土木研究所報告　第百八号　昭和三十六年四月

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

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，天端径間と高さとの比は 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思わしくなく，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。

* 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

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

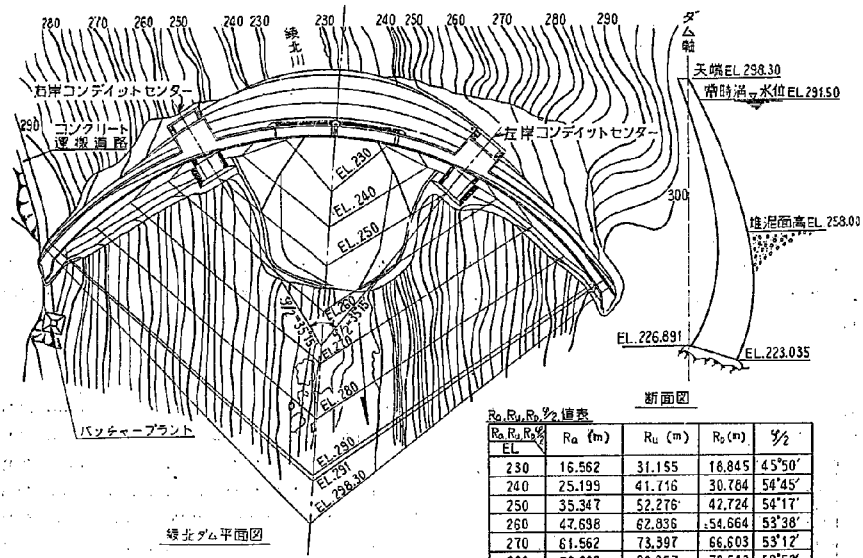
i) 応力歪の関係が相似的であること

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しうる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

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



$R_a, R_u, R_b, \theta/2$ 値表

EL	R_a (m)	R_u (m)	R_b (m)	$\theta/2$
230	16.562	31.155	16.845	45°50′
240	25.199	41.716	30.764	54°45′
250	35.347	52.276	42.724	54°17′
260	47.698	62.836	54.664	53°38′
270	61.562	73.397	66.603	53°12′
280	76.083	83.957	78.543	52°53′
290	90.887	94.517	90.483	52°00′
298.30	103.283	103.283	100.398	47°49′

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。

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） 石膏と硅藻土との混合物
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 20,000kg/cm² 以下にすることが困難であり，このため模型が大型化し載荷装置も大きくなる。

石膏と硅藻土との混合物は 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ほぼ同一である。また，その弾性係数は 100,000kg/cm² から9,000kg/cm² まで配合を変えることにより，自由に変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。このため石膏と硅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膏と硅藻土の混合物が最も適していると思われた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作ることが必要となってくる。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。

元来石膏と硅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，水量と硅藻土の量とがある。しかしＪＩＳ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くな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。また当研究室にて行なった材料試験の結果を観察するに，硅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。そこで硅藻土の量により強度および弾性係数を変化させ，水量はおのおのの焼石膏と硅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の供試体をとり，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

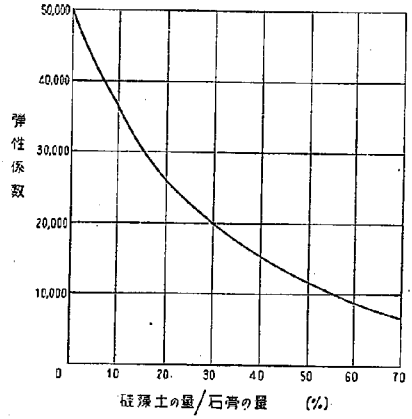


図-2 (a) 予備材料試験

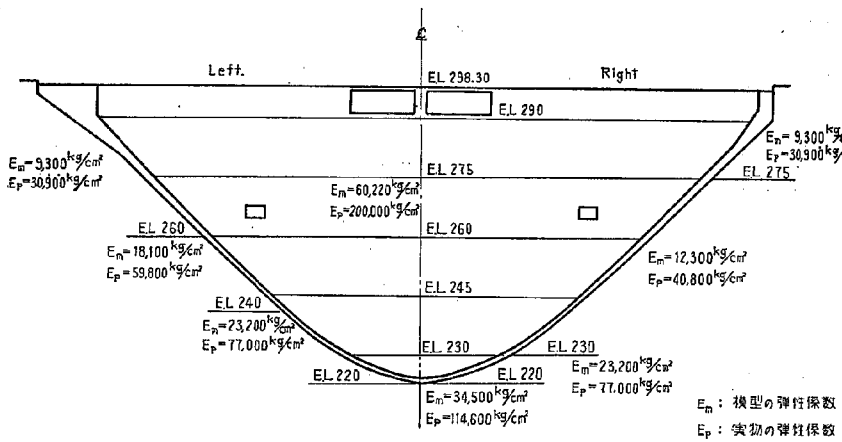


図-2 (b) 綾北ダム岩盤及び堤体の弾性係数

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	硅藻土の量 / 石膏の量	水量 / (石膏)+(硅藻土)
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 〃 右岸 230m～220m	90,000 〃	22,500 〃	25〃	1/1
〃 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 〃 左岸 300m～275m	30,000 〃	7,500 〃	70〃	1/0.72

表-2　材料試験結果

	弾性係数 (kg/cm²)	圧縮強度 (kg/cm²)	引張強度 (kg/cm²)	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 〃 右岸 230m～220m	23,200	48.09	—	—
〃 左岸 260m～240m	18,100	31.30	—	—
〃 右岸 275m～230m	12,300	20.61	—	—
〃 左岸 300m～260m 〃 右岸 300m～275m	9,300	18.44	—	—

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。

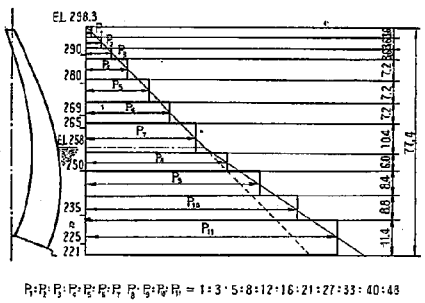
〔3〕 載荷装置

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，石膏と硅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$\pm 20\times10^{-6}$ 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$\pm20\times10^{-6}\times2\times10^{6}=\pm4$ (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，$\varepsilon_m/\varepsilon_p$ 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

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

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 2cm のスポンジを挿入した。これらのゴムチューブ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。



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

図-3　綾北ダム荷重分布図

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$\pm20\times10^{-6}$あるとして実物の応力に換算して 2.4kg/cm² の誤差が生じうることになる。

〔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のダイア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

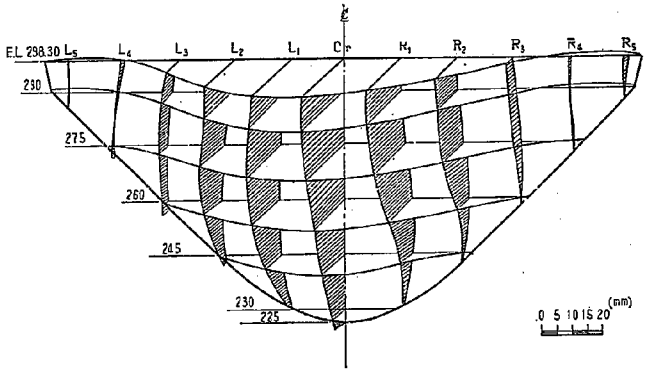


図-4 (a) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

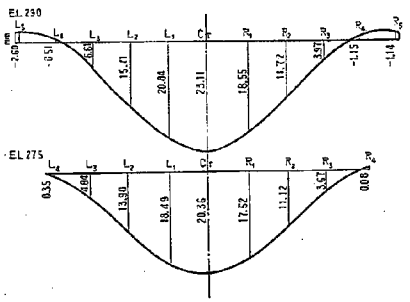


図-4 (b) 綾北ダム水平撓み図(Radial deflection)

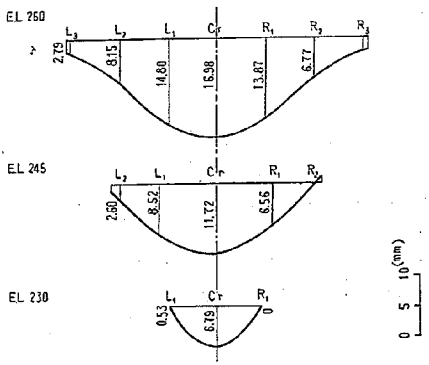


図-4 (c) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

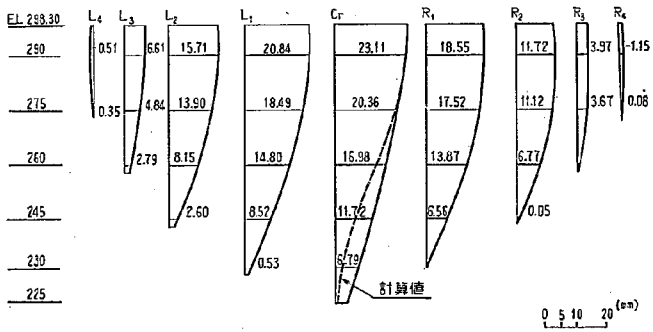


図-4 (d) 綾北ダム水平撓み図 (Radial deflection)

た。

半径方向変位は模型のダムの下流側に鉄のフレームを組み，これから鉄の棒を出しその先にダイアルゲージを取付け，ダイアルゲージの先端をダムの下流面に接触させることにより測定した。測定結果を示すと，図-4のごとくである。

接線方向変位および鉛直軸の周りの回転は1/1,000ダイアルゲージを用いて行なった。測定原理および測定方法は次のとおりである。すなわち各測点に下流面に垂直に金属棒を埋め込み，これに 図-5 のように二つのダイアルゲージを水平にとりつける。この状態でダムに載荷すると金属棒は模型の接線方向変位と鉛直軸の周りの回転の影響を受けて水平面内で移動する。

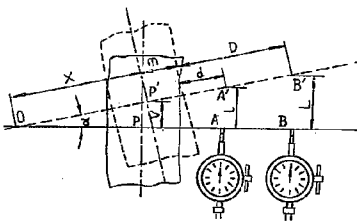


図-5

この移動を二つのダイアルゲージにより測定し，これから鉛直軸のまわりの回転および切線方向変位を求める。

鉛直軸の周りの回転は

$$\alpha\,(\text{radian})=\frac{L-l}{AB}=\frac{L-l}{D-d}$$

接線方向変位は

$$V=l-(L-l)\frac{PA}{AB}=l-\alpha(m+d)$$

測定結果を示すと，図-6，図-7のとおりである。

鉛直方向変位および接線軸のまわりの回転の測定は接線方向変位および鉛直軸の周りの回転の測定と同様にして行なった。測定原理および測定方法は下流面の金属棒にダイヤルゲージを鉛直に取りつけた以外は接線方向変位および鉛直軸のまわりの回転の測定とまったく同様である。

測定結果を示すと図-8および図-9とまったく同様である。

〔5〕 応力測定

応力測定は異常洪水時に対してのみ行ない，水圧荷重，堆砂圧を対象として行なった。測定は電気抵抗線歪計により行なった。なお測定はコンディットがない場合とある場合とについて行ない，両者を比較しコンディットのダムの構造作用に及ぼす影響について検討した。

（a） コンディットがない場合の応力測定

測定結果を示すと図-10のとおりである。すなわち，

i） 応力分布はほぼ対称的であるが下部の標高245m以下でやや非対称性が現われている。

ii） 最大圧縮応力は上流面標高260mの拱頂部で発生しており，およそ29.4kg/cm² に達している。

iii） 下流面の両岸取付部に発生する圧縮応力は全般的に上流面の拱頂部に発生する圧縮力より小さい。これは岩盤の弾性係数が低いためであると考えられる。

iv） 下流面標高245m以下の拱頂部にかなりの水平引張応力が発生しており，標高230mで−12.8kg/cm² 標高227mで−17.7kg/cm² に達している。

v） 水平荷重，堆砂圧のみによる鉛直応力は上流面では全般に圧縮となっており，下部に僅かな引張応力が生じているだけである。逆に下流面では標高 245m以上では全般に引張応力であり，標高 245m 以下で圧縮となっている。しかしこれ等の引張応力は，いずれも自重応力を加うれば圧縮となる範囲である。

（b） コンディットがある場合の応力測定

測定結果を示すと 図-11のとおりである。また，この測定においてはコンディットのまわりにも電気抵抗線歪計を貼りつけて測定を行なった。結果を要約すると

i） 全般に応力分布はコンディットのない場合と大差なく，差の認められる所でも高々 2～3kg/cm² である。すなわち，標高260mから標高245mの上流面水平応力が僅かに増加しており，逆に標高 270m 以上の上下流面の水平応力が僅かに減少している。上流の鉛直応力は上部では僅かに減少し，下部では僅かに増加している。下流面の鉛直応力は全般にほとんど変化していない。

ii） 下流面の下部に現われた水平引張応力はほとんど変化していない。

以上から本ダムではコンディットの影響はほとんど現われていないということができる。

iii） コンディットのまわりの応力の測定結果は図-12(a，b）のごとくである。なお，この値は電気抵抗線歪計により測定されたもので，局部応力は充分測定されていない。したがって，これについては補足実験として行なわれた光弾性実験結果において詳しく述べることにする。

計算により自重応力を求め，加算すれば 図-13 のごとくである。

（c） コンディットのダムの構造作用に及ぼす影響

以上の二つの実験からコンディットのダムの構造作用に及ぼす影響について考察してみよう。ダムの動きをより明確にするために応力の直線分布を仮定してダム内の断面力を計算し，比較すると 図-14 のごとくである。

すなわち

i） コンディットの位置は初めに予想したとおりアーチの曲げモーメントが0の点にあり，このためアーチの曲げモーメント，スラストもほとんど形は変わってい

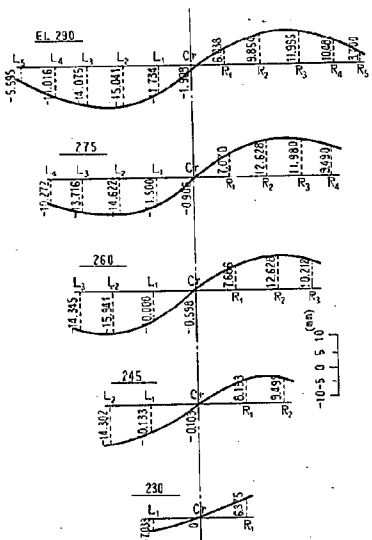


図-6 (a) アーチ・エレメント接線方向変位値

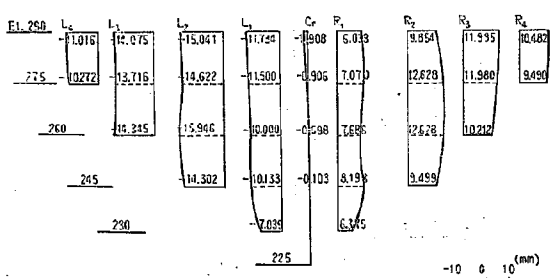


図-6 (b) カンチレバー・エレメント接線方向変位値

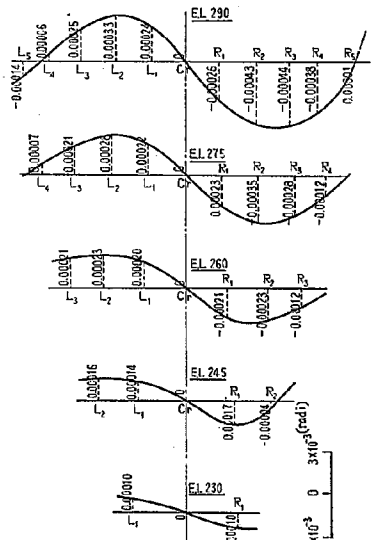


図-7 (a) アーチ・エレメント 鉛直軸の周りの回転

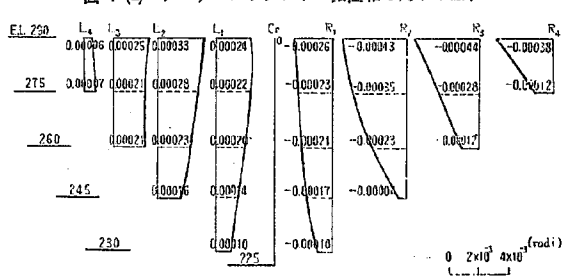


図-7 (b) カンチレバー・エレメント 鉛直軸の周りの回転

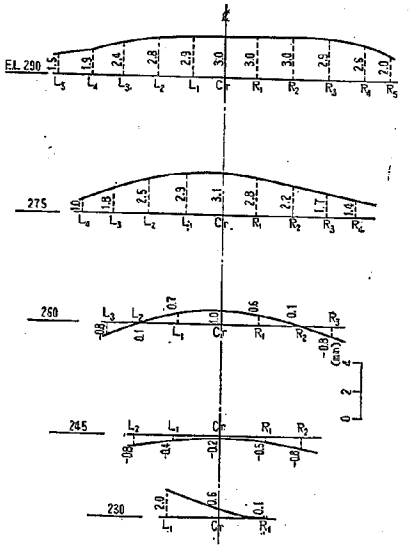


図-8 (a) アーチ・エレメント　鉛直方向変位値

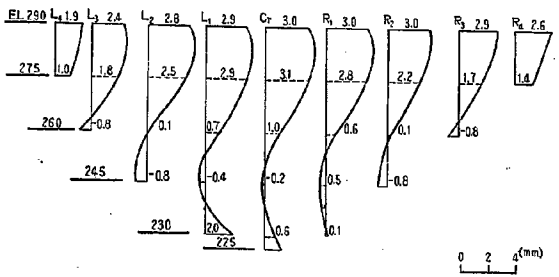


図-8 (b) カンチレバー・エレメント　鉛直方向変位値

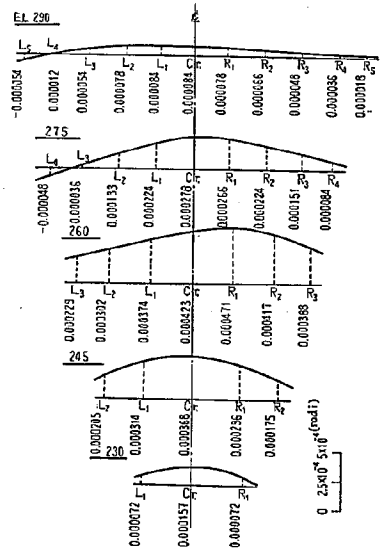


図-9 (a) アーチ・エレメント　接線の周りの回転

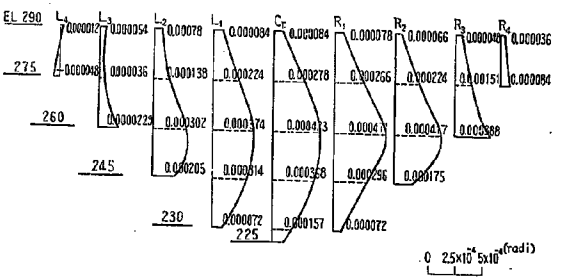


図-9 (b) カンチレバー・エレメント接線の周りの回転

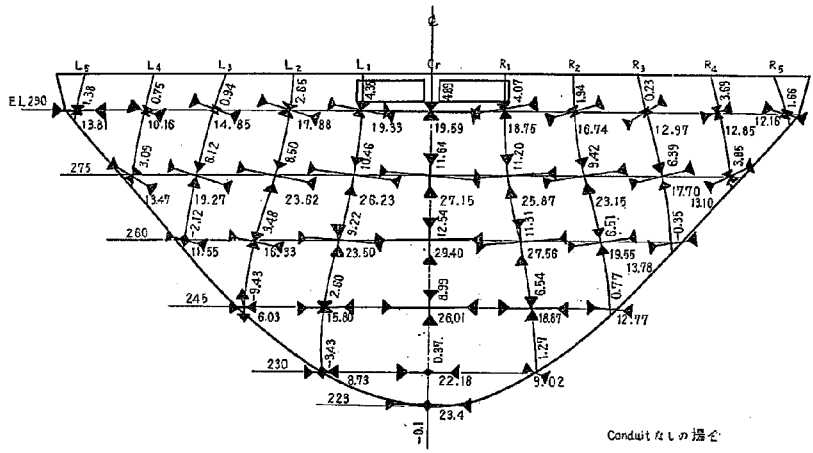


図-10 (a) 綾北ダム主応力図（上流面）

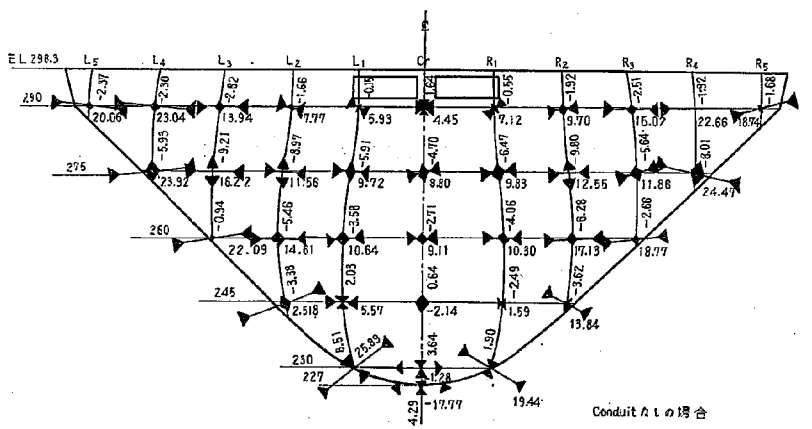


図-10 (b) 綾北ダム主応力図（下流面）

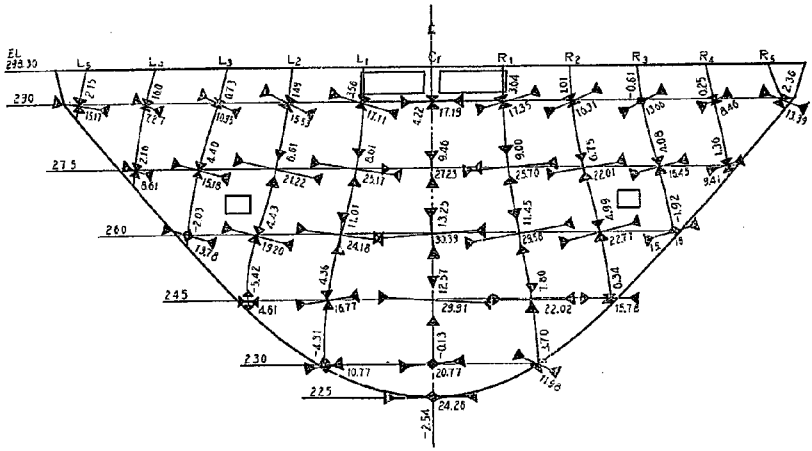


図-11 (a) 上流面 (conduit 有り) 主応力図

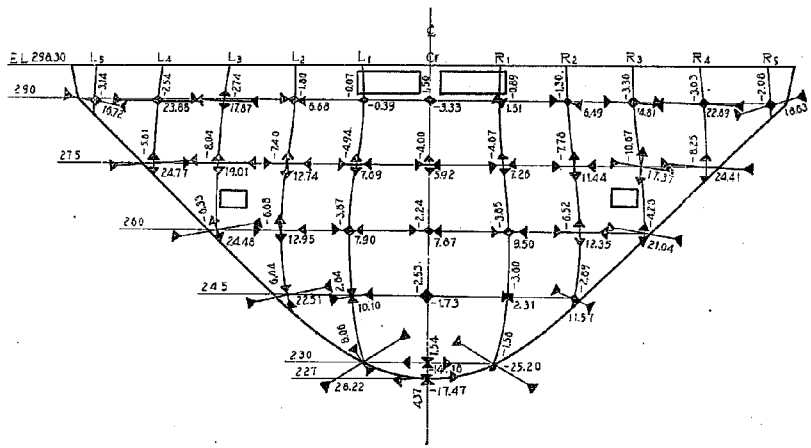


図-11 (b) 下流面 (conduit 有り) 主応力図

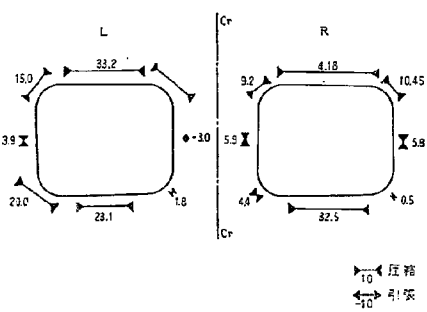


図-12 (a) 上流面コンディット周辺応力図

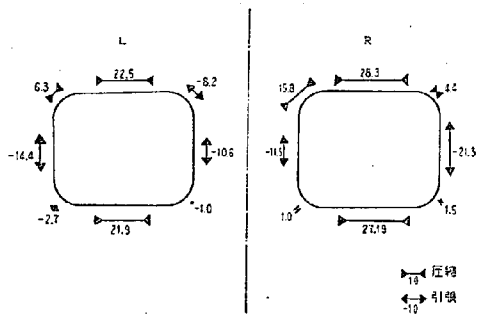


図-12 (b) 下流面コンディット周辺応力図

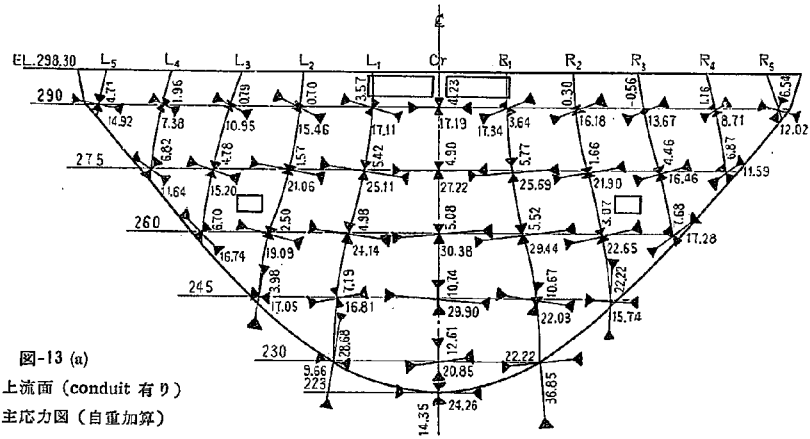


図-13 (a)
上流面 (conduit 有り)
主応力図 (自重加算)

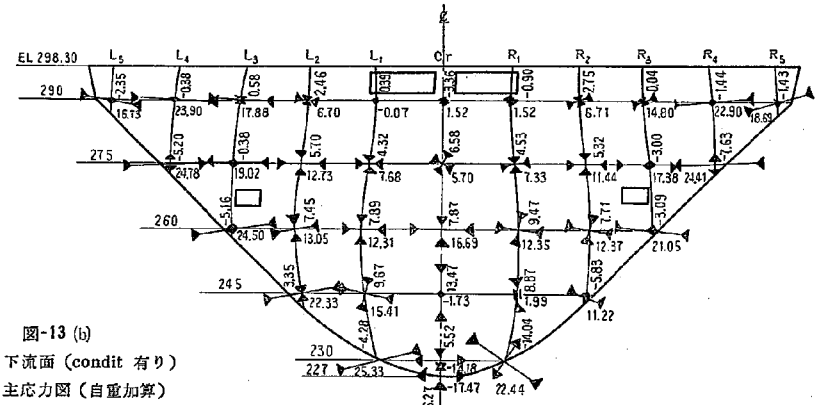


図-13 (b)
下流面 (condit 有り)
主応力図 (自重加算)

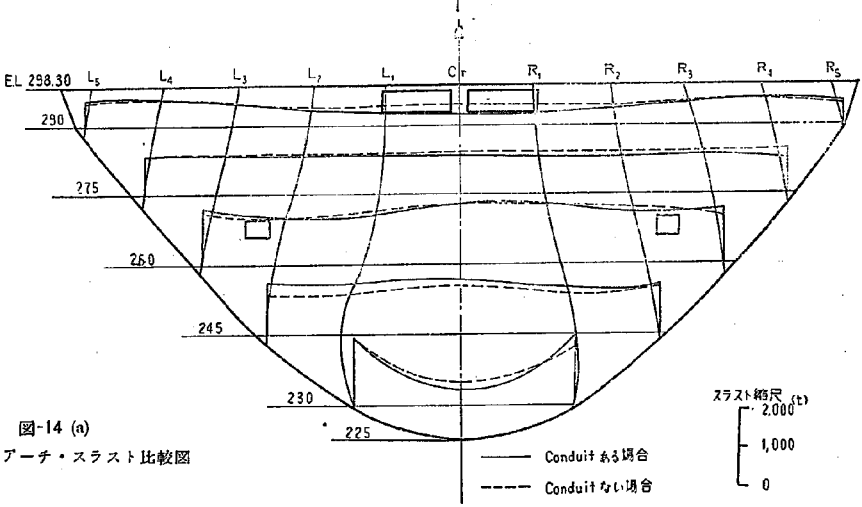


図-14 (a)
アーチ・スラスト比較図

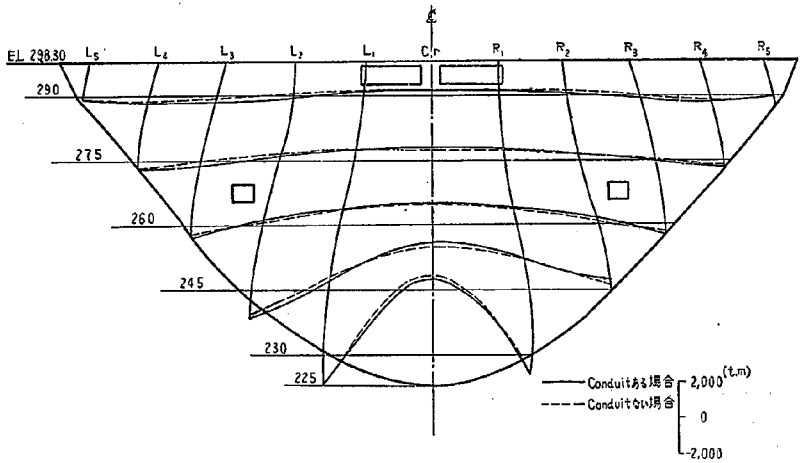


図-14 (b) アーチモーメント比較図

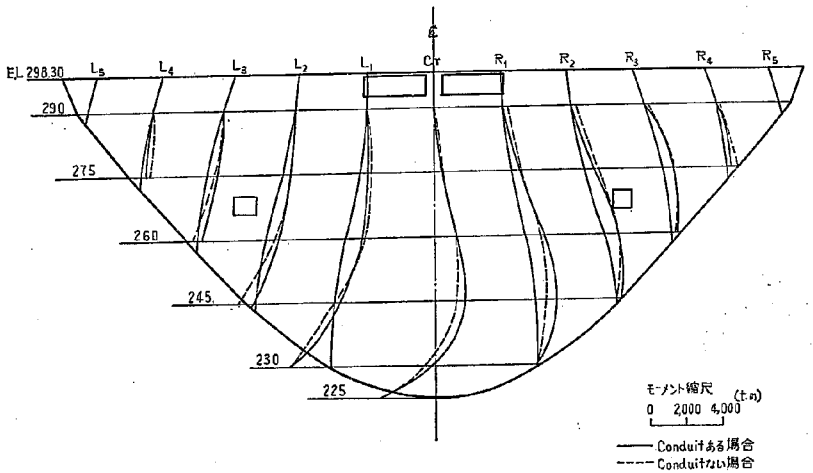


図-14'(c) 片持梁モーメント比較図

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。

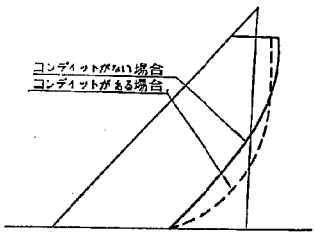


図-15 荷重分割図

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巾，偏心の度合いを加味したアラル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

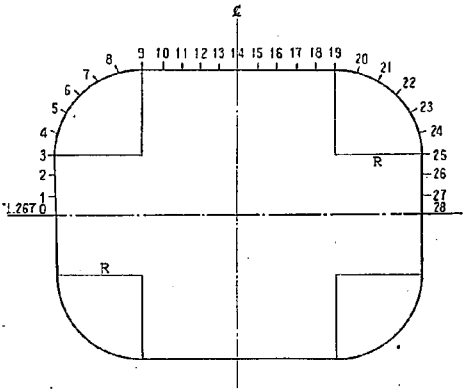


図-16 (a) 上流面綾北ダム Conduit

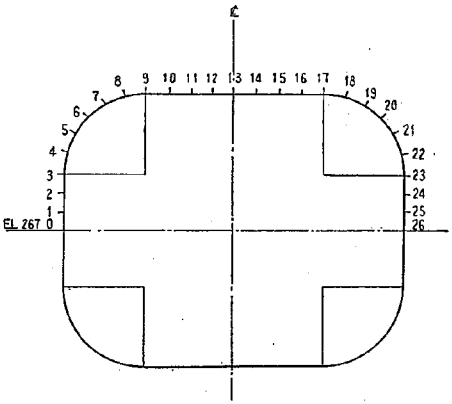


図-16 (b) 下流面綾北ダム Conduit

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/cm² 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/cm² 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 35kg/cm² の圧縮応力となっており，水平線上では全般におよそ −16kg/cm² 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 40kg/cm² 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

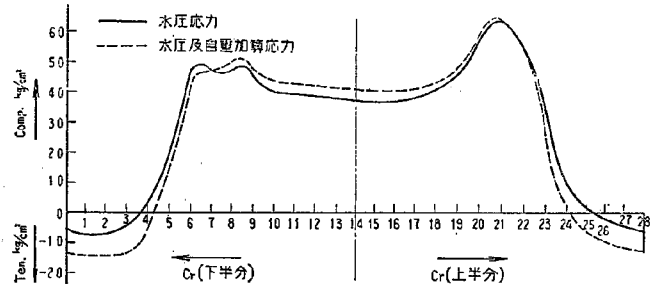


図-17 (a) 上流面(右岸側)水圧に依る Conduit周辺応力図

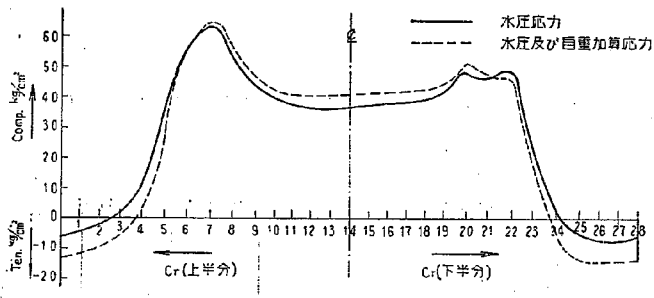


図-17 (b) 上流面(左岸側)水圧に依る Conduit周辺応力図

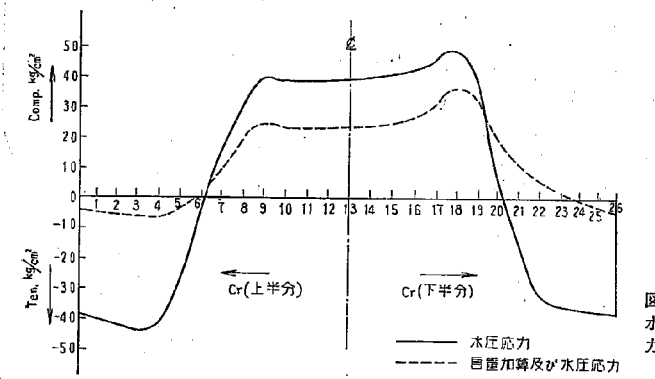


図-17 (c) 下流面(右岸側)水圧に依る Conduit周辺応力図

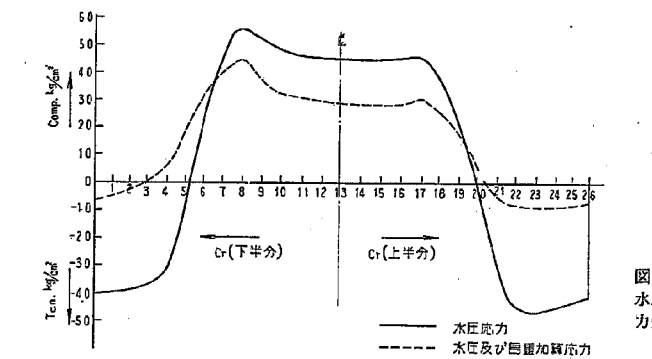
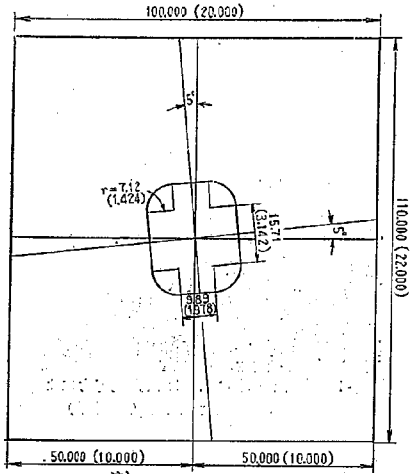
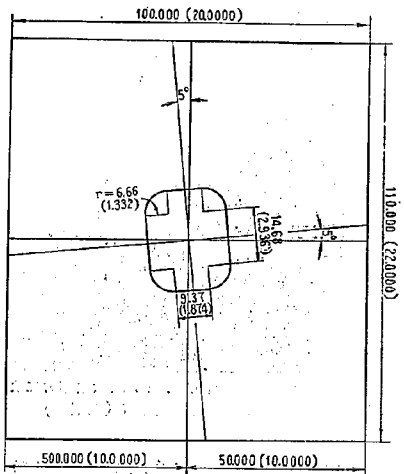


図-17 (d) 下流面(左岸側)水圧に依る Conduit周辺応力図



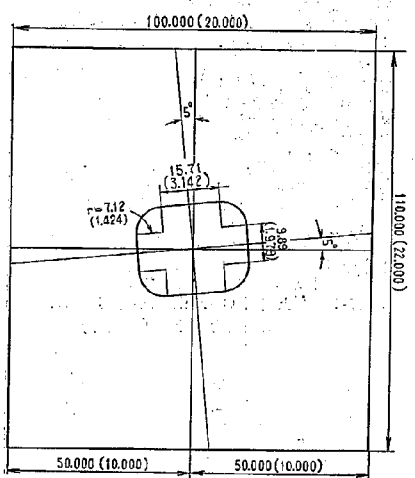
注)
数字は模型寸法
( )内は原寸法

図-18 (a)　上流面 Conduit 寸法図



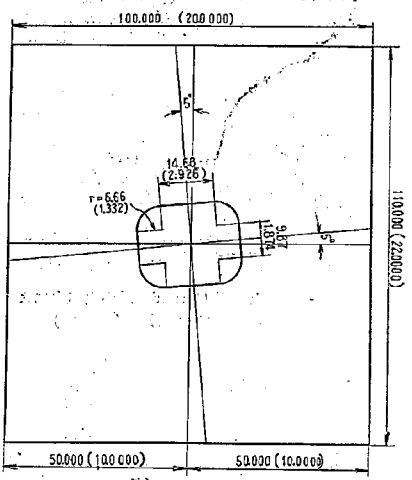
注)
数字は模型寸法
( )内は原寸法

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)　上流面 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附近で上流面で約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/cm²，最小主応力は 3.9kg/cm²；右岸側では最大主応力は 19.1kg/cm² 最小主応力は 3.5kg/cm²，下流面の左岸側では最大主応力は 17.3kg/cm²，最小主応力は −7.1 kg/cm²，右岸側では最大主応力は15.5kg/cm² 最小主応力は −7.4kg/cm² 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

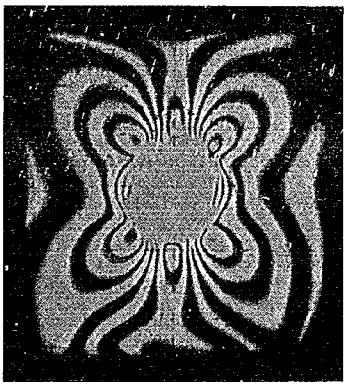


写真-1 (a) 上流面 Conduit 最大主応力による周辺応力縞分布（明視野）

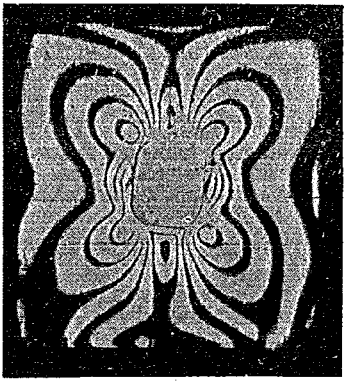


写真-1 (a)′ 上流面 Conduit 最大主応力による周辺応力縞分布（暗視野）

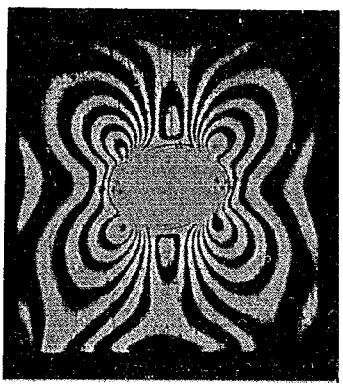


写真-1 (b) 上流面 Conduit 最小主応力による周辺応力縞分布（明視野）

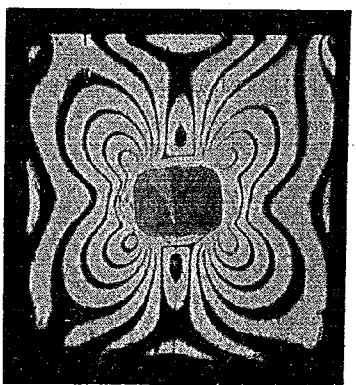


写真-1 (b)′ 上流面 Conduit 最小主応力による周辺応力縞分布（暗視野）

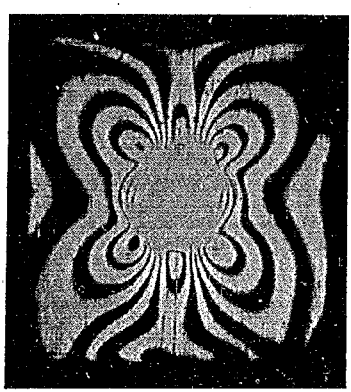


写真-1 (c) 下流面 Conduit 最大主応力による周辺応力縞分布（明視野）

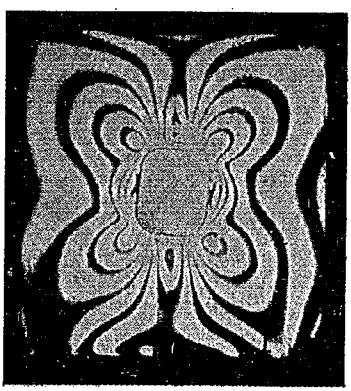


写真-1 (c)′ 下流面 Conduit 最大主応力による周辺応力縞分布（暗視野）

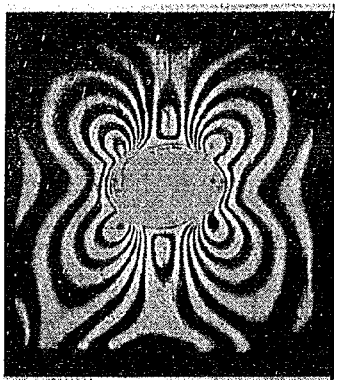


写真-1 (d) 下流面 Conduit 最小主応力による周辺応力縞分布（明視野）

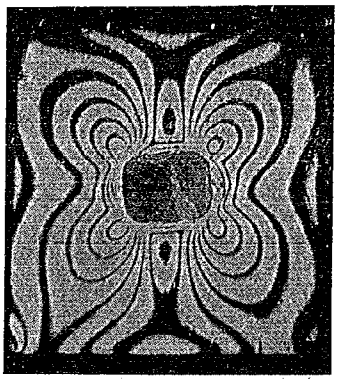


写真-1 (d)′ 下流面 Conduit 最小主応力による周辺応力縞分布（暗視野）

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は拱頂側の鉛直辺上にあり左岸側の下半分では測点25～28は拱頂側の鉛直辺上にある。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 −15kg/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55kg/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うるのが一般である。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れ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(1)。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うことができる。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硅藻

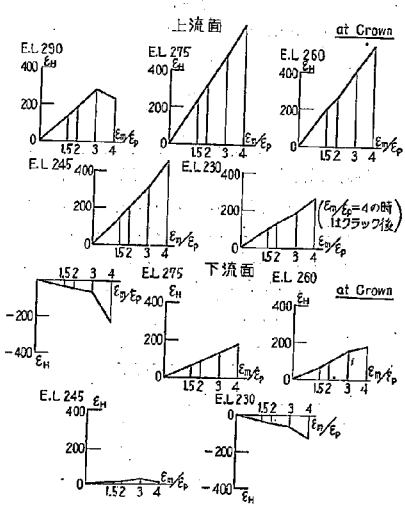


図-19 破壊実験における $\varepsilon_m/\varepsilon_p\sim\varepsilon_H$ 曲線

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はいり，$\varepsilon_m/\varepsilon_p$ 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。

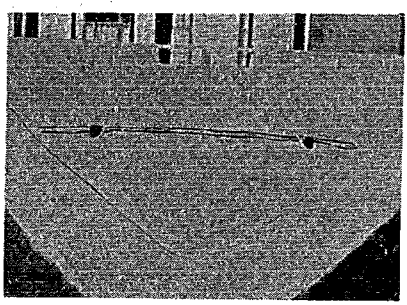


写真-2

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いったために，片持梁のこの標高での剛性が減り，折れたためで上部の負が減少し，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いらず予想しなかった EL 267m にクラックが入いったが，これについて考察してみよう。

水平クラックの入い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 *EL*267m 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 $-40kg/cm^2$ 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い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付近でおのおのの片持梁での最大引張応力を示しているので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い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，本ダムの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 200,000kg/cm² とした。

3）コンクリートの熱膨張係数は $10\times10^{-6}C^{-1}$ 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 $0.8t/m^3$ 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損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C₂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(＋)
- 半径方向分力(＋)
  - 半径方向変位(－)
  - 接線方向変位(＋)
- 接線方向分力(－)
  - 接線方向変位(－)
  - 半径方向変位(－)

接線方向荷重(＋)
- 半径方向分力(＋)
  - 半径方向変位(－)
  - 接線方向変位(＋)
- 接線方向分力(＋)
  - 半径方向変位(＋)
  - 接線方向変位(＋)

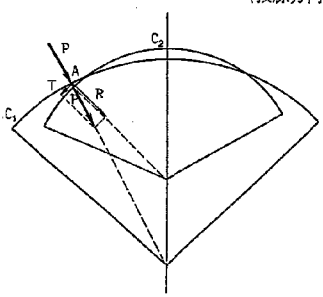


図-20

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位水圧荷重＋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 $E_R=Ec$

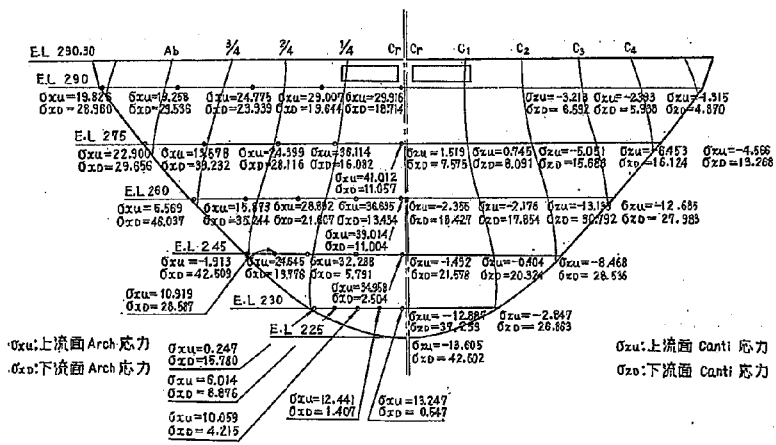


図-21　半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図（異常洪水時）

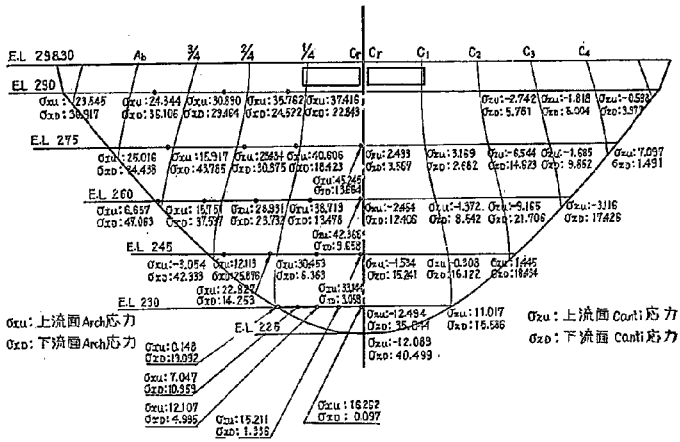


図-22　半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図（超過貯水時＋地震荷重1/2）

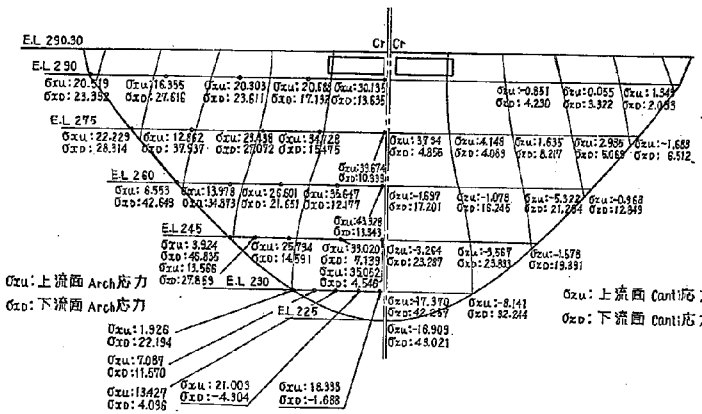


図-23　半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図（常時満水時＋地震荷重）

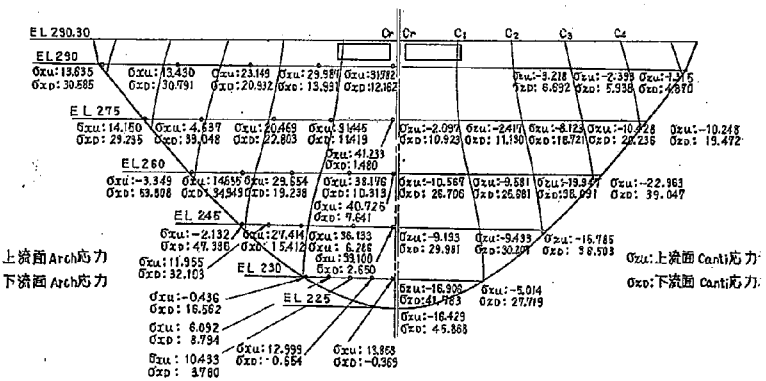


図-24　半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図（異常洪水時＋温度荷重）

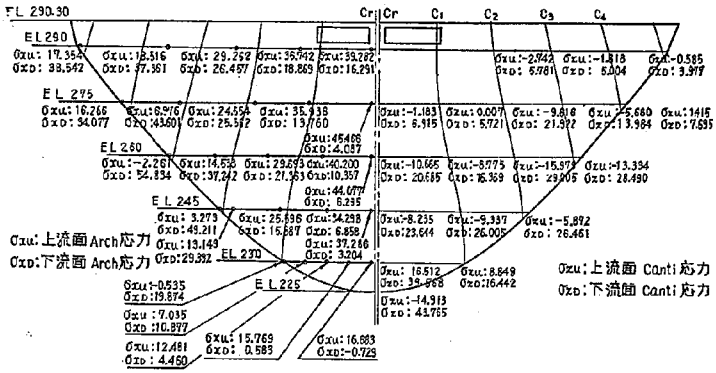


図-25　半径方向調整によるアーチおよび片持梁応力図(超過貯水時＋温度荷重＋地震荷重1/2)

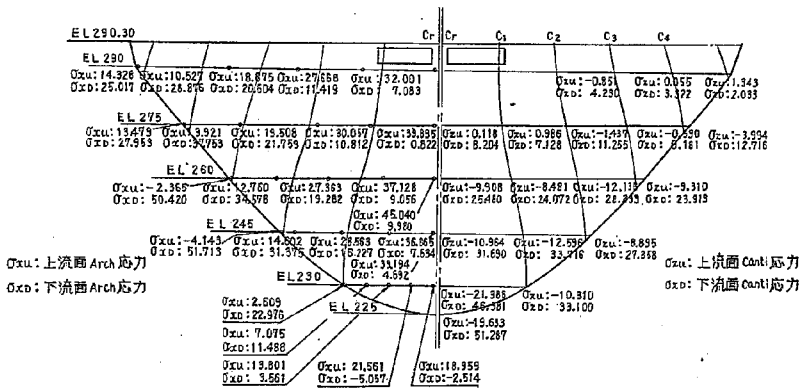


図-26　半径方向調整によるアーチおよび片持応力図(常時満水時＋温度荷重＋地震荷重)

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。

この表から明らかなとおり

（i）圧縮応力はアーチで最大 36.4kg/cm², 片持梁で最大 50.4kg/cm² 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 ovorhang がいちじるしいため，自重により31.9kg/cm²の圧縮が下流面では−15.2kg/cm²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 40kg/cm² 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 −15kg/cm² 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 10kg/cm² 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 10kg/cm² 程度と考えられる。

（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)

		標高		異常洪水時計算値	超過貯水位計算値	常時満水位計算値	異常洪水位+(温度荷重)計算値	超過貯水位+(温度荷重)計算値	常時満水位+(温度荷重)計算値	異常洪水位実験値	超過貯水位推定値	常時満水位推定値	異常洪水位+(温度荷重)推定値	超過貯水位+(温度荷重)推定値	常時満水位+(温度荷重)推定値
水平応力	上流面	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
	下流面	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)

		標高		異常洪水時計算値	超過貯水位計算値	常時満水位計算値	異常洪水位+(温度荷重)計算値	超過貯水位+(温度荷重)計算値	常時満水位+(温度荷重)計算値	異常洪水位実験値	超過貯水位推定値	常時満水位推定値	異常洪水位+(温度荷重)推定値	超過貯水位+(温度荷重)推定値	常時満水位+(温度荷重)推定値
鉛直応力	上流面	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
			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	29.7
		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
	下流面	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
		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/cm² 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，この引張の部分をけず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い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 クラックが入い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は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いっても，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と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

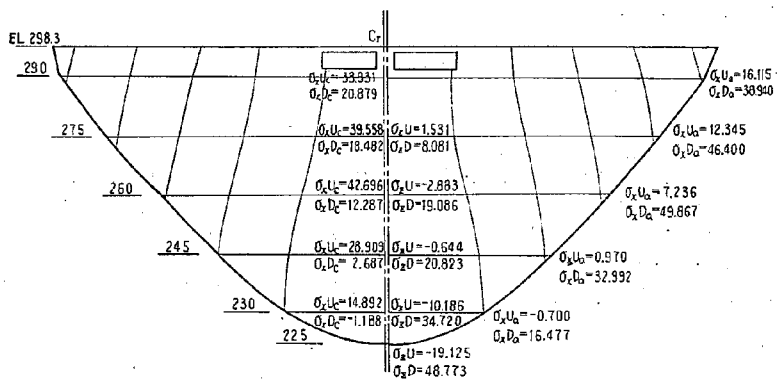


図-27 (a)　拱頂調整の応力図

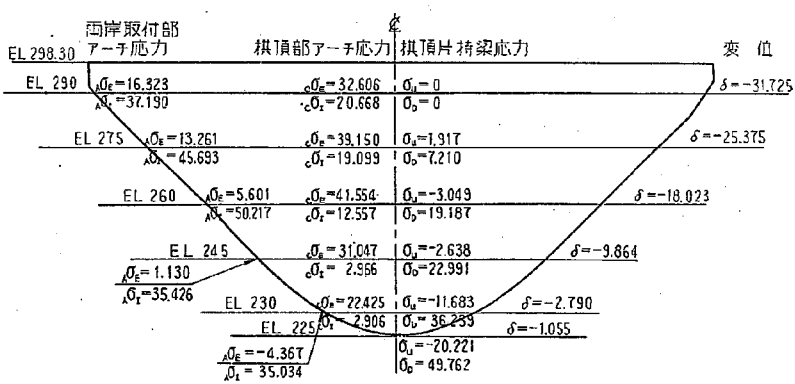


図-27 (b)　下流側に 4.31m のクラックが入いった場合

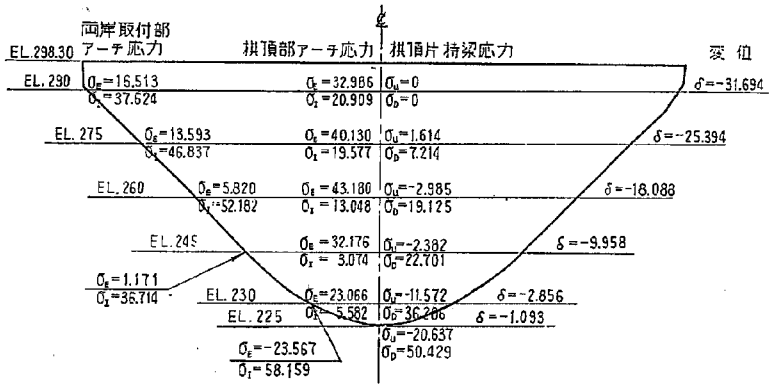


図-27 (c) 下流側に 5.81m のクラックが入った場合

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($E_C \fallingdotseq E_R$)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，基礎の変形常数を

$$\alpha=\frac{\text{Raxis}}{\gamma}\ \frac{5.075}{E_R T_A^2};\quad \gamma=\frac{\text{Raxis}}{\gamma}\ \frac{1.785}{E_R};$$

$$\delta=\frac{\text{Raxis}}{\gamma}\ \frac{5.720}{E_R T_A^2}$$

として計算した。$E_C \fallingdotseq E_R$ 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，基礎岩盤の変形常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をとって行なった。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った。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/cm²	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で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，$E_C \fallingdotseq E_R$ 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常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。

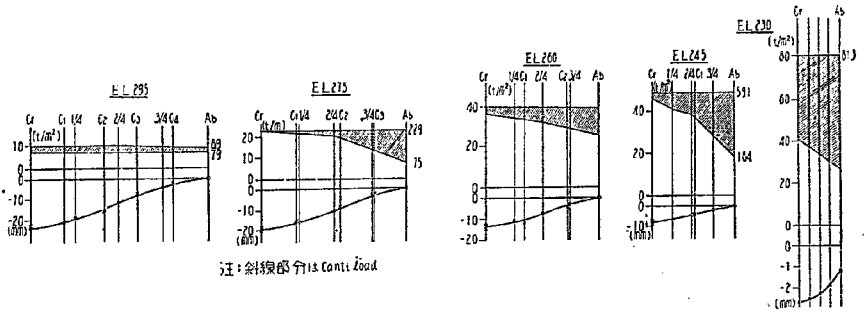


図-28 (a)　半径方向分割荷重及び撓み図 ($E_R=E_C$)

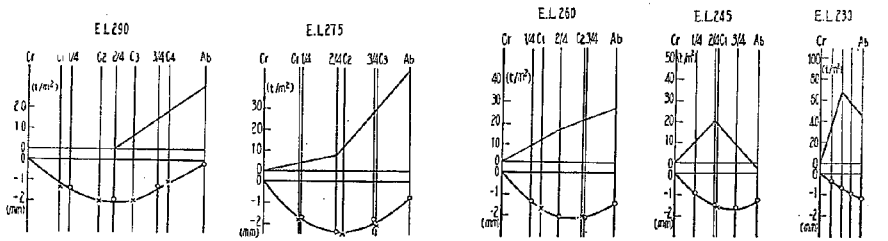


図-28 (b)　接線方向分割荷重及び接線方向変位図 ($E_R=E_C$)

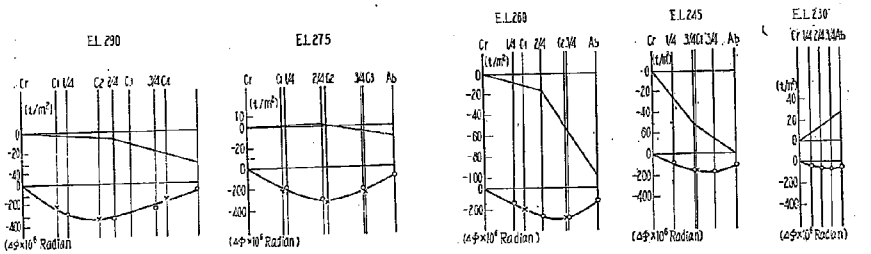


図-28 (c)　撓れ分割荷重及び変角図 ($E_R=E_C$)

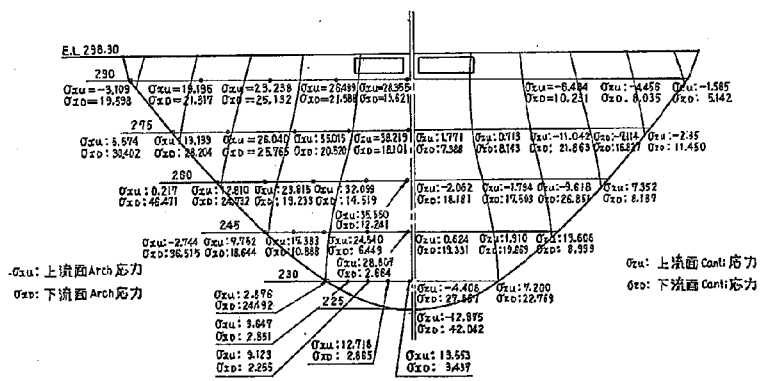


図-28 (d)　完全調整によるアーチ及び片持梁応力 ($E_R=E_C$)

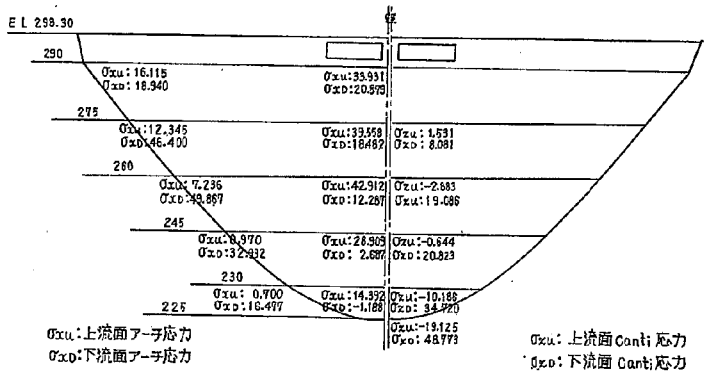


図-29 拱頂調整 アーチ及び片持梁応力図 ($E_R \fallingdotseq E_C$)

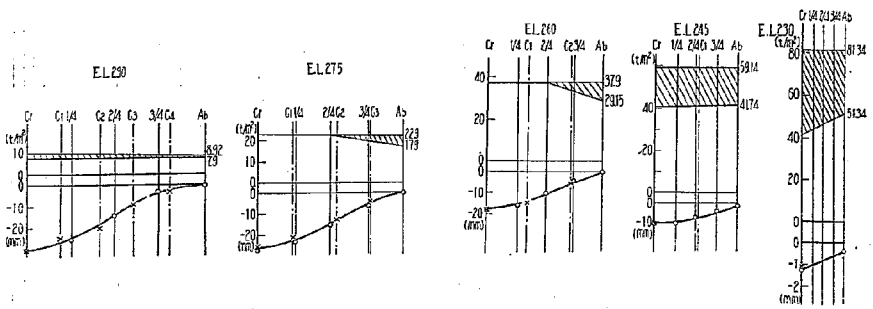


図-30 (a) 半径方向分割荷重及び撓み図 ($E_R \fallingdotseq E_C$)

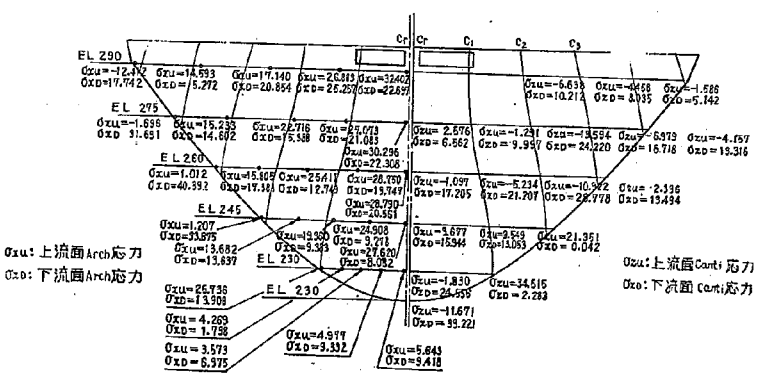


図-30 (b) 半径方向調整によるアーチ及び片持梁応力図 ($E_C \fallingdotseq E_R$)

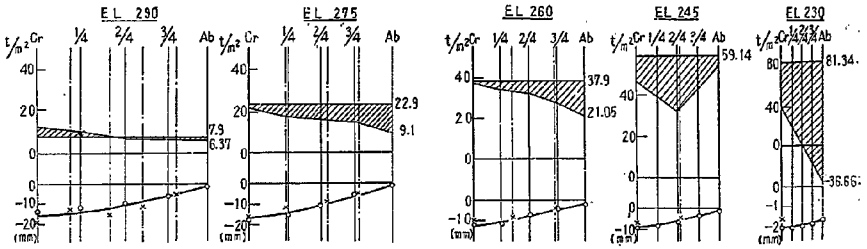


図-31 (a) 三成分調整　半径方向分割荷重及び撓み図 ($E_R \fallingdotseq E_C$)

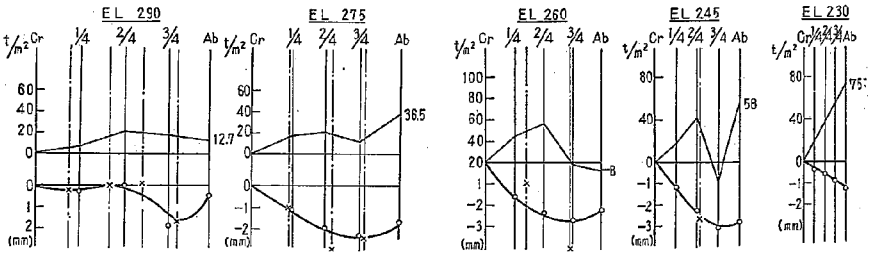


図-31 (b) 三成分調整　接線方向分割荷重及び接線方向変位図 ($E_R \fallingdotseq E_C$)

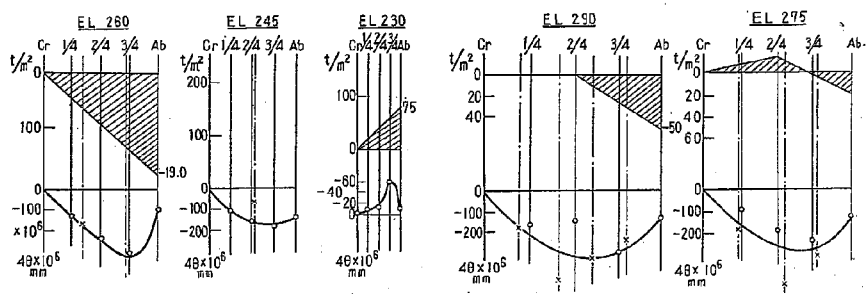


図-31 (c) 三成分調整　損れ分割荷重及び変角図 ($E_R \fallingdotseq E_C$)

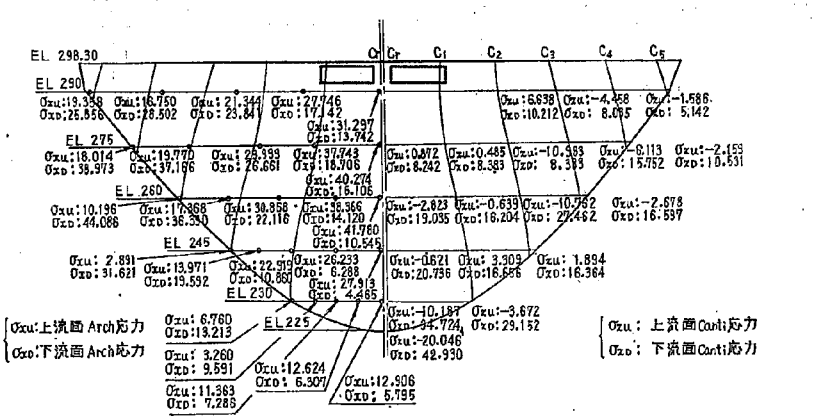


図-32 (d) 三成分調整　アーチ及び片持梁応力図 ($E_R \fallingdotseq E_C$)

〔1〕 変位の比較

$E_R=E_C$とした場合および$E_R \fallingdotseq E_C$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よく一致しているが，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$E_R \fallingdotseq E_C$の場合と比較すると$E_R \fallingdotseq E_C$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。$E_R \fallingdotseq E_C$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つている。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で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

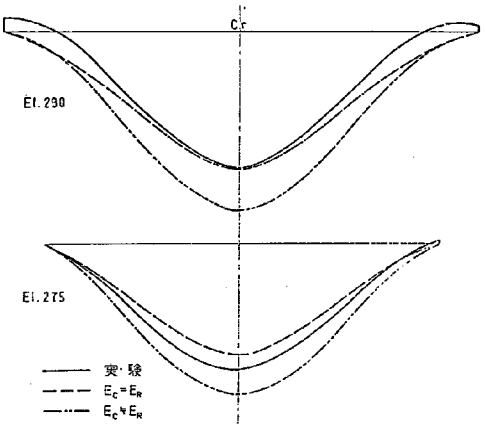


図-32 (a)　異常洪水時半径方向撓み比較図

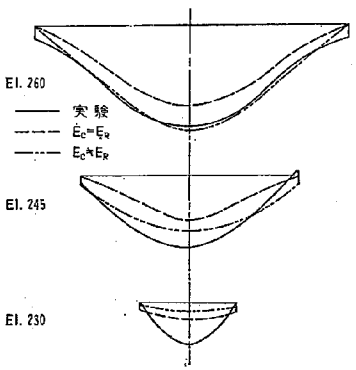


図-32 (a)　異常洪水時半径方向撓み比較図

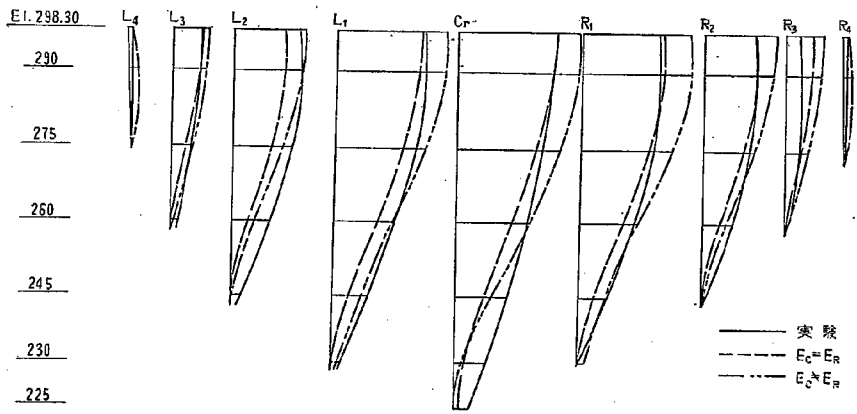


図-32 (b)　異常洪水時半径方向撓み比較図

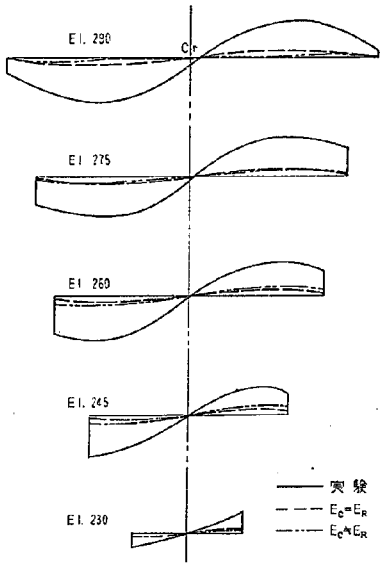


図-33　異常洪水時接線方向撓み比較図

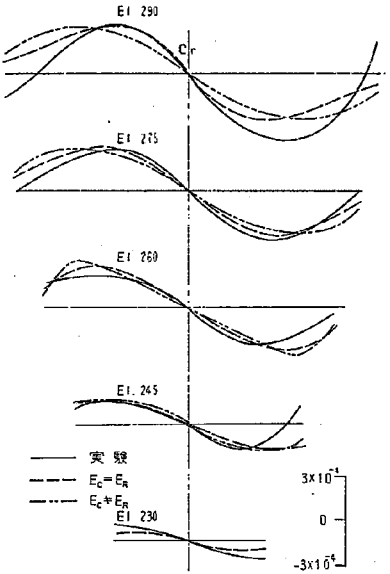


図-34　異常洪水時撓り方向撓み比較図

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かと思われる。

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$E_R \fallingdotseq E_C$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$E_R \fallingdotseq E_C$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，$E_R \fallingdotseq E_C$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 $E_R \fallingdotseq E_C$ 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

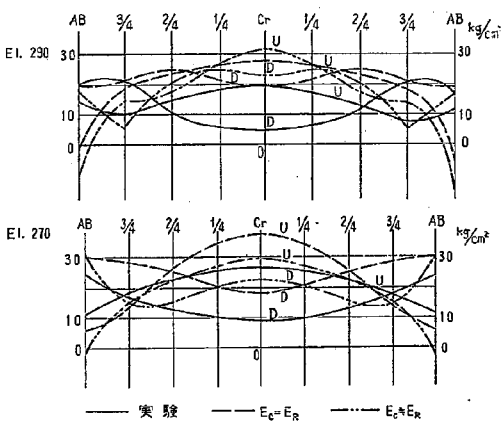


図-35 (a)　上流面完全調整による水平応力比較図

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（β）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，比較的よく一致しているが，$E_R \neq E_C$ 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さい値を示している。

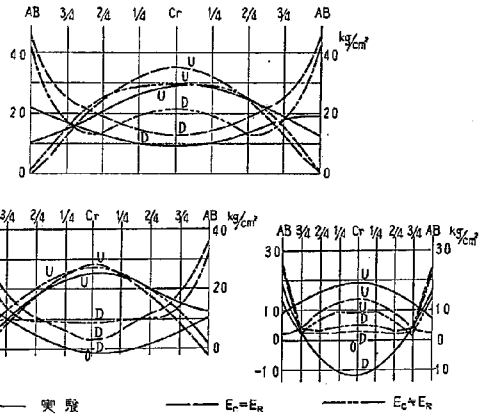


図-35 (b)　完全調整による水平応力比較図

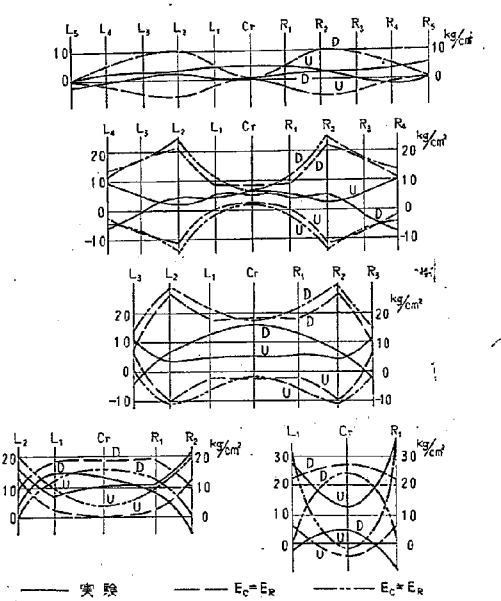


図-36　完全調整による鉛直方向応力比較図

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段階においてよく用

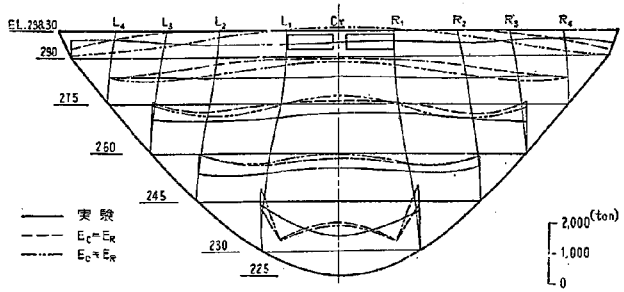


図-37 (a)　三成分調整アーチスラスト比較図

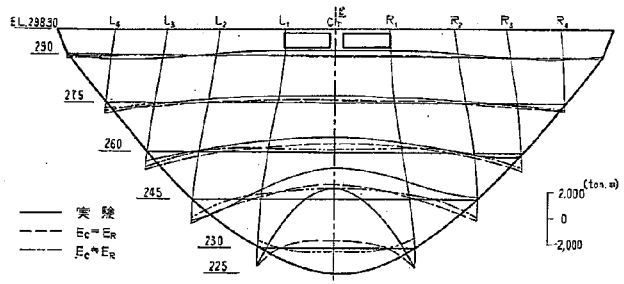


図-37 (b)　三成分調整アーチモーメント比較図

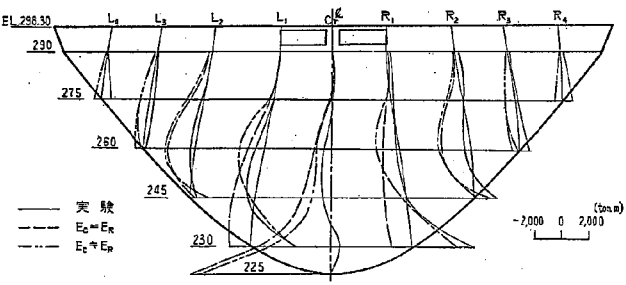


図-37 (c)　完全調整（自重加算）片持梁モーメント比較図

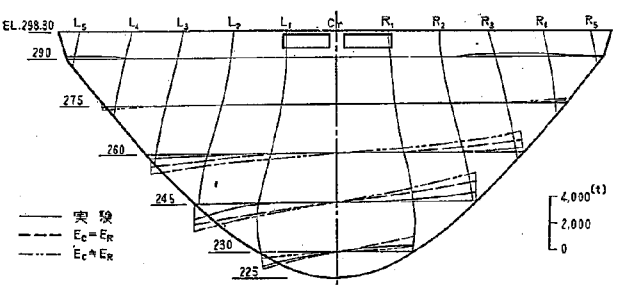


図-37 (d)　Twist moment 比　較　図

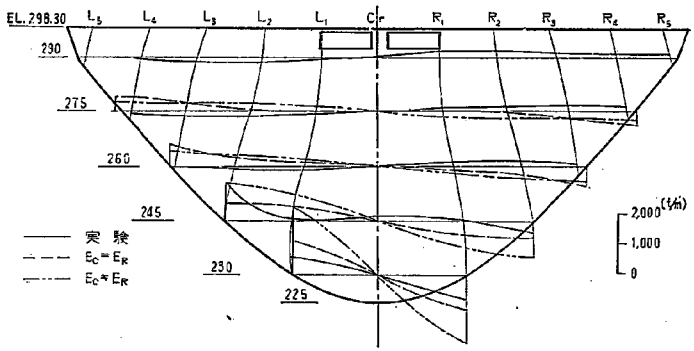


図-37 (c) Tangential Shear 比 較 図

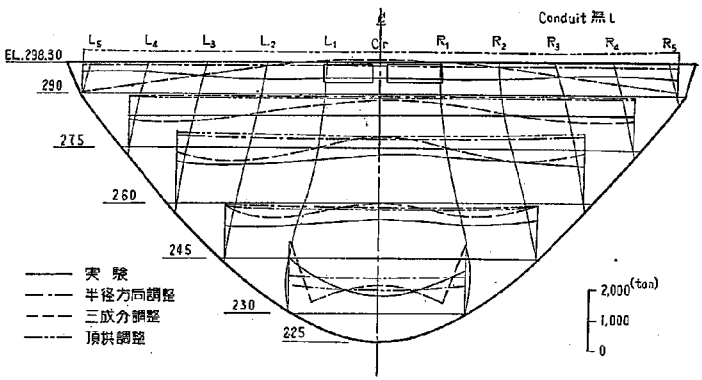


図-38 (a) ア ー チ ス ラ ス ト

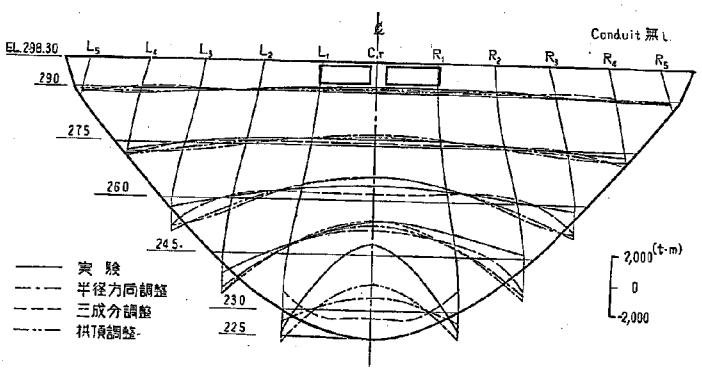


図-38 (b) ア ー チ モ ー メ ン ト

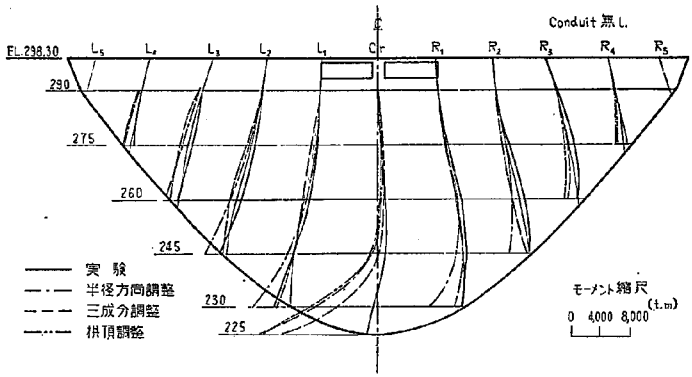


図-38 (c) 片持梁モーメント比較図

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が，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，いづ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綾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での水圧荷重，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)
2. 実験装置……(1)
3. 供試体の製作……(2)
4. 測　定……(2)
5. コンクリートの γ-線透過試験法における問題点……(2)
6. 測定結果整理の方法……(7)
7. 実験結果ならびに考察……(11)
8. 今後に残された問題点……(21)
9. 結　論……(23)
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い出した。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であれば，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，供試体の均質性を探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を述べておいたが，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れの 2 倍に達する。こういう傾向は他の原子番号が比較的近接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

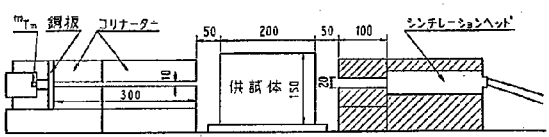


図-1 透過装置

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，強度を少こ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 2 cm 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 2 mm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_2O_3	5.16	5.03	11.58
Fe_2O_3	3.01	3.11	1.82
Mn_2O_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

AE剤　ダレックス，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(m^3当り)　400kg，320kg，240kg

G/S　1.00，1.15，1.30

スランプ　8 cm　15cm

振動時間　0秒，30秒，1分，3分

AE剤　ダレックス，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プを測定し，所定のスランプ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。バイブ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し，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バイブ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，3 cm 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。

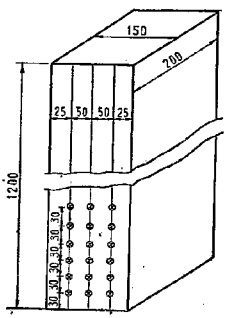


図-2　測定点の配置図　単位mm

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}Yb^{m}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，この低収率は一部 yb の X-線でカバーしている。^{170}Tm の崩壊図式[2]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，存在比は約 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[3]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，52 Kev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っ

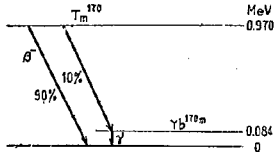


図-3　170Tmの崩壊図式

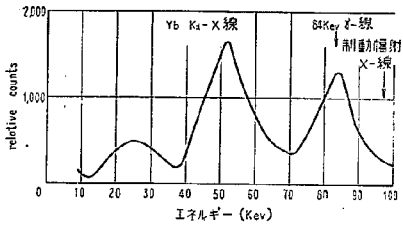


図-4　170Tmのγ-線，X-線のエネルギースペクトル（低エネルギー部分）

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，170Tm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，170Tm のビームの通路に，厚さ2cm の銅板を置いて戸過したため，ほとんど完全に消失したものと考えられる。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，

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

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

$[e^{-\mu_m\rho d(\gamma=84\text{Kev})}]/[e^{-\mu_m\rho d(\gamma=52\text{Kev})}]=e^{42.72-12.46}$

$=e^{30.26}$

$\fallingdotseq 10^{13}$

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，この炉過の過程において，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

まえ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。

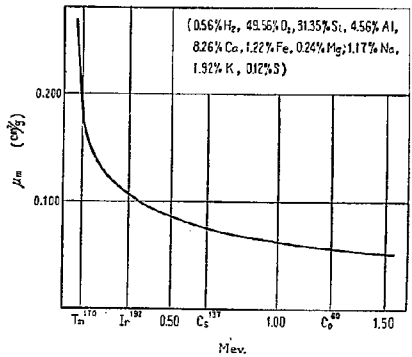


図-5　コンクリートに対するγ-線エネルギーと μ_m との関係

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-吸収端に接近しだすと，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[5]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。170Tmのγ-線のエネルギー付近では，μ_mは60Co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いるので，透過後のγ-線計数値に強くきいてくる。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，60Co では計数値の比

$$\frac{I(d=2.2)}{I(d=2.3)}=\frac{e^{-0.056\times2.2\times20}}{e^{-0.056\times2.3\times20}}$$

$$=e^{0.056\times20\times(23-2.2)}$$

$$=e^{0.112}=1.12$$

170Tm では，

$$\frac{I(d=2.2)}{I(d=2.3)}=e^{0.190\times20\times(2.3-2.2)}$$

$$=e^{0.380}=1.46$$

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だ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ってくることである。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

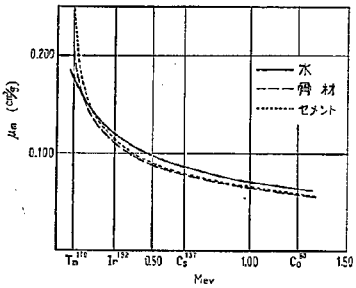


図-6 γ-線エネルギーとμ_mとの関係

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 cm²/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でわかるように少こ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成分のとる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[5]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

$$I=I_0e^{-\mu_m dx}$$

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附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のとる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して図-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より小なる場合，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，

$$I=I_0e^{-\mu_m dx}$$

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_lの三角図表を作成しておけばμ_l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_l-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_l-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	μ_m(cm²/g)	d(g/cm³)	$\mu_m d$(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

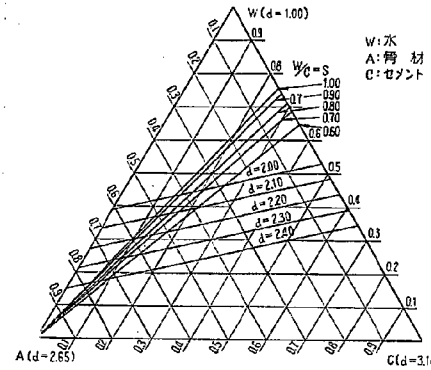


図-7　ポルトランドセメントを使ったコンクリートの3主要成分の容積比とdとの関係（d-図表）

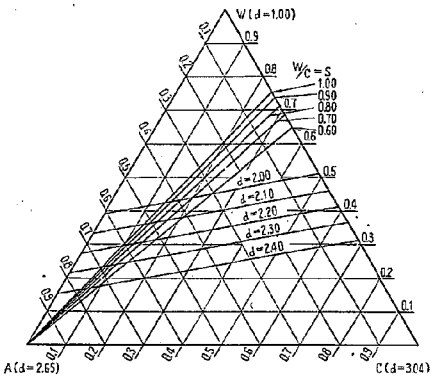


図-8　高炉セメントを使ったコンクリートの3主要成分の容積比とdとの関係（d-図表）

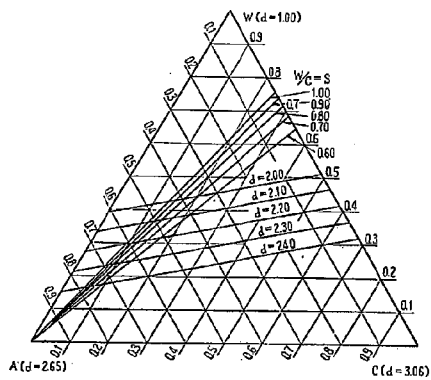


図-9　シリカセメントを使ったコンクリートの3主要成分の容積比とdとの関係（d-図表）

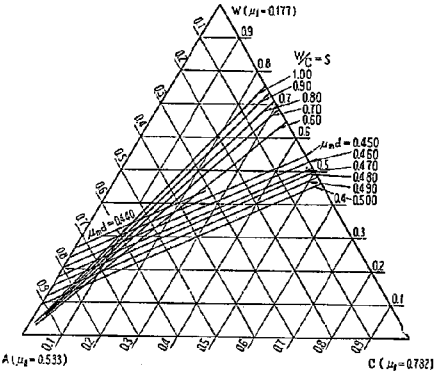


図-10　ポルトランドセメントを使ったコンクリートのμ_1-図表（容積比）

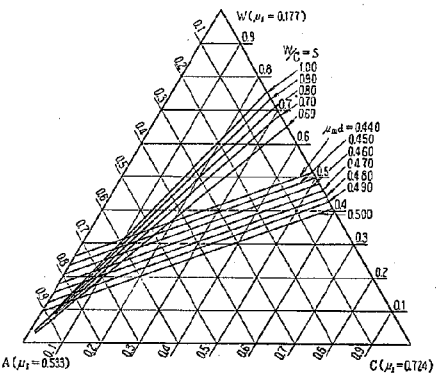


図-11　高炉セメントを使ったコンクリートのμ_1-図表（容積比）

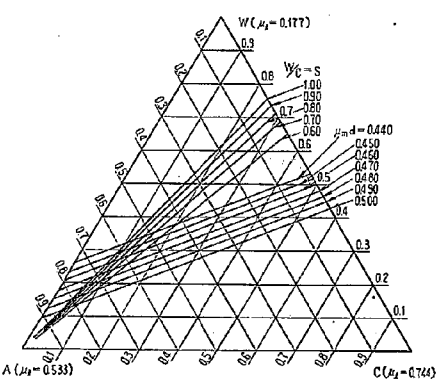


図-12　シリカセメントを使ったコンクリートのμ_1-図表（容積比）

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連行空気を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，コンクリート中に連行された空気は，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〕 連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。そして連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。

$$I=I_0e^{-(\mu_{m1}d_1x_1+\mu_{m2}d_2x_2+\mu_{m3}d_3x_3)l} \quad \cdots\cdots(1)$$

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連行されているから

$$x_1+x_2+x_3<1$$

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

$$lnI=lnI_0-(\mu_{m1}d_1x_1+\mu_{m2}d_2x_2+\mu_{m3}d_3x_3)l \quad \cdots\cdots(2)$$

これをn個の測定について足し合わせると

$$n\,lnI_0-\sum^{n}lnI=(\mu_{m1}d_1\sum^{n}x_1+\mu_{m2}d_2\sum^{n}x_2+\mu_{m3}d_3\sum^{n}x_3)l \quad \cdots\cdots(3)$$

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，水に対する連行空気量の存在比をtとすれば，$a+b+c=1$であるから

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

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

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

となり，これを(3)式に入れて

$$n\,lnI_0-\sum^{n}lnI=(\mu_{m1}d_1a+\mu_{m2}d_2b+\mu_{m3}d_3c)\frac{nl}{1+tc} \quad \cdots\cdots(4)$$

I_0と$\sum^{n}lnI$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

$$\frac{tc}{1+tc}\times100\% \quad \cdots\cdots(5)$$

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

$$I=I_0e^{-(\mu'_{m1}d'_1x'_1+\mu_{m2}d_2x_2)l} \quad \cdots\cdots(6)$$

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

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

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

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

となる。

(6)式から

$$lnI_0-lnI=(\mu'_{m1}d'_1x'_1+\mu_{m2}d_2x_2)l$$

$$\mu'_{m1}d'_1x'_1+\mu_{m2}d_2x_2=\frac{lnI_0-lnI}{l} \quad \cdots\cdots(10)$$

またx'_1とx_2との関係から

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

(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μ_md-図表を使って近似的に解くには，μ_md-図表でμ_md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$\mu_md\times(1/1-v)$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ない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、非常に影響を及ぼし，zが大

きい元素に対するほど，その影響ははなはだしくなる。この間の関係を Colgate[6] は図-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^{-3} 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。

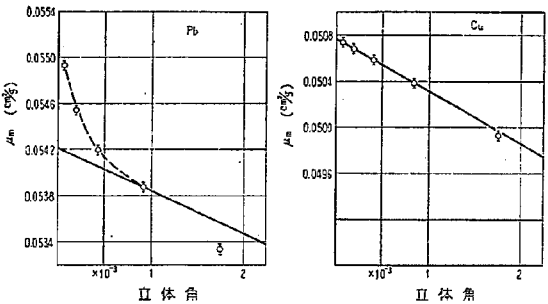


図-13　ビームの立体角と質量吸収係数との関係(^{60}Co)

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

$$T/S=N_e x_0 \sigma_s^{\theta} \quad \cdots\cdots(12)$$

N_e ：単位体積中の電子数
x_0 ：吸収体の厚さ
σ_s^{θ} ：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[6] によれば近似的に次式が成立する。

$$\sigma_s^{\theta}=\pi\gamma_0^2\theta^2\left(1-\frac{\theta^2}{12}(9\gamma+4)\right) \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\pi\gamma_0^2=2.5\times10^{-25}\mathrm{cm}^2$$
$$\gamma=\frac{h\nu}{mc^2}$$

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

$$N_e x_0=1.38\times10^{25}\mathrm{cm}^{-2}$$

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

$$\sigma_s^{\theta}=2.5\times10^{-25}\times0.014^2\times\left(1-\frac{0.014^2}{12}\times5.476\right)=5.1\times10^{-29}\mathrm{cm}^2$$

$$S/T=5.1\times10^{-29}\times1.38\times10^{25}=7.04\times10^{-4}$$

すなわち，計数値が 0.07% 増加するという結果になる。Compton 小角散乱線を拾うために起こる μ_m の変化は

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

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

$$\Delta\mu_m=-1.5\times10^{-5}\mathrm{cm}^2/\mathrm{g}$$

ビームの開きの角度が一般に θ(radian) の場合は

$$\Delta\mu_m=-7.5\times10^{-2}\theta^2\mathrm{cm}^2/\mathrm{g} \quad \cdots\cdots(14)$$

(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，この点にも注意する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	0.5min	1 min	3 min

この配合において

$$W/C=S=0.65$$

容積比

セメント：骨材：水＝0.097：0.704：0.199
＝$a:b:c$

$\mu_m d$ 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

$$\mu_{m1}d_1a+\mu_{m2}d_2b+\mu_{m3}d_3c=0.4863\mathrm{cm}^{-1}$$

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。

$\sum_{1}^{24}\ln I$ 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

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

$l = 20$ 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

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

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

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

$$\therefore t = 0.1197 \fallingdotseq 0.120$$

この供試体の平均空気含有量は(5)式から

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

同様にして No. 42では

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

$$\therefore t = 0.068$$

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

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

(10)式から

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

$$= 0.4935$$

(11)式から

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

$$\therefore \quad 1.0818x'_1 + x^2 = 1$$

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。

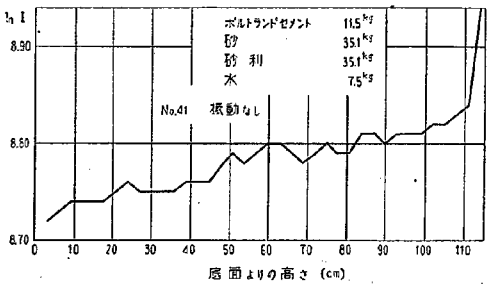


図-14(a)　コンクリート供試体の計数値分布

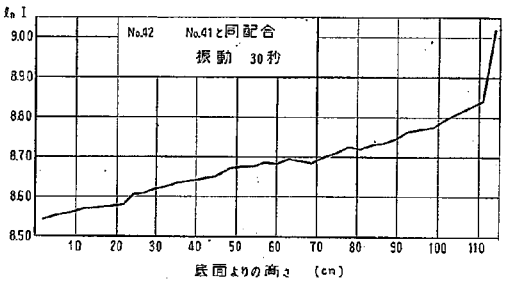


図-14 (b)　コンクリート供試体の計数値分布

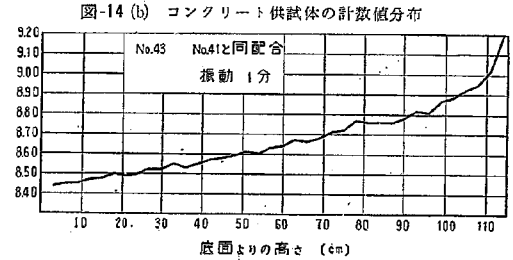


図-14 (c)　コンクリート供試体の計数値分布

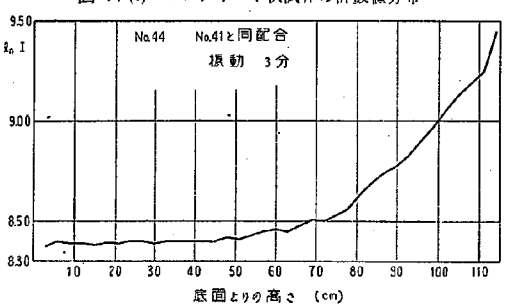


図-14 (d)　コンクリート供試体の計数値分布

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_l-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50cmのところでは $ln I = 8.41$であり，透過厚 l は20cmであるから

$$\mu_m dl = ln I_0 - ln I = 18.28 - 8.41 = 9.87$$

$$\mu_l = \mu_m d = \frac{9.87}{20} = 0.494$$

図-10から $s = W/C = 0.65$ の線と，$\mu_l = 0.494$ の線とが交叉する点の W 座標を求めると

$W \fallingdotseq 0.16$

∴ 空気量 $V = 0.16 \times 0.026 \fallingdotseq 0.004$

5.〔3〕で述べたような方法で

$$\mu_m d \times \frac{1}{1-0.004} = \frac{0.494}{0.996}$$

$$\fallingdotseq 0.496$$

$\mu_m d = 0.496$ 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 $(1-\nu) = 0.996$ 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，$\mu_m d = 0.444$ 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

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

$$\mu_m d \times \frac{1}{1-V} = 0.444 \times \frac{1}{0.99} = 0.448$$

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，打設方向における組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） $\mu_m d$ 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。

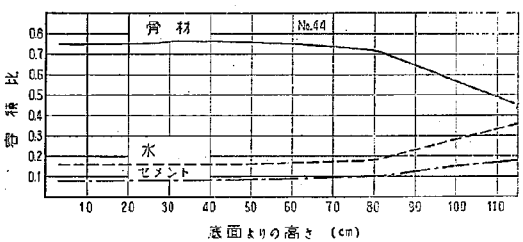


図-15　コンクリート供試体の打設方向の成分比変化の一例(Ⅰ)

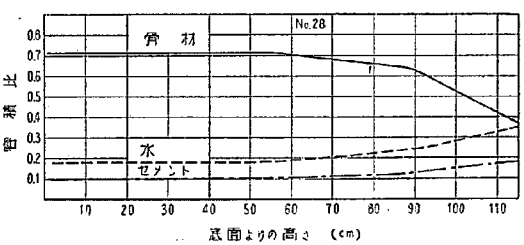


図-16　コンクリート供試体の打設方向の成分比変化の一例(Ⅱ)

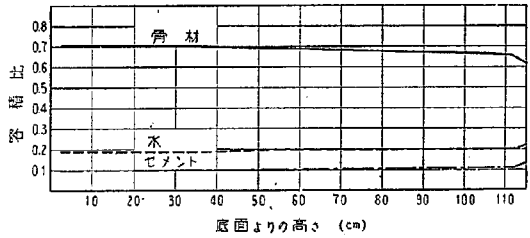


図-17 (a)　供試体 No. 41〔図-14(a)〕の打設方向構成比変化

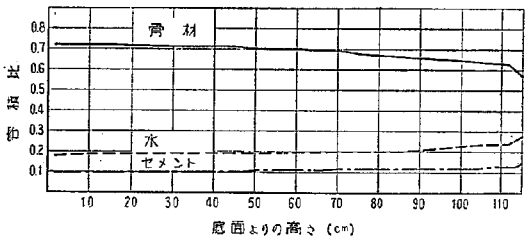


図-17 (b)　供試体 No. 42〔図-14(b)〕の打設方向構成比変化

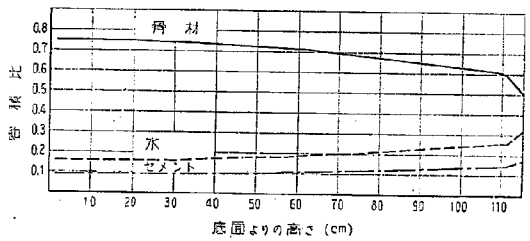


図-17 (c)　供試体 No. 43〔図-14(c)〕の打設方向構成比変化

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かなっているのは，iv) 法であると考えられる。しかし，iv) 法は μ_1-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う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(11)式から

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

また，(10)式と(11)式とから

$$x'_1=\left[\mu_{m2}d_2-\frac{ln\,I_0-ln\,I}{l}\right]\Big/\left[\left(1+\frac{tsd_1}{1+sd}\right)\mu_{m2}d_2-\mu_{m'}d'\right]$$

$$=\left[\left(\mu_{m2}d_2-\frac{ln\,I_0}{l}\right)+\frac{ln\,I}{l}\right]\Big/\left[\left(1+\frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\mu_{m2}d_2-\frac{(1+s)d_1}{1+sd_1}\times\frac{\mu_{m1}+s\mu_{m3}}{1+s}\right)\Big]$$

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

(15)式に(16)式を入れて　……(16)

$$x_2=\left[\left(1+\frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\left(\frac{ln\,I_0}{l}+\frac{ln\,I}{l}\right)-\frac{(\mu_{m1}+s\mu_{m3})d_1}{1+sd_1}\right]\Big/\left[\left(1+\frac{tsd_1}{1+sd_1}\right)\mu_{m2}d_2-\frac{(\mu_{m1}+s\mu_{m3})d_1}{1+sd_1}\right] \quad \cdots\cdots(17)$$

(17)式から

$$dx_2=-\left[1+sd_1+tsd_2\right]\Big/\left[l\{(1+sd_1+tsd_1)\mu_{m3}d_2-(\mu_{m1}+s\mu_{m3})d_1\}\right]\times d\ln I \quad \cdots\cdots(18)$$

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

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

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），t（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，t 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(9)式で表わされるように

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

また，(11)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) 法は骨材の填充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 がどういう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，スランプ，セメントの種類，単位セメント量，G/S比とどういう関係にあるかを調べてみよう。まず，表-5 はスランプ，セメントの種類との関係を表わしたものである。表-5からスランプ15cmで打設した供試体の σ は，スランプ 8 cm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ー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らて，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プ15cmのときの方が，8 cm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，スランプが 8 cm の場合，σはG/S 比が増加するにしたがって減少するが，スランプが，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 がスランプの値に鋭敏になることを示している。そしてまた，スランプの値が 8 cm 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，スランプが 8 cm 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，スランプが 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し始めるので，粗骨材は内部閉塞を起すことなく底面に向って沈降し，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ため大きく，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，スランプを 8 cm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，セメントの種類の差はほとんど認められないこと，スランプが 15cm の場合においてもセメントの種類の差は認められないが，スランプが 8 cm 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と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，スランプを大にしたり，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だんだん失われてくる。

〔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，振動の累積がこういう現象をもたらしたもの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，スランプ 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，スランプ 8 cm 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，スランプ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，スランプ 8 cm 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，スランプ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，スランプ 8 cmの場合は6.9，5.4 と打ち継ぎ目が存在する方が大である。このことはスランプが 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，バイブレーターの振動は，バイブ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.	スランプ (cm)	セメント種類	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利(kg)	振動(分)	打ち継目	AE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.	スランプ (cm)	セメント種類	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利(kg)	振動(分)	打ち継目	AE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	〃	シリカ	〃	36.1	36.1	0.5	〃	Darex 0.03
117	〃	〃	〃	〃	〃	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.	スランプ (cm)	セメント種類	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利 (kg)	振動(分)	打ち継目	AE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 スランプ，セメントの種類と σ との関係

スランプ(cm) / セメント	8	15
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 との関係

スランプ(cm) / 単位セメント量	8	15
400 kg/m³	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 との関係

スランプ(cm) / G/S	8	15
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

がさなくても，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，スランプ 8 cm 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実測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。AE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，AE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，AE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えない。

〔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 にどうい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

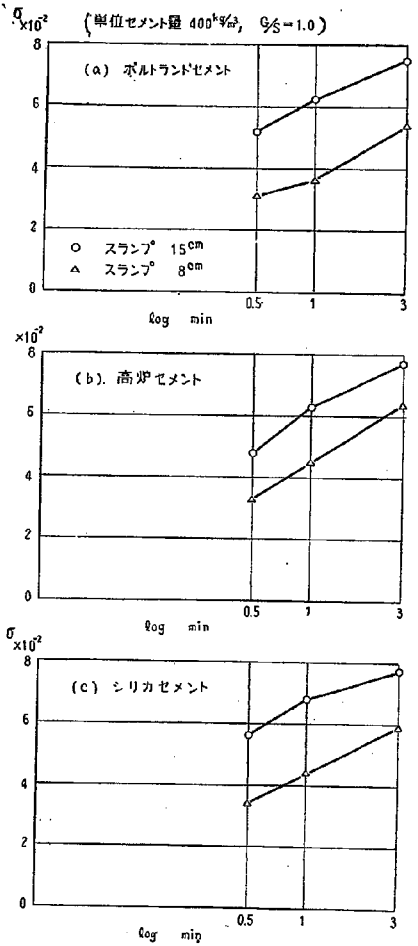


図-18　σ の振動時間による変動

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，振動時間をと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

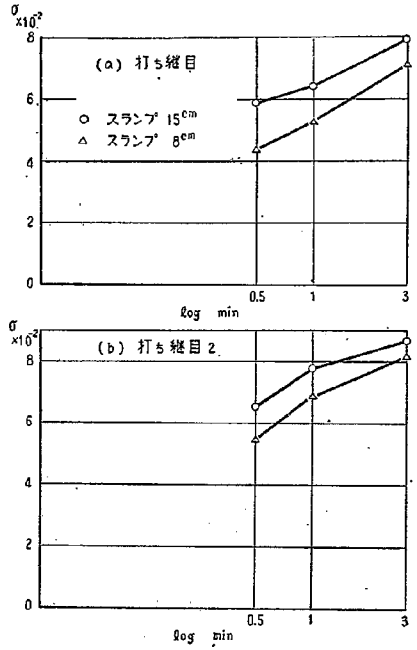


図-19　打ち継ぎ目の存在による σ の変動
（ポルトランドセメント，単位セメント量 400kg/m³, G/S=1.0）

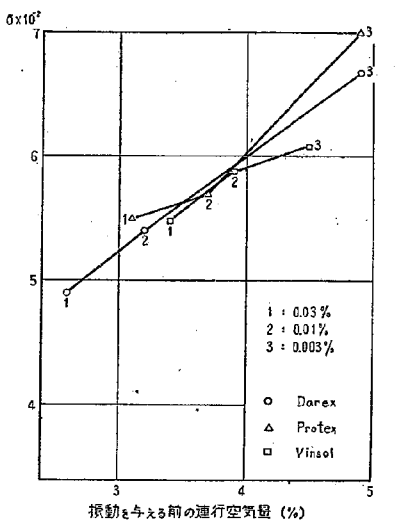


図-20　連行空気量と σ との関係
（ポルトランドセメント 400kg/m³, G/S=1.0 振動30秒，スランプ15cm）

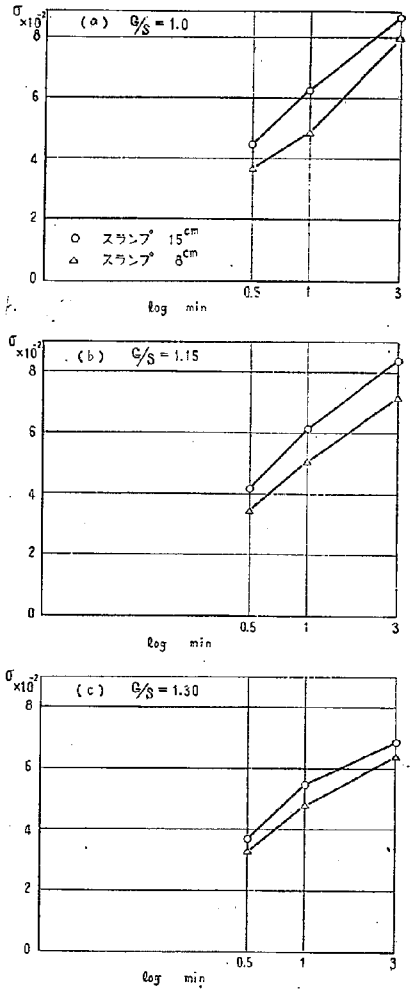


図-21　G/S比，振動時間と σ との関係(Ⅰ)
（ポルトランドセメント 320kg/m³ を使用）

-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ろうと考えられる。

〔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 15cm のものとについて，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，いままであげたデータのう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にぶくなることの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分のものは急激にその 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隙に細骨材，セメントペーストが充填された状態にだいたい等しい。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 $\sigma=6\times10^{-2}$ くらいのところが限度であろうと考えられる。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，$G/S=1.90$，$\sigma=3\times10^{-2}$ 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っているとした場合，320kg/m³ のセメント，

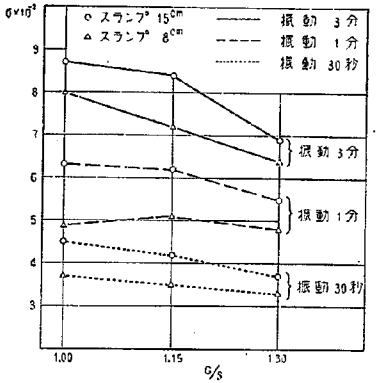


図-22　G/S 比，振動時間と σ との関係(Ⅱ)
（ポルトランドセメント 320kg/m³ を使用）

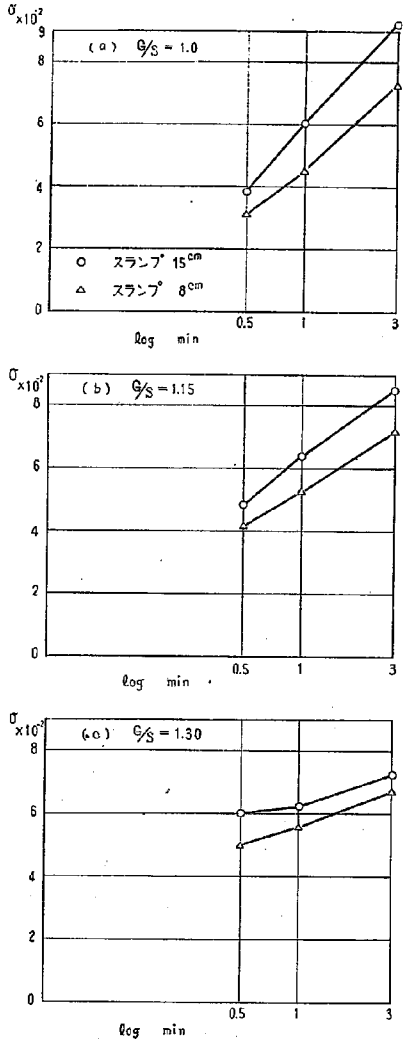


図-23　G/S 比，振動時間と σ との関係(Ⅰ)
（ポルトランドセメント 240kg/m³ を使用）

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。

1 m³ 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 1 m³ 当り 320÷3.14=102*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 320×0.7=224*l* である。1 m³ からセメントと水とが占める容積を差引いた残りの 674*l* 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

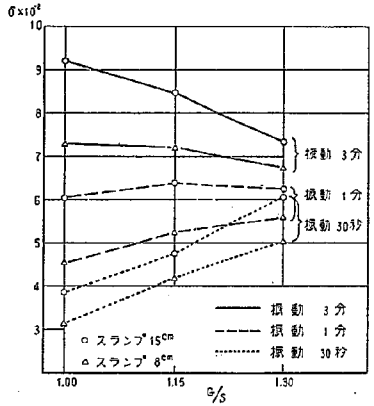


図-24　G/S 比，振動時間と σ との関係(Ⅱ)
（ポルトランドセメント 240kg/m³ を使用）

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

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÷0.45=989*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 1 m³ 当り

セメントの容積 $\frac{240}{3.14}=76l$

水の容積　240×0.7=168*l*

骨材の容積　1,000−(76+168)=756*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

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

であり，粗骨材の填充率を 0.45 とおけば

粗骨材の見掛けの容積　$\frac{454}{0.45}=1.009l$

となり，1 m³ 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積が無いので，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 $\sigma=6\times10^{-2}$ のときは容積比で 25.1%であり，$\sigma=3\times10^{-2}$ 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

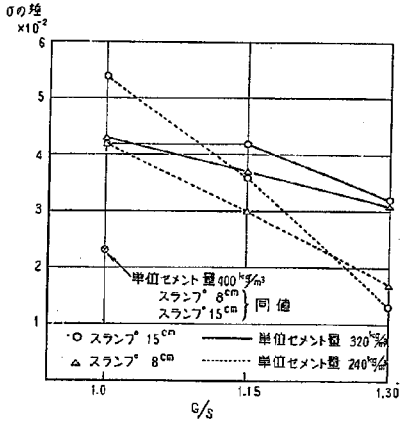


図-25 振動に対する σ の感度

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っては 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比の増大に伴って振動に対する σ の感度が急激に減少する。そして単位セメント量240kg/m³のものではスランプが大なる方，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/m³のスランプ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，スランプ15cmでは G/S=1.40，スランプ8cmでは G/S=1.50 となる。この点は図-24から，スランプ別に求めた収斂点に等しい。スランプ15cmのものはスランプ 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プ15cmのものの収斂点の G/S 比はスランプ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からスランプ別に収斂点の σ の値を求めてみると，スランプ15cmでは $\sigma \fallingdotseq 6.5\times10^{-2}$，スランプ8cmでは $\sigma=6.0\times10^{-2}$ である。だからスランプ15cmのときは，スランプ 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こっていると云える。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戟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

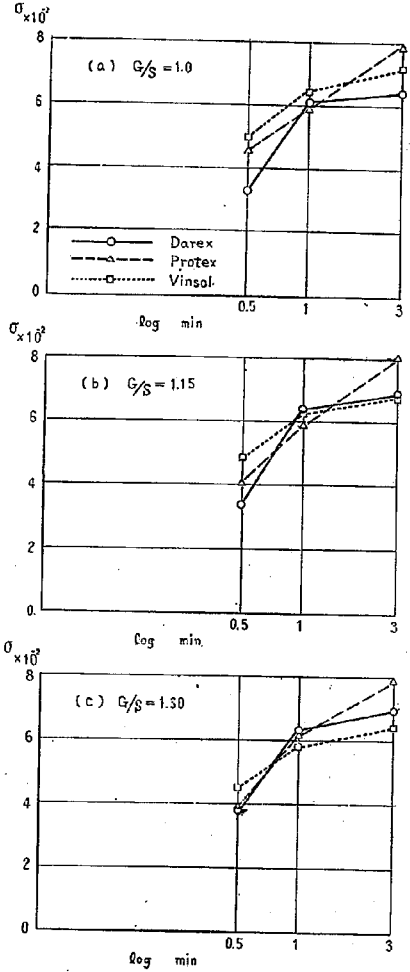


図-26 高炉セメント使用のコンクリートにおける G/S比，使用AE剤の種類，振動時間と σ との関係(I)（単位セメント量320kg/m³ スランプ8cm，AE剤添加量 セメント量の0.03%）

間の接触面に介在し，粗骨材間の間隔を拡げるからであろう。

〔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AE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/m³の割で使用し，AE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 比別に図-

26 (a), (b), (c)に示す。図-26 を見ると，σ の傾向はこの3種のAE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AE剤，Darex，Vinsolではσの感度が低く，とくに振動が1分のものと3分のものとのσの値の差は1×10^{-2}以下である。このことをさらによく観察するために，図-27にAE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，AE剤を添加しないポルトランドセメント320kg/m³使用の，スランプ8cm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AE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。

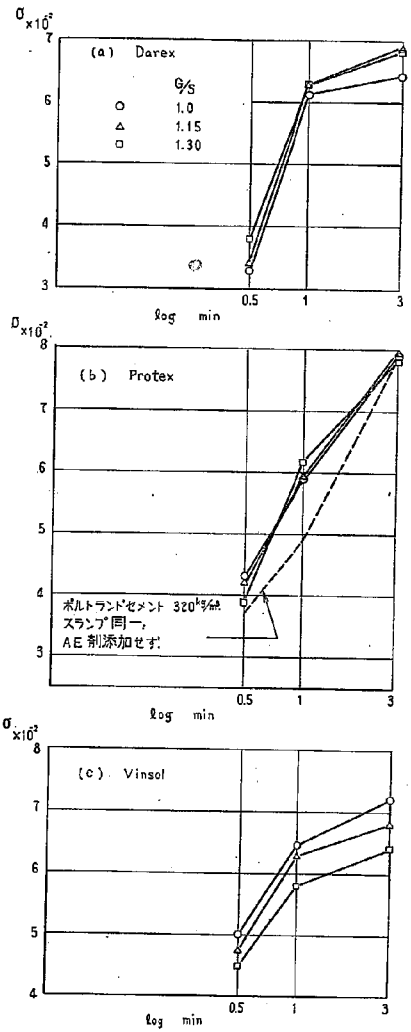


図-27　高炉セメント使用のコンクリートにおけるG/S比，使用AE剤の種類，振動時間とσとの関係(Ⅱ)

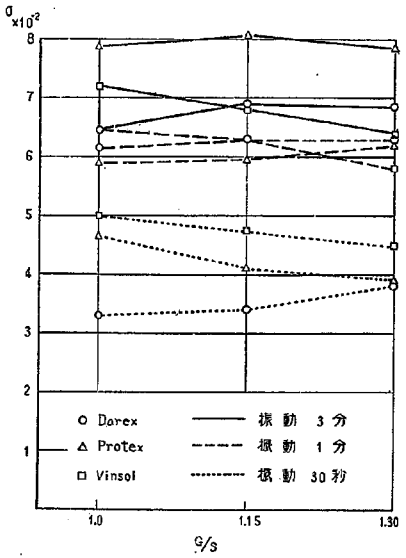
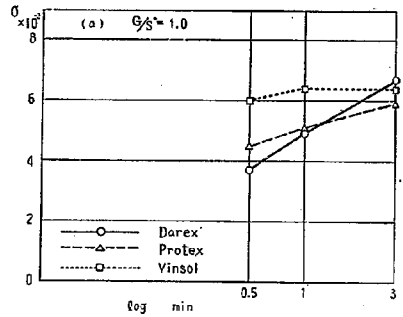
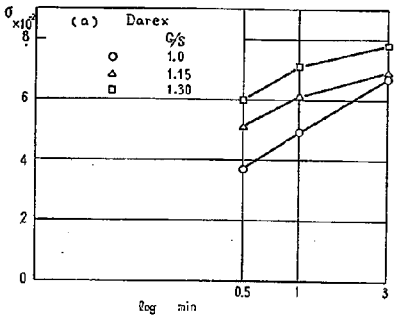


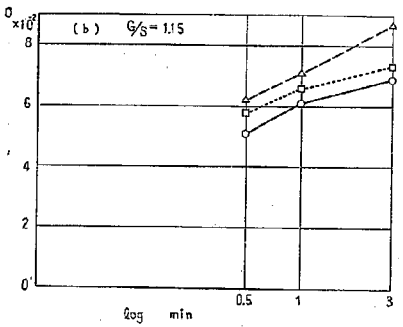
図-28　高炉セメント使用のコンクリートにおけるG/S比，使用AE剤の種類，振動時間とσとの関係(Ⅲ)

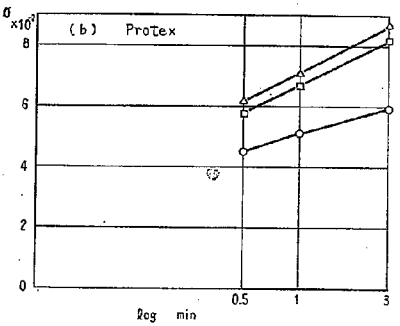
〔8〕 シリカセメント使用のコンクリートにおける G/S 比，使用AE剤の種類と振動時間がσの値に及ぼす影響

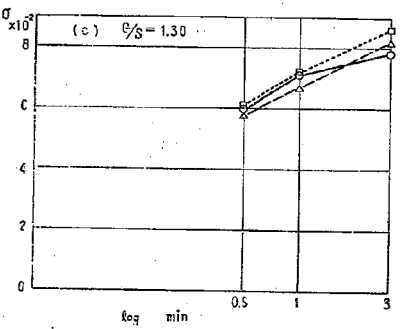
(7)と同一の条件で，ただ高炉セメントの代りにシリカセメントを使ったコンクリートについて上記の関係を調べた。その結果を G/S 比別に図-29 (a), (b), (c)に示す。図-29を高炉セメント使用のコンクリートに対する結果を示した図-26と比較してみると，共通な点として認め











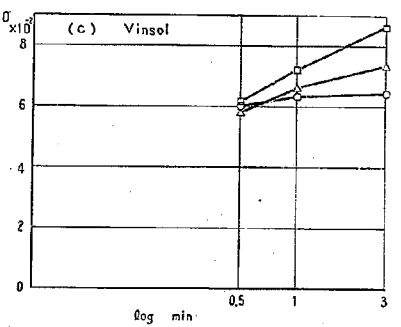


図-29　シリカセメント使用のコンクリートにおけるG/S比，使用AE剤の種類，振動時間とσとの関係(I)　(単位セメント量 320kg/m³，スランプ8cm　AE剤添加量　セメント量の0.03%)

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AE剤の種類，振動時間とσとの関係(II)

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AE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 比が変化しても振動時間とσの関係は各AE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AE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AE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。

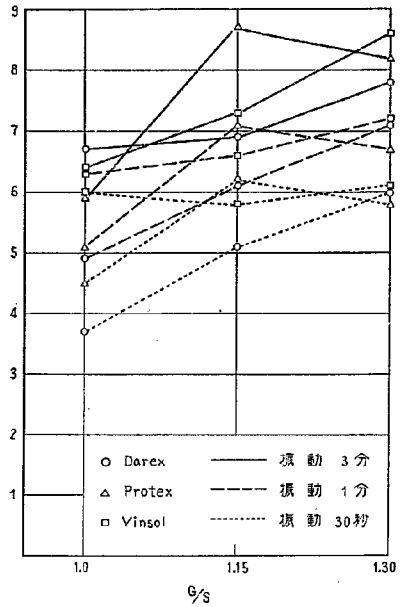


図-31　シリカセメント使用のコンクリートにおける G/S 比，使用 AE 剤の種類，振動時間と σ との関係（Ⅲ）

c）30秒振動の場合だけについて云えば，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が，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と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)とから，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，次にあ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つ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なう 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，バイブ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こし触れたように，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，今後取扱わ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，^{170}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，このうちのいづれか一方と他の ^{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を透過測定すれば，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 Lcm 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

$$I=I_0e^{-(0.1846\,a+0.1526\,b+0.0638\,c)L}$$

となる。これを書き変えて

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

同様に ^{192}Ir，^{170}Tm については

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

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

この三式から

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

$$=\frac{10^5}{L}\times\frac{\begin{vmatrix} ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Co} & 0.1526 & 0.0638 \\ ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Ir} & 0.292 & 0.120 \\ ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Tm} & 0.533 & 0.177 \end{vmatrix}}{-1.023} \quad\cdots\cdots(20)$$

となり，同様にして b，c については

$$b=\frac{10^5}{L}\times\frac{\begin{vmatrix} 0.1846 & ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Co} & 0.0638 \\ 0.358 & ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Ir} & 0.120 \\ 0.782 & ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Tm} & 0.177 \end{vmatrix}}{-1.023} \quad\cdots\cdots(21)$$

$$c=\frac{10^5}{L}\times\frac{\begin{vmatrix} 0.1846 & 0.1526 & ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Co} \\ 0.358 & 0.292 & ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Ir} \\ 0.782 & 0.533 & ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Tm} \end{vmatrix}}{-1.023} \quad\cdots\cdots(22)$$

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 を求めずに，

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

単位 { 質量吸収係数 cm²/g / 線吸収係数 1/cm

γ-線源	γ-線エネルギー	質量吸収係数（　）内は線吸収係数		
		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
** ポルトランドセメント

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$(Fe)_{Co}$，$(Fe)_{Ir}$，$(Fe)_{Tm}$を得たものとする。そうすれば次の関係式が成立する。

$$ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Co}=(0.186\,a+0.1526\,b+0.0638\,c)L$$
$$=(\mu_l^{Fe})_{Co}(Fe)_{Co} \quad \cdots\cdots(23)$$

$$ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Ir}=(0.358\,a+0.292\,b+0.120\,c)L$$
$$=(\mu_l^{Fe})_{Ir}(Fe)_{Ir} \quad \cdots\cdots(24)$$

$$ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Tm}=(0.782\,a+0.533\,b+0.177\,c)L$$
$$=(\mu_l^{Fe})_{Tm}(Fe)_{Tm} \quad \cdots\cdots(25)$$

ただし

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

以下同様

そこで(20)，(21)，(22)式の $ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Co}$ の代りに$(\mu_l^{Fe})_{Co}(Fe)_{Co}$を，$ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Ir}$ の代りに $(\mu_l^{Fe})_{Ir}(Fe)_{Ir}$ を，$ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Tm}$ の代りに $(\mu_l^{Fe})_{Tm}(Fe)_{Tm}$ を入れると，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_l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**8**，で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まるはずである。

(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。スランプ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，スランプを大にするとか，長時間の振動を与えるとか云った手段で故意に材料の分離を促進させると，この差は認めがたくなってくる。

(6) スランプ 8 cm 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で，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直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AE剤のうち，Protex は他の2種のAE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ことがわかった。

(11) 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とでは大きな差異がある。

(12) 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 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) 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なう 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。

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・カットの水理模型実験

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 prposed cut-off

要　旨

本文は水理模型実験により，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，同個所の水理設計を行なったものである。

目　次

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

1. 緒　言

渡良瀬川は岩井山でその河道を狭ばめられるため，この付近で洪水時に高流速を生じまた狭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，これと関連して，分流量をいくらにするか，分流点，ショート・カットの設計をいかに行なうかということ

* 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 関東地建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標を与えるのではないかと思われる。

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，改修改訂計画がたてられ，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

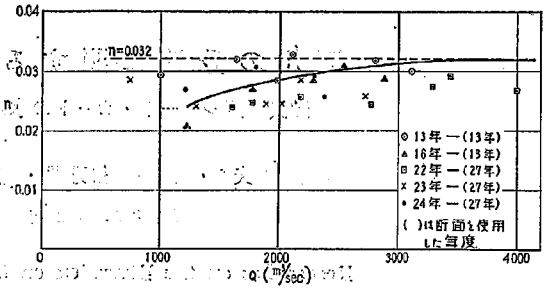
秋山川合流点より藤岡まで
4,500 m³/sec

模型区間は上記の中 4,000m³/sec の区間にある。

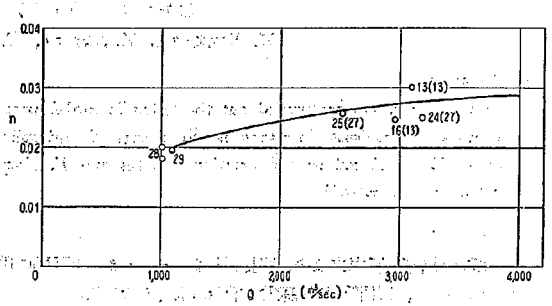
（b） 粗度係数　昭和 13 年9月洪水より昭和 29 年に至る洪水記録より等流計算により粗度係数 n を求めると図-1-(1)～図-1-(3)のようになり，点は相当にばらついているが，これは各年度の横断記録がないため，粗度係数の算出にあたって，洪水記録年度と異なった年度の横断記録を使用したためによるものではないかと考えられる。昭和 13 年洪水に対しては同年度の横断記録を使用しているため，一応これだけをまとめると図-2 のごとくなり，流量および各地点に対して一定の値 $n=0.032$ となる。この値を用いて不等流計算を行なえば図-3 のごとくなり実測水位によく一致する。

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。

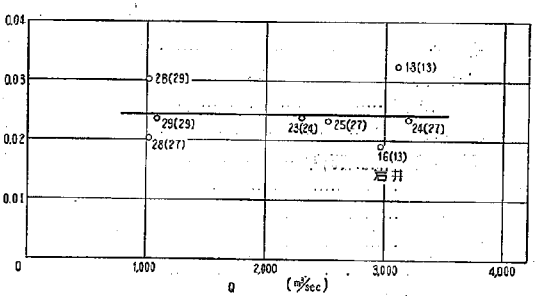
（c） 模型下流端水位　模型下流端 (31.0 km) の水位-流量曲線を求めるため，早川田より不等流計算を行なった。



(1)

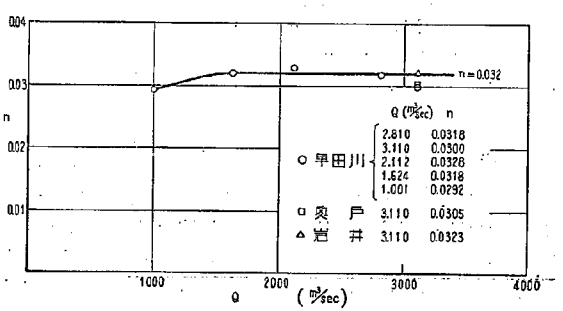


(2)



(3)

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 1/50

使用断面：固定床現況実験は昭和29年断面使用，補助断面として 30 年断面を挿入した。分流実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 5 mm 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。

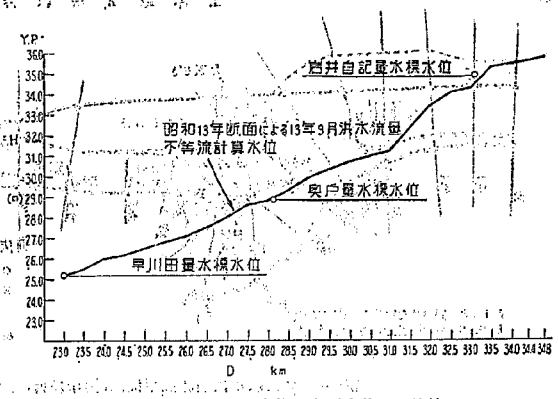


図-3　不等流計算水位と実測水位との比較

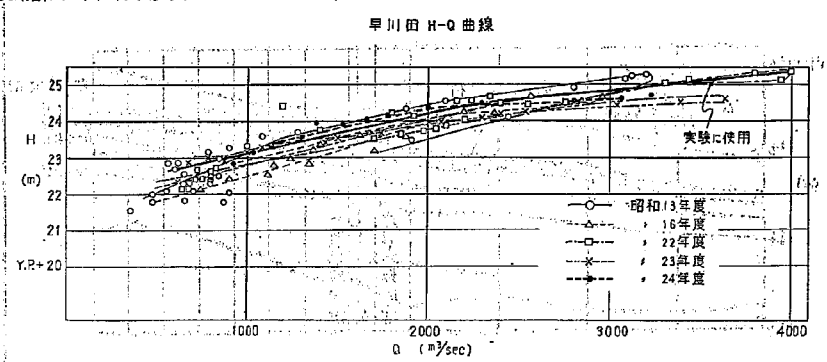


図-4　早川田の水位流量曲線

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おり大きく迂回して 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

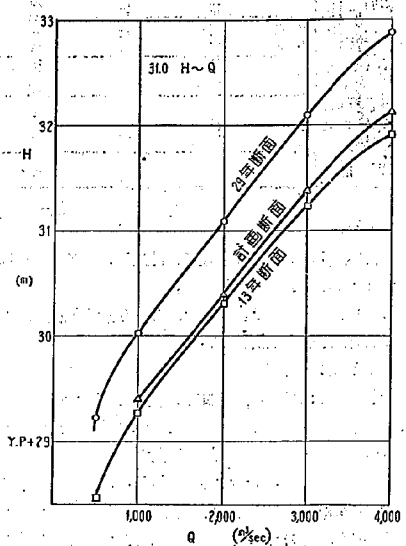


図-5　模型下流端 (31 km) 水位-流量曲線

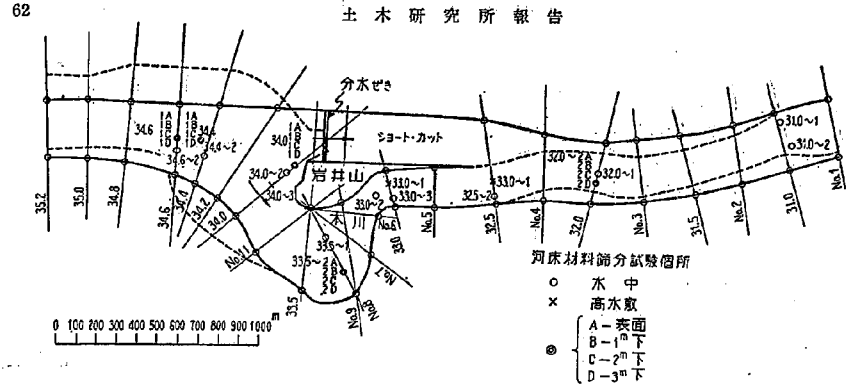
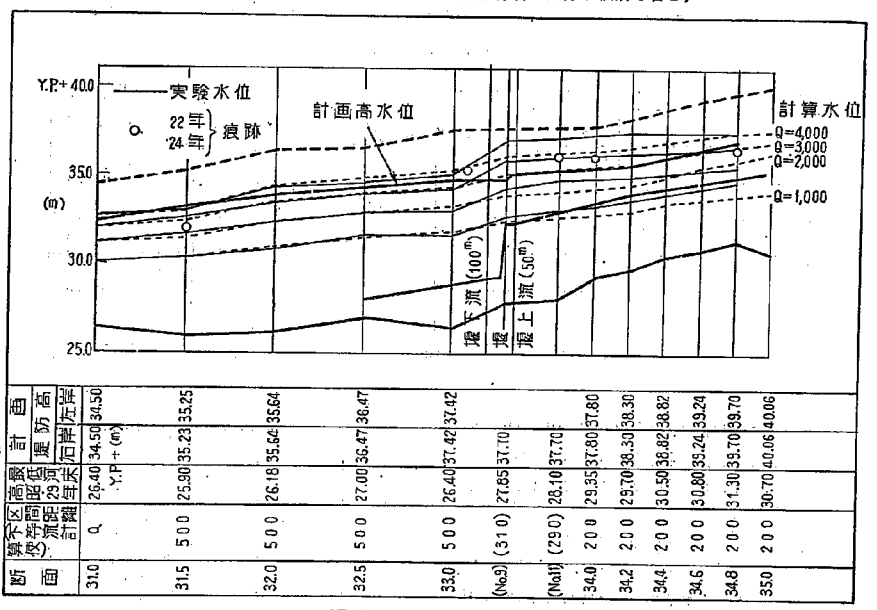


図-6　渡良瀬川模型範囲平面図(河床材料の篩分け個所も含む)



計画	堤防高 右岸	34.50		35.25		35.64		36.47	37.42		37.70	37.80	38.30	38.82	39.24	39.70	40.06
	Y.P.+(m) 左岸	34.50		35.23		35.54		36.47	37.42	37.10	37.70	37.80	38.30	38.82	39.24	39.70	40.06
計画	高水敷高 右岸	26.40		25.90		26.18		27.00	26.40	27.65	28.10	29.35	29.70	30.50	30.80	31.30	30.70
	堤防高 左岸																
不等流計算区間距離(m)		0		500		500		500	500	(310)	(290)	200	200	200	200	200	200
断面		31.0		31.5		32.0		32.5	33.0	(No.9)	(No.11)	34.0	34.2	34.4	34.6	34.8	35.0

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。

このような流況であるので，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 m³/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で，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

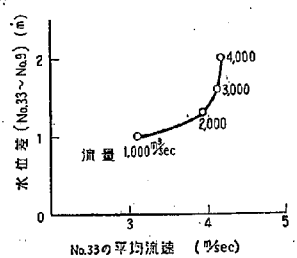


図-8　No. 33の平均流速とせき上げ高(No. 33 と No. 9 との水位差)との関係

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 m³/sec で 2.0m，3,000 m³/sec で 1,0m 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。この個所は 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，堤体に接近する傾向がある。これを最高流速図（図-10）で調べると最高流速は流量 1,000 m³/sec，1,500 m³/sec では No. 33 に生じ，流量 2,000 m³/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，右岸に沿って迂廻する水流に比べて，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 m³/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。資料採取個所は 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～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—吉川—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 m³/sec ごとに区切って，図-13 の Q～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 100,000m³ 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であろう。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とづき，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。これらを綜合検討の上で，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とづき，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 m³/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 2,000m³/sec 以上は 1,500 m³/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 m³/sec 付近にあることが理解される。多少の安全を見て，1,700 m³/sec より多少小さい流量 1,500 m³/sec に対する本川流速を安全流速と考える。計画流量 4,000 m³/sec に対して，本川が，この流速以下

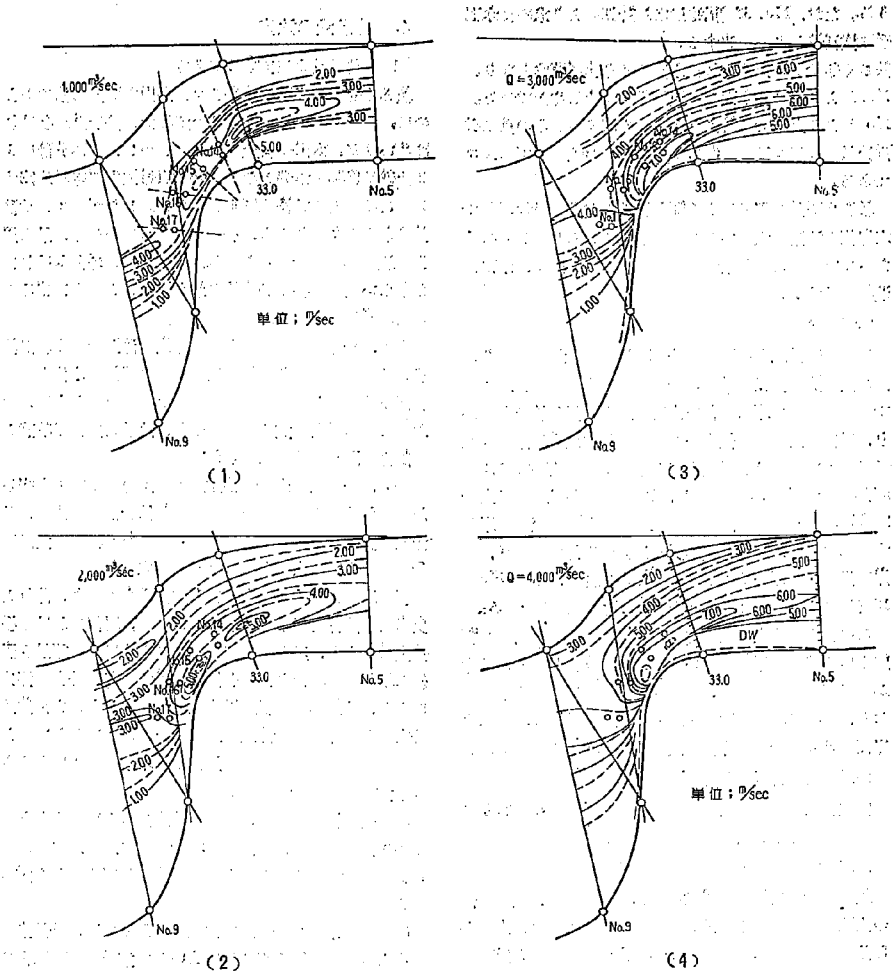


図-9(1～4) 現況平面流速分布図

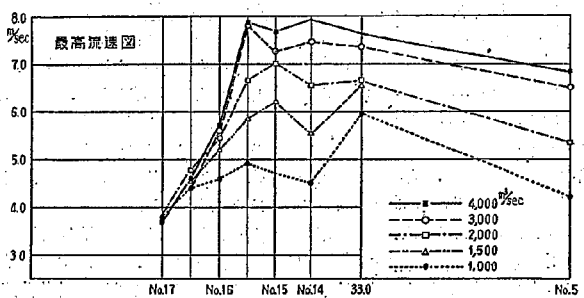
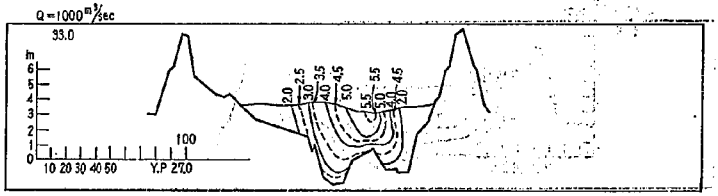
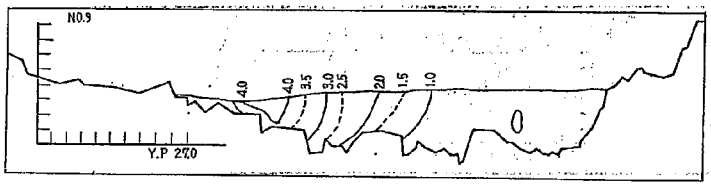


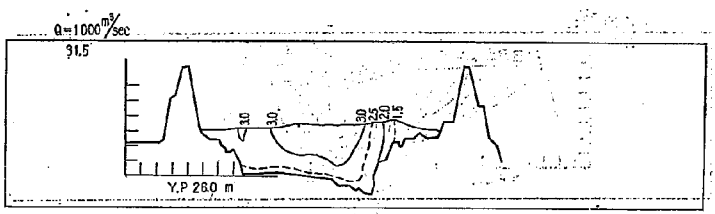
図-10 横断面最高流速図



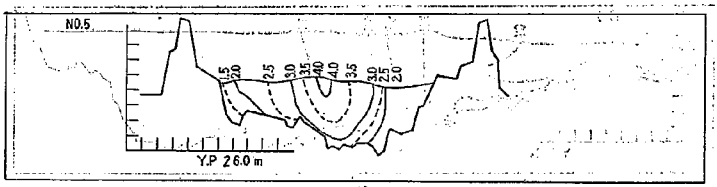
(1)



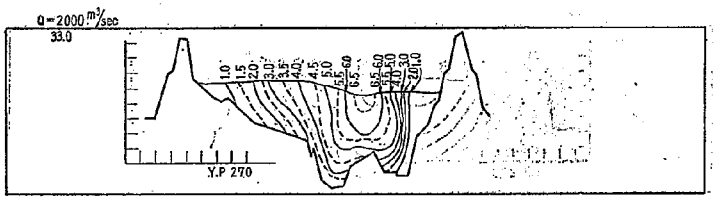
(2)



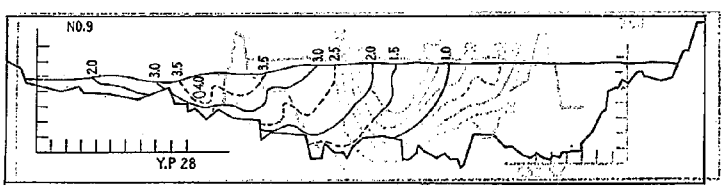
(3)



(4)

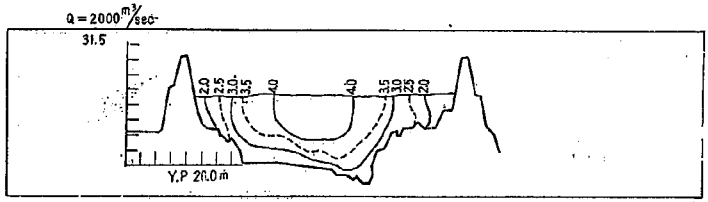


(5)

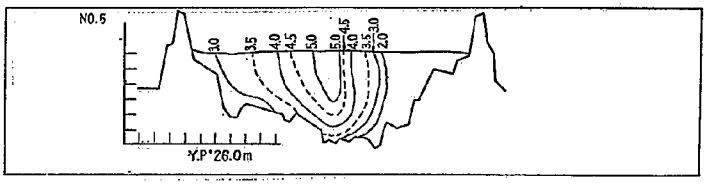


(6)

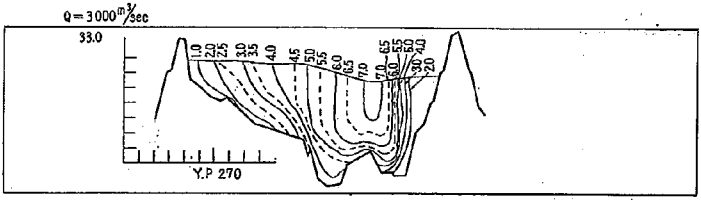
図-11(1～6) 横断流速分布図



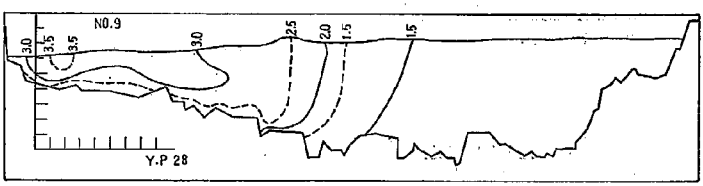
(7)



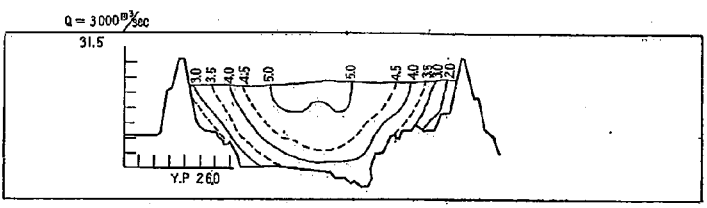
(8)



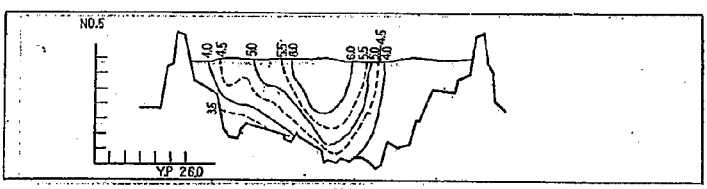
(9)



(10)

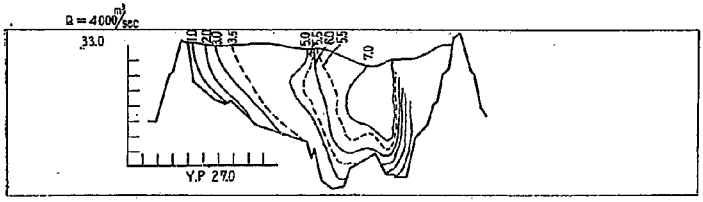


(11)

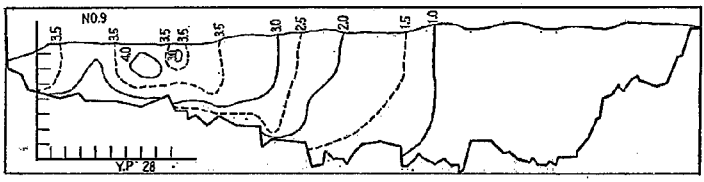


(12)

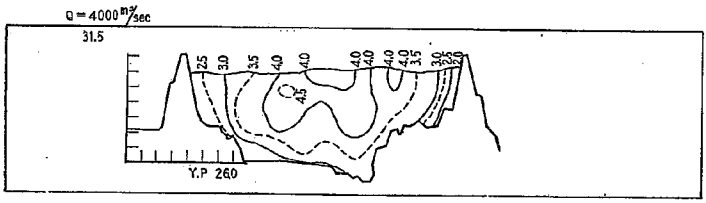
図-11(7～12) 横断流速分布図



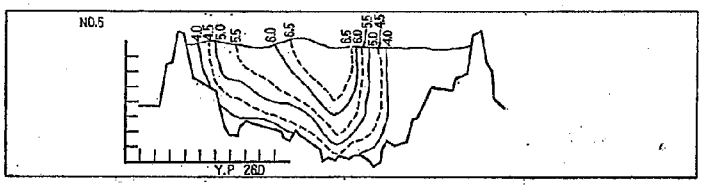
(13)



(14)



(15)



(16)

図-11(11~16) 横 断 流 速 分 布 図

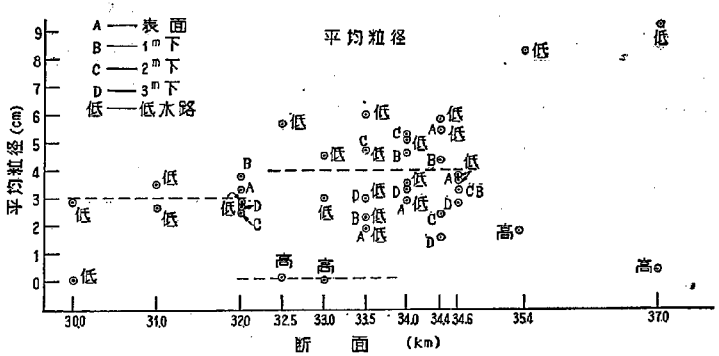


図-12 河床材料の平均粒径

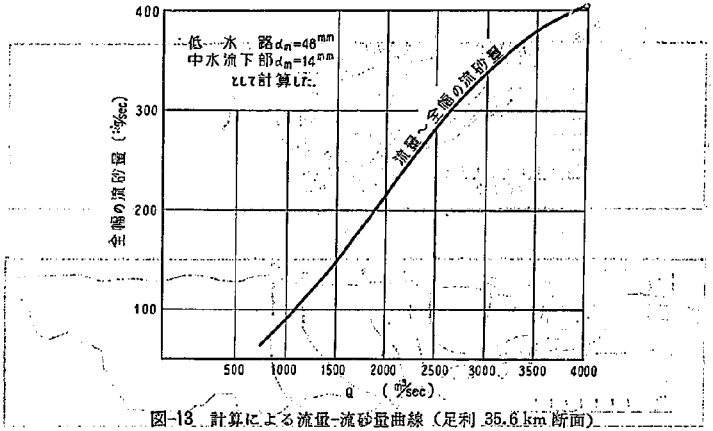


図-13 計算による流量-流砂量曲線（足利 35.6 km 断面）

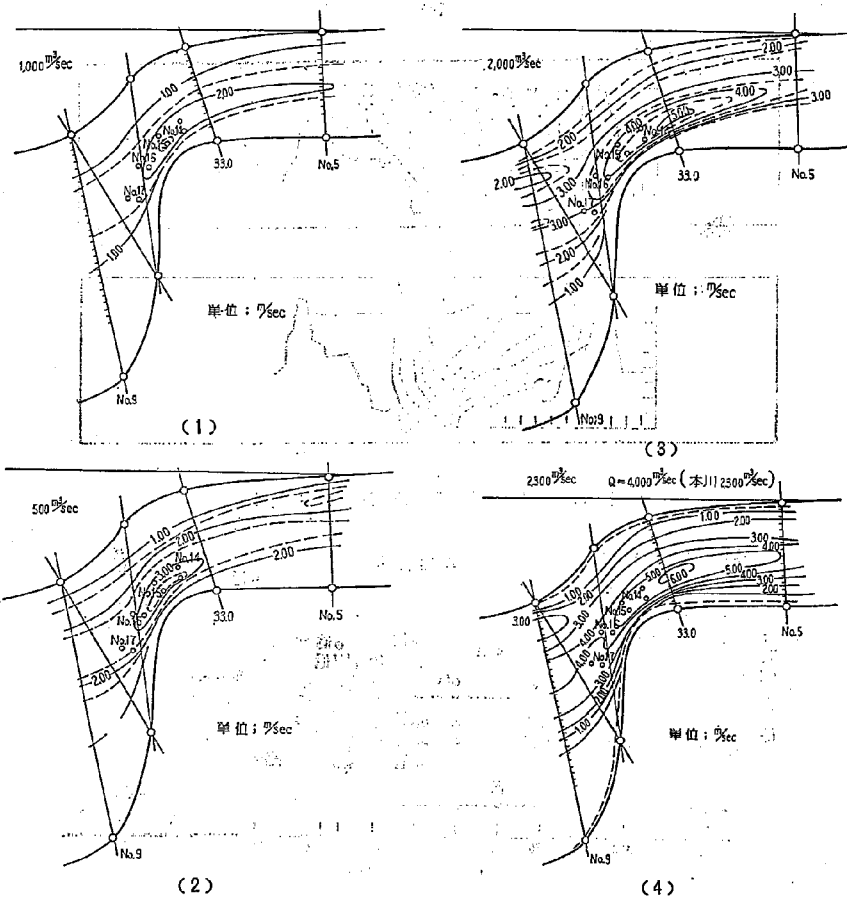


図-14（1～4） 平面流速分布（合流点を 4,000 m³/sec に対する水位にした場合）

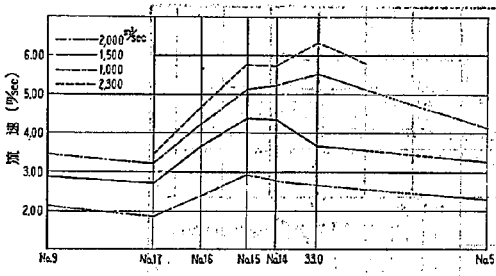


図-15　最高流速図
（合流点を 4,000 m³/sec に対する水位にした場合）

になるように分流量を定めればよい。

〔3〕 分流量の決定

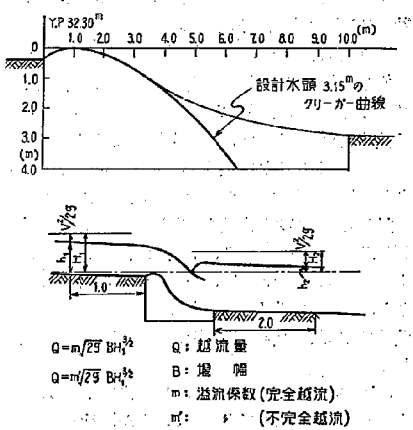
本川とショート・カットとの合流点 32.5 km の断面の水位を計画流量 4,000 m³/sec の計算水位に保って，本川に 2,300，2,000，1,500，1,000 m³/sec の各流量を流し，流速分布を測定した結果を図-14 に示す。高流速の位置は現況より下流へ移る傾向から見られ，さらに流量の増大に伴う発生位置の岸への接近は見られない。

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 2,300m³/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. 分流ぜきの設計

〔1〕 分流ぜきの実験

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ぜきを設けることにした。ぜきの形状は図-16 に示すようなクリーガー形とし（設計水頭 3.15m）



$Q=m\sqrt{2g}\,BH_1^{3/2}$　Q：越流量

$Q=m'\sqrt{2g}\,BH_1^{3/2}$　B：堰幅

m：越流係数（完全越流）

m′：〃　（不完全越流）

図-16　分派点のぜきの形状

全幅を 260m（有効幅 250m，橋脚 10m）とした。ぜ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，越流深はぜき頂より上流 1 m（実物 50m），下流水深はぜき下流端より 2 m（実物 100m）の位置において測定した。

完全越流の場合の $H_1 \sim m$ 曲線（記号は図-16）は図-17 に示すとおりである。

次にぜき下流水位がぜ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

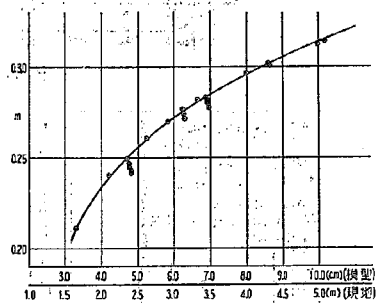


図-17　越流係数（完全越流）

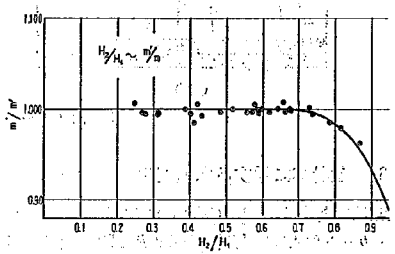


図-18　越流係数（もぐりぜき）

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。

ぜき下流の水面形，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，ぜき頂より 30 m 下流では 3～4 m/sec 流速であるが，10m下流では 8～9 m/sec の高流速である。またぜき頂より 20 m 下流で水位が回復していることから，ぜき頂より 20 m までは床固めをすることが望ましい。

〔2〕 ぜき高の決定

上記のぜきを用い，分流量を 1,700 m³/sec とするためには，ぜき頂高 Y.P＋32.30m 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。

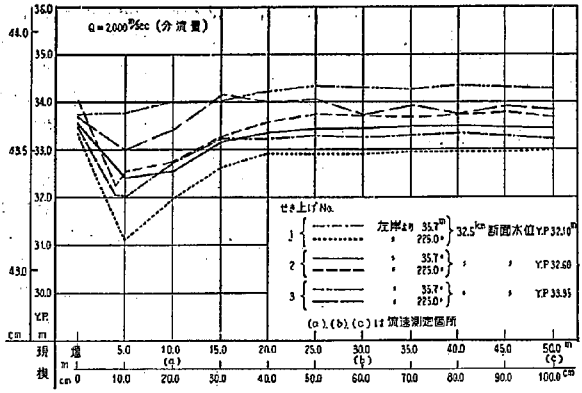
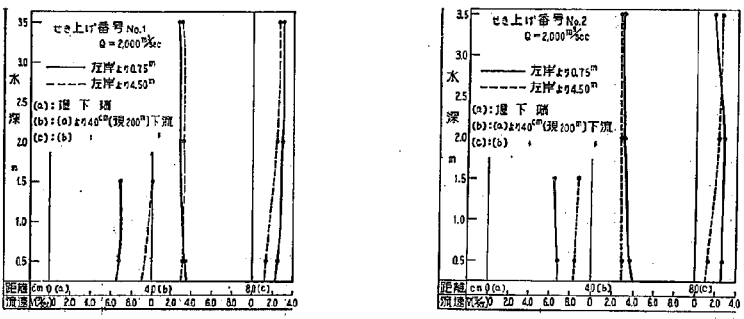


図-19　せき下流水面形



（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ぜき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。

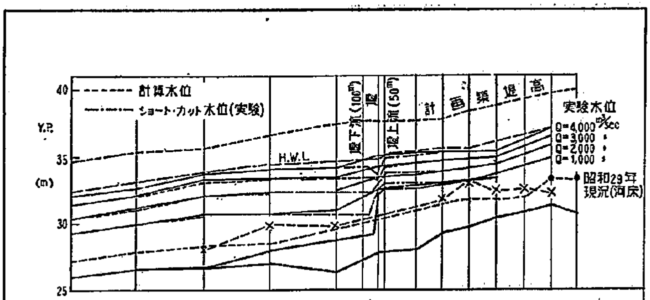
〔2〕 分流量

全流量は上流越流ぜき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，本川を締切って求めた分流ぜき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。



断面 km	計算使用区間距離	29年河床低高	計画河床低高	計画堤防高 右岸	計画堤防高 左岸
31.0	0		26.00	34.50	34.50
31.5	500		26.50	35.23	35.25
32.0	500		26.70	35.64	35.64
32.5	500	27.00		36.47	36.47
33.0	500	26.40		37.42	37.42
(No.9)	310	27.85		37.70	
(No.11)	(290)	28.10		37.70	
34.0	200	29.35		37.80	37.80
34.2	200	29.70		38.30	38.30
34.4	200	30.50		38.82	38.82
34.6	200	30.80		39.24	39.24
34.8	200	31.30		39.70	39.70
35.0	200	30.70		40.06	40.06

図-21 実験水位と計算水位（設計案）

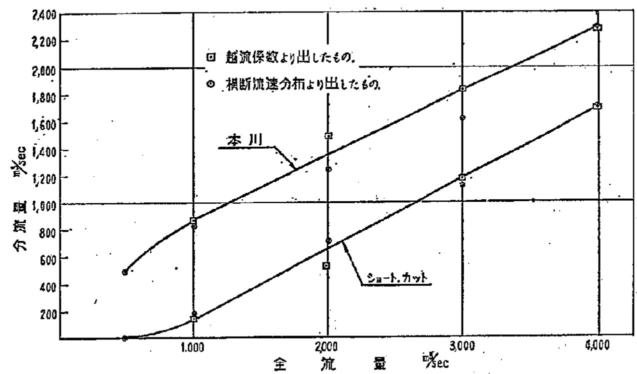


図-22 分 流 量 曲 線

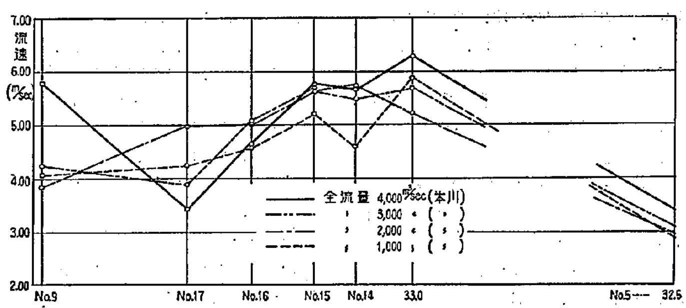


図-23 本 川 最 高 流 速 図

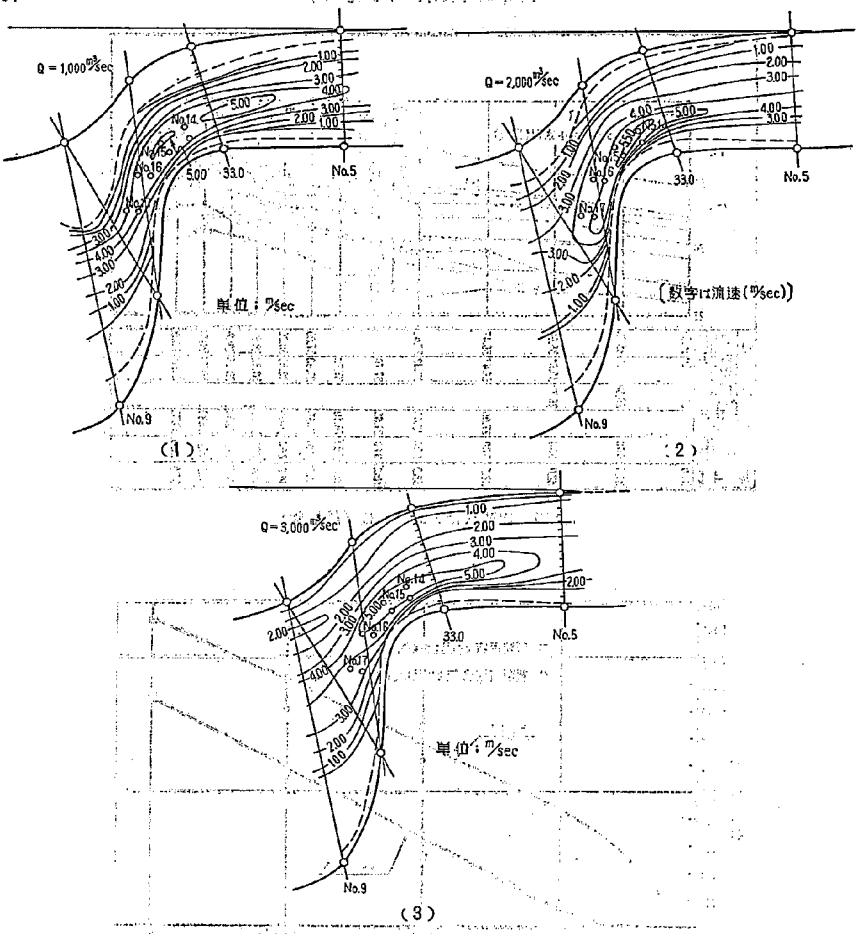


図-24（1～3）平面流速分布図

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。

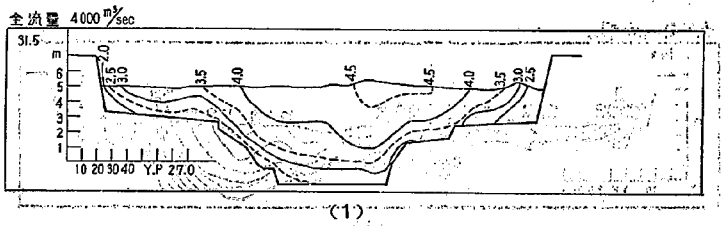
〔4〕 せき高と分流量，最高流速の関係

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。

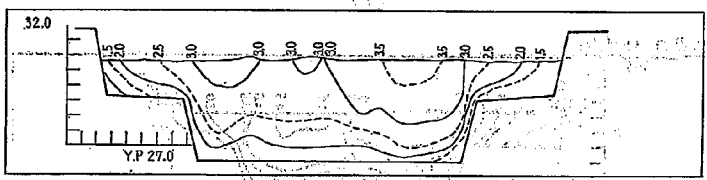
ショート・カットについて，せき下流断面と 32.5 km の断面との水位相関図は 図-27 のとおりである。 せき高が変わっても越流係数が同じであるとして， 図-17，図-18 および図-27 を用いて，せき上流の水位―流量曲線を求めることができる。 No.11 および せき上流の水位―流量曲線から エネルギー―流量を求めると 図-28 のとおりである。両断面のエネルギー水頭が一致すると仮定して， 分流量を求めせき高別に表わすと 図-29 のとおりである。

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。

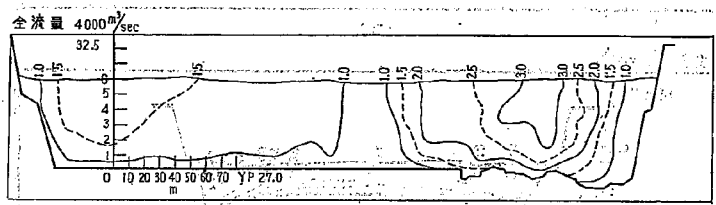
現況および計画河道に対する実験値から，最高流速と本川流量との関係を求めると 図-31 のとおりである。これに 図-29 に求めたせき高と分流量の関係を用いてせき高を記入した。これより，せき高 Y.P＋32.8m，＋33.30m に対して，せき高 Y.P＋32.30m の場合はショート・カットを作る効果が十分表われている。また＋32.30m に対しては計画流量以外においても安全流速を越す場合は現われない。また，せき高 Y.P＋32.0m は高水敷高より低くなるので，土砂の移動の面から思わしくない。以上によりせき高 Y.P＋32.30m は妥当な高さであると考えられる。



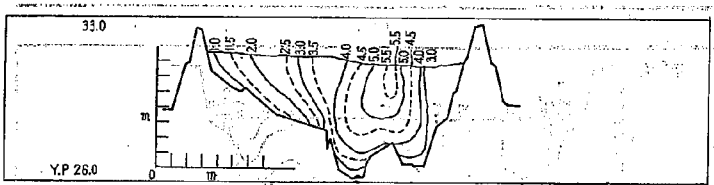
(1)



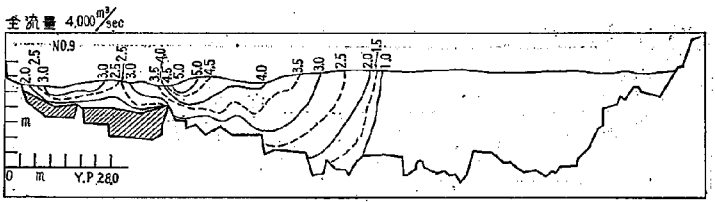
(2)



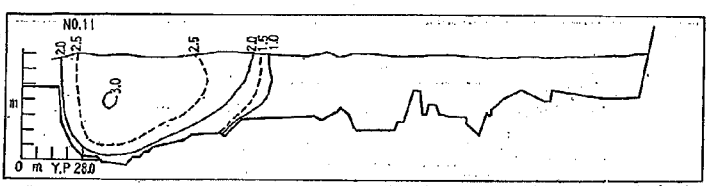
(3)



(4)

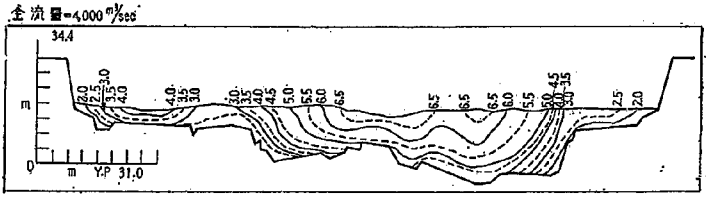


(5)

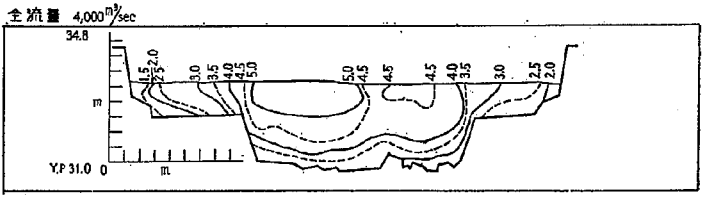


(6)

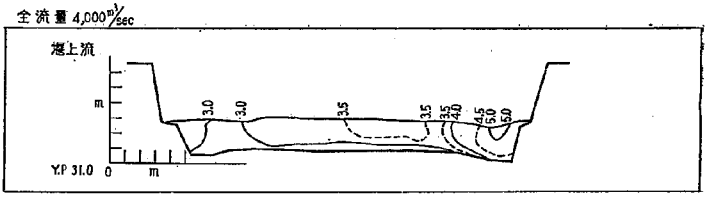
図-25(1～6) 断 面 内 流 速 分 布 図



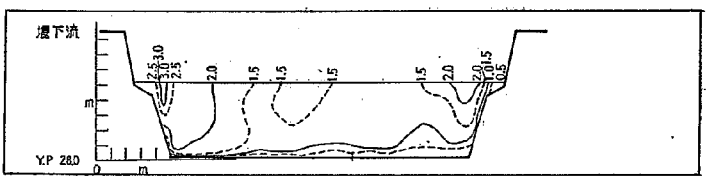
(7)



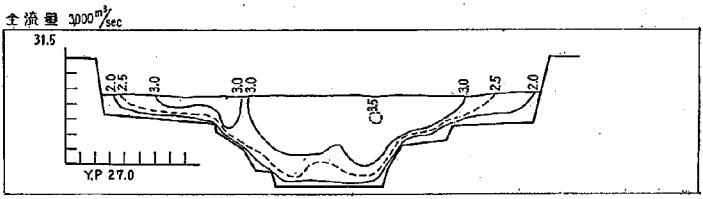
(8)



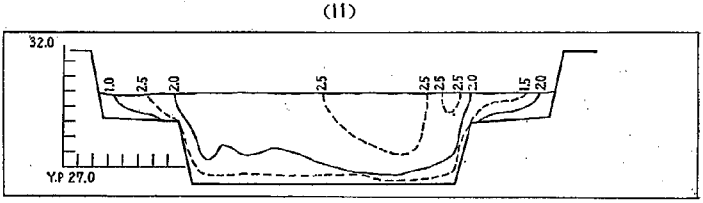
(9)



(10)

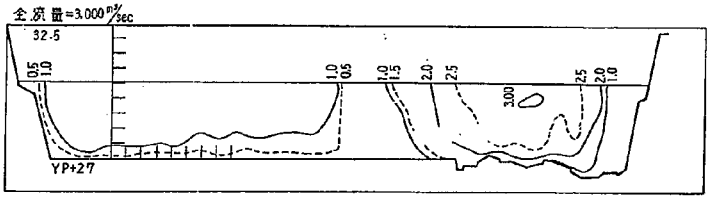


(11)

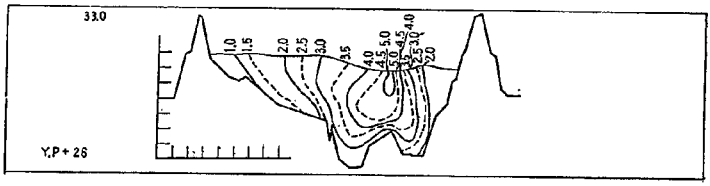


(12)

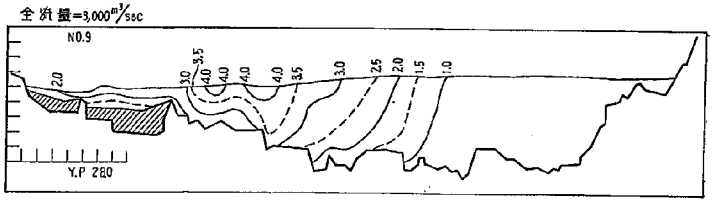
図-25(7～12) 断面内流速分布図



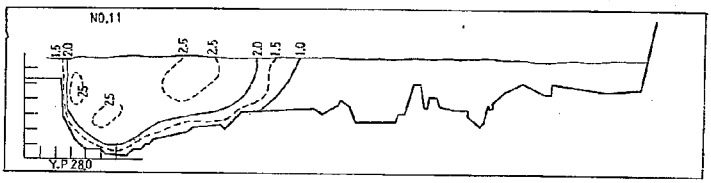
(13)



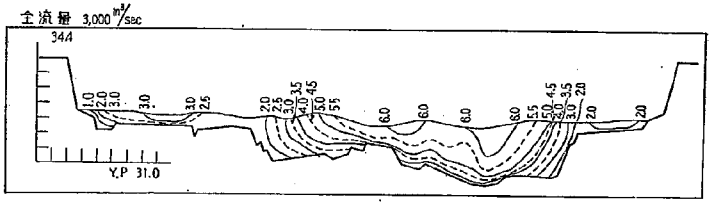
(14)



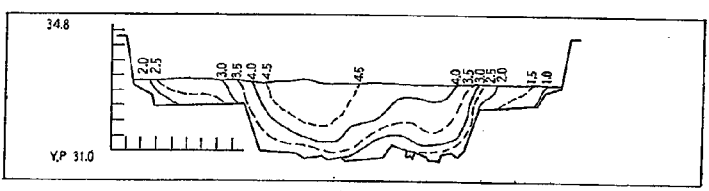
(15)



(16)

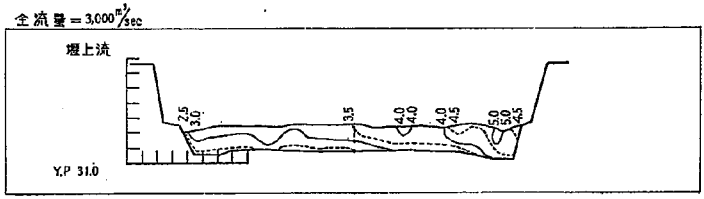


(17)

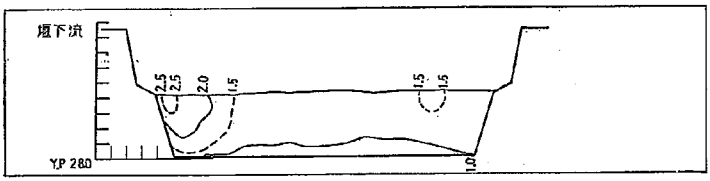


(18)

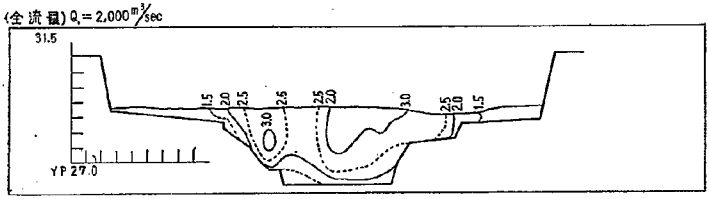
図-25(13～18) 断 面 内 流 速 分 布 図



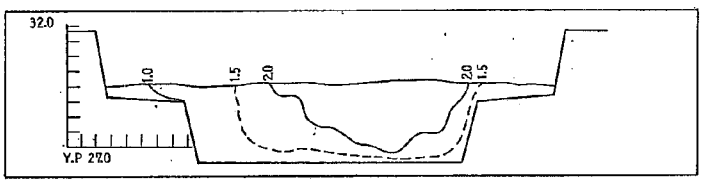
(19)



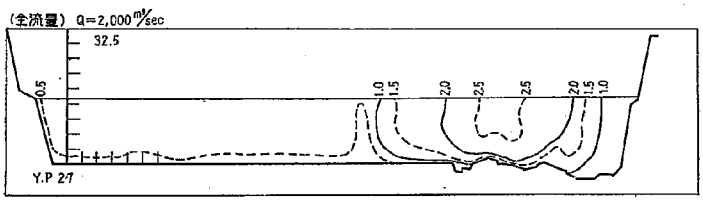
(20)



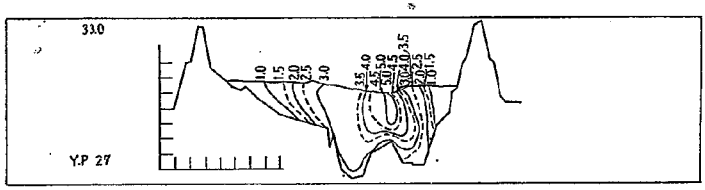
(21)



(22)

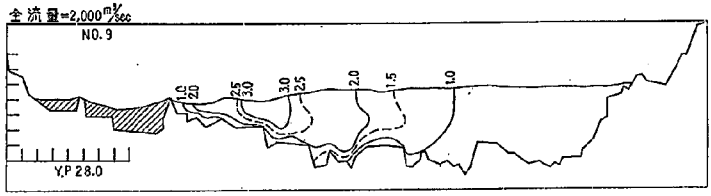


(23)

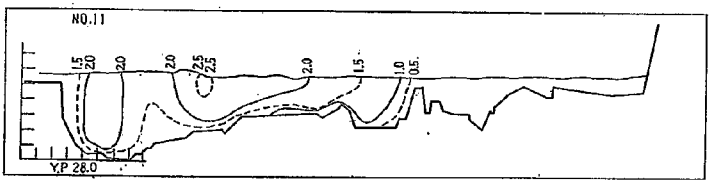


(24)

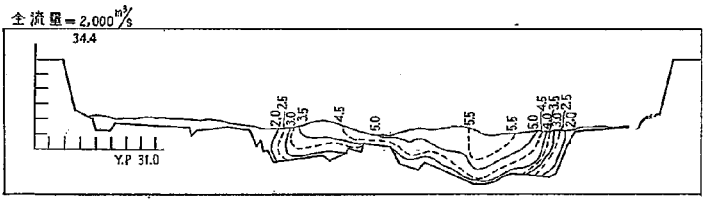
図-25(19～24) 断 面 内 流 速 分 布 図



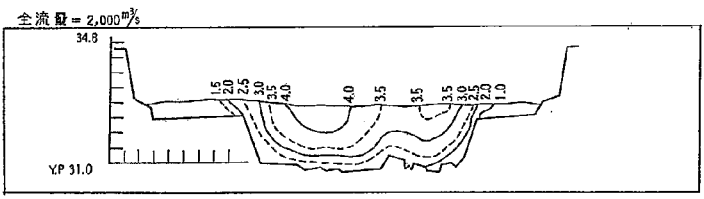
(25)



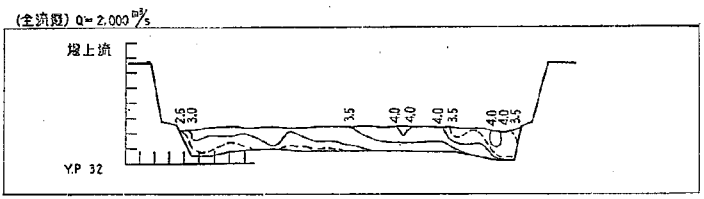
(26)



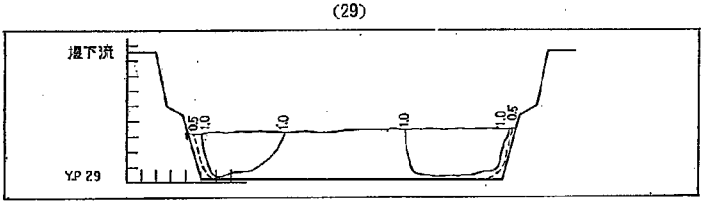
(27)



(28)

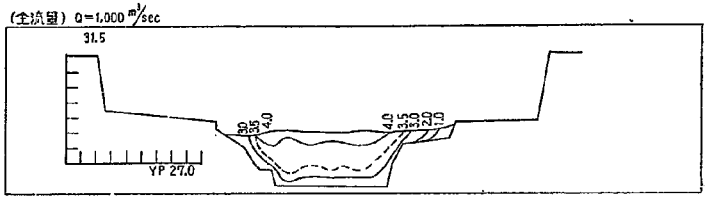


(29)

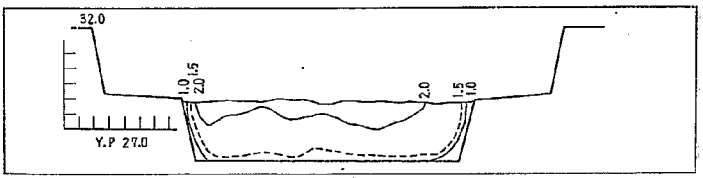


(30)

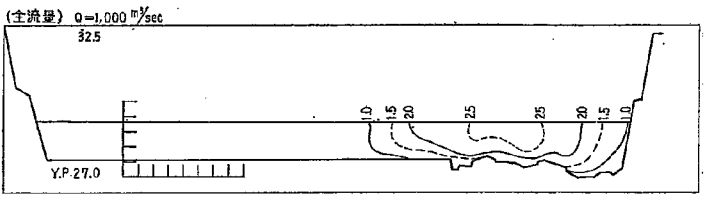
図-25(25～30) 断 面 内 流 速 分 布 図



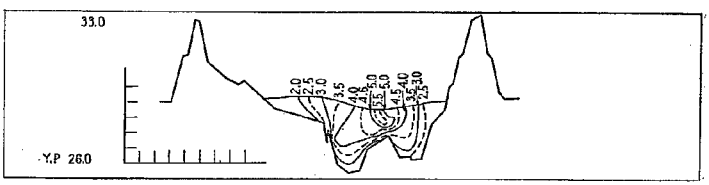
(31)



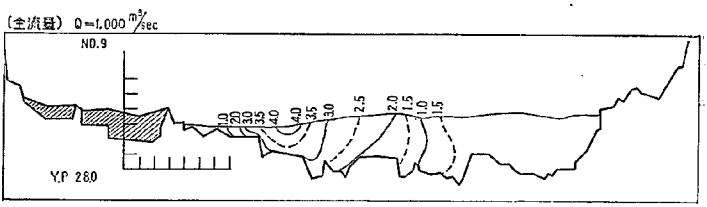
(32)



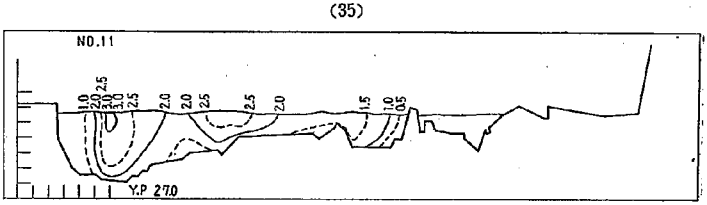
(33)



(34)

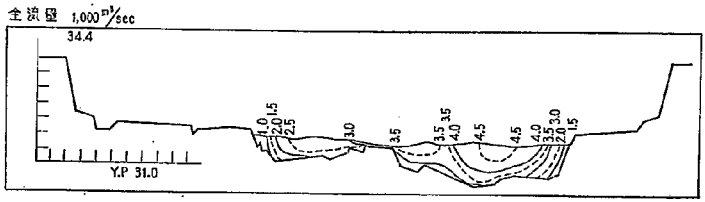


(35)

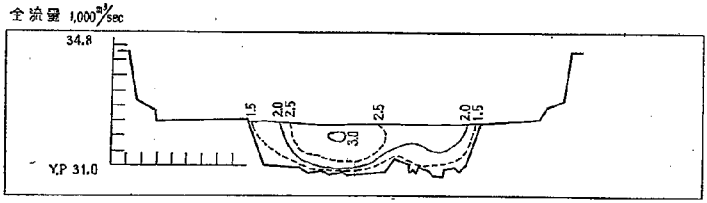


(36)

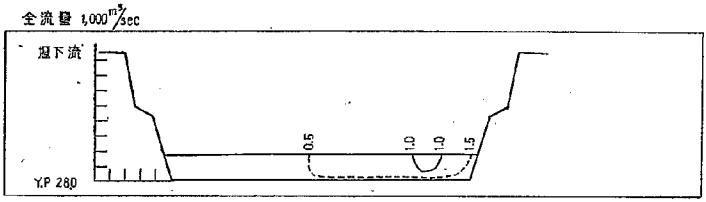
図-25(31～36) 断 面 内 流 速 分 布 図



(37)



(38)



(39)

図-25(37～39) 断 面 内 流 速 分 布 図

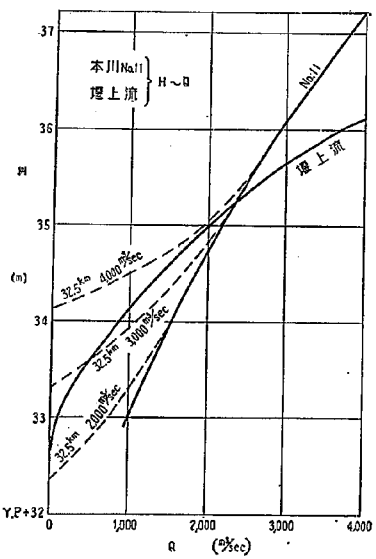


図-26 せき上流および本川No. 11の水位-流量曲線

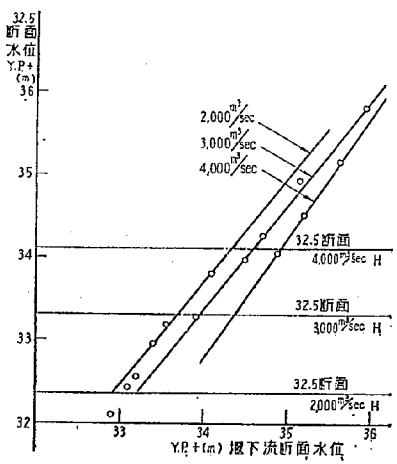


図-27 ショート・カットせき下流断面とNo. 32.5断面の水位相関図

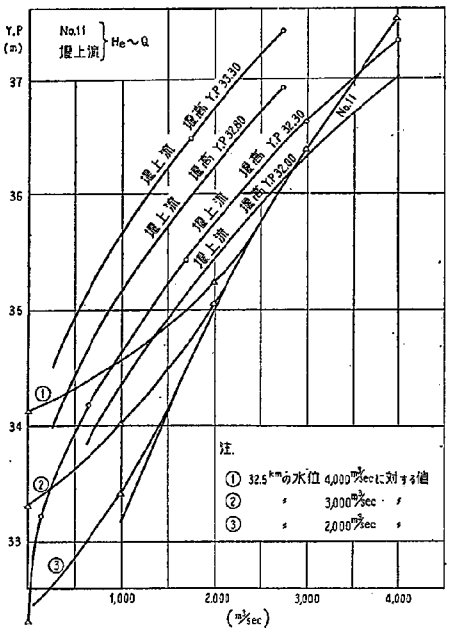


図-28　種々のせき高に対するせき上流および No. 11の水位—エネルギー曲線(計算値)

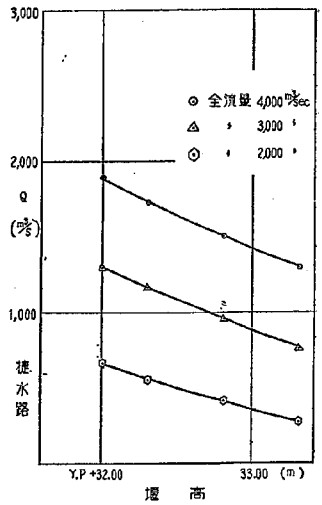


図-30　せき高と分流量の関係

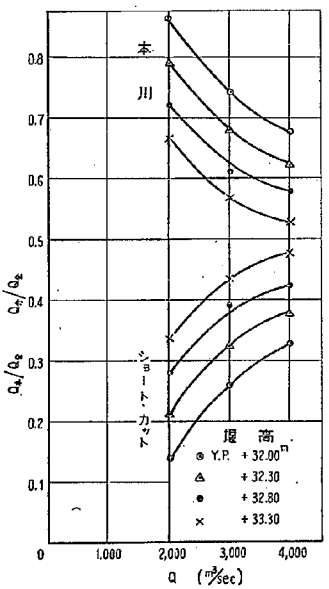


図-29　種々のせき高に対する流量配分(計算値)

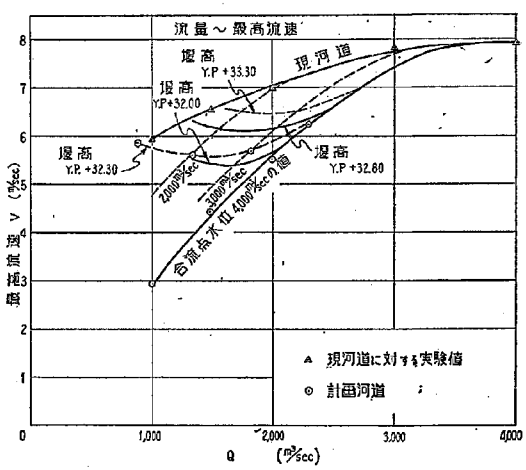


図-31　最高流速と本川流量との関係

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。

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

$$\frac{d(q_B \cdot B)}{dx} + B(1-\lambda)\frac{d_g}{dt} = 0 \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，q_B：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_c：限界掃流力

τ_0：掃流力$=\rho g R \cdot I$

$\varphi(n)$：粗度係数の関数

$\varphi(n)=0.623(1/40 \cdot n)^{3.5}$ ：$n \leqq 0.025$

$\varphi(n)=0.623$ ：$n \geqq 0.025$

$f(\tau_c/\tau_0)$：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。

$$\frac{(q_B)_m}{(q_B)_p} = \frac{1}{\alpha \cdot \beta} l^{3/2} / h^3 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{\alpha \cdot \beta}{\gamma} \frac{h^2}{l^{5/2}} \quad \cdots\cdots(4)$$

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

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

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堆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堆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，なるべく砂漣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 $1.4(=h/l)$, $d_m=1.5$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堆積，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 m³/sec, 4,000 m³/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+32.30m)

ショートカット河床高は計画高

	流量(m³/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，整形しない)	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+32.30m)

(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 m³/sec 流下後のまま))

実験−3 (せきなし)

ショート・カット河床現地盤高

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(m³/sec)	G_p	G_m
4,000	6,630 gr/m•sec	103 gr/m•sec
3,000	4,867 gr/m•sec	76 gr/m•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。

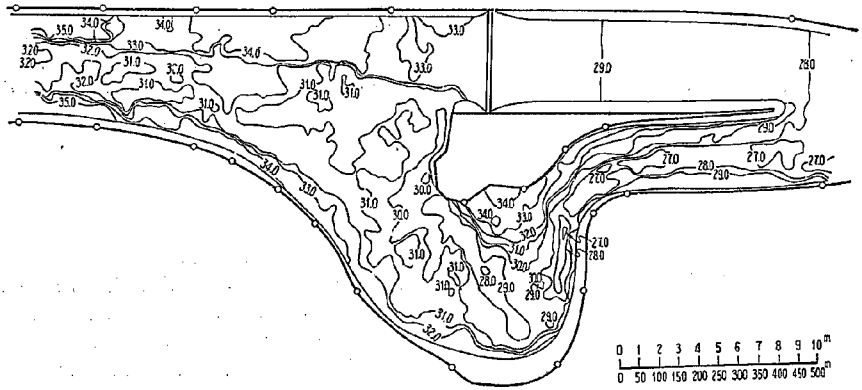


図-32(1) 実験開始前の河床高

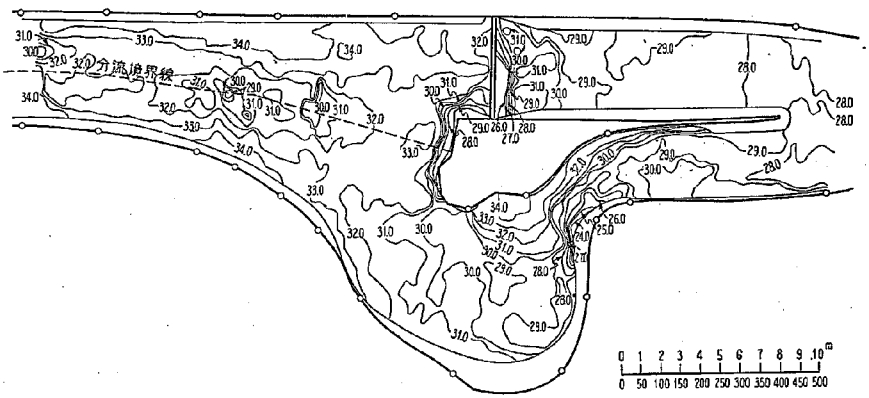


図-32(2) 実験 2-1 後の河床高

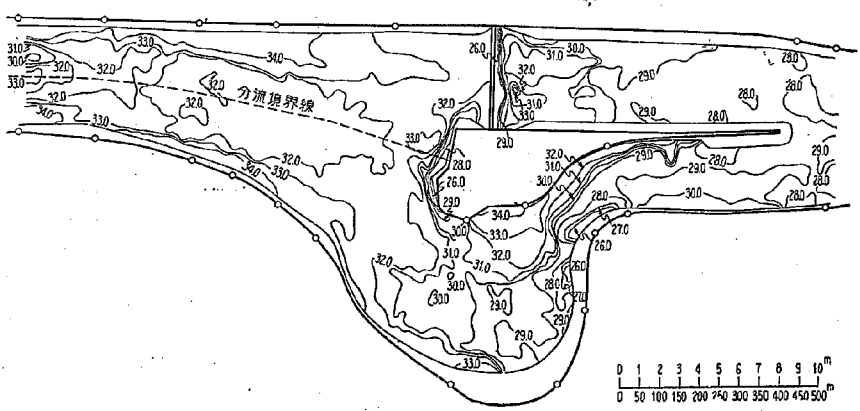
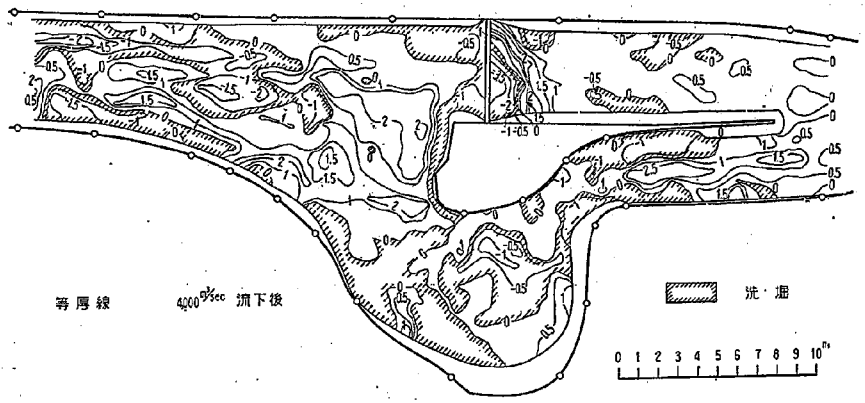
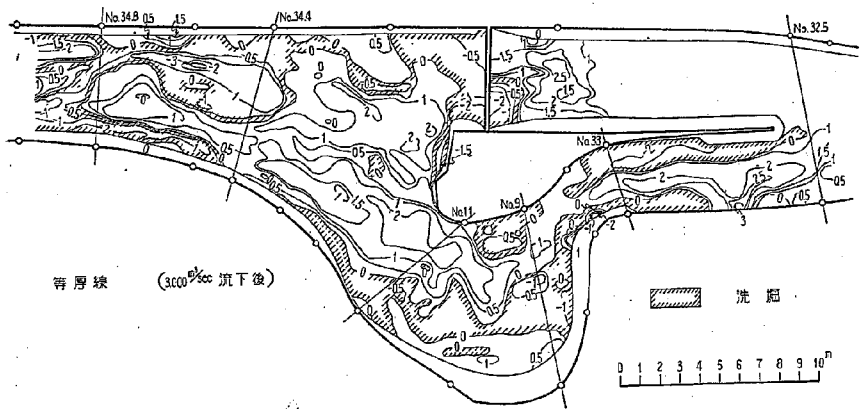


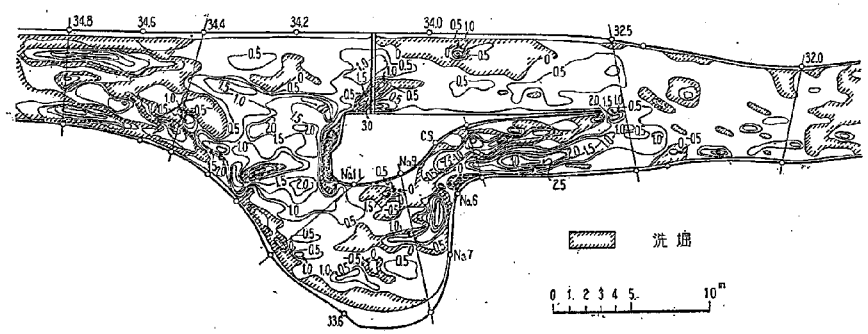
図-32(3) 実験 2-2 後の河床高



（1） 実験 2-1



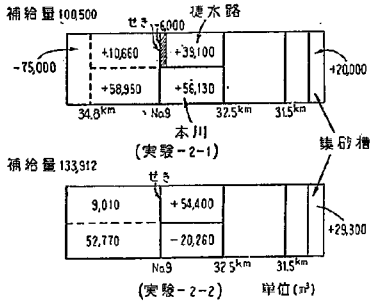
（2） 実験 2-2



（3） 実験 2-2

図-33 河床変動量

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，河幅は狭まくなるため，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継続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測結果の 20,000m³ 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，流路が，本川からショート・カットの方に変ることが予想される。したがって分流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して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，分流率，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で比較すると，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

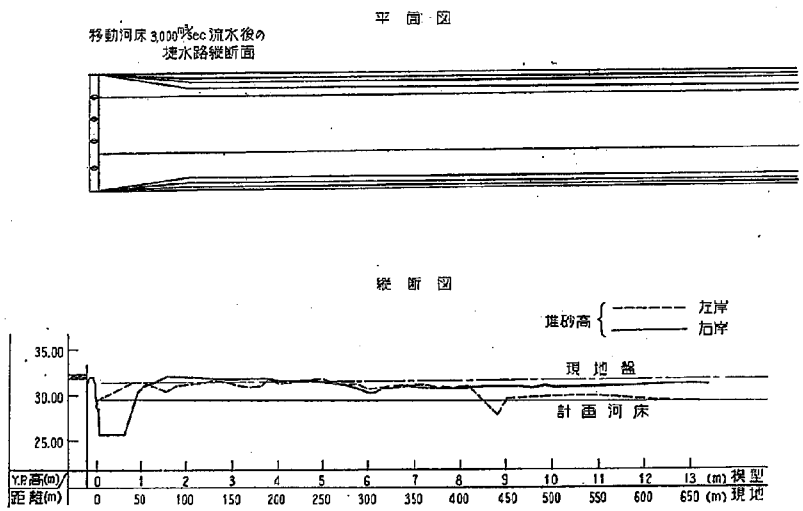


図-34　ショート・カットの河床高（実験 2-2 後）

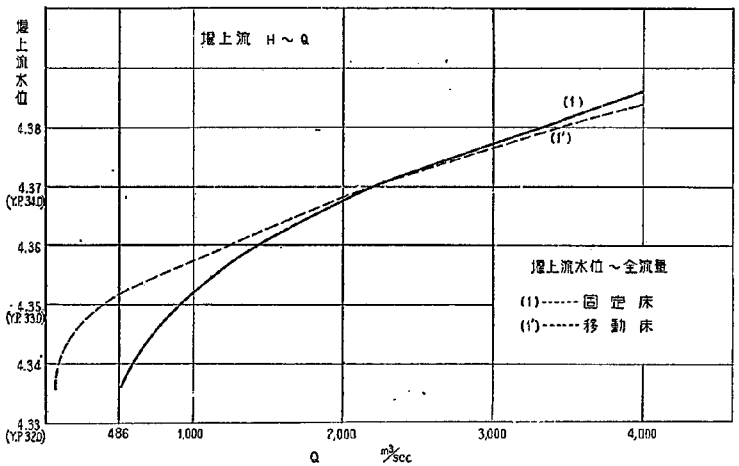


図-35 河床移動後のせき上流の水位—流量曲線（実験１）

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

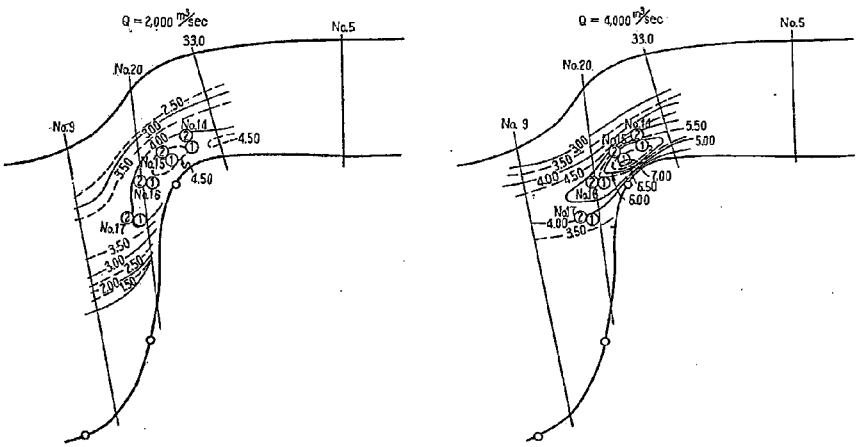
以上を取りまとめると次のごとくである。

(1) 早川田より横瀬区間上流端(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。

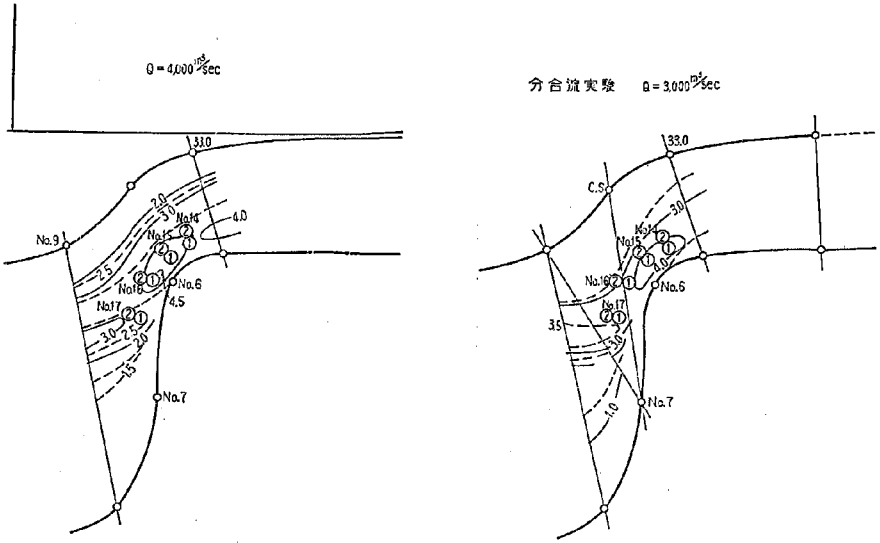
(3) 現況河道において岩井山の狭さく部には洪水時にいちじるしい高流速が現われる。実験の結果この最高値は流量 4,000，3,000，2,000，1,500，1,000 m³/sec に対してそれぞれ約 8.0 m³/sec，8.0 m³/sec，7.0 m³/sec，6.5 m³/sec，6.0 m³/sec 程度である。その発生位置は流量 2,000 m³/sec 以上と 1,500 m³/sec 以下とで異なり流量の大きい時は堤体に接近し，流量の小さい時には下流に移り，しかも堤体から離れる。このことは流量 1,700 m³/sec 程度を境にこの付近の災害実績が出ている現地の記録と符合す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

(4) 前記流量 1,700 m³/secより多少小さい流量 1,500



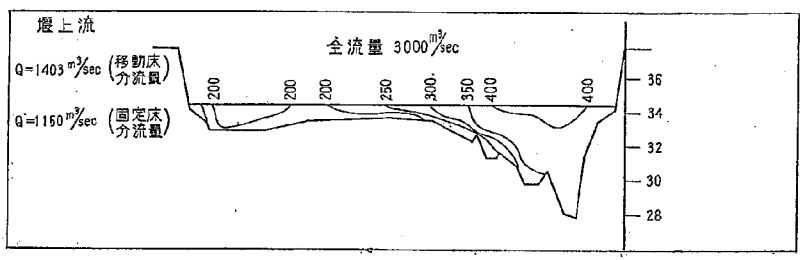
(1)　　(2)

図-36(１～２) 本川狭さく部の平面流速分布図 （実験１）

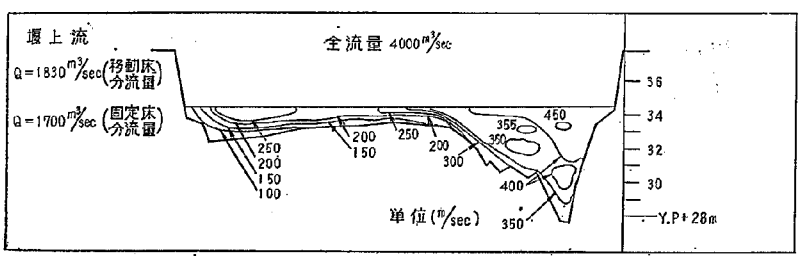


（3）　　（4）

図-36(3～4)　本川狭さく部の平面流速分布図（実験1）



（1）



（2）

図-37　移動床実験による分流量（実験3）

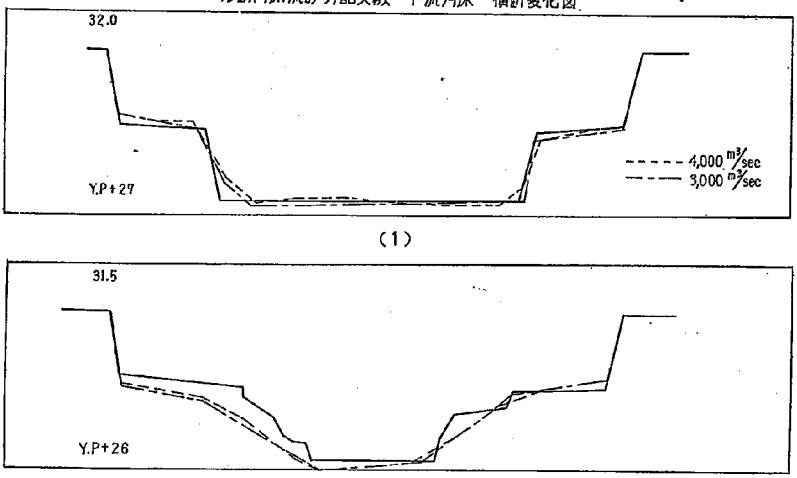


図-38 合流点より下流断面の河床変動

m³/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 m³/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 m³/sec (したがって本川 2,300 m³/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 m³/sec を分流するためには越流幅を 260m(有効幅 250m，橋脚総幅 10m) にすれば せき高は実験の結果 Y.P+32.30m となり，せき上流の河床の高さとほぼ一致する。

(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+32.30m 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 m³/sec に対して それぞれ 1,700, 1,170, 650, 140, 0 m³/sec である。すなわち 分流開始流量は 500 m³/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 20m 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 30m 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ぢるしく低下する。その低下量は，No.11 において

Q(m³/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+32.80m，+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+32.30m は適当であると考えられる。

(12) 現況においては上流より流下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 m³ 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。

(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。

(16) 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。

(17) 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 4,000m³/sec の時 100～150 m³/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）
［1］ 基本的仮定……（1）
［2］ 推力による岩盤内の応力分布……（2）
［3］ 曲げモーメントによる岩盤内の応力……（3）
［4］ 剪断力による岩盤内の応力……（4）
［5］ 基礎岩盤内の応力分布……（5）
2. 数　表……（5）
3. 応用例……（24）
［1］ 二瀬ダム……（24）
［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 および星埜博士(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ついては松村博士(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が，岩盤の表面に平行な粘土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って，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附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附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いった所

* 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） 星埜　和 "基礎の支持論"

（2） 松村探治 "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
及び松村探治 "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

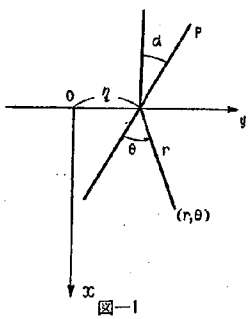
（3） Wallace A. Waldorf: "Strengthening of weak rock seams in foundation of Shasta Dam" Technical Memorandum of U.S.B.R. No. 598
Edwin Rose: "Strengthening of weakrock seams outside base of Shasta Dam" Technical Mem. of U.S.B.R. No.602

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 t とすれば推力の作用する幅は $t\sec\alpha$ 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 Venunt 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)

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

いま，作用点から η だけ離れた点を原点とすると，

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

推力に対する式を求めるに $(H/t)\cos\alpha$ なる強度の分布荷重が $(t/2)\sec\alpha$～$(-t/2)\sec\alpha$ 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

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

これを計算して

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

ただし，

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

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

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

$$+\left\{\log\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}+\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{x}{t}\right)^2}\right\}\sin\alpha \quad\cdots\cdots(5.b)$$

$$H_{xy}=2\int_{(-t/2)\sec\alpha}^{(t/2)\sec\alpha}\frac{x(\eta-y)\{x\cos\alpha+(\eta-y)\sin\alpha\}}{\{x^2+(\eta-y)^2\}^2}d\eta$$

$$=\left\{\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}-\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\sin\alpha$$

$$-\left\{\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\cos\alpha \quad\cdots\cdots(5.c)$$

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

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

にて表わされる。すなわち

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

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

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

ただし

$$M_x=\left(\frac{x}{t}\sin\alpha+\frac{y}{t}\cos\alpha\right)\left(\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}\right)-\left(\frac{x}{t}\cos\alpha+\frac{y}{t}\sin\alpha\right)$$

$$\times\left\{\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}$$

$$-\left(\frac{x}{t}\sin\alpha-\frac{y}{t}\cos\alpha\right)\left\{\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}+\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\quad\cdots\cdots(8.a)$$

$$M_y=2\tan\alpha+\left(\frac{x}{t}\cos\alpha+\frac{y}{t}\sin\alpha\right)$$

$$\times\left\{\log\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}+\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}$$

$$-\left(3\frac{x}{t}\sin\alpha-\frac{y}{t}\cos\alpha\right)\left(\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}\right)+\left(\frac{x}{t}\sin\alpha-\frac{y}{t}\cos\alpha\right)$$

$$\times\left\{\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}+\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\quad\cdots\cdots(8.b)$$

$$M_{xy}=\frac{x}{t}\sin\alpha\log\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}$$

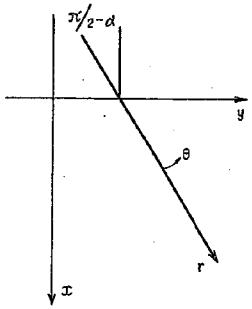
$$+\left(\frac{x}{t}\cos\alpha+\frac{y}{t}\sin\alpha\right)\left\{\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}-\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}$$

$$+\left(\frac{x}{t}\sin\alpha-\frac{y}{t}\cos\alpha\right)\left\{\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\} \quad \cdots\cdots(8.c)$$

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

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

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 $(t/2)\sec\alpha$，～$-(t/2)\sec\alpha$ 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

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

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，

$$V_x=\left\{\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}+\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\sin\alpha$$

$$+\left\{\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\cos\alpha \quad \cdots\cdots(11.a)$$

$$V_y=\left\{\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}+\tan^{-1}\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}}{\frac{x}{t}}-\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\frac{x}{t}\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\sin\alpha$$

$$-\left\{\log\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}+\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha-\frac{y}{t}\right)^2}-\frac{\left(\frac{x}{t}\right)^2}{\left(\frac{x}{t}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sec\alpha+\frac{y}{t}\right)^2}\right\}\cos\alpha \quad \cdots\cdots(11.b)$$

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

［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，

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

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

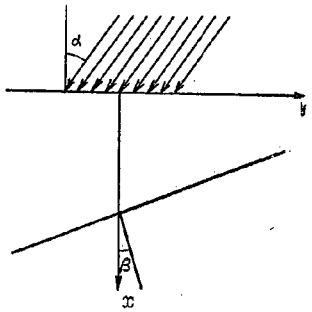
$$\left.\begin{aligned}\sigma_n&=\sigma_x\cos^2\beta+\sigma_y\sin^2\beta+2\,\tau_{xy}\sin\beta\cos\beta\\\sigma_t&=\sigma_x\sin^2\beta+\sigma_y\cos^2\beta-2\tau_{xy}\sin\beta\cos\beta\\\tau_{nt}&=(\sigma_y-\sigma_x)\sin\beta\cos\beta+\tau_{xy}(\cos^2\beta-\sin^2\beta)\end{aligned}\right\}$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

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，変形が大きいので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。



図—3

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

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

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

$$H_x=H_{xy}=M_x=M_{xy}=\nu_x=\nu_{xy}=0$$
$$H_y=2\sin\alpha\,\log\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-(y/t)}{\frac{1}{2}\sec\alpha+(y/t)}$$
$$M_y=2\tan\alpha+2\frac{y}{t}\sin\alpha\,\log\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-(y/t)}{\frac{1}{2}\sec\alpha+(y/t)}$$
$$\nu_y=-2\cos\alpha\,\log\frac{\frac{1}{2}\sec\alpha-(y/t)}{\frac{1}{2}\sec\alpha+(y/t)}$$

となる。

2. 数　表

前章，(5)，(8)，(11)式にて与えられる H_x，H_y，H_{xy}；M_x，M_y，M_{xy}；ν_x，ν_y，ν_{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，$\alpha=30°$，$40°$，$45°$，$50°$，$55°$，$60°$ 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) $\alpha=30°$

	x/t \ y/t	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	-0.003011	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	0.1832	0.1958	0.2023	0.2029
	4.50	0.01792	0.006671	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)　$\alpha=30°$

	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
	0.25	-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
	0.05	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
	1.00	0.09461	0.2080	0.09059	-0.1494	-0.1577	-0.06687	-0.02828	-0.01137	-0.006577	-0.003127	-0.001857	-0.001152	-0.0006025
	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
	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
	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
	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
	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
	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
	4.50	0.31280	0.01042	0.006213	0.001253	-0.003643	-0.007323	-0.009731	-0.01053	-0.01030	-0.009442	-0.008231	-0.007001	-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
M_y	0.00	-0.1623	1.1981	1.1547	-1.5226	-0.1623	-0.06179	-0.03378	-0.02121	-0.01459	-0.01261			
	0.25	0.02804	0.1716	0.3743	0.02871	-0.1964	-0.08529	-0.04434	-0.02602	-0.01843	-0.01213	-0.009531	-0.007908	-0.005939
	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	-0.006743
	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
	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
	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	-0.005341
	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
	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
	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
	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
	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
	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
M_{xy}	0.00	0	0.7854	0	-0.7854	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
	0.50	-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
	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
	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
	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
	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	-0.005403
	3.00	0.005396	0.01641	0.02423	0.02419	0.01724	0.008688	0.001313	-0.003517	-0.005840	-0.006857	-0.006503	-0.005781	-0.005390
	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
	4.00	0.006304	0.01042	0.01353	0.01403	0.01232	0.008834	0.004706	0.001499	-0.001004	-0.002781	-0.003477	-0.003685	-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
	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

表—1 (c) $\alpha=30°$

	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	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_y	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)　$\alpha=40°$

	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
	0.25	-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
	0.50	-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
	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
	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
	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
	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
	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
	3.50	0.3717	0.4764	0.5587	0.5998	0.5936	0.5479	0.4788	0.4022	0.3294	0.2658	0.2135	0.1713	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
	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
	5.00	0.3065	0.3562	0.3954	0.4199	0.4269	0.4173	0.3945	0.3621	0.3249	0.2865	0.2495	0.2154	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
	0.25	-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
	0.50	-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
	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
	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
	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
	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
	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
	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
	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
	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
	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
H_{xy}	0.00	0	2.0194	2.0194	2.0194	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
	0.50	0.1011	-0.05647	0.5583	1.1023	1.0061	0.4944	0.2678	0.1650	0.1186	0.08395	0.06016	0.04678	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
	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
	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
	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
	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
	3.50	-0.09723	-0.05992	0.005415	0.08707	0.1671	0.2297	0.2673	0.2810	0.2768	0.2611	0.2402	0.2172	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
	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
	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

表—2 (b) $\alpha=40°$

	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	1.2033	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	-0.006698	-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	-0.008838	-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	-0.01286	-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	0.002839	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	0.006934	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	0.005638	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	0.02976	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) $\alpha=40°$

	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	2.0194	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	0.6491	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	-0.4222	-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	-0.1421	-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) $\alpha=45°$

	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	2.3335	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	0.0002647	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	0.02559	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	0.1884	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) $\alpha=45°$

	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	-0.0016(G)	-0.0005(G)	-0.0002(G)	0.00009993	0.0003604
	0.50	0.1546	0.6107	0.3421	-0.5000	-0.3261	-0.07358	-0.02180	-0.008217	-0.003753	-0.0023(G)	-0.0016(G)	-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	0.008967	-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	-0.007(G)	-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	-0.01236	-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	-0.040(G)	-0.03281	-0.024(G)	-0.01806	-0.01427
	0.50	-0.0005840	0.1911	0.3059	0.2786	-0.07046	-0.1338	-0.09282	-0.06726	-0.4338	-0.03342	-0.02687	-0.008378	-0.01500
	1.00	0.05893	0.005317	0.05524	0.1586	0.09775	-0.03860	-0.039(G)	-0.03992	-0.037(G)	-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	-0.00656(G)	-0.007853
	3.00	-0.01525	-0.006307	0.0002427	0.01319	0.02177	0.02594	0.023(G)	0.01567	0.009(G)	0.0002(G)	0.0001(G)	-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	0.006477	0.0090(G)	0.01119	0.01060	0.009816	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	0.005(G)	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	-0.01300(G)	-0.00750(G)	-0.00500(G)	-0.002768	-0.001720	-0.0009743
	0.50	-0.4031	-0.01957	0.3418	0.1232	-0.2381	-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	-0.06307	-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	-0.012(G)	-0.009744
	2.50	-0.01510	0.02345	0.04904	0.05448	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	-0.011(G)	-0.01089	-0.01006	-0.008690
	3.50	0.005528	0.01621	0.02622	0.03043	0.02618	0.01848	0.010(G)	0.001771	-0.003398	-0.006544	-0.007910	-0.0082(G)	-0.007824
	4.00	0.006288	0.01390	0.02008	0.02286	0.02120	0.01645	0.01012	0.004591	-0.0000092	-0.003090	-0.005035	-0.006627	-0.006229
	4.50	0.006728	0.01153	0.01634	0.01815	0.01802	0.015(G)	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) $\alpha=45°$

	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	0.05584	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	-0.04985	-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	-0.06876	-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) $\alpha=50°$

	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	0.04194	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	0.1885	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	0.06364	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) $\alpha=50°$

	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	-0.0001364	-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	-0.09281	-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	-0.02660	-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	2.2253	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	0.04789	0.07541	0.05779	0.03255	0.01320	-0.001998	-0.01124	-0.01297	-0.01261	-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	0.0028(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	0.0790(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)　$\alpha=50°$

	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	-0.04082	-0.03652	-0.03024	-0.02639	-0.01977
	2.00	1.0383	1.1677	1.0858	0.8194	0.4982	0.2322	0.07886	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	-0.5064	-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	-0.09652	-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

表—5 (a) $\alpha=55°$

	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	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	0.08845	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	0.2587	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	0.8673	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	0.01589	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	0.1098	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	-0.06525	-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	-0.05825	-0.03557	0.01085	0.07532	0.1469	0.2205	0.2638	0.2962	0.3107	0.3107	0.3006	0.2843	0.2647
	4.50	-0.05174	-0.03079	0.007692	0.05897	0.1165	0.1718	0.2178	0.2512	0.2709	0.2784	0.2765	0.2677	0.2548
	5.00	-0.04548	-0.02634	0.005398	0.04765	0.09476	0.1410	0.1818	0.2140	0.2358	0.2478	0.2515	0.2488	0.2413

表—5 (b) $\alpha=55°$

	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	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	-0.0006	-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	0.003369	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	-0.01788	-0.01605
	3.50	0.002007	0.02096	0.03830	0.04809	0.04603	0.03495	0.02044	0.006884	-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

表—5 (c) $\alpha=55°$

	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	0.06893	0.06555	0.05772	0.04693	0.03475
	5.00	0.02936	0.01212	0.005398	0.009191	0.01992	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) $\alpha=60°$

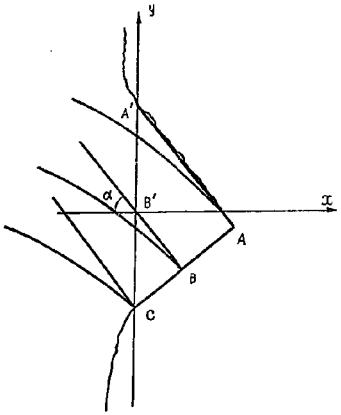
	x/t \ y/t	1.0	0.5	0	− 0.5	− 1.0	− 1.5	− 2.0	− 2.5	− 3.0	− 3.5	− 4.0	− 4.5	− 5.0
H_x	0.00		1.5708	1.5708	1.5708		0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	-0.06795	1.3877	1.5611	1.6873	1.6375	0.1961	0.04962	0.02038	0.01051	0.006183	0.003964	0.002700	0.001925
	0.50	-0.03453	1.0708	1.5071	1.7636	1.5956	0.5399	0.1801	0.07921	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	07934	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	04846	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	03068	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	02014	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
	0.25	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) $\alpha=60°$

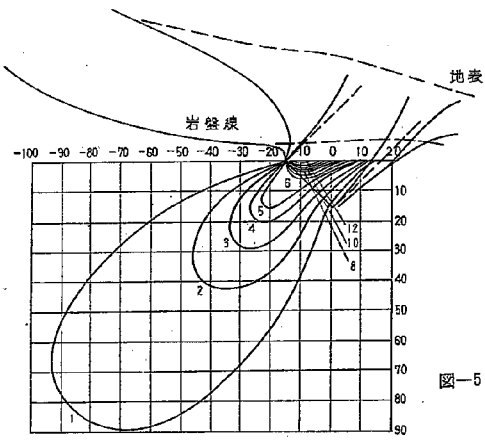
	x/t \ y/t	1.0	0.5	0	− 0.5	− 1.0	− 1.5	− 2.0	− 2.5	− 3.0	− 3.5	− 4.0	− 4.5	− 5.0
M_x	0.00		0.7854		-0.7854		0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	0.09549	1.0945	0.4722	-0.3997	-1.2279	-0.1265	-0.02469	-0.008172	-0.003526	-0.001779	-0.001001	-0.0006033	-0.0003830
	0.50	0.2023	0.9699	0.6124	-0.2473	-0.8881	-0.3066	-0.08478	-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	6.009882
	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	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	-0.03560	-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) $\alpha=60°$

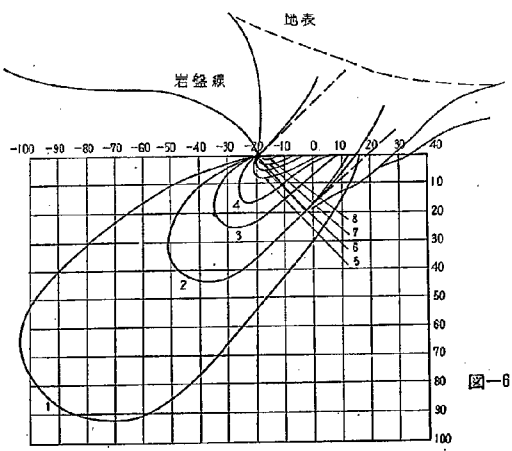
	x/t \ y/t	1.0	0.5	0	− 0.5	− 1.0	− 1.5	− 2.0	− 2.5	− 3.0	− 3.5	− 4.0	− 4.5	− 5.0
V_x	0.00		2.7207	2.7207	2.7207		0	0	0	0	0	0	0	0
	0.25	1.8515	2.7495	2.7039	2.5765	0.8669	-0.04050	-0.01791	-0.008599	-0.004777	-0.002939	-0.001940	-0.001352	-0.0009822
	0.50	1.8225	2.6547	2.6105	2.2547	0.8814	0.01199	-0.03395	-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
	0.25	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	0.2308	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	0.09565	0.08981	0.07994	0.06773
	5.00	0.03614	0.01640	0.008806	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
	0.25	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	0.03568	-0.1438	-0.2445	-0.2595	-0.2174	-0.1550	-0.09689	-0.05188	-0.02028	0.0006562	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	-0.008638
	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	-0.06472	-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	-0.1107	-0.09220	-0.07448



図—4



図—5



図—6

おけるこれらの値を求めると，表—1，2，3，4，5，6，のごとくである。

3. 応用例

本章では第一章に述べた解にもとづいて二次元的に岩盤内の応力分布を求め，基礎処理方法について検討した実例について述べることにする。

［1］ 二瀬ダム

このダムは高さ 95m の厚肉アーチダムで両岸とも硅質千枚岩からなり，右岸は比較的堅牢であるが左岸はクラックおよび節理が比較的多い岩からなっている。

このダム特に左岸のコンソリデーショングラウトの計画をたてるにあたって，まず，どの範囲までグラウトすべきかが問題となった。

一般に数多くのクラックまたは節理をともなった岩盤では，これらの節理またはクラックに沿った剪断破壊に対し十分安全なように処理すればよいと考えられる。二瀬ダムの左岸は河に垂直な方向に節理が，平行な方向にクラックが発達していた。したがって河に垂直な面，および平行な面内での剪断応力が，ある程度以上の場所に対してグラウトして固めればよいということになる。

そこで第一節に求めた解にもとづき，二次元的に岩盤内の剪断応力の分布をもとめた。すなわち，一般にアーチダムでは下流側のアバットメントを堅牢な岩盤の上にのせ，岩盤とコンクリートとの接触面がアーチの半径方向と一致するようにするため，上流側のアバットメントは堅牢な岩の深い所にとりつけられる。したがって半無限板の境界線を下流側のアバットメントを通って，岩盤の表面に平行な直線にとる。(図—4 参照)次にアーチ中心線のアバットメント（図—4 の点B）を通って，アーチ中心線の接線を引き，これとさきに仮定した半無限板の境界線との交点を求め，(図—4 の点B′)，これを座標原点にとる。上流側のアバットメントからもアーチ中心線の接線の平行線を引き，これと境界線との交点を求める。（図—4 のA′），この交点（A′）と下流側アバットメントとの間（図—4 のA′C）を半無限板の載荷部分とする。

またアーチ中心線の接線と境界線のノリ線のなす角を α とする。t はアバットメントでアーチ中心線に垂直な方向にはかったダムの厚さである。

このようにして，第一章に述べた解にもとづき，第二章の数表を用いて岩盤内の剪断応力の分布を求めると図—5，6 のごとくである。かくして求められた応力分布にもとづいて，当地点では岩盤の状況にかんがみて，剪断応力が 3 kg/cm²

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/cm² 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収ダム，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，室収ダムでは剪断応力が 5 kg/cm²，綾北ダムでは 3 kg/cm² 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来ると思われる。

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，三次元的な力の伝幡が考えられるので Rochy 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入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，室牧ダムの諸工事々務所の方々に感謝の意を表する。

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

1. 緒　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，あるいわ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出水を生じ，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1960m³/sの内1000m³/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 m³/sと改訂され，その内2,000m³/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

---

* 工博　河川部河川研究室長　　** 河川部河川研究室主任研究員　　*** 中部地建　沼津工事々務所技官

**** 吉川秀夫，芦田和男，川畑昭至：断面変化を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：河川の分流に関する研究(4)――狩野川放水路の水理設計――　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な高速流であるが，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）を実験的に見い出す。

〔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 型の法則を考え，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

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

$$n_m=(1/40)^{\frac{1}{2}}\ n_p=\frac{1}{1.849}n_p$$

$$Q_m=(1/40)^{\frac{5}{2}}\ Q_p=\frac{1}{10120}Q_p$$

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，

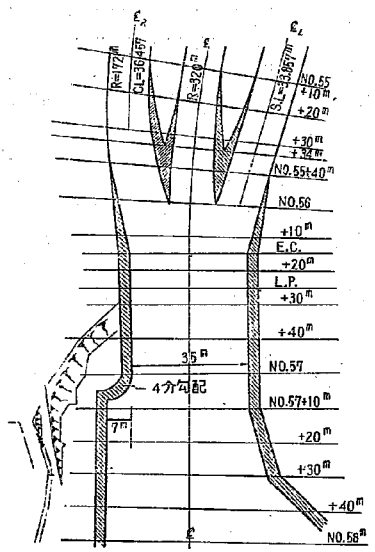


図-1　実験-1　平面図

* 吉川秀夫，芦田和男，川端昭至：断面変化を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

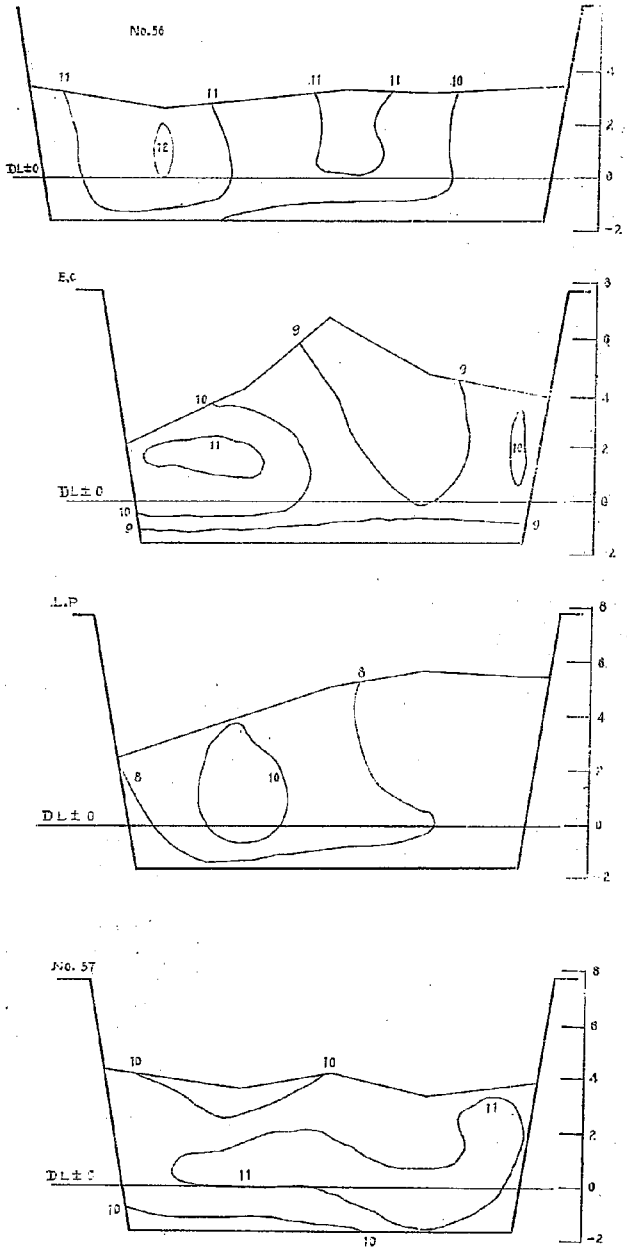


図-2 流速分布図（実験-1）

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はなは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剝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$Q=2,000\mathrm{m^3/s}$の場合$U_{max}=12.13\mathrm{m/s}$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。

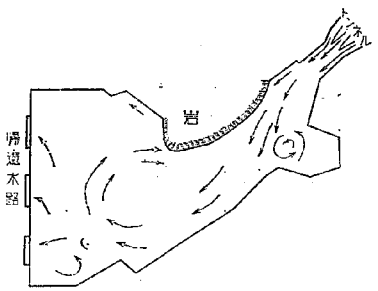


図-3　湾右岸部（No.58～No.63付近）岩山掘削前の湾内流況

次いで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ると思われる。

〔2〕 実験-2

(a) 実験-1において現われた衝撃波，流線の剝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，中心線は曲率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

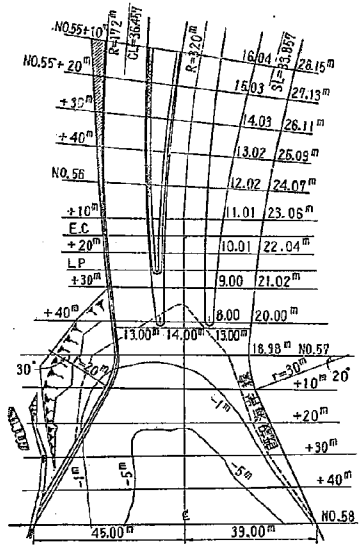


図-4　実験-2　平面図

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

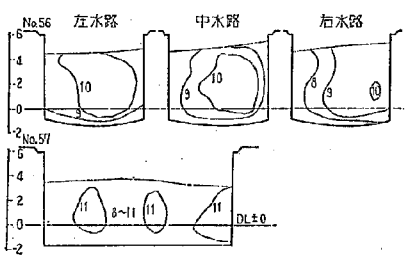


図-5　流速分布図（実験-2）

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で跳水を起こし海に突入する。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と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。

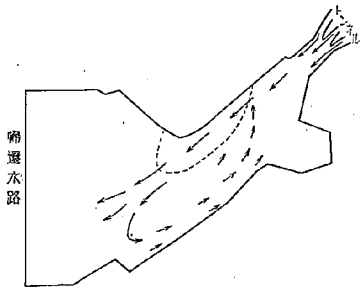


図-6　湾右岸部岩山をDL.—7mまで切取後の湾内流況

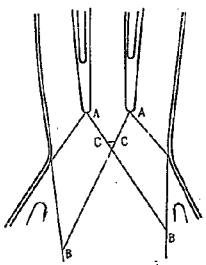


図-8　衝撃波線

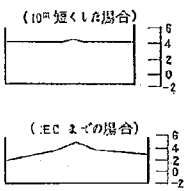


図-9　横断水位図

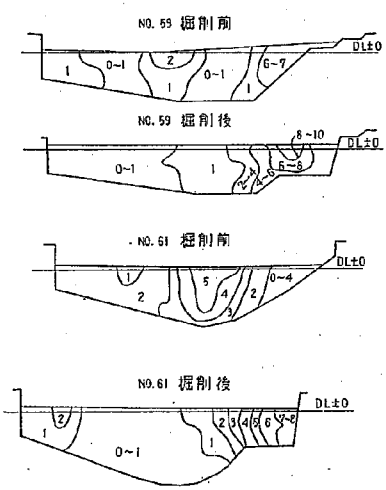


図-7　岩掘削による湾内流速分布の変化

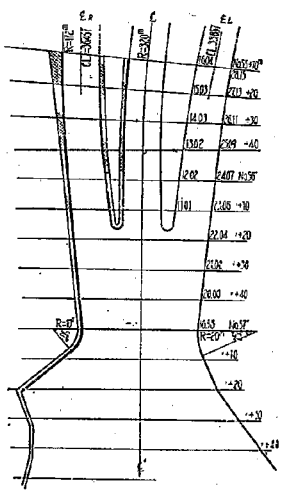


図-10　実験-3　平面図

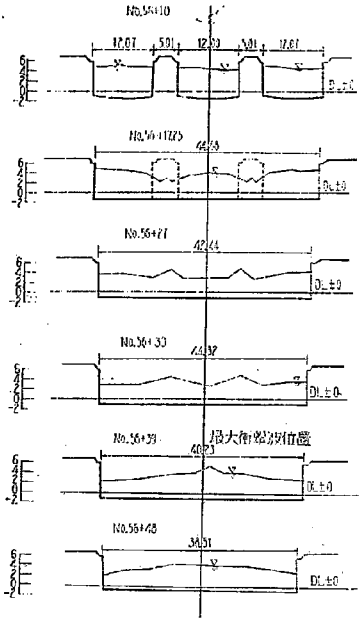


図-11　実験-3　水　位

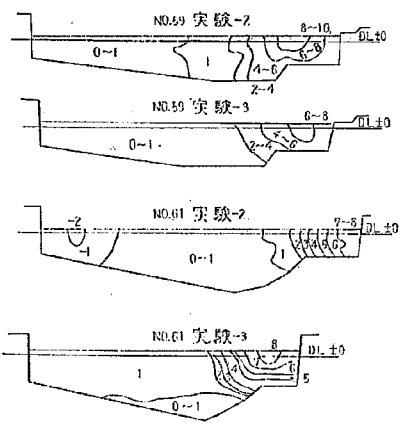


図-12　湾内横断面内流速分布比較図

(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ので，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で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までにすると 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

湾内に突入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 線上とほとんど同個所）No.57 付近から既設海岸への取り付けは右岸は半径 10 m 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-2 b 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。

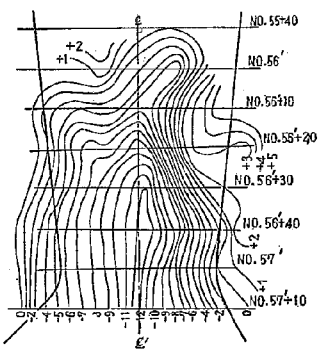


図-13　遷移部岩盤等深線図

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水路となるために，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

の深い遷移部の基礎岩盤位置を考慮せずに，トンネル内の河床こう配 1/400 で No.57 付近まで河床を延長施工し，また導流壁も最も長く No.56＋40まで伸ばして実験を行なって来た。

しかし，この第２トンネル出口遷移部の基礎岩盤の位置は非常に深く(特に右岸寄りにおいて)，そのため導流壁および河床をトンネル内と同こう配1/400で延長施工することは実際現地で施工にあたる場合および施工後の河床維持（河床面コンクリート被覆部と非被覆部との接合点より河床下の土砂洗掘による河床の崩潰など）の面で多くの問題が生じてくる。（図-13参照）そのために遷移部の岩盤を考慮して河床は岩盤露出の状態（適度な岩掘削により河床形状を整える）とし岩掘削の多少により水路河床形状を異にした各状態について水理実験を行ない水理的，経済的に最良な形状を求めるために以下の実験が行なわれた。なお，中心線はNo.55＋40より出た接線を採用した場合は EC より出た接線の場合とは横断的位置も多少異なってくるため，(′) を付けて EC の場合と区別する。実験目的は前述したように水理的，経済的に最良の形状を求めるのにあるわけであるが，そのために次の項目を実験的に求めることとする。

(1) 側壁法線形状
(2) 導流壁の長さおよびその形状
(3) 河床断面形状
(4) 中心線の方向

主に以上の４点について実験的に最良の形状を求めるわけであるが，その結果の比較検討事項として，大体下記の４つを上げることができる。

1. 橋架桁下高と水位との関係
2. 水位および流速
3. 跳水の高さおよびその位置

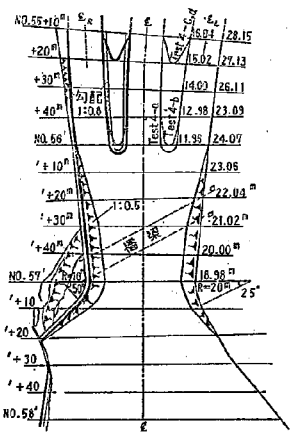


図-14　実験-4　平面図

4. 衝撃波

一方海に放流された後の流況については主に水面振動渦流等による湾左岸部（No.59～65）への水位振動が問題となって来る。

実験 2-b により，湾右岸部に存在する岩山を掘削することにより，渦流は是正され，放流状態は非常に良好になったわけであるが，ここで問題となってくることは，その掘削深の程度である。本実験においては，岩盤可能掘削深 DL—7m と考えて，この状態で実験を行なうと同時に，掘削の一段と浅いDL—4mについても結果の比較検討の意味から行なうこととした。また，中心線方向の変化による海への影響についても検討する。

1. 湾右岸岩山の掘削深DL—7mとDL—4m との場合の水理状態の比較
2. 中心線方向の変化による湾内水理状態の比較

以上の２点を比較検討して湾内形状を決定することとする。

〔1〕 実験 - 4

(a) 遷移部の形状の概略を次に記す。（図-14参照）

① 平面形状

中心線はNo.55＋40の接線延長線(ℓ)を採用し No.56′＋40の断面で水路巾40mとし，トンネル出口よりNo.57′の区間の側壁法線は比例配分による緩和曲線とする。この平面的な側壁法線形状は実験-3と同様であり，河床形状を異にする実験-4においてこのような側壁法線形状を採用したことについての大きな根拠はないが，実験-1の結果をみてもわかるように，この形状が大体妥当な形状と判断して，これを採用した。

No.57′ より下流においては，右岸側では側壁を曲率半径 10m 内角50°の円弧で，その後は接線を延長させて右岩海岸線にすり付ける。

一方左岸壁はNo.57′より曲率半径20m，内角 25° で接線を延長して左岸既設海岸線にすり付ける。

導流壁はNo.56′ までとし，３水路をトンネル内と同一水路巾12mで導びくために，導流壁先端厚は約 6m となる。なお，先端形状は半円弧とする。

② 横断状形

導流壁先端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岩盤最低位置（大体水路中央部に当る）を河床高とする台形水路とした。ただし，側壁は最初の計画河床位置（河床こう配1/400の延長位置）より上部を垂直としその下部は５分の法こう配をつける。（図-15参照）

③ 縦断形状

前述のごとく導流壁先端まではトンネル内の河床を延長し，この導流壁先端よりNo.56′＋30付近にかけては岩盤の関係で約 18° の河床こう配で下り，それより下流にあっては大体水平になる（なお，トンネル内のインバー

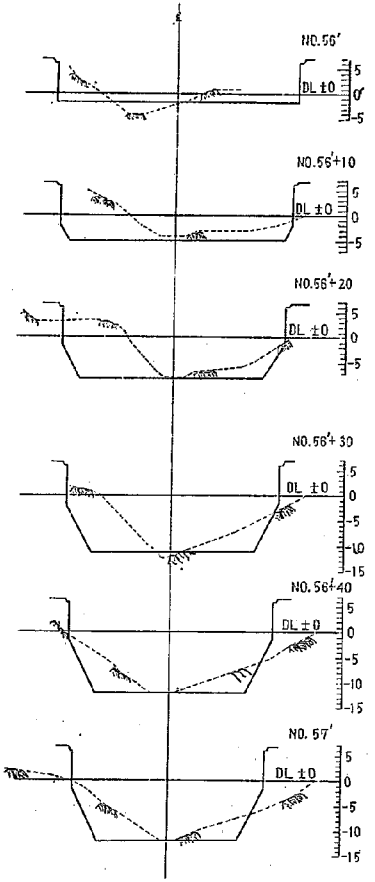


図-15　岩盤横断図および実験-4 横断面図

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。これは導流壁先端厚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なったものであるが，結果的には衝撃波は小さくなるが，その他についてはいちじるしい変化は見られなかった。なお，導流壁先端厚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。

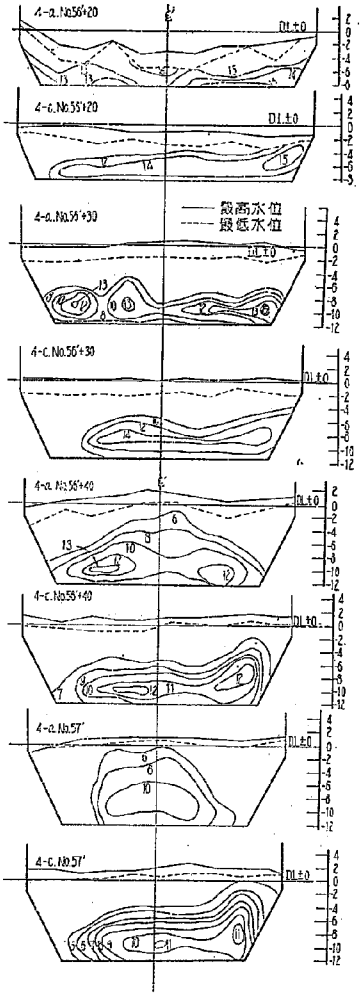


図-16　導流壁長短の水理状況変化（実験-4）

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）

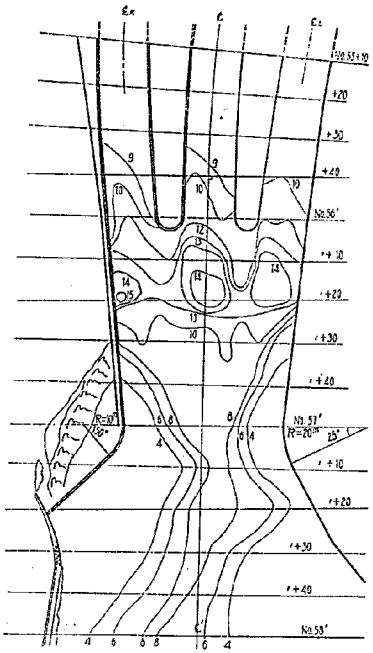


図-17 (1)　実験-4a 流速分布図

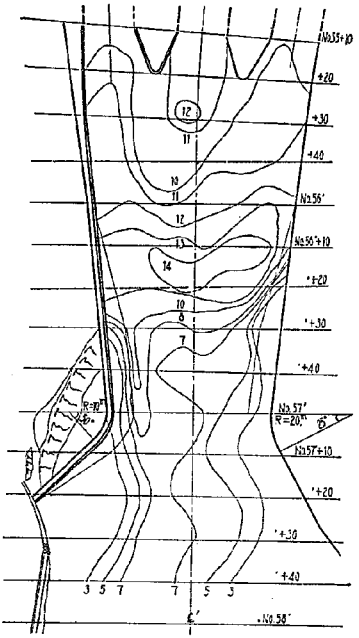


図-17 (2)　実験-4c 流速分布図

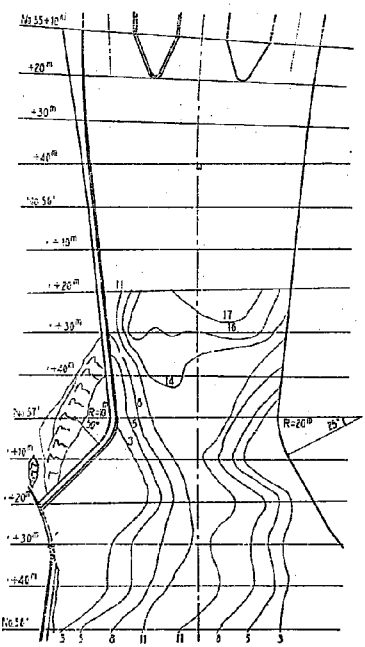


図-17 (3)　実験-4d 流速分布図

① 導流壁を極端に短かくした場合，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かくした場合，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，流速においての(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，

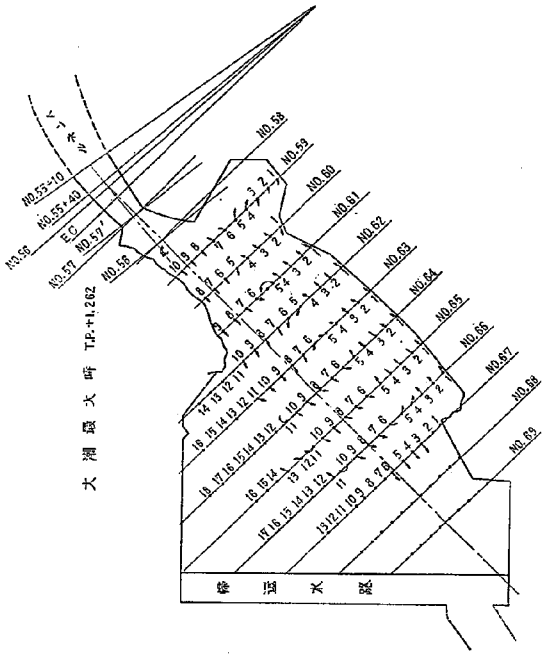


図-18　実験-4　湾内流向図

この遷移部内では非常な高流速となるため，岩質により河床洗掘のおそれも多分にあるので，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なくても放流に支障ない程度の掘削にとどめ，大体現状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（こう配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）の低い右側壁は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 であることと盛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

湾右岸岩山の掘削深は前実験-4においてはDL－7 m 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－4 m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 A_1，A_2 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。

（A_1）の場合は（A_2）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（A_2）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

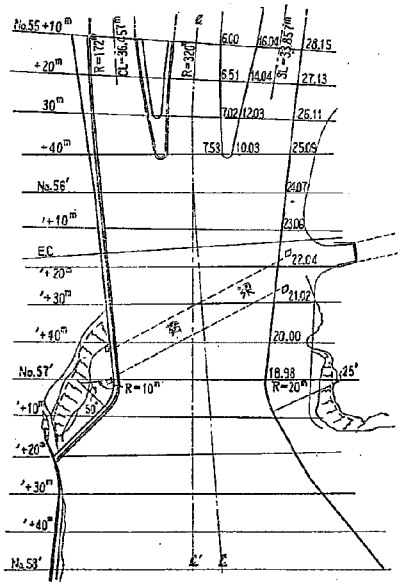


図-19　実験-5，7，8　平面図

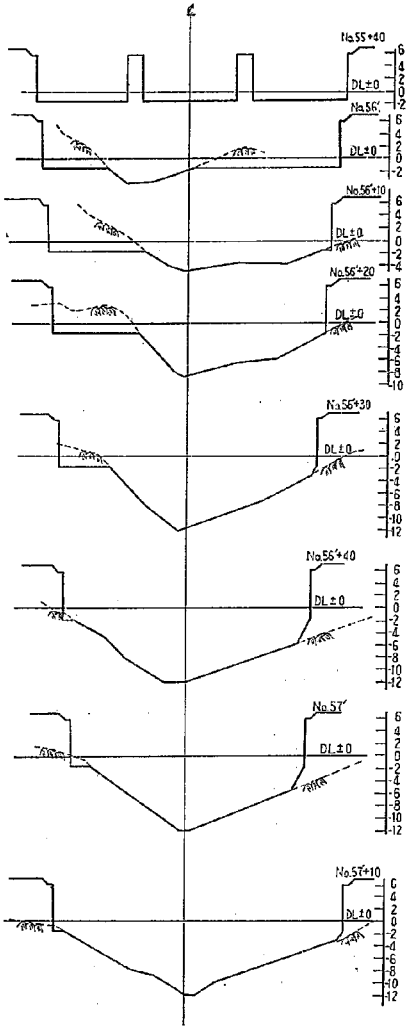


図-20　岩盤横断図および実験-5 横断面図

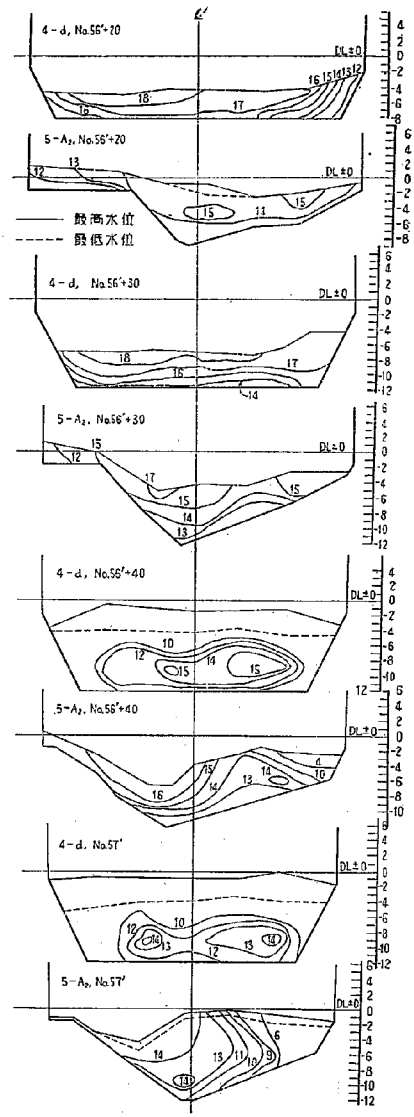


図-21 (1)　遷移部河床形状の差異による水理状態変化

最低点は実験5-A_2 に比べ非常に低くなる。一方実験5-A_2 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。

② 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-A_2 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。

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

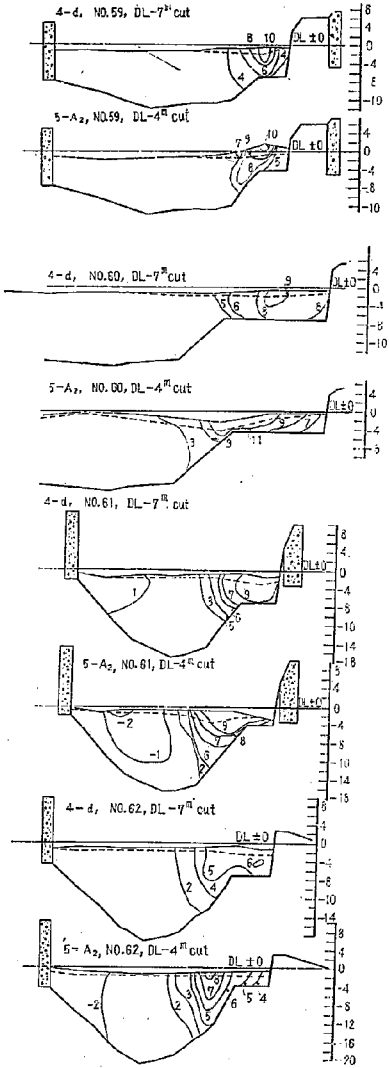


図-21 (2) 湾右岸部DL－7m，DL－4m切取の場合の水理状態変化（最低潮位の時）

図-22 実験-5 流速分布図

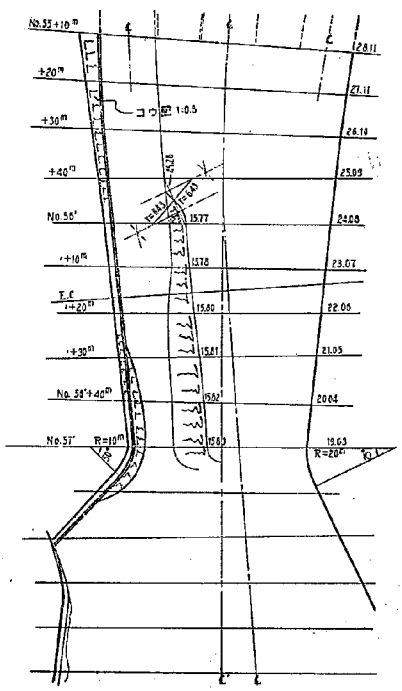


図-23 実験-6 平面図

[illegible]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-A_2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

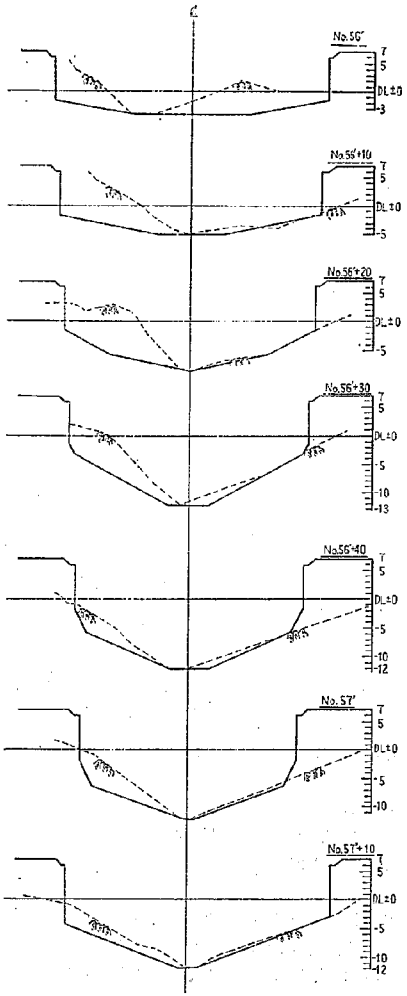


図-24　岩盤横断図および実験-7遷移部横断面図

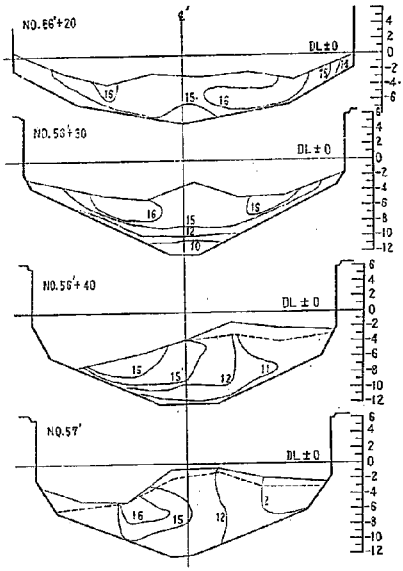


図-25　実験-7　遷移部水理状況

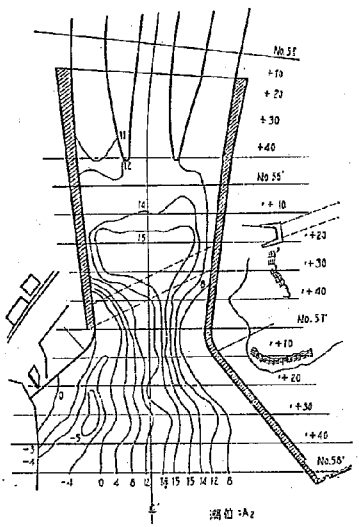


図-26　実験-7　流速分布図

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-A_2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）

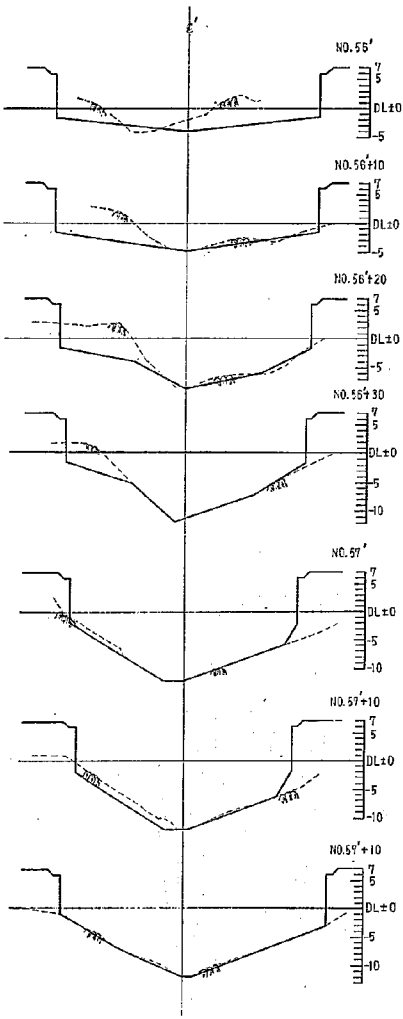


図-27　岩盤横断図および実験-8 横断面図

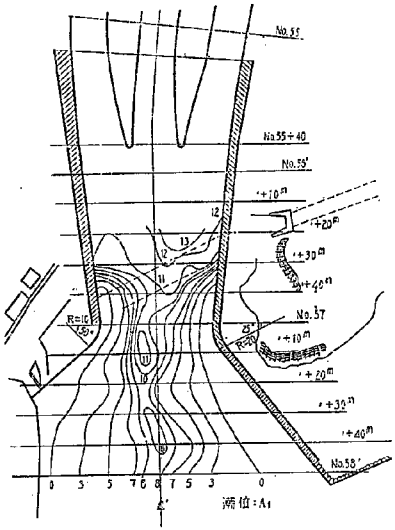


図-28　実験-8　流速分布図

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は云いがたい。このように水位および流速の不規則性は河床形状に基因しているように思われる。それゆえ，以上のごとき不規則性を少なくするため，横断的に左右対称なる水路にすべく岩盤の低い右岸部岩盤を基準として左岸部岩盤をこれに対称に掘削した。もちろん，この場合横断的に河床を左右対称にすると同時に縦断的河床形状も考慮した。（図-24参照）

(3) 湾内形状

実験-5と同様右岸岩山をDL－4mまで切り取る。

（A_2）：実験-5と同様流況状態の悪い A_2 につき資料を取った。（図-25，26参照）

(a) 遡移部

① 水位は実験5-A_2 に比べ全体的に低い結果となる。

② 流速は実験 5-A_2 に比べ水位の低下にともない全体的に大きく，また最大流速は下流（No.58'）に至っても減少せず高流速を維持する。

③ 河床形状の修正により断面方向の水位変化は小さくなり，また流速分布状態もいく分良好となる。

実験5-A_2 と比較検討すると大体上記のようなことが指摘できるわけであるが，実験５の場合より多量の岩掘削を施して経費がかかり経済的にはよくない状態であったにもかかわらず，結果は全体的にみて水理的な面においても流速の増大などによりむしろ悪化しているように思われる。この流速増大は河床修正による河床粗度の減少が原因しているようにも思われる。

(b) 湾内流況

実験 5-A_2 と同様湾右岸岩山DL－４mまで切り取った部分の No.60～No.61 にかけ大きな跳水を起こし水位

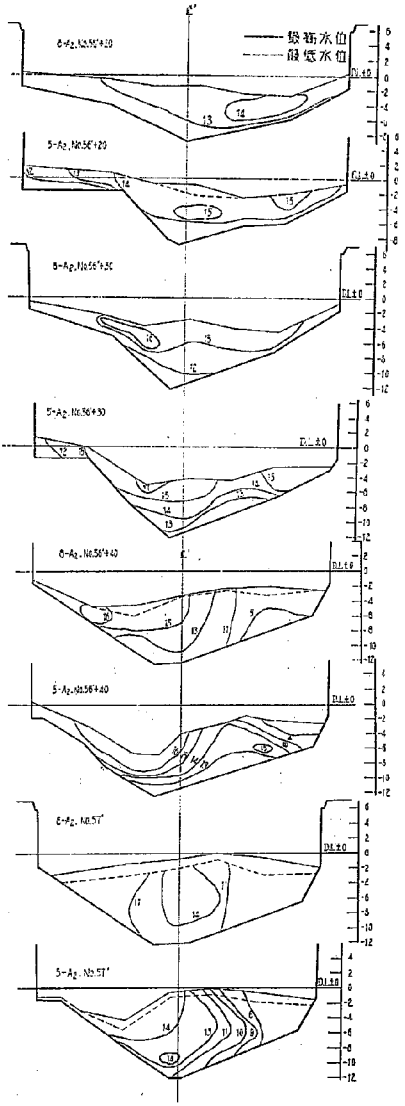


図-29　実験-8，実験5遷移部水理状態比較

（水面）状態は好ましくない。

〔5〕 実験－8

前述したように実験 4-d, 5-A_2, 7-A_2 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）。

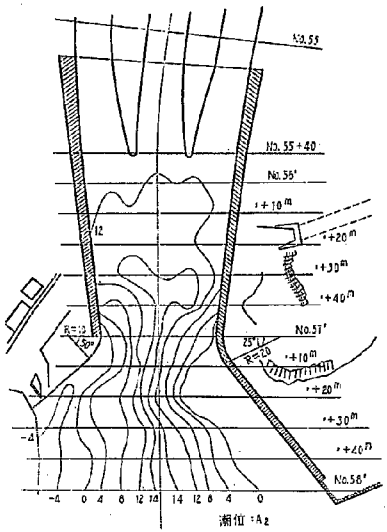


図-30　実験-8 流速分布図

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－4 mまで切り取るものとする。

（A_1）：実験5，7を通じて資料はすべて A_2（下流最低潮位）についてのみ求めた。実験8-A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-A_2 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が他は大差ない。

③ 実験8-A_1 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。

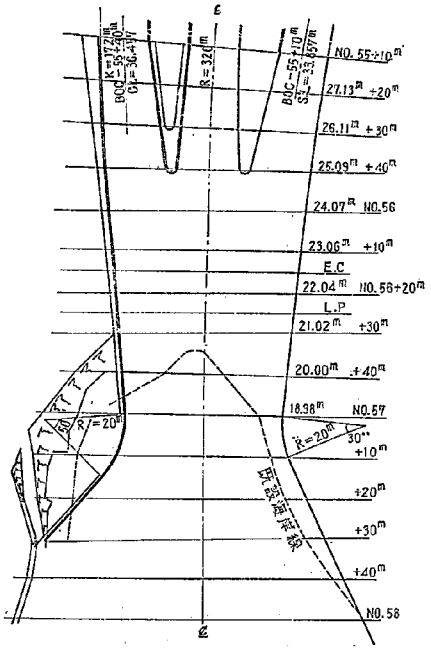


図-31　実験-9，10　平面図

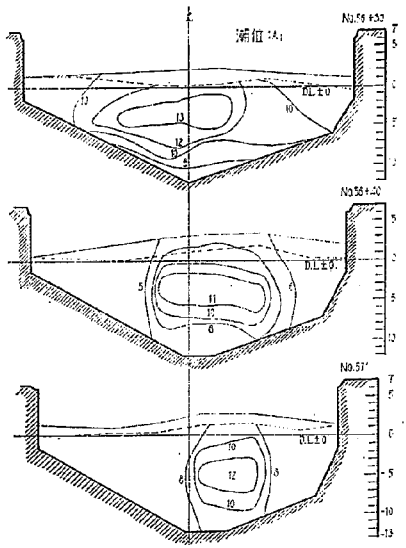


図-32　実験-10遷移部水理状況

（A_2）：潮位（A_2）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-A_2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-A_2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—A_2 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，水理的にみて実験-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

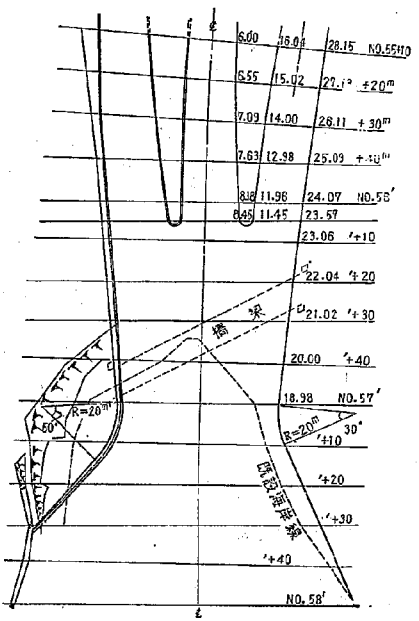


図-33　実験-11　平面図

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

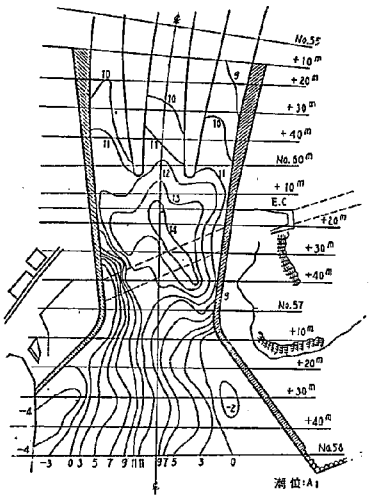


図-34　実験-11　流速分布図

か，あるいはDL−4 m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ちじるし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（4～8）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どして実験し，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，A_1の場合。跳水（流水）がいちじるしく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，水路の曲線的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なってみたが，結果は実験-9の場合と大差なく，結果は良好とならなかった。（図-32参照）

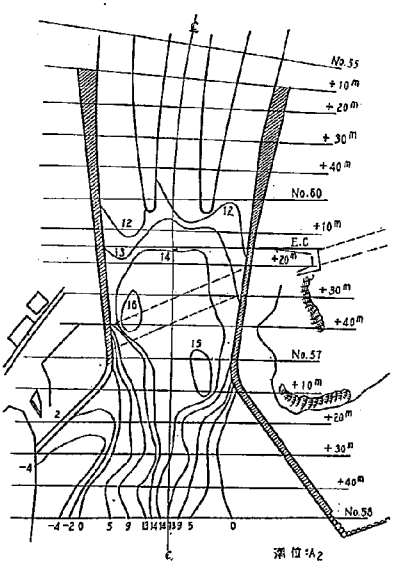


図-35　実験-11　流速分布図

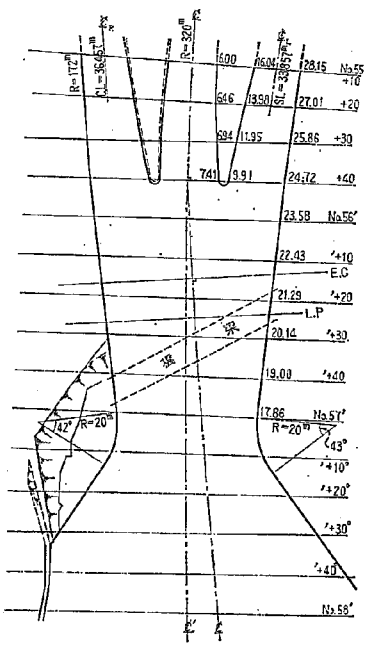


図-36　実験-12　平面図

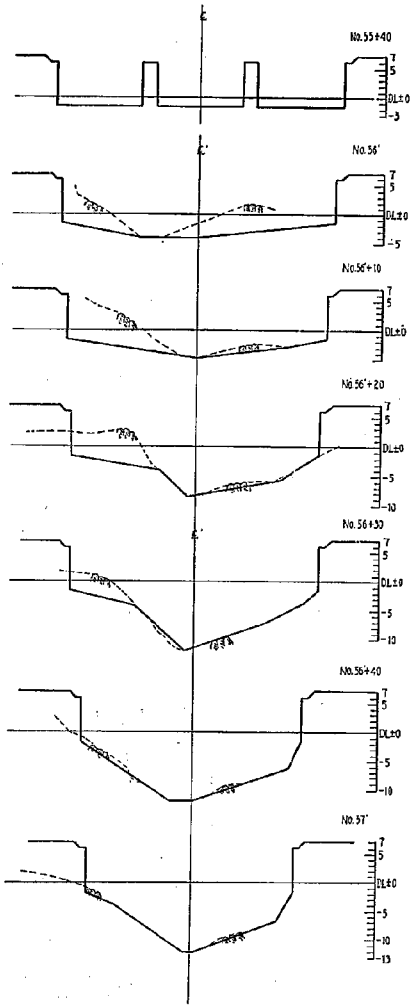


図-37 岩盤横断面および実験-12横断面図

〔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，かつ海へ撹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

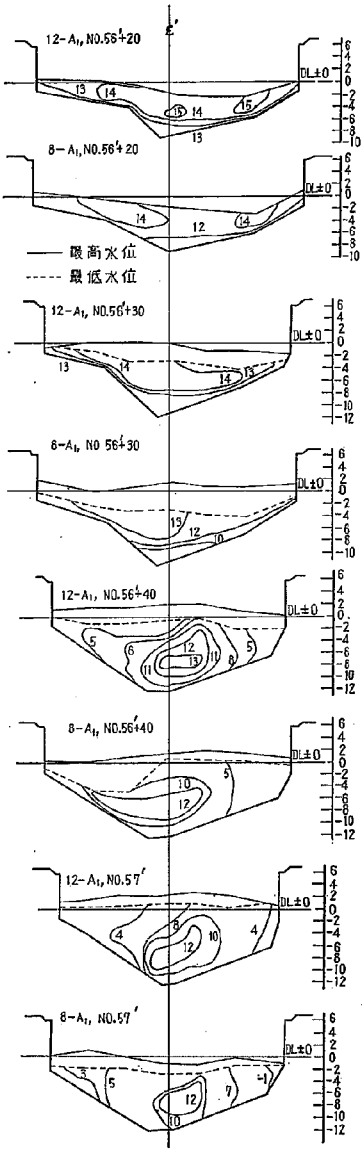


図-38 実験-12，実験-8遷移部水理状態比較

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）

（A_1）：下流潮位の同一の実験8-A_1の結果と比較することとする。

(a) 遷移部

① 水位は実験8-A_1と比較した場合11-A_1は流水の落

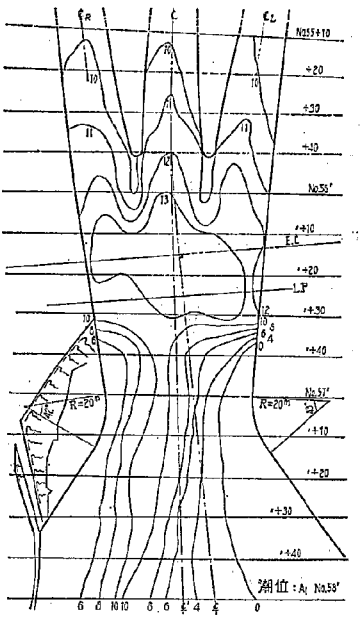


図-39　実験-12　流速分布図

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-A_1においては縦断的にみた水位の変化は小さいが実験11-A_1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-A_1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。

（A_2）：下流潮位同一の実験8-A_2と比較する。

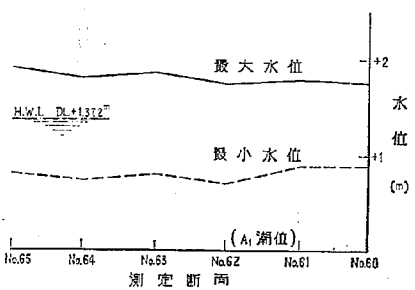


図-40　実験-12　湾内右岸部水位振動状況

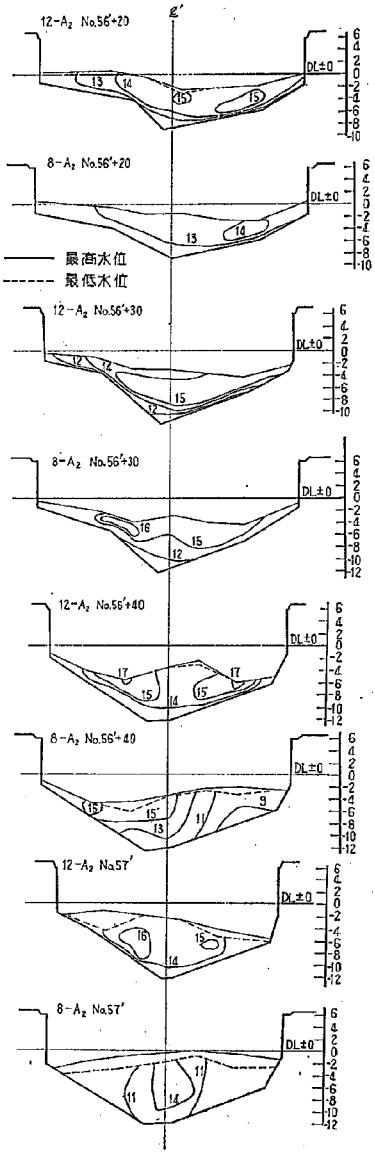


図-41　実験-12，実験-8遷移部水理状態比較

(a) 遷移部

① 水位は実験5-A_2，8-A_2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-A_2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。

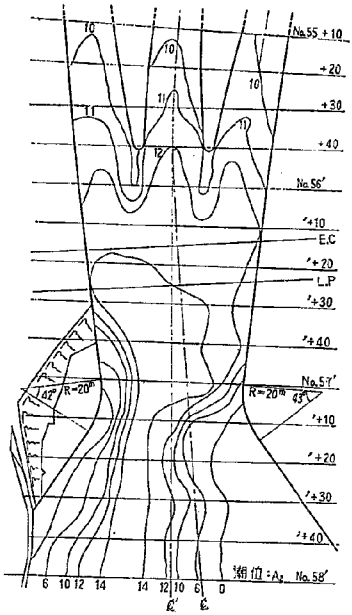


図-42　実験-12　流速分布図

②　流速分布は実験11-A_2 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りなかった。

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仲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40m）とやや縮小して比例配分による緩和曲線によ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

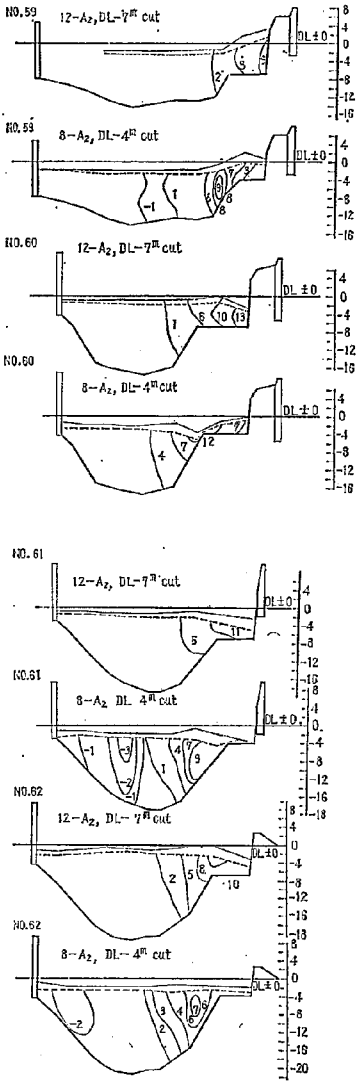


図-43　湾右岸部DL－7 m，DL－4 m，切取の場合の水理状態比較（12-A_2と 8-A_2の比較）

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－7 mまで掘削およびDL－4 m まで掘削の2種について実験を行なって来たが結局 DL－4 m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－7 m 掘削で行なうこととした。

(A_1)：実験 8 -A_1 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く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の方がやや大きくなっている。(図-38，39参照)

③ 湾右岸岩山DL－7 m 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－4 m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－4 m掘削の実験 8 -A_1 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-A_1 においては振巾も小さく水位上昇もDL＋ 2 m 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－7 m 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 -A_2，8 -A_2 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-A_2 の場合実験 8 -A_2 に比べいくぶん大きい。(図-41，42参照)

(b) 湾内

① 湾右岸部 DL－7 m 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基因して流水は右岸 (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－4 m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 (A_1) 時の遷移部の流水右偏現象は 8 -A_1 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 (6 m) が厚くなることに基因して衝撃波 (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) と遷移部岩盤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盤位置まで掘削して，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変化は，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－7 m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－4 m 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－7 m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，水位的に見れば DL－7 m の場合よりいくぶん高くなるけれども，DL－4 mの場合でもよいと思われる。しかしDL－7 m

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。

次ぎ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，非常な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くするよう施工し，できれば河床凹凸を少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

実験＼比較事項	形状				
	側壁法線形状	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側壁法こう配千分の形状水路(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						
下流潮位 (m)	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(No56′+20～No.57′)	No.57′の最大及び平均流速	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			
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的結果は悪い。	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斜交等の是正。	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	流水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計る。	
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	岩掘削量の多過。	4-b は 4-a の状態で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それ程衰えず。 ○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に大きな跳水を生ずる。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 以上に大きく流速 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700m³/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。	

比較事項 / 実験	形状				湾右岸部cut (No.58～63m)
	側壁 法線形状	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とし中心線に対し対称な緩和曲線にて施工	No.55＋40（岩盤考慮して）先端厚2.5m	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。	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拡大水路とする。ゆえに導流壁は中心線に対し左右非対称。	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とし中心線に対し対称な緩和曲線にて施工。	No.55＋40 先端厚2.5m	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

実験結果

下流潮位 (m)	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(EC の接続延長)ゆえに水路を幾分左に振っただけのものである。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路幅をやや縮める。	
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により流水の右偏いちじるしい。	右岸DL—7m cutよりDL—4m cutの場合に生じたNo.60～61付近の跳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)