

土木研究所報告

第 108 号

-
- 綾北ダム構造模型実験……………村 幸雄, 中村慶一, 大久保忠良, 飯田隆一…(1)
- γ-線透過法によるコンクリートの材料分離現象の測定 (第二報)
……………有泉 昌, 近藤 紀, 森 芳徳…(35)
- 河川の分流に関する研究 (7)
- 渡良瀬川ショート・カットの水理模型実験——
……………吉川秀夫, 芦田和男, 金子 保…(59)
- ダムの基礎改良に関する一力学的考察
……………村 幸雄, 中村慶一, 大久保忠良, 飯田隆一…(89)
- 狩野川放水路河口部模型実験報告
……………吉川秀夫, 芦田和男, 丸田和也, 丸野 喬…(115)
-

昭和 36 年 4 月

建設省土木研究所

綾北ダム構造模型実験

村 幸雄*・中村慶一**・大久保忠良***・飯田隆一****

(昭和 35 年 7 月)

要 旨

本報告は宮崎県企業局の依頼により行われた綾北ダムの設計計算および構造模型実験の報告書である。本報告には各種荷重時の計算結果と構造模型実験結果とが述べられており、最後に計算値と計算値との差について述べられている。

目 次

1. 総 説	(1)	3. 設計計算	(18)
2. 構造模型実験	(1)	〔1〕 設計条件	(18)
〔1〕 相似律および模型材料	(1)	〔2〕 設計計算 (1)	(19)
〔2〕 材料試験	(2)	〔3〕 設計計算 (2)	(23)
〔3〕 載荷装置	(4)	4. 実験値と計算値との比較	(24)
〔4〕 掃み測定	(4)	〔1〕 変位の比較	(28)
〔5〕 応力測定	(6)	〔2〕 応力および断面力の比較	(29)
〔6〕 光弾性実験	(13)	5. 結 論	(33)
〔7〕 破壊試験	(17)		

1. 総 説

綾北ダムは大淀川支流に位し、洪水調節、発電、灌漑等を目的とした多目的ダムである。建設地点はほぼ対象は急峻な谷を形成しており、天端階間と高さとの比は2.53という比較的深いV字形の谷を形成している。地質は右岸は砂岩、左岸は粘板岩よりなり、河床及び谷の下部は堅牢な岩よりなっているが上部に行くに従ってクラックおよび細かな風化層が多くなっている。これらの地形的、地質的条件を考慮した上で薄いアーチダムの建設が可能であると考えられたので、薄いアーチダムの建設が計画された。

現在アーチダムの解析方法として試算荷重法を初めとしていくつかの方法があるが、あるものは簡単ではあるが近似度が悪く、あるものはかなりの近似度は得られるが極めて労力を要する。その上最も精度のよいと云われる試算荷重法も多大な労力と時間を要するにも拘らず、基礎岩盤の変形の算定等に多くの仮定が存在するために、未だ実験結果とかなり異なった結果を与えているのが現状である。したがって本地点の設計方針としては模型実験結果を主体として考え、計算は実験には加味し得ない荷重たとえば地震荷重、温度荷重等が作用した場合の応力の動きを推定する手段として行なった。

2. 構造模型実験

〔1〕 相似律および模型材料

一般に模型実験の相似律は実物と模型実験との間に

- i) 応力歪の関係が相似的事であること
- ii) 破壊機構が同一であること

の条件が満足されている場合に成立する。第一の条件をさらにくわしく述べれば、実物の材料と模型材料との間で応力歪曲線が相似形であり、Poisson比が等しく塑性変形に対する特性も相似であり、さらに実物の材料が方向性を持つ時は模型材料も相似的に方向性を持つ必要がある。しかし目的を弾性領域内に限るならば応力の発生する範囲内において弾性的であり、Poisson比が等しく、方向性が相似的事であるという条件に緩和される。さらに実際の構造物が等方性体であると見なうときは方向性に対する条件も削除される。才二の条件は破壊実験を行なう場合にのみ必要なものであって、実験を弾性領域内に限るときは不必要なものである。

外荷重のみを対称とするときはその相似関係を示すと

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{G}{n} \sigma_p \\ \delta_m &= \frac{G}{n^2} \frac{E_p}{E_m} \delta_p \\ \varepsilon_m &= \frac{G}{n} \frac{E_p}{E_m} \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

* ダム部長 ** ダム部ダム構造研究室長
*** 材料構造部構造研究室長 **** ダム部ダム構造研究室研究員

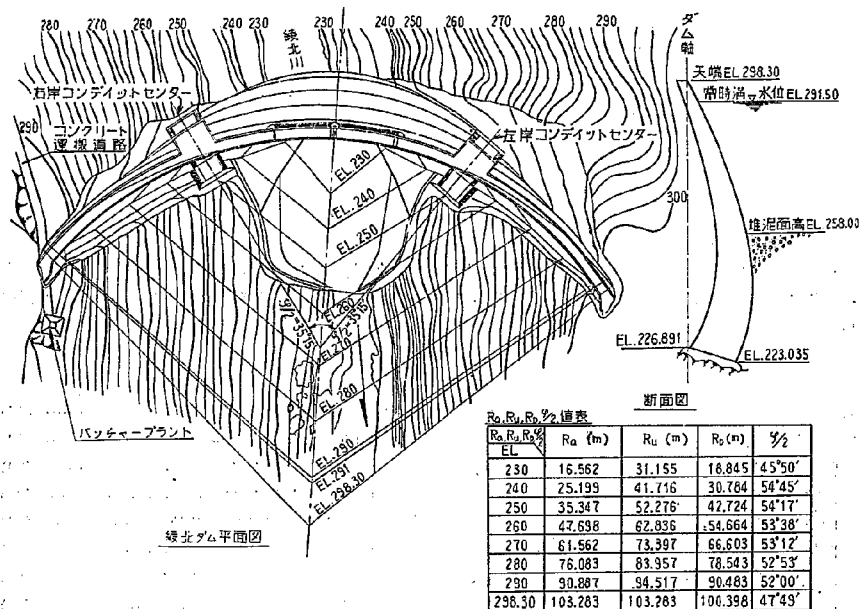


図-1 綾北ダム平面図

ここに、 σ_m , δ_m , ε_m , E_m はそれぞれ模型の応力、たわみ、歪、弾性係数を示し、 σ_p , δ_p , ε_p , E_p はそれぞれ実物の応力、たわみ、歪、弾性係数を示すものとする。また $1/n$ は縮尺、 G は模型と実物の荷重強度の比とする。

図一般に応力測定は歪測定により行なわれるため十分な精度をもって測定されるためには、さらに模型材料の弾性係数が低いことという条件がつけ加えられてくる。このような条件を満足するものとして従来用いられて来た材料としては、

- i) 軽石コンクリート
- ii) 石屑と珪藻土との混合物
- iii) 樹脂

などがあげられる。この中、軽石コンクリートは前に述べた相似条件を完全に満足しており、模型材料としては理想的なものであり、クラック・塑性変形が生じた後の応力分布の測定および破壊試験も行なえる材料である。しかし弾性係数を $20,000 \text{ kg/cm}^2$ 以下にすることが困難であり、このため模型が大型化し荷重装置も大きくなる。

石屑と珪藻土との混合物は Poisson 比、破壊強度と弾性係数の比、および圧縮強度と引張強度との比はコンクリートのそれとはほぼ同一である。また、その弾性係数は $100,000 \text{ kg/cm}^2$ から $9,000 \text{ kg/cm}^2$ まで配合を変えることにより、自由に变化できる利点をもっている。このため軽石コンクリートの場合よりも模型を小型化すること

が可能であり、模型材料としては最も多く用いられているが、その応力、歪曲線はコンクリートのそれよりもやや直線的であり、供試体の破断面から見ると、破壊機構はコンクリートのそれと違っているようである。このため石屑と珪藻土との混合物は実験の主目的を弾性領域内の応力測定におくときは、最も優れた材料であるが、破壊実験に用いるにはやや疑問の点が存在する。

樹脂は一般に Poisson 比がコンクリートに比して大きく、塑性変形もかなり大きいため厳密には相似律を満足していないが、他の材料に比して低い弾性係数のものが得られやすいので予備的な段階で行なう小型の模型実験に適している。

以上述べたように従来用いられて来た材料は一長一短あり、実験の目的と規模に応じて選択されるのが一般であるが、本実験で計画されたような $1/100$ 程度の模型実験では石屑と珪藻土の混合物が最も適していると思われるのでこれより行なうことにした。

(2) 材料試験

(a) 予備材料試験

前にも述べたとおりアーチダムの応力分布は岩盤の弾性係数の影響を強く受けるので、模型のダム本体および岩盤の弾性係数をできるだけ実際の状況に合せてやる必要があるとてくる。予備材料試験は配合を種々変えた時の強度および弾性係数の変化する度合いを調べるため行なった。

元米石粉と珪藻土の混合物は弾性係数および強度を変える要素としては、水量と珪藻土の量とがある。しかし J I S の規格によれば水中に焼石膏の粉末を少量ずつ散布しながら水中に沈め、余剰の上澄水が全くなかったとき石膏と水量との比を標準水量と定めているが、当研究室で行なった試験結果によると、水量が標準水量より多いときは、材料の分離が多くなる傾向を示していた。また当研究室に行なった材料試験の結果を観察するに、珪藻土は直接弾性係数に影響を与えておらず、むしろ材料の分離を増加させずに混合する水量を増加させる働きが主であるように考えられた。そこで珪藻土の量により強度および弾性係数を変化させ、水量はおおのの焼石膏と珪藻土の混合物の標準水量になるように調整して行なった。その結果を示せば図-2(a)のごとくである。この結果を用いて次の配合を決定した。

(b) 本材料試験

予備材料試験の結果にもとづいて決定された配合に従って模型が打設された。この際ダム本体に対してはφ50×100mmの供試体10本φ100×200mmの供試体5本をとり岩盤に対しては各配合に対し3本ずつφ50×100mm

の供試体を取り、材料試験を行なった。φ50×100mmの供試体は弾性係数測定および圧縮強度の測定に用い、φ100×200mmの供試体は引張強度の測定に用いた。

弾性係数の測定は模型実験では載荷後15分たってから

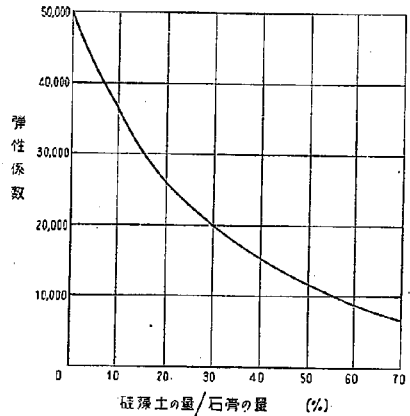


図-2 (a) 予備材料試験

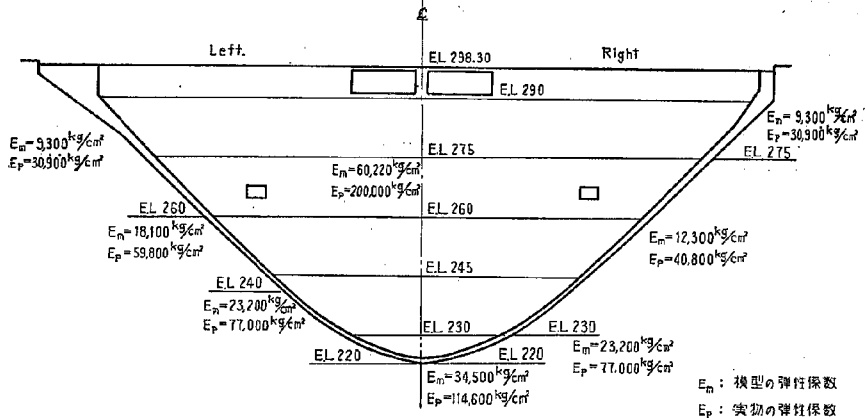


図-2 (b) 綾北ダム岩盤及び堤体の弾性係数

表-1 配合表

	目標とした実物の弾性係数	目標とした模型の弾性係数	珪藻土の量 石膏の量	水 量 (石膏)+(珪藻土)
ダム本体	200,000kg/cm²	50,000kg/cm²	0%	1/1.5
岩盤 EL 220m 以下	120,000 "	30,000 "	15 "	1/1.41
左岸 240m~220m	90,000 "	22,500 "	25 "	1/1
右岸 230m~220m				
左岸 260m~240m	50,000 "	12,500 "	48 "	1/0.82
右岸 275m~230m	40,000 "	10,000 "	56 "	1/0.76
右岸 300m~260m	30,000 "	7,500 "	70 "	1/0.72
左岸 300m~275m				

表-2 材料試験結果

	弾性係数 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	Poisson 比
ダ ム 本 体	60,220	82.25	14.58	0.207
岩盤 EL 220m 以下	34,500	70.15	—	—
“ 左岸 240m~220m	23,200	48.09	—	—
“ 右岸 230m~220m			—	—
“ 左岸 260m~240m	18,100	31.30	—	—
“ 右岸 275m~230m	12,300	20.61	—	—
“ 左岸 300m~260m	9,300	18.44	—	—
“ 右岸 300m~275m			—	—

測定が行なわれるとの前提にたち、15分間の Creep を含めた弾性係数を測定するように、荷重をかけた後15分間放置して歪を測定し、その歪の差からその荷重に対する歪を決定するという方法をとった。

試験結果を示せば表-2 および図-2 (b)のごとくである。

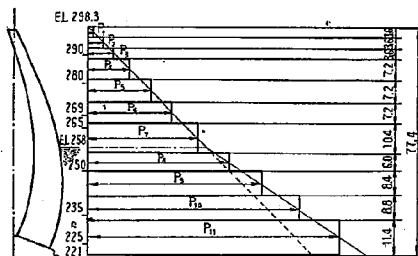
〔3〕 載荷装置

相似律によれば模型に生ずる歪と実物に生ずる歪とが等しい時に測定を行なうのがよいとされている。しかし、石屑と珪藻土との混合物は前にも述べたように応力歪曲線はコンクリートよりも直線的であるので模型に生ずる歪の方がやや大きくなってもさしつかえないと考えられる。一方、歪測定に用いられる電気抵抗線歪計は $\pm 20 \times 10^{-3}$ 程度の誤差が生じうるが、模型に生ずる歪と実物に生ずる歪とが等しい時はこれが実物の応力に換算して $\pm 20 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^8 = \pm 4$ (kg/cm²) の誤差に相当する。この測定誤差をできるだけ小さくし、相似律からくる条件をできるだけ満足するようにするためには、 ϵ_m/ϵ_p を 1.5~2.0 程度にとることが望ましい。

載荷装置としては液体によるものが最も理想的であるが、最も比重の大きい水銀を用いても

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_p} = \frac{G}{n} \cdot \frac{E_p}{E_m} = \frac{13.6}{100} \cdot \frac{200,000}{60,220} = 0.45$$

となり、極めて小さい。したがって液圧以外の載荷を考える必要が生じた。従来液圧以外の載荷方法としては oil jack による方法が行なわれている。しかし、oil jack により載荷するときは荷重が上流面全体に分布して作用せず、一部に集中して作用するため上流面応力が乱れる恐れがある。そこで本実験を行なうに当って特殊な載荷装置を考案して行なった。すなわち、模型の上流面に沿って水平な11個の Chamber を仕切り各アーチ型の Chamber にゴムチューブを入れ、これに油を送入して加圧する方法である。液体で載荷したときは荷重分布は三角形であるが、この方法によると荷重分布は階段状になっている。(図-3 参照) この影響を消すために、ゴムチューブを直接堤体上流面に接触させずに、その間に厚さ 2 cm のスポンジを挿入した。これらのゴムチュ



$P_1:P_2:P_3:P_4:P_5:P_6:P_7:P_8:P_9:P_{10}:P_{11} = 1:3:5:8:12:16:21:27:33:40:48$

図-3 緩北ダム荷重分布図

ープに送られる油は単一のオイルポンプから特殊な減圧弁を通して自動的に変圧して送られ各層間の圧力は一定比に保たれるようになっている。この方法によれば荷重はその液体の比重が変化するような形で任意に調整することが可能であり、液体に近い形で上流面全体に分布させて作用させることができる。

本実験においては外荷重としては静水圧の他に堆砂圧も作用せしめ、静水圧は異常最高水位に対して行なった。なお自重は荷重として加圧されずに計算で加味することにした。

本実験での荷重強度は

$$G = 49.8$$

であった。したがって歪測定の誤差が $\pm 20 \times 10^{-3}$ あるとして実物の応力に換算して 2.4 kg/cm^2 の誤差が生じることになる。

〔4〕 撓み測定

撓み測定としては、半径方向変位、接線方向変位、鉛直軸のまわりの回転、鉛直方向変位、接線軸のまわりの回転に対して行なった。

測定は1/100mmおよび1/1,000mmのダイヤルゲージにより行なった。測点は堤軸すなわち標高 298.30m の上流面に沿って 16m 間隔に片持梁要素をとり、これと標高 290, 275, 260, 230, 225m のアーチ要素との交点を測点とした。

なお変位測定はコンディットがある状態でのみ行なっ

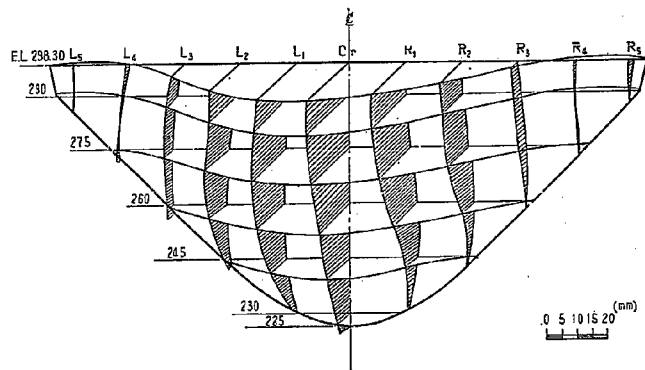


図-4 (a) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

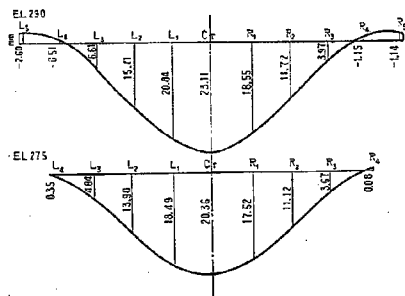


図-4 (b) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

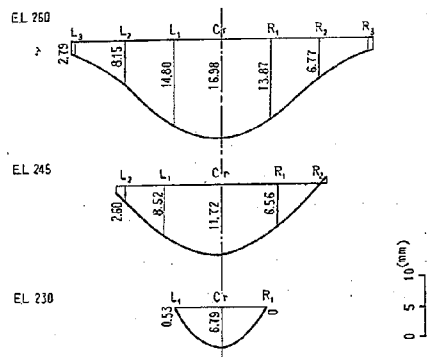


図-4 (c) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

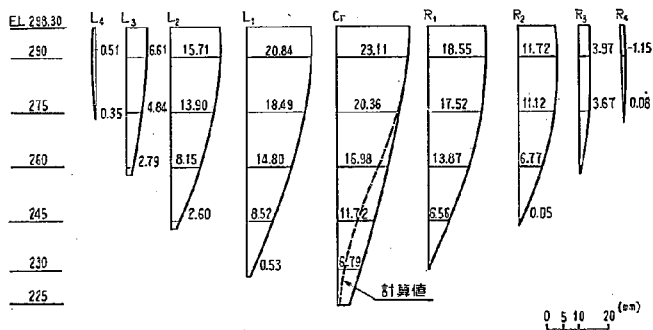


図-4 (d) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

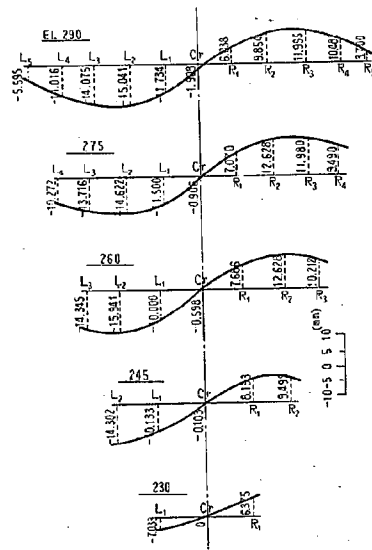


図-6 (a) アーチ・エレメント接線方向変位値

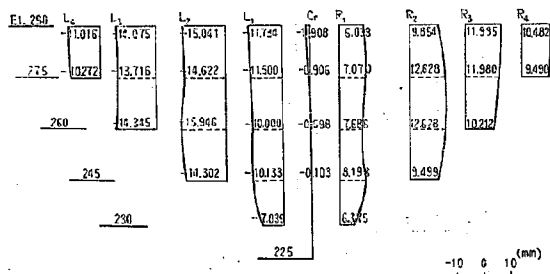


図-6 (b) カンチレバー・エレメント接線方向変位値

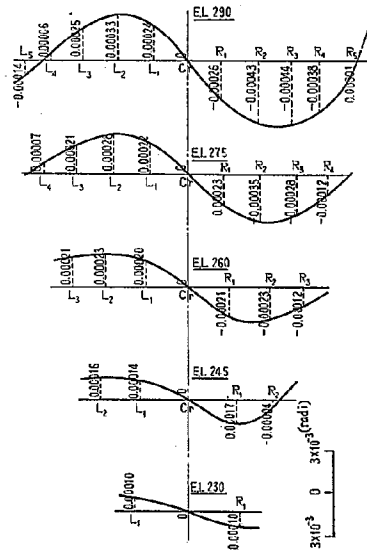


図-7 (a) アーチ・エレメント鉛直軸の周りの回転

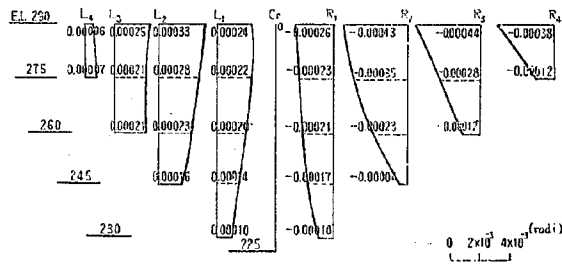


図-7 (b) カンチレバー・エレメント鉛直軸の周りの回転

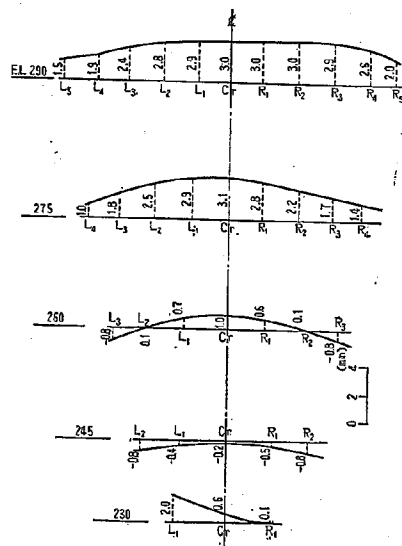


図-8 (a) アーチ・エレメント 鉛直方向変位値

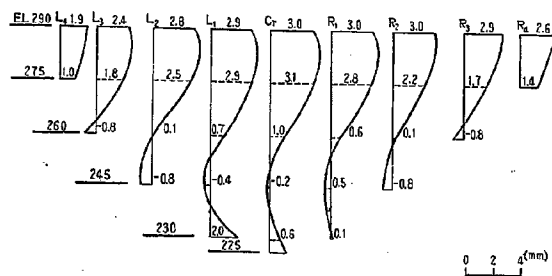


図-8 (b) カンチレバー・エレメント 鉛直方向変位値

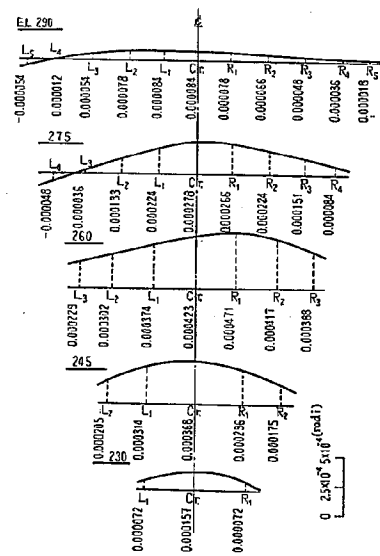


図-9 (a) アーチ・エレメント 接線の周りの回転

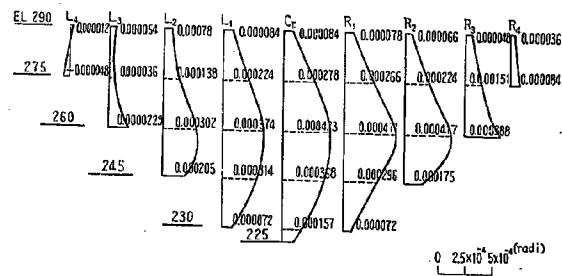


図-9 (b) カンチレバー・エレメント 接線の周りの回転

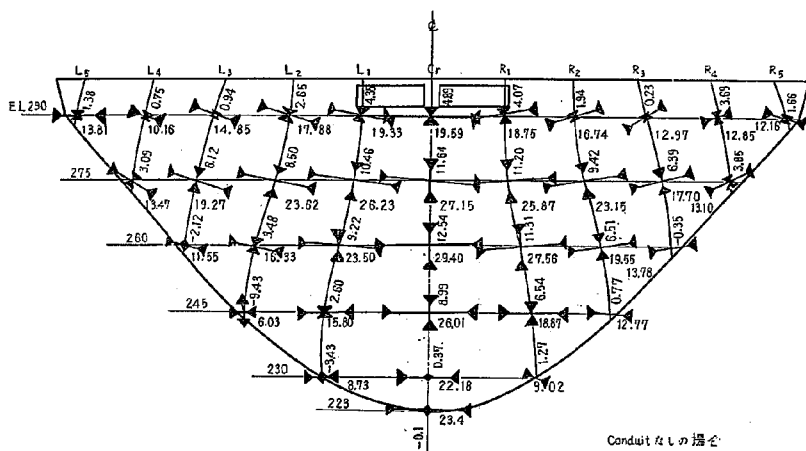


図-10 (a) 綾北ダム主応力図(上流面)

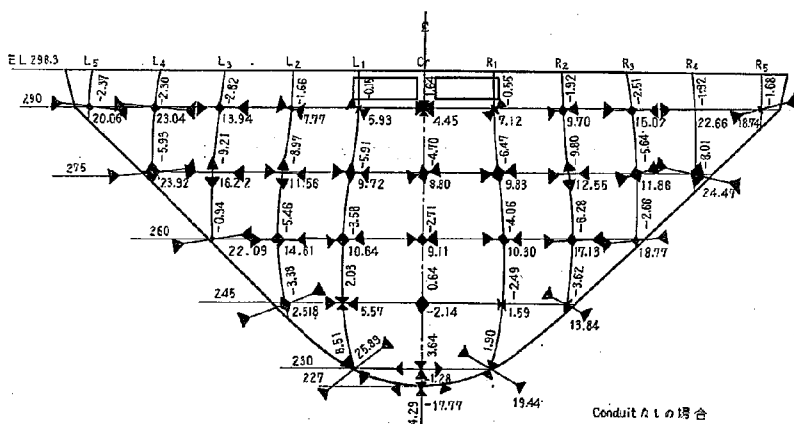


図-10 (b) 綾北ダム主応力図(下流面)

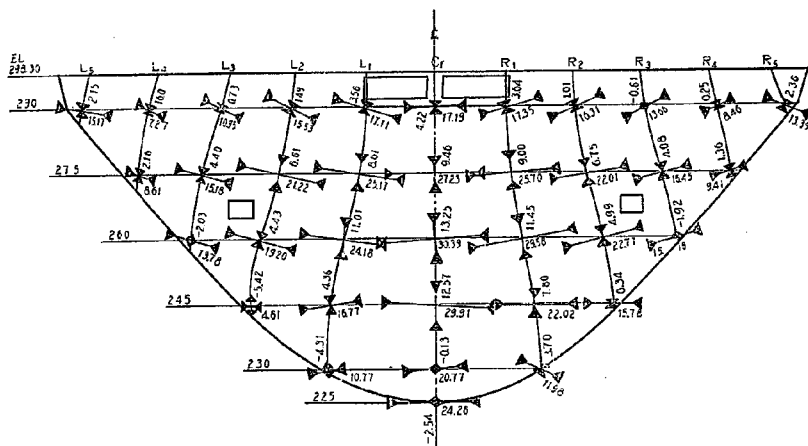


図-11 (a) 上流面 (conduit 有り) 主応力図

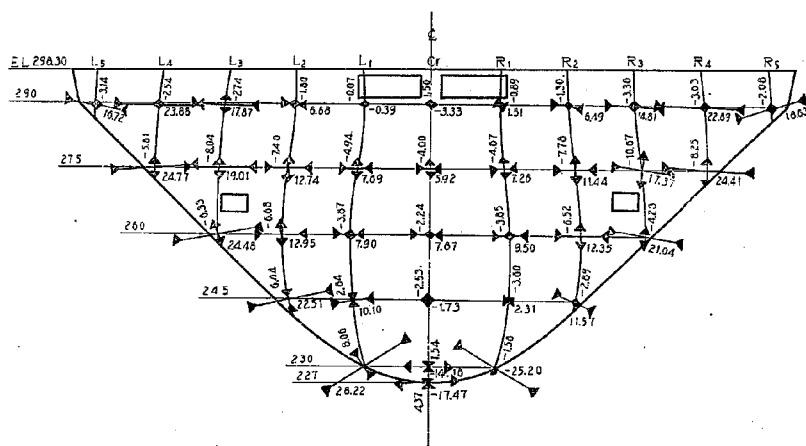


図-11 (b) 下流面 (conduit 有り) 主応力図

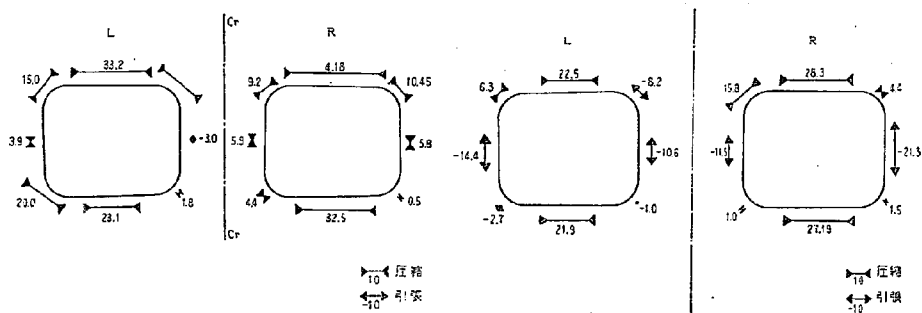
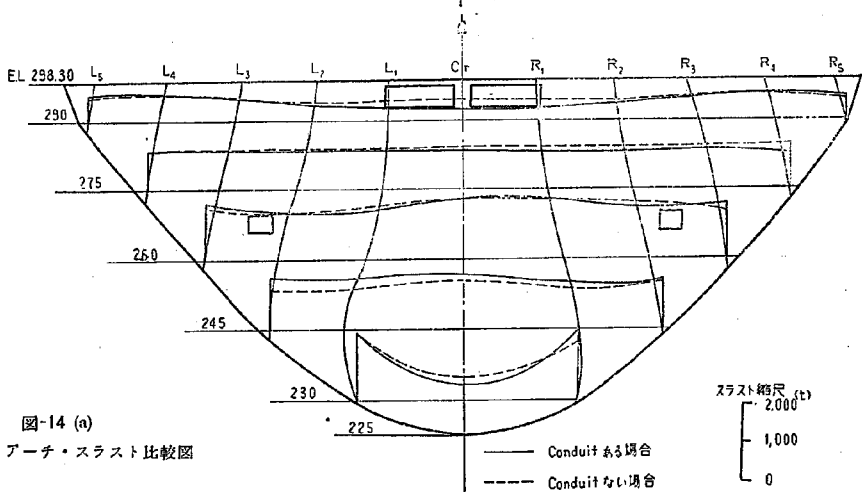
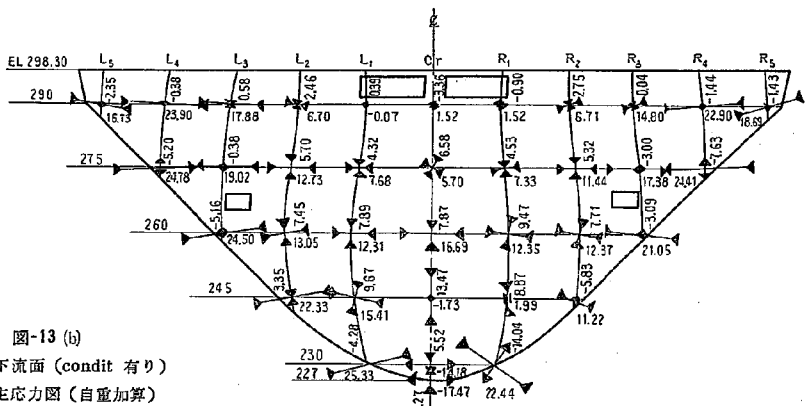
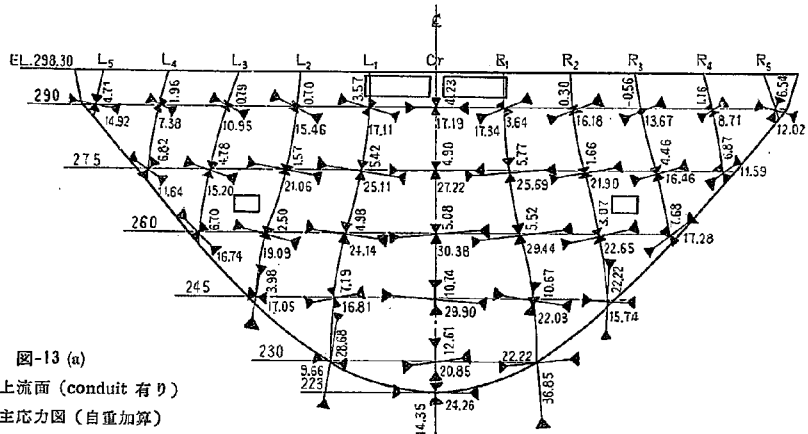


図-12 (a) 上流面コンディット周辺応力図

図-12 (b) 下流面コンディット周辺応力図



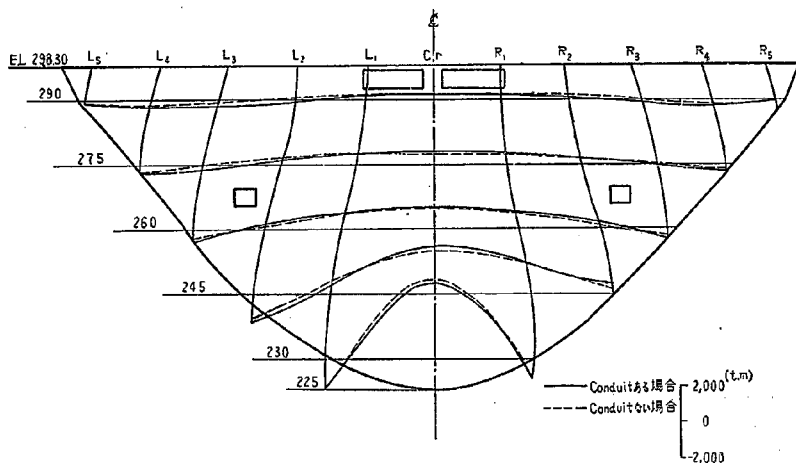


図-14 (b) アーチモーメント比較図

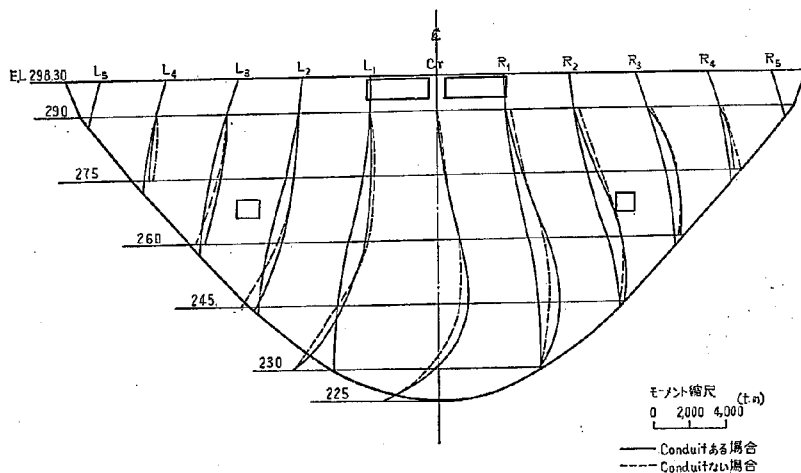


図-14(c) 片持梁モーメント比較図

ない。

ii) アーチのスラストはコンディットを設けると、コンディットより下の標高では僅かに増加し、逆に上部では減少している。また片持梁の曲げモーメントはコンディットより上では正の曲げモーメントが減少しているが下では逆に正の曲げモーメントが増加している。一般にアーチダムでは上部のアーチにはその標高の水圧荷重よりも大きな荷重がかかるために、片持梁要素には上流向きの荷重がかかる。これらの曲げモーメント比較図を観察するに、コンディットを設けることにより、コンディットより上の標高のアーチの荷重が減少し、逆にコンディットより下の標高でのアーチの荷重が増加してい

る。このためにコンディットより上の標高の片持梁要素の上流向きの荷重が減少し、逆にコンディットより下の標高の上流向きの荷重はコンディットがない場合より下まで作用するようになり、このためにコンディットより上の標高では正の曲げモーメントが減少し、逆に下部では増加したものと思われる。

iii) 以上の動きと片持梁モーメントがコンディットの附近である程度の値を持っていることを考えるならば本ダムではコンディットを設けたために、アーチは直接的な影響は現われていないが、コンディットの附近で片持梁の曲げモーメントはある程度の値を持っていたために、コンディットの標高での片持梁の剛性がやや低下

し、曲げモーメントの伝達が少なくなっているようである。アーチに現われた影響はこのような片持梁の剛性の低下による間接的なものであった。しかし、本ダムにおいてはこれらの動きは極めて僅かなもので設計上はまったく問題にならない程度のものであった。

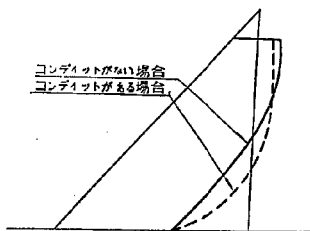


図-15 荷重分割図

iv) これらの実験結果から、アーチダムに余水吐、あるいはコンディットを設ける場合に曲げモーメントの少ない所に設けることがその影響を最も少なくする方法であることが明らかになった。

〔6〕 光弾性実験

本ダムは標高 276m に二つのコンディットが設けられているが、これらのコンディットにはある程度の応力集中が生じ、これによりかなりの引張応力が発生することが疑念された。そのため三次元の石膏模型実験においても、コンディットのまわりに上下流面とも八本の電気抵抗線歪計を貼って測定を行なったが、元来電気抵抗線歪計の貼られた面の平均の歪しか測定し得ないため、応力勾配の大きい局部応力の測定には不向きであるので結果は満足すべきものではなかった。このため、この部分の応力をさらに明細に知るために、二次元光弾による補足実験を行なった。

光弾性実験は二つの場合に対して行なった。

すなわち、

i) 自重による応力集中に対する実験

ii) 水圧荷重および堆砂圧による応力集中に対する実験

これら上下流面に対して実験し、これから自重のみが作用する場合の応力と自重と水圧荷重が作用した時の応力を求めた。

i) 自重による応力集中に対する実験

この実験ではダムの joint grout され一体化する前の状態における応力集中を求めるために、コンディットの大きさに対するブロック中、偏心の度合いを加味したアラダイトの二次元模型を作製して実験を行なった。

これから応力集中係数を求め、これにコンディットがないとして求めたコンディットの位置での自重応力を乗じた結果を示すと図-17のごとくである。図-17に示した測点の位置は図-16に示すごとくであり、応力分布は上

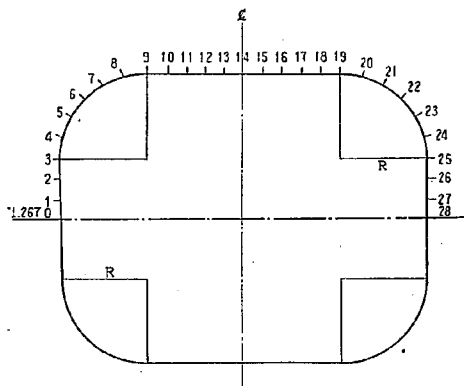


図-16 (a) 上流面緩北ダム Conduit

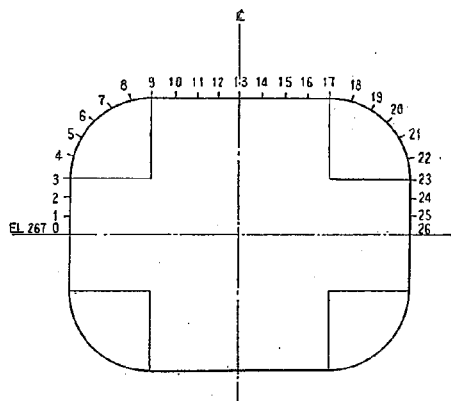


図-16 (b) 下流面緩北ダム Conduit

下対称であるから、左右岸側のコンディットとも、測点は 0 ~ 3 拱頂側の鉛直辺上に、測点 25 ~ 28 は abutment 側の鉛直辺上にある。結果を要約すると、

a) 上流面では鉛直辺上では全般におよそ 7.5 kg/cm^2 の引張応力となっており、水平辺上では全般におよそ小さな圧縮応力となっている。隅角部では圧縮応力の集中は見られないが、かなりの引張応力の集中を示しており、測点 3 および 25 では -8 kg/cm^2 以上の値を示している。

b) 下流面では鉛直辺上では全般におよそ 35 kg/cm^2 の圧縮応力となっており、水平線上では全般におよそ -16 kg/cm^2 の引張応力となっている。隅角部では引張応力の集中は見られないが、かなりの圧縮応力の集中を示しており、測点 3 および 25 では 40 kg/cm^2 以上の値を示している。

ii) 水圧荷重および堆砂圧による応力集中に対する実験

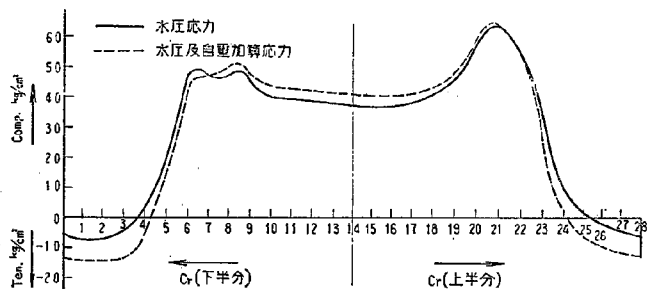


図-17(a) 上流面(右岸側)
水圧に依る Conduit 周辺応力図

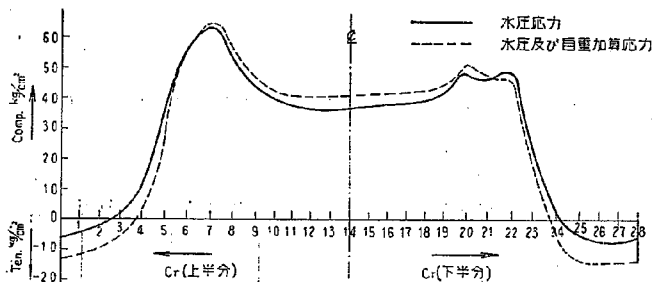


図-17(b) 上流面(左岸側)
水圧に依る Conduit 周辺応力図

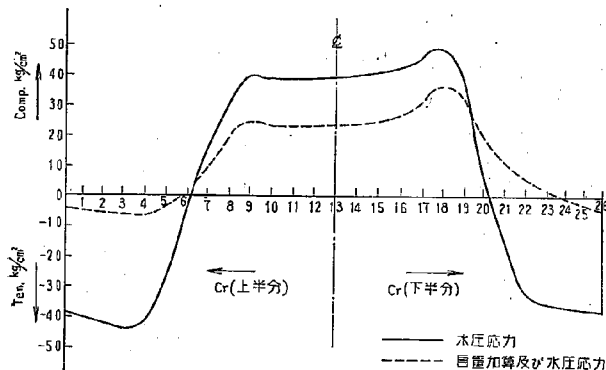


図-17(c) 下流面(右岸側)
水圧に依る Conduit 周辺応力図

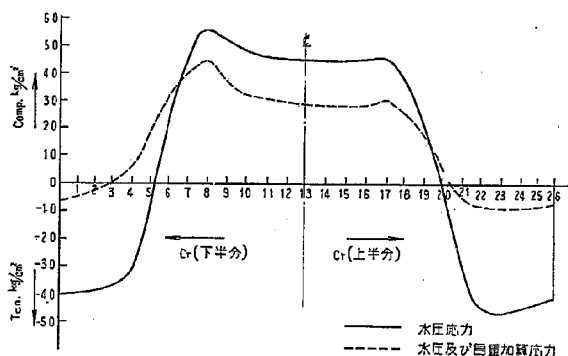
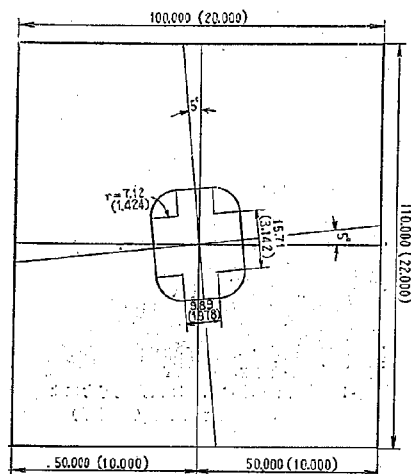
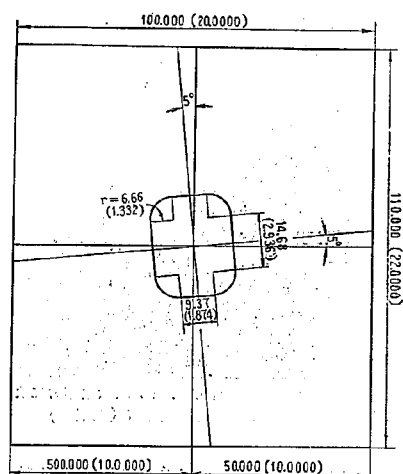


図-17(d) 下流面(左岸側)
水圧に依る Conduit 周辺応力図



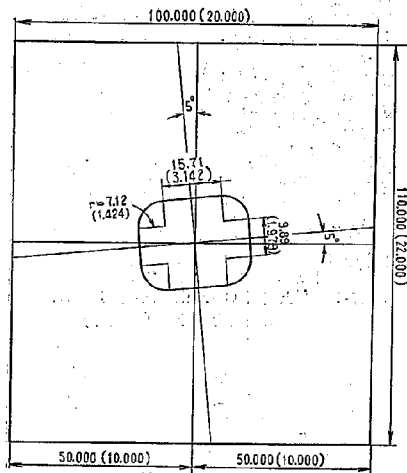
注)
数字は模型寸法
()内は原寸法

図-18 (a) 上流側 Conduit 寸法図



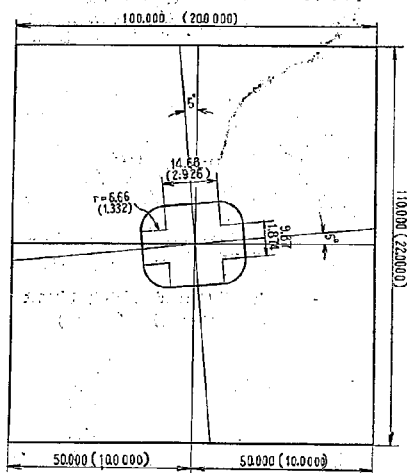
注)
数字は模型寸法
()内は原寸法

図-18 (c) 下流側 Conduit 寸法図



注)
数字は模型寸法
()内は原寸法

図-18 (b) 上流側 Conduit 寸法図



注)
数字は模型寸法 (mm)
()内は原寸法 (m)

図-18 (d) 下流側 Conduit 寸法図

水圧荷重および堆砂圧が作用した時に主応力線は左右岸ともコンディット付近で上流面で約 10° 、下流面で約 3° の傾きがある(図-11(a)(b)参照)、そこで近似的に上下流面とも主応力線が鉛直水平に対して 5° の傾きがあるものとして行なった。すなわち、図-18に示すような試験片を作り、これを長手の方向に押して等色線図を写真に撮り、応力集中係数を求めた。その等色線図を示せば写真-1のごとくである。

水平荷重および堆砂圧が作用した時の主応力図を観察するに、上流面の左岸側では最大主応力は、 17.9kg/cm^2 、最小主応力は 3.9kg/cm^2 、右岸側では最大主応力は 19.1kg/cm^2 、最小主応力は 3.5kg/cm^2 、下流面の左岸側では最大主応力は 17.3kg/cm^2 、最小主応力は -7.1kg/cm^2 、右岸側では最大主応力は 15.5kg/cm^2 、最小主応力は -7.4kg/cm^2 なる値を示している。光弾性実験により求めた応力集中係数に主応力の値を乗じて、最大主

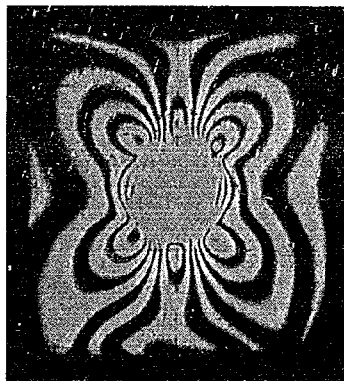


写真-1 (a) 上流面 Conduit 最大主応力による周辺応力線分布 (明視野)

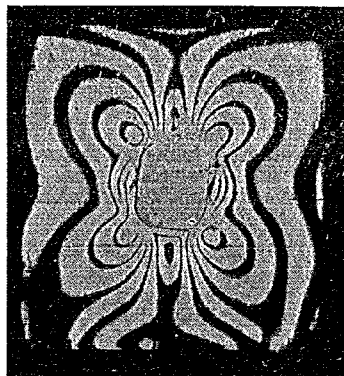


写真-1 (a') 上流面 Conduit 最大主応力による周辺応力線分布 (暗視野)

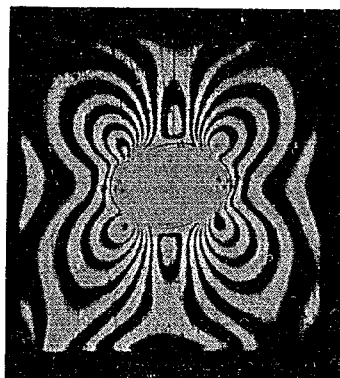


写真-1 (b) 上流面 Conduit 最小主応力による周辺応力線分布 (明視野)

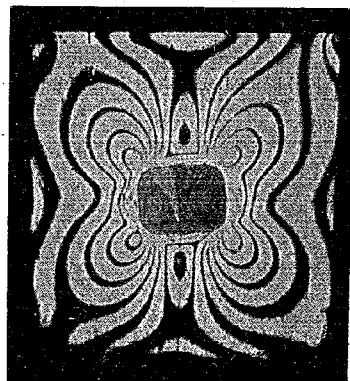


写真-1 (b') 上流面 Conduit 最小主応力による周辺応力線分布 (暗視野)

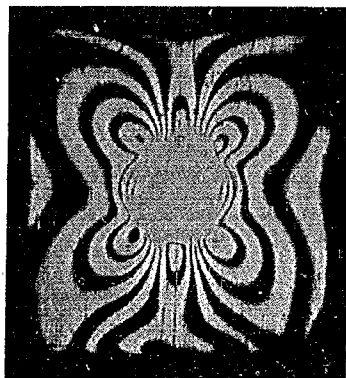


写真-1 (c) 下流面 Conduit 最大主応力による周辺応力線分布 (明視野)

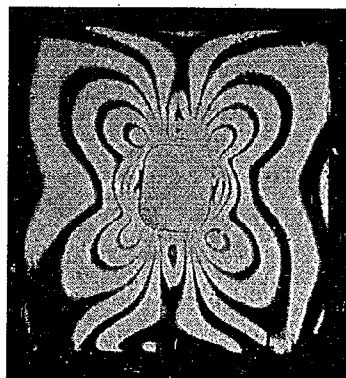
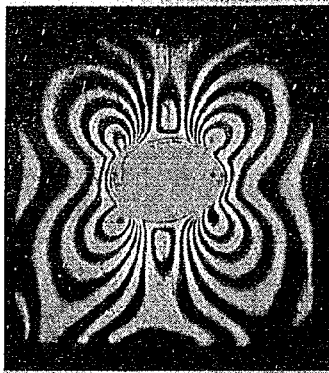


写真-1 (c') 下流面 Conduit 最大主応力による周辺応力線分布 (暗視野)


写真-1 (d) 下流面 Conduit 最小主応力による
周辺応力線分布 (明視野)

応力により生ずる応力と最小主応力による応力とを加算すると図-17のごとくである。この図に示す測点は図-16に示す通りであるが、この場合応力分布はコンディットの中心点に対して点対称であるから、左岸側の上半分では測点0〜3は拱頂側の鉛直边上にあり左岸側の下半分では測点25〜28は拱頂側の鉛直边上にある。また右岸側はその逆である。また図-17には自重による応力を加算したものも記入されている。結果を要約すると

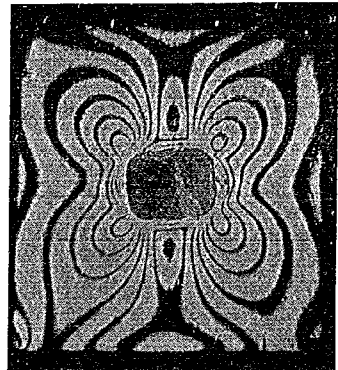
a) 上流面では左右岸のコンディット共上下辺は 40 kg/cm² 程度の圧縮応力となっている。また鉛直辺は水圧荷重と堆砂圧のみが作用する時におよそ 15 kg/cm²、自重による応力を加算すれば 8 kg/cm² 程度の引張応力となっている。最大圧縮応力は拱頂側上部の隅角部と abutment 側上部の隅角部に生じており、右岸側で約 50 kg/cm²、左岸側で約 55 kg/cm² となっている。また引張応力の集中は認められない。

〔7〕 破壊試験

コンクリートは組合せ応力状態ではかなり複雑な破壊をし強度も一軸的な圧縮強度および引張強度とはかなり異なった値を示しており、このため発生する応力と一軸強度と比較して判断された安全性と実際にダムが持つ安全性とはかなり異なっていると思われる。さらにアーチダムのように不静定度の高い構造物では一部に塑性変形または破壊が生じても応力の再配分が行なわれ、かなり大きな荷重まで耐えるのが一般である。これらの状況を観察するために破壊実験を行なった。

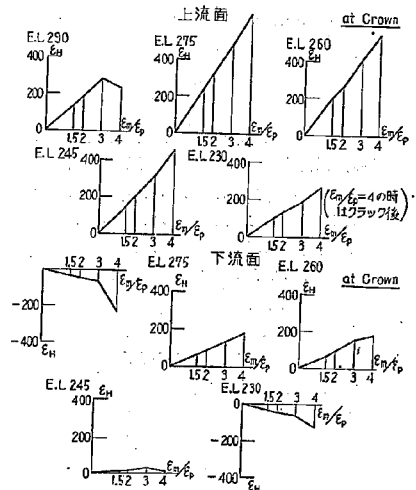
破壊実験は水圧荷重の他に自重も倍に増加させて行なうのがよいが綾北ダムに用いる載荷装置には自重を加えることが不可能だったので、水圧荷重と堆砂圧のみを増加させて行なった。

元来破壊実験を行なう場合には模型材料は組合せ応力状態での破壊がダムコンクリートのそれと同じ機構で生じており、塑性的性質も相似でなければならない。模型


写真-1 (d)' 下流面 Conduit 最小主応力による
周辺応力線分布 (暗視野)

材料とダムコンクリートとが応力歪曲線相似でポアソン比が等しく、模型とダムとで破壊強度と作用応力との比が等しいときは(1)式が成立する。一方種々の強度のコンクリートの応力の歪の関係を比較した結果、最大応力の時の歪はほぼ一定であるという研究がある。石狩についてもいろいろと試験を行なった結果、最大応力のときの歪はコンクリートのそれとほぼ等しい値を示していた。

以上から $\varepsilon_m/\varepsilon_p = (G/n)(E_p/E_m) = 1$ のときは模型とダムとで破壊強度と作用応力との比が等しいといえることができる。したがって破壊実験は荷重を増加させつつ、 G を増加させ、 $\varepsilon_m/\varepsilon_p$ の値を1.5, 2, 3, 4, ……と増加させて行なった。厳密な意味では石狩および石狩と陸奥


図-19 破壊実験における $\varepsilon_m/\varepsilon_p \sim \varepsilon_H$ 曲線

土の混合物はコンクリートの破壊機構とは少し異なっているようである。また前にも述べたとおりこの破壊実験では自重が加えられていないので主応力の値も実物とは異なっており、したがって破壊も異なっている。したがってこの実験結果は参考資料となる程度のものである。

破壊実験を行なうに当って各測点に対し水平、鉛直方向に対し $\varepsilon_m/\varepsilon_p = 1.5, 2, 3, 4$ の場合に対し歪測定を行なった。

実験の経過を述べると $\varepsilon_m/\varepsilon_p = 3$ までは異常はなかったが $\varepsilon_m/\varepsilon_p$ がおよそ 3.9 倍に達した時写真-2 のごとくコンディットの標高の下流面に水平にクラックが入り、 $\varepsilon_m/\varepsilon_p$ が 4.5 に達した時に載荷装置が破損したので中止した。クラックは EL267m の水平クラックの他には入らなかった。この間に測定した歪を示せば図-19 のごとくである。この図から明らかなように $\varepsilon_m/\varepsilon_p = 3$ までは極めて直線的に変化しているが $\varepsilon_m/\varepsilon_p = 4$ で歪はかなり異なった値を示している。このことは $\varepsilon_m/\varepsilon_p = 3$ と 4 の間で明らかにクラックが入っていることを示している。

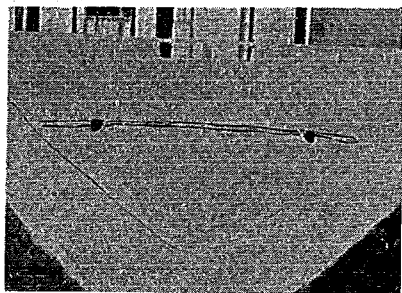


写真-2

EL 290m のアーチは著しく推力が減少しているが逆に EL245~230m のアーチはいくぶん推力が減少している。これは EL267m に水平なクラックが入ったために、片持梁のこの標高での剛性が減り、折れたため上部の負が減少し、上部アーチの分担荷重が減少し、下部アーチの分担荷重が増加したものと思われる。

われわれは破壊実験を行なうに当って下流面のベースの水平方向の引張応力を問題にしていた。ところがこの部分では $\varepsilon_m/\varepsilon_p$ が 4.5 になるまでクラックが入らず予想しなかった EL 267m にクラックが入ったが、これについて考察してみよう。

水平クラックの入った部分下流面の自重を加算しない場合の応力を調べると図-11から EL267m 付近では鉛直応力はコンディットの付近で最も引張側の値を示しており、約 -8 kg/cm^2 である。なお光弾性実験で測定された鉛直辺での引張応力は約 -40 kg/cm^2 であった。したがってクラックはまずコンディットの所から入り水平に伸びていったものと推定される。自重を加算しない場合の鉛直応力図をみると EL267m 付近でおおの片

持梁での最大引張応力を示しているのこのように水平に入いったものと思われる。

しかし自重を加算した鉛直応力を見ると下流面での鉛直応力はほとんど圧縮に変わっておりコンディットの周辺でも -7 kg/cm^2 程度に減少している。したがって自重を加味された状態で考えるならばこの水平クラックは入るおそれはほとんどないと考えられる。

なお、この実験により下流面のベースの引張応力は 4 倍以上の安全性があることが確認された。

3. 設計計算

(1) 設計条件

前にも述べたとおり従来行なわれた模型実験結果とを比較するに、かなりの相違があるために、本ダム設計に当っては模型実験結果を主体として考え、計算は実験には加味し得ない荷重、たとえば地震荷重、温度荷重などが作用した場合の応力の動きを推定する手段として行なった。

本設計計算においては側方片持梁をたてた半径方向調整による応力解析を主体として行ない、さらに実験値と計算値との相違および岩盤の弾性係数の影響を検討するために異常洪水位の水圧荷重と堆砂圧が作用する場合についてはダム本体と基礎岩盤の弾性係数が等しいとしたときと基礎岩盤の弾性係数が模型実験に用いたものと同じ比をもっているときについて完全調整を行なった。

荷重は次の組合わせに対して行なった。

- (i) 異常洪水位水圧荷重+堆砂圧
- (ii) 超過貯水位水圧荷重+堆砂圧+ $1/2$ (地震荷重)
- (iii) 常時満水圧荷重+堆砂圧+地震荷重
- (iv) 温度荷重

この計算に用いた常数を列記すると

- 1) コンクリートの比重は 2.35 とした。
- 2) コンクリートの弾性係数は $200,000 \text{ kg/cm}^2$ とした。
- 3) コンクリートの熱膨張係数は $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ とした。
- 4) 地震係数は 0.12 とし地震力は下流方向に作用するものとした。
- 5) 堆砂の水中の重量は 0.8 t/m^3 とし、土圧係数は 0.6 とした。
- 6) 温度荷重としては、表-3 に示すような値をとった。

表-3 温度荷重

標 高	290	275	260	245	230	225
温度荷重	10.07	9.11	4.45	0	0	0

なお、計算ではダムを対称として周辺継目から上の部

分だけを解析の対象として行なった。また鉛直片持梁では鉛直方向の曲率の影響を加味して曲り梁として計算し、さらに側方片持梁の形が崩れている影響も加味して計算した。

すなわち、図-20に示すように本ダムは Variable center type をとったために拱頂部以外の点では上部のアーチ (C_1) の半径方向と下部のアーチ (C_2) の半径方向とは異なってくる。いま図-20で片持梁 A の C_1 の標高でアーチ C_1 の半径方向に荷重が作用したとする。しかるとき C_2 の標高ではアーチ C_2 の半径方向はアーチ C_1 の半径方向とは方向が異なるので半径方向と接線方向との二つの分力が生ずる。同様に C_2 の標高で半径方向変位から C_1 の標高での半径方向変位と接線方向変位とが生ずる。

半径方向荷重 (+) $\left\{ \begin{array}{l} \text{半径方向分力 (+)} \\ \text{接線方向分力 (-)} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{半径方向変位 (-)} \\ \text{接線方向変位 (+)} \end{array} \right\}$

接線方向荷重 (+) $\left\{ \begin{array}{l} \text{半径方向分力 (+)} \\ \text{接線方向分力 (+)} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{半径方向変位 (+)} \\ \text{接線方向変位 (+)} \end{array} \right\}$

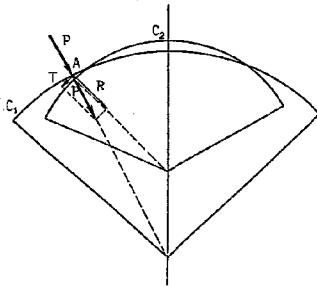


図-20

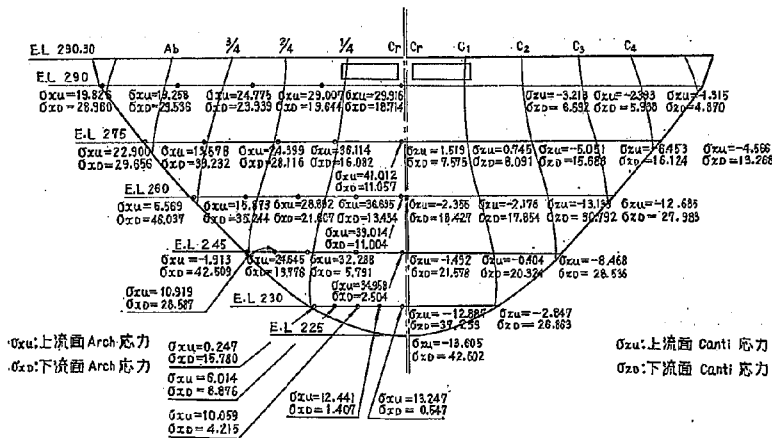


図-21 半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図 (異常洪水時)

のような形で変位が現われてくる。これらの点を加味して計算を行なった。

計算は各種荷重条件に対しては岩盤の弾性係数はコンクリートの弾性係数と等しいとして、半径方向調整のみを行ない、さらに実験の対象となった異常洪水水位圧荷重+堆砂圧に対しては岩盤の弾性係数とコンクリートの弾性係数とが等しい場合と岩盤の弾性係数とコンクリートの弾性係数との比が実験に用いられたものと等しい場合については完全調整を行なった。

〔2〕設計計算 (1)

まず各種荷重状態における半径方向調整結果を示すと図-21~26のごとくである。

これらの計算結果にもとづいて各種荷重状態の時の応力分布を推定してみよう。

一般に実験値と計算値とはかなりの相違がある。したがって種々の荷重状態の時の計算値から、おのおのの荷重状態の時の応力分布を推定する場合にある程度の誤差はまぬかれないと思われる。しかし、ここではそれぞれの荷重状態のときの応力の差は実験値と計算値とではほぼ等しいという前提に立って推定してみよう。

綾北ダムの模型実験および応力計算で問題となった応力の発生場所は水平応力では上流面標高275m, 260m, 245mの拱頂部と下流面標高260m, 245mの両岸取付部の圧縮応力と、上流面標高230m, 225mの両岸取付部と下流面標高230mの拱頂部の引張応力であった。また鉛直応力では下流面標高230mの両岸取付部、標高225mの圧縮応力と、上流面標高260m, 245m, 230mの両岸取付部と225mの拱頂部と、下流面標高230mの右岸取付部の引張応力であった。これらの点の、各種荷重状態における応力の推定値を求めると、表-4のごとくである。なお、これに用いた計算値は前にのべたように $E_R = E_C$

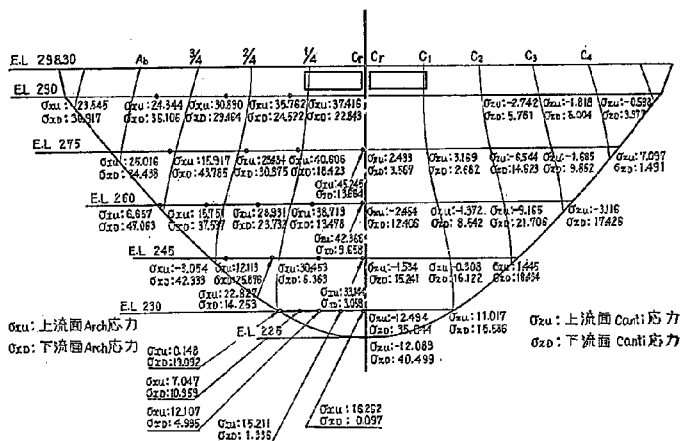
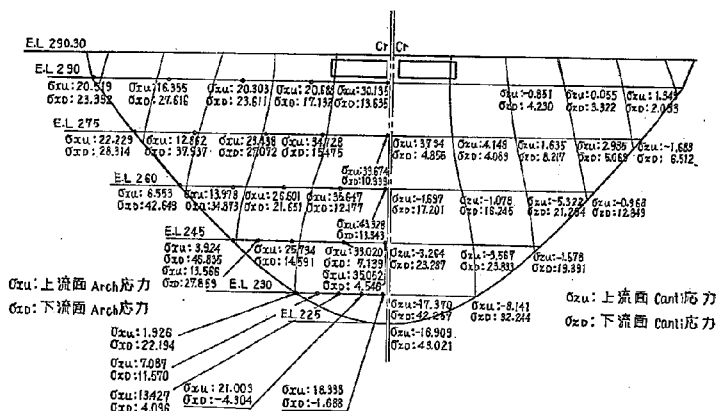
図-22 半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図 (超過貯水時+地震荷重 $1/2$)

図-23 半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図 (常時満水時+地震荷重)

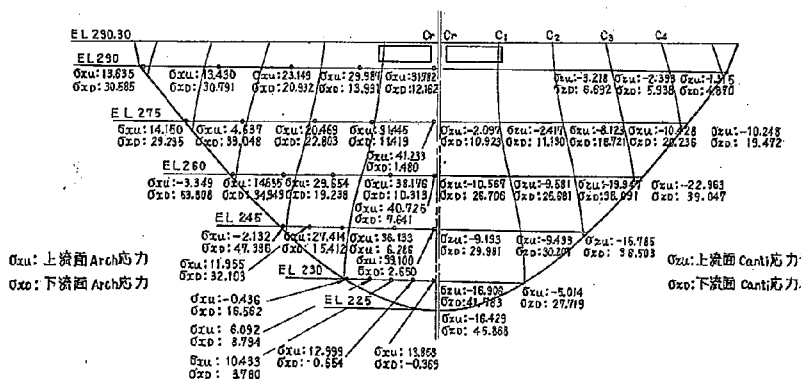


図-24 半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図 (異常満水時+温度荷重)

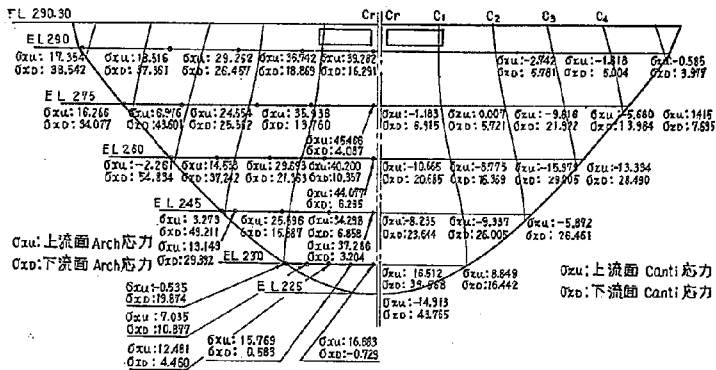


図-25 半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図(超過貯水時+温度荷重+地震荷重1/2)

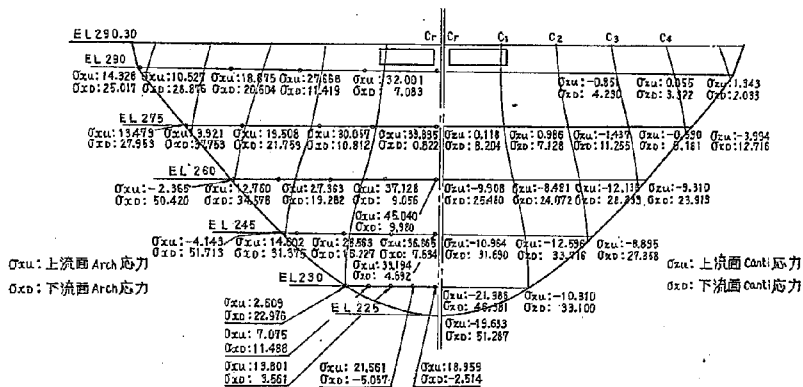


図-26 半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図(常時満水時+温度荷重+地震荷重)

とした時の半径方向調整計算結果であり、標高 225m の下流面の水平応力の値は計算値がないので各荷重状態の間の差は標高 230m の拱頂部の水平応力の差に等しいという仮定で求めたものである。

この表から明らかとなり

(i) 圧縮応力はアーチで最大 36.4 kg/cm^2 、片持梁で最大 50.4 kg/cm^2 であった。この内、片持梁の最大応力は下流面標高 230m の右岸取付部に生じたものであるが、この部分では上流側への overhang がいちじるしいため、自重により 31.9 kg/cm^2 の圧縮が下流面では -15.2 kg/cm^2 の引張応力が生じている。このため、これらの応力を緩和するために上流側にバットレスを設けた。これから、標高 230m の右岸取付部の下流面の圧縮応力は高く 40 kg/cm^2 と考えられる。これらの値は綾北ダムのコンクリート試験の結果から見て十分安全であると考えられる。

(ii) 計算値で問題になった引張応力の発生場所は上流面標高 230m の両岸取付部の水平応力と、標高 230m、

225m の拱頂部の鉛直応力であったが、これらの応力はいずれも各種の荷重状態での実験値または推定値は圧縮である。

(iii) 実験値で問題になった引張応力は下流面 標高 230m、225m の拱頂部の水平応力と、下流面標高 230m の右岸取付部の鉛直応力であった。これらの応力は表から明らかな通り、荷重状態によっては実験値より大きくなっている。この内、右岸取付部の鉛直応力は前にも述べたとおり、この部分では上流側への overhang がいちじるしいため、自重により -15 kg/cm^2 の引張応力が生じているが、これは上流側に設けたバットレスにより、少なくとも 10 kg/cm^2 程度は緩和されていると考えられる。したがってこの部分の応力は高く 10 kg/cm^2 程度と考慮される。

(iv) 下流面標高 230m、225m の拱頂部に生じた水平引張応力は実験値でもかなりな値を示しているが、計算によると地震荷重、温度荷重が加わるとかなり増加しており、特に温度荷重による増加がいちじるしい。このこ

表-4 (a)

水	上	標高		異常洪水	超過貯水	常時満水	異常洪水	超過貯水	常時満水	異常洪水	超過貯水	常時満水	異常洪水	超過貯水	常時満水
				計算値	計算値	計算値	水位 + (温度荷重)	水位 + (温度荷重)	水位 + (温度荷重)	突 驗 値	推 定 値	推 定 値	推 定 値	推 定 値	推 定 値
力	面	275	cr	41.0	42.2	39.7	41.2	45.5	39.9	27.2	28.4	25.9	27.4	31.7	26.1
		260	cr	39.0	42.4	43.3	40.7	44.1	45.0	30.4	33.8	34.7	32.1	35.5	36.4
		245	cr	34.9	33.1	35.1	39.1	37.3	39.2	29.9	28.1	30.1	34.1	32.3	34.2
		230	右岸Abut	0.25	0.15	-1.9	-0.44	-0.54	-9.6	10.9	10.8	8.75	10.21	10.11	1.05
			左岸Abut	0.25	0.15	-1.9	-0.44	-0.54	-9.6	10.1	10	7.95	9.41	9.31	0.25
	下	260	右岸Abut	46.0	47.1	42.6	53.8	54.8	50.4	20.9	22.0	17.5	28.7	29.7	25.3
			左岸Abut	46.0	47.1	42.6	53.8	54.8	50.4	23.9	25.0	20.5	31.7	32.7	28.3
		245	右岸Abut	42.5	42.3	46.8	47.4	49.2	51.7	9.7	9.5	14.0	14.6	16.4	18.9
			左岸Abut	42.5	42.3	46.8	47.4	49.2	51.7	21.8	21.6	26.1	26.7	28.5	31.0
		230	cr	0.46	0.10	-1.7	-0.37	-0.73	-2.5	-14.2	-14.56	-16.36	-15.03	-15.39	-12.16
	225	cr								-17.5	(-17.9)	(-19.7)	(-18.3)	(-18.9)	(-20.5)

表-4 (b)

鉛	上	標高		異常洪水	超過貯水	常時満水	異常洪水	超過貯水	常時満水	異常洪水	超過貯水	常時満水	異常洪水	超過貯水	常時満水
				計算値	計算値	計算値	水位 + (温度荷重)	水位 + (温度荷重)	水位 + (温度荷重)	突 驗 値	推 定 値	推 定 値	推 定 値	推 定 値	推 定 値
直	流	260	右岸Abut	-12.7	-3.1	1.0	-23.0	-13.4	-9.3	11.1	20.7	24.8	0.8	10.4	14.5
			左岸Abut	-12.7	-3.1	1.0	-23.0	-13.4	-9.3	11.5	21.1	25.2	1.2	10.8	14.9
		245	右岸Abut	-8.5	1.4	-1.6	-15.8	-5.9	-8.9	22.2	32.1	29.1	14.9	24.8	21.8
			左岸Abut	-8.5	1.4	-1.6	-15.8	-5.9	-8.9	16.8	26.7	23.7	9.5	19.4	16.4
		230	右岸Abut	-2.8	11.0	-8.1	-5.0	8.8	-10.3	36.6	50.4	31.3	34.4	48.2	29.1
			cr	-12.9	-12.5	-17.4	-16.9	-16.5	-21.4	12.7	13.1	8.2	8.7	9.1	4.2
	面	230	左岸Abut	-2.8	11.0	-8.1	-5.0	8.8	-10.3	28.2	42.0	22.9	26.0	39.8	20.7
			225	-13.6	-12.1	-16.9	-16.4	-14.9	-19.6	14.4	15.9	11.1	11.6	13.1	8.4
		230	右岸Abut	26.9	15.6	32.2	27.7	16.4	33.1	-9.7	-21.0	-4.4	-8.6	-20.2	-3.5
	下	225		42.6	40.5	48.0	45.9	43.8	51.3	6.3	4.2	11.7	9.6	7.5	15.0

とはこれらの荷重が加わると引張応力はかなり増加し、標高230m 以下では -20kg/cm^2 をこえる可能性があることを示している。

以上、各種荷重状態における応力を推定し、検討したがその結果下流面標高230m 以下の拱頂部に生じた引張応力以外になんら問題はなかった。標高230m 以下の拱頂部に生じた引張応力については、かなりの値に達しており、問題になったが、実験の結果この部分に大きな引張応力が発生するということが判明した時にはすでにこの部分の打設は終了していた。このような引張応力に対する対策としては、この引張の部分だけをすって不等厚アーチを採用することであるが、この部分の打設が終了していたので、このような対策をとることは不可能であった。

そこでわれわれは破壊実験を行なって、この部分が組合せ応力状態のもとにおいて、また塑性変形の影響を加味した場合にどの程度の安全率があるかについて検討したところ少なくとも4.5以上あるとの結論を得た。また万一、この部分にクラックが入った場合にどの程度の

応力の変化がほかの部分に生ずるかについて検討するために、標高230m の下流面拱頂部に表面から4.31m と5.81m クラックが入った場合について計算を行なった。その結果を示すと図-27のごとくである。その結果によると標高230m の下流面拱頂部の水平応力がいちじるしく圧縮側に変わっているほかほとんど差がないことが明らかとなった。

以上から標高230m の下流面拱頂部の水平引張応力は温度荷重によりかなり増加する傾向があるので、温度荷重をできるだけ小さくするようにこの部分の二次冷却を十分に行ない、年最低温度以下に下げて joint grout を行ない、逆の温度荷重を加えるようにする必要があるが、破壊実験で4.5以上の安全率があったことおよびこの引張応力によりクラックが入っても、ある程度以上はのびない性質をもっており、これにより他の部分の応力はほとんど変わらないので、特別な対策を立てなくても十分安全であるとの結論に達した。

〔3〕設計計算(2)

種々な荷重条件のときの応力計算を行なった後に模型

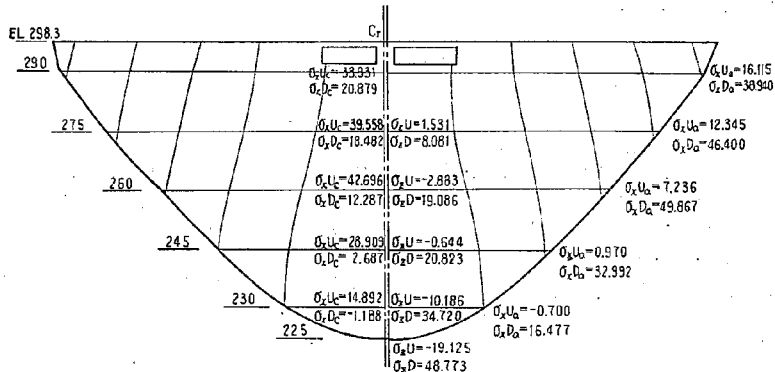


図-27 (a) 拱頂調整の応力図

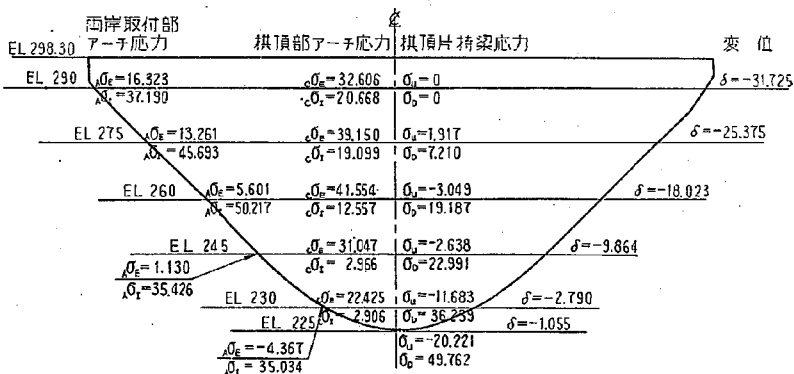


図-27 (b) 下流面に4.31m のクラックが入った場合

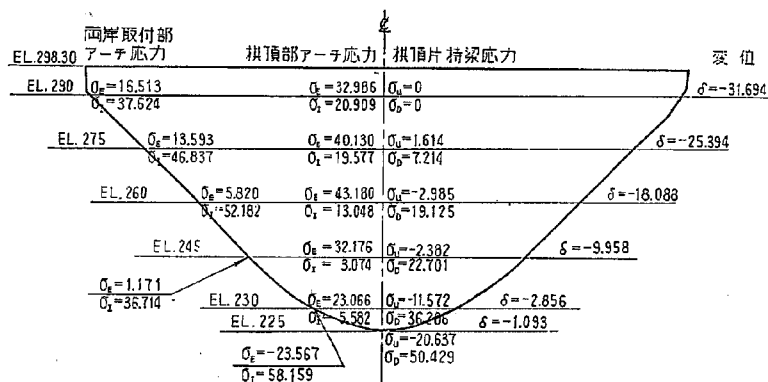


図-27 (c) 下流側に 5.81m のクラックが入った場合

実験結果と比較するとともに基礎岩盤の弾性係数の影響を調べるために、基礎岩盤の弾性係数とコンクリートの弾性係数が等しい場合 ($E_C = E_R$) と、両者の比が模型のそれと等しい場合 ($E_C \neq E_R$) について完全調整計算を行なった。

$E_C = E_R$ とした場合はアーチ要素に対しては Lieurance 表を用い、片持梁要素に対しては、基礎の変形係数を

$$\alpha = \frac{R_{axis}}{\gamma} \frac{5.075}{E_R T A^2}; \quad \gamma = \frac{R_{axis}}{\gamma} \frac{1.785}{E_R};$$

$$\delta = \frac{R_{axis}}{\gamma} \frac{5.720}{E_R T A^2}$$

として計算した。 $E_C \neq E_R$ の場合には計算にとりいれるべきアバットメントは周辺継目の位置にすべきか、サドルと岩盤とのとりつけ部にすべきか、またサドルの形状を加味する場合にどのようにすべきかについて問題となったが、綾北ダムの場合にはサドルの厚さも比較的薄く、最小 2m であったので、アバットメントは周辺継目の位置にとり、基礎岩盤の変形係数の計算にはダムの厚さをサドルと岩盤との接触面での厚さとして行なった。これは後で述べるように、サドルは岩盤よりも変形しやすいにもかかわらず、サドルを含めた岩盤の変形が本来の岩盤よりも変形が小さい変形定数を与える結果となり、計算結果は思わしくなかった。今後はこの点についてさらに検討を加えるべきであると思われる。

岩盤の弾性係数は模型実験に合わせ、さらに計算を簡単にするために左右岸の岩盤の弾性係数は等しくとした。すなわち計算に仮定された弾性係数を示せば表-5のごとくである。

表-5 計算に仮定した岩盤の弾性係数

EL (m)	290	275	260	245	230	225
E_R kg/cm ²	30,900	30,900	50,500	50,500	77,000	114,600

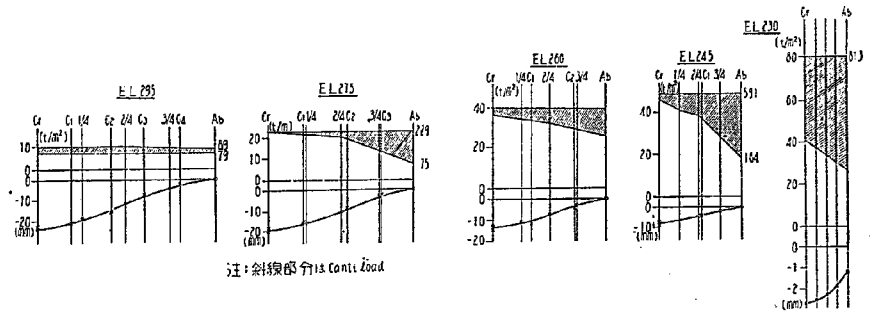
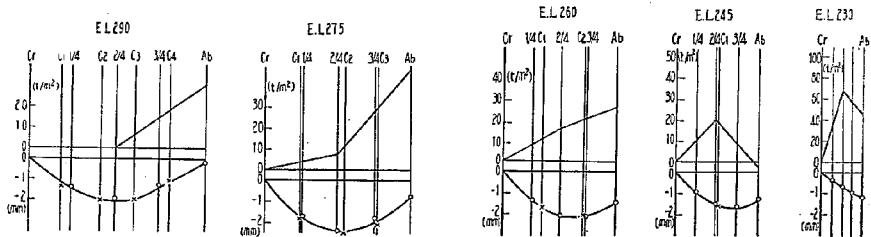
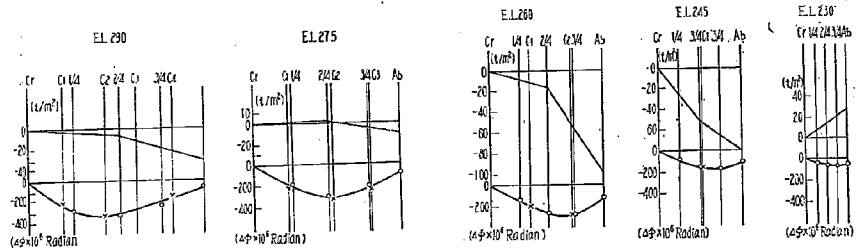
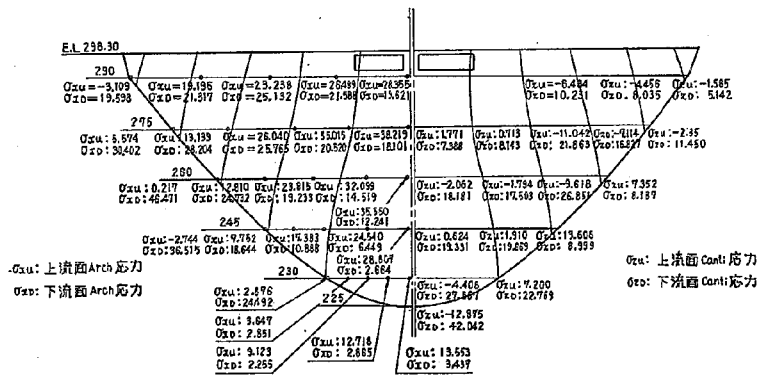
これにもとづいて求めた岩盤の変形常数は前章に述べた $E_R = E_C$ として Lieurance の表を用いた場合よりも全般に大きな値を示しているが、標高 230m のアーチのアバットメントではアバットメントの勾配により、拱頂片持の基礎ではさきに述べたようにダムの厚さを岩盤とサドルの接触面での厚さにとっているのて逆に小さな値となっている。このために片持梁の基礎の曲げモーメントはむしろ $E_C = E_R$ の場合より大きな値を与えている。

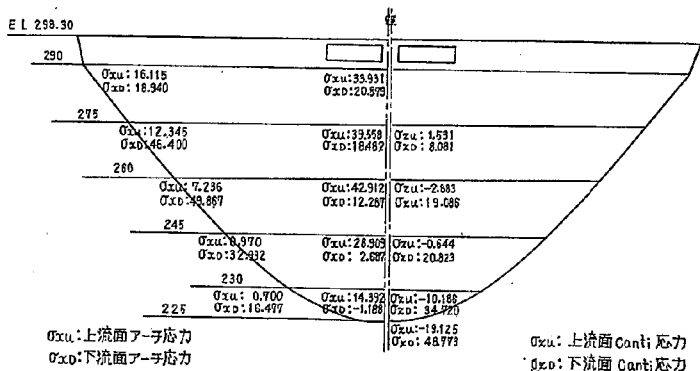
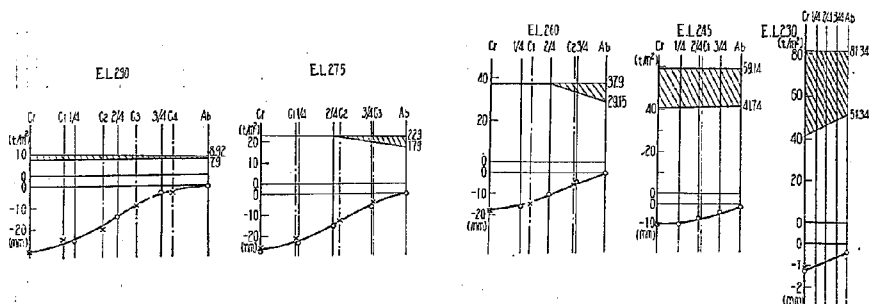
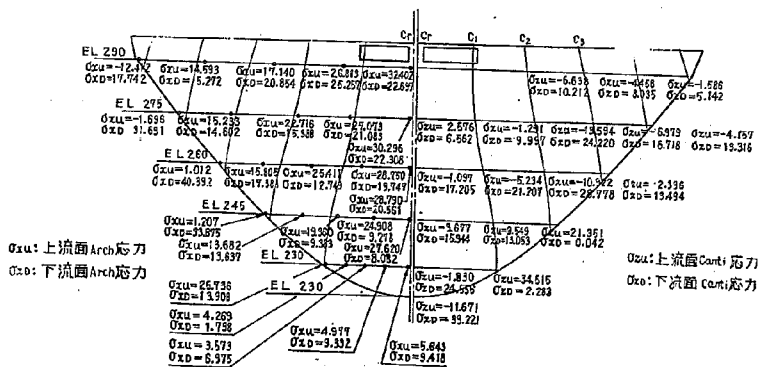
計算は異常洪水時に対してのみ行なった。以下 $E_C = E_R$ の場合の完全調整計算結果、 $E_C \neq E_R$ とした場合の拱頂片持梁法の計算結果、半径方向調整計算結果、完全調整結果の順にのべると図-28~31のごとくである。

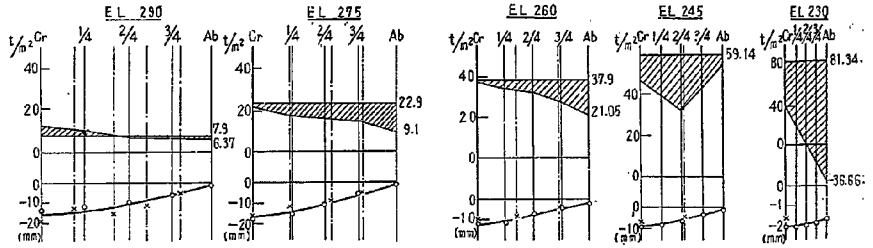
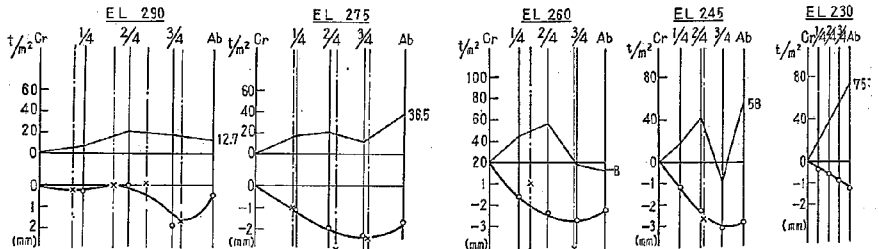
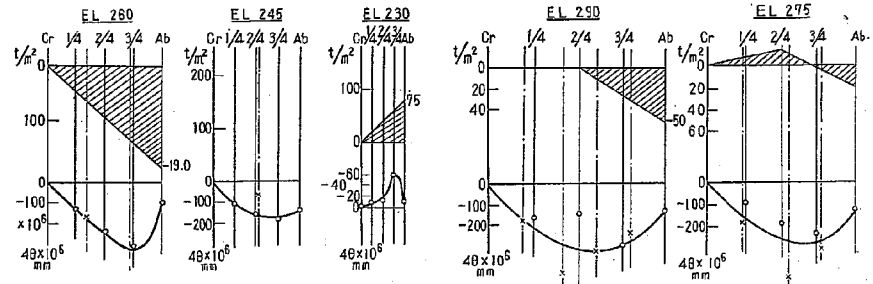
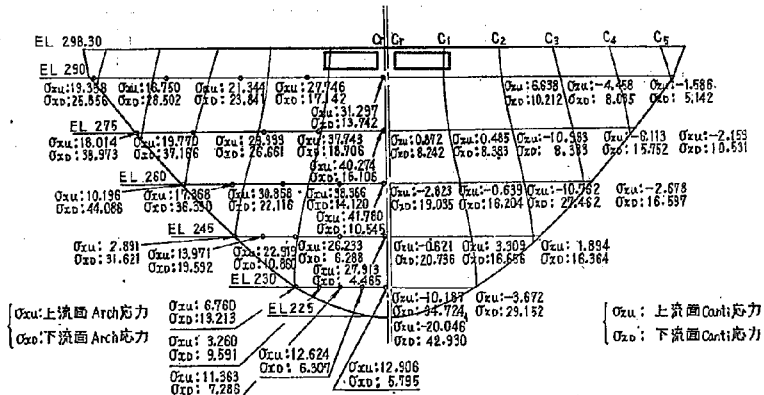
4. 実験値と計算値との比較

一般にアーチダムの計算は極めて複雑で多くの労力を要するにもかかわらず、模型実験結果と比較するとかなりの差がある。そのために現段階ではアーチダムの形を決めるに際しては概略の形を計算で定め、実験により最終的に形を決めるという方法がとられている。したがって最終的には実験により形が決定されるにせよ、予備的な段階では計算により設計を進めるのであるから、計算値と実験値とを比較しておくことは、今後の設計のために極めて有益な資料を提供するものと思われる。

3. にも述べたように、本ダムの計算では岩盤の変形係数の計算の際に設けた仮定で不適当なものがあったので、計算を実験に加味し得なかった荷重が作用した時の応力の動きを見るという点に関してはほぼその目的を達したにもかかわらず、実験値と計算値との比較、あるいは岩盤の弾性係数の影響を見るという点では満足すべきものではなかった。しかし、本ダムの計算結果と実験結果との比較により、アーチダムの計算法に内在する欠点と、計算値と実験値との間にある共通な相違を見い出せると思われる。


 図-28 (a) 半径方向分割荷重及びひねり図 ($E_R=E_c$)

 図-28 (b) 接線方向分割荷重及び接線方向変位図 ($E_R=E_c$)

 図-28 (c) 換れ分割荷重及び変位図 ($E_R=E_c$)

 図-28 (d) 完全調整によるアーチ及びび片持梁応力 ($E_R=E_c$)

図-29 拱頂調整アーチ及び片持梁応力図 ($E_R \approx E_C$)図-30 (a) 半径方向分割荷重及びひねり図 ($E_R \approx E_C$)図-30 (b) 半径方向調整によるアーチ及び片持梁応力図 ($E_C \approx E_R$)


 図-31 (a) 三成分調整 半径方向分割荷重及び撓み図 ($E_R \approx E_C$)

 図-31 (b) 三成分調整 接線方向分割荷重及び接線方向変位図 ($E_R \approx E_C$)

 図-31 (c) 三成分調整 せん断分割荷重及びせん断角図 ($E_R \approx E_C$)

 図-32 (d) 三成分調整 アーチ及びび片持梁応力図 ($E_R \approx E_C$)

〔1〕変位の比較

$E_R = E_C$ とした場合および $E_R \neq E_C$ とした場合の三成分調整計算結果の半径方向変位と実験より得られた半径方向変位とを比較すれば図-32のごとくである。全般的に見て比較的良好一致しているが、下部では実験の方がかなり大きくなっている。 $E_R = E_C$ の場合と $E_R \neq E_C$ の場合と比較すると $E_R \neq E_C$ の場合の計算結果の方が標高245m以上では大きくなっている。 $E_R = E_C$ の場合の計算結果と実験値とを比較すると、標高290mでは両者はほぼ一致するが、以外の標高では実験値の方が大きい。 $E_R \neq E_C$ の場合の計算結果と実験値とを比較すると、標高260m以上では実験値の方が小さいがそれ以下では実験値の方が大きくなっている。片持梁要素の撓み曲線を見るに、全般に実験値の方が下流側に凸な曲線を示している。このことは実験値の方が上流面に圧縮応力が生ずるような曲げモーメントが強く生じていることを示している。

次に接線方向変位を比較すると、図-33のごとくである。すなわち実験値と計算値とはいちじるしく相違しており、大体実験値は計算値の凡そ10倍位の値を示している。これは実験値と計算値との間の差が最もいちじるしいものの一つであり、実験値と計算値とを比較する場合に最も注目すべきものの一つである。このことは実験値は計算値に比して推力による岩盤の変形がいちじるしく大きいことを示しており、さらに後で述べるように、アーチ推力が実験値の方がかなり小さいことを関連させて考えるならば、推力による岩盤

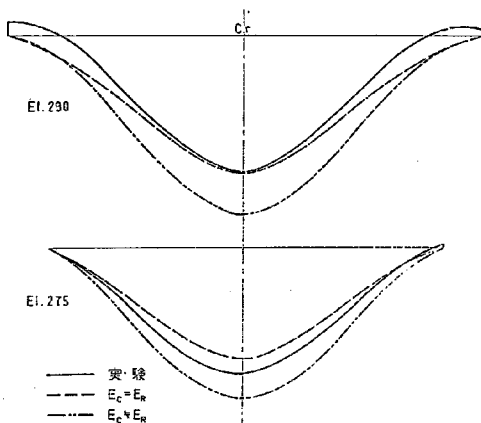


図-32 (a) 異常洪水時半径方向撓み比較図

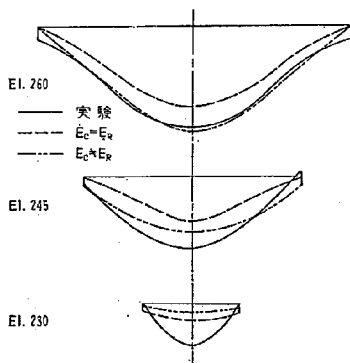


図-32 (a) 異常洪水時半径方向撓み比較図

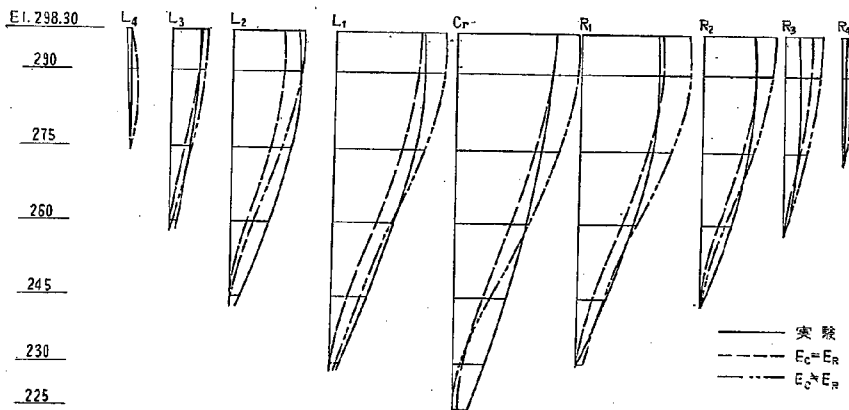


図-32 (b) 異常洪水時半径方向撓み比較図

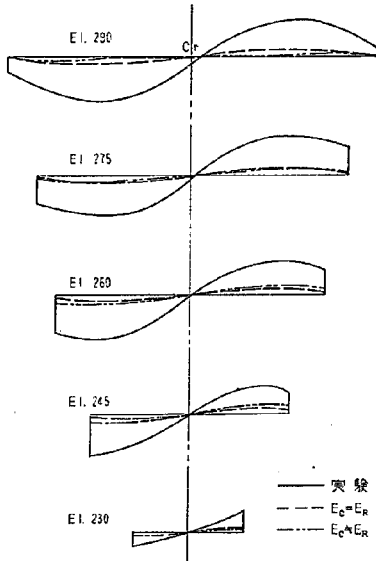


図-33 異常洪水時接線方向撓み比較図

の表面に垂直な方向への変形常数(β)の値が計算では過少にとられているのではないと思われる。

鉛直軸のまわりの廻転を比較すると図-34のごとくである。すなわち、全般的に見て極めてよく一致している。

以上各方向変位を比較したが、半径方向変位および鉛直軸のまわりの廻転は比較的よく一致しているが、接線方向変位はかなり異なっているのは注目すべき事実である。

〔2〕 応力および断面力の比較

$E_R = E_C$ とした場合、および $E_R \neq E_C$ とした場合の三成分調整計算結果、水平、鉛直応力と、実験より得られた水平鉛直応力とを比較すれば図-35、36のごとくである。

水平応力は全般に計算値の方が圧縮側の値を示しているが、特に下部の下流面ではいちじるしい。鉛直応力は実験値の方が全般に絶対値が小さい。

これらの実験値と計算値との差をさらに明瞭にするために、応力の直線分布を仮定して、推力、曲げモーメント接線方向剪断力、捩れモーメントを比較すれば、図-37のごとくである。これらの図では実験値と、 $E_R = E_C$ とした場合の計算値と $E_R \neq E_C$ とした場合の計算値とが比較されている。また片持梁の曲げモーメントは自重が加算された状態で比較

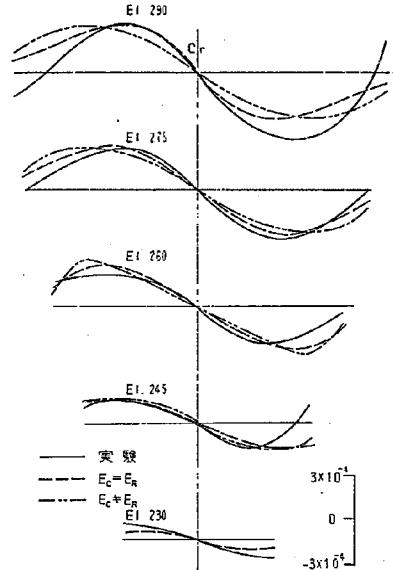


図-34 異常洪水時捩り方向撓み比較図

されている。

まずアーチの推力および曲げモーメントについて考察すると、

(i) 推力は全般的に見て実験値の方がかなり小さい。また、 $E_R = E_C$ とした場合の計算値と、 $E_R \neq E_C$ とした場合の計算値とを比較すると、両者は大体近い値を示しているが、細かく見ると、上部では $E_R = E_C$ とした場合の方が下部では $E_R \neq E_C$ とした場合の方が大きな値をしている。

(ii) 曲げモーメントは全般的に見て拱頂部では実験

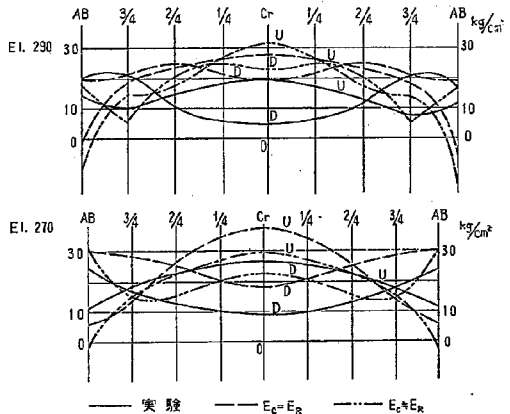


図-35 (a) 上流面完全調整による水平応力比較図

値の方が大きく、アバットメントでは計算値の方が大きい。特に下部の拱頂部では実験値は計算値に比していちじるしく大きな値を示している。また $E_R = E_C$ とした場合の計算値と $E_R \neq E_C$ とした場合の計算値とを比較すると、全般に $E_R = E_C$ の場合の値の方が大きな値を示しているがその差は小さい。

(iii) 前にも述べたように、推力は全般的に見て実験値の方がかなり小さいが、接線方向変位は実験値の方がいちじるしく異なっていることを合せ考えるならば、推力による岩盤の表面に垂直な方向への変形常数 (θ) の値が計算では過小にとられていたのではないかと思われる。この傾向は鳴子ダムの構造模型実験でも観察された。これは計算値と実験値との相違の原因の一つを示しているものと思われる。

次に片持梁のモーメントについて考察してみよう。

(i) 実験値と計算値とはかなり相違しており、特に拱頂片持梁においていちじるしい。全般に実験値の方が正(上流面に圧縮応力)側が生ずるような曲げモーメント側の値を示している。

また $E_R = E_C$ とした場合の値と $E_R \neq E_C$ とした場合の値を比較すると、比較的一致しているが、 $E_R \neq E_C$ とした場合の方が拱頂部では正の側の値を、他では負の側の値を示している。

接線方向剪断力、捩れモーメントを比較すると

(i) 接線方向剪断力は全般に実験値の方が小さく、標高 260m 以上では符号が逆になっている。この傾向は鳴子ダムの場合にも見られたが、これは鉛直方向の曲率と、アーチに推力が作用した際のポアソン比の影響により、中央部が隆起し、アーチ内に剪断力が加わる。この剪断力は接線方向調整による剪断力と方向が上部では反対であるため実験値が小さい値を示したものと解釈される。このような剪断力は鉛直方向変位が中央部程大きいときに大きくなるが、図-8(a)から標高 260m 以上ではこの傾向はかなり著しい。 $E_R = E_C$ とした場合の計算値と $E_C \neq E_R$ とした場合の計算値とを比較すると、上部では大差ないが、下部では $E_R = E_C$ とした場合の値の方がかなり小さく、実験値に近い値を示している。

(ii) 捩れモーメントは全般に実験値の方が小さい。また計算値の中では、 $E_R = E_C$ とした場合の値の方が小

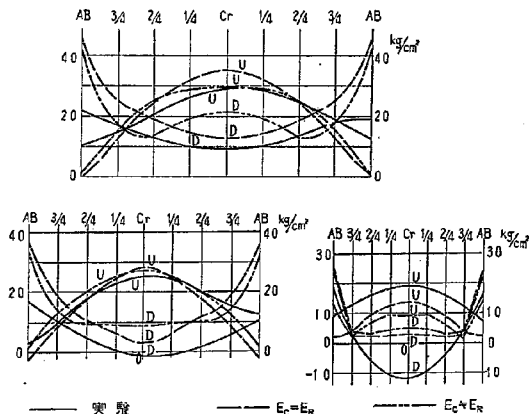


図-35 (b) 完全調整による水平応力比較図

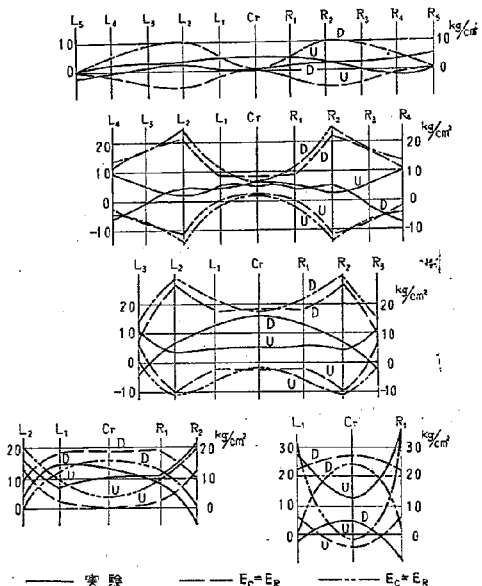


図-36 完全調整による鉛直方向応力比較図

さい値を示している。

以上実験値と計算値との比較を行なったが、全般的に見てかなりの差がある。その内特にいちじるしいのはアーチの推力と、片持梁の曲げモーメントであった。これらの断面力はダムの形状決定の際に極めて重要なものであるから、今後ともその相違について研究する必要があると思われる。

次に、アーチダムの計算で初期の設階においてよく用

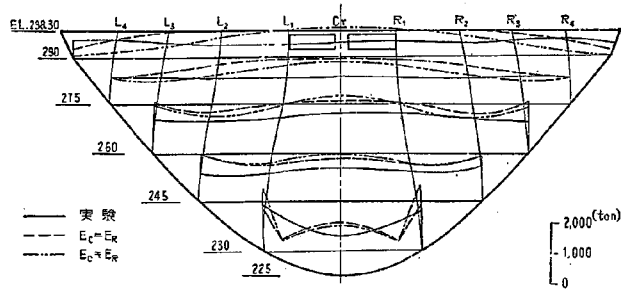


図-37 (a) 三成分調整アーチスラスト比較図

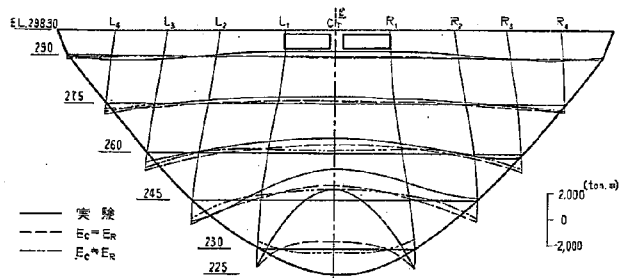


図-37 (b) 三成分調整アーチモーメント比較図

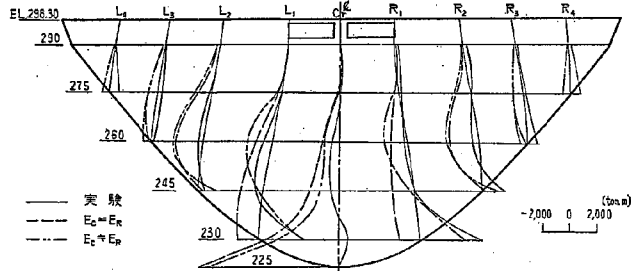


図-37 (c) 完全調整 (自重加算) 片持梁モーメント比較図

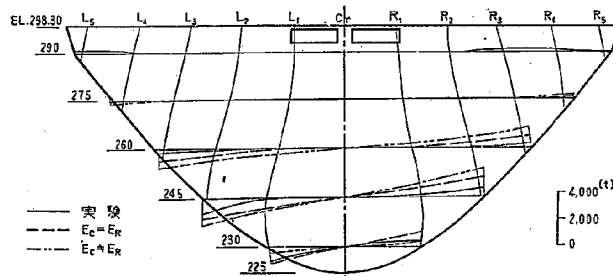


図-37 (d) Twist moment 比較図

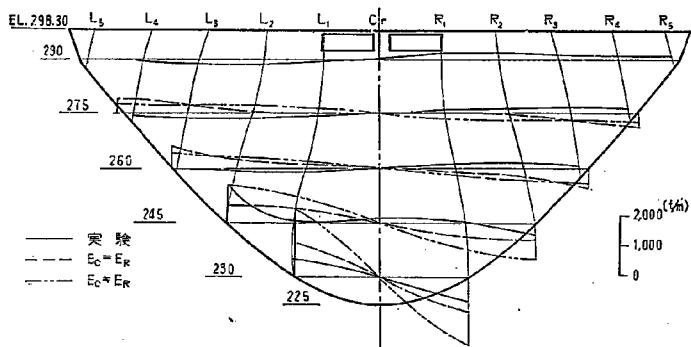


図-37 (e) Tangential Shear 比較 図

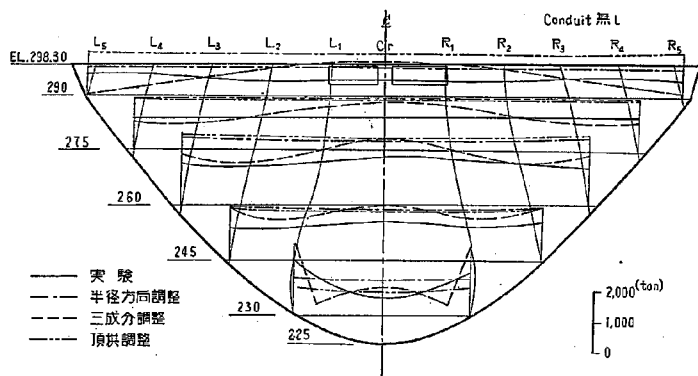


図-38 (a) アーチスラスト

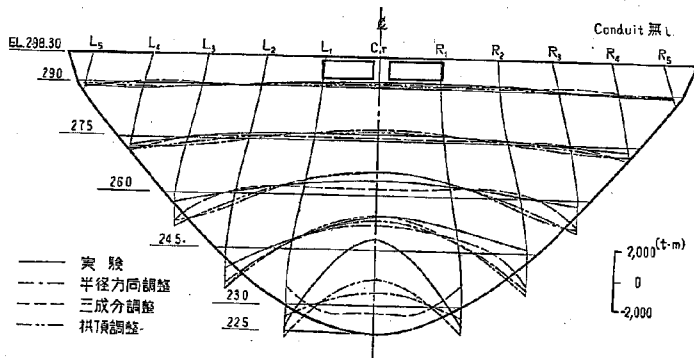


図-38 (b) アーチモーメント

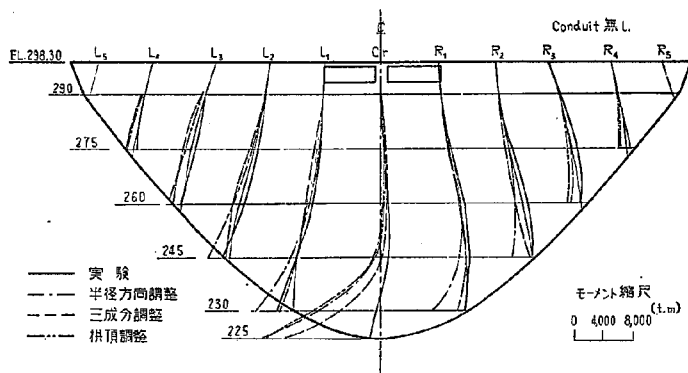


図-38 (c) 片持梁モーメント比較図

いられる拱頂片持梁法、半径方向調整の計算結果が三成分調整結果あるいは実験結果とどのような関係にあるかについて比較を行なった。その結果を示すと図-38の如くである。すなわち

(i) アーチ推力は、いずれの計算値も全般に実験値より大きい。拱頂片持梁法の結果と、半径方向調整結果とは大差なく、拱頂部から両岸取付部までほぼ一様な値を示している。一方三成分調整の結果は、これとはやや異なり、拱頂部と両岸取付部に最大値を示し、 $1/2$ 点付近で最も小さな値を示している。さらに標高 245m 以上では拱頂部の方が大きい、それ以下では逆に両岸取付部の方が大きくなっている。また拱頂部での値は拱頂片持梁法および半径方向調整結果とはほぼ一致している。

(ii) アーチの曲げモーメントは標高 230m をのぞいて実験値と計算値とは大差ないが、標高 230m の拱頂部では実験値の方がかなり大きな値を示している。拱頂片持梁法と半径方向調整結果とは極めてよく一致しているが、三成分調整結果は全般に小さな絶対値を示している。

(iii) 片持梁の曲げモーメントは全般的に実験値と計算値とかなり相違している。この場合にも拱頂片持梁法と半径方向調整結果とはかなりよく一致しているが、三成分調整の結果はやや実験値に近い結果を与えている。

試し荷重法は元来、三成分調整をもって完成された形としているが、その計算を行なうには極めて多大の時間と労力を要するので、その設計の段階に応じて、拱頂片持梁法、半径方向調整等の簡略法を用いるのが一般であ

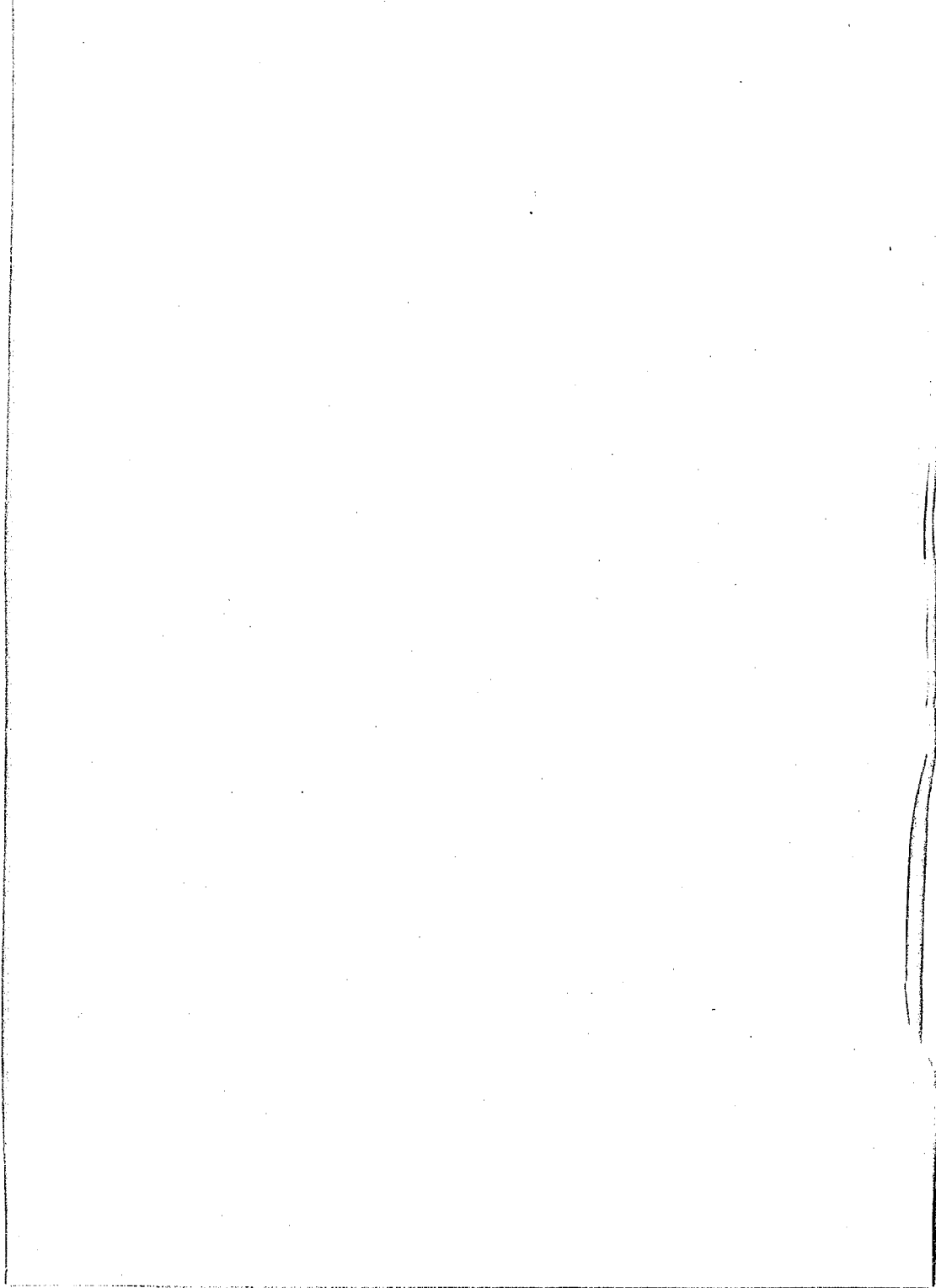
る。これらの簡略計算法と三成分調整結果とは多少の差はあるが、大体近い値を示しており、いずれも実験値とはかなり異った値を示している。このことは試し荷重法は調整する成分を増すことによりいちじるしく精度をますという性質のものではなく、むしろ岩盤の変形常数の計算などに実験値と異なる結果を与える原因があるのではないかと思われる。

5. 結 論

前にも述べたように綏北ダムの設計に当っては主として模型実験結果にもとずいて進めて来た。この模型実験の対象とされた荷重は異常洪水時の水圧荷重、堆砂圧と自重のみで、これらの荷重の時の応力分布、安全性は応力測定、あるいは破壊試験を通して十分検討された。しかしわれわれの設計の対象となる荷重はこの他に常時満水位時水圧荷重+地震荷重、超過貯水位時水圧荷重+ $1/2$ (地震荷重)あるいはこれらの荷重の組合せにさらに温度荷重が加わった場合など、いろいろな組合せがある。これらの荷重の組合せのすべてに対してとくに温度荷重を含む場合に対して、実験により応力分布および安全性を求めることは極めて困難であるので、各々の荷重の組合せの時の計算結果を用いて応力分布を推定することにした。

参 考 文 献

- (1) G.M. Smith and L. Young: "Ultimate Flexural Analysis Based on Stress-Strain Curves of Cylinders" Journal of A.C.I. Dec. 1956.



γ-線透過法によるコンクリートの材料分離現象の測定

(第二報)

有 泉 昌*・近 藤 紀**・森 芳 徳***

(昭和 35 年 4 月)

目 次

1. ま え が き.....(1)	6. 測定結果整理の方法.....(7)
2. 実験装置.....(1)	7. 実験結果ならびに考察.....(11)
3. 供試体の製作.....(2)	8. 今後に残された問題点.....(21)
4. 測 定.....(2)	9. 結 論.....(23)
5. コンクリートの γ-線透過試験法 における問題点.....(2)	10. あとがき.....(23)

1. ま え が き

前回の報告¹⁾では、マグネタイト、バライトなどを重骨材として、種々の条件で打設した重コンクリートの材料分離現象について、 ^{60}Co の γ-線を使って調べた結果について報告した。その結果として著者らは、この試験方法は、供試体各部間における僅少な密度差を確実に把握できるので、コンクリートのような土木構造物材料の無破壊試験には極めて優れた方法であることを見出した。しかし、その反面において、供試体を構成する各成分元素の原子番号の開きが大きければ、各成分の γ-線に対する質量吸収係数が近似的に一定と見なしがたくなり、供試体の均質性を求める程度の定性的な測定では別に問題はないが、コンクリートの材料分離などのような多くの要因の組合わさった現象を、その属性たる密度の偏倚を唯一の指標として追求するためには、多くの検討を要する問題が含まれていることを指摘しておいた。著者らは前報で報告した実験の継続として、重コンクリートにおける材料分離現象調査のために実施した γ-線透過試験法の成果を基礎とし、同方法により普通コンクリートについてその材料分離現象を調査するに当って、これら問題について検討した。

普通コンクリートに対する γ-線透過試験法は、重コンクリートに対するそれと比べて、材料分離によって引き起こされる密度差が小であるために、γ-線源として質量吸収係数の大きな小エネルギーのものを使用する必要がある。この小エネルギー γ-線源には、 ^{60}Co などの線源に比べて、高価であり、半減期が短かいという経済的に不利な点以外に、その構成材料間の質量吸収係数の開きが増加するとい

う欠点がある。このことについては前報でも、 ^{60}Co の γ-線に対する質量吸収係数が、普通使用されているコンクリートと重コンクリートに使用するマグネタイトで約 4% の差異を生じること述べておいたが、小エネルギー γ-線源、たとえば、 ^{170}Tm では、マグネタイトの質量吸収係数はコンクリートのその 2 倍に達する。こういう傾向は他の原子番号が比較的接近した元素についても云えることであって、コンクリートの主要構成元素である酸素と珪素についてみても、後者の ^{170}Tm の γ-線に対する質量吸収係数は前者のだいたい 1.3 倍である。材料分離を起こしたコンクリート供試体はその各部において元素の偏在化を起こしているから、各透過点における質量吸収係数には差が存在し、透過 γ-線強度をもって一義的にその部分の平均密度を求めるわけにはいかない。

著者らは、とくに以上のような問題に着目して、普通コンクリートにおける材料分離現象を測定した。以下この実験について報告する。

2. 実験装置

[1] 透過装置

透過装置は前回の実験で組み立てたものをそのまま使用した。ただし、コリメーター間の間隔には多少の変更を加えた。透過装置の配置を図-1 に示す。

[2] γ-線源

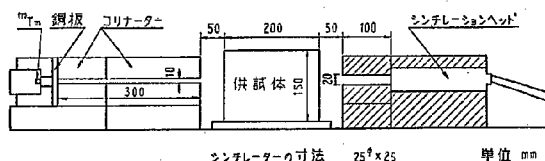


図-1 透過装置

γ-線源としては前にも述べたように、質量吸収係数の大きな小エネルギーのものということで、 ^{170}Tm を使っ

* 地質化学部長 ** 地質化学部化学研究室 研究員
*** 地質化学部化学研究室

た。入手した ^{170}Tm 線源は400mcであって、強度を少し減らす必要を認めたので、実際に測定に当っては、線源と線源側コリメーターとの間に、厚さ2cmの銅板を挿入して線束を減衰させた。

〔3〕 検出器部

検出器部は前回の実験と同じく、指向型シンチレーションヘッドと1,000進式スケーラーを組み合わせたものを使った。

3. 供試体の製作

〔1〕 型 枠

木製で縦15cm、横20cm、高さ130cmのものを使用した。

〔2〕 配合材料

以下にあげるものを使用した。

砂 酒匂川産 粒径2mm以下、 $d=2.56$

砂利 酒匂川産 粒径10mm~20mm $d=2.76$

ポルトランドセメント 小野田社製

高炉セメント 秩父社製

シリカセメント 秩父社製

比重、化学分析結果を表-1に示す。

表-1 使用セメントの化学分析結果

セメント	ポルトランド	シリカ	高 炉
比 重	3.14	3.06	3.04
Ig loss	0.63	0.70	0.32
Insol	0.43	10.45	0.55
SiO ₂	22.87	20.59	27.69
Al ₂ O ₃	5.16	5.03	11.58
Fe ₂ O ₃	3.01	3.11	1.82
Mn ₂ O ₃	—	—	0.74
CaO	64.34	57.08	52.30
MgO	1.38	1.80	3.70
SO ₃	1.45	1.53	1.47
S	—	0.01	—
計	99.27	100.30	100.66

AB剤 グレックス、プロテックス、ビンゾール

〔3〕 配合ならびに打設の条件

供試体の配合、打設に当っては、次の種々の値を適当に組み合わせた。

単位セメント量(m³当り) 400kg, 320kg, 240kg

G/S 1.00, 1.15, 1.30

スランブ 8cm 15cm

振動時間 0秒, 30秒, 1分, 3分

AB剤 グレックス、プロテックス、ビンゾールともに 0.1%, 0.03%, 0.01%, 0.003%

打ち継ぎ目 なし, 1, 2

〔4〕 打 設

計量し終わった材料を練板上に置き、手練りで少こし固目に練和し、その一部をとってスランブを測定し、所定のスランブになるまで水を加えつつ練和した後、型枠に投入した。使用した全水量はすべて記録した。パイプ

レーターは前回に使用した径38mm、振幅32mm、振動数毎分8,000のものを使用した。打ち継ぎ目のあるものは10分間の間隔を置いて以上の操作を繰り返す。振動を与える場合は新しく投入したコンクリート中だけでパイプレーターを上下させるようにした。供試体の高さは打設後において120cmになるよう調節した。打設後脱型までの期間は、コンクリートの上面に濡らした布を置いて、乾燥を防いだ。

〔5〕 脱型と養生

打設後48時間経過したコンクリートは脱型し、ただちに表面養生剤としてクレハロン・ラテックスの2倍液を表面に塗布して、厚い被膜を形成させた。

4. 測 定

測定は図-2に示すように供試体の打設方向に平行な3本の線上で、3cm間隔に3分間行なった。そして打設方向同一の高さの3点の測定値を平均してその高さの測定値を代表させた。

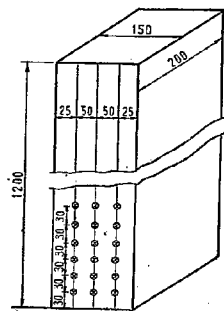


図-2 測定点の配置図 単位mm

5. コンクリートのγ線透過試験法における問題点

〔1〕 ^{170}Tm

^{170}Tm は $^{170}\text{Yb}^{99}$ に基づく84Kevのγ線を放出するので、weak γ-sourceとして賞用されているが、この線源はγ線の収率が悪い。しかし、この低収率の一部ybのX線でカバーしている。 ^{170}Tm の崩壊図式を図-3で見ると、元来、単位崩壊について10%の割合で存在するはずの84Kevのγ線は、主としてL-電子によるinternal conversionのため、存在率は約3%となっている。 ^{170}Tm のγ線、X線のエネルギースペクトルについて、Cameronら⁹⁾が測定結果を出しているので、これを図-4に示す。ここで84Kevのピークは ^{170}Tm のγ線、52KevのピークはYbのKα-X線である。図-4には100Kev以上のエネルギー分布は示していないが、100Kev以上の分布は ^{170}Tm のβ線の制動輻射線に基づくものであ

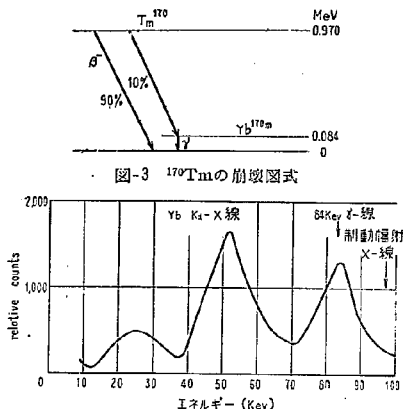


図-3 ^{170}Tm の崩壊図式

て、Wyardら⁴⁾によって示されているように、エネルギーの増加とともに著減し、 β -線の最大エネルギーのところ、0.970MeVで分布は0となる。このエネルギー範囲に分布する制動輻射線は確率的に極めて少ないので、実験に当っては無視できるものと考えられる。図-4によれば、 ^{170}Tm の84Kevの γ -線に比べて、52KevのX-線が強度的に優越している。しかし、この52KevのX-線は図-1に示すように、 ^{170}Tm のビームの通路に、厚さ2cmの銅板を置いて河通したため、ほとんど完全に消失したのと考えられる。すなわち、銅の密度は8.9であって、

$$\mu_m(\gamma=52\text{Kev})=2.4\text{cm}^2/\text{g}$$

$$\mu_m(\gamma=84\text{Kev})=0.7\text{cm}^2/\text{g}$$

であるから、

$$\mu_m \rho d(\gamma=52\text{Kev})=42.72$$

$$\mu_m \rho d(\gamma=84\text{Kev})=12.46$$

$$[e^{-\mu_m \rho d(\gamma=84\text{Kev})}] / [e^{-\mu_m \rho d(\gamma=52\text{Kev})}] = e^{12.72-12.46}$$

$$= e^{0.26}$$

$$= 10^{13}$$

となり、銅板を透過することによって、84Kevの γ -線は52Kevのそれと比べて 10^{13} の存在比をもつことになるから、52KevのX-線はほとんど完全に消失したという推論は成り立つ。ただし、この炉通の過程において、84Kevより高エネルギーの制動輻射線が、84Kevの γ -線に対してその存在比を増してくることは否めない。

(2) 原子番号区、密度d、 γ -線のエネルギーと質量吸収係数 μ_m との関係

まがきのところで述べておいたように、普通コンクリートのような材料分離によって引き起こされる密度の偏倚が小である場合に、精度を高く密度差を測定するためには、大きな μ_m を与える γ -線を選ばねばならない。

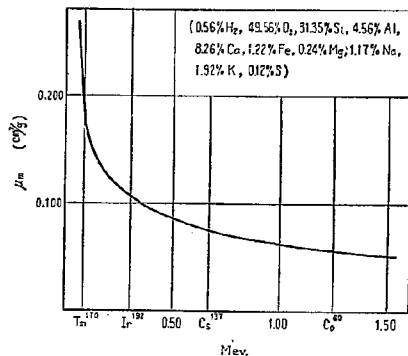


図-5 コンクリートに対する γ -線エネルギーと μ_m との関係

コンクリートのみならず、一般の物質についても、 γ -線のエネルギーが小さいほど、 μ_m が大きくなり、とくに γ -線のエネルギーが吸収物質のK-吸収端に接近したと、この増加の傾向ははなはだしくなってくる。この関係を表からコンクリートについて求めた値をもととして、図-5に示す。

図-5でわかるように、 γ -線のエネルギーが0.1MeVより小になる附近から、 μ_m が急速に増大する。 ^{170}Tm の γ -線のエネルギー付近では、 μ_m は ^{60}Co のそれが0.056cm²/gであるのに対し、0.190cm²/gにも達する。

この μ_m は指数の累となっており、透過後の γ -線計数値に強くよいてくる。たとえば、コンクリート供試体で、密度dが2.2の場合と2.3の場合とを比較すれば、透過厚を20cmとしたとき、 ^{60}Co では計数値の比

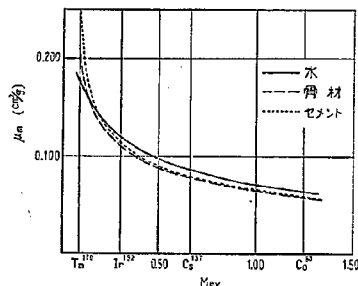
$$\frac{I(d=2.2)}{I(d=2.3)} = \frac{e^{-0.056 \times 2.2 \times 20}}{e^{-0.056 \times 2.3 \times 20}} = e^{0.056 \times 20 \times (2.3-2.2)} = e^{0.112} = 1.12$$

^{170}Tm では、

$$\frac{I(d=2.2)}{I(d=2.3)} = \frac{e^{-0.190 \times 2.2 \times 20}}{e^{-0.190 \times 2.3 \times 20}} = e^{0.380} = 1.46$$

このようなわけで、小さな密度差を確実に把握するためには、大きな μ_m を与える小エネルギーの γ -線を使用した方が有利ということが云える。

しかし、この小エネルギー γ -線による透過試験法では一つの大きな問題が発生してくる。これは物質の原子番号によって μ_m の値が相当な開きを持つてくることである。図-5ではコンクリートの平均組成に対する μ_m のエネルギー別変化を図示したが、このコンクリートをその3大主要材料、すなわち、水、骨材、セメントに分けて、おのおのその μ_m が γ -線のエネルギーにしたがってどういう変化をするかということを図示したものが図-6である。図-6で砂と砂利の密度は前に示したように、大

図-6 γ -線エネルギーと μ_m との関係表-2 コンクリート主要構成材料の d, Z, μ_m
(γ -線のエネルギー=0.084Mev)

材 料	密度 (d)	平均原子番号 (Z)	質量吸収係数 (μ_m)
水	1.00	7.2	0.177 cm ² /g
骨 材	2.65	11.6	0.201
セメント (ポルトランド)	3.14	14.8	0.249

した差がなく、構成元素比もだいたいにおいて等しいとみなされるので、ここではコンクリートの打設条件として G/S 比を 1:1 とした場合をとり砂と砂利との等量づつの混合物を骨材として表わすことにする。 γ -線吸収散乱の原理上、水素をその構成成分とする水の質量吸収係数は、骨材、セメントのそれと図-6でわかるように少し違った値をとっている。この傾向は γ -線のエネルギーが ^{60}Co から ^{192}Ir までの範囲ではだいたい同じであるが、0.20Mevより小さいエネルギー範囲になると、この傾向は崩れて来、同時にこれら3成分の質量吸収係数間の差が増大してくる。 ^{60}Co くらいの γ -線エネルギーについては、水、骨材、セメントそれぞれの質量吸収係数は、近似的に一定と見なしても大した誤差は生じないのであるが、 ^{170}Tm の γ -線エネルギー付近では、図-6でもわかるように、質量吸収係数を一定とみなすわけにはいかない。表-2に ^{170}Tm の γ -線に対する水、セメント、骨材の密度、平均原子番号、質量吸収係数を挙げておいた。ここで μ_m の値は各元素別の種々の γ -線エネルギーに対する質量吸収係数のデータ表より0.084Mevのエネルギーに対応するものを内挿して求めたものである。表-2で分るように質量吸収係数 μ_m は平均原子番号 Z と同じ方向に増加する傾向をもっている。これは密度 d に対しても同様なことが云える。このことは数式的に云い表わすと、 γ -線の透過による減衰の式

$$I = I_0 e^{-\mu_m d x}$$

d : 密度, x : 透過厚

において、 γ -線のエネルギーがだいたい0.5Mevより大きいとき、すなわち μ_m は物質の単位重量中の電子数によって定まるようなときにおいては、 μ_m は一定と見

なし得、また透過厚 x は既知であるから、 I_0 を透過前に求めておけば、 I から d が一意的に求まり、さらにコンクリート中の水セメント比は各部について共通であるとの仮定を付け加えることによって、その部分におけるコンクリートの主要3成分の存在比が求まる。いまこのことを一例を挙げて説明すると、 I_0 と I とから d が求まるので、これを使用セメントがポルトランドセメントの場合は図-7、高炉セメントの場合は図-8シリカセメントの場合は図-9でそれに対応する d のところを探す。そうすれば、図でわかるように同一の d を示す点は一直接線上に並んでいる。ここで $A=100\%$ の点を原点として、コンクリートの水セメント比に対応する点を $C-W$ 線上にとり、原点とこの点を結び、この線と d の値を示す線とが交差する点が、その d の値を示す点の材料容積混合比を表わす。たとえば図-7において $d=2.30W/C=0.70$ のとき、材料混合比は $A:C:W=0.642:0.114:0.244$ となる。シリカセメントの場合は同様に図-9から、 $A:C:W=0.650:0.110:0.240$ となる。

次に γ -線のエネルギーが0.50Mevより小さな場合、すなわち μ_m の値は原子番号 Z によって大きく変動する場合について考えてみる。この場合においては、 μ_m は前と同じように一定とみなすことはできないので、

$$I = I_0 e^{-\mu_m d x}$$

において I_0 と I とから求まるのは $\mu_m d$ 、すなわち線吸収係数 μ_e である。そこでコンクリートの3主要成分についてあらかじめ、 μ_e の三角図表を作成しておけば μ_e の値と水セメント比から、前と同じ手続きで、コンクリート中のセメント、骨材、水の比率が求まる。またこれから d を求めようとするれば、この得られた3成分の比率と同じ点を図-7または図-8、図-9の d -図表上にとって、その点の示す d の値を読めばよい。ここにおいて必要とする0.084Mevの γ -線に対する μ_e -図表をポルトランドセメントについては図-10に、高炉セメントについては図-11、シリカセメントについては図-12に示す。なお、図-7~12を作るに当たって必要とした数値は表-3から取った。

以上のようなわけで μ_m の値が物質によって大きく変動するようなエネルギー範囲の γ -線透過試験に使用する場合も、あらかじめ μ_e -図表、 d -図表を作成しておけば、コンクリートの材料分離現象の調査にはまったく支障は感じられない。とくに材料分離現象は d の値の変化をもって追求するよりも、構成材料間の比率の偏倚をも

表-3 セメントの μ_m, d

セメント種類	$\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	$d(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\mu_m d(\text{cm}^{-1})$
ポルトランド	0.249	3.14	0.782
高 炉	0.238	3.04	0.724
シ リ カ	0.243	3.06	0.744

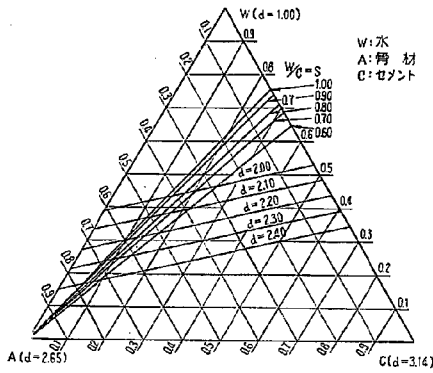


図-7 ポルトランドセメントを使ったコンクリートの3主要成分の容積比と d との関係 (d -図表)

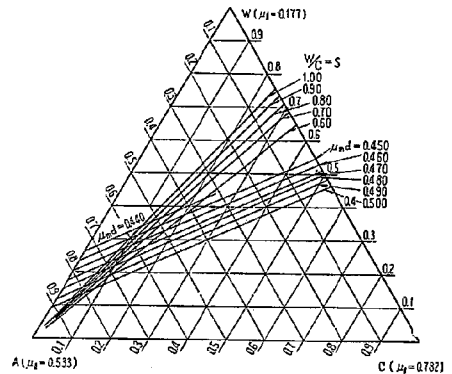


図-10 ポルトランドセメントを使ったコンクリートの μ -図表 (容積比)

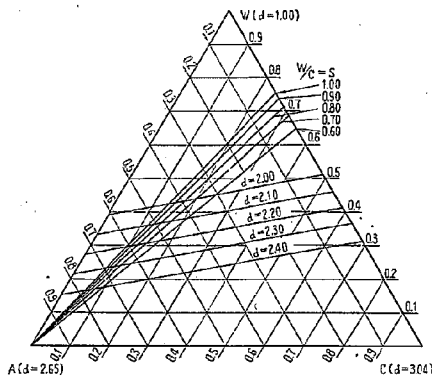


図-8 高炉セメントを使ったコンクリートの3主要成分の容積比と d との関係 (d -図表)

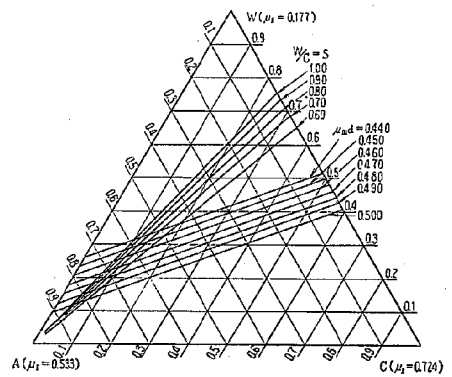


図-11 高炉セメントを使ったコンクリートの μ -図表 (容積比)

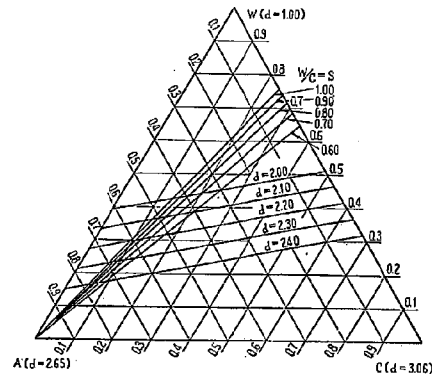


図-9 シリカセメントを使ったコンクリートの3主要成分の容積比と d との関係 (d -図表)

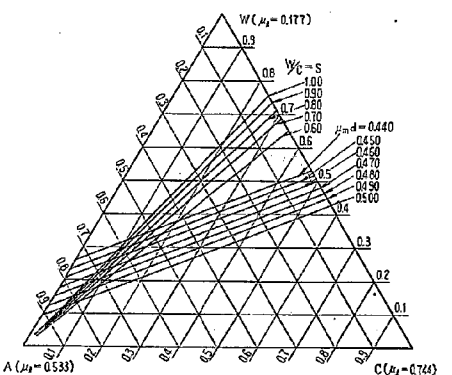


図-12 シリカセメントを使ったコンクリートの μ -図表 (容積比)

って追求する方が、より合理的であるからなおさらである。なお、以上の方法はコンクリート中の進行空気無視したものであるが、相対的な材料間の比率を問題とする場合は、これでもさしつかえない。なぜならば、コンクリート中に進行された空気は、セメントペーストすなわち水と挙動をともにするものと考えられるからである。コンクリート中に空気が含有されているとしたときの議論は次項で行なう。

[3] 進行された空気量の影響、ならびにそれを考慮したコンクリート各部における構成材料比の数式的解法

コンクリート供試体透過前の γ -線強度を I_0 とおき、透過後の γ -線強度を I とおく。そして進行された空気は水と行動をともにするものとする。そうすれば、ある測定点においては、 I は次式で表わされる。

$$I = I_0 e^{-(\mu_{m1} d_1 x_1 + \mu_{m2} d_2 x_2 + \mu_{m3} d_3 x_3)l} \quad (1)$$

ただし、

l : 透過距離(=20cm)

x : それぞれの成分のその測定位置における容積比
 附加数字 1: セメント

2: 骨材

3: 水

ここでは当然空気が進行されているから

$$x_1 + x_2 + x_3 < 1$$

である。

このコンクリート供試体を打設方向に十分大きい n 個の点をとって測定するものとする。

(1)式の $\ln$ をとると

$$\ln I = \ln I_0 - (\mu_{m1} d_1 x_1 + \mu_{m2} d_2 x_2 + \mu_{m3} d_3 x_3)l \quad (2)$$

これを n 個の測定について足し合わせると

$$n \ln I_0 - \sum \ln I = (\mu_{m1} d_1 \sum x_1 + \mu_{m2} d_2 \sum x_2 + \mu_{m3} d_3 \sum x_3)l \quad (3)$$

ここで、コンクリート供試体の材料配合に当って使用したセメント、骨材、水のこれら三成分の全容積に対する容積比をそれぞれ a, b, c 、と置き、水に対する進行空気量の存在比を t とすれば、 $a+b+c=1$ であるから

$$\sum x_1 = \frac{na}{a+b+(1+t)c} = \frac{na}{1+tc}$$

$$\sum x_2 = \frac{nb}{a+b+(1+t)c} = \frac{nd}{1+tc}$$

$$\sum x_3 = \frac{nc}{a+b+(1+t)c} = \frac{nc}{1+tc}$$

となり、これを(3)式に入れて

$$n \ln I_0 - \sum \ln I = (\mu_{m1} d_1 a + \mu_{m2} d_2 b + \mu_{m3} d_3 c) \frac{nl}{1+tc} \quad (4)$$

I_0 と $\sum \ln I$ を求めておけば(4)式から t が求まる。供試

体の平均空気含有率は $\%$ で表わすと

$$\frac{tc}{1+tc} \times 100\% \quad (5)$$

となる。これで t の値が求まるから、これから供試体各部における構成材料比を求めてみる。

前報で報告したように、かなり材料分離が進行したコンクリート供試体にあっても、その水セメント比は一定であるとみなすことができるので、(1)式を骨材とセメントペーストとの二成分系に書き変えてみる。そうすれば

$$I = I_0 e^{-(\mu'_{m1} d'_1 x'_1 + \mu_{m2} d_2 x_2)l} \quad (6)$$

μ'_{m1} : セメントペーストの μ_m

d'_1 : セメントペーストの d

x'_1 : セメントペーストの x

水セメント比 W/C を S と置いた場合($d_3=1$ とする)、 μ'_{m1}, d'_1, x'_1 は、それぞれ

$$\mu'_{m1} = \frac{\mu_{m1} + S \mu_{m3}}{1+S} \quad (7)$$

$$d'_1 = \frac{(1+S)d_1}{1+sd_1} \quad (8)$$

$$x'_1 = \left(1 + \frac{1}{sd_1}\right)x_3 \quad (9)$$

となる。

(6)式から

$$\ln I_0 - \ln I = (\mu'_{m1} d'_1 x'_1 + \mu_{m2} d_2 x_2)l$$

$$\mu'_{m1} d'_1 x'_1 + \mu_{m2} d_2 x_2 = \frac{\ln I_0 - \ln I}{l} \quad (10)$$

また x'_1 と x_2 との関係から

$$\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)x'_1 + x_2 = 1 \quad (11)$$

(7)式と(8)式とを連立方程式として解けば、 x'_1 と x_2 、すなわち x_1, x_2, x_3 がすべて求まることになる。以上述べた方法は数値的な解法であるが、これを図-9、図-10の $\mu_m d$ -図表を使って近似的に解くには、 $\mu_m d$ -図表で $\mu_m d$ の値に対応する W の比率を求め、これと t とから(t はあらかじめ前述した方法で求めておく)、その部分における空隙の比率 v を求める。

次に $\mu_m d \times (1/(1-v))$ の値に対応する3成分の比率を同じ図表上で求め、これら3成分の比率にそれぞれ $(1-v)$ を乗じて、空隙が存在するコンクリートの4成分の構成比を知ることができる。

[4] コリメーションの角度と μ_m との関係

μ_m は実際には無限小立体角内へ放射するような条件の narrow beam に対する値であるが、こういう装置は現実的に不可能であって、通常の透過装置では幾分かの小角散乱線が散乱を受けずに γ -線に混入して計数されるため、 μ_m の値は現実には真の値より小さな値をとる。narrow beam の透過装置において、実験精度に影響を及ぼす小角散乱線は主として Compton 小角散乱線と Rayleigh 散乱線とよりなる。とくに後者はエネルギーが小さい場合に、非常に影く影響を及ぼし、 z が大

きい元素に対するほど、その影響はなはだしくなる。この間の関係を Colgate の図-13 のようになることを示している。図-13 でわかるように pb では立体角が 10^{-2} より小となると、 μ_m が急激に増加する。この増加は Rayleigh 散乱線によるものである。Cu では Rayleigh 散乱線の影響は、この図でもわかるように出ていない。しかし Cu でも γ 線のエネルギーが小となれば、相当影響が出て来るものと考えられる。

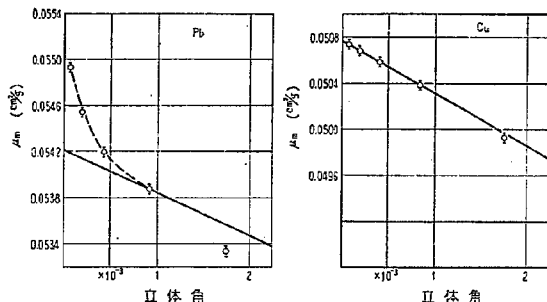


図-13 ビームの立体角と質量吸収係数との関係(^{60}Co)

次に Compton 小角散乱線とビームの開きの立体角間の関係を調べて見よう。

図-13 でもわかるように、この間には一次的な関係が成立するはずである。いま、ある供試体を散乱を受けずに透過した γ 線の光子数を T 、散乱角度が 0 から θ までの範囲で散乱を受けた γ 線光子数を S とすれば

$$T/S = N_e x_0 \sigma_s^0 \quad (12)$$

N_e : 単位体積中の電子数
 x_0 : 吸収体の厚さ
 σ_s^0 : 0 から θ までの角度範囲における散乱断面積

なる関係式が成立する。 θ が小さい場合においては Colgate の図によれば近似的に次式が成立する。

$$\sigma_s^0 = \pi \gamma^2 \theta^2 \left(1 - \frac{\theta^2}{12} (9\gamma + 4) \right) \quad (13)$$

$$\begin{cases} \pi \gamma^2 = 2.5 \times 10^{-25} \text{cm}^2 \\ \gamma = \frac{h\nu}{mc^2} \end{cases}$$

以上の関係式から、この実験に使用した図-1の透過装置で、どれほどの μ_m の誤差が生じるかを計算してみよう。 θ は図-3から計算すると 0.014 である。また、コンクリートの密度を 2.3 と置くと N_e は近似的に 6.9×10^{23} となり、透過厚 x_0 は 20cm であるから

$$N_e x_0 = 1.38 \times 10^{25} \text{cm}^{-2}$$

^{170}Tm の場合 $\gamma = 0.164$ であるから (13) 式に入れると

$$\begin{aligned} \sigma_s^0 &= 2.5 \times 10^{-25} \times 0.014^2 \\ &\times \left(1 - \frac{0.014^2}{12} \times 5.476 \right) = 5.1 \times 10^{-29} \text{cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S/T &= 5.1 \times 10^{-29} \times 1.38 \times 10^{25} \\ &= 7.04 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

すなわち、計数値が 0.07% 増加するという結果になる。Compton 小角散乱線を捨てるために起こる μ_m の変化は

$$\Delta \mu_m = - \frac{NZ}{A} \sigma_s^0$$

コンクリートの主要構成元素については、 $A = 2Z$ がたいたい成立するから、

$$\Delta \mu_m = -1.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{g}$$

ビームの開きの角度が一般に θ (radian) の場合は

$$\Delta \mu_m = -7.5 \times 10^{-2} \theta^2 \text{cm}^2/\text{g} \quad (14)$$

(14) 式は入射 γ 線のエネルギーにはさして依存しない。以上述べたように μ_m はビームの開きによって、僅かながら値が変化して行くから、γ 線の透過試験に当っては、この点にも注意が必要があると考えられる。

6. 測定結果整理の方法

[1] コンクリート供試体各部における主要構成材料比の計算

一例として下記の条件で打設した 4 個の供試体に関する諸値の求め方を示す。

供試体番号	No. 41	No. 42	No. 43	No. 44
ポルトランドセメント	11.5kg	"	"	"
砂	35.1kg	"	"	"
砂利	35.1kg	"	"	"
水	7.5l	"	"	"
振動時間	0 min	0.5 min	1 min	3 min

この配合において

$$W/C = S = 0.65$$

容積比

$$\begin{aligned} \text{セメント : 骨材 : 水} &= 0.097 : 0.704 : 0.199 \\ &= a : b : c \end{aligned}$$

μ_{md} の値	セメント	0.782cm ⁻¹
	骨材	0.533cm ⁻¹
	水	0.177cm ⁻¹

(4) 式において括弧内の値

$$\begin{aligned} \mu_{m1} d_1 a + \mu_{m2} d_2 b + \mu_{m3} d_3 c \\ = 0.4863 \text{cm}^{-1} \end{aligned}$$

使用したビームの強度 I_0 は

$$\ln I_0 = 18.28$$

この 4 個の供試体の測定結果を 図-14(a)~(d) に示す。

測定点の数 $n = 24$ である。

$\sum \ln I$ の値は	
No. 41 では	210.73
No. 42 では	208.44

No. 43 では 208.08

No. 44 では 206.52

$$n \ln I_0 = 24 \times 18.28 = 438.72$$

 $t=20$ であるから、これらの値を(4)式に入れると、

供試体 No. 41 では

$$438.72 - 210.73 = 0.4863 \times \frac{24 \times 20}{1 + 0.199t}$$

$$= \frac{233.424}{1 + 0.199t}$$

$$1 + 0.199t = \frac{233.42}{227.99}$$

$$\therefore t = 0.1197 \approx 0.120$$

この供試体の平均空気含有量は(5)式から

$$\frac{0.120 \times 0.199}{1 + 0.120 \times 0.199} \times 100\% = 2.33\%$$

同様に No. 42 では

$$1 + 0.199t = \frac{233.42}{230.28}$$

$$\therefore t = 0.068$$

平均空気含有量 = 1.33%

No. 43 では $t = 0.061$

平均空気含有量 = 1.20%

No. 44 では $t = 0.026$

平均空気含有量 = 0.51%

このように振動時間が長くなるに従って供試体の平均空気含有量が減少して来ることがわかる。

次に供試体の各部における構成材料比は次のようにして求まる。一例として No. 44 の底面から 50 cm のところをとってみると図-14(d)から

$$\ln I = 8.41$$

(7)式からセメントペーストの μ'_m は

$$\mu'_m = \frac{0.249 + 0.65 \times 0.177}{1 + 0.65} = 0.221$$

(8)式から同じく d'_1 は

$$d'_1 = \frac{(1 + 0.65) \times 3.14}{1 + 0.65 \times 3.14} = 1.70$$

(9)式から

$$0.3757x'_1 + 0.533x_2 = \frac{18.28 - 8.41}{20}$$

$$= 0.4935$$

(10)式から

$$\left(1 + \frac{0.026 \times 0.65 \times 3.14}{1 + 0.65 \times 3.14}\right)x'_1 + x_2 = 1$$

$$\therefore 1.0818x'_1 + x_2 = 1$$

この2式から $x'_1 = 0.237$, $x_2 = 0.759$

その位置における空気量は

$$1 - x'_1 - x_2 = 0.004$$

水量(x_3)は (9)式より

$$0.237 = \left(1 + \frac{1}{0.65 \times 3.14}\right)x_3$$

$$x_3 = 0.159$$

セメント量(x_1)は

$$x_1 = x'_1 - x_3 = 0.078$$

結局 セメント, 骨材, 水, 空気 の容積比は

$$0.078 : 0.759 : 0.159 : 0.004$$

となる。

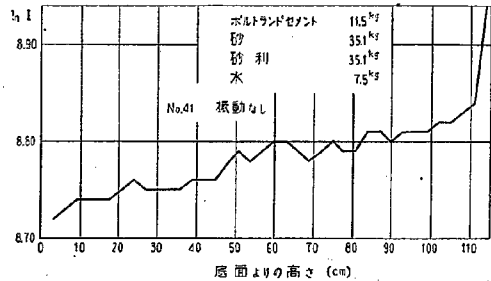


図-14(a) コンクリート供試体の計数値分布

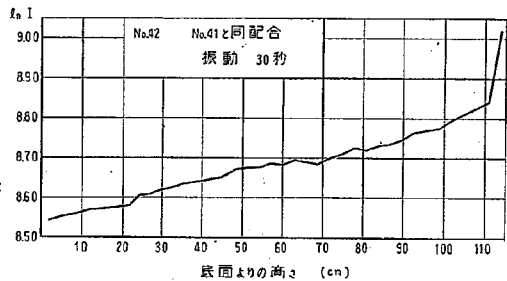


図-14 (b) コンクリート供試体の計数値分布

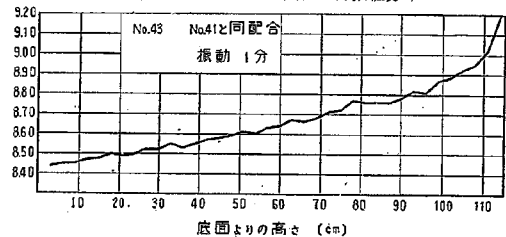


図-14 (c) コンクリート供試体の計数値分布

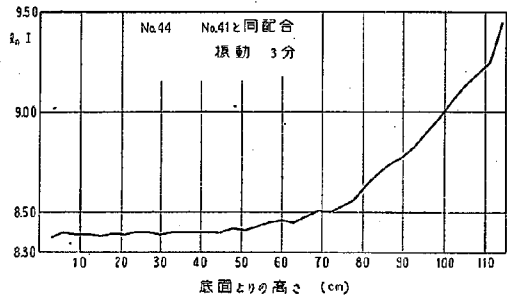


図-14 (d) コンクリート供試体の計数値分布

No. 44 で底面から高さ 113cmのところでは

$\ln I = 9.40$ として計算して

セメント : 骨材 : 水 : 空気

$= 0.175 : 0.457 : 0.358 : 0.010$

こんどは μ -図表を使って以上の 2 点の構成材料比を求めてみよう。No. 44 の底面から 60cm のところでは

$\ln I = 8.41$ であり、透過厚 l は 20cm であるから

$$\mu_{md} l = \ln I_0 - \ln I = 18.28 - 8.41 = 9.87$$

$$\mu = \mu_{md} = \frac{9.87}{20} = 0.494$$

図-10から $s = W/C = 0.65$ の線と、 $\mu = 0.494$ の線とが交差する点の W 座標を求めると

$$W \approx 0.16$$

$$\therefore \text{空気量 } V = 0.16 \times 0.026 \approx 0.004$$

5.〔3〕で述べたような方法で

$$\mu_{md} \times \frac{1}{1 - 0.004} = \frac{0.494}{0.996}$$

$$\approx 0.496$$

$\mu_{md} = 0.496$ に対応する点を $s = 0.65$ 線上で求めてみると

セメント : 骨材 : 水 = 0.08 : 0.76 : 0.16

この値に $(1 - v) = 0.996$ を乗じ、空気量の値 0.004 を入れて 4 成分の容積比を求めてみると

セメント : 骨材 : 水 : 空気

$= 0.080 : 0.757 : 0.159 : 0.004$

となり、先に計算で求めた値とかなりよく一致している。

底面から高さ 113cm のところでは $\ln I = 9.40$ であるから、 $\mu_{md} = 0.444$ となる。図-10でこの点の W 座標を求めてみると

$$W = 0.38$$

となる。

空気量 V は

$$W \times t = 0.38 \times 0.026 \approx 0.010$$

$$\mu_{md} \times \frac{1}{1 - V} = 0.444 \times \frac{1}{0.99} = 0.448$$

この点における 3 成分比は

セメント : 骨材 : 水

$= 0.180 : 0.458 : 0.362$

それぞれ $(1 - V) = 0.99$ を乗じ、空気量を含めて 4 成分の容積比を作ると

セメント : 骨材 : 水 : 空気

$= 0.178 : 0.453 : 0.359 : 0.010$

となり、これも計算値とかなり良く一致している。

以上のような操作を供試体 No. 44 の全測点について行ない、打設方向における構成材料比変化の模様を図示したものが図-15である。図-15で供試体 No. 44 の材料分離の傾向

を見ると、底面より高さ 80cm のところに境界があって、それより下部ではだいたい均一の組成を持ち、それより上部では組成が非常に不均一になっている。このような傾向は、材料分離がいちじるしく進行した他の供試体でも見られる。一例として図-16に、シリカセメントを m^3 当り 400kg の割合で使い、3 分間の振動を与えて材料分離を促進させた供試体の成分容積比を示す。図-16でも材料の構成比がいちじるしく変化するところは、底面から 90cm の高さの点より上部である。次にこの材料分離が進行した供試体の成分比変化の図を、比較的に材料分離を起こしていない供試体のそれと比較してみよう。前にあげた供試体 No. 41, No. 42, No. 43 を例としてここに引用してみると、その構成材料比の打設方向に沿った変化の模様は図-17(a), (b), (c) に図示するとおりである。図-17でわかるとおり、振動時間が長くなるにしたがって、3 成分の比率の曲線がだんだん平行性を失ってくるのと同時に、底部における骨材の存在比が、その平均存在比よりも漸次増加してくる。こういった構成材料比変化の傾向は、他の供試体すべてについてそのグラフを書いてみてでも明瞭に表われている。

〔2〕材料分離現象の量的表示法について

図-14~17 から、材料分離現象を量的に表示する手段として、次にあげる幾通りかの方法が考えられる。

- i) 供試体透過後の γ -線強度 I の標準偏差。
- ii) I の対数の標準偏差。
- iii) μ_{md} の標準偏差。
- iv) 骨材存在比の標準偏差。
- v) 骨材存在比の平均傾斜。

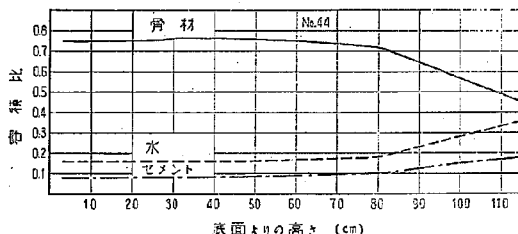


図-15 コンクリート供試体の打設方向の成分比変化の一例(I)

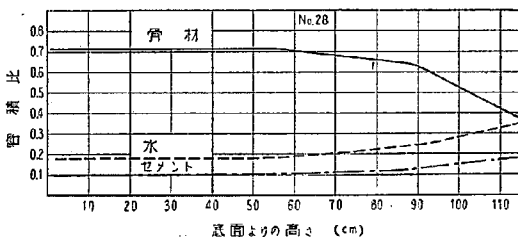


図-16 コンクリート供試体の打設方向の成分比変化の一例(II)

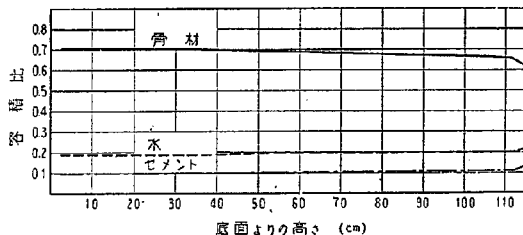


図-17 (a) 供試体 No. 41[図-14(a)]の打設方向構成比変化

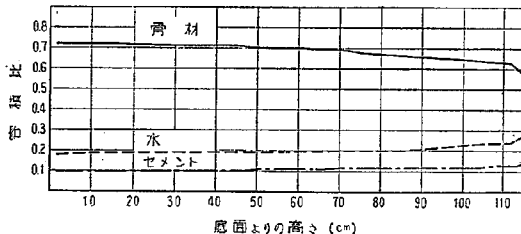


図-17 (b) 供試体 No. 42[図-14(b)]の打設方向構成比変化

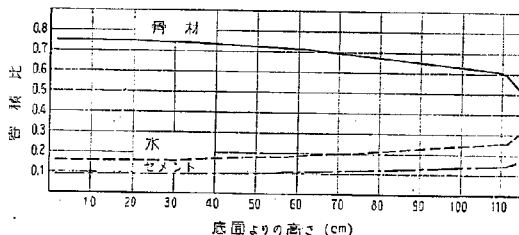


図-17 (c) 供試体 No. 43[図-14(c)]の打設方向構成比変化

vi) 供試体底面と上部における骨材存在比の差。

vii) 打設時における骨材配合比, 供試体底面における骨材存在比との差。

以上の7通りの方法のうち, コンクリートの材料分離現象の本質に最ももなっているのは, iv) 法であると考えられる。しかし, iv) 法は μ -図表を使うにしても, そうとう煩雑な過程を踏まねばならないので, iv) 法以外の簡便法は iv) 法と比較してどういふ点に問題があるかをここで検討してみよう。

まず, 供試体を前に述べた(6)式で表示される2成分系とみなす。そうすれば(10)式から

$$x_2 = 1 - \left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)x'_1 \quad (15)$$

また, (10)式と(11)式とから

$$x'_1 = \left[\mu_{m2}d_2 - \frac{\ln I_0 - \ln I}{l} \right] / \left[\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\mu_{m2}d_2 - \mu_{m1}'d_1' \right]$$

$$= \left[\left(\mu_{m2}d_2 - \frac{\ln I_0}{l} \right) + \frac{\ln I}{l} \right] /$$

$$\left[\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\mu_{m2}d_2 - \frac{(1+s)d_1}{1+sd_1} \times \frac{(\mu_{m1} + s\mu_{m3})}{1+s} \right]$$

$$= \left[\left(\mu_{m2}d_2 - \frac{\ln I_0}{l} \right) + \frac{\ln I}{l} \right] /$$

$$\left[\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\mu_{m2}d_2 - \frac{(\mu_{m1} + s\mu_{m3})d_1}{1+sd_1} \right]$$

(15)式に(16)式を入れて

$$x_2 = \left[\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right) \left(\frac{\ln I_0}{l} + \frac{\ln I}{l} \right) - \frac{(\mu_{m1} + s\mu_{m3})d_1}{1+sd_1} \right] /$$

$$\left[\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\mu_{m2}d_2 - \frac{(\mu_{m1} + s\mu_{m3})d_1}{1+sd_1} \right] \quad (17)$$

(17)式から

$$dx_2 = - \left[1 + sd_1 + tsd_2 \right] /$$

$$\left[l \left\{ (1 + sd_1 + tsd_1)\mu_{m3}d_2 - (\mu_{m1} + s\mu_{m3})d_1 \right\} \right]$$

$$\times d \ln I \quad (18)$$

骨材に関する材料分離度を σ とおいて, σ を dx_2 の標準偏差で表わすものとすれば

$$\sigma^2 = \sum (dx_2)^2 / n \quad (19)$$

となる。

そこで, (18)式でわかるように材料分離度の表示法として, 前述の i)~iii) 法を使った場合は, 得られた値は S (水セメント比), d_1 (セメントの比重, セメントの種類によって異なる), l (連行空気量) の値によって異なってくる。したがって, i)~iii) 法は S が一定, d_1 が一定, すなわちセメントの種類が同一, l が一定, すなわち, 振動時間が一定で, 同一の条件で打設したときに限って, 正確な材料分離度を表示する。次に, v) 法ならびに vi) 法は, x'_1 と x_2 の比が一定の場合に限って適用可能である。すなわち, この場合では(10)式で表わされるように

$$x'_1 = \left(1 + \frac{1}{sd_1}\right)x_2$$

また, (10)式で表わされるように

$$\left(1 + \frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)x'_1 + x_2 = 1$$

なる関係が存在するので, 結局 x'_1 と x_2 の比が同一であるという条件は, $s, t, d_1, x_2 : x_3$ が一定であるという条件に帰着し, 前述の i)~iii) 法よりもさらに適用範囲が狭くなる。次に, vii) 法は骨材の充填度が大きく影響するものと考えられるため, vii) 法で材料分離度を表示するためには, 使用する骨材の寸法, 形状, さらに表面状態, 比重などを厳密に統一しておく必要がある。

以上のような理由から、ここでは、iv) 法の骨材存在比の標準偏差 σ で供試体の材料分離度を表示することにした。

7. 実験結果ならびに考察

この実験において製作した供試点は150本であって、それぞれの配合比、打設条件等を一覧表に示したものが表-4である。以下これらの配合比、打設条件の違いによって、骨材分布の標準偏差 σ がどういふ値をとるかについて検討してみよう。

[1] 振動を与えない場合の σ

振動を与えずに打設した供試体の σ が、スランブ、セメントの種類、単位セメント量、 G/S 比とどういふ関係にあるかを調べてみよう。まず、表-5はスランブ、セメントの種類との関係を表わしたものである。表-5からスランブ15cmで打設した供試体の σ は、スランブ8cmのそれより大であることがわかる。これは当然の現象であって、今後あげる測定結果にはすべてこの傾向が現われている。またセメントの種類別では、シリカセメント>高炉セメント>ポルトランドセメントの順に σ が大きい。この現象は今後セメントのブレン試験結果などと考え合わせて検討せねばならない問題であると思われる。表-6ではポルトランドセメント使用の供試体について、その単位セメント量の影響を表示した。表-6では単位セメント量が減少するにしたがって、 σ の値が僅かながら増大するという結果が現われている。 σ の値はもちろんスランブ15cmのときの方が、8cmのときのものより大である。表-7は G/S 比の影響を調べたものである。この表で認められる現象は、スランブが8cmの場合、 σ は G/S 比が増加するにしたがって減少するが、スランブが、15cmの場合は、 G/S 比が増加するにつれて増加する。すなわち、このことは、 G/S 比が大になるにしたがって σ がスランブの値に鋭敏になることを示している。そしてまた、スランブの値が8cmから15cmの間で、 σ が G/S 比に無関係な値をとる点が存在することも考えられる。この現象は粗骨材の内部閉塞現象によって理由づけられるものと思われる。すなわち、スランブが8cmの場合は、セメントペーストの粘度が高く、骨材は内部閉塞を起こしやすいため、 G/S 比が大となり、粗骨材の量が増すにつれて、内部閉塞のために σ が減少する。しかし、スランブが15cmの場合は、セメントペーストの粘度が小さく、粗骨材間の潤滑油的な働きを始めるので、粗骨材は内部閉塞を起すことなく底面に向かって沈降し、またこの沈降の度合いもセメントペーストの粘度が低いので大きく、したがって σ が大となり、表-7のような現象が起こったものと考えられる。

[2] 単位セメント量 400kg/m³、 G/S 比1のときの σ の振動時間による変動

この組合せでセメントの種類をポルトランド、高炉、シリカの3種、スランブを8cmと15cmの2種類、振動時間を30秒、1分、3分の3種とって、これらのファクターの σ に対する影響を調べた。図-18(a)にポルトランドセメントに関する測定結果をまとめてあげた。図-18では振動時間はその対数を取った。図でもわかるように、振動時間の対数をとった方がよく直線性を示すように思われる。同様な図法で高炉セメントに関する結果を図-18(b)に、シリカセメントに関する結果を図-18(c)にあげる。この図から認められることは、振動が3分間の場合においては、セメントの種類の違いはほとんど認められないこと、スランブが15cmの場合においてもセメントの種類の違いは認められないが、スランブが8cmの場合は、振動時間が30秒、1分のとき、高炉セメント、シリカセメントで σ の値がポルトランドセメントのそれより大きいことの2点である。このことは次のようにも換言できる。すなわち、骨材の自然沈降にもつづく材料分離現象は、ポルトランドセメントを使ったコンクリートの場合、他の高炉セメント、シリカセメントを使ったコンクリートの場合より起こりがたいが、スランブを大にしたり、長時間の振動を与えたりすることによって材料分離を促進させるならば、このセメントの種類間の差はほとんど失われてくる。

[3] 打ち継ぎ目の存在による σ の変動

このことを調べる目的で、打ち継ぎ目が1つのものと2つのものとをそれぞれ6個づつ、計12個の供試体を製作した。この測定結果を図-19(a)、(b)に示す。この図からわかるように σ の値は打ち継ぎ目が多いものほど大である。このことについては供試体打設の際に、打ち継ぎ目が1つのものについては計2回、打ち継ぎ目が2つのものについては計3回の振動を供試体に与えたので、振動の累積がどういふ現象をもたらしただけとも考えられるのであるが、同一配合で打設した供試体の結果である図-18(a)と比較してみると、スランブ15cmの場合は振動の累積を考慮することによって説明できるのに対し、スランブ8cmの場合では振動の累積を考慮に入れた以上に σ の値が大である。たとえば振動30秒で打ち継ぎ目1の場合は、図-18(a)での振動1分の場合に相当し、スランブ15cmでは σ の値はそれぞれ、5.9、6.2でだいたい一致しているとみなされるのに対し、スランブ8cmでは、それぞれ4.4、3.6と差が大きい。また打ち継ぎ目2で振動1分の場合は同じ図で振動3分の場合に相当し、スランブ15cmのときは σ の値はそれぞれ7.5、7.8で、これもだいたい等しいとみなし得るのに対し、スランブ8cmの場合は6.9、5.4と打ち継ぎ目が存在の方が大である。このことはスランブが15cmくらいで、生のコンクリートがそうとう軟らかい場合においては、パイプレーターの振動は、パイプレーターの振動部の位置を動

表-4 コンクリート供試体の打設条件一覧表

供試体 No.	スランブ (cm)	セメント 種	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利(kg)	振動(分)	打ち継目	A B 剤 (セメントに対する%)
1	8	ポルトランド	14.4	35.1	35.1	0	なし	なし
2	"	"	"	"	"	0.5	"	"
3	"	"	"	"	"	1	"	"
4	"	"	"	"	"	3	"	"
5	15	"	"	"	"	0	"	"
6	"	"	"	"	"	0.5	"	"
7	"	"	"	"	"	1	"	"
8	"	"	"	"	"	3	"	"
9	8	高 炉	"	"	"	0	"	"
10	"	"	"	"	"	0.5	"	"
11	"	"	"	"	"	1	"	"
12	"	"	"	"	"	3	"	"
13	欠	"	"	"	"	"	"	"
14		"	"	"	"	"	"	"
15		"	"	"	"	"	"	"
16		"	"	"	"	"	"	"
17	15	高 炉	14.4	35.1	35.1	0	なし	なし
18	"	"	"	"	"	0.5	"	"
19	"	"	"	"	"	1	"	"
20	"	"	"	"	"	3	"	"
21	8	シ リ カ	"	"	"	0	"	"
22	"	"	"	"	"	0.5	"	"
23	"	"	"	"	"	1	"	"
24	"	"	"	"	"	3	"	"
25	15	"	"	"	"	0	"	"
26	"	"	"	"	"	0.5	"	"
27	"	"	"	"	"	1	"	"
28	"	"	"	"	"	3	"	"
29	8	ポルトランド	"	"	"	0.5	1	"
30	"	"	"	"	"	1	"	"
31	"	"	"	"	"	3	"	"
32	15	"	"	"	"	0.5	"	"
33	"	"	"	"	"	1	"	"
34	"	"	"	"	"	3	"	"
35	8	"	"	"	"	0.5	2	"
36	"	"	"	"	"	1	"	"
37	"	"	"	"	"	3	"	"
38	15	"	"	"	"	0.5	"	"
39	"	"	"	"	"	1	"	"
40	"	"	"	"	"	3	"	"
41	8	"	11.5	36.1	36.1	0	なし	"
42	"	"	"	"	"	0.5	"	"
43	"	"	"	"	"	1	"	"
44	"	"	"	"	"	3	"	"
45	15	"	"	"	"	0	"	"
46	"	"	"	"	"	0.5	"	"
47	"	"	"	"	"	1	"	"
48	"	"	"	"	"	3	"	"
49	8	"	"	33.5	38.6	0	"	"
50	"	"	"	"	"	0.5	"	"
51	"	"	"	"	"	1	"	"
52	"	"	"	"	"	3	"	"
53	15	"	"	"	"	0	"	"
54	"	"	"	"	"	0.5	"	"
55	"	"	"	"	"	1	"	"
56	"	"	"	"	"	3	"	"
57	8	"	"	31.5	40.8	0	"	"
58	"	"	"	"	"	0.5	"	"
59	"	"	"	"	"	1	"	"
60	"	"	"	"	"	3	"	"
61	15	"	"	"	"	0	"	"
62	"	"	"	"	"	0.5	"	"
63	"	"	"	"	"	1	"	"
64	"	"	"	"	"	3	"	"
65	8	"	8.6	39.9	39.9	0	"	"

表-4 つづき

供試体 No.	スランブ (cm)	セメント 種	セメント 類	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利(kg)	振動(分)	打ち継目	A B 剤 (セメントに対す る%)
66	8	ポルトランド		8.6	39.9	39.9	0.5	なし	なし
67	"	"		"	"	"	1	"	"
68	"	"		"	"	"	3	"	"
69	15	"		"	"	"	0	"	"
70	"	"		"	"	"	0.5	"	"
71	"	"		"	"	"	1	"	"
72	"	"		"	"	"	3	"	"
73	8	"		"	37.2	42.7	0	"	"
74	"	"		"	"	"	0.5	"	"
75	"	"		"	"	"	1	"	"
76	"	"		"	"	"	3	"	"
77	15	"		"	"	"	0	"	"
78	"	"		"	"	"	0.5	"	"
79	"	"		"	"	"	1	"	"
80	"	"		"	"	"	3	"	"
81	8	"		"	35.3	45.1	0	"	"
82	"	"		"	"	"	0.5	"	"
83	"	"		"	"	"	1	"	"
84	"	"		"	"	"	3	"	"
85	15	"		"	"	"	0	"	"
86	"	"		"	"	"	0.5	"	"
87	"	"		"	"	"	1	"	"
88	"	"		"	"	"	3	"	"
89	8	高	炉	11.5	36.1	36.1	0.5	"	Darex 0.03
90	"	"	"	"	"	"	1	"	"
91	"	"	"	"	"	"	3	"	Darex 0.03
92	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Protex 0.03
93	"	"	"	"	"	"	1	"	"
94	"	"	"	"	"	"	3	"	"
95	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Vinsol 0.03
96	"	"	"	"	"	"	1	"	"
97	"	"	"	"	"	"	3	"	"
98	"	"	"	"	33.5	38.6	0.5	"	Darex 0.03
99	"	"	"	"	"	"	1	"	"
100	"	"	"	"	"	"	3	"	"
101	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Protex 0.03
102	"	"	"	"	"	"	1	"	"
103	"	"	"	"	"	"	3	"	"
104	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Vinsol 0.03
105	"	"	"	"	"	"	1	"	"
106	"	"	"	"	"	"	3	"	"
107	"	"	"	"	31.5	40.8	0.5	"	Darex 0.03
108	"	"	"	"	"	"	1	"	"
109	"	"	"	"	"	"	3	"	"
110	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Protex 0.03
111	"	"	"	"	"	"	1	"	"
112	"	"	"	"	"	"	3	"	"
113	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Vinsol 0.03
114	"	"	"	"	"	"	1	"	"
115	"	"	"	"	"	"	3	"	"
116	"	シ	リ	"	36.1	36.1	0.5	"	Darex 0.03
117	"	"	力	"	"	"	1	"	"
118	"	"	"	"	"	"	3	"	"
119	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Protex 0.03
120	"	"	"	"	"	"	1	"	"
121	"	"	"	"	"	"	3	"	"
122	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Vinsol 0.03
123	"	"	"	"	"	"	1	"	"
124	"	"	"	"	"	"	3	"	"
125	"	"	"	"	33.5	38.6	0.5	"	Darex 0.03
126	"	"	"	"	"	"	1	"	"
127	"	"	"	"	"	"	3	"	"
128	"	"	"	"	"	"	0.5	"	Protex 0.03
129	"	"	"	"	"	"	1	"	"
130	"	"	"	"	"	"	3	"	"

表-4 つづき

供試体 No.	スランブ (cm)	セメント種類	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利 (kg)	振動(分)	打ち継目	A E 剤 (セメントに対する%)
131	8	シリカ	11.5	33.5	38.6	0.5	なし	Vinsol 0.03
132	"	"	"	"	"	1	"	"
133	"	"	"	"	"	3	"	"
134	"	"	"	31.5	40.8	0.5	"	Darex 0.03
135	"	"	"	"	"	1	"	"
136	"	"	"	"	"	3	"	"
137	"	"	"	"	"	0.5	"	Protex 0.03
138	"	"	"	"	"	1	"	"
139	"	"	"	"	"	3	"	"
140	"	"	"	"	"	0.5	"	Vinsol 0.03
141	"	"	"	"	"	1	"	"
142	"	"	"	"	"	3	"	"
143	15	ポルトランド	14.4	35.1	35.1	0	"	Darex 0.03
144	"	"	"	"	"	0.5	"	"
145	"	"	"	"	"	"	"	Darex 0.01
146	"	"	"	"	"	"	"	Darex 0.003
147	"	"	"	"	"	0	"	Protex 0.03
148	"	"	"	"	"	0.5	"	"
149	"	"	"	"	"	"	"	Protex 0.01
150	"	"	"	"	"	"	"	Protex 0.003
151	"	"	"	"	"	0	"	Vinsol 0.03
152	"	"	"	"	"	0.5	"	"
153	"	"	"	"	"	"	"	Vinsol 0.01
154	"	"	"	"	"	"	"	Vinsol 0.003

表-5 スランブ、セメントの種類と σ の関係

スランブ (cm)	8	15
セメント		
ポルトランド	2.38×10^{-2}	2.52×10^{-2}
高 炉	2.68	3.08
シ リ カ	2.90	3.46

* 振動なし

** セメント量 400kg/m³

*** G/S=1.0

表-6 単位セメント量と σ の関係

スランブ (cm)	8	15
単位セメント量		
400 kg/m ³	2.38×10^{-2}	2.52×10^{-2}
320	2.62	2.68
240	2.63	2.73

* ポルトランドセメント ** 振動なし

*** G/S=1.0

表-7 G/S 比と σ の関係

スランブ (cm)	8	15
G/S		
1.00	2.62×10^{-2}	2.68×10^{-2}
1.15	2.40	2.90
1.30	1.62	3.00

* ポルトランドセメント ** 振動なし

*** 単位セメント量 320kg/m³

かさなくても、この実験に使用した型枠の大きさくらい
の容積全部に伝達し、十分な効果を及ぼすことを示すと
同時に、スランブ 8cm の場合では他にもっと別のファ
クターがあって、材料分離がさらに促進されることを示
している。

〔4〕 連行空気量と σ との関係

ポルトランドセメントを 400kg/m³、G/S 比を 1.0 で
配合し、打設前にその連行空気量を測定したコンクリ
ートに、30秒の振動を与えて作った供試体の σ と連行空気
量との関係を図-20 に示す。この図では、連行空気量
が多いほど σ が大となる傾向が容易に認められる。この現
象は連行空気量の増加によって、セメントペーストの粘
度が低下することにもとづくものと思われる。A E 剤と
しては Darex, Protex, Vinsol の 3 種を、それぞれセ
メントに対して 0.03%, 0.01%, 0.003% の 3 種の濃度
で使用したが、A E 剤の種類によって、同じ濃度のもの
を使用しても、その連行空気量には差があることが認め
られる。しかし、含有空気量と σ との間には、A E 剤の
種類による差は有意的には現われていないと考えてさし
つかない。

〔5〕 ポルトランドセメント 320kg/m³ 使用のコン クリートにおける G/S 比、振動時間と σ との関係

(1)においては振動を与えない条件下においての、G/S
比と σ との関係を扱ったが、ここでは G/S 比と振動と
が σ にどう影響を与えるかを調べてみよう。図-21
(a), (b), (c) に G/S 比別に振動時間と σ との関係を図示
した。この図を見ると振動 30秒のときの σ の値は G/S

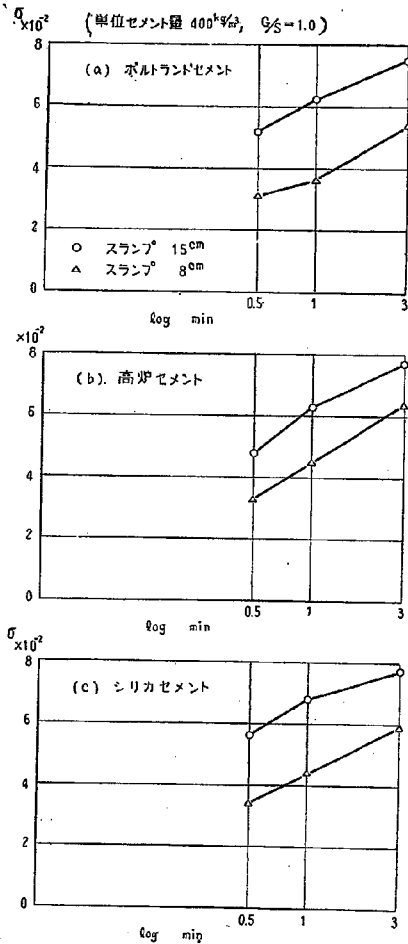


図-18 σ の振動時間による変動

比が変わっても、さして変動しないが、3点を結ぶ直線の傾斜が、 G/S 比が増すにしたがってだんだん緩やかになってくることが認められる。そのため、振動が3分のときの σ の値は、 G/S 比が増すにしたがって減少してくる。この現象をもっとわかりやすくするために、 G/S 比を横軸にとって図-21を図示すると図-22のようになる。図-22では G/S 比が増加するにつれて σ の値がとくに振動3分の場合、急激に減少していることが認められる。振動30秒、1分のときの σ の値は、この図に現われた程度の差異であれば、とくに減少の傾向があるとは考えられない。この点に関しては今後さらに種々の G/S 比、振動時間をもって供試体を製作し、多くのデータをとる必要があるものと思われる。振動3分の場合には図

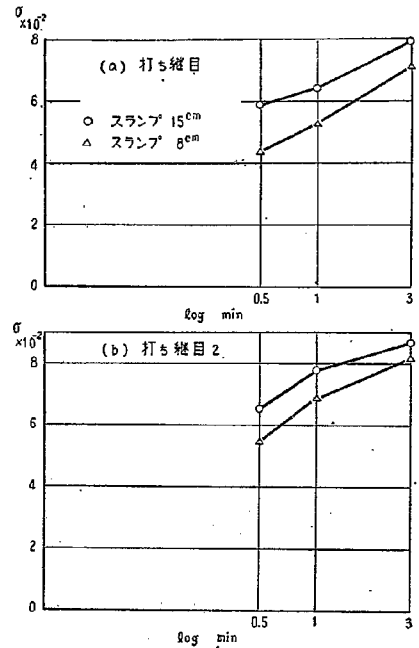


図-19 打ち継ぎ目の存在による σ の変動
(ポルトランドセメント, 単位セメント量 400kg/m^3 , $G/S=1.0$)

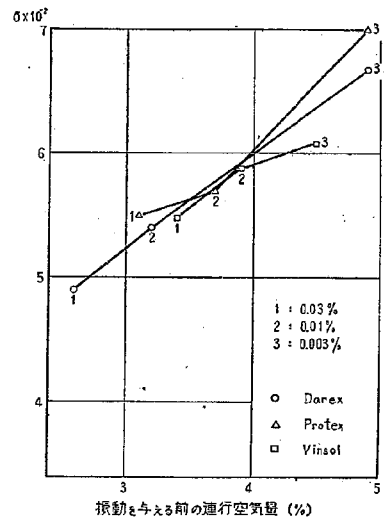
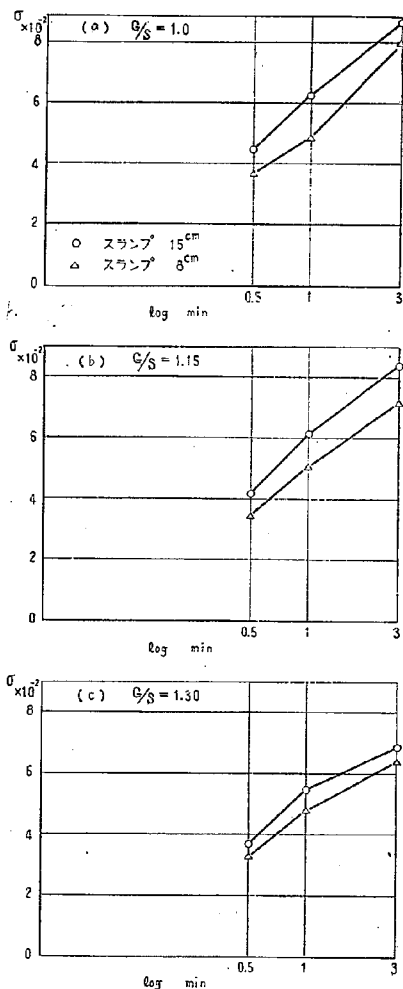
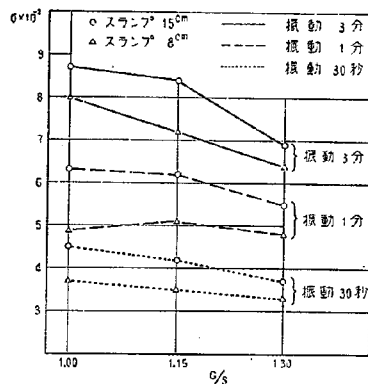


図-20 進行空気量と σ との関係
(ポルトランドセメント 400kg/m^3 , $G/S=1.0$
振動30秒, スランプ15cm)

図-21 G/S比、振動時間と σ との関係(I)(ポルトランドセメント 320kg/m³を使用)

-22でわかるように、明瞭にG/S比増加に対して σ 値の減少の傾向が認められるが、この現象は粗骨材の容積が増加したためにおこる粗骨材の内部閉塞に帰因するものであらうと考えられる。

〔6〕ポルトランドセメント 240kg/m³使用のコンクリートにおけるG/S比、振動時間と σ との関係
前項と同じく、スランプ 8 cm のものと 15 cm のものについて、それぞれ 9 個、計 18 個の供試体を製作した。その測定結果を図-23に示す。図-23で認められることは、G/S 比が 1.0 のとき σ は振動時間に非常に敏感であって、この直線の傾斜は、いまだあげたデータのう

図-22 G/S 比、振動時間と σ との関係(II)(ポルトランドセメント 320kg/m³を使用)

ち最大であることと、この傾斜はG/S比が増すにつれて、振動時間の短いものの σ の値が増加し、また振動時間の長いものの σ の値が減少するため緩やかになり、したがってG/S比が大であれば σ の値は振動に対して変化がぶくなることの2点である。図-23を図-22のようにG/S比を横軸にして σ の値を図示したものが図-24である。図-24ではG/S比が増大するにつれて振動時間30秒のものは急激に σ の値が増加する反面、振動時間3分のもは急激にその σ の値が減少するのでG/S比の増加とともに σ の値が振動に対して敏感でなくなり、あたかも一点に収斂するような傾向を示している。こういう傾向は前にあげた図-22でも見受けられる。そこで、図-24から仮りにこの収斂点の位置を求めてみると、だいたいG/S比が1.50くらいのところになり、その位置での σ の値は約 6×10^{-2} である。G/S比が1.50というと、粗骨材の形状を球に近いもの(直径1の粗骨材の占める容積を0.45とする)とし、それが柱状に積み重なってその間に細骨材、セメントペーストが充填された状態にしたい等しい。そして、この状態においては、粗骨材は供試体の底面から上部に至るまで均一に分布しているものと考えられ、材料分離現象はセメントペーストと細骨材間だけに起こるものと推定される。また、このことから、15cmまでのスランプを与えるに必要な水セメント比の範囲では、振動時間の長短にかかわらず、細骨材とセメントペースト間に起こる材料分離現象は $\sigma = 6 \times 10^{-2}$ くらいのところが限度であらうと考えられる。図-22でも、いま述べた仮りの収斂点は求めることができる。この場合では、収斂点の位置はだいたい、 $G/S = 1.90$ 、 $\sigma = 3 \times 10^{-2}$ のところである。G/S = 1.90の点は、前に述べたように、直径1の粗骨材の占める容積を0.45(直径1の球の占める容積は0.5236である)とし、それが柱状に積み重なっているとした場合、320kg/m³のセメント、

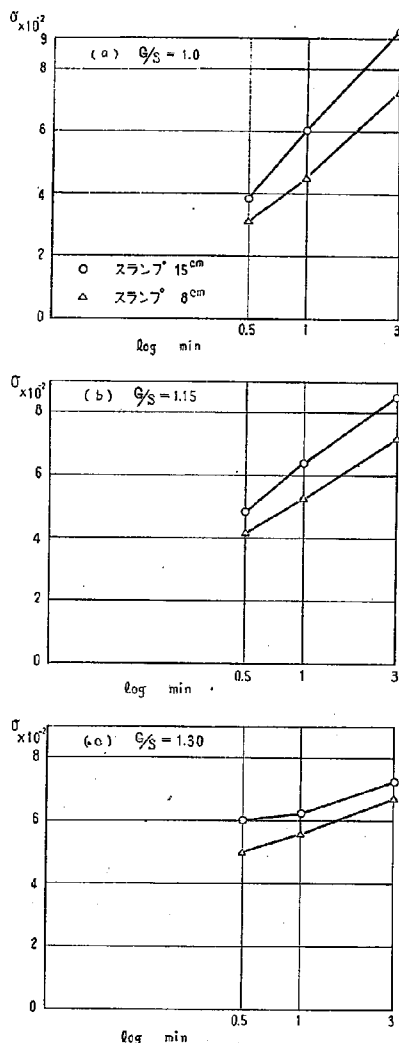


図-23 G/S比, 振動時間と σ との関係(I)
(ポルトランドセメント 240kg/m³を使用)

水セメント比0.70程度の水と細骨材とがちょうど粗骨材間の間隙を埋めつくしてしまうところに相当する。この計算は次のようにして行なう。

1m³当り 320kg のセメントを使用した場合、セメントの占める容積は 1m³ 当り $320 \div 3.14 = 102\text{l}$ である。水の占める容積は水セメント比を 0.70 とした場合 $320 \times 0.7 = 224\text{l}$ である。1m³ からセメントと水とが占める容積を差引いた残りの 674l は骨材が占める容積であって、このうち粗骨材が占める容積は、 $G/S = 1.90$ であるから

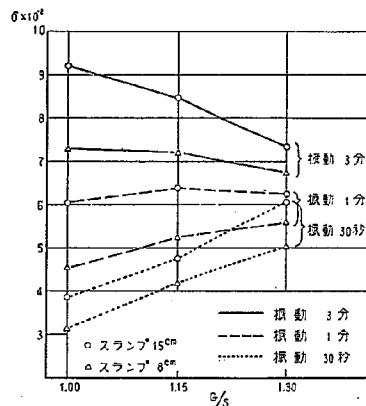


図-24 G/S比, 振動時間と σ との関係(II)
(ポルトランドセメント 240kg/m³を使用)

$$674 \times \frac{1.90}{1.90+1} = 442\text{l}$$

となる。粗骨材の填充率を 0.45 とすれば、粗骨材が占める見掛けの容積は $442 \div 0.45 = 989\text{l}$ となり、近似的に 1 m³ とみなし得る。同様にしてセメント量 240kg/m³ の場合は、コンクリート 1m³ 当り

$$\text{セメントの容積} \frac{240}{3.14} = 76\text{l}$$

$$\text{水の容積} 240 \times 0.7 = 168\text{l}$$

$$\text{骨材の容積} 1,000 - (76 + 168) = 756\text{l}$$

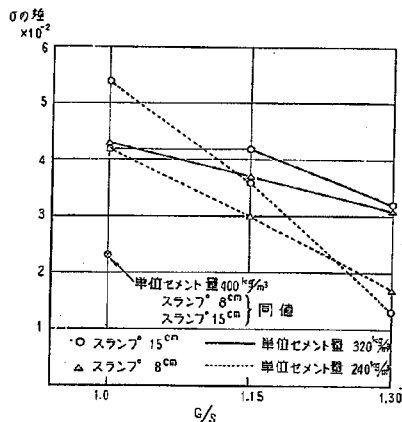
となり、この場合は $G/S = 1.50$ の点が収斂点であったから

$$\text{粗骨材の容積} 756 \times \frac{1.50}{2.50} = 454\text{l}$$

であり、粗骨材の填充率を 0.45 とおけば

$$\text{粗骨材の見掛けの容積} \frac{454}{0.45} = 1,009\text{l}$$

となり、1m³ に極めて近い値が得られる。以上の事実から、この実験に使用した粗骨材に外接する直方体中で粗骨材が占める容積は 0.45 であるという推定はなり立つものと思われる。収斂点の σ の値はセメント量 320kg/m³ のとき 3×10^{-2} であり、240kg/m³ のとき 6×10^{-2} であったが、これはセメントペーストと細骨材間だけに起こる分離現象に基づく値であって、セメント粉末度、細骨材に対するセメントの使用量などが大きく関係しているものと考えられる。セメントの粉末度の影響については、十分なセメントの試験成績が無いので、ここでは取り扱えないが、細骨材に対するセメントの使用量は前のデータから計算すれば $\sigma = 6 \times 10^{-2}$ のときは容積比で 25.1% であり、 $\sigma = 3 \times 10^{-2}$ のときは 32.5% である。そこでこのことから、収斂点における σ の値は、細骨材に対するセメントの使用量が多ければ大きく、少なければ

図-25 振動に対する σ の感度

小さいということが云えるが、また、さらに広く適用して、十分な振動を与え、かなりよく締め固めたコンクリート供試体にあつては σ の値は、細骨材に対するセメントの使用量が増加すれば減少するとも云える。

次に振動に対する σ の感度を、セメント使用量の異なった他の供試体のそれと比較してみよう。振動に対する σ の感度としては、振動3分のときと、30秒のときの σ の値の差を図-18、図-21、図-23から取り、これを図-25に示した。図-25で認められるように、単位セメント量が少ないものの方が、 G/S 比の増大に伴つて振動に対する σ の感度が急激に減少する。そして単位セメント量 240kg/m^3 のものではスランブが大なる方、すなわち、水セメント比が大なるものほど、 σ の感度減少が早い。この図から単位セメント量 240kg/m^3 のスランブ 15cm と 8cm のものについて、 σ の感度が0になる点を外挿して求めると、スランブ 15cm では $G/S=1.40$ 、スランブ 8cm では $G/S=1.50$ となる。この点は図-24から、スランブ別に求めた収斂点に等しい。スランブ 15cm のものはスランブ 8cm のものに比べて水セメント比が大であるから、前のような考え方でいけばスランブ 15cm のものの収斂点の G/S 比はスランブ 8cm のそれより大でなければならない。しかし、ここでその逆の結果が出たことについては、次のような説明が適当であろう。すなわち、図-24からスランブ別に収斂点の σ の値を求めると、スランブ 15cm では $\sigma=6.5 \times 10^{-2}$ 、スランブ 8cm では $\sigma=6.0 \times 10^{-2}$ である。だからスランブ 15cm のときは、スランブ 8cm のときと比べてセメントペーストと細骨材間の分離が烈しく起っていると云える。そしてまたセメントペーストの粘度も低いため、分離が進行した細骨材の一部は、もはや振動などの物理的刺激によってその位置を変えることがない死容積として粗骨材

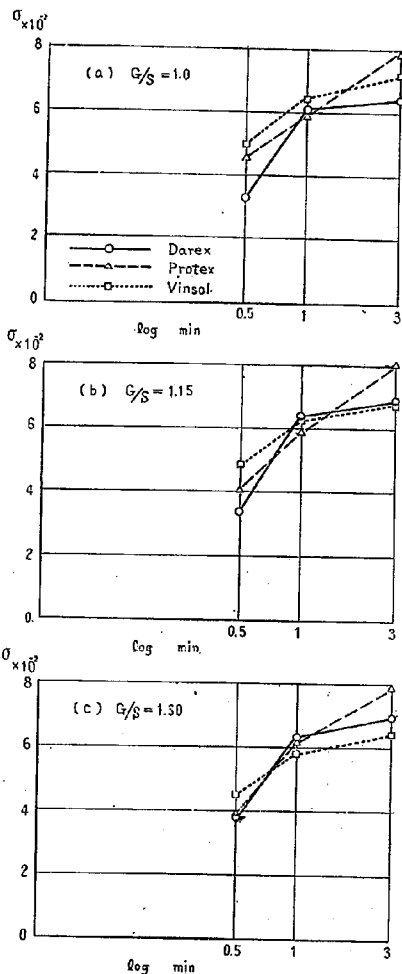


図-26 高炉セメント使用のコンクリートにおける G/S 比、使用A E剤の種類、振動時間と σ との関係(I) (単位セメント量 320kg/m^3 スランブ 8cm 、A E剤添加量 セメント量の 0.03%)

間の接触面に介在し、粗骨材間の間隔を抜げるからである。

(7) 高炉セメント使用のコンクリートにおける G/S 比、使用A E剤の種類と振動時間が σ の値に及ぼす影響

高炉セメントを 320kg/m^3 の割合で使用し、A E剤としてDarex, Protex, Vinsolをセメント量に対してそれぞれ 0.03% の比率で添加したコンクリート供試体について、上記の関係を調べた。その結果を G/S 別に図-

26 (a), (b), (c)に示す。図-26を見ると、 σ の傾向はこの3種のA E剤についてG/S比の如何に関せず、ほとんど同一であるように見受けられる。そして他にこの図で注意される点は、Protex の場合では振動時間の増加に伴って σ の値は急激に増加し、したがって振動に対する σ の感度は高いが、他の2種のA E剤、Darex, Vinsolでは σ の感度が低く、とくに振動が1分のもとの3分のものとの σ の値の差は 1×10^{-2} 以下である。このことをさ

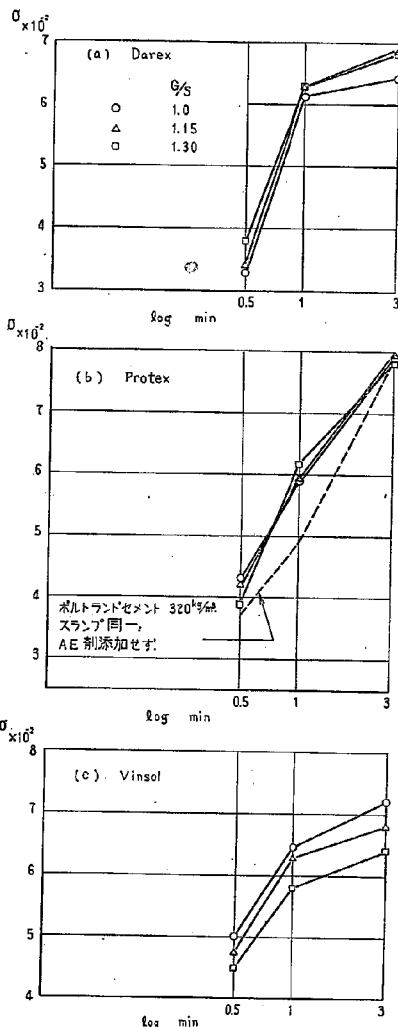


図-27 高炉セメント使用のコンクリートにおける G/S比, 使用 A E剤の種類, 振動時間と σ との関係(Ⅱ)

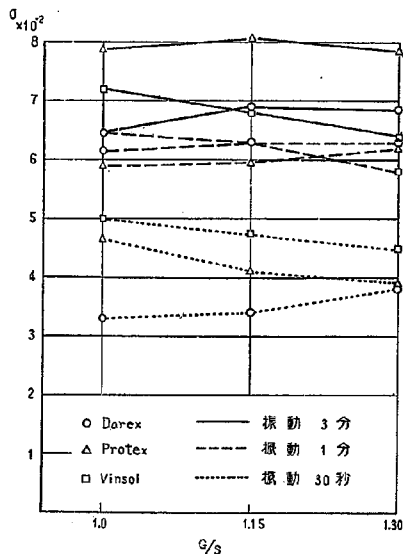


図-28 高炉セメント使用のコンクリートにおける G/S比, 使用 A E剤の種類, 振動時間と σ との関係(Ⅲ)

らによく観察するために、図-27にA E剤の種類別に図-26を分類して書きあらためた。そして図-26では参考として Protex の図面に、A E剤を添加しないポルトランドセメント 320kg/m³使用の、スラング 8 cm で打設したコンクリートの結果を点線で付け加えた。図-27の (b)で見ると、高炉セメントに Protex を添加したものは、ポルトランドセメント単独使用のものによく類似した傾向を示している。Darex ならびに Vinsol 添加のものは、Protex 添加のものと非常に様子が異なっており、1分以上の振動は材料分離の促進に大して寄与していない。そして、これら曲線の形状から、Darex での σ の限界値は 7.5×10^{-2} くらい、Vinsol では 8×10^{-2} くらいと見なされる。また図-27 から A E剤 3 種共通に、G/S 比は 1.0 から 1.30 までの範囲では σ の値にはほとんど関係がないということが云える。この現象は G/S 比を横軸にとって σ の値の変化を示した図-28 によって容易に認めることができる。

〔B〕 シリカセメント使用のコンクリートにおける G/S 比, 使用 A E剤の種類と振動時間が σ の値に及ぼす影響

(7)と同一の条件で、ただ高炉セメントの代りにシリカセメントを使ったコンクリートについて上記の関係を調べた。その結果を G/S 比別に図-29 (a), (b), (c)に示す。図-29 を高炉セメント使用のコンクリートに対する結果を示した 図-26 と比較してみると、共通な点として認め

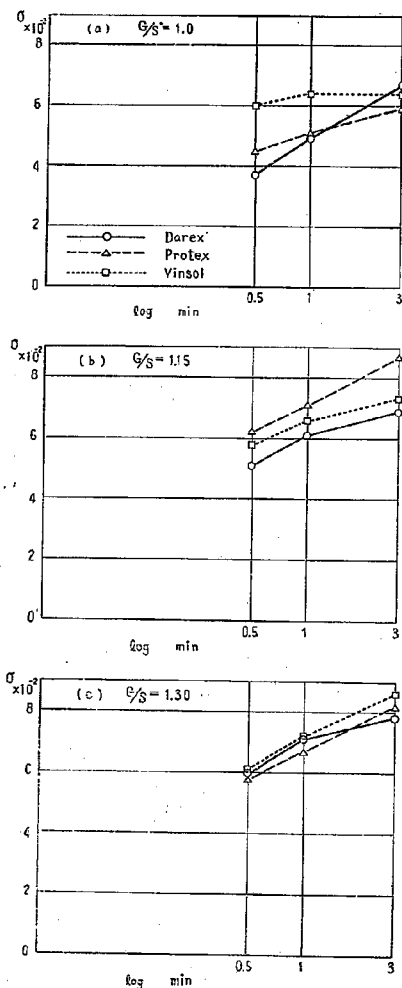


図-29 シリカセメント使用のコンクリートにおける G/S 比, 使用 A E 剤の種類, 振動時間と σ の関係 (I) (単位セメント量 320kg/m^3 , スランプ 8cm A E 剤添加量 セメント量の 0.03%)

られるものは、G/S 比の増大に伴って、 σ の値が僅かながら全般的に増加することだけであって、 σ の値の増加の傾向は図-26 とかなり異なっている。この差異点を指摘しやすくするために、図-30 にシリカセメントについて図-27 と同様な図法で A E 剤別のグラフを作り、図-31 に図-28 と同様な方法で G/S 比に対する σ の値の変化を図示した。図-29~31 を図-26~28 と比較して、異なっている点を指摘すれば次のとおりである。

a) 高炉セメントにおいては、G/S 比が変化しても

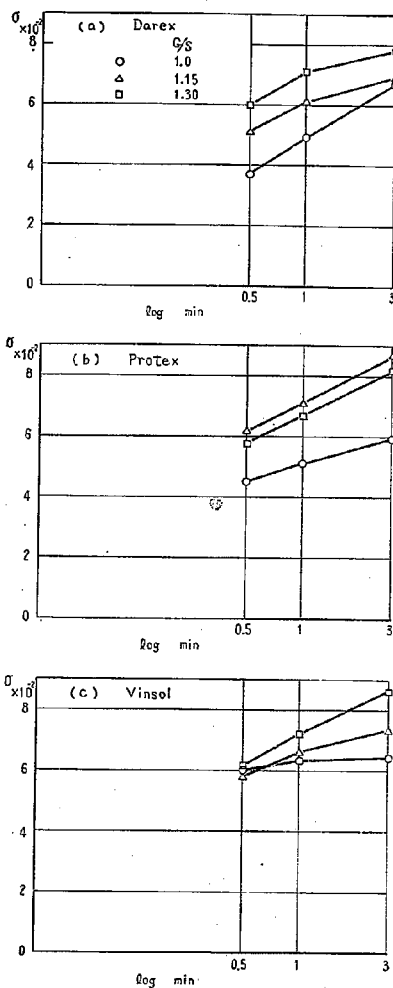


図-30 シリカセメント使用のコンクリートにおける G/S 比, 使用 A E 剤の種類, 振動時間と σ の関係 (II)

振動時間と σ の関係は各 A E 剤についてほとんど変化しなかったが、シリカセメントの場合は G/S 比が増加するにつれて一般に σ の値が増大し、また A E 剤間の特徴が失われてくる。そして G/S 比が 1.30 においては、これら 3 種の A E 剤添加の効果は同一とみなしてもさしつかえない。

b) 一般にシリカセメントの方が、高炉セメントより、振動に対する σ の感度が低い。Protex ではとくにそうということが云える。

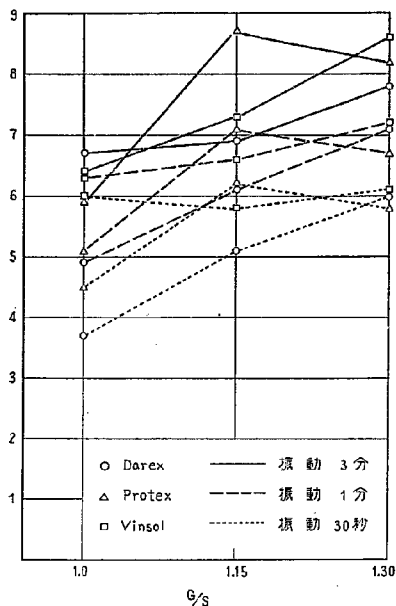


図-31 シリカセメント使用のコンクリートにおける G/S 比、使用 AE 剤の種類、振動時間と σ との関係 (Ⅲ)

c) 30秒振動の場合だけについて言えば、シリカセメントの方が σ の値が大きい。しかし振動 3 分の場合では σ の値は G/S 比によって大きく変動し、G/S 比が大なるものは σ の値は高炉セメントより大きい、G/S 比が小さいものは高炉セメントより小さいこともある。

d) シリカセメントにおいては Darex, Vinsol は各振動時間を通じて G/S 比の増加に対して σ の値は増加こそすれ減少の傾向は見せないが、Protex では G/S 比が 1.15 のところに σ のピークがあり、これより G/S 比が大になれば σ の値は減少する。高炉セメントにおいては図-28で分るように σ の値は G/S 比が 1.0 から 1.3 の範囲では G/S 比にほとんど無関係である。

以上あげた点が高炉セメントを使ったコンクリートがシリカセメント使用のコンクリートに対して持つ AE 剤を添加した場合の差異である。この差異はこのセメントの間のどの性質の差にもづくものであるかについては、実験データの量に乏しく、またセメントそのものの化学的、物理的性質の追究もなされていないので、ここでは検討できない。この間の関係の追究は今後に残された大きな課題であると考えられ、これにはセメントそのものの物理化学的性質の研究と平行して進まねばならないものと思われる。そういうわけで、ここでは(7)と(8)から、AE 剤を添加した高炉セメントならびにシリカセ

メントを使ったコンクリートの材料分離現象の特徴として、次におげる数点を拾い上げるに止め、残された諸点は今後の調査にまづということにしたい。

a) AE 剤の添加が材料分離現象に及ぼす影響は、高炉セメント使用のコンクリートとシリカセメント使用のコンクリートでは大きな違いがある。

b) AE 剤を添加した高炉セメントコンクリートでは、材料分離現象は 1.0 から 1.3 までの G/S 比の変化の範囲では、G/S 比との関係は認められない。

c) AE 剤のうち Protex は他の Darex, Vinsol と材料分離現象に関する限り、異なった性質を有している。

d) G/S 比と σ との関係では AE 剤を添加しないポルトランドセメントの場合では、 σ の値は G/S 比に対して収斂したが、AE 剤添加の高炉セメント、シリカセメントにおいてはこのような傾向は認められない。

この原因が AE 剤側にあるのか、セメント側にあるのかは不明である。

e) AE 剤を添加した場合のシリカセメントコンクリートでは、高炉セメントコンクリートより、振動 30 秒における σ の値は一般に大であるが、振動時間の増加に伴う σ の増加率は高炉セメントコンクリートよりかえって小さい。

8. 今後に残された問題点

データが極めて不備ではあったが、以上述べてきたことによってコンクリートの材料分離現象が如何なる要因に左右されるものであるか、それら要因間の関係はどうであるかについて、だいたいの概略をつかむことができた。しかし、たとえば AE 剤の種類別の材料分離に対する影響、AE 剤の添加量、セメントの種類間の差異、型枠の縦、横、深さと粗骨材の最大寸法との関係、パイプレーターの振動部の径、振動数、振幅、粗骨材の密度、表面状態、セメントの粉末度、打設のときの温度……などコンクリートの材料分離現象の全貌をつかむには、幾多の未知な要因が残されている。またこの実験でスランプ、単位セメント量、振動時間、G/S 比、AE 剤の種類等供試体製作の関係上 2~3 種しか変えていなかったが、これらもできるだけ多く変えて実験を行なう必要があると思われる。この実験のテーマであったコンクリートの材料分離現象に関しては、以上あげた諸点が今後の課題として残されているが、この報告の初めの部分でも少し触れたように、γ線透過法によるコンクリート供試体の試験についても、今後取扱いねばならない問題が残されている。すなわち、この報告ではコンクリート供試体各部における構成材料比を、打設のときの材料配合比を使って、 ^{137}Tm の γ線透過結果から求めた。そして、とくに配合比のうち、水セメント比は重要な役割を

占めていた。そのため配合比が未知の供試体については、この方法では部分、部分の構成材料比は判明しないのみならず、打設後時日が経過して供試体の含水量が低下しているような状態であれば、当初の配合比が既知であっても、同様に正確な比率を捉えることは不可能である。そこで、こういう場合に対処する手段として、この報告の図-6で説明したように、コンクリートの3主要成分、水、セメント、骨材の質量吸収係数が透過 γ -線のエネルギーによって変化することを逆に利用することが考えられる。ただし、この場合に、これら3成分の質量吸収係数が比例的に増減するようなエネルギー範囲の γ -線は利用できず、この3つの質量吸収係数の比がそれぞれ異なっているエネルギーの γ -線を選ぶことが必要である。表-8に ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir 、 ^{170}Tm の γ -線の質量吸収係数を図-6から求めて示したが、そういうわけで、 ^{60}Co と ^{137}Cs ではこの3成分の質量吸収係数の比がほとんど同一であるから、この両者を併用することは意味がなく、このうちのいずれか一方と他の ^{192}Ir と ^{170}Tm とを使えば良いと考えられる。すなわち、存在比が未知の成分が3種と空隙が存在するので、これら3種の成分の質量吸収係数の比がそれぞれ異なる3種の γ -線を使って同一の部分透過測定すれば、3成分の総和が1に等しいことを利用して3つの未知の存在比が判明するはずである。以上のことを数式的に考えてみると、次のようになる。

γ -線源として ^{60}Co 、 ^{192}Ir 、 ^{170}Tm の3種を使ってみる。供試体透過前の γ -線強度を I_0 、透過後の強度を I と置く。透過厚を $L\text{cm}$ とし、透過部分におけるセメント、骨材、水の容積存在比をそれぞれ a 、 b 、 c とする。そうすれば ^{60}Co については表-8の値を使って

$$I = I_0 e^{-(0.1846a + 0.1526b + 0.0638c)L}$$

となる。これを書き変えて

表-8 4種の γ -線のセメント、骨材、水に対する質量吸収係数と線吸収係数

γ -線源	γ -線エネルギー	単位 $\left\{ \begin{array}{l} \text{質量吸収係数 } \text{cm}^2/\text{g} \\ \text{線吸収係数 } 1/\text{cm} \end{array} \right.$		
		セメント**	骨材	水
^{60}Co	* 1.250Mev	0.0588 (0.1846)	0.0576 (0.1526)	0.0638 (0.0638)
^{137}Cs	0.661	0.0794 (0.2493)	0.0778 (0.2062)	0.0862 (0.0862)
^{192}Ir	* 0.300	0.114 (0.358)	0.110 (0.292)	0.120 (0.120)
^{170}Tm	0.084	0.249 (0.782)	0.201 (0.533)	0.177 (0.177)
	密度	3.14	2.65	1.00

* 平均エネルギー

** ボルトラントセメント

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Co}} = (0.1846a + 0.1526b + 0.0638c)L$$

同様に ^{192}Ir 、 ^{170}Tm については

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Ir}} = (0.358a + 0.292b + 0.120c)L$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Tm}} = (0.782a + 0.533b + 0.177c)L$$

この三式から

$$a = \frac{1}{L} \times \begin{vmatrix} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Co}} & 0.1526 & 0.0638 \\ \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Ir}} & 0.292 & 0.120 \\ \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Tm}} & 0.533 & 0.177 \end{vmatrix} = \frac{10^5}{L} \times \begin{vmatrix} 0.1846 & 0.1526 & 0.0638 \\ 0.358 & 0.292 & 0.120 \\ 0.782 & 0.533 & 0.177 \end{vmatrix} \dots\dots(1)$$

$$= \frac{10^5}{L} \times (-1.023)$$

となり、同様にして b 、 c については

$$b = \frac{10^5}{L} \times \begin{vmatrix} 0.1846 & \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Co}} & 0.0638 \\ 0.358 & \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Ir}} & 0.120 \\ 0.782 & \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Tm}} & 0.177 \end{vmatrix} \dots\dots(2)$$

$$= \frac{10^5}{L} \times (-1.023)$$

$$c = \frac{10^5}{L} \times \begin{vmatrix} 0.1846 & 0.1526 & \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Co}} \\ 0.358 & 0.292 & \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Ir}} \\ 0.782 & 0.533 & \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Tm}} \end{vmatrix} \dots\dots(2)$$

$$= \frac{10^5}{L} \times (-1.023)$$

なる式が得られ、これら3式と $a+b+c=1$ なる関係から、 a 、 b 、 c 、 L が求まる。 L は実際の透過厚であるから、 γ -線透過方向の供試体の厚さ L' を計測すれば、その供試体の含有空気の比率は $(L'-L)/L'$ で表わされる。この方法では、3種の γ -線についてそれぞれ I_0 、 I を測定しておけば a 、 b 、 c および空気量が判明するのであるが、供試体の厚さが大であって、 I に比してかなり大きな I_0 を使わねばならないような場合も考えられる。この場合では I_0 は通常の装置では測定不能であるから、ある既知厚の金属板、たとえば鉄板等の種々の厚さのものを供試体の代りに挿入して透過させ、その減衰率から外挿して I_0 を求めるか、あるいは I_0 を求めず、

内挿によって供試体透過後のγ-線強度 I を得るに必要な鉄板の厚さ、すなわち鉄当厚などの形に換算する。換算後の計算は次のようにして行なう。

金属板として鉄板を使用するものとし、 ^{60}Co 、 ^{192}Ir 、 ^{170}Tm についてそれぞれ供試体を透過させ、鉄当厚として $(\text{Fe})\text{Co}$ 、 $(\text{Fe})\text{Ir}$ 、 $(\text{Fe})\text{Tm}$ を得たものとする。そうすれば次の関係式が成立する。

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Co}} = (0.186a + 0.1526b + 0.0638c)L \\ = (\mu^{\text{Fe}})_{\text{Co}}(\text{Fe})_{\text{Co}} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Ir}} = (0.358a + 0.292b + 0.120c)L \\ = (\mu^{\text{Fe}})_{\text{Ir}}(\text{Fe})_{\text{Ir}} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Tm}} = (0.782a + 0.533b + 0.177c)L \\ = (\mu^{\text{Fe}})_{\text{Tm}}(\text{Fe})_{\text{Tm}} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ただし

$(\mu^{\text{Fe}})_{\text{Co}}$: ^{60}Co のγ-線に対するFeの線吸収係数
以下同様

そこで(2)、(4)、(6)式の $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Co}}$ の代りに $(\mu^{\text{Fe}})_{\text{Co}}$

$(\text{Fe})_{\text{Co}}$ を、 $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Ir}}$ の代りに $(\mu^{\text{Fe}})_{\text{Ir}}(\text{Fe})_{\text{Ir}}$ を、

$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\text{Tm}}$ の代りに $(\mu^{\text{Fe}})_{\text{Tm}}(\text{Fe})_{\text{Tm}}$ を入れたら、

鉄当厚で以て a 、 b 、 c 、空気量の4個の未知数が判明する。

以上述べたような方法は、γ-線透過試験法によるこの種の調査研究に非常に有効な手段であると考えられる。著者らは今後実験の機会に恵まれれば、この方法の有用性を実験的に確認したいと思っている次第である。

9. 結 論

本稿を要約して以下に掲げ、結論に代える。

(1) ^{170}Tm のような低エネルギーγ-線源は元素の種類によって質量吸収係数の差が大きく、γ-線の透過結果から直接に供試体の密度を求めるわけにはいかないが、 μ 図表をあらかじめ作成しておくことによって直接に供試体の材料構成比を求めることができる。このことは前報で報告した ^{60}Co のγ-線についても同様であって、 ^{170}Tm はγ-線源としてこの種の調査研究に全然不便を感じることなく、かえって ^{60}Co に比してその質量吸収係数の値が大であるため有効であるとさえ考えられる。

(2) 供試体の材料配合比が判明しない場合は、述べたように違ったエネルギーのγ-線をコンクリート構成材料の種類の数だけ透過させ、その減衰比を知れば透過部分の材料構成比は求めるはずである。

(3) 普通コンクリートにおける材料分離現象の特徴は、骨材が底面に沈下し、それと同時にセメントペーストが上部に浮き上がることである。そのため骨材は供試

体の底面に多く分布し、上部に至るにしたがって少なくなる。このような理由で、材料分離現象を量的に取り扱うには、骨材の分布率の変化をもって表わすのが適切であると考えられる。

(4) 振動を与えない場合の自然に起こる材料分離は、使用したセメントがシリカセメントの場合に最も起こりやすく、次いで高炉セメント、ポルトランドセメントの順である。スランブはもちろん大なるものほど材料分離は烈しく起こる。

(5) 前項で述べたように、自然沈下現象による材料分離では、セメントの種類間の差が認められるが、スランブを大にすると、長時間の振動を与えると云った手段で故意に材料の分離を促進させると、この差は認められなくなってくる。

(6) スランブ8cmのコンクリートにおいて、先に打設したコンクリートがまだ軟らかいうちに、次のコンクリートを投入し、振動をかけると、振動の影響が非常に強化されて材料分離に現われる。

(7) 振動によってコンクリート中の連行空気量は、かなり顕著に減少する。

(8) 連行空気量が多いコンクリート程材料分離を起こしやすい。

(9) ポルトランドセメントを使ったコンクリートにおいて、その G/S 比と振動時間が材料分離度に及ぼす効果を調べた結果、収斂点の存在が確認され、この収斂点の σ の値、 G/S 比は大きな意味をもっていることがわかった。また、このことから、この実験に使用した粗骨材のその粗骨材に外接する立方体中における充填率はだいたい0.45であることが推定された。

(10) この実験に使用した3種のA E剤のうち、Pro-texは他の2種のA E剤、Darex、Vinsolと比べて、材料分離現象に関する限り異なった振舞いをするということがわかった。

(11) A E剤の添加が材料分離現象に及ぼす影響は、高炉セメント使用のコンクリートとシリカセメント使用のコンクリートとは大きな差異がある。

(12) A E剤を添加した高炉セメントコンクリートでは、材料分離現象は G/S 比が1.0から1.3までの範囲では、 G/S 比と関係は無いものと考えられる。

(13) A E剤を添加した場合のシリカセメントコンクリートでは、高炉セメントコンクリートより振動30秒における σ の値は一般に大であるが、振動時間の増加に伴う σ の増加率は、高炉セメントコンクリートより小さい。

10. あとがき

前に述べたように、この実験では時日、予算の関係で取扱えなかった問題が山積して今後に残されており、コ

ンクリート材料分離現象の全貌を把握するためには、莫大な量のデータを蒐集する必要が痛感せられた。著者らは今後機会を見てこの実験の継続を行ないたいと思っている。ここでこの報告を終わるに当って、本実験の企画、指導等で当研究所コンクリート研究室長伊東茂富氏から種々有益な助言を得たことを厚く感謝する次第である。

なお、この実験は科学技術庁から配布された原子力予算によって実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 有泉他：土木研究所報告 103号
- 2) Simon Kinsman : Radiological Health Handbook. P.B.Report Company
- 3) J.F. Cameron and J.R. Rhodes : International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 7, 3, 244(1960)
- 4) S.J. Wyard; Proc. Phys. soc. A. 65, 377(1952)
- 5) 木村健二郎編：放射線データブック，アイソトープ応用技術講座，第5巻，地人書館
- 6) S.A. Colgate : Phys. Rev. 87, 592(1952)

河川の分流に関する研究(7)

渡良瀬川ショート・カットの水力模型実験

吉川 秀夫*・芦田 和男**・金子 保***

(昭和 35 年 3 月)

Researches on the Diversion on the River (7)

Hydraulic Model Test of the Cut-off in Watarase River

(March 1960)

H. KIKKAWA, K. ASHIDA, T. KANEKO

Synopsis :

In this paper, authors carried out the hydraulic model tests for the cut-off in Watarase river, and made the problems clear such as the change of hydraulic performance and of the river bed that would be induced by the diversion into the cut-off. Then authors decided the functional design for the proposed cut-off

要 旨

本文は水力模型実験により、渡良瀬川ショート・カット開削に伴う水理状況の変化および河床変動の問題を明らかにし、同箇所の水理設計を行なったものである。

目 次

1. 緒 言.....(1)	[1] 分流ぜきの実験.....(11)
2. 実験の説明.....(2)	[2] せき高の決定.....(11)
[1] 水理条件.....(2)	6. 設計案に対する水理実験.....(12)
[2] 模型の説明.....(3)	[1] 水 位.....(12)
3. 現況河道の水理的諸性質.....(3)	[2] 分流量.....(12)
[1] 流 況.....(3)	[3] 流速分布.....(12)
[2] 水 位.....(4)	[4] せき高と分流量、最高流速の関係.....(14)
[3] 流 速.....(5)	7. 移動床実験.....(23)
[4] 河床材料の分布.....(5)	[1] 相似律.....(23)
[5] 流送土砂量.....(5)	[2] 実験の種類.....(23)
4. 分流量の決定.....(5)	[3] ショート・カット分流による河床 変動、土砂の移動量.....(23)
[1] 分流量を決定する考え方.....(5)	[4] 河床変動の水位、流速、分流量、下 流の流向に及ぼす影響.....(26)
[2] 安全流速の検討.....(5)	7. 結 論.....(27)
[3] 分流量の決定.....(11)	
5. 分流ぜきの設計.....(11)	

1. 緒 言

渡良瀬川は岩井山でその河道を狭められるため、この付近で洪水時に高流速を生じた後、さく部上流の水位をせき上げ、これが、しばしば災害の原因となってい

る。したがって、この付近の改修計画については従来よりいろいろ検討されてきた結果、ショート・カットを岩井山の北側に開削して洪水流の一部を分流する方式が取られるに至った。

この方式において最も問題になる点は、ショート・カットへ分流することにより生じる河床変動であり、さらに、これに関連して、分流量をいくりにするか、分流量点、ショート・カットの設計をいかに行なうかというこ

* 建設技官 工博 河川研究室長
** 建設技官 河川研究室主任研究員
*** 建設技官 関東建設渡良瀬川工事事務所

とである。

これらの問題を解決するために、土木研究所では関東地建の依頼により、固定床および移動床の模型実験を行なった。本文は、これらの実験結果の報告であるが、同じようなショート・カットを設計する場合に何らかの指唆を与えるのではないと思われる。

2. 実験の説明

(1) 水理条件

(a) 計画流量 昭和22年9月の未曾有の洪水の結果、改修改訂計画が立てられ、次のごとく計画高水量が決定された。

改修地点より相生川合流点まで

3,500 m³/sec

相生川合流点より松田川合流点まで

3,850 m³/sec

松田川合流点より旗川合流点まで

4,000 m³/sec

旗川合流点より秋山川合流点まで

4,350 m³/sec

秋山川合流点より藤岡まで

4,500 m³/sec

模型区間は上記の中 4,000 m³/sec の区間にある。

(b) 粗度係数 昭和13年9月洪水より昭和29年に至る洪水記録より等流計算により粗度係数 n を求めると図-1-(1)~図-1-(3)のようになり、点は相当にばらついているが、これは各年度の横断記録がないため、粗度係数の算出にあたって、洪水記録年度と異なった年度の横断記録を使用したためによるものではないかと考えられる。昭和13年洪水に対しては同年の横断記録を使用しているため、一応これだけをまとめると図-2のごとくなり、流量および各地点に対して一定の値 $n=0.032$ となる。この値を用いて不等流計算を行なえば図-3のごとくなり実測水位によく一致する。

また、 $n=0.032$ が従来の記録で最大値を示しているので早川田から上流はこの値を用いることにする。

(c) 模型下流端水位 模型下流端(31.0 km)の水位-流量曲線を求めるため、早川田より不等流計算を行なった。

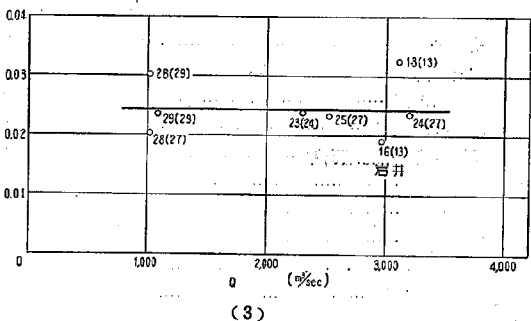
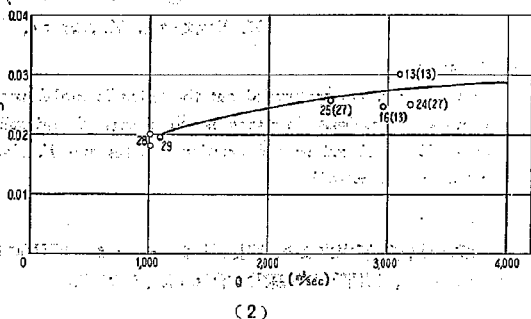
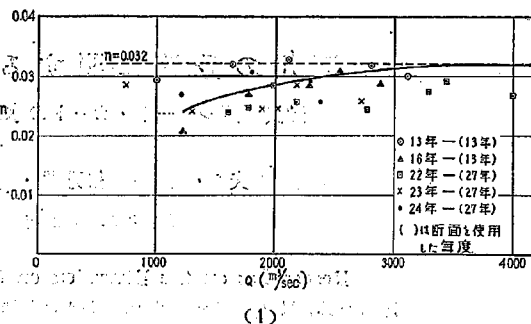


図-1 (1~3) 粗度係数の実測値

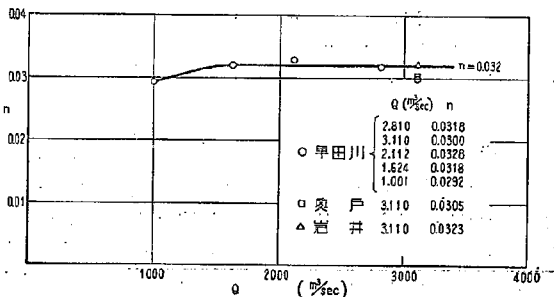


図-2 昭和13年9月洪水粗度係数

計算出発点とした早川田の水位-流量曲線は図-4に示すように各年度の平均を用いた。現況河床(29年断面)、13年河床、計画河床による不等流計算の結果、図-5のように断面 31 km の水位-流量曲線を決定し、この水位に合わせて実験を行なった。

〔2〕 模型の説明

模型区間: 30.0 km~35.0 km

(図-6)

縮 尺: 固定床模型は歪めず縮尺

1/50, 移動床模型は横縮尺

1/50, 縦縮尺 1.4/50

使用断面: 固定床現況実験は昭和29年

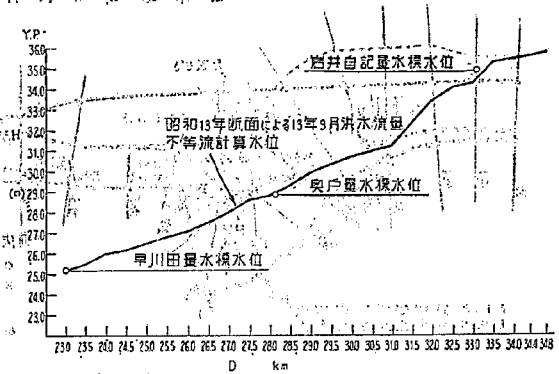


図-3 不等流計算水位と実測水位との比較

早川田 H-Q 曲線

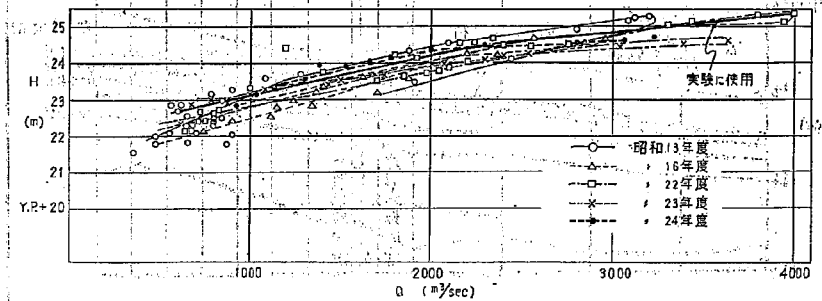


図-4 早川田の水位流量曲線

断面使用; 補助断面として 30 年断面を挿入した。分流失験は計画河床によって行なったが、堰上流高水敷および低水路は現況のままとした。

模型河床: 固定床模型はモルタル面にアスファルト乳剤を塗布し、平均径 5mm の砂利を散布して必要な河床抵抗を与えた。移動床模型は平均径 1.5 mm の砂を用いて河床を作った。砂の平均厚は 10~15 cm 程度にした。

3. 現況河道の水理的諸性質

水理実験の結果明らかにされた現況河道の水理的諸性質は次のとおりである。

〔1〕 流 況

岩井山により右廻した水流は、左岸沿いには No. 9 付近の台地から No. 33 付近にまっすぐに流下し、右岸沿いには底部をとり大きく迂回して No. 33 付近に流下する。したがって、この付近の水流は表面で左岸側、底部で右岸側を堤防沿いに流れ、ねじれた状態となる。No. 33 の上流の凸部で水流は堤防から離れ、死水域が

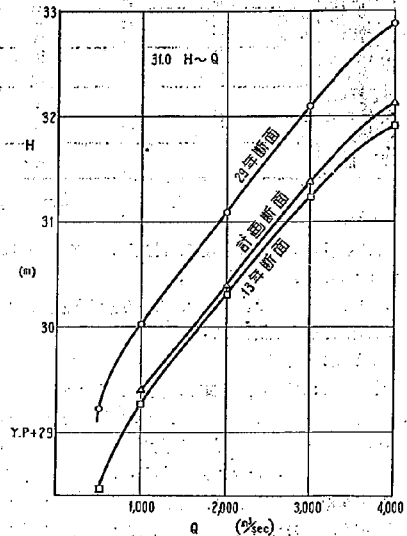


図-5 模型下流端 (31 km) 水位-流量曲線

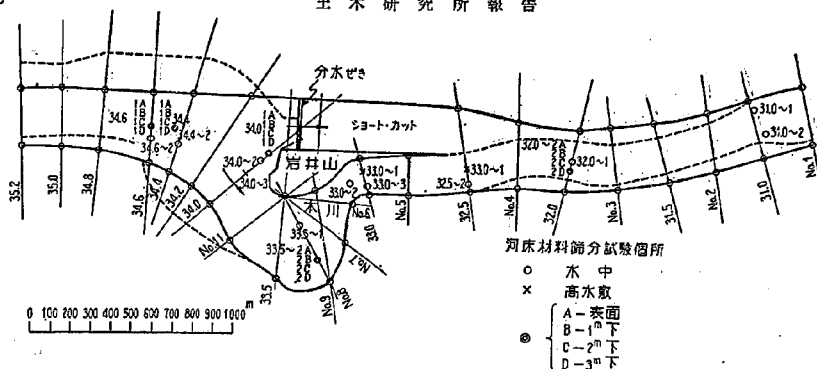


図-6 渡良瀬川模型範囲平面図(河床材料の篩分け個所も含む)

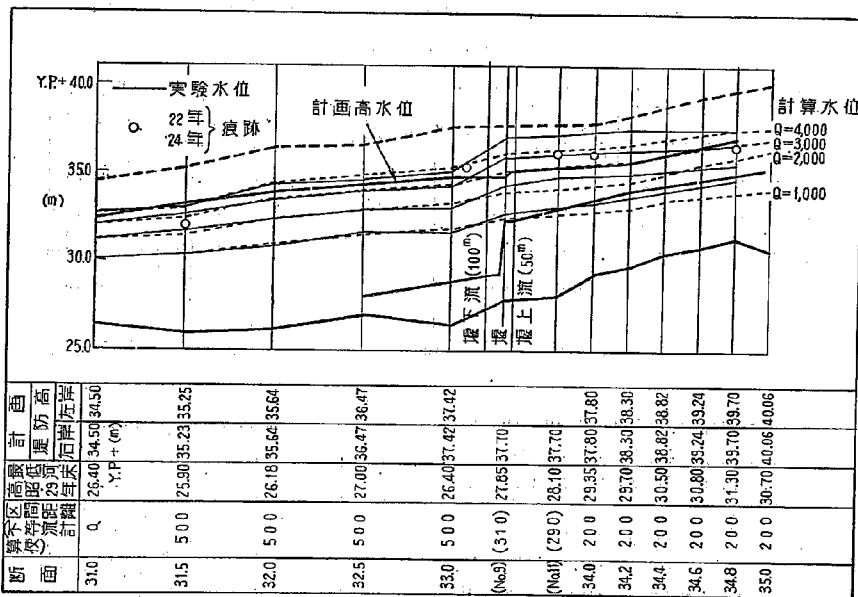


図-7 現況河道の水面形

発生する。

狭さく部においては高流速が発生し、その上流部においては水位がせき上げられる。

このような状況であるので、この個所は過去においてしばしば災害が発生している。

〔2〕 水 位

図-7に示すとおり、岩井山狭さく部で水位はせき上げられ、No. 33 と No. 9 との水位差は流量 4,000, 3,000, 2,000, 1,000 m^3/sec に対して、それぞれ 2.0, 1.6, 1.3, 1.0m に達する。断面形が No. 33 から No. 9 まで複雑に、しかも急激に変化しているの、計算によりせき上げ高を求めることは困難である。実験結果により No. 33 と No. 9 との水位差と、No. 33' の平均流

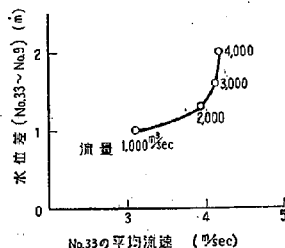


図-8 No.33の平均流速とせき上げ高(No. 33とNo.9との水位差)との関係

速の関係を調べると図-8のとおりである。同図により No. 33 断面の流速を知れば狭さく部上流の水位を求め

うる。なお、No. 33 断面までは計算により求めた水面形は実測値とよく一致する。

狭さく部でせき上げられた水流はせき上げ背水となり、No. 9 より上流は水面こう配が非常にゆるやかである。No. 9 より上流では計画高水位を突破する。その量は計画流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ で 2.0 m 、 $3,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ で 1.0 m である。

横断水面形は図-11 より知られるとおり、No. 33 で右岸側の流速の大きいところで水位はいちじるしく低くなっている。この箇所は Froude 数が 1 に近く、水面は波状を呈する。

〔3〕 流速

狭さく部付近の平面流速分布は図-9 に示すとおり、高流速の発生位置は No. 5 付近から No. 16 付近までであり、流量の増大に伴い上流に進み、発生範囲も広がり、突体に接近する傾向がある。これを最高流速図 (図-10) で調べる。最高流速は流量 $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、 $1,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ では No. 33 に生じ、流量 $2,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上では No. 16~No. 14 間に生じる。このように流量が増加するにつれて、最高流速の発生位置が前進するのは、右岸に沿って迂迴する水流に比べて、左岸台地から No. 16 付近に直進する水流の部分が増加するためである。

この付近の過去の災害記録を見ると、 $1,700 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度を境に被害が増大しているが、これは上記の流速分布から説明しうる。なお、横断流速分布は図-11 に示すとおり、No. 31.5 では均一な分布を示し、No. 33 では右岸側、No. 9 では左岸側に最高流速がかたよっている。

〔4〕 河床材料の分布

模型付近の河床材料の平均粒径は 図-12 のとおりである。資料採取箇所は 図-6 に示す。

〔5〕 流送土砂量

現況に対して掃流土砂量の概算を行なうと、狭さく部の上流せき上げ背水の区間でほとんど 0 となり、上流から流入してくる土砂は狭さく部の上流でほとんど滞積することがわかる。

上流から、この区間に過去のこう水によってどの程度の土砂量が流入しているかを調べるために、足利量水標の $H \sim Q$ 曲線を早川田からの相当水位曲線を用いて補足推定し、さらにこう水痕跡および平均河床こう配よりこう水時の水面こう配を $1/500$ と推定して、佐藤一吉川一芦田公式により各流量に対する掃流砂量を計算すると図-13 に示すとおりである。

次に、昭和 13 年 9 月こう水より 24 年こう水までの早川田記録 (13.9, 16.7, 22.9, 24.8) を集計して、 $500 \text{ m}^3/\text{sec}$ ごとに区切って、図-13 の $Q \sim G$ 曲線を適用すれば、流砂量の総和が求まる。計算の結果この値は約 $100,000 \text{ m}^3$ となる。この他相当量の浮流土砂量が流下したものと考えられる。

4. 分流量の決定

〔1〕 分流量を決定する考え方

狭さく部の高流速を減少させ、本川を安全に治めるために、ショート・カットへ分流するが、分流量が多ければ多いほど、本川は安全となる。しかし、反面分流による土砂の移動が活発となり、分派点付近の河床が変動する。このことは維持上好ましくない。したがって、分流量はあまり多すぎても、少なすぎても害が生じ、最も適当な範囲があるのである。しかしながら、考えなければならない要素が多く分流量を最も適当なところに定めることは簡単ではない。

まず、分流することにより、本川の流速をどの程度減少させることができるか、狭さく部上流部の水位をどの程度下げることができるかを明らかにするとともに、現地における過去の実績にもつづき、流量と災害の状態との関係を調べなければならない。

一方、分流量と土砂の移動量との関係についても明らかにしなければならない。これらを総合検討の上で、分流量を決定しなければならない。これらの検討を実際に行なうために、次のような考え方に立った。

(a) 現地における過去の災害実績にもつづき、流量と災害との関係を明らかにする。さらに、現況における模型実験により、災害に影響をおよぼす水理的な諸量を詳細に検討する。たとえば各流量に対する流速分布の測定により、流速がある程度以上大きくなったり、また流速分布の型 (岸付近で流速が速いとか、おそいとかいったこと) がどのようになれば災害が急増するかというような事実がわかるであろう。

(b) (a) の検討により、かりに安全流速というようなものが考えられれば、分流した場合に、安全流速以下になるようにするには、どのように分流すればよいかを実験により求めることができる。

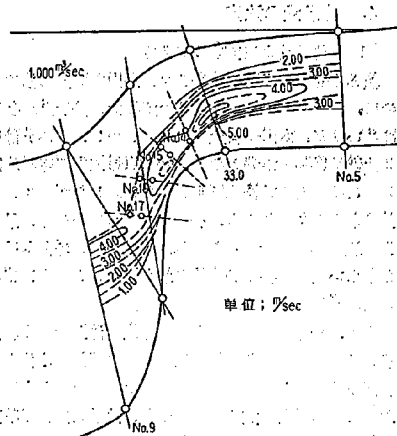
(c) (b) に求めた分流量を確保するためには、分派点にどのような構造物を設ければよいかを実験により求める。

(d) 上記の構造物に対して、移動床の実験を行ない、設計案の良否を検討する。

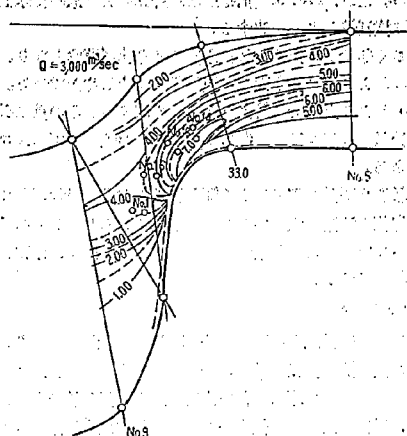
〔2〕 安全流速の検討

本川狭さく部における過去の災害記録より見ると、 $1,700 \text{ m}^3/\text{sec}$ を境として、被害が増大している。

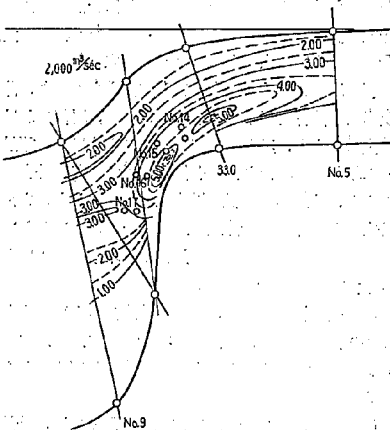
一方、図-9 および 図-10 に示した現況に対する流速分布図によりわかるように、 $2,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上は $1,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以下に比べて、流速の最大位置が岸に接近する。流速の最大値も大きくなる。このことにより、被害の増大する流量は $1,700 \text{ m}^3/\text{sec}$ 付近にあることが理解される。多少の安全を見て、 $1,700 \text{ m}^3/\text{sec}$ より多少小さい流量 $1,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対する本川流速を安全流速と考える。計画流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対して、本川が、この流速以下



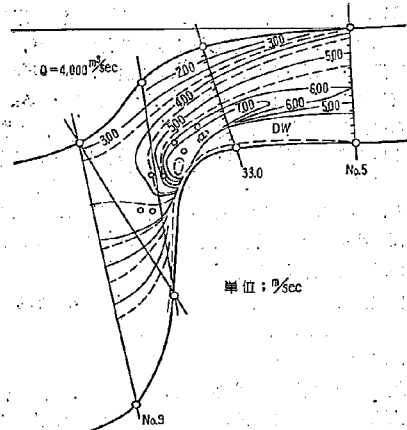
(1)



(3)



(2)



(4)

圖-9 (1~4): 現況平面流速分布圖

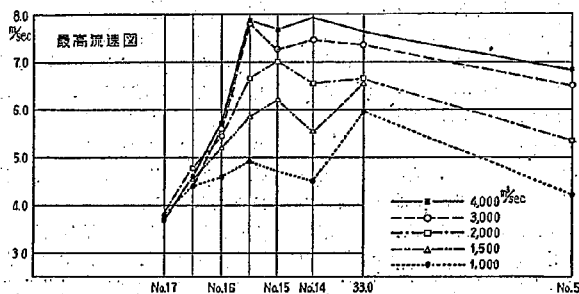
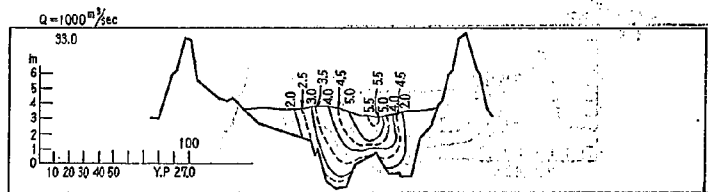
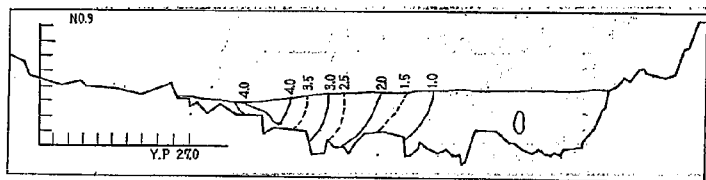


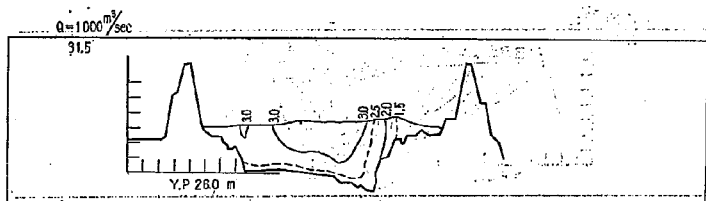
圖-10 橫断面最高流速圖



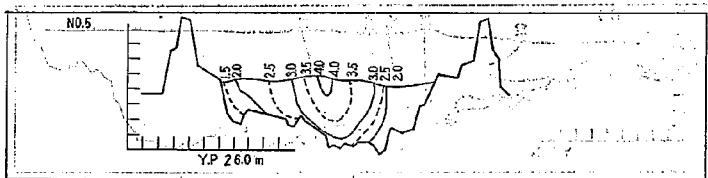
(1)



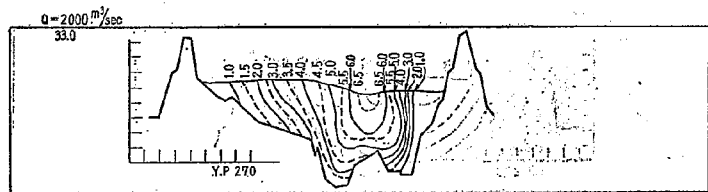
(2)



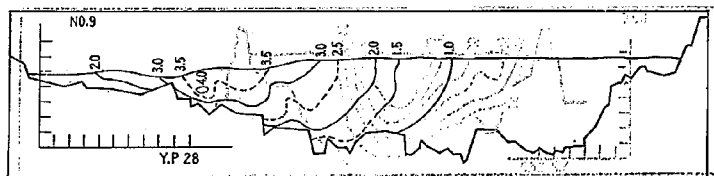
(3)



(4)



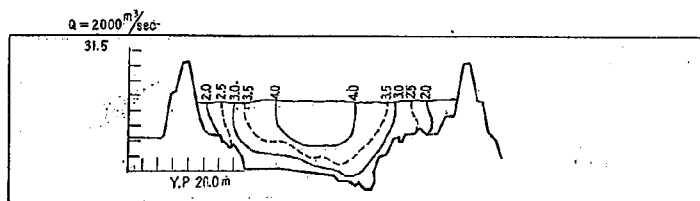
(5)



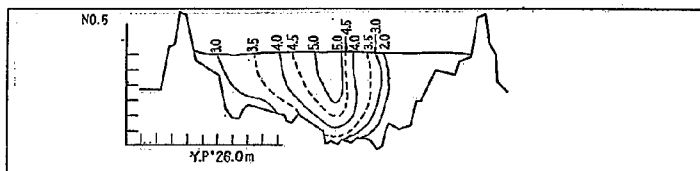
(6)

図-11(1~6) 横断流速分布図

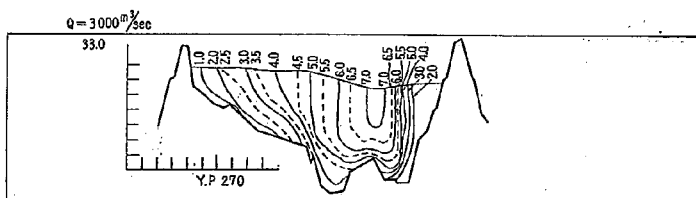
(7)



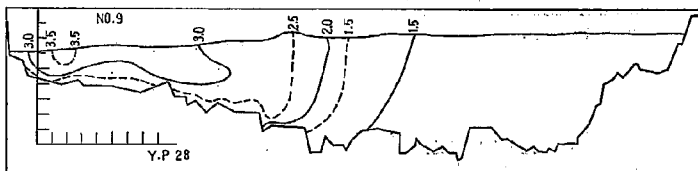
(7)



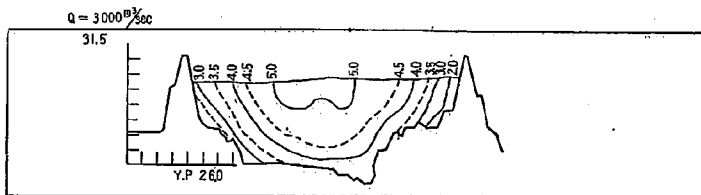
(8)



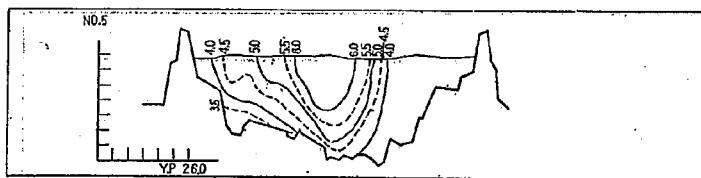
(9)



(10)



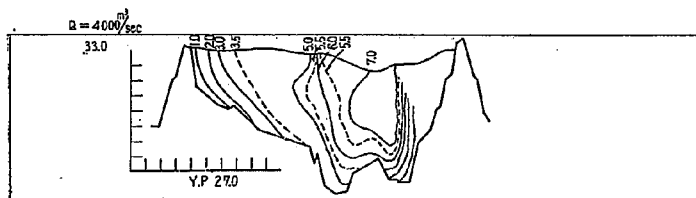
(11)



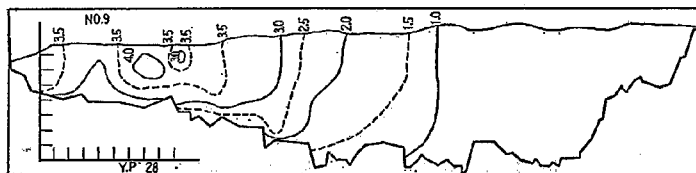
(12)

圖-11(7~12) 橫斷流速分布圖

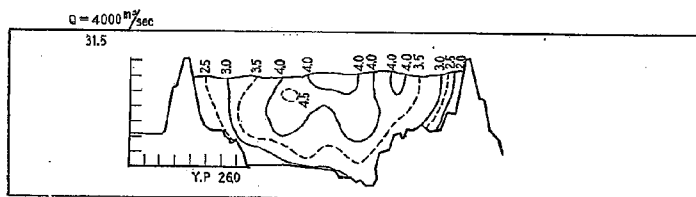
(8)



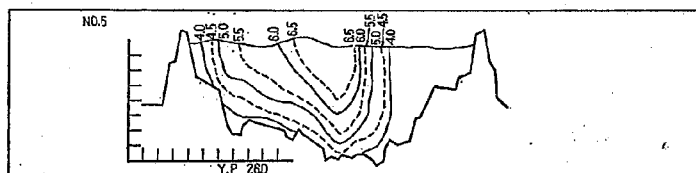
(13)



(14)



(15)



(16)

圖-11(11~16) 橫斷流速分布圖

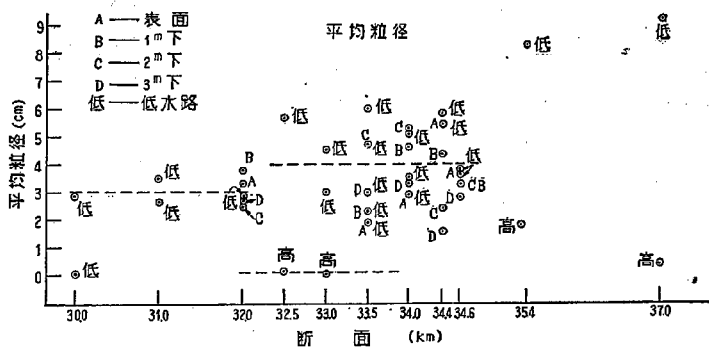


図-12 河床材料の平均粒径

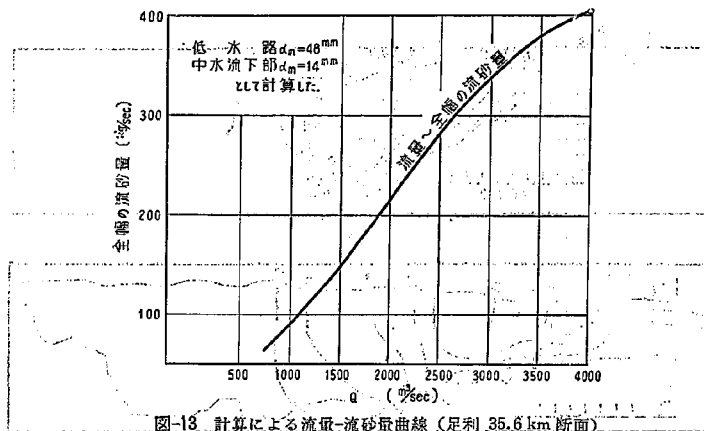
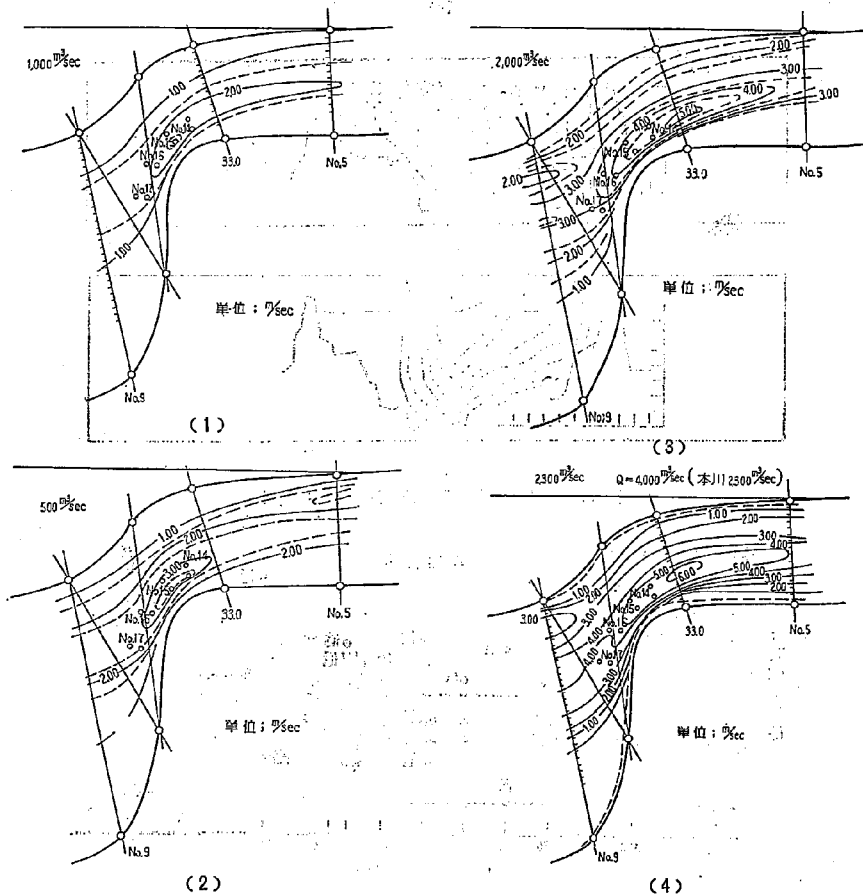


図-13 計算による流量-流砂量曲線 (足利 35.6 km 断面)

図-14 (1~4) 平面流速分布 (合流点を 4,000 m^3/sec に対する水位にした場合)

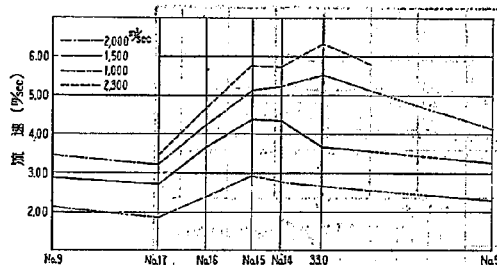


図-15 最高流速図

(合流点を 4,000 m³/sec に対する水位にした場合)

になるように分流量を定めればよい。

〔3〕 分流量の決定

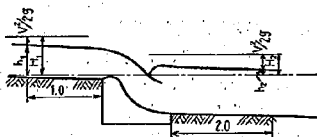
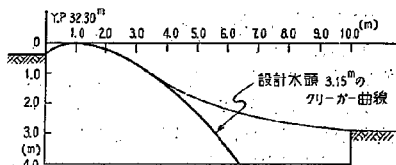
本川とショート・カットとの合流点 32.5 km の断面の水位を計画流量 4,000 m³/sec の計算水位に保って、本川に 2,300, 2,000, 1,500, 1,000 m³/sec の各流量を流し、流速分布を測定した結果を図-14 に示す。高流速の位置は現況より下流へ移る傾向から見られ、さらに流量の増大に伴う発生位置の岸への接近は見られない。

各断面における最高流速を示すと図-15 のとおりである。流速の大きさにおいて 2,300 m³/sec が現況における 1,500 m³/sec に相当する。すなわち、計画流量 4,000 m³/sec の中、本川に 2,300 m³/sec、ショート・カットへの分流量を 1,700 m³/sec にすれば本川を安全流速以下におさめることができる。

5. 分流量の設計

〔1〕 分流量の実験

上記の分流量を確保するために、ショート・カットの上流端に固定せきを設けることにした。せきの形状は図-16 に示すようなクリーガー形とし(設計水頭 3.15 m)



$Q = m/\sqrt{2g} B H_1^{3/2}$ Q : 越流量
 $Q = m/\sqrt{2g} B H_2^{3/2}$ B : 堰幅
 m : 溢流係数(完全越流)
 m' : (不完全越流)

図-16 分派点のせきの形状

全幅を 280 m (有効幅 250 m, 橋脚 10 m) とした。せきの上流側に土砂が滞積するものと考えられるのでその状態にして実験を行なった。なお、越流深はせき頂より上流 1 m (実物 50 m), 下流水深はせき下流端より 2 m (実物 100 m) の位置において測定した。

完全越流の場合の $H_2 \sim m$ 曲線(記号は図-16)は図-17 に示すとおりである。

次にせき下流水位がせき頂より高くなった場合、どの範囲からもぐりになるかを調べるために図-18 に示すように m'/m と H_2/H_1 の関係を示すと、 $H_2/H_1 < 0.7$ の範囲に対して $m = m'$ で

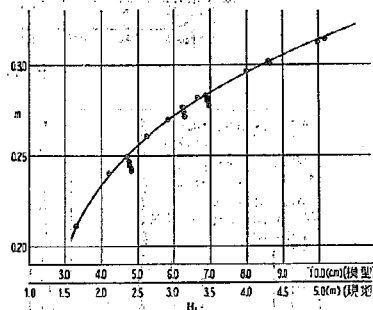


図-17 越流係数(完全越流)

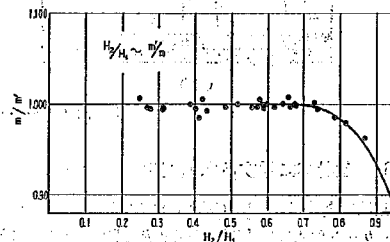


図-18 越流係数(もぐりせき)

あり、水理的に完全越流であり、 $H_2/H_1 > 0.7$ に対して $m'/m < 1$ となり、もぐりであることがわかる。

せき下流の水面形、流速の測定結果は図-19、図-20 (1)、図-20 (2) に示すとおりである。分流量 2,000 m³/sec の場合、せき頂より 30 m 下流では 3~4 m/sec 流速であるが、10 m 下流では 8~9 m/sec の高流速である。またせき頂より 20 m 下流で水位が回復していることから、せき頂より 20 m までは床固めをすることが望ましい。

〔2〕 せき高の決定

上記のせきを用い、分流量を 1,700 m³/sec とするためには、せき頂高 $Y.P + 32.30$ m となる。

これは上流側高水敷高とほぼ同じ高さであり、床止として土砂の移動を抑える意味もあり、この点からも適当であると考えられる。

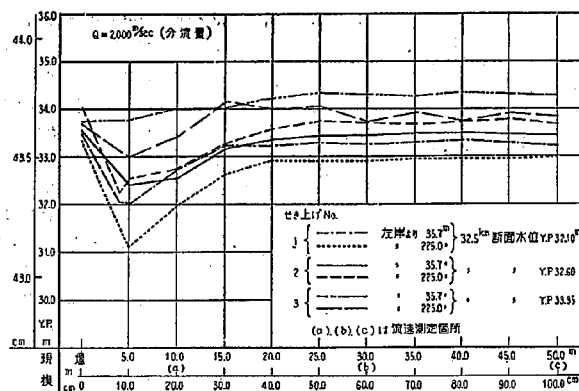
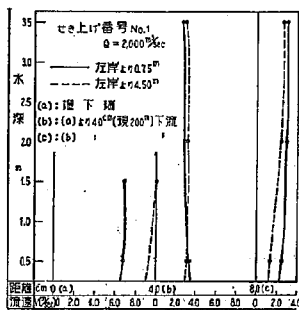
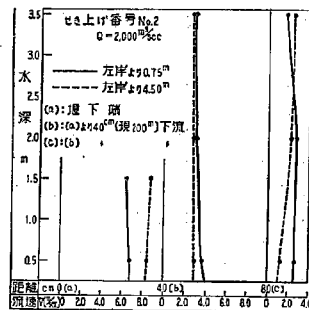


図-19 せき下流水面形



(1)



(2)

図-20 (1~2) せき下流の流速分布

6. 設計案に対する水理実験

断面を計画断面とし(図-21 および図-25), ショート・カットの入口に上記の分流ぎを設けて実験を行なった。

(1) 水位

全流量 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 m³/sec に対する実測水位は 図-21 に示すとおりである。合流点より下流に対しては、計算により水位を求めているが、計算値と実測値とよく一致している。現況に対する水位(図-7)と比較すると、計画案は狭さく部上流の水位がいちぢるしく低下し、ショート・カットを作ることによる効果が十分に知られる。

なお設計においては、水位を計画高水位内に収めることができる。

(2) 分流量

全流量は上流越流ぎにより求めることができるが、分流量は、分流点で分れたものが、さらに分流するので直接測定しなければならない。これには、木川を締切っ

て求めた分流量の越流係数を用いる方法、せき下流における流速分布の実測から求める方法があるが、ここでは両者の方法によった。結果を 図-22 に示すとおり、計画どおりの流量配分を得た。

(3) 流速分布

狭さく部における最高流速図および平面流速分布図は 図-23, 図-24 に示すとおりである。図-24 において計画流量に対するものは、図-14 (4) に示したものと同じである。これによれば流量の大きいときは流速を現況よりかなりおそくすることができる。全流量 1,000 m³/sec に対しては現況より高流速が現われているが、これは計画断面にすることにより、下流の水位が下がることによるものである。このように、分流量が少ない間は、現況よりも、かえって流速が大きくなることがあるので、各分流量ごとに最高流速を比較検討する必要があると考えられる。

これをいろいろのせき高について求めることにより、先に定めたせき高が妥当であるか否か検討することができる。これについて次に述べる。

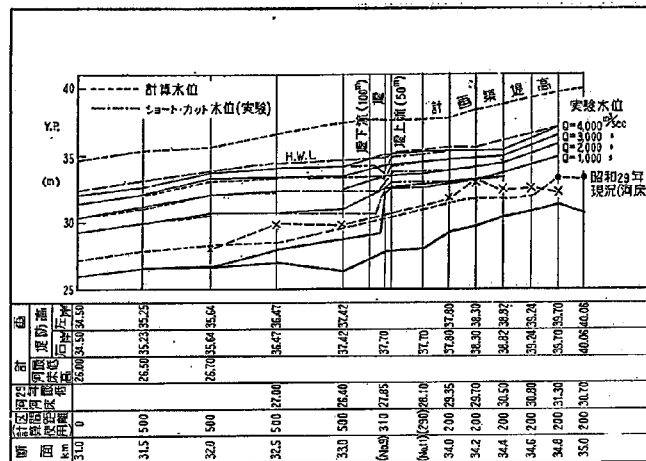


図-21 実験水位と計算水位 (設計案)

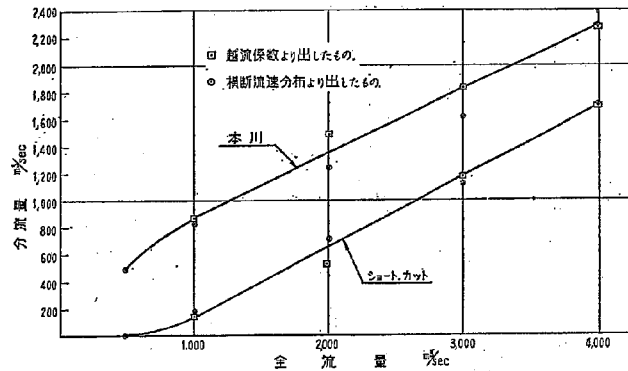


図-22 分流量曲線

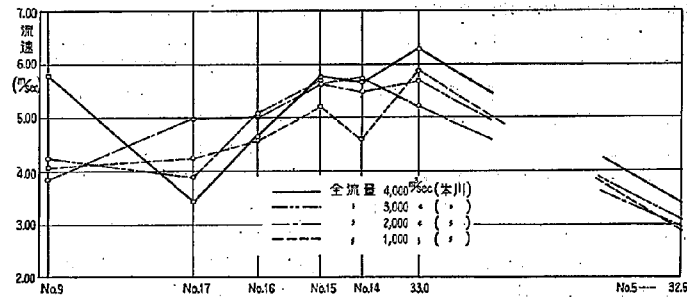


図-23 本川最高流速図

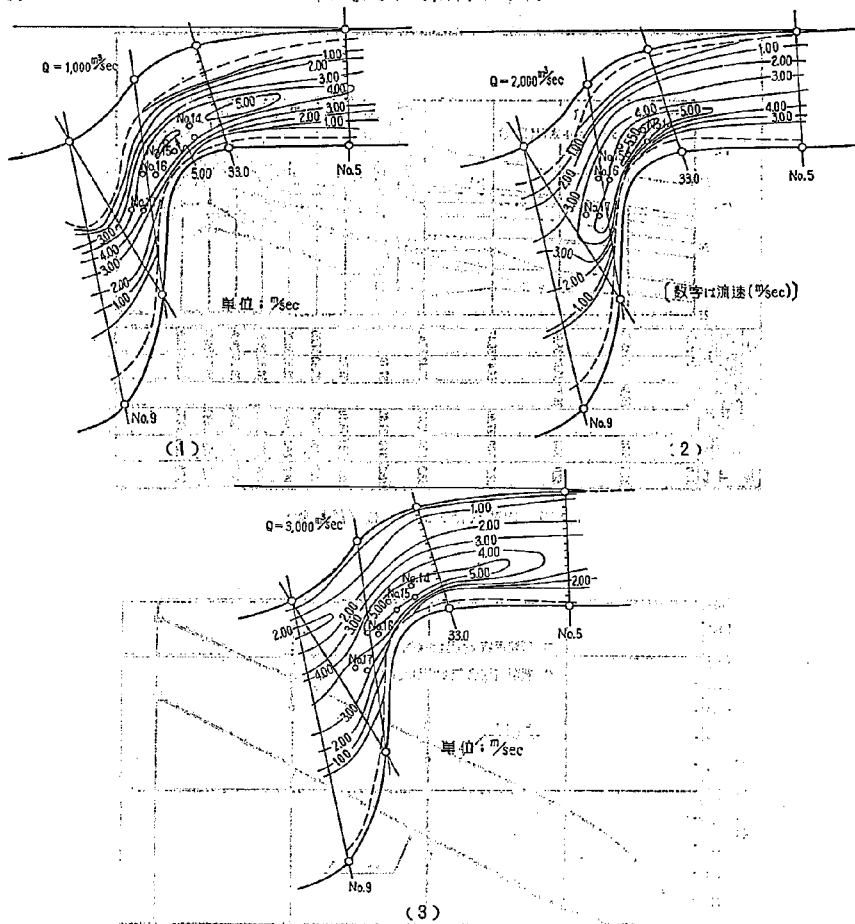


図-24 (1~3) 平面流速分布図

なお、参考のために各断面における流速分布を示すと図-25 のとおりである。

〔4〕 せき高と分流量、最高流速の関係

実験により求めた本川・No.11.の水位-流量曲線、およびせき高 Y. P + 32.3m のせき上流の水位-流量曲線は図-26 のとおりである。

ショート・カットについて、せき下流断面と 32.5 km の断面との水位相関図は図-27 のとおりである。せき高が変わっても越流係数が同じであるとして、図-17、図-18 および図-27 を用いて、せき上流の水位-流量曲線を求めることができる。No.11 およびせき上流の水位-流量曲線からエネルギー-流量を求めると図-28 のとおりである。両断面のエネルギー-水頭が一致すると仮定して、分流量を求めせき高別に表わすと図-29 のとおりである。

これをせき高と分流量との関係であらわすと図-30 のとおりとなる。せき高 Y. P + 32.30m に対する計算値は図-22 に示した実測値とかなりよく一致し、この計算法が妥当なことがわかる。

現況および計画河道に対する実驗値から、最高流速と本川流量との関係を求めると図-31 のとおりである。これに図-29 に求めたせき高と分流量の関係を用いてせき高を記入した。これより、せき高 Y. P + 32.8m, +33.30m に対して、せき高 Y. P + 32.30m の場合はショート・カットを作る効果が十分表われている。また +32.30m に対しては計画流量以外においても安全流速を越す場合は現われない。また、せき高 Y. P + 32.0m は高水敷高より低くなるので、土砂の移動の面から思わしくない。以上によりせき高 Y. P + 32.30m は妥当な高さであると考えられる。

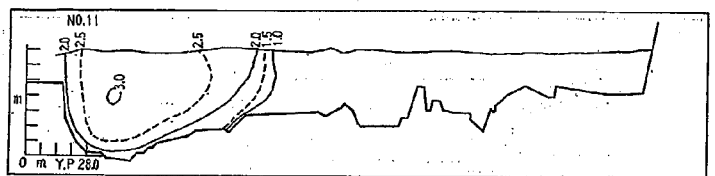
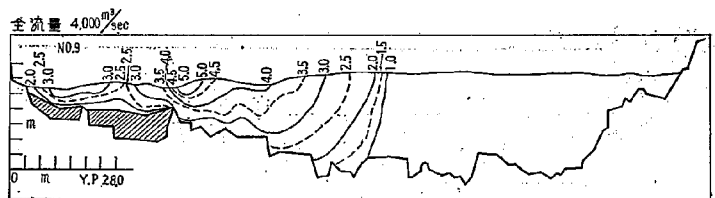
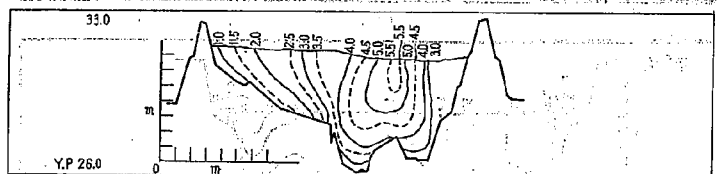
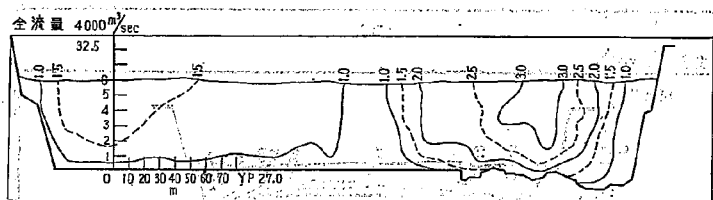
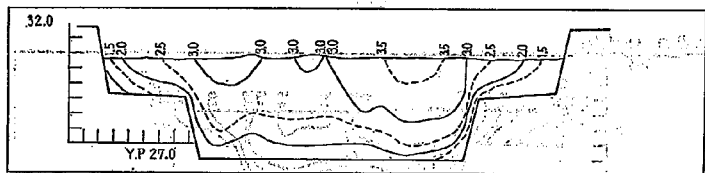
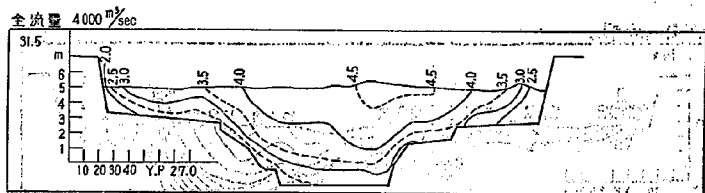
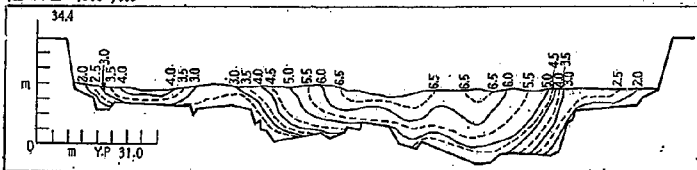
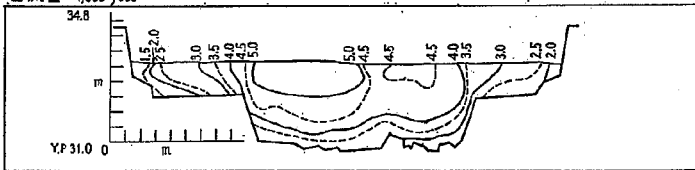


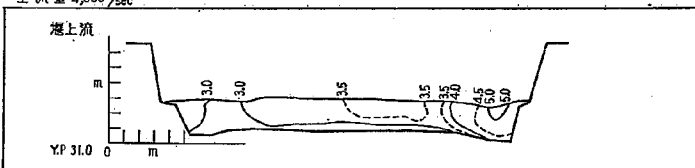
図-25(1~6) 断面内流速分布図

全流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 

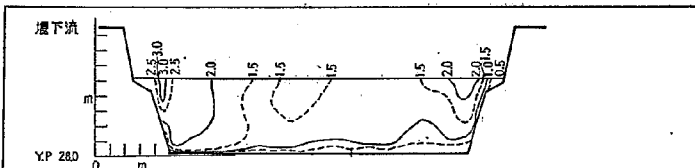
(7)

全流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 

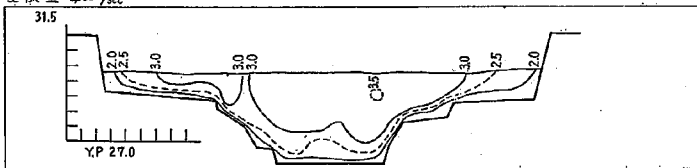
(8)

全流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 

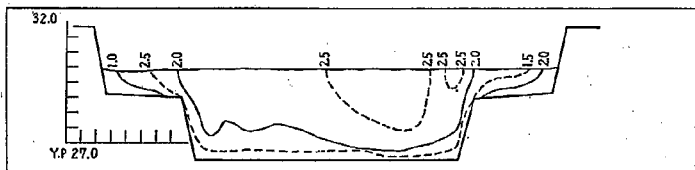
(9)



(10)

全流量 $3,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 

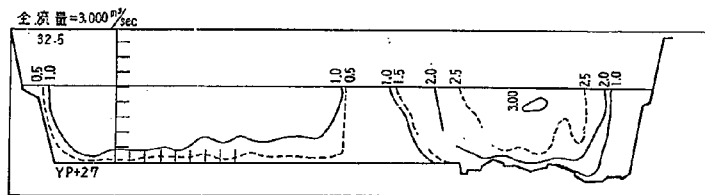
(11)



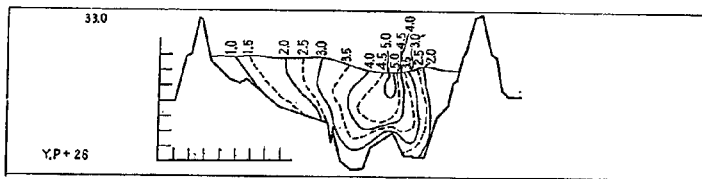
(12)

圖-25(7~12) 断面内流速分布图

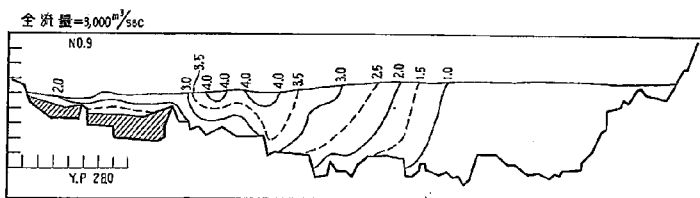
(16)



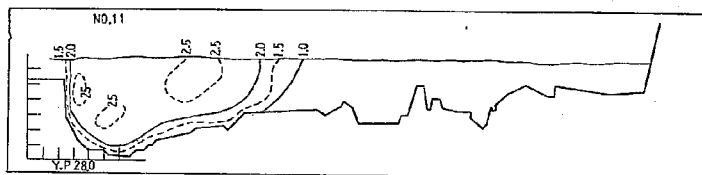
(13)



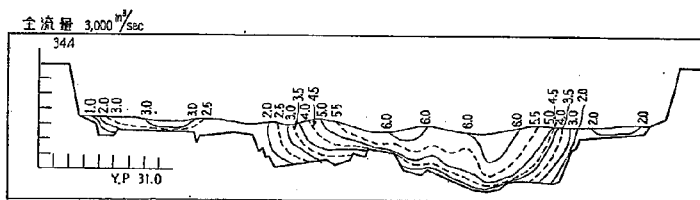
(14)



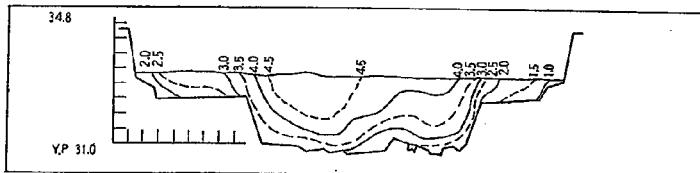
(15)



(16)

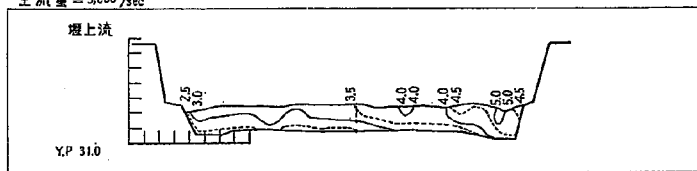


(17)

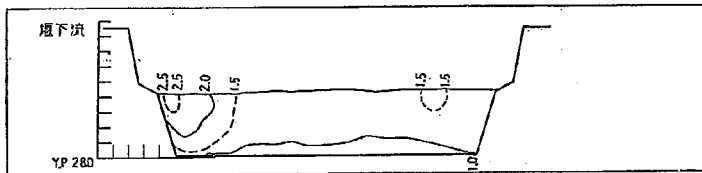


(18)

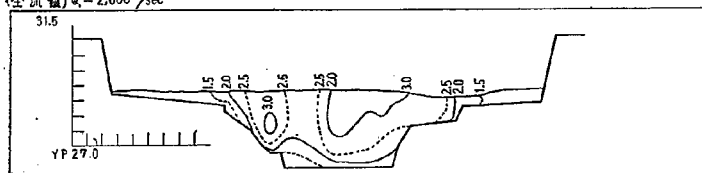
図-25(13~18) 断面内流速分布図

全流量 = $3,000 \frac{m^3}{sec}$ 

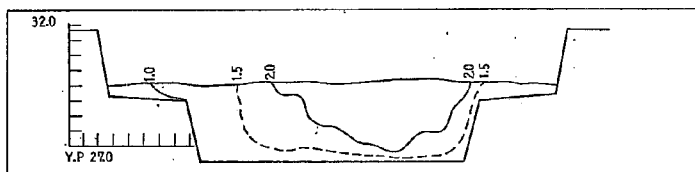
(19)



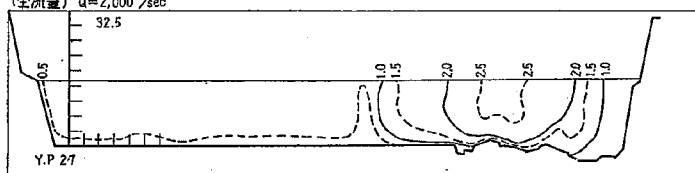
(20)

(全流量) $Q = 2,000 \frac{m^3}{sec}$ 

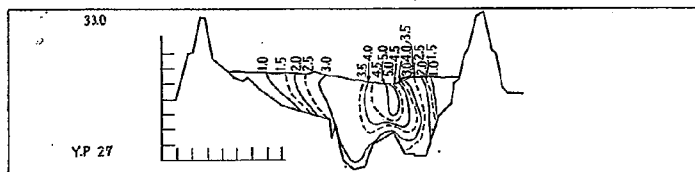
(21)



(22)

(全流量) $Q = 2,000 \frac{m^3}{sec}$ 

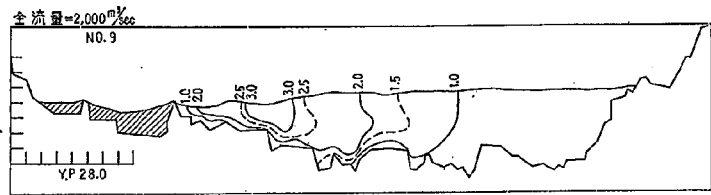
(23)



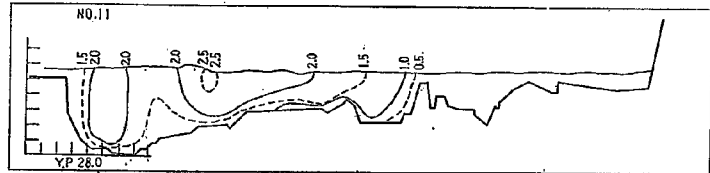
(24)

圖-25(19~24) 断面内流速分布図

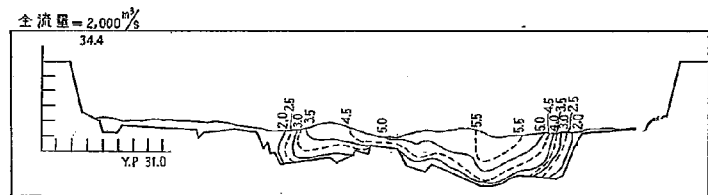
(18)



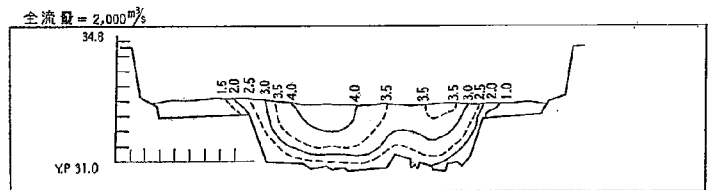
(25)



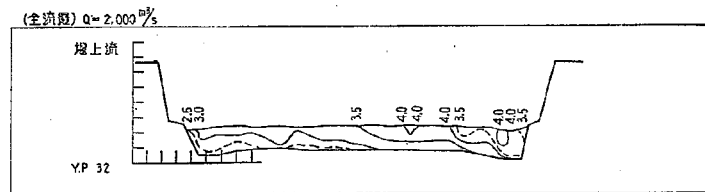
(26)



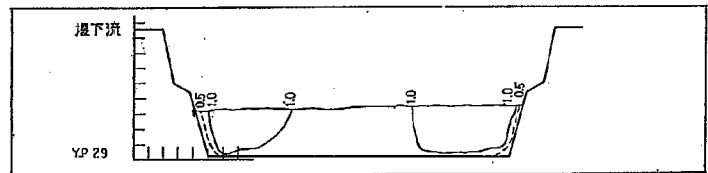
(27)



(28)

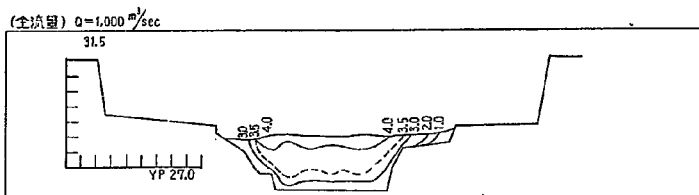


(29)

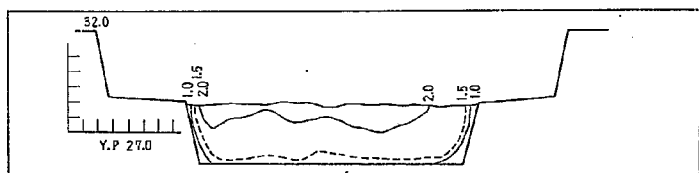


(30)

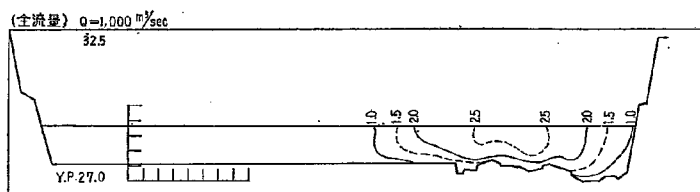
図-25(25~30) 断面内流速分布図



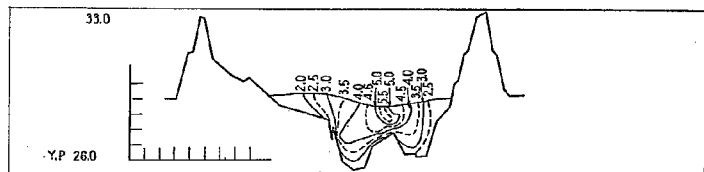
(31)



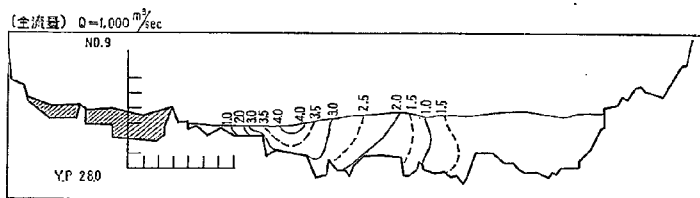
(32)



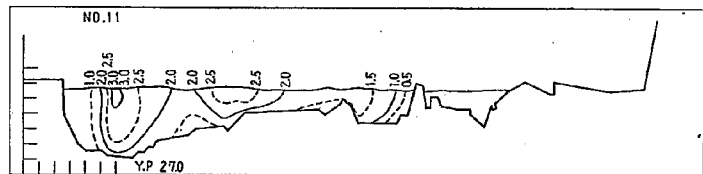
(33)



(34)

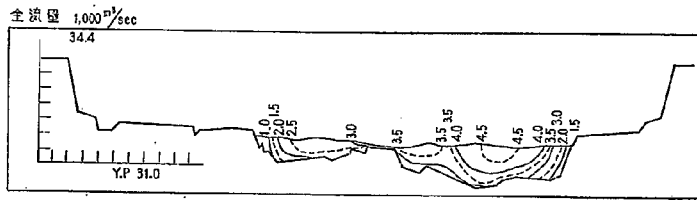


(35)

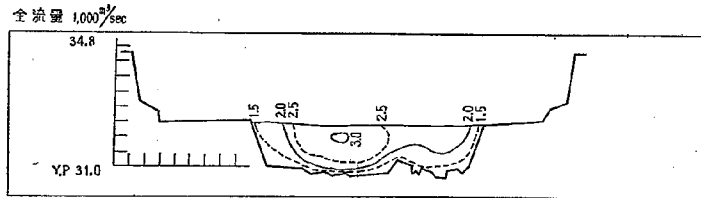


(36)

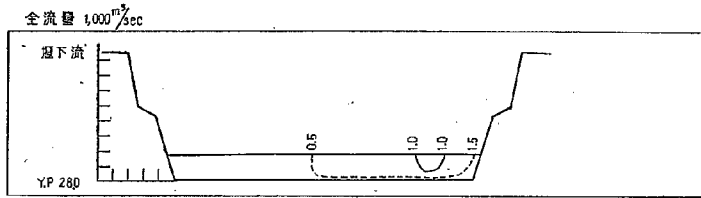
圖-25(31~36) 断面内流速分布圖



(37)



(38)



(39)

図-25(37~39) 断面内流速分布図

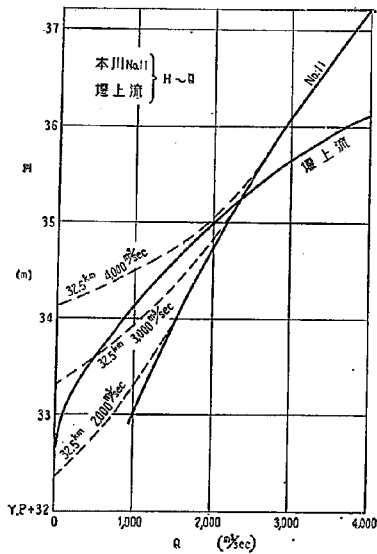


図-26 せき上流および本川No. 11の水位-流量曲線

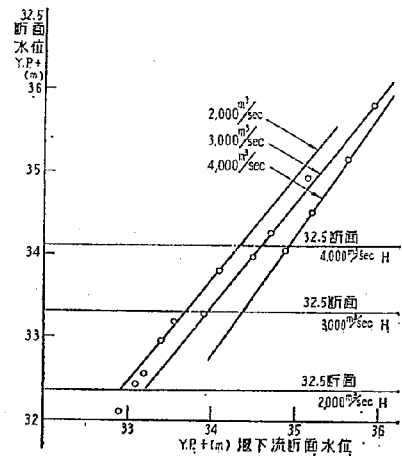


図-27 ショート・カットせき下流断面とNo. 32.5断面の水位相関図

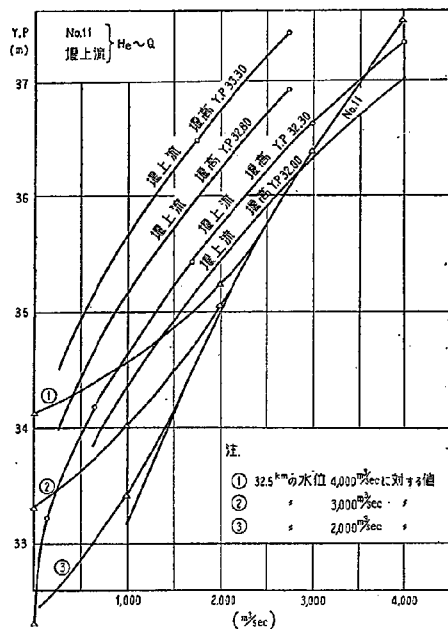


図-28 種々のせき高に対するせき上流および No. 11 の水位—エネルギー曲線(計算値)

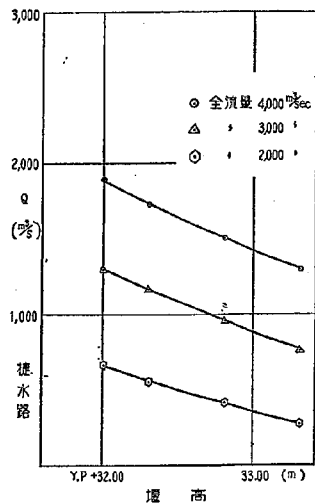


図-30 せき高と分流量の関係

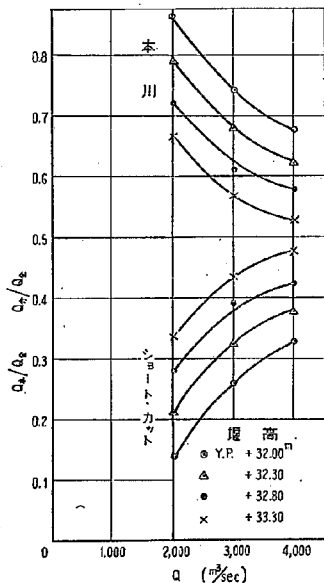


図-29 種々のせき高に対する 流量配分(計算値)

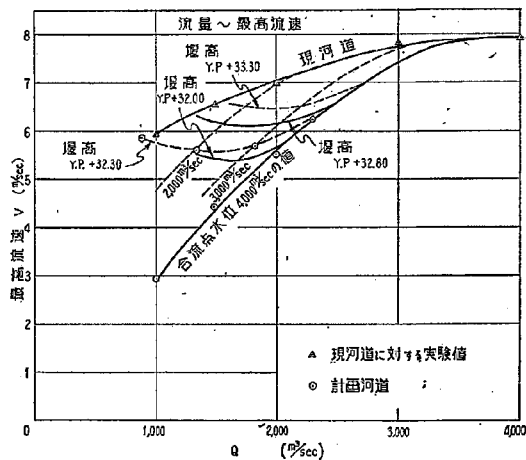


図-31 最高流速と本川流量との関係

7. 移動床実験

〔1〕 相似律

基本方程式として次のような掃流砂量の運動方程式⁽¹⁾と連続式を用いることにする。

$$qB \cdot \frac{\sigma - \rho}{\rho} \cdot g = \varphi(n) \cdot f(\tau_0/\tau_0) \cdot (\tau_0/\rho)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d(qB \cdot B)}{dx} + B(1-\lambda) \frac{dg}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 qB ：単位幅、単位時間当りの砂れきの容積で表わした掃流砂量

σ ：砂れきの密度

ρ ：水の密度

n ：Manning の粗度係数 m-sec 単位

τ_0 ：限界掃流力

τ_0 ：掃流力 $= \rho g R \cdot I$

$\varphi(n)$ ：粗度係数の関数

$\varphi(n) = 0.623(1/40 \cdot n)^{35} \quad : n \leq 0.025$

$\varphi(n) = 0.623 \quad : n \geq 0.025$

$f(\tau_0/\tau_0)$ ：限界掃流力と掃流力の比の関数

B ：水路幅

λ ：空隙率(%)を100で割って示したもの

(1) 式と (2) 式を模型と実物とで相似にさせるためには、次式を満足させなければならない。

$$\frac{(qB)_m}{(qB)_p} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta} \frac{l_p^{3/2}}{h_p^3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{\alpha \cdot \beta}{\gamma} \frac{h_p^2}{l_p^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、添字 m , p はそれぞれ模型および実物に対する値であり

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= f(\tau_0/\tau_0)_p / f(\tau_0/\tau_0)_m \\ \beta &= \varphi(n)_p / \varphi(n)_m \\ \gamma &= (1-\lambda)_p / (1-\lambda)_m \\ h &= h_p / h_m \quad l = l_p / l_m \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。

(3) 式および (4) 式を満足させるように、時間および流砂量の縮尺を定めれば、流砂運動は実物と模型とで相似になると考えられる。しかし、実際には護岸や高水敷の浸蝕に対する抵抗性のために自然に放置した場合とは洗掘滞積の関係が異なってくるもので、過去における河川の洗掘滞積の状態に合わせるためには、人為的操作を加えなければならない。

以上の他、移動床模型においては、固定床の場合と同じように Froude 数、粗度係数を相似にしなければならない。

移動床模型における粗度係数は水理量および河床材料により定まる。したがって、粗度係数を相似にするために、どのような河床材料、粒径を用いるべきか十分検討

しておかなければならない。また模型において、なるべく砂澱の発生を防ぐようにすることが望ましい。これには模型を歪ませて急こう配にするとよい。この2点を満足させるように予備試験を行ない、歪度 $1.4(=h/l)$, $d_m = 1.5 \text{ mm}$ とした。この場合、時間および流砂量の縮尺は

$$T_m/T_p = 0.0316, \quad G_p/G_m = 60$$

となる。

〔2〕 実験の種類

ショート・カットを作った後の河床の洗掘滞積、それが流量配分に及ぼす影響、せき下流部の洗掘、土砂の移動量を調べることを目的として実験した。流量が小さい時は土砂の移動も少なく、現況とあまり異ならないので $3,000 \text{ m}^3/\text{sec}$, $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対して実験を行なった。実験の種類は次のとおりである。

実験-1 (せき高 Y. P + 32.30 m)

ショートカット河床高は計画高

流量 (m^3/sec)	実験継続時間	測定項目
1-1 4,000	5 時間45分	水位、流速
1-2 " 6 " 30 "	(河床、整形しなおす)	流速
1-3 3,000	5 " 20 "	(") 水位、流速
1-4 " 1 " 30 "	(")	流速

実験-2 (せき高 Y. P + 32.30 m)

(ショート・カット河床高は計画高)

2-1 4,000	1 時間27 分	土砂移動量
2-2 3,000	2.50	"

(河床は $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 流下後のまま)

実験-3 (せきなし)

ショート・カット河床現地盛高

3-1 4,000	実験-2 に同じ	土砂移動量、分流量
3-2 3,000	"	土砂移動量、分流量

なお、上流からの砂の補給は 34.8 km 断面における計算値

$Q (\text{m}^3/\text{sec})$	G_p	G_m
4,000	$6,630 \text{ gr/m} \cdot \text{sec}$	$103 \text{ gr/m} \cdot \text{sec}$
3,000	$4,867 \text{ gr/m} \cdot \text{sec}$	$76 \text{ gr/m} \cdot \text{sec}$

を用いて、実験継続時間中絶えず行なった。

また、本川 No. 33 の直上流の右岸側、直下流の左岸側など、洗掘が顕著にあらわれるところは護岸を行なった。

〔3〕 ショート・カット分流による河床変動、土砂の移動量

現況においては狭さく部のせき上げにより下流へ流下する土砂は比較的少ないが、ショート・カットに分流すると水面こう配がつき、土砂が下流へ流下するようになる。実験開始前の河床高を図-32 (1)、実験-2-1 後の河床高を図-32 (2) に示す。

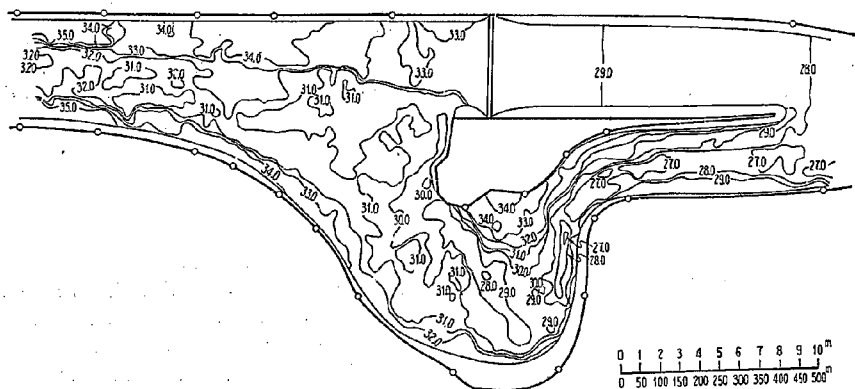


図-32(1) 実験開始前の河床高

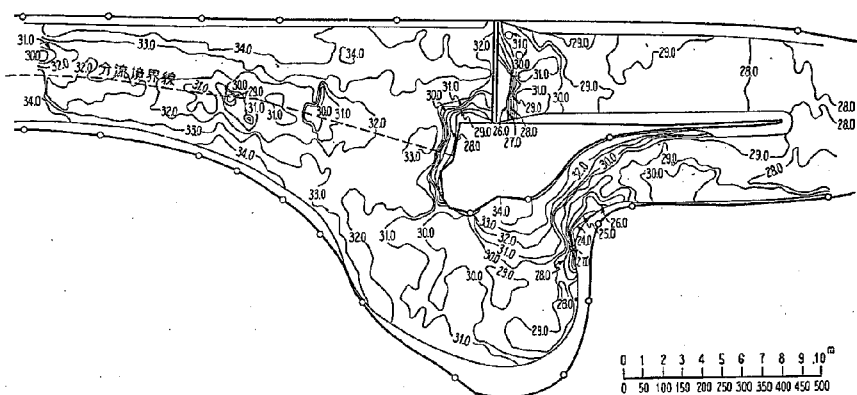


図-32(2) 実験 2-1 後の河床高

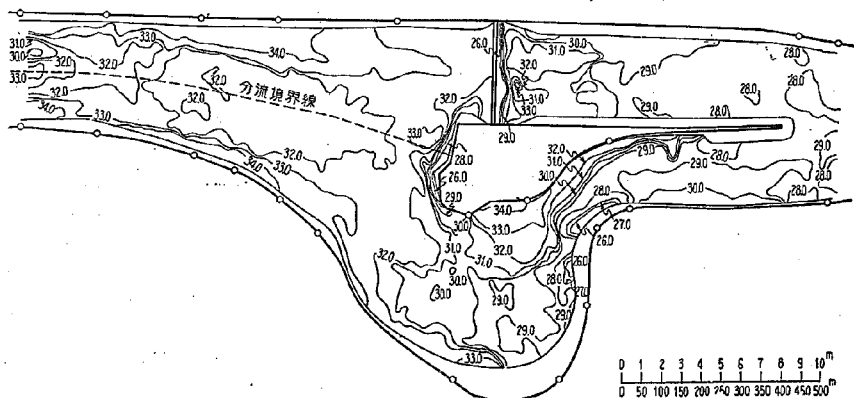
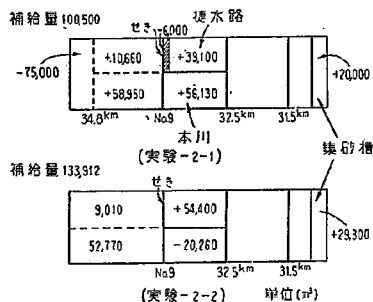


図-32(3) 実験 2-2 後の河床高

洗掘、滞積の状況を明らかにするため、通水前の河床高を基準にして、変動量を示せば図-33 (1), (2) のとおりとなる。また実験 3-2 の河床変動量を図-33 (3) に示す。分派点より上流に行くにつれて、河幅は狭くなるため、低下背水となり、この部分で河床がかなり低下する。この土砂が分派点直上流の河幅の広い部分に滞積すると同時にショート・カットおよび本川下流に多量に流下する。この流下土砂量を表示すると次のとおりである。



せき上流の断面と 31 km の断面において(1)式で計算を行ない、実測値と比較すると、

Q=4,000 (m³/sec) の場合		
断面	計算値(m³)	実測値 (m³)
31.5 km	13,700	20,000
せき上流	10,100	33,000
Q=3,000 (m³/sec) の場合		
31.5	22,100	29,300
せき上流	53,600	54,400

実測値と計算値とはほぼ合い、相似律の基礎に(1)式を用いることは妥当であると考えられる。

実験を行なった流量および截流時間は実物に換算すると相当長時間になっており、下流への流出土砂量が実験結果の 20,000 m³ 程度であれば、これは許容し得るのではないかと考えられる。図-33 (3) からわかるように、せきがない場合には、ショート・カットの入口が洗掘され、洗路が、本川からショート・カットの方に変ることが予想される。したがって分派せきは床固めとしての作用もあり、必要である。

ショート・カットの河床高は 図-34 に示すとおり、流入土砂のため現地盤程度の高さになる。せき頂より 50 m 程度下流までは、相当洗掘されるので、この区間は十分に河床保護を行なう必要がある。

実験-3 はショート・カットの河床を現地盤高に行なった実験であるが、図-33 (3) に示すとおり、河床変動はほとんどなくショート・カットは現地盤高程度で維持されるものと思われる。

〔4〕河床変動の水位、流速、分流量、下流の流向に及ぼす影響

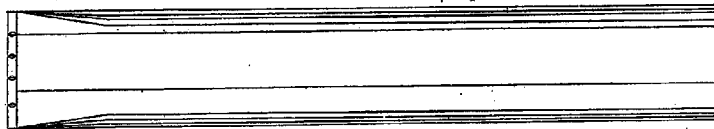
固定床と移動床の水位をせき上流断面と比較すると、図-35 に示すとおり流量の小さい範囲において、移動床の方が高い。これは河床が上昇したためである。しかし計画流量付近ではほとんど変化しない。

本川狭さく部における流速は 図-36 に示すとおり、固定床に比してかなり減少する。これは流速の速いところの河床が洗掘されたことによる。分流量の変化を最も極端にあらわれる実験-3 について求めると 図-37 に示すとおりとなり、100~150 m³/sec 程度ショート・カットへの流入量が増加する。

合流点より下流の断面は 図-38 に示すとおりあまり

平面図

移動河床 3,000 sec 流水後の
変水路縦断面



縦断面図

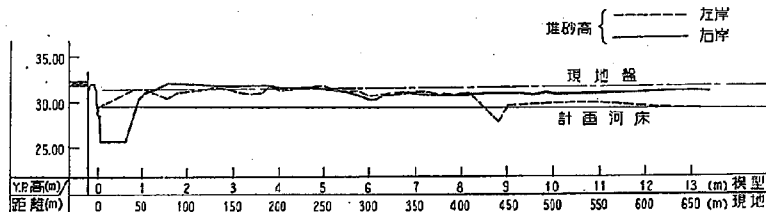


図-34 ショート・カットの河床高 (実験 2-2 後)

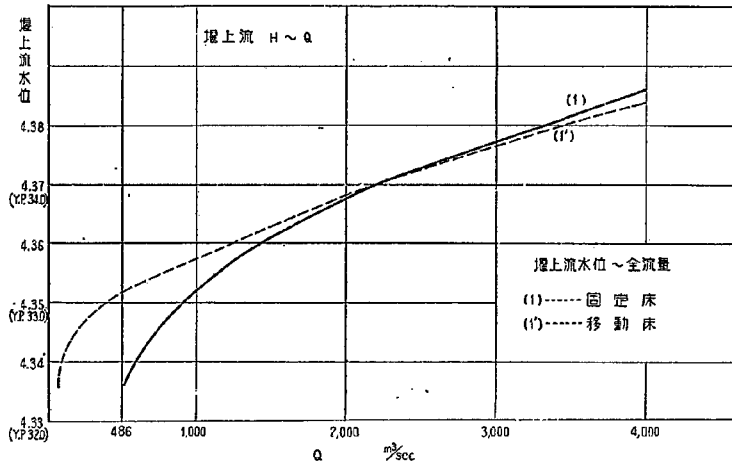


図-35 河床移動後のせき上流の水位-流量曲線 (実験1)

変化せず、したがって、流向もあまり変わらないことがわかる。

7. 結 論

以上を取りまとめると次のごとくである。

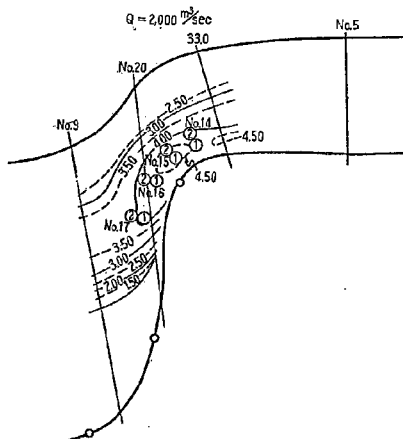
(1) 早川田より模型区間上流端(34.8 km)に至る区間の Manning の粗度係数は過去の洪水記録ごとにかなり変化しているが、その最大値は昭和 13 年に対する $n = 0.032$ であるので、計算および実験に際してこの値を採用した。

(2) 現況河道においては岩井山の狭さく部のために水位はいちじるしくせき上げられている。そのせき上げ高は流量 4,000 (m³/sec), 3,000 (m³/sec), 1,000 (m³/sec)

に対してそれぞれ 2.0m, 1.6m, 1.3m, 1.0m に達することを実験の結果明らかにした。

(3) 現況河道において岩井山の狭さく部には洪水時にいちじるしい高流速が現われる。実験の結果この最高値は流量 4,000, 3,000, 2,000, 1,500, 1,000 m³/sec に対してそれぞれ約 8.0 m³/sec, 8.0 m³/sec, 7.0 m³/sec, 6.5 m³/sec, 6.0 m³/sec 程度である。その発生位置は流量 2,000 m³/sec 以上と 1,500 m³/sec 以下とで異なり流量の大きい時は堤体に接近し、流量の小さい時は下流に移り、しかも堤体から離れる。このことは流量 1,700 m³/sec 程度を境にこの付近の災害実績が出ていた現地の記録と符合する。

(4) 前記流量 1,700 m³/sec より多少小さい流量 1,500



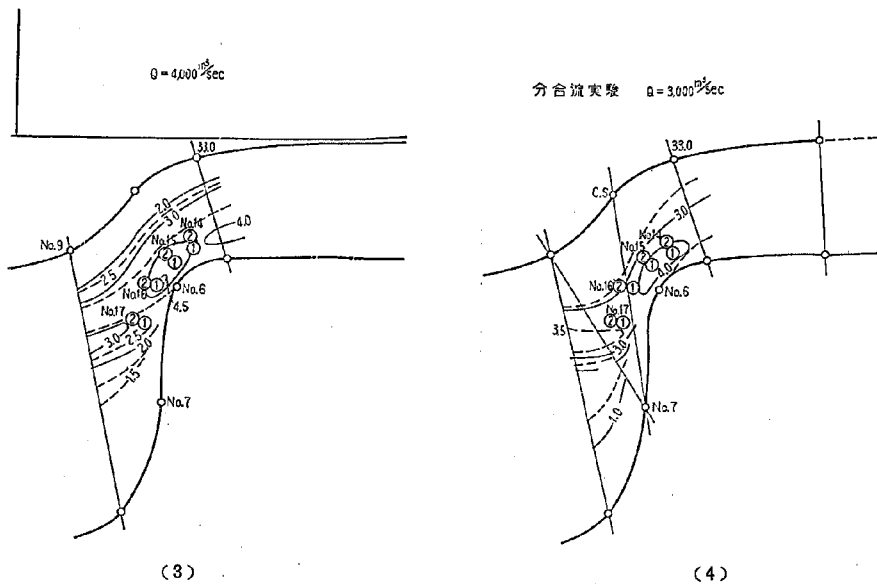


図-36(3~4) 本川狭さく部の平面流速分布図(実験1)

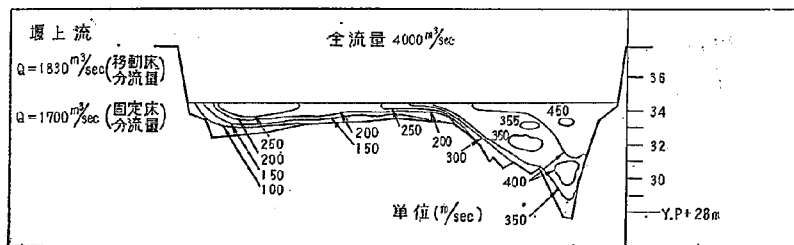
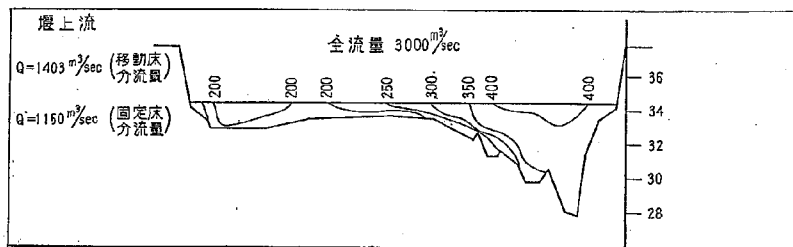


図-37 移動床実験による分流量 (実験3)

移動河床流砂分配実験 下流河床 横断変化図

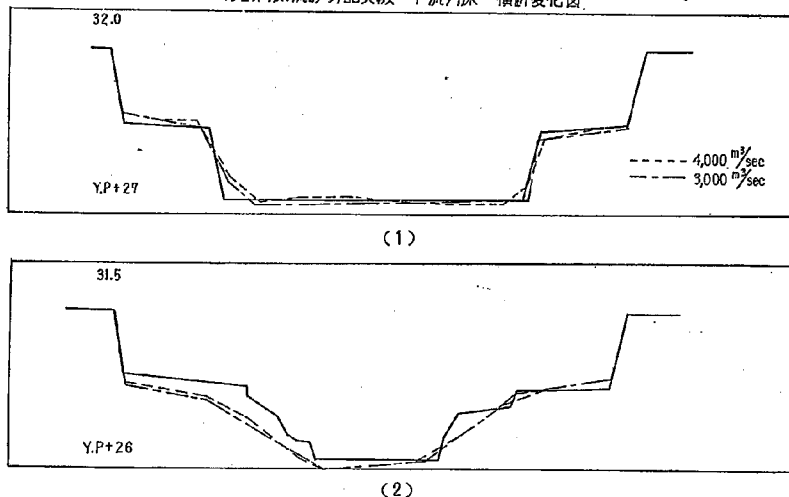


図-38 合流点より下流断面の河床変動

m^3/sec 程度に対する流速を一応安全流速と考え、計画流量 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 時に本川流速を安全流速以下にするためにはショート・カットに $1,700 \text{ m}^3/\text{sec}$ (したがって本川 $2,300 \text{ m}^3/\text{sec}$) を分流しなければならぬことが実験から明らかになった。

(5) ショート・カットに $1,700 \text{ m}^3/\text{sec}$ を分流するためには越流幅を 260 m (有効幅 250 m , 橋脚縁幅 10 m) にすればせき高は実験の結果 $Y.P+32.30 \text{ m}$ となり、せき上流の河床の高さはほぼ一致する。

(6) 前記のせきは上流の河床に対する床止として土砂の移動を抑える意味もあり、土砂の移動面からも $Y.P+32.30 \text{ m}$ のせき高は適当であると考え得る。

(7) 上記分流せきによる分流量は全流量 $4,000, 3,000, 2,000, 1,000, 500 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対してそれぞれ $1,700, 1,170, 650, 140, 0 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。すなわち分流開始流量は $500 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。

(8) 上記のせきの越流係数は 図-17, 図-18 のとおりである。

(9) せき下流の水位および流速測定の結果、せき頂より 20 m 下流までは水叩を設ける必要がある。移動床によりせき下流の洗掘を調べた結果、さらに 30 m の区間十分に河床保護する必要がある。

(10) 上記せきよりショート・カットへ分流の結果、本川の水位は $H.W.L.$ 以内となる。狭さく部上流においては現況に比して水位がいちじるしく低下する。その低下量は、No. 11 において

$Q(\text{m}^3/\text{sec})$	低下量 (m)
4,000	2.0
3,000	1.5

2,000 : 1.0

である。

(11) せきの越流係数を同じであるとして、せき高をいろいろ変えた場合の本川流量を計算により求め、流量と最高流速の関係をせき高別に求めると 図-31 のごとくなる。これよりせき高 $Y.P+32.80 \text{ m}$, $+33.30 \text{ m}$ に対してせき高 $Y.P+32.30 \text{ m}$ の場合はショート・カットを作る効果が十分現われている。また計画流量以外においても安全流速を越す場合は現われない。これらのことによりせき高 $Y.P+32.30 \text{ m}$ は適当であると考えられる。

(12) 現況においては上流より下流した土砂は狭さく部の上流においてほとんど滞積していると考えられる。上流よりの掃流土砂は昭和 13 年より 24 年までの洪水記録より計算して同期間中に足利より下流へ概算 $100,000 \text{ m}^3$ 程度と推定される。

(13) ショート・カットに分流することにより、上流部は現況に比べて、かなり水面こう配がつき、土砂の移動が活発となる。分派点より上流に行くにつれて、河幅は狭くなるため、低下背水となり、この部分で河床はかなり低下する。この土砂は分派点直上流の河幅の広い部分に滞積すると同時にショート・カットおよび本川下流へ多量に流下する。

(14) 流下土砂量の実測値と、(1) 式による計算値とをほぼい、相似律の基礎に(1)式を用いることは妥当であると考えられる。

(15) ショート・カットの河床高は、流入土砂のため現地盤程度の高さになる。さらに現地盤高にして行なった実験で河床変動はほとんどなく、ショート・カットは現

地盤程度で維持されるものと考えられる。

(10) ショート・カットの流頭部にせきがない場合にはこの付近が洗掘される。したがって流路が本川からショート・カットの方に変わることが予想され、水理的に好ましくない。したがって、分流せきは床固めとしての作用もあり、必要である。

(11) 分流することによる河床変動にもとづく、流量配分の変化は、もっとも極端にあらわれるせきのない場合について考えても計画流量 $4,000\text{m}^3/\text{sec}$ の時 $100\sim 15\text{m}^3/\text{sec}$ 程度ショート・カットへの流入量が増加する程度である。

ダムの基礎改良に関する一力学的考察

村 幸雄*・中村 慶一**・大久保忠良***・飯田 隆一****

(昭和 36 年 1 月)

要旨：

一般に堰堤の基礎処理は、大別して透水性防止のためのものと、外力に抗し得るように基礎を改良するためのものとに分けられる。従来、重力ダムが多く建設されている間は、主として前者が問題とせられ、これに関しては数多くの研究がなされて来た。しかし、最近アーチダムが数多く建設され、さらに地質的に見てかなり問題のある地点にもアーチダムが建設されるに至り、後者もかなり重大な問題となって来た。

本論文はこの後者の問題について一つの考え方を示さんとするものである。

目

次

1. 基本方程式.....(1)	[5] 基礎岩盤内の応力分布.....(5)
[1] 基本的仮定.....(1)	2. 数 表.....(5)
[2] 推力による岩盤内の応力分布.....(2)	3. 応用例.....(24)
[3] 曲げモーメントによる岩盤内の 応力.....(3)	[1] 二瀬ダム.....(24)
[4] 剪断力による岩盤内の応力.....(4)	[2] 鳴子ダム.....(25)
	[3] その他.....(25)

1. 基本方程式

[1] 基本的仮定

基礎地盤内の応力および変位については古くから数多くの研究がある。弾性理論の立場に立って求めたものとしては、有名な Boussinesq の解を始めとして Michell, Lamb および寺沢博士の研究などがあり、また、土の中の応力分布については Frohlich および星埴博士⁽¹⁾の研究などがある。さらに基礎内に表面に平行な軟層または硬層が存在する場合および弾性率が深さとともに変化する場合には松村博士⁽²⁾の研究がある。

このように半無限体および半無限板の問題は古くから数多く取扱われているが、これをダムの基礎処理に適用した例は極めて少ない現状にある。この種の研究の代表的なものをあげれば、米国の開拓局において行なわれた Shasta Dam の基礎軟弱岩盤の補強理論⁽³⁾があげられる。

この論文は河川に直交した鉛直な軟弱岩盤が存在する場合に、これに堤体から力が作用した場合に硬い部分と軟弱な部分とでは変位に差が生じ、これにより堤体の応力分布が乱されることが予想されるが、このような変位差を実質的になくすためには、どの程度の深さまでコンクリートにおきかえるべきかを論じたものである。

この研究は堤体と岩盤との接触面に現われる軟弱地層の処理方法を取扱うものとしては極めて優れたものである。

るが、岩盤の表面に平行な粘着層が存在する場合にこれをコンクリートで置き換える必要があるか否か、あるいは、節理が発達している岩盤の場合に、力学的に見てどの程度の深さまでグラウトを行なうて、岩盤が一体として作用するように処理すべきかを判断するには用い得ない欠点を有している。

本論文は基礎岩盤が一様にして一体として作用するものと仮定し、さらに二次元応力状態を仮定して、岩盤内の応力分布を求め、地質に応じた許容応力を定めて基礎処理の方法およびその範囲を定めんとするものである。

ここに導入された主な仮定を列記すると、

- (i) 岩盤は一定の弾性係数を有し、一体として作用する弾性的半無限体からなるとしたこと。
- (ii) 岩盤は方向性を有しないと仮定したこと。
- (iii) 二次元応力状態が成立しているものとしたこと。
- (iv) 岩盤の表面は平面であると仮定したこと。
- (v) 岩盤に作用する力は堤体との接触面で直線的に変化しているものと仮定したこと。

などである。もちろん堤体と岩盤との接触面付近では局部応力が発生しており、岩盤の表面の形状を簡略化しているために、この方法により求められた値は堤体との接触面の付近では実際に生ずるものと、ある程度異なっていることが予想される。しかし、Saint Venant の原理から考えて、堤体厚と等しい程度以上内部に入ったら所

* ダム部長, ** ダム部ダム構造研究室長, *** 材料構造部研究室長, **** ダム部ダム構造研究室研究員

(1) 星埴 和 “基礎の支持論”

(2) 松村 隆治 “弾性地盤に於ける基礎の沈下に関する理論的研究” 土木学会誌 Vol. 17 p. 813

及び松村 隆治 “弾性率の深さと共に変化する地盤に於ける基礎の沈下” 土木学会誌 Vol. 17 p. 1121

(3) Wallace A. Waldorf: “Strengthening of weak rock seams in foundation of Shasta Dam” Technical Memorandum of U.S.B.R. No. 598
Edwin Rose: “Strengthening of weakrock seams outside base of Shasta Dam” Technical Mem. of U.S.B.R. No.602

では、大体正確な値を与えているものと思われる。また岩盤内に seam または節理が存在する場合には、その附近ではその影響を受け応力分布は計算により求めた結果とは異なっていることが予想される。しかし、その seam または節理が受け持つべき応力はこの計算から推定することは可能であると考えられる。

[2] 推力による岩盤内の応力分布

abutment 近くの岩盤等高線を直線に仮定してこれを半無限板の境界にとる。この線は多くの場合河心に平行な直線と仮定するのが妥当であろう。この線の垂線と堤体との取付角を α とする。境界面に沿って y 軸を、これに垂直に岩盤内に x 軸をとる。堤体の厚さを l とすれば推力の作用する幅は $l \sec \alpha$ となる。

前述したとおり、堤体と岩盤との取付部においては局部応力が発生してその応力分布は複雑な形となっているが、Saint Venant の原理により作用点からある程度離れた所の応力分布は推力、曲げモーメント、剪断力が作用面での直線分布を仮定して求めても大差ないものと思われる。したがって推力、曲げモーメント、剪断力は直線分布した surface traction により表わされるものと仮定する。

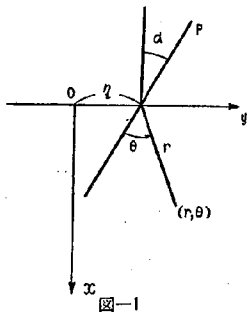


図-1

集中心力 p が半無限板の境界の一点に作用するとき、力の方向に首線をとれば半無限板内の応力は⁽⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= + \frac{2}{\pi} p \cdot \frac{\cos \theta}{y} \\ \sigma_\theta &= \tau_{y\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

いま、作用点から η だけ離れた点を原点とすると、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= + \frac{2}{\pi} p \frac{x^2 \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} \\ \sigma_y &= + \frac{2}{\pi} p \frac{(\eta - y)^2 \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} \\ \tau_{xy} &= - \frac{2}{\pi} p \frac{x(\eta - y) \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

推力に対する式を求めるに $(H/l) \cos \alpha$ なる強度の分布荷重が $(l/2) \sec \alpha \sim (-l/2) \sec \alpha$ の範囲に分布しているときの式を求めればよい。すなわち

(4) Love: "Mathematical Theory of Elasticity" p. 210

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= + \frac{2H}{\pi l} \cos \alpha \\ &\int_{-(l/2) \sec \alpha}^{(l/2) \sec \alpha} \frac{x^2 \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} d\eta \\ \sigma_y &= + \frac{2H}{\pi l} \cos \alpha \\ &\int_{-(l/2) \sec \alpha}^{(l/2) \sec \alpha} \frac{(\eta - y)^2 \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} d\eta \\ \tau_{xy} &= - \frac{2H}{\pi l} \cos \alpha \\ &\int_{-(l/2) \sec \alpha}^{(l/2) \sec \alpha} \frac{x(\eta - y) \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} d\eta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

これを計算して

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= + \frac{H}{\pi l} \cos \alpha \cdot H_x \\ \sigma_y &= + \frac{H}{\pi l} \cos \alpha \cdot H_y \\ \tau_{xy} &= - \frac{H}{\pi l} \cos \alpha \cdot H_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} H_x &= 2 \int_{-(l/2) \sec \alpha}^{(l/2) \sec \alpha} \frac{x^2 \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} d\eta \\ &= \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l}}{\frac{x}{l}} + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l}}{\frac{x}{l}} \right. \\ &\quad + \frac{\frac{x}{l} (\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l})}{(\frac{x}{l})^2 + (\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l})^2} \\ &\quad + \frac{\frac{x}{l} (\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l})}{(\frac{x}{l})^2 + (\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l})^2} \cos \alpha \\ &\quad - \frac{(\frac{x}{l})^2}{(\frac{x}{l})^2 + (\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l})^2} \\ &\quad \left. - \frac{(\frac{x}{l})^2}{(\frac{x}{l})^2 + (\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l})^2} \right\} \sin \alpha \dots\dots\dots (5.a) \\ H_y &= 2 \int_{-(l/2) \sec \alpha}^{(l/2) \sec \alpha} \frac{(\eta - y)^2 \{x \cos \alpha + (\eta - y) \sin \alpha\}}{\{x^2 + (\eta - y)^2\}^2} d\eta \\ &= \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l}}{\frac{x}{l}} + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l}}{\frac{x}{l}} \right. \\ &\quad - \frac{\frac{x}{l} (\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l})}{(\frac{x}{l})^2 + (\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{l})^2} \\ &\quad - \frac{\frac{x}{l} (\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l})}{(\frac{x}{l})^2 + (\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{l})^2} \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left\{ \log \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \right. \\
 & + \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} \\
 & \left. - \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \right\} \sin \alpha \dots\dots\dots (5.b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{xy} &= 2 \int_{(-1/2) \sec \alpha}^{(1/2) \sec \alpha} \frac{x(y-\eta) \{x \cos \alpha + (\eta-y) \sin \alpha\}}{[x^2 + (\eta-y)^2]^2} d\eta \\
 &= \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
 & \quad - \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} \\
 & \quad - \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \left. \right\} \sin \alpha \\
 & \quad - \left\{ \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \right\} \cos \alpha \dots\dots\dots (5.c)
 \end{aligned}$$

とする。

[3] 曲げモーメントによる岩盤内の応力

abutment における曲げモーメントを M とすると境界面における荷重分布は

$$\frac{12M}{\pi t^3} \eta \cos^2 \alpha$$

にて表わされる。すなわち

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= + \frac{24M}{\pi t^3} \cos^2 \alpha \\
 & \quad \int_{(-1/2) \sec \alpha}^{(1/2) \sec \alpha} \frac{[x^2 \eta \{x \cos \alpha + (\eta-y) \sin \alpha\}]}{[x^2 + (\eta-y)^2]^2} d\eta \\
 \sigma_y &= + \frac{24M}{\pi t^3} \cos^2 \alpha \\
 & \quad \int_{(-1/2) \sec \alpha}^{(1/2) \sec \alpha} \frac{\eta(\eta-y)^2 \{x \cos \alpha + (\eta-y) \sin \alpha\}}{[x^2 + (\eta-y)^2]^2} d\eta \\
 \tau_{xy} &= - \frac{24M}{\pi t^3} \cos^2 \alpha \\
 & \quad \int_{(-1/2) \sec \alpha}^{(1/2) \sec \alpha} \frac{x\eta(\eta-y) \{x \cos \alpha + (\eta-y) \sin \alpha\}}{[x^2 + (\eta-y)^2]^2} d\eta
 \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

このとき M は上流側に圧縮を生ぜしめるような曲げモーメントを正とする。これを計算して

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= + \frac{12M}{\pi t^3} \cos^2 \alpha \cdot M_x \\
 \sigma_y &= + \frac{12M}{\pi t^3} \cos^2 \alpha \cdot M_y \\
 \tau_{xy} &= - \frac{12M}{\pi t^3} \cos^2 \alpha \cdot M_{xy}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 M_x &= \left(\frac{x}{t} \sin \alpha + \frac{y}{t} \cos \alpha \right) \left(\tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
 & \quad + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \left. \right) - \left(\frac{x}{t} \cos \alpha + \frac{y}{t} \sin \alpha \right) \\
 & \quad \times \left\{ \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} \right. \\
 & \quad - \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \left. \right\} \\
 & \quad - \left(\frac{x}{t} \sin \alpha - \frac{y}{t} \cos \alpha \right) \left\{ \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} \right. \\
 & \quad + \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \left. \right\} \dots\dots\dots (8.a) \\
 M_y &= 2 \tan \alpha + \left(\frac{x}{t} \cos \alpha + \frac{y}{t} \sin \alpha \right) \\
 & \quad \times \left\{ \log \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \right. \\
 & \quad + \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} - \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \left. \right\} \\
 & \quad - \left(3 \frac{x}{t} \sin \alpha - \frac{y}{t} \cos \alpha \right) \left(\tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
 & \quad + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \left. \right) + \left(\frac{x}{t} \sin \alpha - \frac{y}{t} \cos \alpha \right) \\
 & \quad \times \left\{ \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2} \right. \\
 & \quad + \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2} \left. \right\} \dots\dots\dots (8.b) \\
 M_{xy} &= \frac{x}{t} \sin \alpha \log \frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}\right)^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{x}{t} \cos \alpha + \frac{y}{t} \sin \alpha \right) \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
& + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} - \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \\
& - \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \\
& + \left(\frac{x}{t} \sin \alpha - \frac{y}{t} \cos \alpha \right) \left\{ \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \right. \\
& - \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \dots \dots \dots (8.c)
\end{aligned}$$

とする。

[4] 剪断力による岩盤内の応力

abutment に作用する剪断力を V とし、上流側に作用するものを正とする。集中力が半無限板の境界上の一点に作用するとき、力の方向に首線をとれば半無限板内の応力は(1)式にて表わされる。

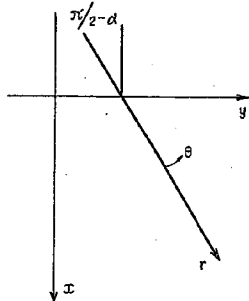


図-2

いま、集中外力が図-2に示す方向に作用するとき、応力は

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= -\frac{2}{\pi} p \frac{x^2 \{ (\eta - y) \cos \alpha - x \sin \alpha \}}{\{ x^2 + (\eta - y)^2 \}^2} \\
\sigma_y &= -\frac{2}{\pi} p \frac{(\eta - y)^2 \{ (\eta - y) \cos \alpha - x \sin \alpha \}}{\{ x^2 + (\eta - y)^2 \}^2} \\
\tau_{xy} &= +\frac{2}{\pi} p \frac{x(\eta - y) \{ (\eta - y) \cos \alpha - x \sin \alpha \}}{\{ x^2 + (\eta - y)^2 \}^2} \dots \dots \dots (9)
\end{aligned}$$

剪断力に対する式を求めるに、 $(V/t) \cos \alpha$ なる強度の分布荷重が $(t/2) \sec \alpha$ 、 $\sim -(t/2) \sec \alpha$ の範囲に分布しているときの式を求めればよい。すなわち

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= +\frac{2V}{\pi t} \cos \alpha \\
\sigma_y &= -\frac{2V}{\pi t} \cos \alpha \\
\tau_{xy} &= +\frac{2V}{\pi t} \sin \alpha
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \int_{-(t/2) \sec \alpha}^{(t/2) \sec \alpha} \frac{(\eta - y)^2 \{ (\eta - y) \cos \alpha - x \sin \alpha \}}{\{ x^2 + (\eta - y)^2 \}^2} d\eta \right\} \\
\tau_{xy} &= +\frac{2V}{\pi t} \cos \alpha \\
& \left\{ \int_{-(t/2) \sec \alpha}^{(t/2) \sec \alpha} \frac{x(\eta - y) \{ (\eta - y) \cos \alpha - x \sin \alpha \}}{\{ x^2 + (\eta - y)^2 \}^2} d\eta \right\} \dots \dots \dots (10)
\end{aligned}$$

これを計算して

$$\sigma_x = +\frac{V}{\pi t} \cos \alpha \cdot V_x$$

$$\sigma_y = +\frac{V}{\pi t} \cos \alpha \cdot V_y$$

$$\tau_{xy} = -\frac{V}{\pi t} \cos \alpha \cdot V_{xy}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
V_x &= \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
& + \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \\
& + \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \sin \alpha \\
& + \left\{ \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \right. \\
& - \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \cos \alpha \dots \dots \dots (11.a)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_y &= \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
& + \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \\
& + \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \sin \alpha \\
& - \left\{ \log \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \right. \\
& + \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \\
& - \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \cos \alpha \dots \dots \dots (11.b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{xy} = & \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} + \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t}}{\frac{x}{t}} \right. \\
 & - \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \\
 & - \frac{\frac{x}{t} \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \left. \right\} \cos \alpha \\
 & + \left\{ \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha - \frac{y}{t} \right)^2} \right. \\
 & - \left. \frac{\left(\frac{x}{t} \right)^2}{\left(\frac{x}{t} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sec \alpha + \frac{y}{t} \right)^2} \right\} \sin \alpha \dots\dots\dots (11.c)
 \end{aligned}$$

[5] 基礎岩盤内の応力分布

前節迄に基礎岩盤内が一様な等方性の弾性体から成ると仮定した場合に、推力、曲げモーメント、剪断力が作用する場合の応力分布が求められた。従ってこれ等の外力が同時に作用する場合には以上求めた応力を加算すればよい。すなわち、

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x = & (H \cdot H_x + V \cdot V_x) \\
 & \frac{\cos \alpha}{\pi t} + \frac{12M}{\pi t^2} M_x \cos^2 \alpha \\
 \sigma_y = & (H \cdot H_y + V \cdot V_y) \\
 & \frac{\cos \alpha}{\pi t} + \frac{12M}{\pi t^2} M_y \cos^2 \alpha \\
 \tau_{xy} = & -(H \cdot H_{xy} + V \cdot V_{xy}) \\
 & \frac{\cos \alpha}{\pi t} - \frac{12M}{\pi t^2} M_{xy} \cos^2 \alpha
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

にて求められる。

いま、基礎岩盤内に軟弱な層が存在し、この面での強度が問題になったとする。しかるとき、この面のノリ線と x 軸とのなす角を β とすると、この面に作用する直応力 σ_n 、接線方向直応力 σ_t 、剪断応力 τ_{nt} とすれば

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_n = & \sigma_x \cos^2 \beta + \sigma_y \sin^2 \beta + 2 \tau_{xy} \sin \beta \cos \beta \\
 \sigma_t = & \sigma_x \sin^2 \beta + \sigma_y \cos^2 \beta - 2 \tau_{xy} \sin \beta \cos \beta \\
 \tau_{nt} = & (\sigma_y - \sigma_x) \sin \beta \cos \beta + \tau_{xy} (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

にて求められる。

かくして、軟弱な面に作用する応力の分布が求められる。

しかし、ここで問題になる事は軟弱な面に沿っては一般に他の部分に比して、変形が大きいためこの面での応力は他の部分に分散し実際にはこの計算値より小さいものと思われる。

しかし、一般に傾いた弾性係数の低い層を仮定し、この面での応力を求める事は極めて複雑であるし、また、基礎岩盤が等方性の一様な弾性体からなると仮定した結

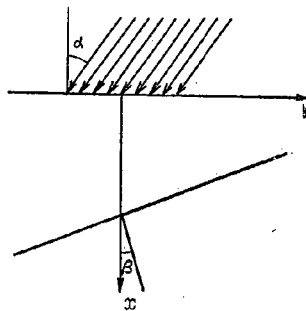


図-3

果は安全側の値を与えるので、このようにして求めた値で十分であると思われる。

また、岩盤表面での応力は

$$-\frac{1}{2} \sec \alpha < \frac{y}{t} < \frac{1}{2} \sec \alpha$$

のときは

$$\begin{aligned}
 H_x = & \pi \cos \alpha \\
 H_y = & \pi \cos \alpha + 2 \sin \alpha \log \frac{1/2 \sec \alpha - (y/t)}{1/2 \sec \alpha + (y/t)} \\
 H_{xy} = & \pi \sin \alpha \\
 M_x = & \pi \frac{y}{t} \cos \alpha \\
 M_y = & 2 \tan \alpha + 2 \frac{y}{t} \sin \alpha \log \frac{1/2 \sec \alpha - (y/t)}{1/2 \sec \alpha + (y/t)} \\
 M_{xy} = & \pi \frac{y}{t} \sin \alpha \\
 V_x = & \pi \sin \alpha \\
 V_y = & \pi \sin \alpha - 2 \cos \alpha \log \frac{1/2 \sec \alpha - (y/t)}{1/2 \sec \alpha + (y/t)} \\
 V_{xy} = & \pi \cos \alpha
 \end{aligned}$$

また、 $\frac{y}{t} < -\frac{1}{2} \sec \alpha$ または $\frac{y}{t} > \frac{1}{2} \sec \alpha$ のときは

$$\begin{aligned}
 H_x = H_y = M_x = M_y = V_x = V_y = 0 \\
 H_{xy} = 2 \sin \alpha \log \frac{1/2 \sec \alpha - (y/t)}{1/2 \sec \alpha + (y/t)} \\
 M_y = 2 \tan \alpha + 2 \frac{y}{t} \sin \alpha \log \frac{1/2 \sec \alpha - (y/t)}{1/2 \sec \alpha + (y/t)} \\
 v_y = -2 \cos \alpha \log \frac{1/2 \sec \alpha - (y/t)}{1/2 \sec \alpha + (y/t)}
 \end{aligned}$$

となる。

2. 数 表

前章、(5), (8), (10)式にて与えられる $H_x, H_y, H_{xy}; M_x, M_y, M_{xy}; v_x, v_y, v_{xy}$ の値を値を求めるのはかなり複雑な計算を要する。したがって実用の便のために、 $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ のときの $x/t = 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0$; $y/t = 1.0, 0.5, 0, -0.5, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5, -3.0, -3.5, -4.0, -4.5, -5.0$ に

表-1 (a) $\alpha=30^\circ$

$x/z \backslash y/l$		1.0	0.5	0.0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
H_x	0.00	0	2.7207	2.7207	2.7207	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.03652	1.4270	2.6444	2.2886	0.1982	0.03714	0.01268	0.006476	0.003358	0.001776	0.001275	0.001114	0.0006444
	0.50	0.06309	1.1788	2.3414	1.9782	0.5503	0.1458	0.05476	0.02582	0.01431	0.008554	0.005655	0.003973	0.002732
	1.00	0.3249	1.0119	1.6569	1.5433	0.8952	0.4093	0.1946	0.1021	0.05869	0.03620	0.02388	0.01650	0.01169
	1.50	0.4446	0.8700	1.2170	1.2076	0.8962	0.5571	0.3274	0.1954	0.1213	0.07876	0.05342	0.03756	0.02729
	2.00	0.4736	0.7446	0.9482	0.9677	0.8143	0.5972	0.4077	0.2727	0.1882	0.1260	0.08888	0.06425	0.04723
	2.50	0.4624	0.6428	0.7727	0.7985	0.7193	0.5829	0.4410	0.3225	0.2331	0.1691	0.1243	0.09278	0.07003
	3.00	0.4363	0.5619	0.6509	0.6755	0.6334	0.5469	0.4446	0.3480	0.2671	0.2035	0.1557	0.1198	0.09313
	3.50	0.4066	0.4972	0.5613	0.5833	0.5610	0.5050	0.4312	0.3555	0.2866	0.2277	0.1806	0.1434	0.1141
	4.00	0.3774	0.4451	0.4932	0.5124	0.5009	0.4640	0.4111	0.3523	0.2949	0.2432	0.1989	0.1622	0.1324
	4.50	0.3502	0.4024	0.4398	0.4563	0.4509	0.4263	0.3878	0.3426	0.2956	0.2512	0.2111	0.1764	0.1472
	5.00	0.3255	0.3669	0.3963	0.4110	0.4089	0.3926	0.3643	0.3293	0.2908	0.2537	0.2182	0.1863	0.1587
H_y	0.00	-1.3170	0.08678	2.7207	5.3546	1.3170	0.8110	0.5942	0.4704	0.3898	0.3335	0.2907	0.2592	0.2320
	0.25	-0.4900	-0.03011	1.3812	1.9766	1.6340	0.9976	0.7246	0.5424	0.4410	0.3707	0.3200	0.2814	0.2510
	0.50	-0.01714	0.2018	0.6271	1.1091	1.3453	1.0161	0.7534	0.5856	0.4766	0.4013	0.3450	0.3007	0.2670
	1.00	0.1820	0.1642	0.1569	0.3975	0.6966	0.7710	0.6891	0.5854	0.4961	0.4247	0.3691	0.3246	0.2887
	1.50	0.1493	0.09123	0.05570	0.1669	0.3660	0.5002	0.5321	0.5061	0.4597	0.4113	0.3674	0.3291	0.2965
	2.00	0.1029	0.05130	0.02516	0.08091	0.2017	0.3166	0.3832	0.4037	0.3946	0.3721	0.3448	0.3171	0.2908
	2.50	0.06888	0.03075	0.01324	0.04447	0.1189	0.2042	0.2710	0.3098	0.3239	0.3214	0.3099	0.2938	0.2755
	3.00	0.04702	0.01963	0.008079	0.02668	0.07433	0.1358	0.1929	0.2349	0.2597	0.2701	0.2705	0.2642	0.2542
	3.50	0.03318	0.01299	0.005009	0.01696	0.04916	0.09347	0.1391	0.1778	0.2063	0.2231	0.2314	0.2329	0.2297
	4.00	0.02413	0.009141	0.003383	0.01154	0.03402	0.06647	0.1023	0.1359	0.1633	0.1823	0.1958	0.2023	0.2029
	4.50	0.01792	0.006871	0.002559	0.008194	0.02435	0.04870	0.07672	0.1050	0.1299	0.1501	0.1647	0.1731	0.1796
	5.00	0.01350	0.005026	0.001646	0.002583	0.01783	0.03658	0.05868	0.08220	0.1041	0.1232	0.1382	0.1493	0.1571
H_{xy}	0.00	0	1.5708	1.5708	1.5708	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.1270	-0.1764	0.7975	1.3158	0.5335	0.1862	0.09360	0.05618	0.03778	0.02689	0.02028	0.01586	0.01266
	0.50	-0.04262	-0.3139	0.3621	1.0707	0.8094	0.3750	0.1999	0.1239	0.08165	0.05820	0.04361	0.03387	0.02695
	1.00	-0.2303	-0.1980	0.09058	0.6222	0.7376	0.5471	0.3610	0.2422	0.1695	0.1236	0.09366	0.07297	0.05825
	1.50	-0.2423	-0.2178	0.03215	0.3669	0.5398	0.5143	0.4115	0.3116	0.2347	0.1792	0.1396	0.1109	0.08974
	2.00	-0.2072	-0.1552	0.01452	0.2315	0.3829	0.4240	0.3897	0.3287	0.2673	0.2156	0.1744	0.1423	0.1172
	2.50	-0.1683	-0.1131	0.007645	0.1565	0.2767	0.3364	0.3409	0.3133	0.2731	0.2322	0.1956	0.1646	0.1388
	3.00	-0.1357	-0.08499	0.004664	0.1117	0.2057	0.2659	0.2887	0.2833	0.2617	0.2334	0.2045	0.1774	0.1535
	3.50	-0.1100	-0.06588	0.002892	0.08318	0.1575	0.2120	0.2415	0.2492	0.2416	0.2245	0.2037	0.1822	0.1618
	4.00	-0.09025	-0.05225	0.002016	0.06425	0.1237	0.1715	0.2024	0.2169	0.2180	0.2101	0.1967	0.1807	0.1639
	4.50	-0.07499	-0.04240	0.001478	0.05098	0.09939	0.1404	0.1702	0.1880	0.1948	0.1933	0.1858	0.1748	0.1623
	5.00	-0.06320	-0.03502	0.0009502	0.04141	0.08128	0.1168	0.1442	0.1630	0.1731	0.1760	0.1731	0.1664	0.1575

表-1 (b) $\alpha=30^\circ$

	x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
M_x	0.00	0	1.3603	0	-1.3603	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.004774	0.6694	0.1993	-0.8138	-0.06486	-0.04463	-0.02121	-0.01422	-0.008920	-0.005413	-0.004481	-0.004035	-0.002981	-0.002981
	0.50	0.03837	0.4325	0.1810	-0.4538	-0.1503	-0.03125	-0.009167	-0.003588	-0.002117	-0.0008123	-0.0004763	-0.0003165	-0.0001761	-0.0001761
	1.00	0.09461	0.2080	0.09059	-0.1494	-0.1577	-0.06687	-0.01137	-0.006577	-0.003127	-0.001857	-0.001152	-0.0006025	-0.0003165	-0.0001761
	1.50	0.08115	0.1081	0.04823	-0.05341	-0.08649	-0.06423	-0.03766	-0.02119	-0.01190	-0.006787	-0.004235	-0.002601	-0.001841	-0.001841
	2.00	0.05906	0.05641	0.02906	-0.02072	-0.04847	-0.04813	-0.03596	-0.02420	-0.01550	-0.009703	-0.006411	-0.004243	-0.002879	-0.002879
	2.50	0.04154	0.03867	0.01911	-0.007927	-0.02752	-0.03246	-0.02963	-0.02305	-0.01659	-0.01148	-0.008134	-0.005939	-0.003981	-0.003981
	3.00	0.02927	0.02601	0.01399	-0.002602	-0.01621	-0.02261	-0.02301	-0.01979	-0.01608	-0.01207	-0.009271	-0.007049	-0.005013	-0.005013
	3.50	0.02166	0.01802	0.01012	-0.0003190	-0.009725	-0.01542	-0.01730	-0.01647	-0.01430	-0.01165	-0.009437	-0.007425	-0.005627	-0.005627
	4.00	0.01662	0.01345	0.007812	0.0006788	-0.005866	-0.01058	-0.01294	-0.01325	-0.01229	-0.01069	-0.009012	-0.007318	-0.005903	-0.005903
	4.50	0.01280	0.01042	0.006213	0.001253	-0.003643	-0.007323	-0.009731	-0.01053	-0.01030	-0.009442	-0.008231	-0.007001	-0.005925	-0.005925
	5.00	0.009549	0.008344	0.004751	0.001538	-0.002502	-0.004993	-0.007323	-0.008300	-0.008564	-0.008123	-0.007312	-0.006583	-0.005911	-0.005911
M_y	0.00	-0.1623	1.1981	1.1547	-1.5226	-0.1623	-0.06179	-0.03378	-0.02121	-0.01459	-0.01261	-0.009531	-0.007908	-0.005939	-0.005939
	0.25	0.02804	0.1716	0.3743	0.02871	-0.1964	-0.08529	-0.04434	-0.02602	-0.01843	-0.01213	-0.009012	-0.007318	-0.005903	-0.005903
	0.50	0.007497	0.02861	0.1167	0.1592	-0.07352	-0.07079	-0.04491	-0.02929	-0.02059	-0.01426	-0.01220	-0.009128	-0.007473	-0.007473
	1.00	-0.002135	-0.02701	0.01692	0.09594	0.05415	-0.01250	-0.02423	-0.02230	-0.01803	-0.01322	-0.01162	-0.008798	-0.006145	-0.006145
	1.50	-0.004408	-0.02118	0.004290	0.04634	0.04340	0.01619	-0.002211	-0.01021	-0.01116	-0.01007	-0.008501	-0.007589	-0.006639	-0.006639
	2.00	-0.007985	-0.01309	0.001651	0.02513	0.02997	0.02135	0.009801	-0.0005092	-0.004157	-0.005234	-0.005721	-0.006101	-0.006341	-0.006341
	2.50	-0.008899	-0.008524	0.001122	0.01322	0.01945	0.01805	0.01174	0.005416	0.001108	-0.001801	-0.003328	-0.003917	-0.004032	-0.004032
	3.00	-0.006769	-0.005465	0.0007374	0.008031	0.01328	0.01396	0.01126	0.007567	0.003660	0.0009685	-0.0008545	0.001953	-0.002507	-0.002507
	3.50	-0.005184	-0.003804	0.0002254	0.005177	0.009154	0.01060	0.009461	0.007490	0.004984	0.002684	0.0009430	0.000093	-0.0007681	-0.0007681
	4.00	-0.003998	-0.002816	0.0001286	0.003410	0.006421	0.007957	0.007982	0.006906	0.005292	0.003689	0.002378	0.001189	0.0003918	0.0003918
	4.50	-0.003072	-0.002123	0.0000613	0.002482	0.004671	0.006053	0.006494	0.005980	0.005105	0.003832	0.002809	0.001923	0.001008	0.001008
	5.00	-0.002396	-0.001503	0.0000686	0.001807	0.003561	0.004711	0.005247	0.005160	0.004487	0.003823	0.002927	0.002055	0.001202	0.001202
M_{xy}	0.00	0	0.7854	0	-0.7854	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.004503	-0.08893	0.3453	-0.4153	-0.1250	-0.02989	-0.01105	-0.004831	-0.003087	-0.001428	-0.001158	-0.0008291	-0.0005389	-0.0005389
	0.50	-0.05119	-0.05604	0.3136	0.01919	-0.1368	-0.05451	-0.02423	-0.01199	-0.006655	-0.003938	-0.002811	-0.002035	-0.001221	-0.001221
	1.00	-0.04829	0.01518	0.1569	0.08637	-0.04102	-0.04973	-0.03283	-0.01995	-0.01239	-0.007856	-0.005531	-0.003769	-0.002478	-0.002478
	1.50	-0.01842	0.02790	0.08354	0.06689	0.009180	-0.02117	-0.02468	-0.01975	-0.01437	-0.01028	-0.007383	-0.005377	-0.004092	-0.004092
	2.00	-0.001539	0.02497	0.05032	0.04603	0.02058	-0.002568	-0.01295	-0.01450	-0.01275	-0.01020	-0.008065	-0.006267	-0.005038	-0.005038
	2.50	0.003875	0.02034	0.03310	0.03291	0.02041	0.005907	-0.004246	-0.008398	-0.009529	-0.008766	-0.007598	-0.006328	-0.005043	-0.005043
	3.00	0.005396	0.01641	0.02423	0.02419	0.01724	0.008688	-0.001313	-0.003517	-0.005840	-0.008657	-0.006503	-0.005781	-0.005030	-0.005030
	3.50	0.006130	0.01253	0.01753	0.01778	0.01453	0.009123	0.003735	-0.0005085	-0.003092	-0.004638	-0.004738	-0.004811	-0.004828	-0.004828
	4.00	0.006304	0.01042	0.01353	0.01403	0.01232	0.008834	0.004706	0.001499	-0.001604	-0.002781	-0.003477	-0.003685	-0.003820	-0.003820
	4.50	0.005674	0.008819	0.01076	0.01138	0.01016	0.008197	0.005240	0.002611	0.0002697	-0.001428	-0.002138	-0.002548	-0.002847	-0.002847
	5.00	0.005182	0.007272	0.008733	0.009222	0.008587	0.007101	0.004999	0.003136	0.001353	-0.0003891	-0.001126	-0.001650	-0.002097	-0.002097

α の基礎変位に関する一力学の考察

表-1 (c) $\alpha=30^\circ$

x/t	y/d	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
V_u	0.00	0	1.5708	1.5708	1.5708	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.2499	1.8187	1.5267	0.5764	-0.1566	-0.04104	-0.01923	-0.007889	-0.004616	-0.003039	-0.001958	-0.001314	-0.0009905
	0.50	0.6045	1.6037	1.3518	0.2191	-0.2476	-0.1147	-0.05357	-0.02854	-0.01679	-0.01074	-0.007247	-0.005176	-0.003790
	1.00	0.8363	1.1976	0.9566	0.2776	-0.1317	-0.1702	-0.1184	-0.07664	-0.05052	-0.03460	-0.02443	-0.01782	-0.01345
	1.50	0.7781	0.8922	0.7026	0.3073	-0.003997	-0.1204	-0.1267	-0.1024	-0.07730	-0.05761	-0.04323	-0.03293	-0.02548
	2.00	0.6669	0.6879	0.5475	0.3007	0.07669	-0.05181	-0.09739	-0.09980	-0.08724	-0.07159	-0.05750	-0.04605	-0.03722
	2.50	0.5636	0.5509	0.4461	0.2812	0.1185	0.003336	-0.05789	-0.08027	-0.08200	-0.07479	-0.06468	-0.05465	-0.04599
	3.00	0.4795	0.4556	0.3758	0.2589	0.1381	0.04129	-0.02168	-0.05499	-0.06796	-0.06936	-0.06484	-0.05818	-0.05100
	3.50	0.4131	0.3864	0.3241	0.2374	0.1456	0.06578	0.006876	-0.03051	-0.05044	-0.05895	-0.05996	-0.05709	-0.05277
	4.00	0.3605	0.3347	0.2847	0.2181	0.1465	0.08094	0.02826	-0.009197	-0.03299	-0.04612	-0.05182	-0.05276	-0.05093
	4.50	0.3184	0.2946	0.2539	0.2013	0.1441	0.08988	0.04360	0.008087	-0.01703	-0.03298	-0.04212	-0.04622	-0.04706
	5.00	0.2842	0.2627	0.2289	0.1864	0.1397	0.09470	0.05440	0.02168	-0.003524	-0.02062	-0.03206	-0.03871	-0.04172
V_v	0.00	2.2810	6.1329	1.5708	-2.9913	-2.2810	-1.4047	-1.0293	-0.8147	-0.6751	-0.5777	-0.5035	-0.4490	-0.4018
	0.25	2.1697	2.2842	0.7974	-1.1447	-1.5092	-1.1706	-0.9176	-0.7497	-0.6323	-0.5467	-0.4812	-0.4296	-0.3881
	0.50	1.5633	1.1642	0.3621	-0.4073	-0.7965	-0.8564	-0.7605	-0.6570	-0.5741	-0.5064	-0.4519	-0.4074	-0.3708
	1.00	0.7093	0.3641	0.09059	-0.03981	-0.2020	-0.3663	-0.4420	-0.4521	-0.4345	-0.4078	-0.3793	-0.3524	-0.3278
	1.50	0.3364	0.1401	0.03211	0.008990	-0.03894	-0.1351	-0.2231	-0.2760	-0.2996	-0.3049	-0.3001	-0.2903	-0.2782
	2.00	0.1732	0.06410	0.01453	0.01223	0.001887	-0.04283	-0.1031	-0.1559	-0.1932	-0.2152	-0.2260	-0.2294	-0.2271
	2.50	0.09747	0.03359	0.007646	0.009844	0.01092	-0.007655	-0.04320	-0.08288	-0.1184	-0.1454	-0.1637	-0.1751	-0.1814
	3.00	0.05867	0.01946	0.004664	0.007248	0.01138	0.004950	-0.01434	-0.04126	-0.06956	-0.09477	-0.1149	-0.1300	-0.1405
	3.50	0.03761	0.01209	0.002891	0.005209	0.009928	0.008847	-0.001089	-0.01833	-0.03886	-0.05994	-0.07863	-0.09425	-0.1064
	4.00	0.02530	0.008076	0.002016	0.003928	0.008162	0.009553	0.004799	-0.005723	-0.02029	-0.03641	-0.05246	-0.06698	-0.07764
	4.50	0.01777	0.005613	0.001478	0.002976	0.006646	0.008864	0.007008	0.0009183	-0.008989	-0.02102	-0.03403	-0.04475	-0.05831
	5.00	0.01280	0.004073	0.0009502	0.008304	0.005290	0.007871	0.007616	0.003727	0.002261	-0.01101	-0.02127	-0.03189	-0.04203
V_{xy}	0.00	0	2.7207	2.7207	2.7207	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.6894	1.4176	1.3812	0.5560	0.4547	0.2143	0.1208	0.07716	0.05408	0.03954	0.03047	0.02421	0.01958
	0.50	0.9101	1.0552	0.6271	0.2558	0.4181	0.3051	0.1989	0.1359	0.09804	0.07531	0.05843	0.04591	0.03739
	1.00	0.7245	0.5464	0.1569	-0.01525	0.1543	0.2436	0.2256	0.1846	0.1474	0.1180	0.09604	0.07903	0.06590
	1.50	0.4834	0.2979	0.05570	-0.03976	0.03185	0.1252	0.1688	0.1668	0.1513	0.1318	0.1135	0.09747	0.08402
	2.00	0.3224	0.1779	0.02516	-0.04573	0.01824	0.04717	0.09869	0.1239	0.1237	0.1234	0.1137	0.1025	0.09133
	2.50	0.2223	0.1154	0.01324	-0.04022	-0.03460	0.005563	0.04921	0.08106	0.09789	0.1035	0.1025	0.09766	0.09069
	3.00	0.1592	0.07993	0.008078	-0.03363	0.03788	-0.01481	0.01795	0.04753	0.06850	0.08063	0.08616	0.08673	0.08356
	3.50	0.1184	0.05801	0.005009	-0.02805	-0.03605	-0.02382	-0.0009674	0.02334	0.04437	0.05893	0.06842	0.07329	0.07481
	4.00	0.09084	0.04397	0.003383	-0.02309	-0.03269	-0.02700	-0.01173	0.007407	0.02572	0.04083	0.05197	0.05931	0.06349
	4.50	0.07148	0.03439	0.002559	-0.01952	-0.02920	-0.02730	-0.01749	-0.002974	0.01227	0.02640	0.03777	0.04629	0.05230
	5.00	0.05738	0.02760	0.001646	-0.01653	-0.02604	-0.02629	-0.02021	-0.009453	0.002902	0.01530	0.02603	0.03485	0.04186

表-2 (a) $\alpha=40^\circ$

	x/l	y/l	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
H_x	0.00	0	2.4066	2.4066	2.4066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.09195	1.5200	2.7750	2.3985	0.3181	0.05403	0.01851	0.008553	0.004694	0.002747	0.001913	0.001970	0.0009084	0.0009084
	0.50	-0.01311	1.1243	2.1448	2.0967	0.7463	0.2003	0.07490	0.03543	0.01359	0.008367	0.007787	0.005264	0.003957	0.003957
	1.00	0.2310	0.9134	1.5872	1.6176	1.0337	0.5067	0.2475	0.1317	0.07675	0.04790	0.03172	0.02202	0.01584	0.01584
	1.50	0.3574	0.7950	1.1898	1.2594	0.9972	0.6518	0.3956	0.2413	0.1522	0.1001	0.06853	0.04864	0.03565	0.03565
	2.00	0.4023	0.6919	0.9351	1.0050	0.8864	0.6769	0.4767	0.3261	0.2235	0.1557	0.1111	0.08105	0.06061	0.06061
	2.50	0.4064	0.6054	0.7658	0.8260	0.7730	0.6476	0.5039	0.3765	0.2774	0.2043	0.1519	0.1146	0.08768	0.08768
	3.00	0.3926	0.5343	0.6464	0.6963	0.6749	0.5994	0.4993	0.3990	0.3117	0.2413	0.1868	0.1454	0.1140	0.1140
	3.50	0.3717	0.4764	0.5537	0.5998	0.5936	0.5479	0.4788	0.4022	0.3294	0.2658	0.2135	0.1713	0.1378	0.1378
	4.00	0.3492	0.4289	0.4913	0.5256	0.5271	0.4995	0.4516	0.3941	0.3351	0.2802	0.2321	0.1915	0.1578	0.1578
	4.50	0.3271	0.3893	0.4382	0.4670	0.4723	0.4558	0.4254	0.3796	0.3325	0.2864	0.2436	0.2058	0.1734	0.1734
	5.00	0.3065	0.3562	0.3954	0.4199	0.4265	0.4173	0.3945	0.3621	0.3249	0.2865	0.2495	0.2154	0.1850	0.1850
H_y	0.00	-2.0055	-0.1920	2.4066	5.0052	2.0055	1.1987	0.8710	0.6872	0.5685	0.4852	0.4233	0.3756	0.3376	0.3376
	0.25	-0.9337	-0.3910	0.8656	2.3117	2.1596	1.3621	0.9736	0.7559	0.6175	0.5217	0.4518	0.3989	0.3561	0.3561
	0.50	-0.3007	-0.01793	0.6656	1.2643	1.6203	1.3074	0.9947	0.7863	0.6798	0.5687	0.4720	0.4153	0.3707	0.3707
	1.00	-0.05670	0.1021	0.1847	0.4549	0.8004	0.9202	0.8526	0.7414	0.6388	0.5541	0.4860	0.4309	0.3864	0.3864
	1.50	0.1035	0.07273	0.06833	0.1921	0.4190	0.5761	0.6323	0.6163	0.5705	0.5182	0.4683	0.4238	0.3851	0.3851
	2.00	0.07682	0.04525	0.03138	0.09339	0.2237	0.3573	0.4437	0.4779	0.4764	0.4562	0.4282	0.3981	0.3690	0.3690
	2.50	0.05622	0.02867	0.01682	0.05108	0.1311	0.2276	0.2995	0.3594	0.3828	0.3859	0.3768	0.3612	0.3426	0.3426
	3.00	0.04060	0.01883	0.009920	0.03046	0.08189	0.1501	0.2165	0.2683	0.3017	0.3186	0.3231	0.3194	0.3107	0.3107
	3.50	0.02951	0.01289	0.006454	0.01947	0.05382	0.1025	0.1547	0.2009	0.2362	0.2595	0.2727	0.2774	0.2761	0.2761
	4.00	0.02192	0.009204	0.004275	0.01319	0.03705	0.07249	0.1129	0.1522	0.1853	0.2105	0.2279	0.2381	0.2426	0.2426
	4.50	0.01654	0.006719	0.002983	0.009260	0.02638	0.05267	0.08684	0.1166	0.1387	0.1708	0.1896	0.2028	0.2110	0.2110
	5.00	0.01273	0.005072	0.002118	0.006767	0.01940	0.03921	0.06407	0.09056	0.1161	0.1390	0.1578	0.1724	0.1829	0.1829
H_{xy}	0.00	0	2.0194	2.0194	2.0194	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.2700	0.2823	0.8543	1.3293	0.7586	0.2621	0.1316	0.07938	0.05323	0.03812	0.02880	0.02302	0.01801	0.01801
	0.50	0.1011	-0.05647	0.5583	1.1023	1.0061	0.4944	0.2678	0.1650	0.08395	0.06016	0.04678	0.03762	0.03762	0.03762
	1.00	-0.1187	-0.1859	0.1550	0.6533	0.8379	0.6597	0.4509	0.3089	0.2196	0.1620	0.1237	0.09716	0.07814	0.07814
	1.50	-0.1700	-0.1656	0.05734	0.3879	0.5924	0.5924	0.4910	0.3811	0.2923	0.2265	0.1784	0.1431	0.1168	0.1168
	2.00	-0.1623	-0.1284	0.02633	0.2447	0.4145	0.4758	0.4515	0.3902	0.3237	0.2650	0.2171	0.1790	0.1491	0.1491
	2.50	-0.1399	-0.09800	0.01411	0.1649	0.2971	0.3717	0.3871	0.3636	0.3232	0.2792	0.2382	0.2027	0.1728	0.1728
	3.00	-0.1168	-0.07587	0.008324	0.1172	0.2196	0.2906	0.3229	0.3234	0.3042	0.2756	0.2446	0.2147	0.1879	0.1879
	3.50	-0.09723	-0.05932	0.005415	0.08707	0.1671	0.2297	0.2673	0.2810	0.2768	0.2611	0.2402	0.2172	0.1945	0.1945
	4.00	-0.08123	-0.04823	0.003587	0.06702	0.1307	0.1844	0.2219	0.2420	0.2472	0.2415	0.2289	0.2128	0.1951	0.1951
	4.50	-0.06849	-0.03958	0.002503	0.05298	0.1045	0.1502	0.1876	0.2079	0.2186	0.2199	0.2139	0.2036	0.1907	0.1907
	5.00	-0.05830	-0.03298	0.001777	0.04291	0.08525	0.1241	0.1562	0.1790	0.1927	0.1984	0.1975	0.1920	0.1834	0.1834

表-2 (b) $\alpha=40^\circ$

$x/t \backslash y/t$		1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
M_x	0.00	0	1.2033	0	-1.2033	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.02446	0.8306	0.5592	-0.8669	-0.1284	-0.01552	-0.004129	-0.001537	-0.0007730	-0.0003855	-0.0001825	-0.00008513	-0.00004057
	0.50	-0.03745	0.5339	0.2792	-0.4972	-0.2432	-0.05324	-0.01587	-0.006087	-0.003625	-0.002082	-0.001068	-0.0002973	-0.0009769
	1.00	0.1122	0.2708	0.1550	-0.1555	-0.1958	-0.1003	-0.04413	-0.02046	-0.01068	-0.005675	-0.003223	-0.001921	-0.001070
	1.50	0.1024	0.1491	0.08601	-0.04797	-0.1085	-0.08901	-0.05482	-0.03152	-0.01810	-0.01076	-0.005489	-0.004285	-0.003154
	2.00	0.07770	0.08913	0.05266	-0.01303	-0.05728	-0.06363	-0.05043	-0.03497	-0.02314	-0.01511	-0.01008	-0.006598	-0.004825
	2.50	0.05671	0.05769	0.03529	-0.0006965	-0.03033	-0.04210	-0.04008	-0.03225	-0.02405	-0.01727	-0.01236	-0.008338	-0.006306
	3.00	0.04214	0.03954	0.02497	0.003513	-0.01609	-0.02740	-0.03004	-0.02731	-0.02254	-0.01760	-0.01346	-0.01019	-0.008291
	3.50	0.03145	0.02847	0.01895	0.004878	-0.008567	-0.01786	-0.02193	-0.02192	-0.01964	-0.01642	-0.01342	-0.01066	-0.008198
	4.00	0.02431	0.02153	0.01435	0.005266	-0.004243	-0.01151	-0.01583	-0.01729	-0.01648	-0.01480	-0.01262	-0.01060	-0.008590
	4.50	0.01891	0.01657	0.01126	0.004924	-0.002024	-0.007667	-0.01130	-0.01326	-0.01366	-0.01285	-0.01156	-0.009970	-0.008418
	5.00	0.01502	0.01321	0.008887	0.0004618	-0.0006620	-0.0005278	-0.008083	-0.01015	-0.01101	-0.01086	-0.01018	-0.009185	-0.008061
M_y	0.00	-0.3273	1.5822	1.6782	-0.8244	-0.3273	-0.1199	-0.06370	-0.03927	-0.02725	-0.01986	-0.01515	-0.01192	-0.009629
	0.25	-0.02839	0.2662	0.5199	0.1111	-0.3014	-0.1419	-0.07603	-0.04672	-0.03158	-0.02227	-0.01725	-0.01635	-0.01057
	0.50	0.09772	0.08862	0.2199	0.2295	-0.07717	-0.1062	-0.07093	-0.04688	-0.03494	-0.02512	-0.01833	-0.01375	-0.01214
	1.00	0.04202	-0.01029	0.03633	0.1317	0.07111	-0.008730	-0.03185	-0.03163	-0.02710	-0.02130	-0.01688	-0.01269	-0.01088
	1.50	0.004075	-0.01839	0.008663	0.06261	0.06467	0.02828	0.001652	-0.01169	-0.01484	-0.01468	-0.01308	-0.01161	-0.01053
	2.00	-0.005797	-0.01309	0.003557	0.03233	0.04377	0.03289	0.01620	0.002727	-0.004528	-0.007206	-0.008529	-0.008029	-0.008242
	2.50	-0.007291	-0.009459	0.001235	0.01743	0.02865	0.02687	0.01332	0.007293	0.002922	-0.001124	-0.003195	-0.004900	-0.005196
	3.00	-0.006878	-0.006242	0.001077	0.01072	0.01825	0.02039	0.01735	0.01192	0.006341	0.002892	-0.0002737	-0.002212	-0.006204
	3.50	-0.005225	-0.004380	-0.0003824	0.006901	0.01286	0.01589	0.01532	0.01229	0.008743	0.007131	0.001913	0.0001803	0.0001568
	4.00	-0.004509	-0.003700	0.0004845	0.004090	0.008627	0.01100	0.01229	0.009852	0.008667	0.006759	0.003562	0.0005910	0.0005677
	4.50	-0.002936	-0.002331	0.0009511	0.003208	0.008904	0.008904	0.009453	0.009175	0.008357	0.007356	0.006272	0.004861	0.003498
	5.00	-0.002144	-0.002039	0.001457	0.002137	0.005454	0.008312	0.009683	0.009176	0.007308	0.005838	0.004709	0.004136	0.003826
M_{xy}	0.00	0	1.0097	0	-1.0097	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.03656	0.04341	0.5828	-0.08673	-0.2187	-0.05262	-0.01980	-0.009486	-0.005326	-0.002996	-0.001872	-0.001293	-0.001020
	0.50	-0.04923	-0.03720	0.3328	0.08100	-0.1960	-0.08788	-0.03835	-0.01928	-0.01250	-0.007730	-0.004613	-0.002898	-0.002730
	1.00	-0.06198	-0.009113	0.1847	0.1283	-0.03747	-0.06937	-0.04924	-0.03089	-0.01989	-0.01282	-0.008674	-0.006344	-0.004309
	1.50	-0.02909	0.02629	0.1025	0.09426	0.02176	-0.02446	-0.03349	-0.02833	-0.02114	-0.01532	-0.01107	-0.008184	-0.006047
	2.00	-0.008666	0.02629	0.06276	0.06441	0.03296	0.0008264	-0.01566	-0.01973	-0.01824	-0.01510	-0.01197	-0.009420	-0.007546
	2.50	0.0006809	0.02268	0.04205	0.04525	0.03076	0.01141	-0.002753	-0.01056	-0.01275	-0.01235	-0.01086	-0.009238	-0.007659
	3.00	0.004985	0.01854	0.02376	0.03277	0.02607	0.01447	0.003644	-0.003691	-0.007541	-0.008963	-0.008952	-0.008259	-0.007608
	3.50	0.006053	0.01514	0.02259	0.02461	0.02123	0.01427	0.006746	0.0006669	-0.003416	-0.005724	-0.006131	-0.006646	-0.006245
	4.00	0.006451	0.01270	0.01710	0.01924	0.01748	0.01330	0.007970	0.003680	-0.0004642	-0.002970	-0.004307	-0.004936	-0.005100
	4.50	0.005919	0.01055	0.01342	0.01518	0.01420	0.01168	0.007822	0.004668	0.001694	-0.0008525	-0.002627	-0.003612	-0.004030
	5.00	0.005356	0.008873	0.01059	0.01238	0.01174	0.009827	0.008081	0.005229	0.002573	0.0005722	-0.001051	-0.002108	-0.002792

表-2 (c) $\alpha=40^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
V_z	0.00	0	2.0194	2.0194	2.0194	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.3392	2.1675	2.0497	1.1205	-0.1495	-0.04184	-0.01642	-0.008144	-0.004617	-0.002968	-0.001878	-0.0007705	-0.0009921
	0.50	0.7601	1.9308	1.7997	0.7720	-0.1449	-0.1023	-0.05039	-0.02735	-0.02382	-0.01458	-0.007054	-0.005088	-0.003588
	1.00	1.0089	1.4815	1.3318	0.6423	-0.05230	-0.1030	-0.09356	-0.06596	-0.04518	-0.03160	-0.02270	-0.01675	-0.01269
	1.50	0.9495	1.1387	0.9983	0.5852	0.1871	-0.01614	-0.07418	-0.07519	-0.06233	-0.04882	-0.03782	-0.02939	-0.02304
	2.00	0.8291	0.8985	0.7847	0.5254	0.2523	0.06596	-0.02481	-0.05618	-0.06043	-0.05482	-0.04664	-0.03879	-0.03194
	2.50	0.7133	0.7320	0.6426	0.4911	0.2763	0.1221	0.02527	-0.02446	-0.04462	-0.04956	-0.04749	-0.04267	-0.03728
	3.00	0.6160	0.6129	0.5424	0.4198	0.2796	0.1557	0.06530	0.008650	-0.02227	-0.03667	-0.04140	-0.04111	-0.03823
	3.50	0.5372	0.5250	0.4688	0.3780	0.2728	0.1738	0.09393	0.03720	0.0008512	-0.02031	-0.03089	-0.03526	-0.03598
	4.00	0.4736	0.4581	0.4123	0.3428	0.2617	0.1820	0.1132	0.06005	0.02195	-0.003025	-0.01822	-0.02655	-0.03053
	4.50	0.4219	0.4056	0.3677	0.3130	0.2489	0.1841	0.1277	0.07702	0.03976	0.01311	-0.005087	-0.01665	-0.02339
	5.00	0.3795	0.3636	0.3318	0.2877	0.2359	0.1825	0.1326	0.08928	0.05409	0.02718	-0.007520	-0.006116	-0.01514
V_y	0.00	2.3900	5.1163	2.0194	-1.0775	-2.3900	-1.4286	-1.0380	-0.8190	-0.6775	-0.5782	-0.5045	-0.4476	-0.4023
	0.25	2.3575	2.4163	1.3083	-0.8047	-1.3289	-1.1128	-0.8872	-0.7305	-0.6192	-0.5730	-0.4736	-0.4232	-0.3833
	0.50	1.6983	1.2870	0.5583	-0.2411	-0.5910	-0.7455	-0.6980	-0.6189	-0.5731	-0.5053	-0.4362	-0.3952	-0.3606
	1.00	0.8028	0.4439	0.1550	0.02344	-0.08356	-0.2501	-0.3526	-0.3866	-0.3855	-0.3703	-0.3499	-0.3284	-0.3083
	1.50	0.3992	0.1823	0.05734	0.03998	0.02321	-0.05243	-0.14214	-0.2064	-0.2424	-0.2581	-0.2618	-0.2585	-0.2515
	2.00	0.2136	0.08685	0.02633	0.02948	0.03856	0.01388	-0.03935	-0.09361	-0.1366	-0.1658	-0.1834	-0.1928	-0.1965
	2.50	0.1232	0.04681	0.01411	0.02011	0.03396	0.03010	0.01526	-0.03171	-0.06780	-0.09814	-0.1210	-0.1370	-0.1474
	3.00	0.07599	0.02761	0.008324	0.01375	0.02679	0.03123	0.02114	-0.0002248	-0.02640	-0.05220	-0.07455	-0.09252	-0.1061
	3.50	0.04945	0.01750	0.005415	0.009653	0.02047	0.02757	0.02548	0.01421	-0.003105	-0.02288	-0.04207	-0.05909	-0.07358
	4.00	0.03375	0.01177	0.003587	0.007020	0.01572	0.02320	0.02495	0.01995	0.009308	-0.004749	-0.01993	-0.03474	-0.04834
	4.50	0.02387	0.008217	0.002503	0.005188	0.01214	0.01908	0.02387	0.02136	0.02412	0.005915	-0.005648	-0.01784	-0.02968
	5.00	0.01745	0.005975	0.001777	0.003956	0.009801	0.01557	0.01988	0.02063	0.01768	0.01167	0.003390	-0.006099	-0.01601
V_{xy}	0.00	0	2.4066	2.4066	2.4066	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.8179	1.3996	1.2656	0.5211	0.4079	0.2085	0.1188	0.07635	0.05324	0.03915	0.03017	0.02454	0.01937
	0.50	1.0395	1.1093	0.6656	0.1370	0.2801	0.2670	0.1843	0.1286	0.09939	0.07430	0.05550	0.04443	0.03660
	1.00	0.8299	0.6306	0.1847	-0.07361	0.02723	0.1568	0.1784	0.1578	0.1311	0.1075	0.08861	0.07380	0.06215
	1.50	0.5812	0.3646	0.06833	-0.09978	-0.05860	0.03502	0.1011	0.1233	0.1219	0.1116	0.09896	0.08684	0.07606
	2.00	0.3923	0.2259	0.03138	-0.08724	-0.09173	-0.03118	0.03180	0.07192	0.09023	0.09473	0.09208	0.08607	0.07903
	2.50	0.2770	0.1502	0.01682	-0.07043	-0.08964	-0.05906	-0.01248	0.02768	0.05466	0.06930	0.07535	0.07616	0.07387
	3.00	0.2024	0.1057	0.009920	-0.05637	-0.07940	-0.06751	-0.03672	-0.003284	0.02429	0.04350	0.05534	0.06151	0.06399
	3.50	0.1526	0.07785	0.006454	-0.04549	-0.06925	-0.06309	-0.04825	-0.02296	-0.001412	0.02118	0.03591	0.04552	0.05115
	4.00	0.1184	0.05955	0.004275	-0.03716	-0.05944	-0.06282	-0.05230	-0.03415	-0.01433	0.003941	0.01903	0.03045	0.03832
	4.50	0.09404	0.04682	0.002983	-0.03084	-0.05112	-0.05738	-0.04966	-0.04000	-0.02456	-0.008709	0.005329	0.01698	0.02609
	5.00	0.07629	0.03776	0.002118	-0.02592	-0.04416	-0.05190	-0.05028	-0.04226	-0.03073	-0.01769	-0.005089	0.006156	0.01552

表-3 (a) $\alpha=45^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
H_x	0.00	0	2.2214	2.2214	2.2214	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.1349	1.5530	2.6776	2.3355	0.4730	0.06497	0.02239	0.01007	0.007623	0.002869	0.002291	0.001444	0.0009898
	0.50	0	1.1036	2.0176	2.1107	0.8874	0.2402	0.08893	0.04173	0.02291	0.01366	0.009574	0.0062647	0.004457
	1.00	0.1815	0.8630	1.6079	1.6440	1.1226	0.5716	0.2827	0.1514	0.08822	0.05537	0.03677	0.02359	0.01859
	1.50	0.3973	0.7525	1.1679	1.2681	1.0881	0.7104	0.4394	0.3008	0.1721	0.1138	0.08508	0.05577	0.04103
	2.00	0.3614	0.6525	0.9157	1.0152	0.9209	0.7207	0.5169	0.3581	0.2476	0.1738	0.1246	0.09130	0.06851
	2.50	0.3810	0.5826	0.7604	0.8403	0.7972	0.6864	0.5423	0.4101	0.3050	0.2263	0.1693	0.1281	0.09866
	3.00	0.3607	0.5175	0.6432	0.7079	0.6990	0.6308	0.5338	0.4305	0.3324	0.2648	0.2061	0.1612	0.1270
	3.50	0.3507	0.4607	0.5565	0.6074	0.6127	0.5736	0.5073	0.4308	0.3559	0.2897	0.2348	0.1984	0.1526
	4.00	0.3322	0.4188	0.4899	0.5331	0.5424	0.5206	0.4761	0.4193	0.3596	0.3031	0.2526	0.2095	0.1735
	4.50	0.3132	0.3813	0.4374	0.4732	0.4852	0.4794	0.4439	0.4022	0.3552	0.3079	0.2636	0.2239	0.1897
	5.00	0.2948	0.3495	0.3948	0.4249	0.4376	0.4325	0.4126	0.3922	0.3455	0.3068	0.2686	0.2333	0.2014
H_y	0.00	-2.4929	-0.2715	2.2214	4.7143	2.4929	1.4478	1.0451	0.8224	0.6794	0.5794	0.5053	0.4482	0.4027
	0.25	-1.1930	-0.5235	0.8543	2.4642	2.4413	1.5924	1.1427	0.8862	0.7392	0.6157	0.5314	0.4704	0.4209
	0.50	-0.6988	-0.1428	0.6843	1.3572	1.7677	1.4867	1.1450	0.9133	0.7504	0.6366	0.5519	0.4860	0.4344
	1.00	-0.01941	-0.06244	0.2038	0.4939	0.8529	1.0069	0.9519	0.8373	0.7267	0.6339	0.5630	0.4969	0.4471
	1.50	0.01584	0.05981	0.07700	0.2236	0.4017	0.6191	0.6915	0.6827	0.6381	0.5836	0.5301	0.4821	0.4383
	2.00	0.05869	0.04025	0.03579	0.1018	0.2359	0.3814	0.4769	0.5212	0.5260	0.5076	0.4793	0.4478	0.4168
	2.50	0.04025	0.02668	0.01962	0.05584	-0.1461	0.2418	0.3307	0.3893	0.4184	0.4252	0.4178	0.4025	0.3837
	3.00	0.04232	0.01821	0.01167	0.03329	0.08690	0.1589	0.2320	0.2886	0.3200	0.3482	0.3552	0.3530	0.3447
	3.50	0.02700	0.01260	0.007491	0.02157	0.05691	0.1082	0.1615	0.2149	0.2547	0.2820	0.2978	0.3066	0.3049
	4.00	0.02042	0.009147	0.005021	0.01432	0.03901	0.07615	0.1193	0.1618	0.1985	0.2273	0.2474	0.2600	0.2661
	4.50	0.01574	0.006736	0.003631	0.01008	0.02796	0.04961	0.08900	0.1237	0.1560	0.1835	0.2049	0.2203	0.2326
	5.00	0.01222	0.004980	0.002618	0.007202	0.02049	0.04115	0.06731	0.09582	0.1136	0.1488	0.1697	0.1864	0.1987
H_{xy}	0.00	0	2.2214	2.2214	2.2214	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.3614	0.5827	1.2043	1.3579	0.8867	0.3124	0.1565	0.09146	0.06688	0.04471	0.03446	0.02652	0.02124
	0.50	-0.05377	0.1037	0.6843	1.1107	1.1227	0.5736	0.3121	0.1922	0.1300	0.09401	0.07093	0.05494	0.04401
	1.00	-0.05379	-0.1120	0.2038	0.6684	0.8873	0.7285	0.5075	0.3510	0.2508	0.1477	0.1425	0.1123	0.09065
	1.50	-0.1692	-0.1229	0.07700	0.4133	0.5868	0.6372	0.5393	0.4240	0.3283	0.2559	0.2024	0.1632	0.1337
	2.00	-0.1357	-0.1103	0.03579	0.2524	0.4303	0.5059	0.4861	0.4276	0.3583	0.2956	0.2435	0.2017	0.1687
	2.50	-0.1157	-0.08751	0.01962	0.1702	0.3020	0.3923	0.4145	0.3941	0.3539	0.3081	0.2645	0.2262	0.1939
	3.00	-0.09919	-0.06940	0.01167	0.1209	0.2277	0.3052	0.3444	0.3477	0.3230	0.3016	0.2691	0.2376	0.2086
	3.50	-0.08897	-0.05579	0.007491	0.09011	0.1730	0.2402	0.2826	0.3002	0.2983	0.2839	0.2626	0.2400	0.2150
	4.00	-0.07540	-0.04538	0.005021	0.06888	0.1349	0.1921	0.2335	0.2570	0.2647	0.2607	0.2487	0.2324	0.2141
	4.50	-0.06412	-0.03757	0.003631	0.05437	0.1078	0.1505	0.1948	0.2200	0.2332	0.2361	0.2312	0.2212	0.2084
	5.00	-0.05504	-0.03164	0.002618	0.04382	0.08776	0.1288	0.1633	0.1888	0.2047	0.2122	0.2124	0.2077	0.1994

表-3 (b) $\alpha=45^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
M_x	0.00	0	1.1107	0	-1.1107	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.04386	0.9209	0.7421	-0.8273	-0.2686	-0.01936	-0.005654	-0.001690	-0.001674	-0.000573	-0.000273	0.00009993	0.0003604
	0.50	0.1546	0.6107	0.3421	-0.5000	-0.3261	-0.07358	-0.02180	-0.003217	-0.003753	-0.002373	-0.001673	-0.0007143	-0.0002787
	1.00	0.1276	0.3197	0.2038	-0.5438	-0.2353	-0.1288	-0.05804	-0.02724	-0.01386	-0.007778	-0.004573	-0.002774	-0.001306
	1.50	0.08650	0.1814	0.1155	-0.01404	-0.2079	-0.1098	-0.06997	-0.04082	-0.02388	-0.01430	-0.008432	-0.006101	-0.004576
	2.00	0.08373	0.1114	0.07233	-0.005667	-0.06381	-0.07582	-0.06226	-0.04402	-0.02950	-0.01961	-0.01303	-0.008701	-0.006197
	2.50	0.09176	0.07253	0.04904	0.005402	-0.03189	-0.04890	-0.04841	-0.03993	-0.03023	-0.02204	-0.02199	-0.02090	-0.008530
	3.00	0.06294	0.05057	0.03501	0.009906	-0.01546	-0.03070	-0.03432	-0.03308	-0.02811	-0.02205	-0.01825	-0.01266	-0.009376
	3.50	0.03931	0.03645	0.02622	0.01167	-0.007182	-0.01951	-0.02559	-0.02618	-0.02392	-0.02040	-0.01673	-0.007443	-0.01068
	4.00	0.03058	0.02790	0.02008	0.003967	-0.002995	-0.01248	-0.01807	-0.02040	-0.01997	-0.01802	-0.01562	-0.01276	-0.01081
	4.50	0.02467	0.02159	0.01634	0.008072	0.00006625	-0.00707	-0.01118	-0.01526	-0.01608	-0.01545	-0.01408	-0.01234	-0.01154
	5.00	0.01961	0.01652	0.01309	0.006647	0.001151	-0.004850	-0.008922	-0.01139	-0.01276	-0.01286	-0.01243	-0.01125	-0.009985
M_y	0.00	-0.4929	1.8643	2.0000	-0.3572	-0.4929	-0.1717	-0.09021	-0.05605	-0.03832	-0.02789	-0.02122	-0.01672	-0.01349
	0.25	-0.01197	0.3918	0.6659	0.1724	-0.3312	-0.1860	-0.1033	-0.05522	-0.04073	-0.03281	-0.02473	-0.01806	-0.01427
	0.50	-0.0005840	0.1911	0.3059	0.2786	-0.07046	-0.1338	-0.09282	-0.06726	-0.04338	-0.03342	-0.02687	-0.008378	-0.01500
	1.00	0.05893	0.005317	0.05524	0.1586	0.09775	-0.03860	-0.03973	-0.03992	-0.03773	-0.02807	-0.02268	-0.01836	-0.02125
	1.50	0.05223	-0.01286	0.01712	0.1210	0.1666	0.04265	0.005894	-0.01156	-0.01782	-0.03433	-0.01507	-0.01574	-0.009703
	2.00	-0.002514	-0.01282	0.005331	0.03860	0.05763	0.04310	0.02181	0.006602	-0.004031	-0.008942	-0.009996	-0.009626	-0.005039
	2.50	-0.02862	-0.007268	0.001021	0.02282	0.04559	0.03471	0.02489	0.01595	0.004505	-0.001410	-0.004315	-0.006567	-0.007853
	3.00	-0.01525	-0.006307	0.0002427	0.01319	0.02177	0.02594	0.02373	0.01567	0.00973	0.000273	0.000173	-0.0001318	-0.0007060
	3.50	-0.005378	-0.003776	-0.0002198	0.01217	0.01539	0.01972	0.01670	0.01543	0.01110	0.004634	0.002963	-0.006506	-0.001674
	4.00	-0.004614	-0.003614	-0.0003563	0.005367	0.01196	0.01587	0.01659	0.01571	0.01279	0.007469	0.004784	0.001357	0.001423
	4.50	-0.004820	-0.002372	-0.0008230	0.004261	0.008477	0.009073	0.01119	0.01060	0.008816	0.007710	0.006523	0.005660	0.00006455
	5.00	-0.003295	-0.00008800	-0.00004780	0.004997	0.005527	0.009473	0.009560	0.007873	0.006945	0.005759	0.00573	0.003743	0.002465
M_{xy}	0.00	0	1.1107	0	-1.1107	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.05414	0.1605	0.6418	-0.06291	-0.2766	-0.07049	-0.02730	-0.013007	-0.007507	-0.005007	-0.002768	-0.001720	-0.0009743
	0.50	-0.4031	-0.01957	0.3418	0.1232	-0.2331	-0.1170	-0.05170	-0.02392	-0.01472	-0.01070	-0.007678	-0.004284	-0.002856
	1.00	-0.07326	-0.001003	0.2038	0.1597	-0.03444	-0.08586	-0.03307	-0.04034	-0.02578	-0.01718	-0.01174	-0.008375	-0.007167
	1.50	-0.1455	0.02477	0.1155	0.05519	0.01575	-0.02712	-0.04126	-0.03608	-0.02758	-0.02027	-0.01441	-0.01144	-0.008977
	2.00	-0.01381	0.02719	0.07230	0.07862	0.04199	-0.003878	-0.01770	-0.02394	-0.02273	-0.01925	-0.01541	-0.01273	-0.009744
	2.50	-0.01510	0.02345	0.04904	0.05443	0.03927	0.01610	-0.002242	-0.01208	-0.01543	-0.01535	-0.01374	-0.01151	-0.01016
	3.00	-0.02776	0.01993	0.03501	0.03939	0.03289	0.01985	-0.007101	-0.003457	-0.009070	-0.01173	-0.01089	-0.01006	-0.008690
	3.50	0.005523	0.01621	0.02622	0.03043	0.02618	0.01848	0.01070	0.004591	-0.003398	-0.006544	-0.007910	-0.008273	-0.007824
	4.00	0.006288	0.01390	0.02008	0.02286	0.02120	0.01645	0.01012	0.000092	-0.0003090	-0.005035	-0.006627	-0.006629	-0.006229
	4.50	0.006728	0.01153	0.01634	0.01815	0.01802	0.01573	0.01093	0.006403	0.002420	-0.0005917	-0.002732	-0.003995	-0.004743
	5.00	0.006069	0.009076	0.01309	0.01410	0.01471	0.01261	0.01005	0.007114	0.003901	0.001261	-0.0009859	-0.002322	-0.003259

表-3 (c) $\alpha=45^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
V_x	0.00	0	2.2214	2.2214	2.2214	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.4315	2.3335	2.1376	1.5530	-0.09337	-0.04500	-0.01662	-0.008362	-0.002787	-0.002342	-0.001817	-0.001421	-0.0009898
	0.50	1.1227	2.1036	2.0176	1.1107	-0.05375	-0.09309	-0.04841	-0.02671	-0.01602	-0.01070	-0.006546	-0.004971	-0.003699
	1.00	1.1226	1.6440	1.6079	0.8636	0.1815	-0.05668	-0.07675	-0.05892	-0.04184	-0.02970	-0.02156	-0.01602	-0.01207
	1.50	1.1434	1.2819	1.1679	0.7387	0.3420	0.05183	-0.03975	-0.05772	-0.05280	-0.04323	-0.02758	-0.02715	-0.02146
	2.00	0.9278	1.0152	0.9157	0.6525	0.3545	0.1362	0.01887	-0.03006	-0.04459	-0.04486	-0.04027	-0.03456	-0.02902
	2.50	0.7980	0.8403	0.7604	0.5826	0.3802	0.1962	0.07750	0.01070	-0.02105	-0.03368	-0.03665	-0.03528	-0.03182
	3.00	0.6932	0.7079	0.6432	0.5175	0.3664	0.2263	0.1206	0.04846	0.0001135	-0.01609	-0.02685	-0.03063	-0.03083
	3.50	0.6127	0.6061	0.5565	0.4618	0.3507	0.2402	0.1477	0.07928	0.03291	0.004098	-0.01287	-0.02304	-0.02555
	4.00	0.5425	0.5331	0.4899	0.4188	0.3321	0.2440	0.1655	0.1026	0.05594	0.02379	0.002660	-0.01030	-0.01790
	4.50	0.4852	0.4732	0.4374	0.3813	0.3132	0.2478	0.1754	0.1196	0.07491	0.04161	0.01789	0.001759	-0.008511
	5.00	0.4376	0.4249	0.3948	0.3500	0.2948	0.2365	0.1807	0.1310	0.08959	0.05687	0.03195	0.01404	-0.001386
V_y	0.00	2.4929	4.7143	2.2214	-0.2715	-2.4929	-1.4478	-1.0451	-0.8224	-0.6794	-0.5794	-0.5053	-0.4482	-0.4027
	0.25	2.4822	2.4695	1.6843	-0.5289	-1.2339	-1.0776	-0.8688	-0.7217	-0.6159	-0.5315	-0.4677	-0.4202	-0.3805
	0.50	1.5324	1.3501	0.6843	-0.1357	-0.4634	-0.6729	-0.6582	-0.5973	-0.5294	-0.4730	-0.4262	-0.3873	-0.3546
	1.00	0.8529	0.4939	0.2038	0.06245	-0.01938	-0.1782	-0.2965	-0.3454	-0.3551	-0.3469	-0.3364	-0.3139	-0.2965
	1.50	0.3918	0.2098	0.07700	0.07361	0.02576	-0.003257	-0.09217	-0.1631	-0.2065	-0.2289	-0.2380	-0.2385	-0.2334
	2.00	0.2363	0.1018	0.03579	0.04025	0.05828	0.04595	-0.003093	-0.05400	-0.1017	-0.1351	-0.1571	-0.1703	-0.1770
	2.50	0.1453	0.05884	0.01962	0.02688	0.04104	0.05255	0.03346	-0.0004390	-0.03684	-0.06905	-0.09436	-0.1136	-0.1264
	3.00	0.09187	0.03334	0.01167	0.03329	0.03620	0.04709	0.04369	0.02479	-0.006359	-0.02596	-0.04935	-0.06968	-0.08543
	3.50	0.05699	0.02121	0.007491	0.01301	0.02708	0.03891	0.04404	0.03399	0.01880	0.0001402	-0.01935	-0.03789	-0.05309
	4.00	0.03914	0.01436	0.005021	0.009181	0.02034	0.03143	0.03717	0.03542	0.02723	0.01476	0.00001414	-0.01495	-0.02921
	4.50	0.02797	0.01007	0.003631	0.006730	0.01574	0.01966	0.03216	0.03379	0.03014	0.02234	0.01177	-0.00009550	-0.01395
	5.00	0.02050	0.007202	0.002618	0.004980	0.01221	0.02046	0.02505	0.03067	0.02995	0.02567	0.01842	0.009695	0.00003799
V_{xy}	0.00	0	2.2214	2.2214	2.2214	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.9277	1.3632	1.1343	0.5774	0.3205	0.2024	0.1175	0.07101	0.05647	0.03950	0.02980	0.02365	0.01917
	0.50	0.8874	1.1037	0.6843	0.1107	0.1815	0.2402	0.1748	0.1238	0.09104	0.06965	0.05481	0.04372	0.03586
	1.00	0.8873	1.6684	0.2038	-0.1120	-0.05379	0.1002	0.1480	0.1408	0.1208	0.1010	0.08418	0.07068	0.05999
	1.50	0.5769	0.3995	0.07700	-0.1161	-0.1593	-0.02134	-0.06008	0.09557	0.1034	0.09880	0.08994	0.08032	0.07121
	2.00	0.4307	0.2524	0.03579	-0.1103	-0.1361	-0.07859	-0.01194	0.03953	0.06603	0.07686	0.07864	0.07585	0.07115
	2.50	0.3012	0.1702	0.01962	-0.08751	-0.1149	-0.09792	-0.05033	-0.005269	0.02685	0.04804	0.05860	0.06276	0.06343
	3.00	0.2334	0.1210	0.01167	-0.06940	-0.1047	-0.09927	-0.06376	-0.03432	-0.009482	0.02069	0.03623	0.04574	0.05073
	3.50	0.1730	0.08961	0.007491	-0.05553	-0.08901	-0.09309	-0.07698	-0.05128	-0.02478	-0.001730	0.01590	0.02865	0.03681
	4.00	0.01350	0.06883	0.005021	-0.04538	-0.07550	-0.08452	-0.07707	-0.05980	-0.03895	-0.01860	-0.001245	0.01260	0.02277
	4.50	0.1078	0.05437	0.003631	-0.03757	-0.06412	-0.08119	-0.07363	-0.06258	-0.04705	-0.03025	-0.01453	-0.0009833	0.01021
	5.00	0.08777	0.04382	0.002618	-0.03164	-0.05505	-0.06716	-0.06869	-0.06231	-0.05117	-0.03773	-0.02426	-0.01154	-0.0006139

表-4 (a) $\alpha=50^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
H_x	0.00	0	2.0194	2.0194	2.0194	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.1909	1.6175	2.2697	2.2464	0.6356	0.08799	0.02713	0.01249	0.006778	0.004044	0.003038	0.001893	0.001300
	0.50	-0.08988	1.1036	1.8697	2.0708	1.0774	0.2970	0.1078	0.05028	0.02736	0.01741	0.01082	0.007233	0.005300
	1.00	0.1325	0.8146	1.4729	1.6550	1.2243	0.6527	0.3376	0.1760	0.1030	0.06441	0.04285	0.02995	0.02178
	1.50	0.2573	0.7064	1.1449	1.3014	1.1194	0.7812	0.4935	0.3074	0.1966	0.1305	0.09002	0.06268	0.04729
	2.00	0.3228	0.6261	0.9111	1.0412	0.9664	0.7814	0.5710	0.4003	0.2792	0.1972	0.1420	0.1044	0.07852
	2.50	0.3360	0.5566	0.7499	0.8553	0.8386	0.7305	0.5879	0.4505	0.3381	0.2528	0.1904	0.1448	0.1117
	3.00	0.3416	0.4979	0.6385	0.7202	0.7315	0.6671	0.5719	0.4679	0.3725	0.2928	0.2295	0.1800	0.1431
	3.50	0.3263	0.4487	0.5533	0.6193	0.6344	0.6034	0.5410	0.4638	0.3854	0.3177	0.2582	0.2110	0.1700
	4.00	0.3121	0.4069	0.4878	0.5414	0.5602	0.5453	0.5074	0.4496	0.3890	0.3296	0.2771	0.2310	0.1848
	4.50	0.2966	0.3717	0.4358	0.4802	0.4997	0.4944	0.4685	0.4287	0.3820	0.3336	0.2877	0.2458	0.2089
	5.00	0.2811	0.3417	0.3937	0.4283	0.4499	0.4500	0.4342	0.4056	0.3698	0.3306	0.2915	0.2545	0.2207
H_y	0.00	-3.1865	-0.3183	2.0194	4.3571	3.1865	1.7600	1.2580	0.9877	0.8131	0.6926	0.6036	0.5350	0.4806
	0.25	-1.4780	-0.6813	0.5001	2.5142	2.8450	1.8748	1.3490	1.0496	0.8592	0.7274	0.6312	0.5570	0.4985
	0.50	-0.6446	-0.2518	0.7001	1.4621	1.9159	1.6995	1.3264	1.0621	0.8748	0.7448	0.6468	0.5708	0.5109
	1.00	-0.1082	0.1482	0.2269	0.5437	0.9105	1.1050	1.0681	0.9512	0.8320	0.7291	0.6447	0.5756	0.5186
	1.50	0.01651	0.04412	0.09414	0.2334	0.4655	0.6691	0.7621	0.7613	0.7185	0.6616	0.6041	0.5500	0.5047
	2.00	0.03244	0.03513	0.04249	0.1152	0.2622	0.4095	0.5211	0.5746	0.5851	0.5692	0.5400	0.5071	0.4739
	2.50	0.03724	0.02472	0.02567	0.06287	0.1497	0.2579	0.3568	0.4244	0.4603	0.4716	0.4665	0.4518	0.4325
	3.00	0.03593	0.01744	0.01382	0.03754	0.09884	0.1696	0.2477	0.3123	0.3572	0.3829	0.3935	0.3939	0.3860
	3.50	0.02377	0.01264	0.008301	0.02312	0.06120	0.1134	0.1756	0.2306	0.2742	0.3080	0.3274	0.3384	0.3386
	4.00	0.01848	0.009857	0.006047	0.01531	0.04154	0.08107	0.1250	0.1736	0.2145	0.2459	0.2705	0.2858	0.3019
	4.50	0.01447	0.006774	0.004300	0.01141	0.02983	0.05875	0.09437	0.1321	0.1677	0.1984	0.2236	0.2412	0.2529
	5.00	0.01136	0.005225	0.003174	0.008219	0.02195	0.04348	0.07161	0.1019	0.1324	0.1603	0.1839	0.2030	0.2191
H_{xy}	0.00	0	2.4066	2.4066	2.4066	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.4678	0.8283	1.4344	1.3561	1.1613	0.3867	0.1835	0.1125	0.07515	0.05378	0.04096	0.03168	0.02534
	0.50	0.2679	0.3154	0.8344	1.1269	1.2473	0.6750	0.3680	0.2269	0.1531	0.1000	0.08303	0.06564	0.05192
	1.00	0.02005	-0.01877	0.2704	0.6854	0.9362	0.8072	0.5758	0.4023	0.2893	0.2149	0.1651	0.1305	0.1056
	1.50	-0.07447	-0.08426	0.1122	0.4150	0.6489	0.6884	0.5964	0.4757	0.3715	0.2913	0.2318	0.1854	0.1538
	2.00	-0.09449	-0.08458	0.05064	0.2637	0.4456	0.5397	0.5312	0.4716	0.3992	0.3320	0.2752	0.2290	0.1921
	2.50	-0.09949	-0.07312	0.03060	0.1775	0.3222	0.4146	0.4462	0.4301	0.3900	0.3425	0.2962	0.2545	0.2189
	3.00	-0.08326	-0.06048	0.01669	0.1260	0.2439	0.3217	0.3668	0.3760	0.3606	0.3321	0.2986	0.2644	0.2340
	3.50	-0.07862	-0.04768	0.01049	0.09348	0.1799	0.2525	0.3004	0.3217	0.3210	0.3102	0.2889	0.2661	0.2390
	4.00	-0.06805	-0.04144	0.007207	0.07144	0.1401	0.2013	0.2444	0.2749	0.2856	0.2817	0.2720	0.2557	0.2306
	4.50	-0.05882	-0.03469	0.005124	0.05636	0.1116	0.1632	0.2051	0.2341	0.2503	0.2552	0.2524	0.2423	0.2290
	5.00	-0.05096	-0.02942	0.003782	0.04544	0.09067	0.1341	0.1720	0.2000	0.2188	0.2283	0.2301	0.2261	0.2181

表-4 (b) $\alpha=50^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
M_x	0.00	0	1.0097	0	-1.0097	0	0	0	0	0	0	0 (G)	0 (G)	0
	0.25	0.07390	1.0169	0.6172	-0.7842	-0.3453	-0.03532	-0.008438	-0.003093	-0.001446	-0.0007038	-0.000370	-0.0002000	-0.0001629
	0.50	0.04405	0.7095	0.3172	-0.4723	-0.4537	-0.1469	-0.03151	-0.01224	-0.005537	-0.002461	-0.001771	-0.001364	-0.0005406
	1.00	0.1525	0.3875	0.2704	-0.1421	-0.2881	-0.1033	-0.07954	-0.03764	-0.01964	-0.01048	-0.006210	-0.004215	-0.003308
	1.50	0.1456	0.2268	0.1687	-0.02817	-0.1460	-0.1391	-0.09229	-0.05500	-0.03253	-0.01965	-0.01245	-0.003963	-0.005722
	2.00	0.1338	0.1439	0.1013	0.006882	-0.07524	-0.07962	-0.07962	-0.05762	-0.03905	-0.02622	-0.01773	-0.01197	-0.008344
	2.50	0.08726	0.09551	0.07649	0.01712	-0.03301	-0.05929	-0.06018	-0.05122	-0.03941	-0.02864	-0.02140	-0.01529	-0.01119
	3.00	0.09186	0.06751	0.04941	0.01794	0.0001450	-0.03544	-0.04332	-0.04168	-0.03562	-0.02860	-0.02226	-0.0174(G)	-0.01316
	3.50	0.05108	0.05045	0.03671	0.01755	-0.004726	-0.02122	-0.03036	-0.03364	-0.03267	-0.02623	-0.02172	-0.01805	-0.0150(G)
	4.00	0.03997	0.03775	0.02883	0.01506	0.0000676	-0.01270	-0.0207(G)	-0.02446	-0.02473	-0.02650	-0.02017	-0.01804	-0.0163(G)
	4.50	0.03191	0.01178	0.02306	0.01351	0.001564	-0.007053	-0.01416	-0.01833	-0.01960	-0.01939	-0.01528	-0.01582	-0.01378
	5.00	0.02625	0.02377	0.01891	0.01173	0.003492	-0.004509	-0.00865	-0.01371	-0.01536	-0.01553	-0.01560	-0.01439	-0.01292
M_y	0.00	-0.8030	2.2533	2.3835	0.2050	-0.8030	-0.2565	-0.1324	-0.08569	-0.05567	-0.04046	-0.03073	-0.02415	-0.01953
	0.25	-0.02145	0.5860	0.7549	0.3398	-0.3886	-0.2660	-0.1402	-0.09019	-0.06130	-0.04403	-0.0343(G)	-0.02643	-0.02086
	0.50	0.1500	0.2311	0.4349	0.3451	-0.04708	-0.1837	-0.1261	-0.0827(G)	-0.05602	-0.04380	-0.03421	-0.0277	-0.02138
	1.00	0.08328	0.03181	0.08745	0.1963	0.1357	0.006785	-0.04480	-0.05125	-0.04642	-0.04005	-0.03023	-0.0243(G)	-0.02236
	1.50	0.02526	0.005741	0.0002580	0.09524	0.1085	0.05869	0.009567	-0.01369	-0.02282	-0.02366	-0.02200	-0.0203(G)	-0.01859
	2.00	-0.01551	-0.01152	0.009325	0.04769	0.07541	0.05779	0.03255	0.01320	-0.001998	-0.01124	-0.01297	-0.01244	-0.01244
	2.50	-0.003725	-0.00833	-0.003762	0.02788	0.04521	0.0439(G)	0.03363	0.02053	0.008307	-0.000383	-0.004500(G)	-0.007694	-0.008612
	3.00	-0.0135(G)	-0.007161	0.001927	0.02596	0.03534	0.0350(G)	0.03058	0.02248	0.01417	0.006676	0.001588	-0.00220(G)	-0.005461
	3.50	-0.005553	-0.007562	0.002055	0.0124(G)	0.01940	0.02131	0.02568	0.0205(G)	0.0150(G)	0.01051	0.00505(G)	-0.00305(G)	0.002506
	4.00	-0.004686	-0.00500(G)	0.0003725	0.00650(G)	0.01362	0.01879	0.0190(G)	0.01778	0.01486	0.0109(G)	0.007091	0.004562	0.00283(G)
	4.50	-0.004000	-0.00330(G)	-0.0000249	0.004462	0.008689	0.01325	0.01511	0.01539	0.0134(G)	0.01106	0.00730(G)	0.00530(G)	0.00280(G)
	5.00	-0.00200(G)	-0.002491	-0.0004076	0.003350	0.007516	0.0107(G)	0.0130(G)	0.01353	0.0120(G)	0.01020	0.008739	0.007459	0.005524
M_{xy}	0.00	0	1.2032	0	-1.2032	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.09832	0.2439	0.6001	-0.2105	-0.4500	-0.1113	-0.03969	-0.01889	-0.01064	-0.006373	-0.00420(G)	-0.00280(G)	-0.002089
	0.50	-0.05442	0.03177	0.3501	0.1676	-0.2893	-0.1628	-0.07275	-0.03624	-0.02187	-0.01244	-0.00790(G)	-0.005024	-0.003587
	1.00	-0.08810	0.004935	0.2269	0.2010	-0.02566	-0.1057	-0.08344	-0.05454	-0.03577	-0.02320	-0.01613	-0.01188	-0.009406
	1.50	-0.04970	0.02404	0.1412	0.1426	0.04935	-0.02907	-0.04969	-0.04724	-0.03684	-0.02734	-0.02085	-0.009289	-0.01199
	2.00	-0.02960	0.02797	0.08499	0.09853	0.07875	0.009459	-0.02016	-0.02970	-0.02746	-0.02514	-0.02062	-0.01617	-0.01288
	2.50	-0.006400	0.02525	0.06418	0.06841	0.06192	0.02288	-0.0004784	-0.01406	-0.01926	-0.01979	-0.01844	-0.01563	-0.01315
	3.00	0.02455	0.02207	0.04146	0.04962	0.05265	0.02623	0.009483	-0.003001	-0.01012	-0.01331	-0.01396	-0.00136	-0.01218
	3.50	0.004577	0.01939	0.03080	0.03767	0.03432	0.02522	0.01461	0.002669	-0.003291	-0.007670	-0.009722	-0.0100(G)	-0.009623
	4.00	0.005888	0.01564	0.02419	0.02860	0.02775	0.02228	0.0144(G)	0.007309	0.001100	-0.00360(G)	-0.005989	-0.007398	0.00790(G)
	4.50	0.006307	0.01914	0.01935	0.02318	0.02262	0.01953	0.01352	0.008935	0.003983	-0.0001024	-0.003482	-0.004836	-0.006774
	5.00	0.005857	0.01141	0.01587	0.01837	0.01910	0.01724	0.01413	0.009387	0.005616	0.002100	-0.0006650	-0.002560	0.004968

表-4 (c) $\alpha=50^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
V_x	0.00	0	2.4066	2.4066	2.4066	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.6117	2.5663	2.7282	2.0386	-0.08173	-0.04312	-0.01764	-0.008228	-0.004585	-0.002897	-0.001441	-0.001748	-0.0009797
	0.50	1.0781	2.2973	2.2282	1.4858	0.9870	-0.07869	-0.04582	-0.02565	-0.01558	-0.01025	-0.006831	-0.005118	-0.003643
	1.00	1.2665	1.8242	1.7553	1.1190	0.3504	0.006695	-0.05492	-0.05010	-0.03742	-0.02762	-0.02033	-0.01513	-0.01143
	1.50	1.1820	1.4460	1.3645	0.9467	0.4586	0.1385	0.004268	-0.03537	-0.04032	-0.03652	-0.03024	-0.02639	-0.01977
	2.00	1.0383	1.1677	1.0853	0.8194	0.4982	0.2322	0.07836	0.005749	-0.02299	-0.03132	-0.03147	-0.02874	-0.02507
	2.50	0.9107	0.9666	0.8937	0.7160	0.4890	0.2847	0.1412	0.05401	0.007681	-0.01463	-0.02428	-0.02600	-0.02544
	3.00	0.8030	0.8191	0.7609	0.6326	0.4759	0.3113	0.1848	0.09662	0.04096	0.008585	-0.008978	-0.01700	-0.02109
	3.50	0.7017	0.7079	0.6594	0.5648	0.4431	0.3198	0.2125	0.1290	0.06913	0.03303	0.008999	-0.003447	-0.01337
	4.00	0.6239	0.6215	0.5814	0.5086	0.4158	0.3181	0.2314	0.1571	0.09708	0.05666	0.02784	0.009146	0.004012
	4.50	0.5598	0.5532	0.5194	0.4622	0.3893	0.3110	0.2360	0.1704	0.1171	0.07587	0.04482	0.02403	0.008913
	5.00	0.5064	0.4979	0.4692	0.4230	0.3647	0.3007	0.2383	0.1807	0.1320	0.09214	0.06137	0.03807	0.002099
V_y	0.00	2.6738	4.3682	2.4066	0.4450	-2.6738	-1.4768	-1.0556	-0.8288	-0.6822	-0.5811	-0.5084	-0.4489	-0.4033
	0.25	2.6282	2.4328	1.5844	-0.2484	-0.9992	-1.0185	-0.8506	-0.7052	-0.6018	-0.5241	-0.4634	-0.4158	-0.3769
	0.50	1.8318	1.4403	0.8344	0.002070	-0.3167	-0.5804	-0.6086	-0.5648	-0.5071	-0.4586	-0.4151	-0.3787	-0.3472
	1.00	0.9055	0.5547	0.2704	0.1109	-0.05073	-0.09468	-0.2287	-0.2955	-0.3180	-0.3190	-0.3097	-0.2963	-0.2816
	1.50	0.4756	0.2448	0.1122	0.08596	0.09885	0.05382	-0.03419	-0.1111	-0.1635	-0.1939	-0.2088	-0.2167	-0.2150
	2.00	0.2719	0.1232	0.05064	0.05599	0.07917	0.08385	0.04433	-0.01041	-0.06108	-0.09938	-0.1256	-0.1432	-0.1538
	2.50	0.1585	0.06819	0.03060	0.03619	0.06420	0.07759	0.06713	0.03669	0.0000374	-0.03450	-0.06292	-0.08526	-0.1015
	3.00	0.1067	0.04119	0.01647	0.02433	0.05392	0.06538	0.06752	0.05409	0.03104	0.004876	-0.02023	-0.04276	-0.05998
	3.50	0.06634	0.02672	0.01049	0.01709	0.03493	0.05399	0.06038	0.05641	0.04222	0.02683	0.007260	-0.009934	-0.02903
	4.00	0.04585	0.01729	0.007206	0.01271	0.02616	0.04140	0.04880	0.05396	0.04863	0.03708	0.02367	0.008456	0.01258
	4.50	0.03284	0.01278	0.005124	0.008891	0.01996	0.03295	0.04330	0.04837	0.04770	0.04180	0.03259	0.02107	0.009020
	5.00	0.02430	0.009267	0.003783	0.006755	0.01541	0.02614	0.03635	0.04230	0.04438	0.04202	0.03635	0.02830	0.01742
V_{xy}	0.00	0	2.0194	2.0194	2.0194	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	1.0967	1.2309	1.1001	0.6020	0.2703	0.2003	0.1162	0.07502	0.05243	0.03865	0.03012	0.02364	0.01914
	0.50	1.2193	1.0887	0.7001	0.1215	0.05206	0.2034	0.1626	0.1186	0.08801	0.06725	0.05312	0.04263	0.03521
	1.00	0.9471	0.6995	0.2269	-0.1409	-0.1447	0.03025	0.1094	0.1196	0.1084	0.09278	0.07869	0.06690	0.05725
	1.50	0.6721	0.4363	0.09414	-0.1587	-0.1900	-0.08726	0.01058	0.06205	0.08089	0.08336	0.07907	0.07075	0.06519
	2.00	0.4691	0.2827	0.04249	-0.1324	-0.1745	-0.1337	-0.05911	0.0002154	0.03653	0.05510	0.06247	0.06359	0.06165
	2.50	0.3447	0.1931	0.02567	-0.1055	-0.1578	-0.1438	-0.09501	-0.04436	-0.004442	0.02229	0.03856	0.04693	0.05053
	3.00	0.2623	0.1386	0.01382	-0.08364	-0.1275	-0.1359	-0.1090	-0.07131	-0.03553	-0.006966	0.01350	0.02788	0.03563
	3.50	0.1965	0.1037	0.008801	-0.06693	-0.1116	-0.1232	-0.1105	-0.08561	-0.05805	-0.02969	-0.008253	0.009415	0.01925
	4.00	0.1542	0.07985	0.006047	-0.05468	-0.09380	-0.1095	-0.1082	-0.08966	-0.06794	-0.04564	-0.02545	-0.008838	0.01206
	4.50	0.1237	0.06335	0.004300	-0.04516	-0.07941	-0.09852	-0.09843	-0.08932	-0.07372	-0.05585	-0.03836	-0.02233	-0.009228
	5.00	0.1011	0.05133	0.003174	-0.03789	-0.06774	-0.08518	-0.09001	-0.08610	-0.07548	-0.06169	-0.04695	-0.03276	-0.02006

α の差角位置に関する一力学的考察

表-5 (a) $\alpha=55^\circ$

x/l	y/l	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
H_z	0.00	0	1.8019	1.8019	1.8019	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.2389	1.4971	2.0800	1.9547	1.0293	0.1227	0.03600	0.01553	0.008371	0.004989	0.003207	0.002082	0.001624
	0.50	-0.1015	1.0951	1.6997	1.9578	1.3261	0.3855	0.1351	0.06159	0.03329	0.02003	0.01293	0.008951	0.006327
	1.00	0.08345	0.7687	1.3908	1.6396	1.3363	0.7610	0.3890	0.2092	0.1222	0.07649	0.05085	0.03539	0.02555
	1.50	0.2030	0.6582	1.1022	1.3095	1.1887	0.8676	0.5624	0.3548	0.2284	0.1521	0.1050	0.07496	0.05519
	2.00	0.2652	0.6009	0.8917	1.0556	1.0414	0.8485	0.6347	0.4523	0.3184	0.2262	0.1635	0.1207	0.09097
	2.50	0.2929	0.5259	0.7414	0.8696	0.8771	0.7843	0.6435	0.5006	0.3797	0.2861	0.2166	0.1656	0.1281
	3.00	0.3006	0.4743	0.6317	0.7328	0.7566	0.7099	0.6193	0.5137	0.4142	0.3280	0.2537	0.2045	0.1626
	3.50	0.2971	0.4301	0.5490	0.6300	0.6592	0.6384	0.5815	0.5058	0.4264	0.3526	0.2886	0.2354	0.1923
	4.00	0.2883	0.3924	0.4849	0.5508	0.5989	0.5746	0.5397	0.4862	0.4250	0.3638	0.3074	0.2578	0.2157
	4.50	0.2973	0.3598	0.4338	0.4880	0.5376	0.5192	0.4983	0.4611	0.4148	0.3652	0.3170	0.2725	0.2330
	5.00	0.2643	0.3338	0.3920	0.4378	0.4646	0.4712	0.4597	0.4344	0.3995	0.3600	0.3196	0.2807	0.2447
H_y	0.00	-4.3914	-0.3371	1.8019	3.9410	4.3914	2.1763	1.5305	1.1925	0.9803	0.8336	0.7257	0.6429	0.5772
	0.25	-1.7765	-0.6389	1.0695	2.6238	3.1978	2.2562	1.6123	1.2522	1.0245	0.8873	0.7521	0.6640	0.5947
	0.50	-0.8507	-0.3557	0.7095	1.5716	2.0554	1.9574	1.5536	1.2478	1.0341	0.8802	0.7651	0.6763	0.6055
	1.00	-0.2152	-0.0421	0.2486	0.6089	0.9756	1.2161	1.2079	1.0912	0.9615	0.8473	0.7518	0.6728	0.6074
	1.50	-0.03678	0.02137	0.1058	0.2681	0.5037	0.7263	0.8418	0.8561	0.8168	0.7576	0.6956	0.6373	0.5850
	2.00	0.01242	0.02644	0.05133	0.1330	0.2781	0.4430	0.5702	0.6378	0.6556	0.6428	0.6146	0.5800	0.5542
	2.50	0.02306	0.02123	0.02811	0.07291	0.1637	0.2796	0.3881	0.4665	0.5109	0.5280	0.5257	0.5122	0.4924
	3.00	0.02258	0.01599	0.01697	0.04354	0.1022	0.1832	0.2773	0.3409	0.3942	0.4254	0.4401	0.4422	0.4361
	3.50	0.01922	0.01193	0.01094	0.02779	0.06696	0.1243	0.1897	0.2516	0.3026	0.3398	0.3637	0.3764	0.3823
	4.00	0.01539	0.009069	0.007601	0.01876	0.04599	0.09307	0.1373	0.1880	0.2337	0.2710	0.2987	0.3174	0.3283
	4.50	0.01278	0.006740	0.005385	0.01299	0.03258	0.06325	0.1014	0.1425	0.1820	0.2167	0.2450	0.2664	0.2814
	5.00	0.01051	0.005370	0.003780	0.009551	0.02400	0.04690	0.07647	0.1093	0.1432	0.1742	0.2012	0.2233	0.2403
H_{xy}	0.00	0	2.5734	2.5734	2.5734	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.5709	1.2570	1.7133	1.5775	1.4589	0.4923	0.2325	0.1366	0.0908	0.0648	0.0486	0.0377	0.0304
	0.50	0.3605	0.5661	1.0133	1.1704	1.3601	0.8123	0.4427	0.2715	0.1828	0.1313	0.09877	0.07717	0.06176
	1.00	0.1062	0.09990	0.3550	0.7097	0.9800	0.9008	0.6621	0.4676	0.3372	0.2519	0.1939	0.1533	0.1239
	1.50	-0.01168	-0.02136	0.1511	0.4347	0.6785	0.7458	0.6648	0.5394	0.4257	0.3359	0.2681	0.2172	0.1788
	2.00	-0.05844	-0.05048	0.07331	0.2782	0.4729	0.5779	0.5816	0.5259	0.4503	0.3773	0.3144	0.2624	0.2214
	2.50	-0.07117	-0.05309	0.04015	0.1875	0.3379	0.4423	0.4836	0.4731	0.4341	0.3845	0.3347	0.2894	0.2499
	3.00	-0.07058	-0.04800	0.02424	0.1330	0.2487	0.3412	0.3946	0.4098	0.3985	0.3697	0.3347	0.2962	0.2649
	3.50	-0.05325	-0.04161	0.01563	0.09830	0.1883	0.2668	0.3217	0.3494	0.3540	0.3425	0.3214	0.2958	0.2691
	4.00	-0.05174	-0.03079	0.007692	0.05897	0.1165	0.1718	0.2638	0.2962	0.3107	0.3107	0.3006	0.2843	0.2647
	4.50	-0.04548	-0.02634	0.005398	0.04765	0.09476	0.1410	0.2178	0.2512	0.2709	0.2784	0.2765	0.2677	0.2548
	5.00							0.1818	0.2140	0.2358	0.2478	0.2515	0.2488	0.2413

表-5 (b) $\alpha=55^\circ$

π/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
M_x	0.00	0	0.9010	0	-0.9010	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.09613	1.0628	0.7367	-0.5830	-0.6646	-0.06102	-0.01389	-0.004658	-0.002415	-0.001267	-0.0006765	-0.0006765	-0.0005108
	0.50	0.07872	0.8305	0.5067	-0.3937	-0.6460	-0.1721	-0.04896	-0.01823	-0.008582	-0.004446	-0.002337	-0.001691	-0.0005481
	1.00	0.01947	0.4843	0.3632	-0.1101	-0.3569	-0.2407	-0.1159	-0.05533	-0.02937	-0.01583	-0.009487	-0.005950	-0.003789
	1.50	0.1855	0.2970	0.2266	-0.002697	-0.1709	-0.1827	-0.1275	-0.07779	-0.04667	-0.02849	-0.01786	-0.01151	-0.007795
	2.00	0.1491	0.1921	0.1466	0.02862	-0.07764	-0.1170	-0.1061	-0.07910	-0.05476	-0.03707	-0.02515	-0.01723	-0.01212
	2.50	0.1150	0.1302	0.1003	0.03407	-0.03244	-0.07064	-0.07797	-0.06859	-0.05395	-0.04028	-0.02953	-0.02163	-0.01583
	3.00	0.08882	0.09317	0.07271	0.03263	-0.01037	-0.04126	-0.05467	-0.05488	-0.04703	-0.03895	-0.03071	-0.02377	-0.01822
	3.50	0.06869	0.06943	0.05470	0.02918	-0.0000917	-0.02378	-0.03705	-0.04152	0.03996	-0.03522	-0.02958	-0.02415	-0.01943
	4.00	0.05526	0.05394	0.04342	0.02588	0.005671	-0.01269	-0.02429	-0.03067	0.03215	-0.03039	-0.02703	-0.02319	-0.01944
	4.50	0.04378	0.04137	0.03461	0.02133	0.008402	-0.005550	-0.01608	-0.02253	-0.02515	-0.02540	-0.02377	-0.02139	-0.01867
	5.00	0.03694	0.03436	0.02699	0.01935	0.009174	-0.001766	-0.01054	-0.01571	-0.01938	-0.02088	-0.02066	-0.01921	-0.01745
M_y	0.00	-1.5351	2.6877	2.8563	0.8858	-1.5351	-0.4082	-0.2048	-0.1250	-0.08472	-0.06136	-0.04656	-0.03657	-0.02949
	0.25	-0.004121	0.9265	1.2392	0.5052	-0.5547	-0.4018	-0.2182	-0.1341	-0.09124	-0.06588	-0.04962	-0.03815	-0.03155
	0.50	0.1994	0.3829	0.6292	0.4497	0.01212	-0.2328	-0.1796	-0.1245	-0.08856	-0.06556	-0.04965	-0.03964	-0.03154
	1.00	0.1208	0.07804	0.1436	0.2504	0.1943	0.02426	-0.05589	-0.06947	-0.06193	-0.05315	-0.04405	-0.03628	-0.02981
	1.50	0.04471	0.009813	0.04191	0.1242	0.1455	0.08715	0.02240	-0.01444	-0.03074	-0.03302	-0.03064	-0.02706	-0.02452
	2.00	0.01278	-0.005334	0.01614	0.06419	0.09430	0.08046	0.04974	0.01654	-0.002010	-0.01216	-0.01636	-0.01711	-0.01742
	2.50	0.0007801	-0.005605	0.008546	0.03779	0.06019	0.06318	0.04734	0.03038	0.01479	0.002605	-0.005349	-0.01006	-0.018
	3.00	-0.003939	-0.005730	0.004274	0.02238	0.03849	0.04624	0.04293	0.03437	0.01062	0.008607	0.002227	-0.001160	-0.003295
	3.50	-0.003727	-0.005252	0.002742	0.01374	0.02709	0.03569	0.03428	0.02922	0.02254	0.01482	0.008470	0.003556	-0.001225
	4.00	-0.005949	-0.005853	0.0007535	0.007398	0.01646	0.02559	0.02499	0.02448	0.02150	0.01675	0.01165	0.007237	0.003334
	4.50	-0.003543	-0.001471	-0.0005216	0.008355	0.01349	0.01697	0.02139	0.02141	0.01844	0.01629	0.01227	0.009332	0.006195
	5.00	-0.005948	-0.003802	0.003284	0.003368	0.006764	0.01353	0.01763	0.01478	0.01553	0.01556	0.01416	0.01055	0.008912
M_{xy}	0.00	0	1.2867	0	-1.2867	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.1268	0.4688	0.7548	-0.1328	-0.5695	-0.1744	-0.06185	-0.02856	-0.01625	-0.009895	-0.006394	-0.003713	-0.003532
	0.50	-0.06486	0.1052	0.3548	0.2006	-0.3324	-0.2398	-0.1085	-0.05477	-0.03136	-0.01944	-0.01251	-0.009133	-0.006033
	1.00	-0.1090	0.007893	0.2486	0.2541	-0.004410	-0.1351	-0.1162	-0.07787	-0.05014	-0.03422	-0.02385	-0.01703	-0.01233
	1.50	-0.06685	0.02137	0.1587	0.1847	0.07704	-0.02937	-0.06692	-0.06438	-0.03389	-0.03905	-0.02887	-0.02145	-0.01640
	2.00	-0.03320	0.02765	0.1027	0.1269	0.08323	0.01923	-0.02284	-0.03897	-0.03966	-0.03472	-0.02855	-0.02278	-0.02039
	2.50	-0.01352	0.02653	0.07027	0.08851	0.07133	0.03548	0.002959	-0.01668	-0.02485	-0.02619	-0.02459	-0.02174	-0.01825
	3.00	-0.002828	0.02397	0.05091	0.06412	0.05776	0.03784	0.01558	-0.001715	-0.01315	-0.01755	-0.01881	-0.01738	-0.01605
	3.50	0.002007	0.02096	0.03830	0.04809	0.04603	0.03495	0.02044	0.006834	-0.003154	-0.009430	-0.01264	-0.01375	-0.01384
	4.00	0.005328	0.01849	0.03040	0.03740	0.03734	0.04151	0.02150	0.01138	0.002837	-0.003365	-0.007388	-0.009537	-0.01051
	4.50	0.005754	0.01494	0.02423	0.02897	0.03008	0.02691	0.02048	0.01324	0.006452	0.0008759	-0.003233	-0.005912	-0.007471
	5.00	0.007069	0.01368	0.01890	0.02393	0.02522	0.02297	0.01876	0.01387	0.008420	0.003672	-0.0000935	-0.003005	-0.004697

π の範囲に於ける一力学の現象

表-5 (c) $\alpha=55^\circ$

x/l	y/l	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
V_x	0.00	0	2.5734	2.5734	2.5734	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	1.0084	2.6251	2.6774	2.3046	0.1204	-0.04388	-0.01706	-0.008445	-0.004535	-0.002825	-0.001905	-0.001445	-0.0008959
	0.50	1.3742	2.4820	2.4274	1.8777	0.3746	-0.05125	-0.04188	-0.02460	-0.01505	-0.009779	-0.006790	-0.004735	-0.003619
	1.00	1.4540	2.0246	1.9862	1.4148	0.6803	0.09998	-0.02299	-0.03778	-0.03175	-0.02455	-0.01853	-0.01415	-0.01100
	1.50	1.3389	1.6331	1.5741	1.1770	0.6487	0.2540	0.06337	-0.005656	-0.02489	-0.02752	-0.02501	-0.02133	-0.01770
	2.00	1.1856	1.3367	1.2735	1.0080	0.6547	0.3495	0.1533	0.05127	-0.004384	-0.01460	-0.02088	-0.02172	-0.02025
	2.50	1.0400	1.1168	1.0588	0.8761	0.6310	0.3978	0.2222	0.1092	0.04442	0.01013	-0.006807	-0.01440	-0.01731
	3.00	0.9146	0.9525	0.9022	0.7715	0.5952	0.4165	0.2668	0.1573	0.08586	0.04019	0.01362	0.001164	-0.009436
	3.50	0.8096	0.8417	0.7840	0.7018	0.5561	0.4175	0.2931	0.1934	0.1201	0.06972	0.03651	0.01542	0.002538
	4.00	0.7231	0.7290	0.6926	0.6181	0.5182	0.4091	0.3062	0.2180	0.1482	0.09628	0.05921	0.03362	0.01643
	4.50	0.6803	0.6503	0.6195	0.5606	0.5120	0.3958	0.3102	0.2335	0.1694	0.1186	0.07998	0.05155	0.03118
	5.00	0.5907	0.5868	0.5598	0.5128	0.4504	0.3799	0.3086	0.2425	0.1845	0.1363	0.09779	0.06813	0.04564
V_y	0.00	3.0749	4.0712	2.5734	1.0756	-3.0749	-1.5239	-1.0717	-0.8350	-0.6864	-0.5837	-0.5082	-0.4501	-0.4041
	0.25	2.7564	2.5594	1.9633	0.2749	-0.7266	-0.9536	-0.8161	-0.6882	-0.5901	-0.5156	-0.4574	-0.4109	-0.3726
	0.50	1.8777	1.5430	1.0133	0.1935	-0.1571	-0.4551	-0.5443	-0.5243	-0.4823	-0.4395	-0.4009	-0.3671	-0.3382
	1.00	0.9600	0.6327	0.3550	0.1769	0.1261	0.007085	-0.1428	-0.2322	-0.2718	-0.2835	-0.2821	-0.2744	-0.2639
	1.50	0.5226	0.2930	0.1511	0.1203	0.1442	0.1110	0.03862	-0.04675	-0.1097	-0.1500	-0.1733	-0.1855	-0.1925
	2.00	0.3000	0.1512	0.07331	0.07656	0.1144	0.1282	0.09825	0.04548	-0.008825	-0.05342	-0.08647	-0.1097	-0.1284
	2.50	0.1826	0.08532	0.04015	0.04913	0.08412	0.1093	0.1073	0.08153	0.04503	0.008063	-0.02427	-0.5037	-0.07062
	3.00	0.1169	0.05216	0.02424	0.03286	0.06122	0.08734	0.09746	0.08942	0.07001	0.04307	0.01625	-0.008236	-0.02908
	3.50	0.07825	0.03391	0.01563	0.02281	0.04482	0.06826	0.08315	0.08525	0.07612	0.05981	0.04012	0.01999	0.001252
	4.00	0.05473	0.02327	0.01085	0.01648	0.03365	0.06168	0.06992	0.07626	0.07448	0.06575	0.05261	0.03733	0.02170
	4.50	0.03932	0.01628	0.007691	0.01190	0.02545	0.04229	0.05686	0.06616	0.06393	0.06555	0.05772	0.04693	0.03475
	5.00	0.02936	0.01212	0.005398	0.009191	0.01932	0.03360	0.04676	0.05686	0.06191	0.06208	0.05814	0.05126	0.04228
V_{xy}	0.00	0	1.8019	1.8019	1.8019	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	1.1162	1.2211	1.2395	0.7636	0.07657	0.1913	0.1148	0.07424	0.05203	0.03839	0.02949	0.02328	0.01906
	0.50	1.3162	1.0395	0.7095	0.1765	-0.1114	0.1474	0.1455	0.1113	0.08417	0.06506	0.05147	0.04177	0.03438
	1.00	1.0041	0.7189	0.2486	-0.1520	-0.2437	-0.06026	0.05853	0.09180	0.09170	0.08269	0.07195	0.06205	0.05354
	1.50	0.7263	0.4704	0.1058	-0.1810	-0.2594	-0.1675	-0.05247	0.01898	0.05224	0.06382	0.06520	0.06219	0.05760
	2.00	0.5243	0.2997	0.05133	-0.1550	-0.2519	-0.1991	-0.1201	-0.04822	-0.0000801	0.02777	0.04204	0.04819	0.04985
	2.50	0.3855	0.2189	0.02811	-0.1248	-0.1987	-0.1960	-0.1493	-0.09281	-0.04464	-0.009828	0.01302	0.02697	0.03474
	3.00	0.2904	0.1590	0.01697	-0.09949	-0.1656	-0.1793	-0.1561	-0.1166	-0.07504	-0.04100	0.01481	0.003748	0.01629
	3.50	0.2242	0.1198	0.01094	-0.08007	-0.1380	-0.1592	-0.1510	-0.1257	-0.09434	-0.06393	-0.03801	-0.01751	-0.002053
	4.00	0.1772	0.09301	0.007601	-0.06527	-0.1154	-0.1338	-0.1406	-0.1262	-0.1036	-0.07880	-0.05542	-0.03525	-0.01880
	4.50	0.1428	0.07396	0.005385	-0.05423	-0.09748	-0.1217	-0.1285	-0.1217	-0.1064	-0.08727	-0.06739	-0.04892	-0.03280
	5.00	0.1174	0.06030	0.003780	-0.04537	-0.08289	-0.1065	-0.1164	-0.1147	-0.1052	-0.09108	-0.07498	-0.05879	-0.04386

表-6 (a) $\alpha=60^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
H_x	0.00		1.5708	1.5708	1.5708	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.06795	1.3877	1.5611	1.6873	1.6375	0.1961	0.04962	0.02038	0.01051	0.006183	0.003964	0.002700	0.001925
	0.50	-0.03453	1.0708	1.5071	1.7636	1.5956	0.5399	0.1801	0.07921	0.04182	0.02484	0.01600	0.01092	0.007799
	1.00	0.06075	0.7276	1.2854	1.5803	1.4464	0.9091	0.4782	0.2573	0.1492	0.09309	0.06163	0.04280	0.03089
	1.50	0.1494	0.6072	1.0495	1.3000	1.2579	0.9751	0.6551	0.4199	0.2717	0.1814	0.1254	0.08966	0.06599
	2.00	0.2097	0.5411	0.8636	1.0627	1.0757	0.9289	0.7167	0.5205	0.3707	0.2650	0.1924	0.1424	0.1076
	2.50	0.2433	0.4897	0.7253	0.8816	0.9192	0.8475	0.7129	0.5652	0.4343	0.3302	0.2514	0.1930	0.1499
	3.00	0.2583	0.4457	0.6217	0.7453	0.7912	0.7611	0.6782	0.5724	0.4667	0.3735	0.2968	0.2360	0.1885
	3.50	0.2618	0.4074	0.5434	0.6415	0.6881	0.6809	0.6315	0.5578	0.4761	0.3976	0.3280	0.2692	0.2209
	4.00	0.2586	0.3741	0.4803	0.5610	0.6050	0.6102	0.5824	0.5322	0.4707	0.4068	0.3465	0.2925	0.2460
	4.50	0.2518	0.3450	0.4304	0.4971	0.5375	0.5493	0.5353	0.5068	0.4563	0.4056	0.3548	0.3071	0.2641
	5.00	0.2432	0.3197	0.3897	0.4456	0.4821	0.4971	0.4919	0.4702	0.4371	0.3976	0.3557	0.3145	0.2758
H_y	0.00		-0.3321	1.5708	3.4736		2.7876	1.9029	1.4676	1.2006	1.0181	0.8848	0.7829	0.7023
	0.25	-2.1027	-0.6082	1.0905	2.5588	3.4241	2.7709	1.9686	1.5217	1.2419	1.0501	0.9102	0.8034	0.7193
	0.50	-1.0933	-0.4302	0.7071	1.6646	2.1838	2.2695	1.8517	1.4945	1.2403	1.0566	0.9191	0.8056	0.7282
	1.00	-0.3474	-0.1087	0.2854	0.6936	1.0546	1.3399	1.3792	1.2695	1.1292	1.0000	0.8902	0.7987	0.7225
	1.50	-0.1069	-0.009056	0.1265	0.3162	0.5542	0.7934	0.9393	0.9739	0.9410	0.8803	0.8129	0.7480	0.6886
	2.00	-0.02457	0.01346	0.06365	0.1597	0.3100	0.4846	0.6299	0.7151	0.7446	0.7372	0.7099	0.6737	0.6346
	2.50	0.003009	0.01577	0.03568	0.08855	0.1839	0.3068	0.4266	0.5185	0.5743	0.5989	0.6010	0.5892	0.5693
	3.00	0.01124	0.01359	0.02175	0.05304	0.1152	0.2014	0.2945	0.3770	0.4389	0.4786	0.4989	0.5047	0.5004
	3.50	0.01265	0.01088	0.01416	0.03383	0.07572	0.1370	0.2079	0.2769	0.3356	0.3799	0.4095	0.4265	0.4335
	4.00	0.01178	0.008611	0.009682	0.02276	0.05187	0.09615	0.1501	0.2062	0.2579	0.3014	0.3345	0.3576	0.3718
	4.50	0.01030	0.006745	0.006901	0.01590	0.03682	0.06947	0.1108	0.1560	0.2002	0.2400	0.2730	0.2986	0.3171
	5.00	0.008756	0.005360	0.005084	0.01152	0.02692	0.05154	0.08347	0.1196	0.1570	0.1922	0.2233	0.2492	0.2696
H_{xy}	0.00		2.7207	2.7207	2.7207	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.6538	1.6028	1.8888	1.7758	1.6384	0.6709	0.2982	0.1711	0.1121	0.07945	0.05942	0.04618	0.03696
	0.50	0.4738	0.8691	1.2248	1.2691	1.4150	1.0065	0.5510	0.3343	0.2234	0.1597	0.1200	0.09344	0.07485
	1.00	0.2124	0.2604	0.4943	0.7526	1.0124	1.0081	0.7747	0.5553	0.4026	0.3008	0.2317	0.1833	0.1484
	1.50	0.06737	0.06600	0.2190	0.4660	0.7074	0.8091	0.7490	0.6214	0.4959	0.3940	0.3159	0.2568	0.2117
	2.00	-0.002838	-0.0006097	0.1102	0.3006	0.4972	0.6202	0.6425	0.5930	0.5152	0.4358	0.3657	0.3071	0.2595
	2.50	-0.03323	-0.02277	0.06180	0.2035	0.3570	0.4736	0.5280	0.5264	0.4899	0.4384	0.3846	0.3343	0.2901
	3.00	-0.04433	-0.02878	0.03767	0.1442	0.2634	0.3646	0.4283	0.4519	0.4440	0.4169	0.3808	0.3422	0.3050
	3.50	-0.04654	-0.02886	0.02452	0.1063	0.1996	0.2848	0.3475	0.3825	0.3922	0.3833	0.3626	0.3360	0.3073
	4.00	-0.04488	-0.02678	0.01677	0.08112	0.1551	0.2262	0.2838	0.3225	0.3420	0.3454	0.3368	0.3209	0.3004
	4.50	-0.04166	-0.02429	0.01195	0.06351	0.1233	0.1826	0.2339	0.2724	0.2967	0.3077	0.3080	0.3003	0.2874
	5.00	-0.03807	-0.02171	0.008806	0.05096	0.09986	0.1497	0.1947	0.2309	0.2571	0.2727	0.2789	0.2776	0.2708

表-6 (b) $\alpha=60^\circ$

x/t	y/t	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
M_x	0.00		0.7854		-0.7854		0		0		0		0	
	0.25	0.09549	1.0945	0.4722	-0.3997	-1.2279	-0.1265	-0.02469	-0.008172	-0.003526	-0.001779	0	0	0
	0.50	0.2023	0.9699	0.6124	-0.2473	-0.8881	-0.3066	-0.08478	-0.03086	-0.01378	-0.007071	-0.004000	-0.002439	-0.001566
	1.00	0.2732	0.6242	0.4943	-0.03748	-0.4340	-0.3555	-0.1817	-0.08790	-0.04513	-0.02497	-0.01477	-0.009246	-0.006059
	1.50	0.2504	0.4026	0.3286	0.04900	-0.1969	-0.2490	-0.1867	-0.1177	-0.07138	-0.04387	-0.02779	-0.01827	-0.01234
	2.00	0.2040	0.2693	0.2205	0.06978	-0.08139	-0.1521	-0.1485	-0.1162	-0.08156	-0.05595	-0.03834	-0.02659	-0.01878
	2.50	0.1602	0.1879	0.1545	0.06789	-0.02670	-0.08725	-0.1058	-0.09699	-0.07828	-0.05949	-0.04409	-0.03247	-0.02401
	3.00	0.1253	0.1365	0.1130	0.05993	-0.001140	-0.04915	-0.07148	-0.07631	-0.06799	-0.05661	-0.04515	-0.03528	-0.02734
	3.50	0.09888	0.1027	0.08582	0.05134	0.01051	-0.02451	-0.04678	-0.05590	-0.05563	-0.05020	-0.04282	-0.03536	-0.02869
	4.00	0.07910	0.07990	0.06708	0.04399	0.01545	-0.01063	-0.02969	-0.04056	-0.04387	-0.04254	-0.03855	-0.03352	-0.02841
	4.50	0.06436	0.06321	0.05379	0.03725	0.01724	-0.002448	-0.01817	-0.02857	-0.03389	-0.03498	-0.03348	-0.03051	-0.02693
	5.00	0.05288	0.05135	0.04403	0.03197	0.01720	0.002776	-0.01044	-0.02015	-0.02560	-0.02815	-0.02837	-0.02701	-0.02476
M_y	0.00		3.2981	3.4641	1.7273	0	-0.7173	-0.3416	-0.2048	-0.1376	-0.09917	-0.07502	-0.05878	-0.04733
	0.25	0.04951	1.4210	1.8437	0.9028	-0.4741	-0.6418	-0.3497	-0.2145	-0.1447	-0.1042	-0.07862	-0.06144	-0.04934
	0.50	0.2774	0.6502	0.9341	0.6377	0.1329	-0.3113	-0.2729	-0.1926	-0.1376	-0.1019	-0.07813	-0.06140	-0.04977
	1.00	0.1819	0.1663	0.2491	0.3371	0.2842	0.06652	-0.06743	-0.09866	-0.09310	-0.07950	-0.06617	-0.05497	-0.04600
	1.50	0.08076	0.04329	0.08020	0.1714	0.2059	0.1372	0.04436	-0.01352	-0.03884	-0.04602	-0.04537	-0.04203	-0.03736
	2.00	0.03136	0.008658	0.03138	0.09097	0.1323	0.1209	0.07645	0.03192	0.001553	-0.01541	-0.02339	-0.02624	-0.02644
	2.50	0.01011	-0.001210	0.01433	0.05167	0.08431	0.09113	0.07462	0.04821	0.02395	0.006145	-0.005315	-0.01194	-0.01541
	3.00	0.001388	-0.003679	0.007414	0.03205	0.05502	0.06635	0.06269	0.04935	0.03314	0.01856	0.007265	-0.0004419	-0.005866
	3.50	-0.001979	-0.003869	0.004102	0.02015	0.03709	0.04803	0.05000	0.04428	0.03468	0.02414	0.01476	0.007190	0.001490
	4.00	-0.003122	-0.004400	0.002528	0.01259	0.02581	0.03512	0.03905	0.03863	0.03246	0.02554	0.01841	0.01204	0.006683
	4.50	-0.003699	-0.002889	0.001660	0.009570	0.01808	0.02606	0.03041	0.03181	0.02933	0.02457	0.01954	0.01444	0.009882
	5.00	-0.003132	-0.002451	0.001147	0.006902	0.01363	0.01925	0.02382	0.02693	0.02491	0.02238	0.01914	0.01544	0.01175
M_{xy}	0.00		1.3603		-1.3603		0		0		0		0	
	0.25	0.1281	0.6493	0.2726	-0.2482	-0.7823	-0.3137	-0.1043	-0.04741	-0.02569	-0.01553	-0.01031	-0.006976	-0.005006
	0.50	-0.07281	0.2194	0.3536	0.1978	-0.3231	-0.3750	-0.1761	-0.08857	-0.04995	-0.03078	-0.02027	-0.01765	-0.01013
	1.00	-0.1350	0.02149	0.2854	0.3173	0.04216	-0.1723	-0.1702	-0.1187	-0.07856	-0.05287	-0.03668	-0.02628	-0.01937
	1.50	-0.09294	0.01941	0.1897	0.2413	0.1239	-0.02356	-0.08906	-0.09256	-0.07623	-0.05849	-0.04416	-0.03362	-0.02567
	2.00	-0.05198	0.02661	0.1273	0.1692	0.1228	0.03819	-0.02501	-0.05235	-0.05654	-0.05095	-0.04273	-0.03485	-0.02820
	2.50	-0.02571	0.02805	0.08920	0.1196	0.1028	0.05662	0.01052	-0.01974	-0.03386	-0.03740	-0.03260	-0.03167	-0.02729
	3.00	-0.01060	0.02639	0.06523	0.08701	0.08229	0.05737	0.02670	0.001214	-0.01518	-0.02345	-0.02624	-0.02584	-0.02399
	3.50	0.002259	0.02366	0.04955	0.06526	0.06541	0.05210	0.03244	0.01295	-0.002041	-0.01180	-0.01715	-0.01929	-0.001949
	4.00	0.002242	0.02105	0.04473	0.05048	0.05235	0.04531	0.03270	0.01869	-0.006285	-0.003110	-0.009352	-0.01297	-0.01466
	4.50	0.004693	0.01821	0.03105	0.03979	0.04242	0.03878	0.03079	0.02083	0.01110	0.002864	-0.003357	-0.007590	-0.01016
	5.00	0.005711	0.01594	0.02542	0.03214	0.03475	0.03317	0.02801	0.02079	0.01356	0.006709	0.001040	-0.003236	-0.006229

表-6 (c) $\alpha=60^\circ$

x/l	y/l	1.0	0.5	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5	-4.0	-4.5	-5.0
V_x	0.00		2.7207	2.7207	2.7207	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	1.8515	2.7495	2.7039	2.5765	0.8669	-0.04050	-0.01791	-0.008599	-0.004777	-0.002939	-0.001940	-0.001352	-0.0009822
	0.50	1.8225	2.6547	2.6105	2.2547	0.8814	0.01199	-0.03395	-0.02281	-0.01444	-0.009508	-0.006548	-0.004686	-0.003469
	1.00	1.7052	2.2449	2.2264	1.7526	0.9052	0.2505	0.02832	-0.01884	-0.02385	-0.02051	-0.01634	-0.01282	-0.01010
	1.50	1.5388	1.8516	1.8179	1.4516	0.8988	0.4183	0.1501	0.03762	-0.002743	-0.01524	-0.01765	-0.01659	-0.01464
	2.00	1.3632	1.5395	1.4959	1.2383	0.8632	0.5075	0.2567	0.1139	0.04204	0.008465	-0.006259	-0.01205	-0.01371
	2.50	1.2019	1.3007	1.2563	1.0744	0.8116	0.5449	0.3303	0.1840	0.09459	0.04358	0.01571	0.001013	-0.006383
	3.00	1.0628	1.1179	1.0769	0.9449	0.7551	0.5527	0.3747	0.2484	0.1437	0.08201	0.04357	0.02025	0.006474
	3.50	0.9457	0.9759	0.9395	0.8407	0.6996	0.5457	0.3978	0.2766	0.1842	0.1182	0.07289	0.04273	0.02307
	4.00	0.8479	0.8637	0.8319	0.7558	0.6479	0.5259	0.4065	0.3010	0.2152	0.1492	0.1006	0.06582	0.04148
	4.50	0.7661	0.7732	0.7455	0.6854	0.6012	0.5041	0.4058	0.3239	0.2375	0.1743	0.1250	0.08772	0.06013
	5.00	0.6971	0.6991	0.6750	0.6265	0.5592	0.4808	0.3995	0.3218	0.2525	0.1936	0.1455	0.1073	0.07785
V_y	0.00		3.8193	2.7207	1.6221	-1.6094	-1.0986	-0.8473	-0.6931	-0.5878	-0.5108	-0.4520	-0.4055	-0.3674
	0.25	2.7421	2.6035	1.8888	0.7750	-0.4488	-0.8319	-0.7735	-0.6650	-0.5753	-0.5049	-0.4492	-0.4043	-0.3674
	0.50	1.8904	1.6738	1.2248	0.4643	-0.001599	-0.2760	-0.4498	-0.4704	-0.4472	-0.4146	-0.3821	-0.3484	-0.3263
	1.00	1.0171	0.7381	0.4943	0.2749	0.2077	0.1292	-0.02998	-0.1474	-0.2093	-0.2368	-0.2460	-0.2457	-0.2405
	1.50	0.5782	0.3599	0.2190	0.1721	0.1965	0.1972	0.1282	0.03632	-0.03988	-0.09274	-0.1264	-0.1467	0.1583
	2.00	0.3437	0.1922	0.1102	0.1077	0.1506	0.1805	0.1647	0.1153	0.05710	0.005275	-0.03552	-0.06565	0.08708
	2.50	0.2141	0.1114	0.06180	0.06934	0.1097	0.1466	0.1562	0.1376	0.1024	0.06274	0.02583	-0.005424	0.03052
	3.00	0.1395	0.06909	0.03767	0.04632	0.07950	0.1146	0.1344	0.1339	0.1170	0.09126	0.06275	0.03540	0.01114
	3.50	0.09474	0.04535	0.02452	0.03210	0.05833	0.08889	0.1113	0.1202	0.1157	0.1015	0.08198	0.06059	0.03968
	4.00	0.06669	0.03125	0.01677	0.02308	0.04355	0.06906	0.09019	0.1040	0.1070	0.1013	0.08949	0.07423	0.05765
	4.50	0.04847	0.02225	0.01195	0.01697	0.03316	0.05420	0.07410	0.08859	0.09566	0.09566	0.08981	0.07994	0.06773
	5.00	0.03614	0.01640	0.008306	0.01284	0.02565	0.04308	0.06053	0.07459	0.08401	0.08757	0.08603	0.08050	0.07219
V_{xy}	0.00		1.5708	1.5708	1.5708	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	1.5144	1.1251	1.0905	0.8255	-0.1910	0.1679	0.1122	0.07346	0.05143	0.03799	0.02922	0.02318	0.01885
	0.50	1.3603	0.9636	0.7071	0.2708	-0.2698	0.04814	0.1183	0.1006	0.07880	0.06190	0.04948	0.04032	0.03342
	1.00	1.0464	0.7188	0.2854	-0.1339	-0.3392	-0.1825	-0.01459	0.05244	0.06943	0.06875	0.06273	0.05565	0.04894
	1.50	0.7779	0.5000	0.1265	-0.1928	-0.3306	-0.2665	-0.1360	-0.03944	0.01298	0.03728	0.04678	0.04902	0.04780
	2.00	0.5757	0.3474	0.06365	-0.1742	-0.2903	-0.2778	-0.1975	-0.1124	-0.04893	-0.008516	0.01509	0.02795	0.03435
	2.50	0.4314	0.2481	0.03558	-0.1438	-0.2445	-0.2595	-0.2174	-0.1550	-0.09689	-0.05188	-0.02028	0.006562	0.01395
	3.00	0.3297	0.1831	0.02175	-0.1165	-0.2032	-0.2315	-0.2146	-0.1738	-0.1274	-0.08547	-0.05187	-0.02671	-0.008633
	3.50	0.2574	0.1394	0.01415	-0.09470	-0.1690	-0.2026	-0.2012	-0.1773	-0.1433	-0.1081	-0.07656	-0.05053	-0.03011
	4.00	0.2050	0.1091	0.009682	-0.07776	-0.1414	-0.1760	-0.1810	-0.1722	-0.1491	-0.1213	-0.09392	-0.06936	-0.04861
	4.50	0.1664	0.08736	0.006901	-0.08472	-0.1193	-0.1529	-0.1659	-0.1625	-0.1479	-0.1273	-0.1049	-0.08306	-0.06341
	5.00	0.1373	0.07137	0.005084	-0.05449	-0.1016	-0.1331	-0.1489	-0.1511	-0.1429	-0.1284	-0.1167	-0.09220	-0.07448

以上の部分に対してコンソリデーショングラウトを行なった。

〔2〕 鳴子ダム

このダムは高さ 85m のアーチダムで、両岸とも閃緑花崗岩からなっているが、右岸には河に平行な方向に風化した石英粗面岩の岩脈が入っており、その境には凡そ 50cm ～ 1m の粘土層をはさんでいた。このダムの基礎処理を実施するにあたり、この粘土層を置き換えすべきか否かが問題となったが、第一章にのべた解により粘土層にそっての剪断応力を計算し、粘土層の状況からみて、剪断応力が 5kg/cm^2 以上の所はコンクリートで置き換えた。

〔3〕 そ の 他

以上述べた例の他に室牧ダム、綾北ダムのコンソリデーショングラウトの範囲決定に、湯田ダムの小規模な粘土層の処理の範囲決定にこの解を用い、室牧ダムでは剪断応力が 5kg/cm^2 、綾北ダムでは 3kg/cm^2 の範囲までグラウトを行った。

以上、今までにこの解を適用した例について述べたが、ここに注意すべきことはこの解により岩盤内の応力

分布を求めても、どの程度の応力の範囲にどのような処理をすべきかということは実際の状況により主任技術者の判断により決めなければならないということである。しかも、この解は弱点のない均質な二次元の弾性体と仮定しているので実際の応力分布はある程度これとは異なってくると思われる。

とくに断層の処理が必要か否かを検討する場合、あるいは山全体の安定を検討する場合には、三次元的な力の伝播が考えられるので *Rocky Pillar* の計算等三次元的な計算によっても検討すべきであろう。

しかし、少くとも適当な仮定のもとに、岩盤内の応力分布を求めることによりどの様な部分により力がかかるか、従ってどのような部分に対してとくに基礎処理を念に行うべきかということが明らかにし得ると思われる。

付 記

最後に、実際の計算例を提供して下さった鳴子ダム、二瀬ダム、湯田ダム、綾北ダム、室牧ダムの諸工務所の方々へ感謝の意を表する。

狩野川放水路河口部模型実験報告

吉川秀夫*・芦田和男**・丸田和也***・丸野喬***

(昭和35年12月)

要 旨：

狩野川放水路計画に伴う放水路第二トンネル出口部の水理試験結果と放水路の放流水の海に及ぼす影響について模型実験を行なった結果についての報告である。

1. 結 言	(1)	[2] 実験 - 5	(9)
2. 実験方針および模型	(1)	[3] 実験 - 6	(13)
[1] 実験方針	(1)	[4] 実験 - 7	(14)
[2] 模型	(2)	[5] 実験 - 8	(15)
3. 計画河床案実験	(2)	[6] 実験 - 9	(17)
[1] 実験 - 1	(4)	[7] 実験 - 10	(17)
[2] 実験 - 2	(4)	[8] 実験 - 11	(18)
[3] 実験 - 3	(6)	[9] 実験 - 12	(20)
4. 岩盤地形を考慮した河床案実験	(6)	5. 結 語	(21)
[1] 実験 - 4	(7)		

1. 結 言

さきに当研究室において沼津工事々務所の依頼により狩野川放水路トンネル部の水理試験****を行なったが、その際放水路放流水の海岸部に及ぼす影響について懸念された。すなわち、放水路末端より射流状態で海に突入、あるいは跳水現象を生じて湾内に流入するため湾内水位の振動および強い沿岸流を生ずる危険性があるのではないかと考えられた。

昭和33年9月26日の狩野川台風のために狩野川は大水を生じ、計画高水流量を大幅に突破する出水を見た。このために計画高水流量が改訂され、前計画では計画高水流量 $1960\text{m}^3/\text{s}$ の内 $1000\text{m}^3/\text{s}$ を放水路に分流することになっていたが、新計画では計画高水流量を $4,000\text{m}^3/\text{s}$ と改訂され、その内 $2,000\text{m}^3/\text{sec}$ を放水路に分流することとなった。

したがって放水路放流水の海岸部に及ぼす影響は前計画より一層大きくなると考えられるので、この合理的処理を行なう必要から放水路末端部の水理試験を行なうことになった。

さらに前計画より放水路計画流量が増したため放水路

全般にわたる水理計画を行なう必要が生じた。計画としては前論文に述べたように放水路途中に二カ所トンネル部があり、前計画では2本並列のトンネルで処理する予定で一部工事中であったが、新計画では計画高水流量の増大に伴い、前計画と同じ断面のトンネル3本並列で流すことになった。したがって分派点の水理設計およびトンネル部への出、入口の水理設計を行う必要が生じた。

この内分派点の水理は前論文****に述べた水理計算により概略の水理状況を推定し、根本的な点においてはほとんど問題のないことを確かめ、詳細かつ具体的な設計は現在模型実験を行なって決定しつつある。この結果については追って発表する予定である。

一方トンネル部出、入口部の水理は前論文において基本的に考察されているので、その結果を用いて水理計算を行なうことができ、また形状の設計をすることができ

る。したがって本文では第二トンネル出口部および海岸への影響について実験された結果について述べる。

2. 実験方針および模型

(1) 実験方針

* 工 地 河川部河川研究室員

** 河川部河川研究室主任研究員

*** 中部地誌 沼津工事々務所技官

**** 吉川秀夫、芦田和男、川畑昭至：断面変化に伴う水路の水理設計に関する研究——狩野川放水路トンネル部の水理試験——土木研究所報告、第102号、P.49、昭和34年3月

***** 佐藤清一、吉川秀夫、川畑昭至：河川の分派に関する研究(4)——狩野川放水路の水理施設設計——土木研究所報告、第101号、P.113、昭和34年3月

i) 第二トンネル出口から海に至る遷移部の水流の状況を模型により観察し、順次改良した形状について実験し、最もよい形状を求める。

ii) 前論文の実験結果第二トンネルのそれぞれのトンネルから出た水流を別々に海に放流することにより遷移部衝撃波を是正することができることが知られたので、この実験においても三本のトンネルの出口にトンネル相互間にそれぞれ導流壁を設け、経済的にして有効な導流壁の形状を実験的に求める。

iii) 第二トンネルより出た水は非常に高速流であるが、その高流速の水流が海に突入した際に生ずる跳水、海面の振動および湾内に生ずる渦流などの現象を観察し、これらの現象を極力小さくするような手段(たとえば湾内海底にある突起岩盤の掘削、海岸法線の改良など)を実験的に見出す。

(2) 模型

i) 模型範囲および縮尺

模型は前記の事項を明らかにするために第二トンネル直上流の開水路部より江ノ浦全体の範囲にわたって製作された。トンネル部の水理的問題点は前回の実験により明らかにされ、本実験において検討する必要はないけれどもトンネル出口より海に至る間の遷移区間の水理現象を明らかにするために、この区間の水流の状況を現地のものと相似ならしめるため、トンネル部を模型範囲に取り入れて実験が行なわれた。

模型は縦、横同一縮尺で歪めないうで製作され、縮尺は1/40とした。

ii) 粗度係数

本模型実験に関係する抵抗法則としては底面および側壁による摩擦抵抗と断面変化などによる形状抵抗とがある。摩擦抵抗法則としては Manning の法則を考え、Manning の粗度係数が相似法則を満足するようにすればよい。第二トンネル内、出口遷移部、および海の部分の実物の粗度係数は不明であるので、トンネル内の計画粗度係数($n=0.022$)にすべて等しいとして、相似法則を満足するように模型粗度が決定された。実物の粗度係数が場所によりあるいは形状によりいく分変わることも考えられるが、本実験では形状抵抗が相当大きな部分を占めると思われるので、多少の模型粗度係数の変化は実験結果の精度にはほとんど影響を持たないと思われる。

一方形状抵抗は従来の研究^{*}により流れの Froude 数と水路形状により定まることが知られているので、実物に忠実な模型を作って Froude の相似法則に従って、実験をすることにより求めることができる。

したがって、本実験では Manning の粗度係数を次項に述べる換算率で換算した値を用い、現地地形の1/40の

忠実な形状を作り Froude の相似率を用いて実験を行なった。

iii) 模型換算率

模型の実物に対する換算率は

$$V_m = (1/40)^{1/2} V_p = \frac{1}{6.325} V_p$$

$$m_m = (1/40)^{1/2} m_p = \frac{1}{1.849} m_p$$

$$Q_m = (1/40)^{3/2} Q_p = \frac{1}{10120} Q_p$$

である。ここに添字 m は模型、 p は実物を表わす。

iv) 実験

上記の換算率に基づいて模型実験が行なわれたが、特にトンネル出口より海に至る間の遷移区間の河床を地下岩盤の位置を考慮せずトンネル内の河床のほぼ延長線について考える場合と、工事上のことも考えて岩盤位置を考慮した河床についての実験との二つに大別される。本文では計画河床案実験と岩盤地形を考慮した河床案実験と名付けることにし、以下それぞれについて実験結果を述べる。

3. 計画河床案実験

実験は最初トンネルおよび海岸を含む模型全体で水流のおおよその現象を把握し、しかるのち主として問題があると考えられる遷移部と海岸線の詳細は実験結果より知られた問題点を解決するような水理的、経済的な改良設計案について順次実験し、最良案を決定する。なお、

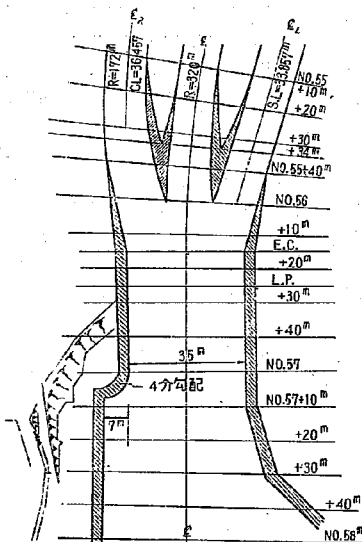


図-1 実験-1 平面図

* 吉川秀夫、芦田和男、川端昭至：断面変化に伴う水路の水理設計に関する研究 土木研究所報告 第102号 P.49,昭和34年3月

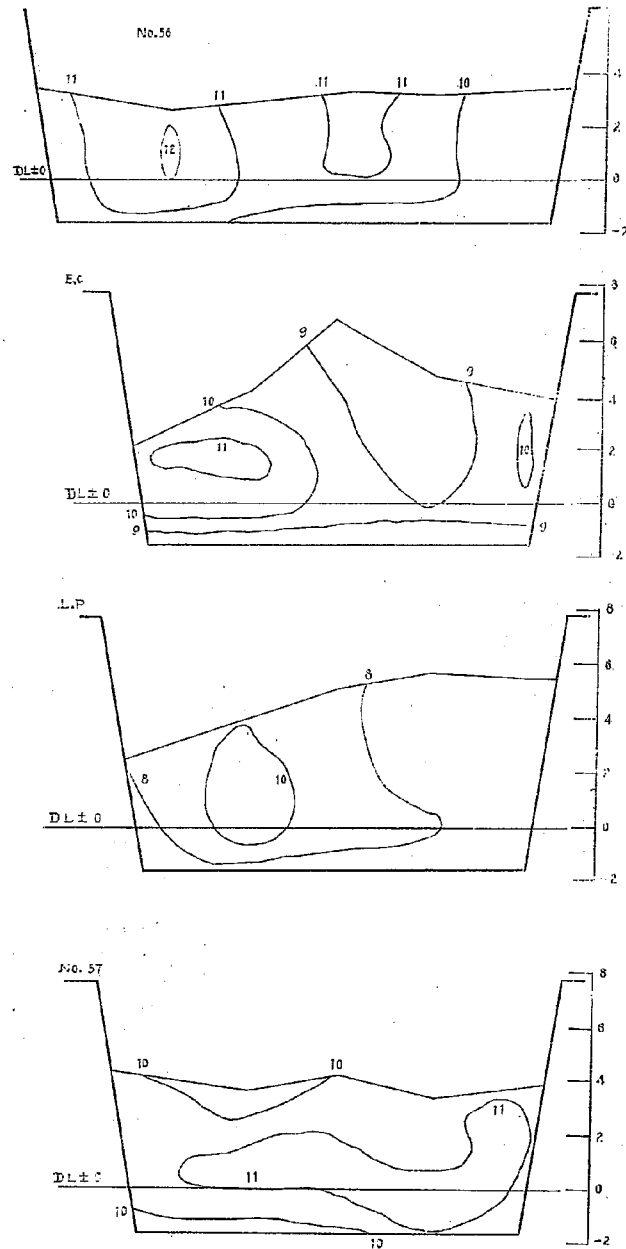


図-2 流速分布図 (実験-1)

本分に示す数字はすべて実物に換算してある。

(1) 実験-1

(形状) — 右側トンネルはNo.55+40までトンネル中心線曲率半径(172m)で、中央トンネルはNo.55+40までトンネル半径(320m)で左側トンネルはNo.55+40まで直線で、側壁垂直の開水路を作り、これをEC~No.57間の底巾35m側壁こう配4分の台形水路と取り付ける。No.55+10のトンネル出口よりNo.56間の各トンネル出口に図-1に示すような導流壁を設け右岸はNo.57から法線を右寄りに7m下げ、海岸部岩山まで法こう配4分の直線護岸に取り付ける。左岸はNo.57から既設海岸線に取付け海底は現地のままとした。

この形状に対し実験を行なった結果、各中心線のほぼ交点であるEC付近に高い衝撃波を生じ、水位の頂点はDL+7.0mに達する。さらにLPでは横断方向の水平の傾斜がほぼなだしくそのまま海に突入する。これは左側トンネルの出口付近が右側に比べ直線的に側壁に取付いていることと、左トンネル内流速が右側と比べやや速いため別離を生じた流線が右側に押されるものと思われる。

横断面内水位および流速は図-2のごとくで最大流速はNo.56付近に生じ $Q=2,000\text{m}^3/\text{s}$ の場合 $U_{\text{max}}=12.13\text{m/s}$ である。なお河床付近の流速が10m/s程度であることは河床維持上注意する必要がある。

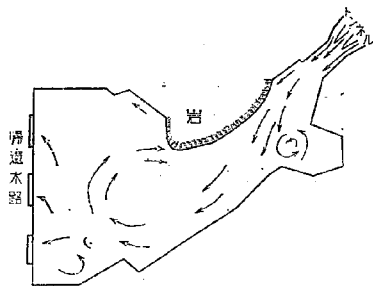


図-3 湾右岸部 (No.58~No.63付近) 岩山掘削前の湾内流況

次に海に対する水理現象を観察すると、不均一な流速分布と高流速のまま海に突入した流水は一たん突入の際跳水現象を起こし突入した流れは右岸の直線海岸に沿ってNo.59から海に突出した岩地帯に激突し、その主力は大きく左に迂回して左岸No.61付近に再び衝突して二分され、その一つは湾外に他の一つは大きな渦流となって逆流しNo.60から再び本流に合流して流下する。

なお図-3は湾内流況を示したものである。

以上の結果No.59付近に突出した岩を除去することにより湾内の渦流、水面振動の現象を是正することができ

と思われる。

(2) 実験-2

(a) 実験-1において現われた衝撃波、流線の別離および横断方向の水面の傾斜を是正するには遷移区間の境界をなるべく曲げないでしかも水路を別々に海に放流すればよいことは明らかである。したがって、ここでは実験-1と同様、中心線曲率半径320mでECまで伸ばし、ECより下流はその接線の延長とする。前述のごとく3水路流水を別々に海に放流させるため導流壁をNo.56+40まで伸ばすと同時に水路(3水路ともNo.56+40まで12m

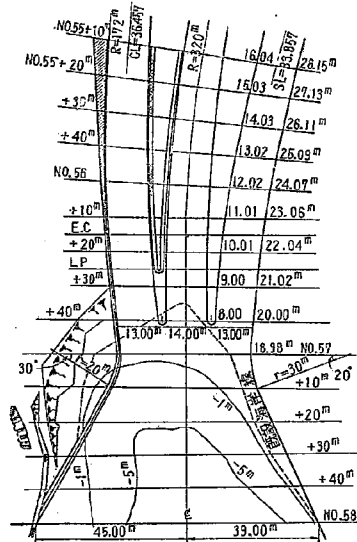


図-4 実験-2 平面図

巾開水路) 導流壁(先端厚2m)のためにNo.56+40の点で水路巾は40mとなる。このNo.56+40で中心線に対し対称に40m巾の水路とし、中心線に対し対称な緩和曲線でトンネル出口部と結ぶ。なお、水路側壁は垂直とする。また右岸の海岸線はNo.57地点より半径20mの

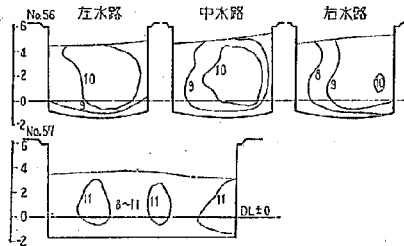


図-5 流速分布図 (実験-2)

曲率側壁部分から No. 58 の既設道路に直線的に取付け左岸は半径30mの曲率護岸部分から No. 58 の既設海岸線に直線的に取り付けた。(図-4参照)

上に述べた形状に対して実験を行なった結果開水路内の衝撃波、流線の剝離および横断方向のはなはだしい水位の傾斜は是正され、横断面内の流速もトンネル内部とほとんど変わらず右側トンネルを除けばほぼ均等に分布している。したがってトンネル内の常流は出口水路遷移部の断面積のわずかな増加によっていく分流速を増し水位はトンネル内水位より約1m下る。(図-5参照)

流下した流れは導流壁終端から射流となってNo. 57+20で跳水を起し海に突入する。突入後の流れの状況は実験1の場合と同様である。

(b) 前実験の結果突入部(海)の跳水現象以外には遷移区間内水理現象中特に顕著な問題はない。したがって

ここでは突入後海岸に対する影響を少なくするために右岸No. 59 付近より湾内に突出している岩盤を掘削し、渦流、逆流、振動の現象を是正し、流水の主力を湾内中央最深部に放流させるため No. 59~No. 63に至る岩盤をDL-7.0mの部分まで切り取り実験を行なった。その結果流水の主力は右岸掘削部分に沿って流れNo. 67 付近から湾外に緩やかな流れとなって進行し、一部は左岸No. 67 付近の突出した海岸線の影響とDL-7.0m以下の切り取らない突出した岩盤の影響により緩やかな流れとなって海岸線沿いを逆流する。(図-6参照)

全般的に湾内水理現象を実験-1と比較し検討すると、湾内突入箇所の振動および渦流の現象は是正され、逆流もほとんど緩やかな流れとなって進むにつれて消滅するため、岩盤を掘削することにより海岸に対する影響を少なくすることができる。掘削前後の横断流速分布を比較すると図-7のようである。

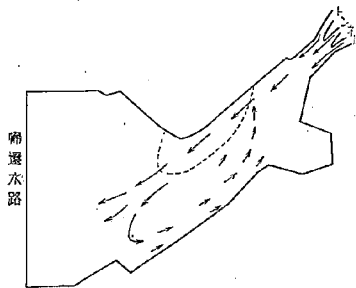


図-6 湾右岸部岩山をDL-7.0mまで切り取後の湾内流況

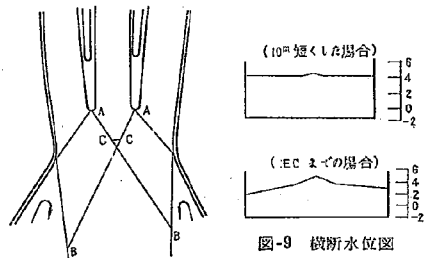


図-8 衝撃波線

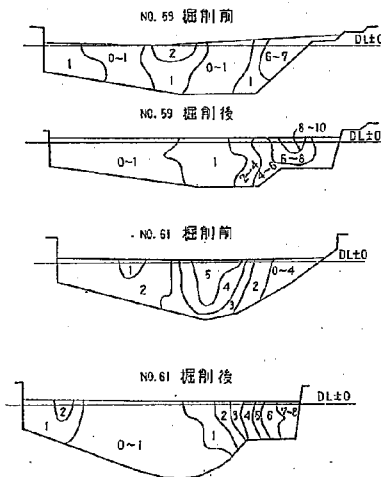


図-7 岩掘削による湾内流速分布の変化

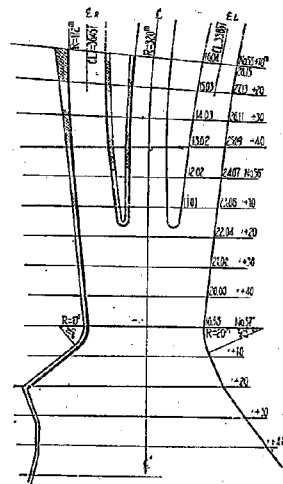


図-10 実験-3 平面図

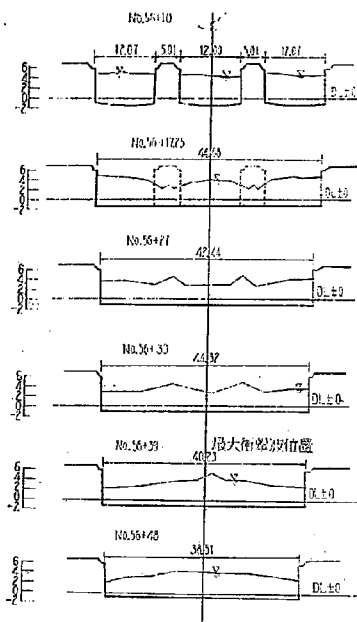


図-11 実験-3 水位

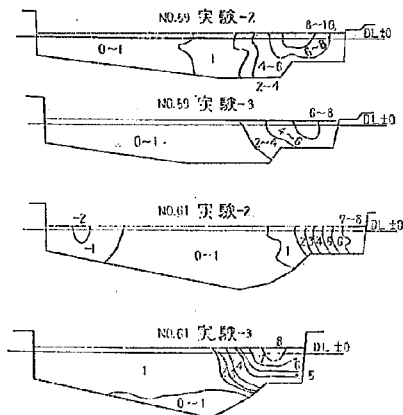


図-12 湾内横断面内流速分布比較図

(c) 前実験で開水路遷移区間にはほとんど問題も生じなかったため、この実験では導流壁を順次短くして水理的に問題の起こる範囲を実験的に求めてみる。図-8に示すような巾が拡がる水路では導流壁から対称な衝撃波がでるために水面は中心部が高く両側壁付近で低くなる。導流壁を10m短くしNo.56+30までにした場合中央の衝

撃波はNo.57線上で水面より約1.5mに達し、さらに10mで短いECまでになるとNo.56+40付近にやや顕著な衝撃波を生ずる。(図-9参照)これは導流壁長さを短くするほど水流の拡がりが大きくなるためである。また導流壁を短くするほど衝撃波の生ずる位置が上流に移るために波の頂点の高さは高くなる。したがって、導流壁の長さは前実験の程度、あるいはせいぜいそれより10m程度短くしたものが望ましく、短くするほど好ましくないことが知られる。

[3] 実験-3

湾内に入射した流水の逆流を是正するため遷移部水路をさらに右岸よりに寄せた場合どのような変化が起こるかを実験的に求めるため、中央トンネルNo.55+40の中心から接線方向に出した線に対称な水路を造り導流壁をNo.56'+15までとした。(前実験EC線上とほとんど同箇所)No.57付近から既設海岸への取り付けは右岸は半径10mで内角50°の点から既設海岸に直線的に取り付け、左岸は半径20m内角25°の円で既設護岸に取り付けた。(図-10参照)以上の結果、横断水位図に示すように(図-11参照)、導流壁先端から生ずる衝撃波のため、横断方向水面形は多少乱れるようであるが水位はそれほど高くはならない。

湾内の表面流向は実験-2bとほとんど同様であるため湾内横断流速を比較すると図-12のようである。

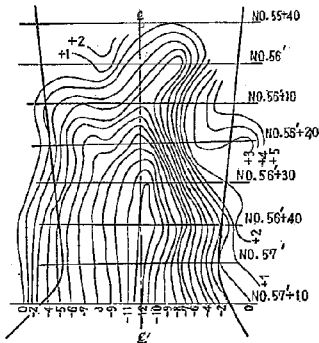


図-13 遷移部岩盤等深線図

以上の結果、特に顕著な効果は認められないが、流速分布から推測すると、実験-2より水路をやや右岸寄りにした方が良好であると考えられる。

なお、No.57付近から既設海岸への取り付けは当実験の断面が急拡する射流拡大大路となるために、実験-2より不良である。

4. 岩盤地形を考慮した河床案実験

以上の実験-1~3の場合には、現地施工に対して関係

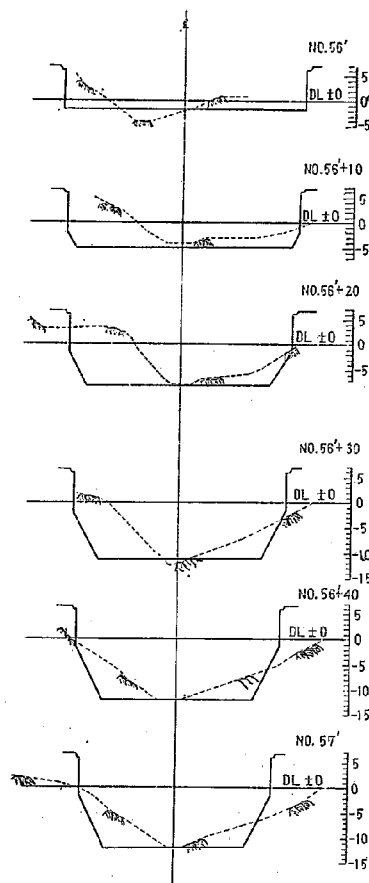


図-15 岩盤横断面および実験-4 横断面図

トは導流壁先端部であるNo. 56'でなくなるようにトンネル出口より徐々に消してゆく。）

一方、湾右岸岩盤掘削はDL-7mの状態で行なう。

なおNo. 57'の河床はNo. 58'の現状河床にすり付ける。

(b) (a)の場合と同様であるが、ただ導流壁厚をNo. 55+40より徐々に細めて先端(No. 56')厚さ3mにした。これは導流壁先端部の厚いことに原因して起こる衝撃波を小さくするために行ったものであるが、結果的には衝撃波は小さくなるが、その他についてはいじりしい変化は見られなかった。なお、導流壁先端部の厚いことに基因して起こる衝撃波は河床の急降下のために格別橋梁への影響は見られない。

(c) 側壁法線形状は(a)と同一であるが、導流壁のみ極端に短くNo. 55+20とトンネル出口より10m出した状態とする。これにより導流壁が長い場合と短い場合におけ

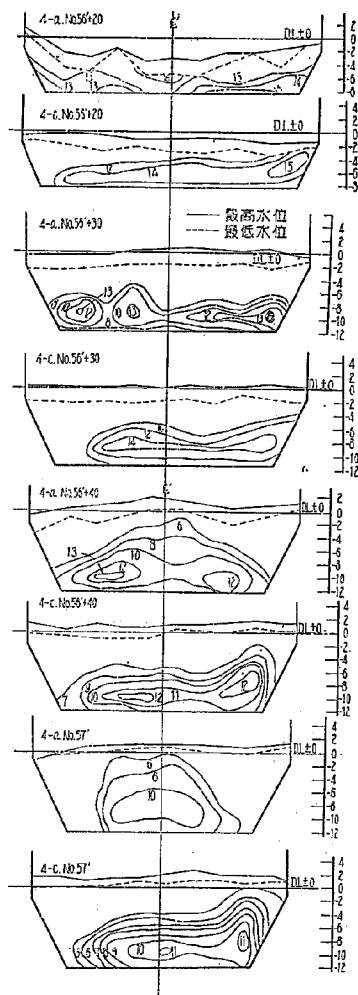


図-16 導流壁長短の水理状況変化(実験-4)

る水理的状態の変化を観察し、導流壁の効果を比較検討する。

なお、下流潮位は大潮最大潮位 DL+1.262mの状態で行なう。

(d) 形状は(c)と同一で、ただ下流潮位を小潮最小潮位 DL-1.398mとして行ない、潮位のみ変えただけである。

以上の実験4-aと4-cの遷移部実験資料を比較することにより導流壁長さの長短による水理的状態の変化が明らかとなり導流壁の効果を検討することができる。すなわち、実験結果より次の諸点が指摘できよう。(図-16, 17, 18参照)

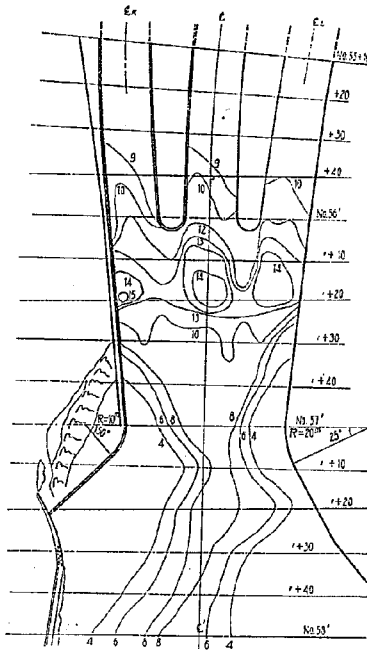


図-17 (1) 実験-4 a 流速分布図

① 導流壁を極端に短くした場合、トンネル出口より水路は急激に拡大し、これにともない導流壁先端より大きな衝撃波を生ずる。しかし、この衝撃波は橋梁架設位置よりかなり上流部に存在するため、橋梁への影響を考える時はまず問題はない。

② 曲線水路に基因して導流壁を短くした場合、長い場合に比べ流水（流心）は右に寄る傾向を生ずる。

③ 橋梁架設付近（No. 56+20～No. 57'）の水位は大差ないが、流速においては(a)の場合の方が平均最大点がいく分下流に生ずる（これは跳水位置の後退にともない射流区間が長くなることに原因していると思われる）と同時にその値もいく分大きくなる。

④ (c)の場合導流壁を取り除いた部分においては(a)に比べ流速は大きくなる。

以上の諸点を指摘できたわけであるが、やはり導流壁は曲線水路によって流水が右に偏るという現象を考えて長く伸ばした方が結果的に良いように思われる。しかし、その他の面においてはそれほど大きな差異はみられないようである。

〔2〕 実験-5

前実験-4のように台形水路にするためには非常に多量の岩盤掘削が必要となり必然的に工費もかかる。また、

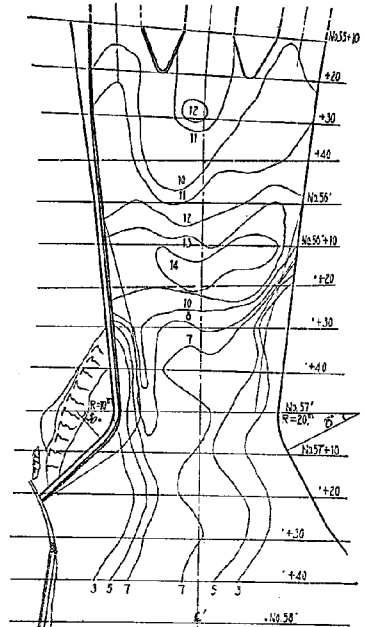


図-17 (2) 実験-4 c 流速分布図

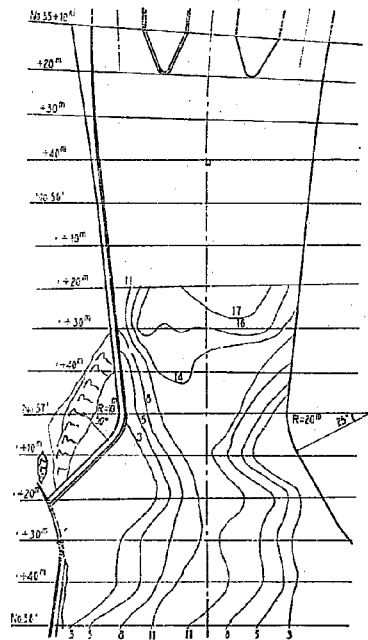


図-17 (3) 実験-4 d 流速分布図

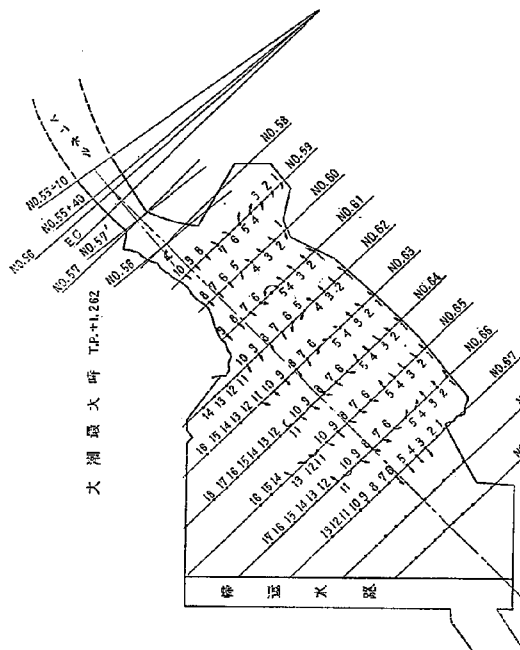


図-18 実験-4 湾内流向図

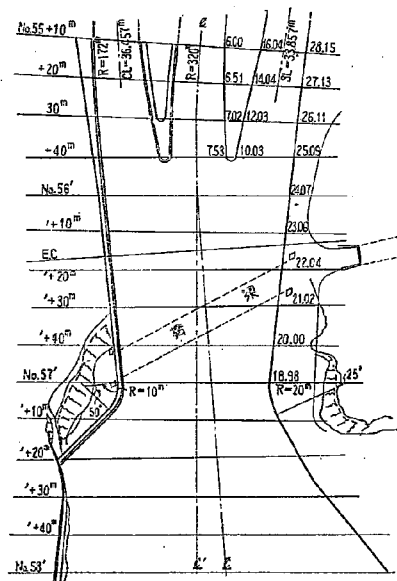


図-19 実験-5, 7, 8 平面図

この遷移部内では非常に高流速となるため、岩質により河床洗掘のおそれ多量にあるので、強いて多額の経費をかけて多量の岩掘削をして台形水路にしろとも放流に支障ない程度の掘削にとどめ、大体的な岩盤を露出した河床状態でもよいのではないかと考えられるので、この案にしたがって実験を行なう。

① 平面形状

側壁法線形状は実験-4と同様であるが、導流壁を岩盤位置の関係でNo. 55+40までとし導流壁先端厚さを衝撃波を小さくする目的で2.5mとして導流壁は3水路等巾拡大水路とするように比例配分による緩和曲線で施工する。(図-19参照)

② 河床形状

導流壁先端(No. 55+40)まではトンネル内河床を延長し、それより下流部においてはトンネル内河床(こう着1/400)延長位置より上部の岩のみ掘削し、岩盤がその位置より低ければそのまま岩盤を河床とする。なお、河床(岩盤)の低い側壁はDL-1.5mより下部に5分の法こう配を付ける。これは導流壁先端の河床位置が大体DL-1.5mであることと壁を高い垂直壁にすることの施工上の困難を考慮してのことである。

③ 湾右岸部岩山掘削状態

湾右岸部岩山の掘削深は前実験-4においてはDL-7mとして行なったが、掘削多量で多額の経費を要するため一段と浅いDL-4mの状態で行なうこととした。(図-20参照)

なお実験-5以後においては新たに下流潮位は最高DL+1.372m最低DL-1.633mを採用する。(三島測候所資料による)。

また実験-5以後で使用するA₁, A₂の記号は、それぞれ下流潮位が最高および最低の状態での資料で、河口部および湾内形状は変わらない。

(A₁)の場合は(A₂)に比べ流況は全体的にみて良いようであったので、状態の悪い(A₂)の場合のみの資料をとった。

(1) 遷移部

実験-4-dとは、導流壁形状および下流潮位に違いはあるが、河床形状の相違による水理的な変化の大体の傾向を把握する意味では、それほど支障がないと思われるので、実験-4-dと水位、流速、流況、などにつき比較検討してみる。(図-21, 22参照)

① 縦断水位は実験-4-dにおいては導流壁先端付近より多量の岩掘削による河床の低下にともなっていちじるしく下る。すなわち、落込の度合が大きく、その水位

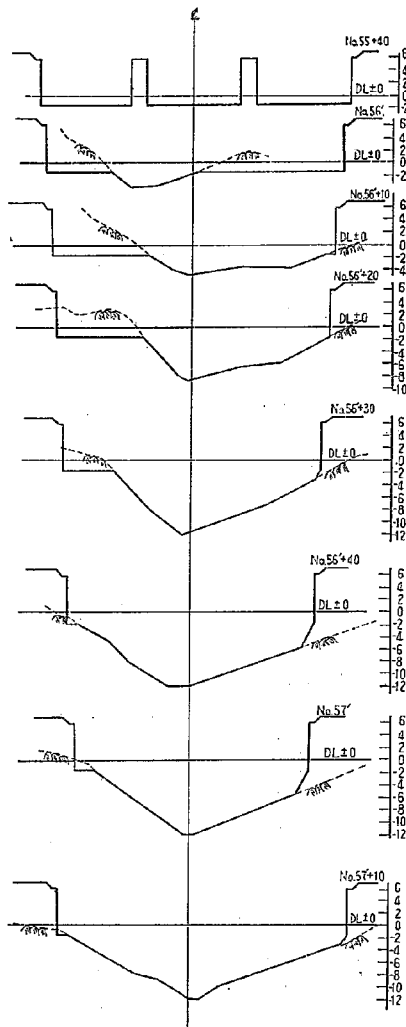


図-20 岩盤横断面図および実験-5 横断面図

最低点は実験5-A₂ に比べ非常に低くなる。一方実験5-A₂ においては全体的に河床は高いので水位の低下の度合も小さく水位最低点もそれ程低くない。またNo. 57' + 10 付近においていちじるしい水位上昇を生ずる。

- ③ 流速は両者とも射流最下端 No. 56' + 30 において最大であり、実験4-d は実験5-A₂ に比べその最大流速は2 m/sec程度大きく現われる。また流速の減少は実験4-d の場合の方が流積の増大などのために大きい。

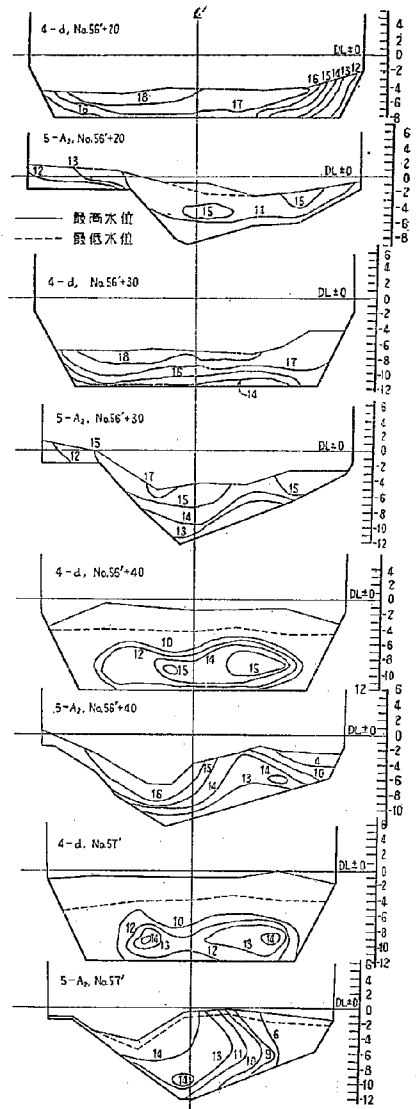


図-21 (1) 遷移部河床形状の差異による水理状態変化

- ③ 水位は横断方向には河床の不規則のために非常に大きな変化を示す。

また、流速分布についても同様、河床の不規則に原因して分布状態は不規則なものとなる。特に河床の高い左岸部より低い中央部への流水の落ち込みにより部

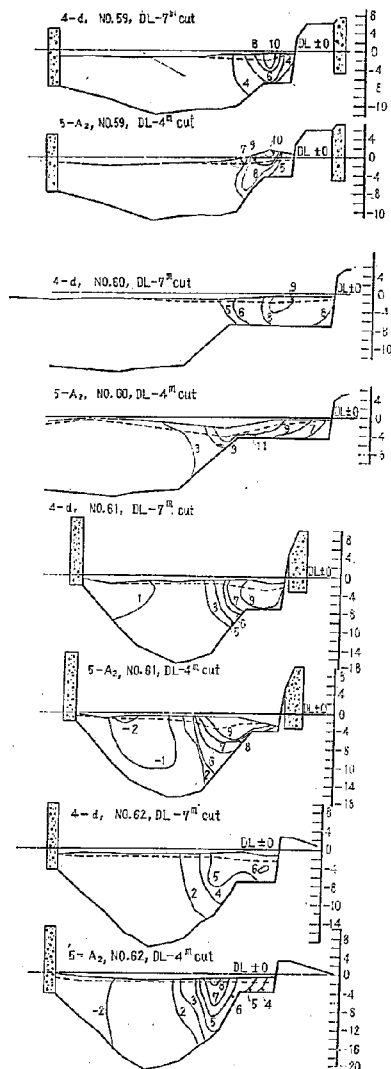


図-21 (2) 湾右岸部DL-7m, DL-4m切取の場合の水理状態変化(最低潮位の時)

部分的な高流速が表われる。

(2) 湾内流況

- ① 実験-4のごとく、湾右岸岩盤をDL-7mまで切り取った場合、下流潮位が最高および最低のどちらの場合でも、これといって指摘するような悪い現象はみうけられなかったが、実験5-A2のごとく岩山をDL-4mまで切り取った場合海の潮位最大の時には問題はない

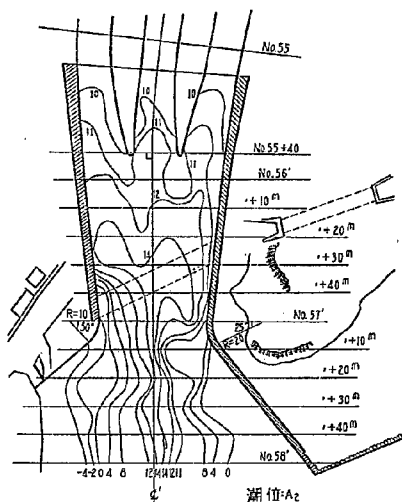


図-22 実験-5 流速分布図

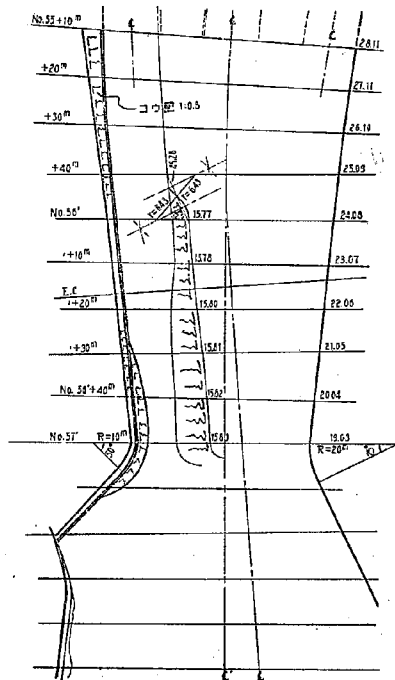


図-23 実験-6 平面図

が、最低潮位の場合切り取り部分と切り取り左部分の深部との境のNo. 60~No. 61にかけて大きな跳水を起

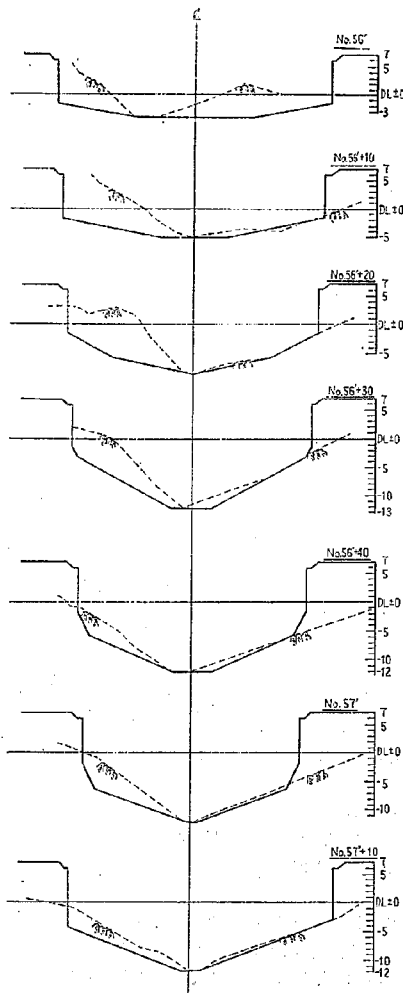


図-24 岩盤横断面図および実験-7遷移部横断面図

こし水面振動は大きくなる。しかし、この振動の湾左岸 (No. 60~No. 65付近) 沿岸に及ぼす影響は潮位が低いだけに水位の絶対高も問題になるほど高くはならない。

② 潮位の変化による流向の変化は少なく、実験-4のごとく No. 60~No. 66 にかけて循環流を生ずる。なお、No. 60~65 付近の左岸沿いに生ずる逆流は実験 5-A₂ の場合の方が、実験 4-d に比べやや大きいようであるが、逆流速そのものが小さいため、少々大きくなったところで問題はない。

[3] 実験-6

工事の施工段階としては、右側トンネル一本のみを通

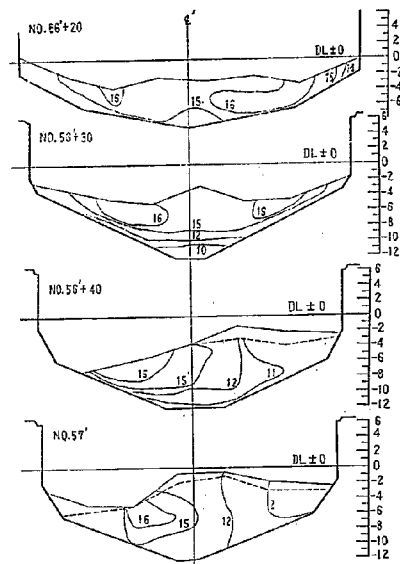


図-25 実験-7 遷移部水理状況

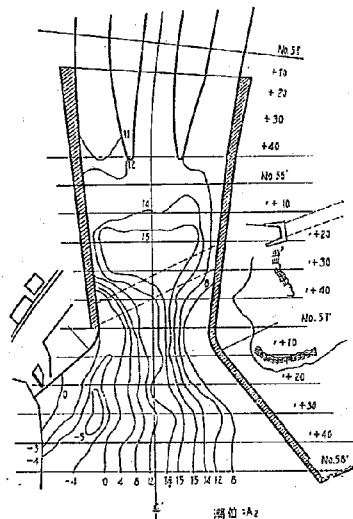


図-26 実験-7 流速分布図

水することも考えられるので、これについて実験的に調べてみる。右側トンネル一本のみで700m³/s流す場合の実験で遷移部河床等は実験-5を採用し一本水路とするため、ただ右水路左側壁には5分法こう配をつけた。(図-23参照)

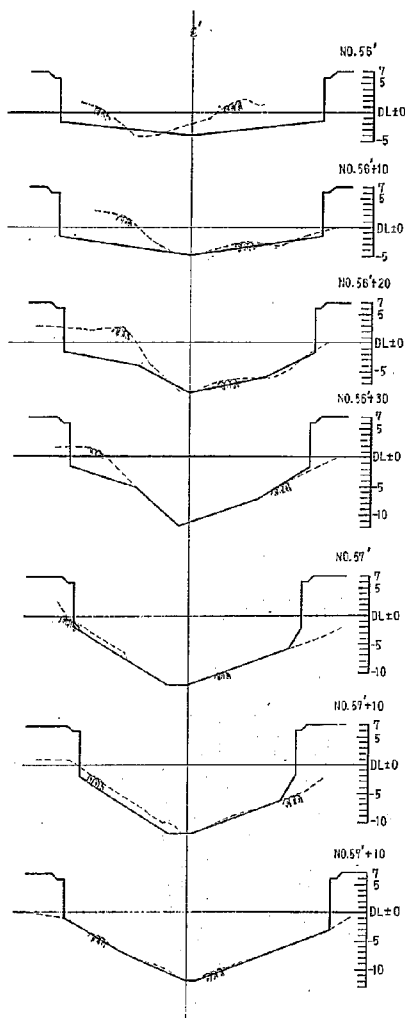


図-27 岩壁横断面図および実験-8 横断面図

結果は流量が少ないために別に支障が表われなかったもので省略する。

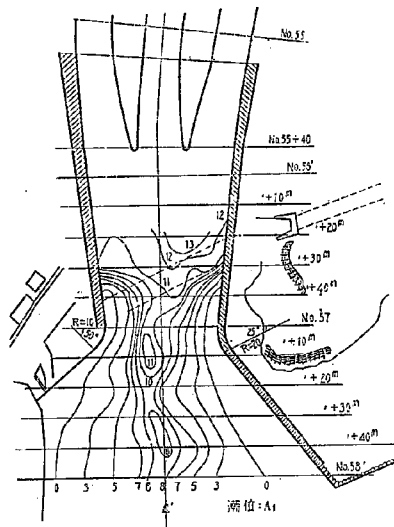
(4) 実験-7

(1) 平面形状

平面的にみた側壁法線形状、導流壁形状は実験-5の場合と同一である。

(2) 河床形状

河床施工にあたり実験-5のごとく最小限の岩掘削状態では横断方向の水位の変化がいちじるしく、また流速も不規則な分布を示し、結果的にはあまり好ましい状態と



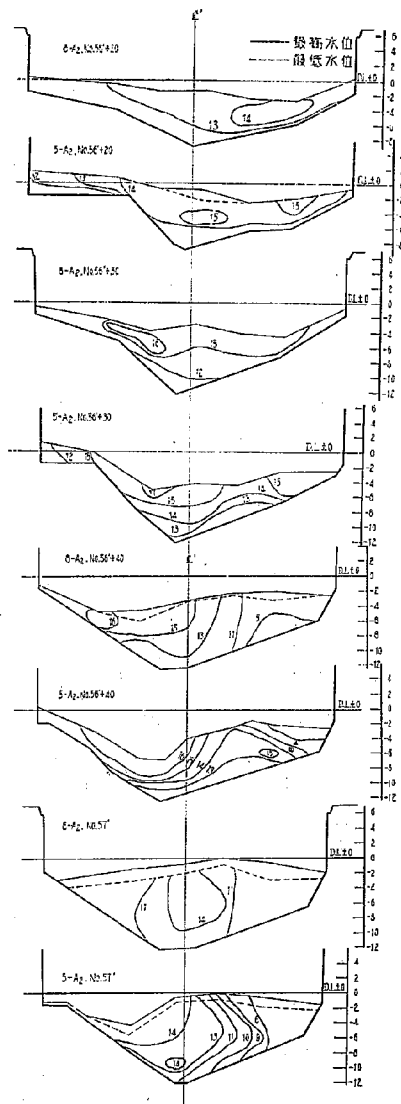


図-29 実験-8, 実験5遷移部水理状態比較

(水面)状態は好ましくない。

[6] 実験-8

前述したように実験 4-d, 5-A₂, 7-A₂ の各河床形状の異なる場合につきその結果を比較してみたが河床形状の不規則による横断方向の水位の変化以外は多量の岩盤掘削を行なった割に結果は好ましくなく、かえって悪い状態にかたむいたように思われる。それゆえ、わざわざ多

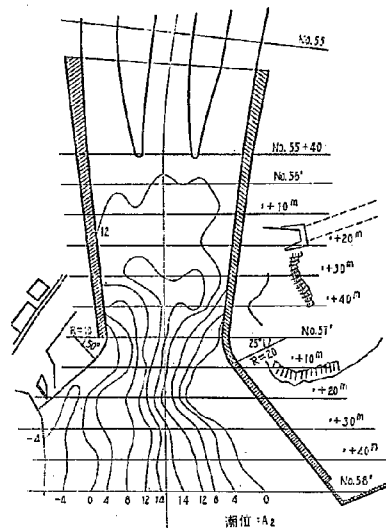


図-30 実験-8 流速分布図

額の経費を費してまでも多量の岩盤掘削の意義が薄れてくる。よってこの河床形状の不規則による横断方向の大きな水位変化を是正する意味で横断的、縦断的に河床形状を考慮し実験-5の場合の河床を多少掘削修正し大体は現状岩盤露出の河床状態で行なうこととした。(図-27参照)。

平面的形状(側壁法線形状、導流壁形状)は前実験-5, -7と同様でただ河床形状のみ上述のごとく修正した。また湾右岸岩山はDL-4mまで切り取るものとする。

(A₁): 実験5, 7を通じて資料はすべてA₂(下流最低潮位)についてのみ求めた。実験8-A₁については実験4-aあるいは4-cと多少下流最高潮位値は違うが比較しその傾向を検討することとする。(図-28参照)

(a) 遷移部

- ① 水位は実験4-a, 8-A₂とも大差ない。
- ② 図-28および図-17(1)により明らかなように平均流速最大値(No. 56'+20付近)は実験4-aの場合の方がより大きい他は大差ない。
- ③ 実験8-A₁において跳水はNo. 56'+20~No. 56'+30の区間を周期的に上、下流への移動現象を生ずる。これはNo. 57'~No. 58'にかけての水路の拡大による流れの変化に原因しているように思われる。

(b) 湾内

- ① 流況(流向)は前実験-5, 7と比べ大きな変化は見られない。湾左岸の水位振動はDL+1~DL+2.5mの範囲である。

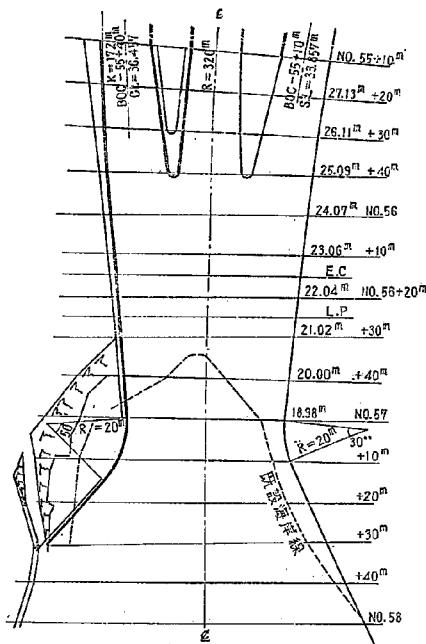


図-31 実験-9, 10 平面図

(A₂): 潮位 (A₂) について実験を行ない, 実験-5, 7 と比較する。(図-29, 30参照)

(a) 遷移部

- ① 水位は実験 5-A₂ に比べ No. 56'+10~No. 56'+40 にかけての射流部分の平均水位は低くなるが No. 57'+10 においては実験 5-A₂ 同様水位が上昇する。
- ② 流速分布は No. 56'+30 が最大になり, その上流部においては変化ないが下流部においては実験 8-A₂ の場合の方がやや小さい。
- ③ 横断方向の水位変化は河床の修正によりその変化は小さくなるが, 流速分布状態はほとんど差異はみられない。

(b) 湾内

- ① 実験-5, 7 と同様 No. 60~No. 61 にかけて大きな跳水を起こし水面振動は大きい。

上述のごとく遷移部における形状としては経済的, 物理的にみて実験-8 が大体妥当な線とみることができ

る。一方, 湾内においては右岸岩山の掘削深は DL-4 m にした場合特に下流最低潮位時において No. 60~No. 61 に大きな跳水を生じ水面の乱れがいちじるしいが民家の存在などで特に問題となる湾左岸の No. 60~No. 66 にかけての水位振動は下流潮位が最低であるためその絶対高は低く問題はない。しかし DL-7 m まで切り取れば上

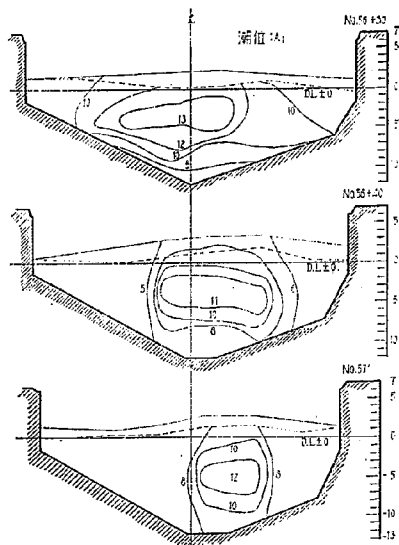


図-32 実験-10遷移部水理状況

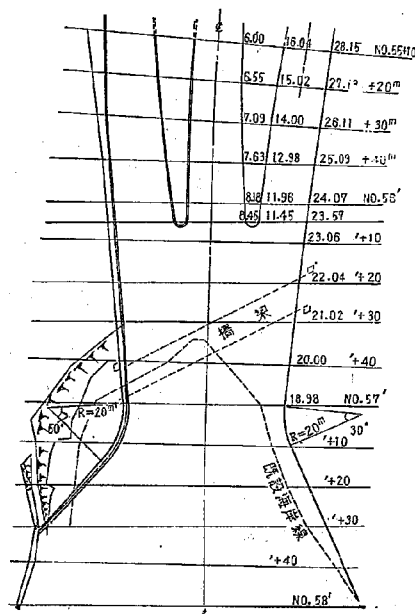


図-33 実験-11 平面図

述のような水面振動の現象は起こらず結果は良好であるが, この場合, 問題となってくることは掘削多量による経費の増大である。ゆえに, 掘削深は DL-7 m にする

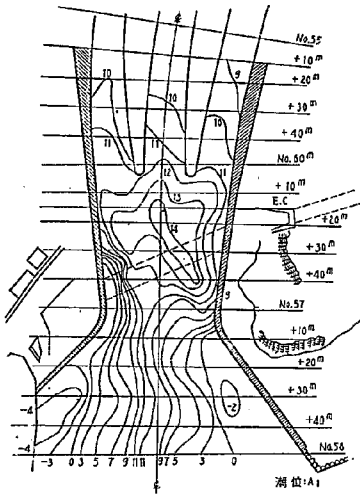


図-34 実験-11 流速分布図

か、あるいはDL-4mにするかは経済的な面と水理的な面とを合わせ考えてきめなければならない。なお、湾右岸岩山切り取りの形状が同一の場合、遷移部の河床形状の相違による湾内流況のいじりやすい変化は見うけられない。

[6] 実験-9

遷移部河床を岩盤露出の状態にした以後の実験(4～

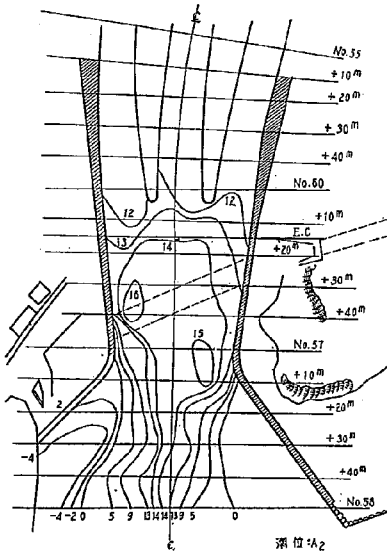


図-35 実験-11 流速分布図

8) ではNo.55+40からの接線延長線を中心線として行なって来たが、ここで、最初のECからの接線延長線を中心線とする状態にもとして実験し、水理状態の変化を調べることとする。この場合導流壁、側壁法線形状は実験8の状態を中心線方向の変化にともない左にいくぶん振っただけのことである。河床は中心線の変化にともない、その形状もいくぶん異なっているが大体実験8と類似している。(図-31参照)

実験結果は、中心線の移動河床形状の変化によって、A₁の場合、跳水(流水)がいじり右に寄り跳水後の流水が右側壁(No.57付近)に多少衝突した時に壁を溢流することすらある。これは前実験8においてさえ跳水(流水)が右に寄っていたにもかかわらず、もとの中心線(EC接線延長)にもどすべく水路を左に振ったため、水路の曲線の変化がより大きくなって、以上のごとき結果を生じたものと思われる。

[7] 実験-10

実験-9においては跳水の右偏によって流水が側壁を溢流する現象が起こったが、これは水路左岸寄りの河床が右岸寄りに比べ高いことに基因して起こる現象であろうと思われるので、この左岸寄り河床を掘削して実験を行ってみたが、結果は実験-9の場合と大差なく、結果は良好とはならなかった。(図-32参照)

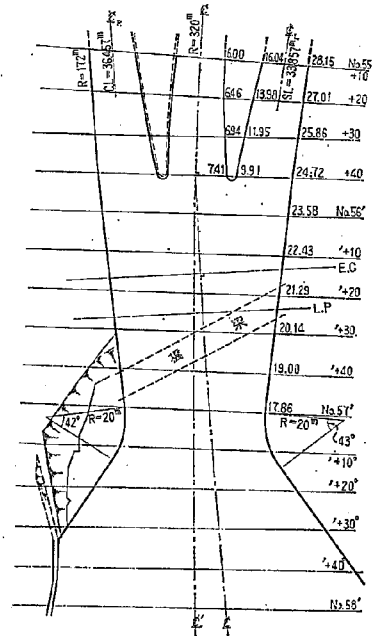


図-36 実験-12 平面図

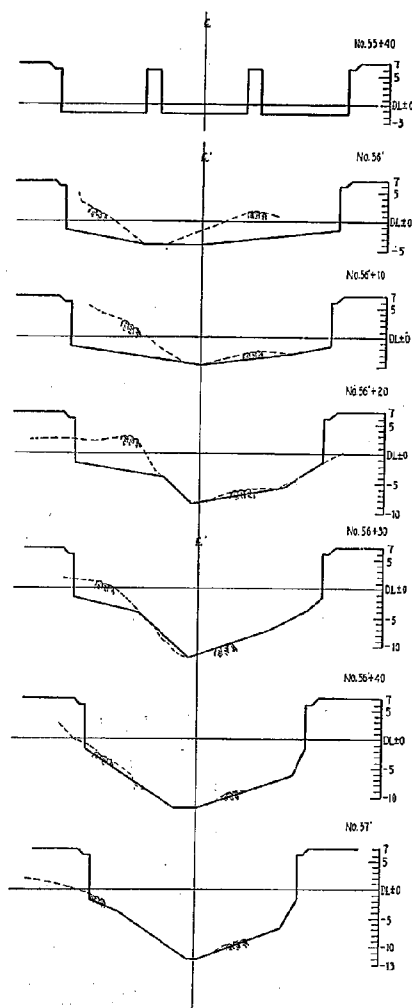


図-37 岩盤横断面および実験-12横断面図

〔8〕 実験-11

実験-9, 10 の場合に生ずる流水の右偏はやはり河床の形状よりも導流壁形状に大きく原因しているように思われた。それゆえ、この欠陥を是正するため、左側水路流水の河床形状などによる右偏を少なくし、かつ海へ攪乱が少なくなるように放流するために左側水路のみトンネル内と同一巾の12mとし、他の2本(中央トンネル、および右側トンネル)は等巾拡大水路となるように導流壁形状を非対称形になるようにし、また、これと同時に導流壁もNo. 56'+5mまで伸ばした(先端厚3cm)、導流壁形状および導流壁を伸ばした部分の河床形状の変

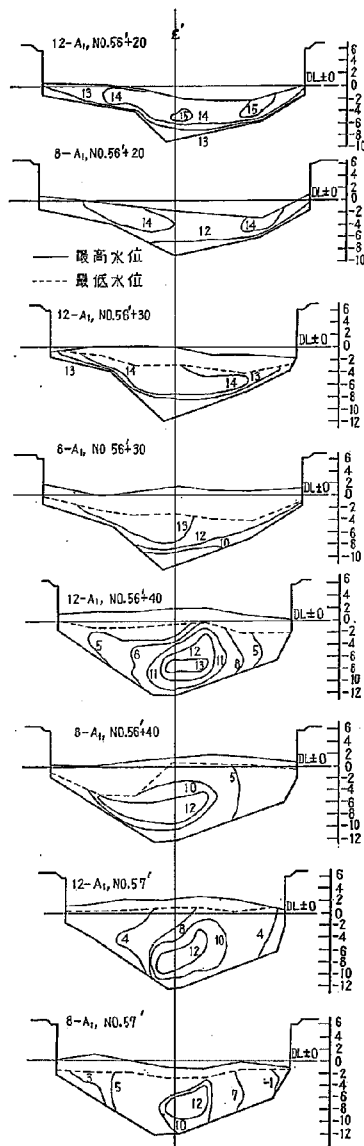


図-38 実験-12, 実験-8 遷移部水理状態比較

化以外はすべて実験-9と同じである。なお、湾右岸岩山の掘削深はDL-4mである。(図-33参照)

(A₁): 下流潮位の同一の実験 8-A₁ の結果と比較することとする。

(a) 遷移部

① 水位は実験 8-A₁ と比較した場合11-A₁は流水の落

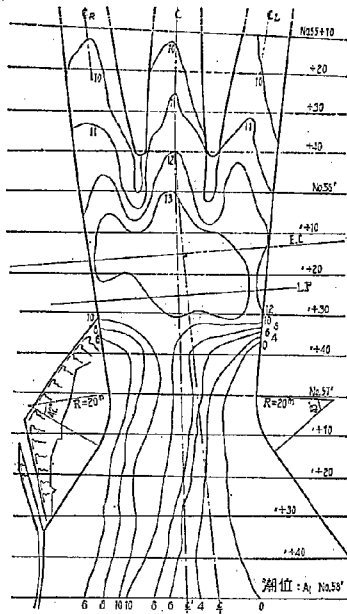


図-39 実験-12 流速分布図

ち込が大きくNo. 56+30が最低なり、その下流の水位上昇も大きい(最高点No. 57+10), すなわち, 実験8-A₁においては縦断的にみた水位の変化は小さいが実験11-A₁においてはその変化がいちじるしい。

- ② 平均流速分布は両者とも大体類似した傾向となるが, 最高流速は実験11-A₁の方が全体的に大きくなる。(図-34参照)

(b) 湾内

- ① 中心線方向を変化させたけれども湾内流況はいちじるしい変化はなかった。

(A₂): 下流潮位同一の実験8-A₂と比較する。

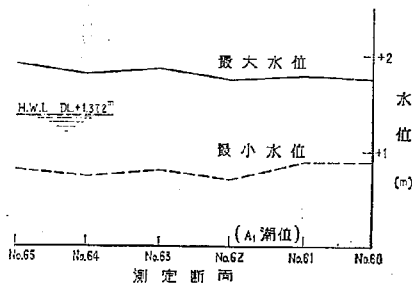


図-40 実験-12 湾内右岸部水位振動状況

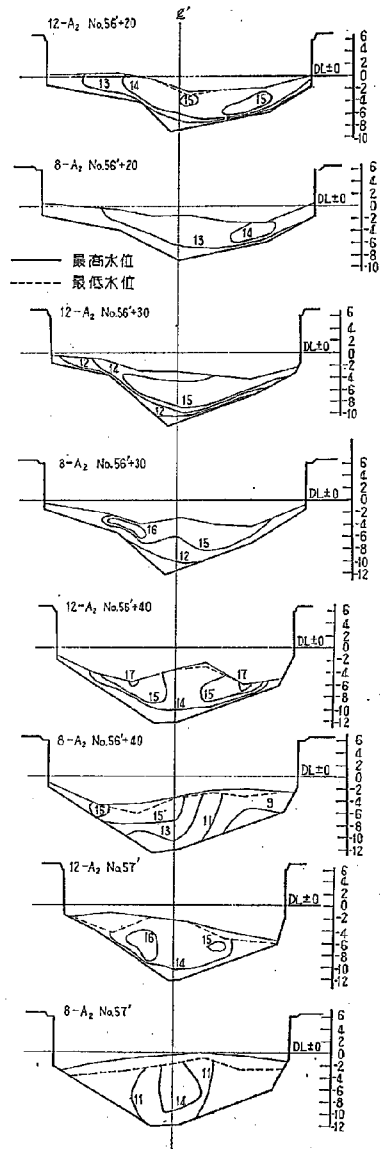


図-41 実験-12, 実験-8 遷移部水型状態比較

(a) 遷移部

- ① 水位は実験5-A₂, 8-A₂の場合はNo. 57'+10付近において水位のいちじるしい上昇現象をみたが, 実験11-A₂においては, このような現象はまったくみられなくなり, 規則的水位縦断線となる。

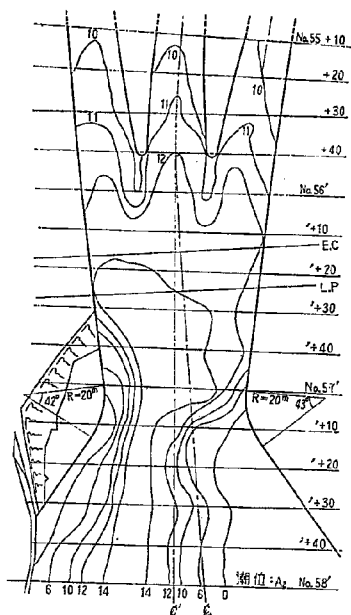


図-42 実験-12 流速分布図

② 流速分布は実験11-A₂の場合、跳水の後退にともない射流部は長くなり、より高流速となる。(図-35参照)

(b) 湾内

① No. 60~No. 61 付近の跳水はこの場合にも生じ、前実験 5.7.8. と大差はない。EC よりの接線延長線を中心線として採用した場合実験-8の遷移部形状そのままを中心線の移動に応じて移動させたのであるが、その結果は実験-9のごとき流水右偏の現象として現われ好ましくなかった。また実験-10のごとく河床形状を変えても結果は変わらなかった。

以上のような結果であるので実験-11のごとく非対称的な導流壁を施工し結果の修正を計った。

導流壁形状及びその長さを変えることによって、主に流水右偏現象を是正することができるが、その他の面においては指摘すべき利点も生じなかった。したがって、あえて中心線方向を変えて導流壁の伸長および右側壁の右海線へのすり付けに工費をかけることに意味が少ないように思われる。

[9] 実験-12

上述のようなわけで、実験-11は好ましくなかった。それゆえ実験-12は大体最もよいと思われる実験-8の形状にもどすと同時に水路巾のみ No. 56' + 40 で 38 m (従来は 40 m) とやや縮小して比例配分による緩和曲線によ

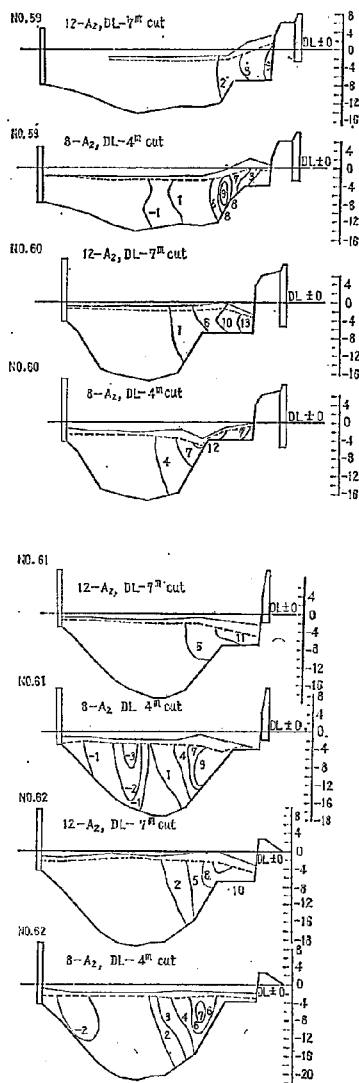


図-43 湾右岸部DL-7m, DL-4m, 切取の場合の水理状態比較 (12-A₂と8-A₂の比較)

って側壁法線を定めた。これにより導流壁も実験-8とは多少異なるが大差はない。このようにNo. 56' + 40で水路巾を縮小させた理由は、橋梁および既設道路(両側にトンネル存在)などの関係である。なお、No. 56' + 40の点で水路幅を従来は40mとしていたが、このこと自体実験-4以後の実験においては大きな根拠をもたず、ただ

実験1,2によって大体妥当な形状とみてこれを採用していたにすぎない。(図-36, 37参照) 一方湾右岸岩山掘削深はDL-7mまで掘削およびDL-4mまで掘削の2種について実験を行なって来たが結局 DL-4m掘削においては特に下流最低潮位時に跳水などによるいちじるしい水面振動を生じ、結果は好ましくなかった。ゆえに、実験-12においては掘削多量による経済的な面の欠点は一時無視し、水理的に状態の良いDL-7m掘削で行なうこととした。

(A₁): 実験8-A₁の場合と比較する。

(a) 遷移部

- ① 水位は水路の縮小のために全体的にいっぶん高くなっているが、直接橋梁への影響はない。
- ② 流速も大きな変化は見られないが部分的に No.56'+10~No.56'+30の範囲が実験12の方がやや大きくになっている。(図-38, 39参照)
- ③ 湾右岸岩山DL-7m掘削に原因してか、流水は放流後右岸に寄る傾向がみられる。

(b) 湾内

- ① 流水は放流後右偏し右岸海岸線に沿って流下するが全体的流況は前実験のDL-4mの場合と大差ない。
- ② 湾左岸部 (No.60~No.65付近) の水位振動はDL-4m掘削の実験8-A₁においてはDL+2.5m近い水位振動による水位の上昇をみたわけであるが実験12-A₁においては振巾も小さく水位上昇もDL+2mが最高程度である。(図-40参照)。ゆえに左岸に対する水位振動に関してはDL-7m掘削の実験-12の場合の方が結果的に良いように思われる。

(a) 遷移部

- ① 水位については実験8-Aと非常に類似した結果となり、やはり実験5-A₂、8-A₂と同様No.57'+10付近で水位の上昇をみる。
- ② 射流区間 (No.56'+10~No.56'+40) の平均流速が実験12-A₂の場合実験8-A₂に比べいくぶん大きい。(図-41, 42参照)

(b) 湾内

- ① 湾右岸部 DL-7m掘削により放流後の流水はいちじるしく右偏し右岸海岸線の不整にも起因して流水は右岸 (No.59付近) に衝突して部分的に水位上昇をみる。しかし、これによる湾内流況の変化はそれほどなく、DL-4m掘削の場合の跳水などの現象は掘削深が大きくなったためにまったく見られない。(図-43参照)

以上のごとく実験経過をたどって最終案として実験12に到達したが、この場合においても下流最高潮位 (A₁) 時の遷移部の流水右偏現象は8-A₁と同様起こるが、実験9.10ほどのことはない。

また、上述の右偏現象を多少でも緩和させるために導

流壁を厚くして3水路等巾 (12)mの水路状態(実験12' としておく)で行なってみたところ導流壁先端厚 (6m) が厚くなることに基いて衝撃波 (両導流壁先端より生ずる衝撃波がNo.56'+20付近で交差し飛水状態を呈し橋梁への影響は多分にある) が生じ、流水右偏状態は前導流壁形状の場合の結果と大差ない。

5. 結 語

本実験においてはトンネル部と海とを連絡する遷移区間の河床およびその法線、導流壁の長さおよび形状について調べられ、さらに放流水の海岸に及ぼす影響を主として岩山の掘削について検討された。

実験はトンネル内河床をNo.57まで延長施工した状態の前半の実験 (実験-1, 2, 3) と遷移部岩壁露出の河床状態とする後半の実験 (実験-4以後) とに大別することができる。

前半のごとき河床状態での実験では実験-3の場合が最も良好であると判断された。しかしながら、この方法では基礎岩盤が低いため施工上および維持上に問題が生じる可能性があるため、後半の実験においては河床は岩壁位置まで掘削して、それを河床として実験を行なった。その結果実験-12の場合が最も良好であると判断された。

両者のいずれが最もよいかは、さらに岩盤の強度、工事上の問題点および維持上の問題点について検討して決定されるべきであるが、現在までの検討結果では実験-12の場合の方がより好ましいように思われる。

湾内の放流水による水理現象については、遷移区間の水路中心線方向の変化による水理的变化は、トンネル中心線が地質などの関係で僅かしか動かすことができないために、その変化は僅かであるが、その範囲においてはほとんど認めることができない。そのために湾右岸水中にある岩山の掘削状態のみが問題となって来る。岩山をDL-7mまで掘削する場合には、水理的にほとんど問題はないが、掘削のための経費が増大し、それほどまで掘削しない場合に生ずる湾内の水面振動および水流を他の手段 (たとえば沿岸護岸の嵩上など) を講ずる場合と工費その他について比較検討して見る必要がある。

また、岩山をDL-4mまで掘削した場合についても実験を行なったが、潮位が最大の場合 (満潮位) にはDL-7mまでの掘削の場合と水理状況は全く変わらず満足すべき状態であるが、潮位が最低の場合 (干潮位) に計画高水流量が海に放流されれば、No.60~No.61付近に跳水を生じ、それに伴って水面振動の現象を示す。しかしながら潮位が低いために水面振動の上限水位は満潮位の場合の上限水位よりは低くなるので、水理的に見ればDL-7mの場合よりいくぶん高くなるけれども、DL-4mの場合でもよいと思われる。しかしDL-7m

まで掘削した場合には沿岸水位もいくぶん低くなるし、最低潮位の場合には水面振動が非常に小さいので護岸に与える影響としては好ましいが、この場合には相当の工費を要する欠点がある。

したがって、岩山の掘削深を決定するためには、本実験で得られた水理的結果と工事に要する費用（岩山掘削ならびに沿岸防護のために要する工費）を考え合せて決定される必要がある。

遷移区間においては跳水現象を生ずるが、潮位が高いほどはげしくなくなり、良好な流況を示す。しかし、最高潮位の時には橋梁架設位置付近で跳水を生じ、橋桁に対して考慮しなければならないが、跳水した水面より桁下端までの余裕高は2m程度あり、飛沫がいくぶんかかる心配はあるが危険は全くないと思われる。しかし、流水中に流木などがある場合、橋梁の下で跳水を起こす場

合があるので、流木などが跳水によりはね上げられ橋桁に衝突する危険性があるので、トンネル入口にかかる危険性より考えても流木は分水点付近で処理する必要がある。

次に遷移部河床施工上の問題点としては、どの区間河床被覆をなすべきかは基礎岩盤の強度を調べた上で実験により知られた流速を参照して決定されるべきであり、また河床表面は実験結果より知られるように、非常に高流速にさらされるので、できるだけ滑らかな凹凸あるいは亀裂のないよう施工することが望まれる。岩盤を露出させて河床とする場合も凹凸を少なくするよう施工し、できれば河床凹凸を少なくするためにコンクリート被覆をすることが望ましい。

なお実験結果の一覧表を次に示しておく。（別表）

別 表

狩野川放水路河口部

比較 事項 実験	形 状				
	側 壁 状 法 線 形 状	導 流 壁 長 さ お よ び 形 状	中 心 線 方 向	河 床	湾右岸部cut (No.58~63m)
1	No.55+40まで右側壁は隧道半径(172m)。左側壁は直線垂直壁の水路を底巾35m側壁法(EC~No.57')にすり付ける。	図 面 参 照	ECまでは中央隧道の曲率(320m)で、その後はECの接線延長。	内隧道河床(こう配1/400)の延長(No.57まで)、No.57より適当に海底へすりつける。	cut無し
2-a	No.56+40で水路巾40mとし中心線に対し対称な緩和曲線にて施工。	3水路等巾12mでNo.56+40まで導くためNo.56+40まで伸ばし先端厚2m。	同 上	同上 なお河床は導流壁先端で水平になるように隧道出口よりインバートを徐々に消してゆく。	同 上
2-b	同 上	同 上	同 上	同 上	DL-7
2-c	同 上	導流壁長さを順次短くしたEC付近まで短くする。	同 上	同 上	同 上
3	同 上	No.56'+15先端厚5m	No.55+40までは中央隧道の曲率(320m)でその後はNo.55+40の点の接線延長。	同 上	同 上
4-a	同 上	No.56' 先端厚6m	同 上	導流壁先端までは隧道内の河床延長その後は岸盤最低点を河床高とした梯形水路にすべく岩掘削。	同 上
4-c	同 上	No.55+20 ほぼ三角形	同 上	同 上	同 上
4-d	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上
5-A ₂	同 上	No.55+40 (岩盤考慮して) 先端厚2.5m	同 上	隧道内河床延長にその上部に出る岩のみ掘削。それ以下に存在する岩は露出さす。	DL-4
7-A ₂	同 上	同 上	同 上	右岸部岩盤を基準に左右対称に左岸部掘削して河床施工す。	同 上
8-A ₁	同 上	同 上	同 上	実験5を修正する程度の岩掘削。	同 上

模型実験結果一覧表

実 験 結 果						
下流湖位 (m)	跳水位置	平均流速最大及 其位置	最大流速値及び 其位置	橋梁架設部最高及び平均 水位(No.56'+20~No.57') 平均流速	No.57'の最大及 平均流速	No.57'の Energy head
DL+1.262	No.57'+20	10.69m/s No.57	12.13m/s No.56	DL+7.30m DL+4.49m (資料はLp.No.57のみ)	11.76m/s 10.69m/s	
同 上	同 上	10.38m/s No.57	11.95m/s No.57	DL+3.75m DL+3.49m (No.57のみ)	11.95m/s 10.38m/s	
同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	
同 上	同 上					
同 上	No.57'+20			DL+5.5m DL+3.67m		
同 上	No.56'+30	14.34m/s No.56'+20	16.78m/s No.56'+20	DL+2.00m DL-0.71m	11.26m/s 7.85m/s	3.97m
同 上	No.56'+20	13.74m/s No.56'+10	15.18m/s 14.14m/s No.56'+20 No.56'+10	DL+2.20m DL-0.31m	11.77m/s 6.05m/s	3.07m
DL-13.98	No.56'+40	16.16m/s No.56'+30	18.98m/s No.56'+20	DL-0.15m DL-3.91m	15.05m/s 8.90m/s	1.84m
DL-1.633	No.57'	14.02m/s No.56'+30	17.32m/s No.56'+30	DL+1.50m DL-2.43m	14.93m/s 11.30m/s	4.36m
同 上	No.56'+40	14.98m/s No.56'+20	16.92m/s No.56'+20	DL-0.65m DL-3.91m	16.60m/s 14.45m/s	8.15m
DL+1.372	No.56'+30	12.68m/s No.56'+20	16.20m/s No.56'+20	DL-1.90m DL-0.76m	12.71m/s 8.75m/s	3.66m

口 野 間 水 路		湾 内 流 況	改 造 理 由	備 考
経済効果の有無	水理効果の有無			
河口部岩盤が非常に深いため河床、導流壁の施工及び維持の面で問題となり工費も大となり経済効果は小さい。	側壁および導流壁形状に基因して 1) EC 付近に高い衝撃波 2) LP 付近の横断方向の水面傾斜大ゆえに水理の結果は悪い。	湾右岸部 No.58~No.63に突出する岩山に放流水が衝突し大きな渦流を生ずる。	側壁法線形状に基因して起こる衝撃波、流線の離水面傾斜等の是正。	改造理由の欄は次の実験に進むための改造理由。
同 上 (特に大)	流速は隧道内と大差なく smooth に放流される。	同 上	○湾右岸岩山によって生ずる渦流の是正。	
同 上	同 上	流右岸岩山に衝突して生ずる渦流は是正され流水は smooth に湾中央に導かれる。	○導流壁を短くすることによりその工費の削減を図る。	
同 上	EC 前後に導流壁を短くすると衝撃波がいちじるしく結果は悪い。	同 上	○右側壁およびその右岸海岸へのすりつけ工費の削減。 ○湾内に突入した流水の逆流を是正。	
同 上	結果良好	同 上	河口部岩盤の深いことによる施工の困難性を考慮して岩盤露出の河床状態とする。	
多量の岩掘削の必要性による工費の増大、ゆえに経済的効果は無い。	流速分布状態は左右対称なる規則的分布となる。	同 上	岩掘削量の多道。	4-b は 4-a の状態にただ導流壁先端より生ずる衝撃波を小さくするため、その先端部分のみ細めたもので、これにより衝撃波は小さくなるが、他に大きな変化はみられず、ゆえに資料は取らず。
同 上	導流壁短小により流心は曲線水路に基因して右偏しかつ河床近くに存在するゆえに水理的には良くない。	同 上	同 上	
同 上	同 上	同 上	同 上	A ₁ は下流潮位を最高にした状態のものであるが下流潮位最低 A ₂ に較べ状態は良いようであったので A ₂ の資料のみ取る。
岩掘削量が最小限に少く工費が安い。	○横断方向水面変化大。 ○下流に至っても流速は 5-A ₂ 以上大きく流速 loss は小さい。 ○流速分布不規則で部分的河床沈掘力大。	○掘削深が浅くなると同時に下流潮位を最低にしたため No.59~No.61 の cut 部分は射流となり No.60~No.61 に大きな放水を生ずる。このため水面振動は大きい。しかし湾左岸部の水位絶対高は低く問題はない。	○横断方向の水面変化の是正。 ○流速分布不規則の是正。	同 上
岩掘削が中程度と云え、依然掘削量少なく工費がかかる。	○下流に至っても流速は 5-A ₂ 以上大きく流速 loss は小さい。	○岩掘削量の依然多い事の是正。 ○結果的にも流速大きく状態が悪いこと。		実験 6 は右側隧道一本のみ使用して 700m ³ /s 放流したもので流水が少ないことにより結果は良好であった。ゆえに省略す。
岩掘削量少なく工費の節減。	流速は 4-a 4-c に較べ大差なし。	○潮位の最大により左岸部水位振動が問題となる当実験の場合 DL+1~3m の水位振動を生ず。	中心線方向の変化による水理状態変化を見るため。	

家比較事項	形					状
	法	側線形状	導流壁長さおよび形状	中心線方向	河床	
8-A ₂	No. 56+40で水路幅40mとし中心線に對し對称な緩和曲線にて施工		No. 55+40 (岩盤考慮して) 先端厚 2.5 m	No. 55+40までは中央隧道の曲率(320m)でその後はNo. 55+40の点の接線延長。	実験-5を修正する程度の岩掘削。	DL-4
11-A ₁	同 上		左水路のみ導流壁先端(No. 56+5)まで12mの等巾水路とし、右及び中央水路は等しい抵大水路とする。ゆゑに導流壁は中心線に對し左右非對称。	ECまでは中央隧道の曲率でその後はEC点の接線延長。	実験 8 程度の岩掘削。	同 上
11-A ₂	同 上		同 上	同 上	同 上	同 上
12-A ₁	No. 56+40 で水路幅38mとし中心線に對し對称な緩和曲線にて施工。		No. 55+40 先端厚 2.5 m	No. 55+40 までは中央隧道の曲率で、その後はNo. 55+40の接線延長。	実験 8 と同様ただ水路幅はNo. 56+40で2m縮め38mとする。	DL-7
12-A ₂	同 上		同 上	同 上	同 上	同 上

下流潮位 (m)	実 験			結 果		
	跳 水 位 置	平均流速最大及 びその位置	最大流速値及び その位置	橋梁架設部最高及び平均 水位 (No.56'+20~No.57')	No.57'の最大 及び平均流速	No.57' Energy head
DL-1.633	No.56'+40	13.79m/s No.56'+30	16.79m/s 16.69m/s No.56'+40 No.56'+30	DL±0m DL-2.64m	15.18m/s 10.05m/s	3.72m
DL+1.372	No.56+40	13.13m/s No.56+20	17.62m/s No.56+20	DL+2.80m DL-1.46m	13.73m/s 8.88m/s	3.07m
DL-1.633	No.57	14.47m/s No.56+40	18.03m/s No.57+10	DL+1.40m DL-3.40m	17.53m/s 13.33m/s	5.17m
DL+1.372	No.56'+40	13.28m/s No.56'+10'+20	16.00m/s No.56'+30	DL+2.85m DL-0.18m	13.08m/s 8.13m/s	(5.62m No.55+10 の Energy head 9.68m)
DL-1.633	No.57'	13.60m/s No.56'+30	17.40m/s No.56'+40	DL+0.57m DL+2.70m	16.43m/s 11.75m/s	4.04m

別表つづき

口野開水路		湾内流況	改造理由	備考
経済効果の有無	水理効果の有無			
岩掘削量少なく工費の節減。	流速は5-A ₂ 7-A ₂ に較べかなり減少。	実験5-A ₂ 7-A ₂ のごとくNo.60~No.61に跳水を生じ水面振動大。	中心線方向の変化による水理状態変化を見るため。	9は8と同様でただ中心線方向のみ変えたもの(BCの接続延長)ゆえに水路を幾分左に振っただけの水のものである。結果は流水のいちじるしい右偏現象を生ずる。(時々流水は右壁をouer)。10は9における流水の右偏現象を是正する意味で河床を幾分深くしたが結果は9と大差なし。
導流壁15m延長により工費増大。右側壁の施工及び海岸すり付に工費増大。	流速は8-A ₁ に較べ部分的に大きくなる所がある。	実験8-A ₁ に大差なし。	水路および導流壁形状の変更、実験8の状態にもどすと同時に既設道路および橋梁に制約されて水階層をやや縮める。	
同上	流速は8-A ₂ に較べ部分的に大。	実験8-A ₂ と大差なし。		
実験8に同様。	○流速は8-A ₁ と大差なし。 ○水位は8-A ₁ に較べ幾分上昇するが、橋への影響はない。	右岸DL-7m cutにより放流水の右偏著しいが、左岸部水位振動はDL+1~2mと実験8-A ₁ より小さく結果良好。		
同上	○流速は8-A ₂ と大差なし。 ○湾右岸DL-7m cutの隆水は起こらず水面により流水の右偏いぢるしい。	右岸DL-7m cutよりDL-4m cutの場合に生じたNo.60~61付近の隆水は起こらず水面振動も小さく結果良好。		

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 108, April 1961

CONTENTS

1. Y. Mura, K. Nakamura, T. Okubo and R. Iida
Structural Analysis of Ayakita Dam by means of Model Test
and Calculation (1)
2. A. Ariizumi, O. Kondou and Y. Mori
Measurements on the Segregation of Concrete by means of
 γ -ray Penetration (35)
3. H. Kikkawa, K. Ashida and T. Kaneko
Researches on the Diversion on the River (7)
— Hydraulic Model Test of the Cut-off in Watarase River —
..... (59)
4. Y. Mura, K. Nakamura, T. Okubo and R. Iida
Mathematical Study on the Foundation in Provement. of Dam (89)
5. H. Kikkawa, K. Ashida, K. Maruta and T. Maruno
The Report of Model Test of the River Mouth of the Cut-off
of Kano River (115)