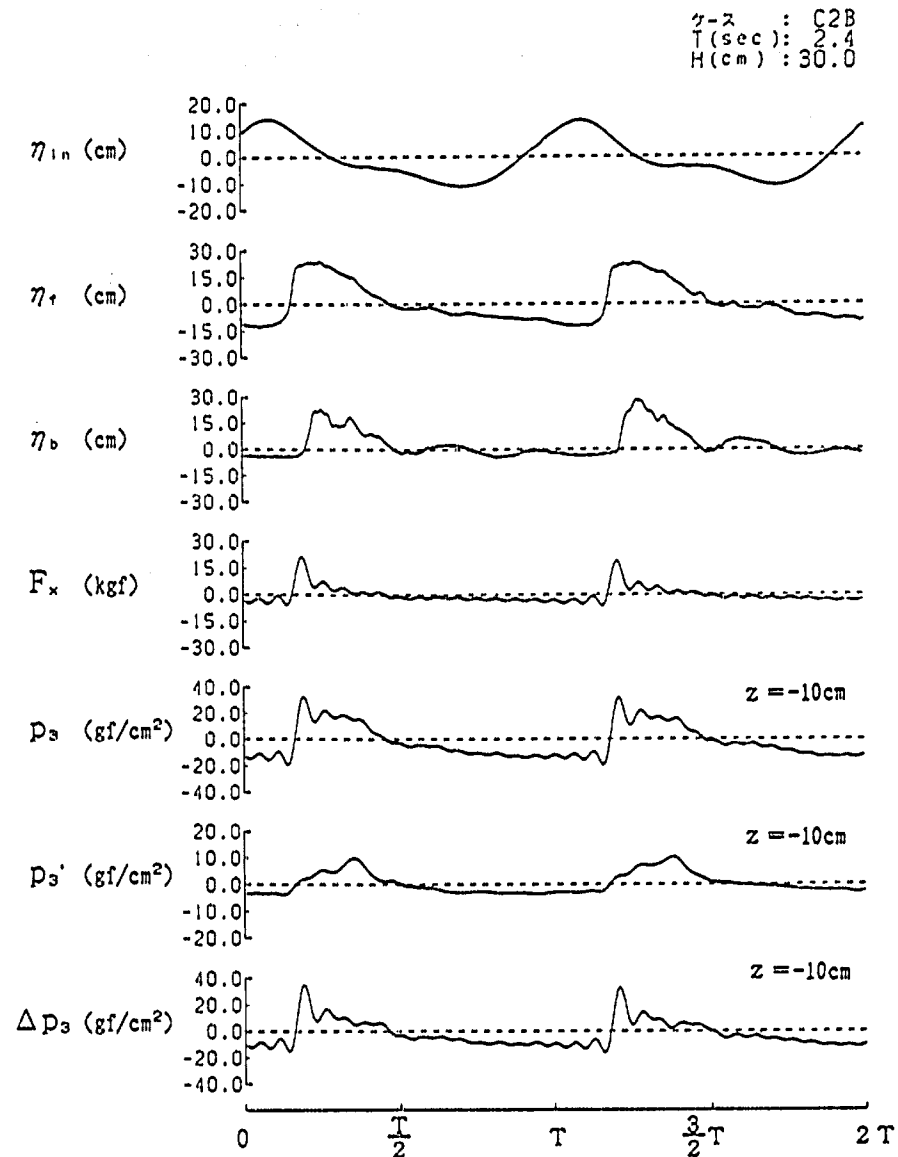
付図-43  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C2B模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



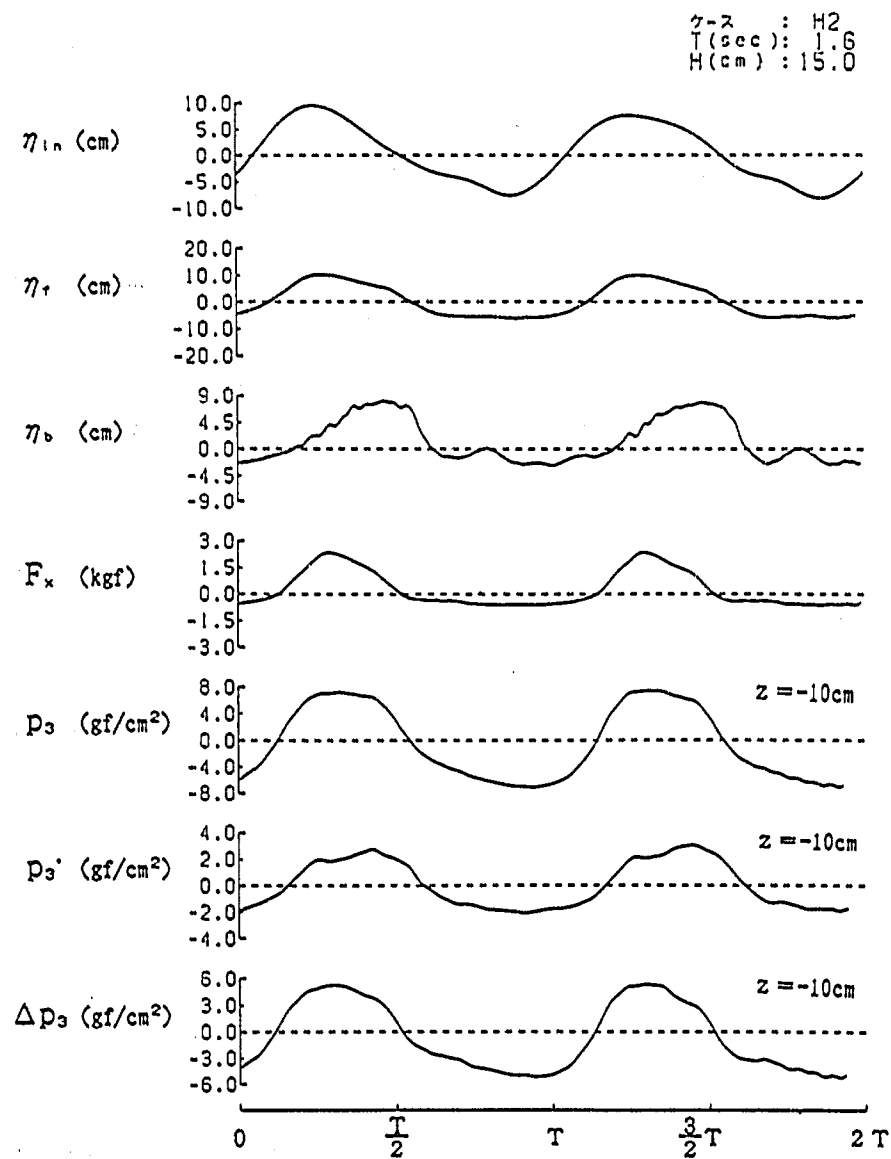
付図-44  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C2B模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



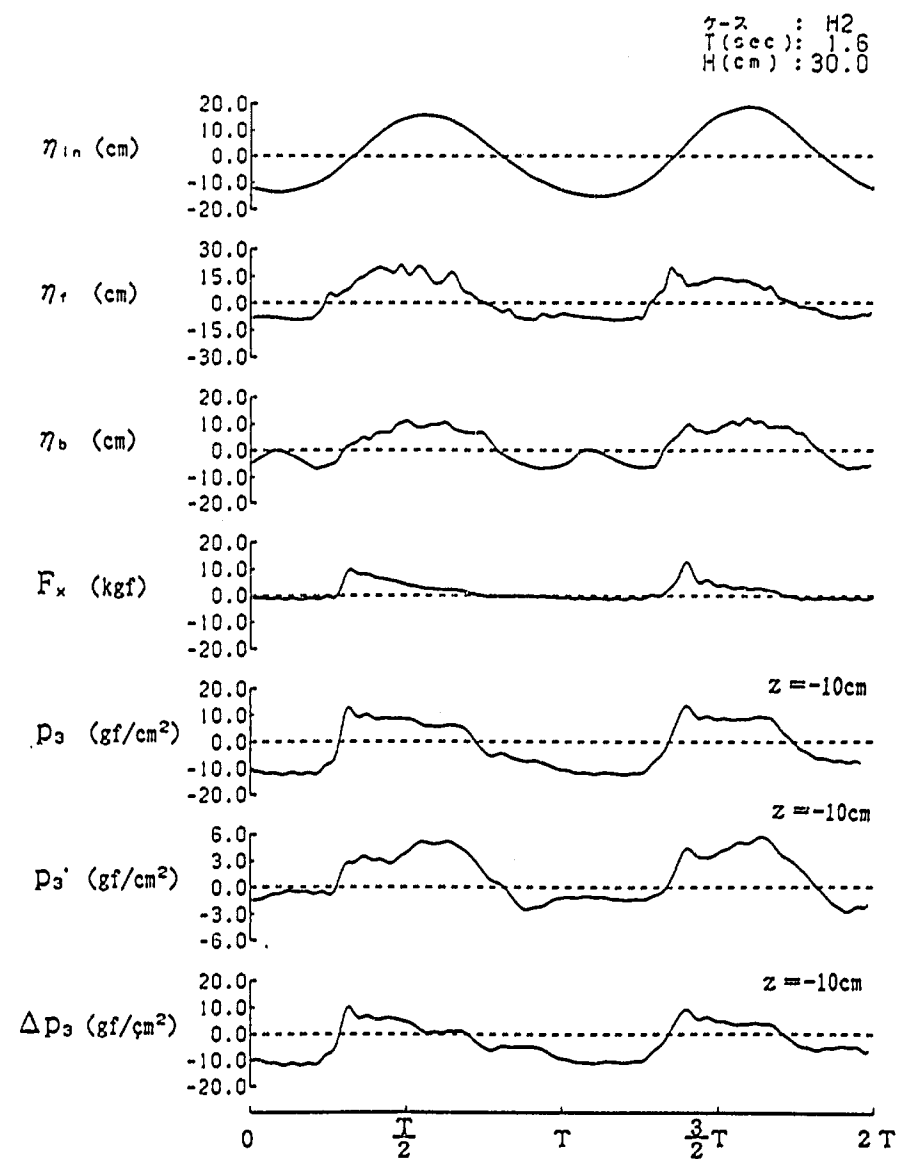
付図-45  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C2B模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



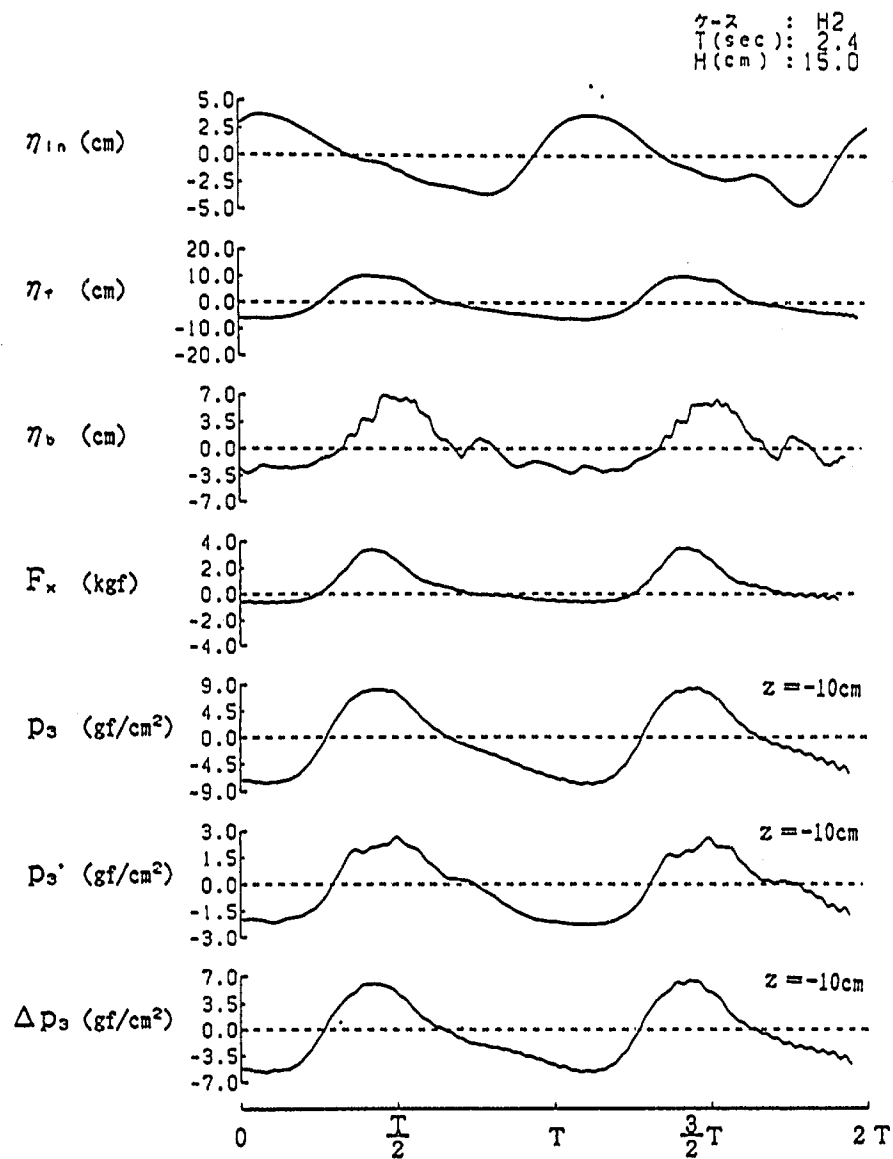
付図-46  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(C2B模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



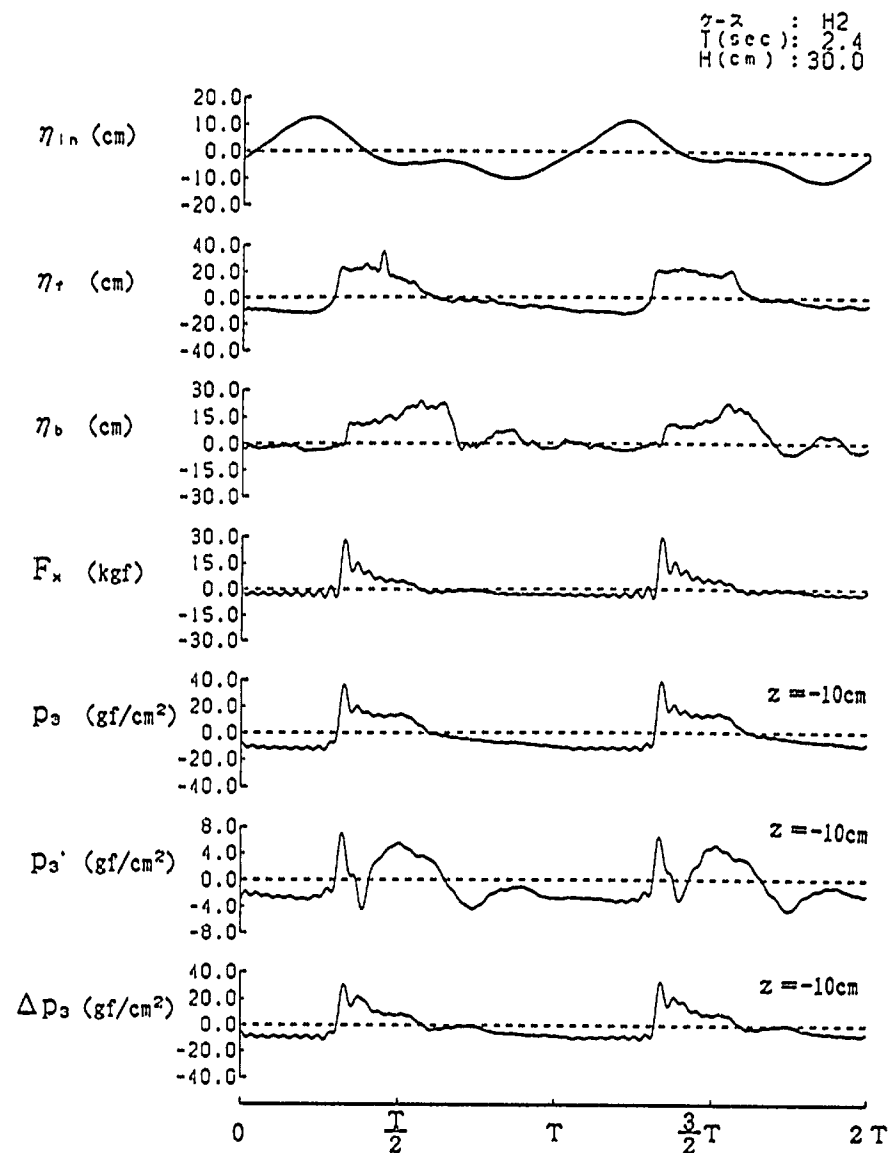
付図-47  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(H2 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



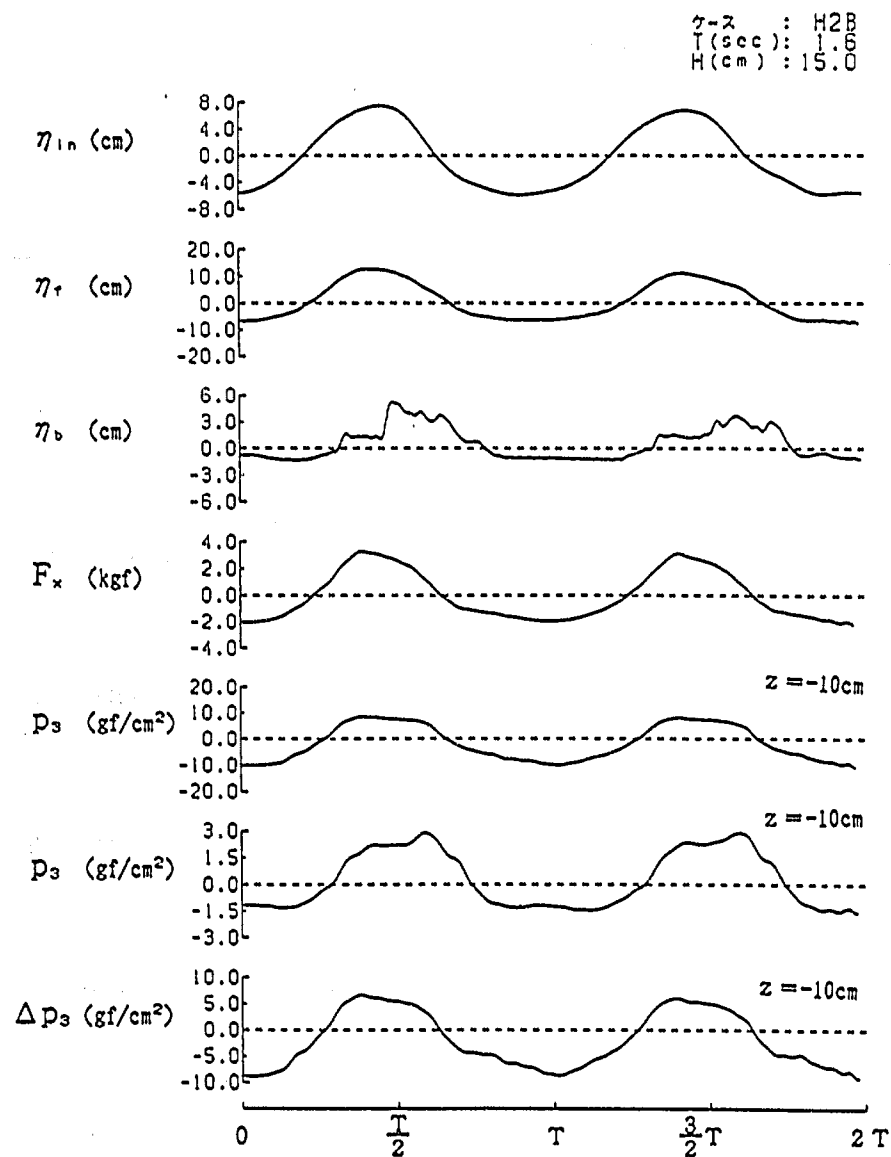
付図-48  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$  の時間波形  
(H2 模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



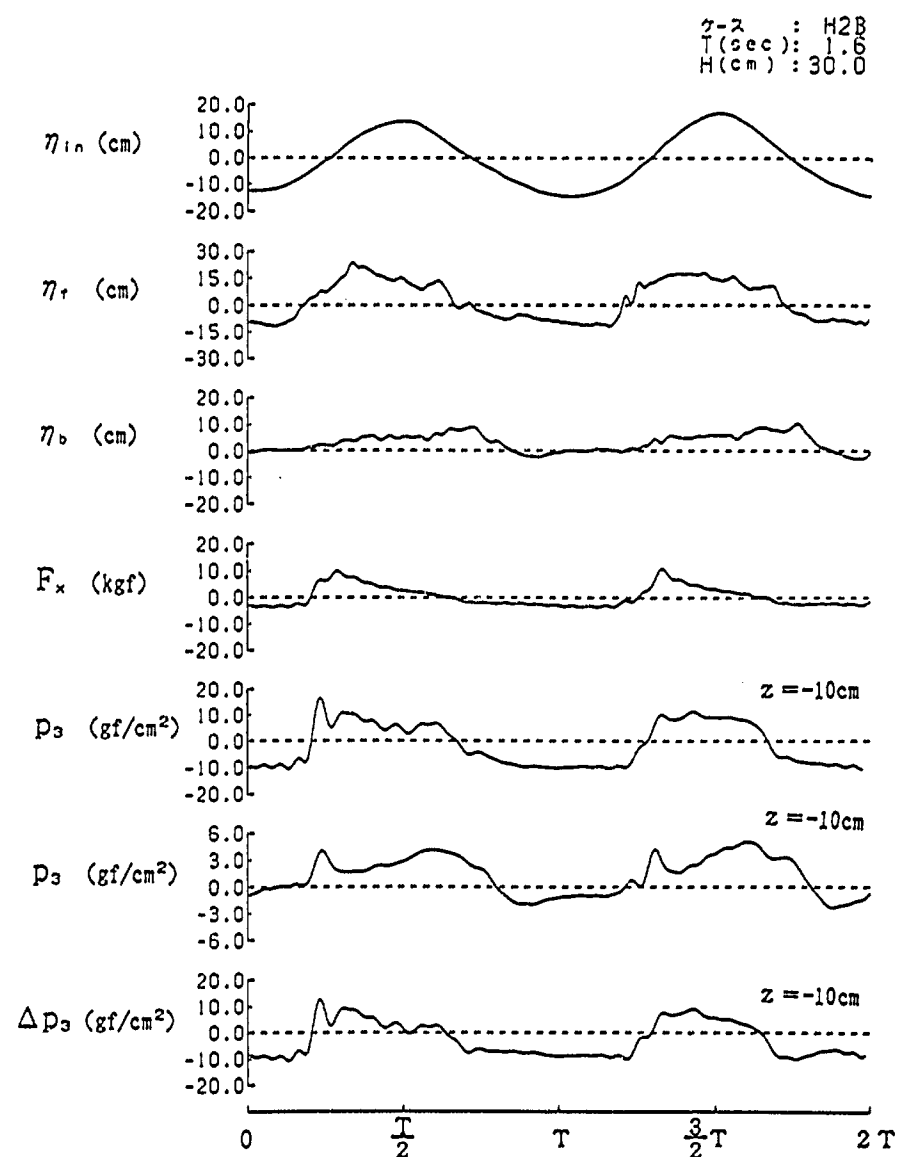
付図-49  $\eta_{1n}$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p'_3$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(H2模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 2$ )



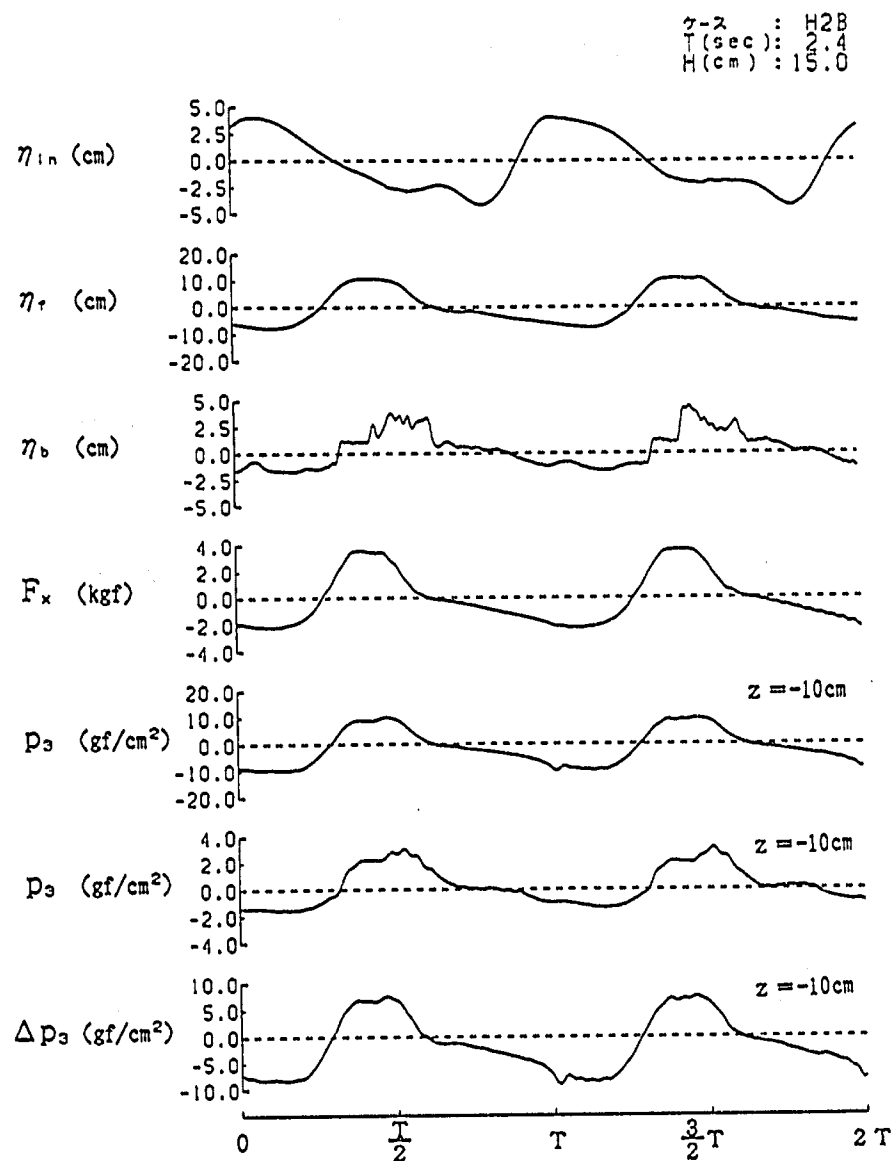
付図-50  $\eta_{1n}$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p'_3$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(H2模型,  $T = 2.4$  s,  $h/H = 1$ )



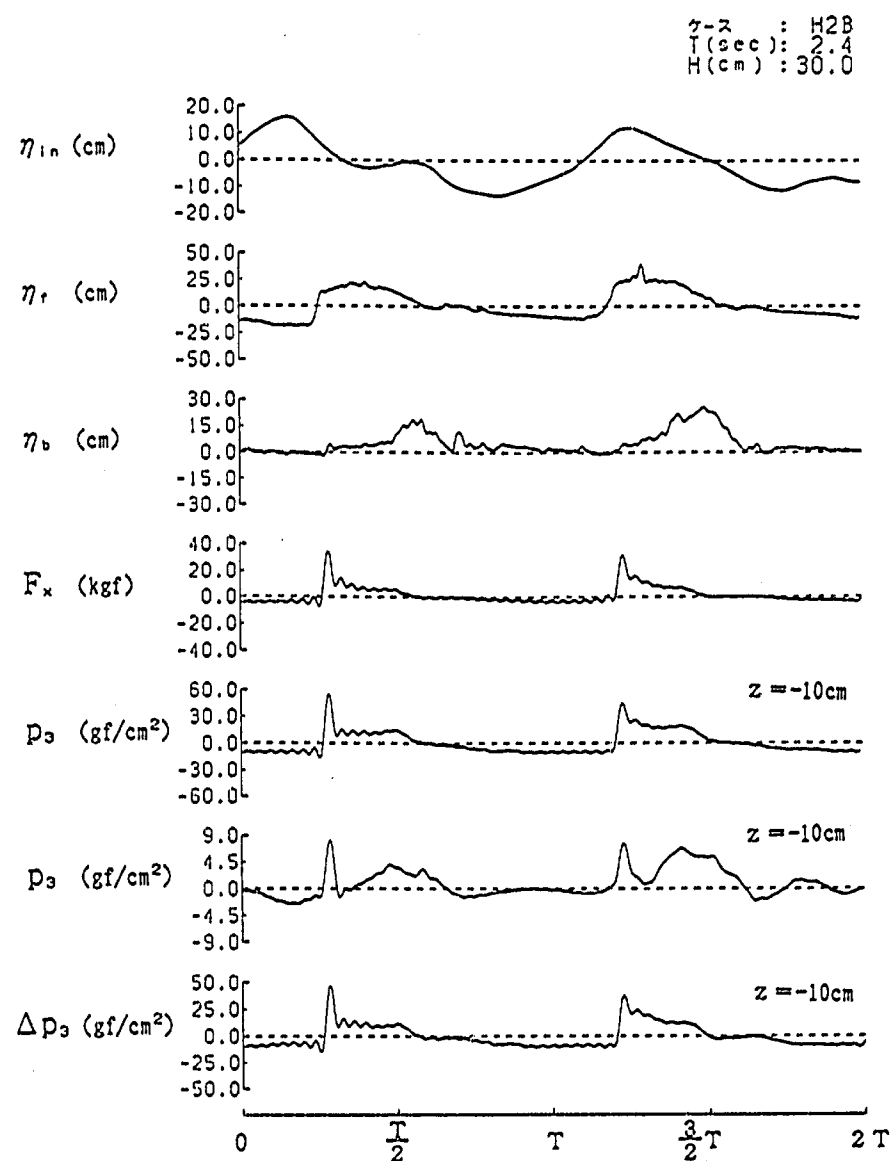
付図-51  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(H2B模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 2$ )



付図-52  $\eta_{in}$ ,  $\eta_f$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(H2B模型,  $T = 1.6$  s,  $h/H = 1$ )



付図-53  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(H2B模型,  $T=2.4$  s,  $h/H=2$ )



付図-54  $\eta_{in}$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_b$ ,  $F_x$ ,  $p_3$ ,  $p_3'$ ,  $\Delta p_3$ の時間波形  
(H2B模型,  $T=2.4$  s,  $h/H=1$ )

スリット型消波構造物の  
消波および波力特性  
に関する実験的研究

I S S N 0386-5878

土 研 資 料 第2891号

平成2年8月(1990)

宇多 高明, 小俣 篤  
川村 哲也

要 旨

スリット型消波構造物の消波および波力特性について、スリットの空隙率と部材形状に着目しつつ検討した。角柱列から成るスリットの消波・波力特性に関しては、スリットの空隙率を0.3より小さくすると碎波力が増大することが見出された。碎波が作用する場合、空隙率を小さくしても透過率は低下せず、逆に波力は増大することから、構造物に碎波が作用しうる条件下では空隙率を0.3以上とすることが望ましいことが指摘された。円柱列スリットは角柱列スリットに比べ重複波領域では波力は同等であるが消波効果が高く、また碎波領域ではほぼ同等の消波効果を有するにもかかわらず、作用波力が小さいことが分かった。横スリットは角柱列スリットと作用波力が同程度であるが、大きなエネルギー損失を生じさせることも指摘された。横スリットでは空隙が鉛直方向に並んでいるので、個々のスリットより生ずる斜難渦は一様でなく、このため流体の鉛直混合が激しく、大きなエネルギー損失が生ずると考えられる。さらに、服部(1971)の消波効果算定モデルを改良し、種々の空隙率・形状を有するスリット型構造物の透過率、反射率、作用波力を計算する方法を導いた。本研究で開発したモデルによれば、消波・波力の実験結果の合理的な説明が可能である。

キーワード：海域制御構造物、水理模型実験、消波機能、波力特性、波力算定モデル

郵便はがき

郵便切手を  
はって下さ

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地  
建設省土木研究所  
海岸研究室  
行

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2891号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印