

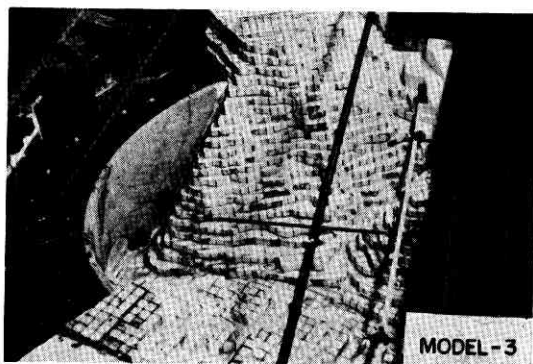
アーチ・ダム の 基盤 の 安全 性 に 関 す る 実 験 的 研 究

高 野 稔

水力電源の開発段階が進むにつれて、ダム地点の地形ならびに地質条件は次第に困難さを加え、アーチ・ダムの安全性を左右する基盤の重要性もその比重を増してきた。しかしながら、アーチ・ダムの本体を構成するコンクリートに比べて基盤を構成する岩盤の性質には不明確な点が多いこと、クレフトやディスロケーションが基盤構造を複雑なものにしていること等から、基盤の力学的性情について、われわれの利用し得る知識は、今日でも極めて少ない。筆者は、黒部第四ダムの設計に関連して実験的な方法による基盤の安全性の研究を進めつつあるが^{*}、本文では、その考え方、実験方法ならびに結果の一部について簡単にふれる。

基 盤 の 安 全 性

黒部第四ダムの基盤の安全性を検討する場合に、筆者は次のような考え方をとった：



第 1 図 模型および実験装置 (模型-3)

1) アーチ・ダムに作用する主な荷重は静水圧と自重で、その中自重はもちろんのこと、静水圧の場合も、その大きさが設計荷重をはるかに上回る機会是一般にないといってよい。したがって、基盤に限らずアーチ・ダムの安全性は、設計荷重の何倍の荷重に耐えるかによってではなく、材料の強度がどこまで落ちれば設計荷重で破壊を招くかによって判断されなければならない¹⁾。

2) 基盤のように実物の状態が明確に把握できない構造物では、数値計算によるしろ実験的な方法によるしろ、直接実物への接近を試みることは困難である。したがって、基盤構造を一般的にいくつかの理想化された範疇にわけ、各範疇に応じてそれぞれの場合に破壊を招く力学的な状態を明らかにするのが適当である。

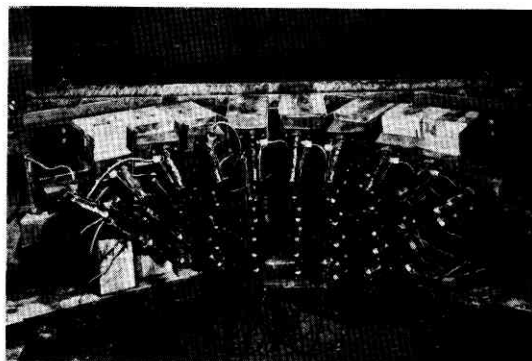
3) 大規模なダム地点では、アバットメントの岩質が下部から上部へと悪くなりクレフトおよびディスロケーション (分離面) は卓越した走行傾斜をもつのが普通である。それで分離面のない様な岩盤よりなる場合、同じく分離面はないが谷の下部と上部とで岩質を異にする場合、卓越した走行傾斜をもつ分離面によって規則正しい不連続構造を伴う場合等を上記の理想化された基盤構造に選ぶことができる。

ダムのように荷重が体積力よりなる構造物の実物と模型とが力学上相似であるための条件は、簡単に次の式であらわされる²⁾。

$$\xi = \rho \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{E_1}{E_1'} = \frac{E_2}{E_2'} = \dots\dots\dots = \frac{S_1}{S_1'} = \frac{S_2}{S_2'} = \dots\dots\dots \\ \rho &= \frac{\gamma_1}{\gamma_1'} = \frac{\gamma_2}{\gamma_2'} = \dots\dots\dots \\ \lambda &= \frac{l}{l'} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$



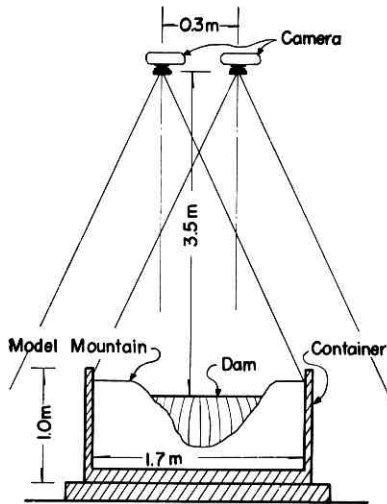
第 2 図 載荷装置

上式中、

- $E_1, E_2 \dots\dots$ = 実物材料の弾性係数
- $E_1', E_2' \dots\dots$ = 模型材料の弾性係数
- $S_1, S_2 \dots\dots$ = 実物材料の強度
- $S_1', S_2' \dots\dots$ = 模型材料の強度
- $\gamma_1, \gamma_2 \dots\dots$ = 実物荷重の密度
- $\gamma_1', \gamma_2' \dots\dots$ = 模型荷重の密度
- l = 実物の寸法
- l' = 模型の寸法

(2) 式の実物の設計荷重の密度 $\gamma_1, \gamma_2 \dots\dots$ すなわち、静水圧と自重の密度は十分な精度で与えることができるので、模型の寸法ならびに材料を選べば、破壊時の模型荷重の密度 $\gamma_1', \gamma_2' \dots\dots$ から実物が設計荷重で破壊を招

^{*} 本研究の実施に当たっては、終始東京大学生産技術研究所岡本舜三教授のご指導を仰ぎ、測定に当たっては岡本、丸安両研究室のご支援をいただいている。



第 3 図 立体写真測量による基盤の変位と破断面の測定

くときの実物材料の機械的性質が求まるのは、(1)式より明らかである。すなわち、実物と相似な形をした模型を破壊することによって、理想化された基盤構造をもつ実物の破壊機構とそれを支配する機械的性質を求めることができる。筆者はそれらを仮想実物 (imaginary prototype) とよぶ。

このような仮想実物は、理想化の数に応じて、 P_1, P_2, \dots, P_i まで得られ、

$P_1; E_{11}, E_{21}, \dots, S_{11}, S_{21}, \dots$

$P_2; E_{12}, E_{22}, \dots, S_{12}, S_{22}, \dots$

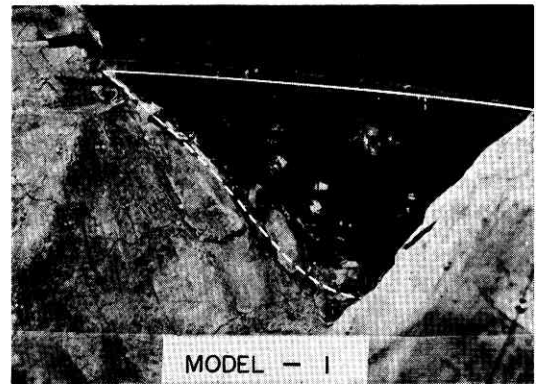
$\dots \dots \dots$

$P_i; E_{1i}, E_{2i}, \dots, E_{ni}, S_{1i}, S_{2i}, \dots, S_{ni},$

なる弾性係数、強度等をもつことになるが、破壊機構を支配する $S_{11}, S_{22}, \dots, S_{ni}$ と実物 (actual prototype) P , すなわち、

$P; E_1, E_2, \dots, E_n, \dots, S_1, S_2, \dots, S_n, \dots$

を対比させることによって、所与のダムと基盤がどの破壊機構に弱いのか、またその場合実物はどの程度の余裕



第 4 図 右岸アバットメントにそう滑動 (模型-1)

があるのかを推察しうる (上掲の記号に付した 2 番目の下記記号は仮想実物の番号をあらわす)。

もともと P の内容 ($E_1, E_2, \dots, E_n, \dots, S_1, S_2, \dots, S_n, \dots$) は、かなりの幅をもってしか評価できないので少なくとも $S_{11}, S_{22}, \dots, S_{ni}$ のような安全性判定の尺度を与えようとするのが筆者の意図である。

実験方法

第 1 図は実験装置を示す。基盤の破壊現象に実用上影響があると思われる範囲の地形を鋳製コンテナの中に再現し、別途製作したダム本体は接着材によって基盤と結合し、実物に相似な形状をもつ模型とした。採用した寸法比 λ の値は 500 である。研究の第 1 段階としてとりあげた荷重は静水圧だけで、模型の載荷は第 2 図のような油圧ジャッキによっている。

第 1 表は、それぞれ次のように理想化された基盤構造の模型材料とその機械的性質を示す。

P_1 : 分離面を伴わず一様な材料よりなる基盤

P_2 : P_1 と同じであるが、アバットメントにおける本体と基盤との接触状態がより良好である。

P_3 : アバットメントにおけるアーチの軸線の切線方向にはほぼ平行ならびに直角な 2 群の鉛直分離面およ

第 1 表 模型材料とその機械的性質

| MODEL | FOUNDATION SOLID | E' | δ' | τ' | ϕ' | q' | SEPA-RATION | τ'_s | ϕ'_s | CONTACT PLANE ^{*2} | α'_s | ϕ'_s | DAM BODY |
|-------|---------------------------------|--------|-------------|-----------|-----------|--------|-------------|-----------|-----------|-----------------------------|-------------|-----------|---------------|
| | | E'_s | δ'_s | τ'_s | ϕ'_s | q'_s | | τ'_s | ϕ'_s | | α'_s | ϕ'_s | |
| 1 | CONSOLIDATED SAND ^{*1} | 500 | 7 | 3 | 37 | 15~30 | NONE | — | — | PLASTER-CELITE | 8 | 26 | CEMENT MORTAR |
| 2 | CONSOLIDATED SAND ^{*1} | 500 | 7 | 3 | 37 | 15~30 | NONE | — | — | PLASTER | 33 | 28 | CEMENT MORTAR |
| 3 | PLASTER-CELITE | 20000 | 30 | — | — | — | CLAY | 1.2 | 18 | PLASTER | 33 | 28 | CEMENT MORTAR |

^{*1}: 砂+水ガラス+重炭酸ソーダ+硅弗化ソーダ ^{*2}: 堤体と基盤の接着材 E' : 単軸試験から得た基盤材料のヤング係数 δ' : 同前圧縮強さ τ' : 直接剪断試験から得た基盤材料の剪断強さ ϕ' : 単軸試験から得た基盤材料の内部摩擦角 q' : 半無限平板から得た支持力 τ'_s : 角柱供試体から得た分離面ぞいの剪断強度 ϕ'_s : 同前摩擦角 τ'_s : 接触面ぞいの剪断強度 ϕ'_s : 同前摩擦角 E, σ, τ, q : kg/cm² ϕ : 度

び1群の水平分離面, 計3群の直交する規則正しい分離面をもつ基盤。

第1表の模型—1, 2に示す基盤材料の圧縮強度さらに模型—3の分離面の剪断強度は極めて小さい。規模の小さい模型による場合は載荷装置の容量から, このような材料によらなければ基盤自体の破壊は実現できない。

第2図の載荷装置では, ジャッキの油圧と模型上流面に作用する荷重を液体荷重に換算した場合の密度との関係は, 次の式で与えられるようになっている。

$$\gamma' = 2.66 p_0$$

上式中,

γ' = 模型上流面の換算液体荷重の密度 (g/cm^3)

p_0 = ジャッキの油圧 (kg/cm^2)

基盤の表面または内部の歪測定は小規模模型では困難で, また機械的な変位計による動きの測定も利用し得る空間の制限を受けて思うにまかせない。筆者は, 第3図に示すようなステレオ写真のテクニックによって, 荷重

の増大に応ずる基盤表面の変位と破壊面の形を把握することにした。撮影距離が小さいため, 航空写真測量に用いるような特殊カメラの使用はできず, 普通写真用カメラ (ニコン) 2台を使った。したがって, 画面の歪がかなり大きく, 特定点の変位はどちらか片方のカメラがとった単写真を利用し, あらかじめ模型基盤の表面に設けた標点の変位をコンパレータで読みとった。基盤の破壊面の形は, ステレオプラニグラフによって図化しても実用上差し支えない。

このほか, ダム本体の下流面アバットメント沿いに電気抵抗線歪計を貼り, 歪の変化を電磁オシログラフで測定したが, アバットメント近傍の基盤材料が破壊する場合には, その位置破壊の順序等を知るのに都合がよい。

実験結果

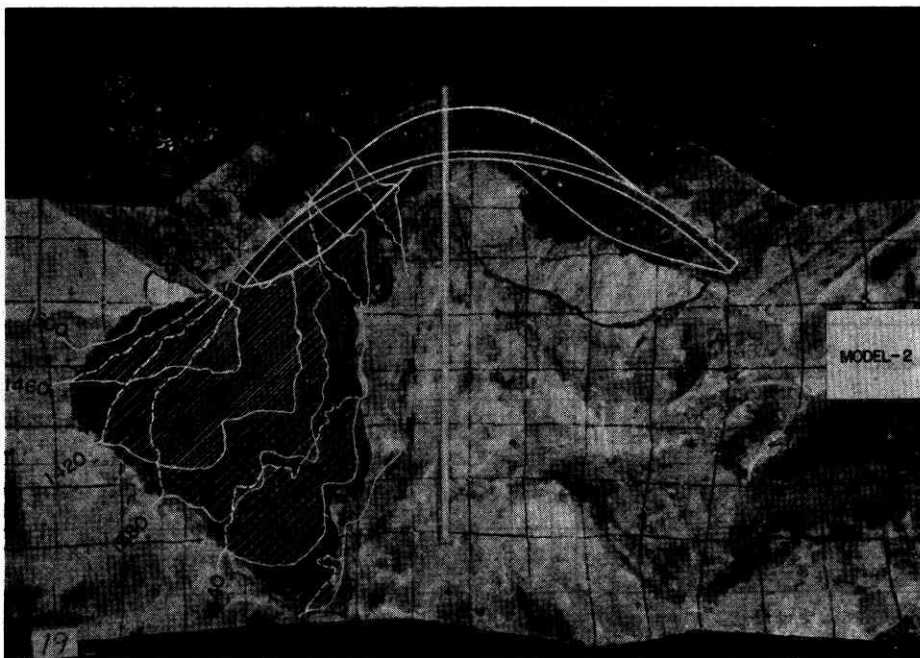
第4, 5および6図はそれぞれ模型—1, 2および3の破壊状況を示す。各模型ごとにその状況を略述すると,

1) 模型—1 ではダム本体が右岸のアバットメント沿

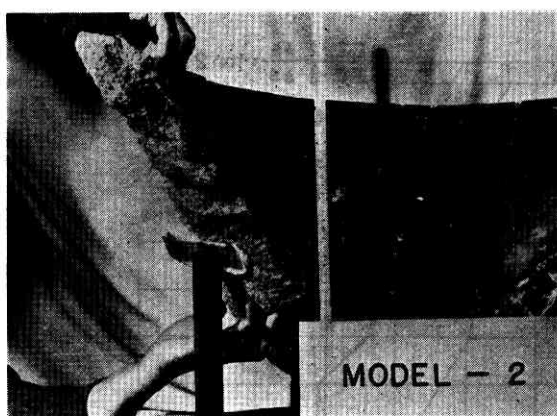
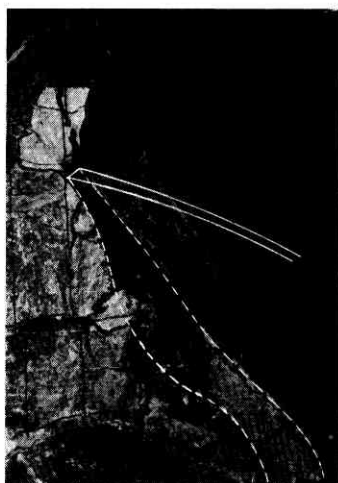
第2表 模型の ζ と対応する仮想実物

| MODEL | P_0 | γ' | ρ | λ | ζ | IMAGINARY PROTOTYPE | E | \uparrow | ζ | ϕ | ζ_0 | λ_0 | ζ_0 | λ_0 | ϕ |
|-------|-------|-----------|--------|-----------|---------|---------------------|-------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|--------------|
| 1 | 80 | 213 | 0.0047 | 500 | 2.4 | 1 | 1200 | 17 | 7 | 37 | <u>19</u> | <u>26</u> | — | — | 35~70 |
| 2 | 148 | 394 | 0.0025 | 500 | 1.3 | 2 | 650 | <u>9</u> | <u>4</u> | <u>37</u> | 43 | 28 | — | — | <u>20~40</u> |
| 3 | 96 | 255 | 0.0039 | 500 | 2.0 | 3 | 40000 | 60 | | | 66 | 28 | <u>24</u> | <u>18</u> | |

* 破壊した機構に該当する数値にアンダーラインを付す, E, σ, τ, q, P : kg/cm^2 , ϕ : 度



(a) 原地形および滑動面の標高線 (模型—2)



(b) 右岸側アバットメント基礎面の破壊 (模型-2)

第 5 図

いに上方へ滑った。

2) 模型-2 では、右岸アバットメントの基盤が圧砕を起こして第5図(b)のような楔形破壊面を生じ以後山は上方では鉛直に近い面で引き割られ、破壊面は右岸突出部を特徴づける下流の沢(カレ谷)まで及んでいる。

3) 模型-3 では、分離面沿いの滑りが起こり、凹凸のある滑り面の包絡面はほぼ模型-2の破壊面と一致する。

各模型の破壊時の γ' と第1表の諸量を(1)および(2)式に与えて、仮想実物の構成材料なり分離面の機械的性質を求めたのが第2表である。

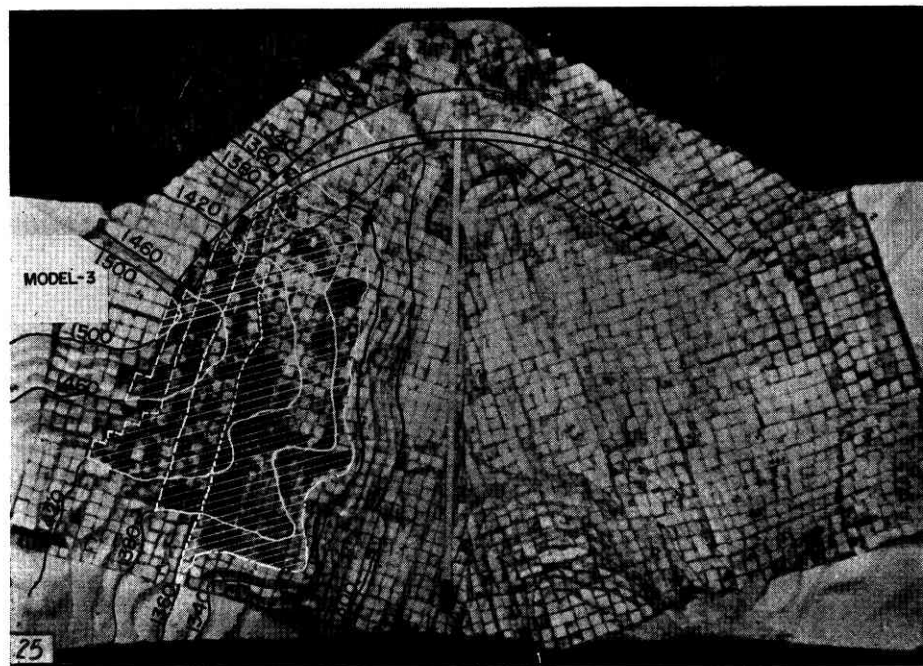
第7図は、設計静水圧による弾性的な応力について、右岸のアバットメントに対する上下流面の平均接線応力 τ ならびに平均垂直応力 σ の分布を示す。図示のように、

$\sum_{i=1}^n \tau_{it} \Delta S_i / \sum_{i=1}^n \sigma_{it} \Delta S_i = \tan 27^\circ$ で、その角度は P_1 の ϕ_0 にほぼ等しい。アバットメントの接触面における剪断強度が小さく (10 kg/cm^2) その摩擦係数が $\tan 26^\circ$ より条件の悪い場合には、もし自重を考慮しないと、右岸における滑動が問題になることは、上述の弾性的な平均応力によるチェックと一致する。

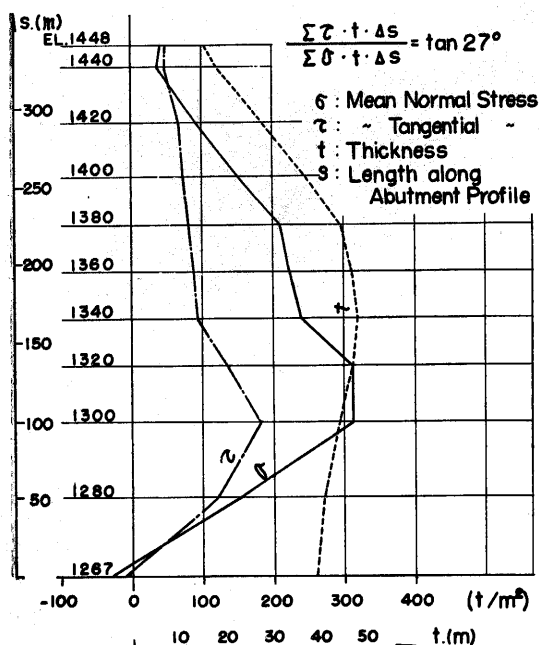
P_2 の破壊機構を支配するのは、基盤材料の支持力であるが、第8図にやはり設計静水圧による弾性的な応力から右岸のアバットメント沿いに上下流面主応力の平均の分布を与えると、最初圧砕を起こした $EL. 1300 \sim 1340 \text{ m}$ 当たりでは $30 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ となるが、 P_2 の支持力 $20 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$ とほぼ一致する。ただし、模型-2 の支持

力 q' は第9図のようにスラブの縁の限定された面積にその面内の分布力を加えて求めたもので、このことから基盤の支持力は半無限体としてよりも半無限板として評価の方が適当であることがわかる。アバットメントの直下流の地形は少なくとも半径方向よりは開いているので、特に地形の貧弱な場合には、このことがいえる。

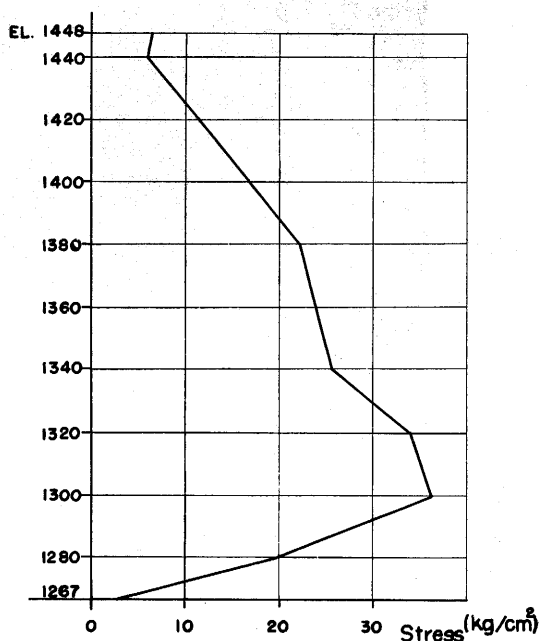
分離面沿いの滑りが問題になる P_2 のような積層構造では



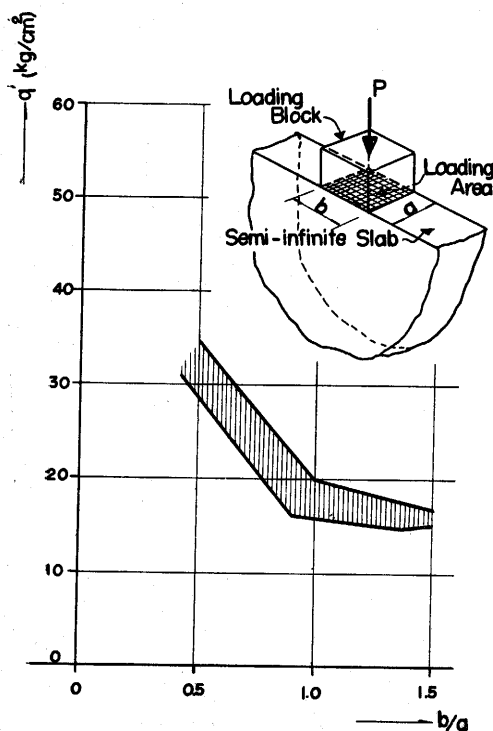
第6図 原地形および滑動面の標高線 (模型-3)



第7図 アバットメントそいの平均剪断応力、垂面応力の実物に換算した値および堤厚の変化



第8図 アバットメントにおける水圧による実物に換算された平均断面力(弾性応力)



第9図 半無限に対する支持力と $\frac{b}{a}$ との関係

分離面の方向を水平面内で45°回転して実験してみるとさらに滑りに対して不利な P_4 が得られるであろう。

筆者の研究は、基盤材料がおのの下部から上部へと弱くなる場合、ダム本体と岩盤の自重を考慮した場合等、 P_5 , P_6 ……を求める段階にきている。それらの総合的な考察によって黒部第四ダムの基盤処理の最終設計を行なうのが研究の目的である。

なお、本研究の協同研究者は山田直明、近藤信昭、鈴木庸二、渡辺威*の諸氏であることを付記する。

(1960. 2. 3)

* 関西電力株式会社、黒部川第四発電所建設事務所、土木設計課
なお、筆者は同上土木設計課の副長である。

参考文献

- 1) Manuel Rocha and J. Laginha Serafim; "RUPTURE STUDES ON ARCH DAMS BY MEANS OF MODELS" Part 1, Water Power, March 1959, Part 2, Water, Power, April 1959.
- 2) Guido Oberti; "SULLA VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE GLOBALE OISICUREZZA DI UNA STRUTTURA MEDIANTE ESPERIENZE SU MODELLI" "ISMES,, 1954-2.