

黒部ダムにおける基礎岩盤の挙動について

STUDIES ON THE BEHAVIOR OF THE ROCK FOUNDATION UNDER KUROBE DAM

横 田 潤*
By Jun YOKOTA

1. 序

近年、世界各地においてアーチ・ダムの事故が散発した。これらの事故原因の大部分は、ダム本体に代りてダムを支持している岩盤の破壊にあった。

一般にダムの規模が大きくなると、基礎岩盤の材料的評価、力学的取り扱いにおいて、小規模なダムに対しては許容される設計時における非現実性が大きな問題となることが多く、そのために生ずる設計上の問題として

① ダムを支持する基礎岩盤の広がりが大きくなるために、本邦においては特に地質の変化幅が大となり、断層、軟弱帯などの介入する機会が多くなること

② ダムが大きくなると、本体コンクリートおよび岩盤に生ずる応力も必然的に大となるために、特に基礎岩盤のマスとしての強度、変形性、基礎岩盤内の応力分布などに関するより正確な知識を必要とすること

③ 設計上の諸種の仮定と現実との相違、特に計算に用いる岩盤の変形特性のコンクリート本体の応力におよぼす影響が、応力が大きいくだけに問題となる可能性があることなどがあげられる。

基礎としてのロック・マスの力学的取り扱い、近年各方面で活発に論議されているが、まだ実用の域に達しているとはいいがたい。その最大の原因は、基礎岩盤の挙動に対する認識の不徹底さにあると考えられ、換言すると広範な領域を対象にした計測データの不足によるものと考えられる。したがって、大きな荷重変動を定期的を受け、その荷重の大きさも明らかにすることが可能なダムの基礎岩盤の現場計測は、今後ともこの分野の進歩にきわめて有益な手がかりを与えるといえよう。

本文は、洪水過程における黒部ダムとその基礎岩盤の挙動を測定解析し、その結果を現行の設計手法一半径方

向、接線方向およびねじり変位を調整して荷重をアーチと片持ばりに分割する方法 (Stress Analysis by Complete Adjustment, 以下 S.A.C.A. と略称) による計算結果と対比して、両者の差異を通じて基礎岩盤の挙動について考察したものである。実測値と計算値を対比すると、多くの場合差異を生ずるが、測定誤差以外の差異は計算上の諸種の仮定に由来するもので、その原因を究明することは、実情に即したダムの設計技術の発展にとって、きわめて有用であると考えられる。

以下に、基礎岩盤の変形、片持ばりのたわみおよびアーチ断面力に関する実測値と計算値の対応について述べ、その結果実測値の解釈に際して考慮しなければならない、岩盤の非弾性的な性質および年周期的な基礎岩盤の強制変位がダムにおよぼす影響などについて考察した。

2. 基礎岩盤の変形、片持ばりのたわみおよびアーチ断面力に関する実測値と計算値の対応

(1) 全般的な傾向および降雨による基礎岩盤の変位

基礎岩盤の変形は、図-1 に示す精密三角測量、岩盤内の下げ振り、ロック・デフォーメータおよびジオジメータによって得られる。このうち、精密三角測量、河床部の深部岩盤から立ち上がる倒立下げ振り $17P_0$ は絶対変位に近い値を、他は基準点に対する相対変位を与える。

図-2, 3 は、左右岸の各 2 標高における基礎岩盤内に、かなり広範囲にわたって設置したロック・デフォーメータによる計測記録の一部である。荷重が年周期的に変化するので、これに対応する変形量から岩盤の物性と岩盤内の力の流れを知ることができる。図の横軸は岩盤の伸縮で負号が圧縮変形を示し、縦軸には貯水位および

* 正会員 工博 関西電力(株)建設部長

LOCATION OF MEASURING APPARATUSES IN DOME, WING DAMS AND ROCK

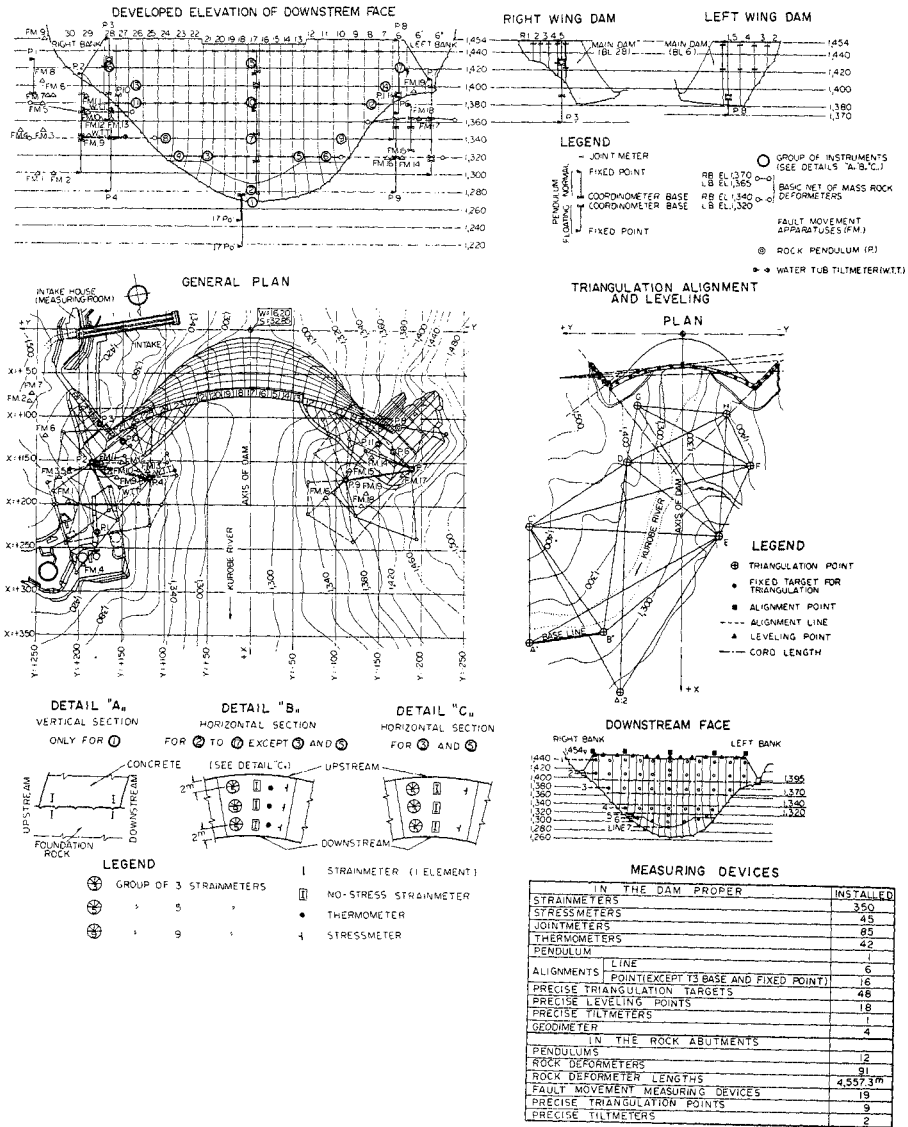


図-1 測定設備

ダム推力の計算値をとり、推力に関して等間隔に目盛をつけた。図示した変形量は各計器に付属する温度計によって、それぞれ温度補正を行った結果である。

これらのロック・デフォーメータは湛水途上の1964年から作動したので、得られた計測値は主としてEL. 1415 m以上の水位変動による応答であって、初期の変形の模様を逸した恨みはあるが、およそ60%のロック・デフォーメータは荷重の変動に対してかなり弾性的な対応を示し、残りの40%はある程度の残留変形を示した。特に、左岸における残留変形の大きい2-14, 6-3などでは、その荷重-変形曲線の形状からみて、計器設置以前の初期荷重による非弾性変形が、かなり大きかったことを

想像させる。現実のダム水位は後述の図-16に示すように、毎年最高水位を10 m程度上昇させているので、実測の残留変形には繰返し荷重による残留変形の増分に新たな荷重増加による残留変形の増分が加算されていると見るべきであるが、一般に前者は後者に比べて小さいので、本文ではもっぱら後者のみによるものとして取り扱った。

このように考えた場合、図-4に示すロック・デフォーメータによる水位-変形曲線の包絡線の勾配と、経験済みの荷重に対する直線の勾配の比は、岩盤内の応力がダムの推力に対して直線的に対応するものとするれば、 E_{r1}/E_{r2} に等しい。ここに、 E_{r1} は岩盤が初めて経験す

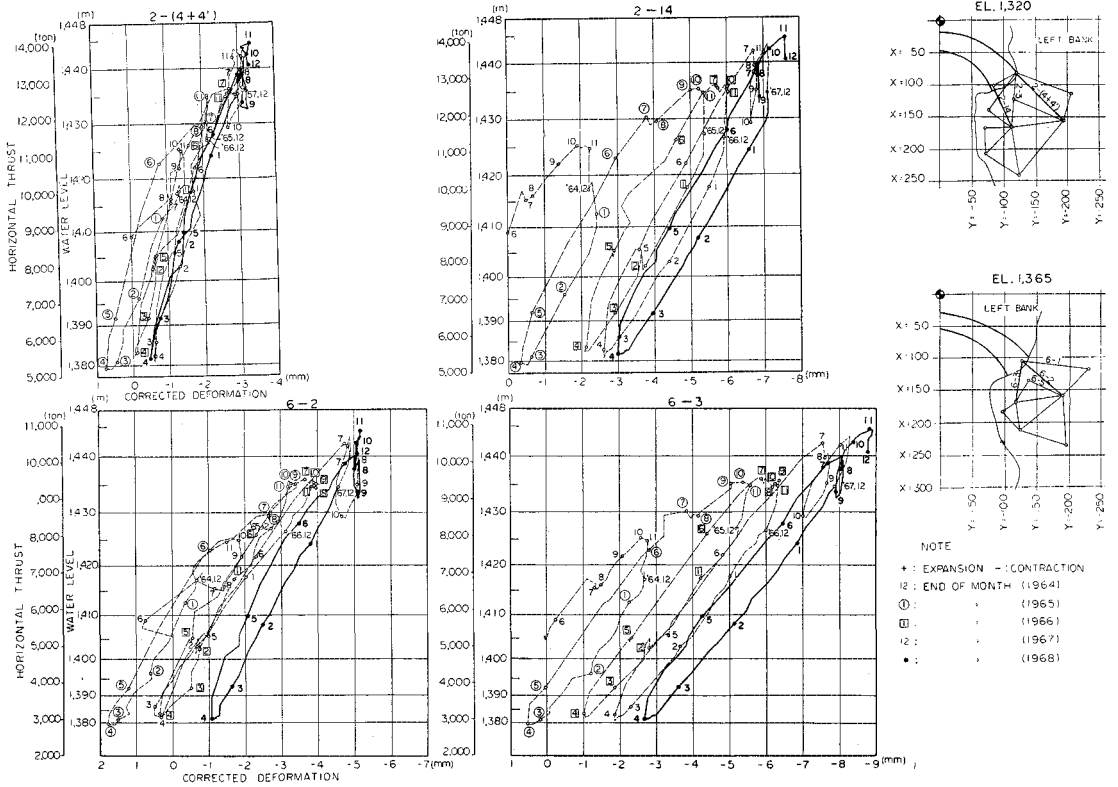


図-2 貯水位と基礎岩盤の変形—左岸

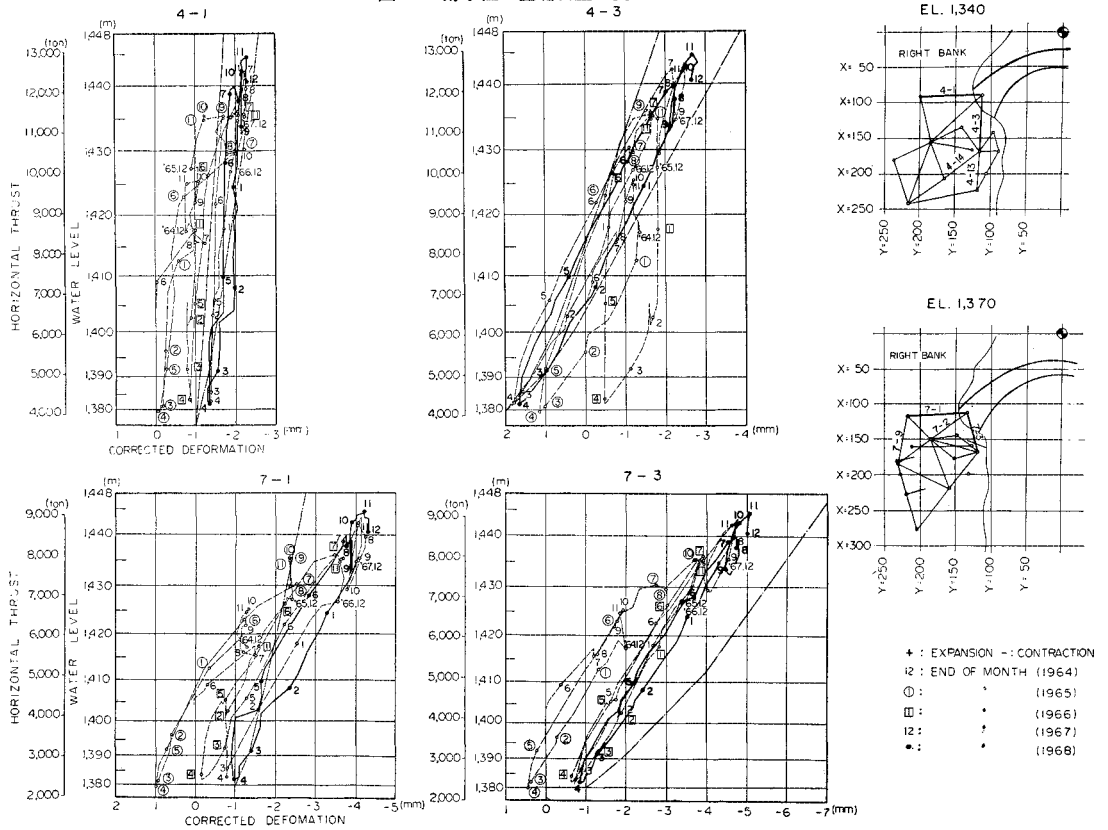


図-3 貯水位と基礎岩盤の変形—右岸

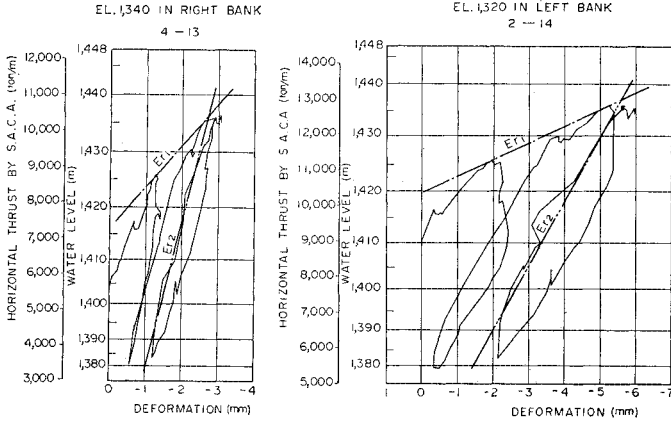


図-4 貯水位と軟岩部基礎岩盤の変形

表-1 基礎岩盤の E_{r1}/E_{r2}

| EL (m) | Right Bank | | | Left Bank | | |
|------------|------------|-----------------|------|------------|-----------------|------|
| | Instrument | E_{r1}/E_{r2} | Mean | Instrument | E_{r1}/E_{r2} | Mean |
| 1370, 1365 | 7-3 | 0.46 | 0.44 | 6-3 | 0.48 | 0.38 |
| | 7-9 | 0.42 | | 6-5 | 0.28 | |
| 1340, 1320 | 4-13 | 0.28 | 0.33 | 2-3 | 0.25 | 0.26 |
| | 4-14 | 0.37 | | 2-14 | 0.26 | |

る荷重に対する変形係数、 E_{r2} は経路済みの荷重に対する変形係数をいう。残留変形の特に大きいロック・デフォーメータについて、この比を求めてみると表-1 のごとくなり、ロック・デフォーメータの配置されている領域の40%程度の部分の岩盤では、非弾性変形量はかなり大きく、いわゆる処女荷重による変形量のうち65%程度は、非回復性の変形であることを示している。これに対して、大型岩盤試験^{(5)-(7), (13)}では30~62%、平均46%程度であった。このような E_r の経路的变化は、ロック・マスの材料的性質の取り扱い方に1つの指針を与える。後述のS.A.C.A.による計算では、このような岩盤の特性を弾性波試験、ジャッキ試験、水室試験および大型岩盤試験の結果から図-5に示すように定めた。

また、ダム着岩部付近のロック・デフォーメータが示

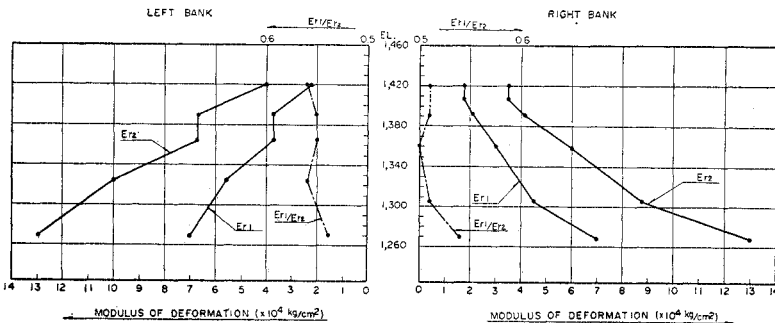


図-5 計算に用いた岩盤の変形係数

す全般的な傾向として、水位上昇に対して7-1, 4-1などの河に直角方向のものにも圧縮変形がみられ、特に右岸 EL. 1370 mでは7-1の圧縮変形量が7-2や7-3と同程度であり、アーチ推力は計算値に比べて(4)に述べるごとく、かなり山側に指向していることを示している。この理由については、後述の片持ばりのたわみおよびアーチ断面力における実測値と計算値との差の原因となる同一の現象、すなわち計算に算入されていない降雨期に生ずる基礎岩盤の河側へのはらみだしによって、はらみだしに対するダムの反力分だけアーチ推力が山側に向けられたものと考えられる。

降雨期に生ずる岩盤の張り出し現象は、各種の測定記録に現われている。この現象のダムへの影響については後述するが、直接的な測定値としては、図-1に示す右岸下流における倒立下げ振りP1および精密水管傾斜計W.T.T. (EL. 1370 m, 測線長66 m)に認められ、これらの測定値は図-6, 7に示すようにドレーン流出量と相関がある。このドレーン流出量には、図-9に示すように降雨期を含み、かつ貯水位および気温の変化がさほど大きくない1964年6月30日~8月5日の値を用いた。したがって、基礎岩盤には上述したようにドレーン流出量と関連する変位が明らかに認められることになる。また図-9には、降水量、ドレーン流出量、ピエゾメトリック水頭、大町トンネル流出量、日平均気温、貯水位などの1964年における変化を示す。一般にドレーン流出量の変化は、ピエゾメトリック水頭(地下水位)の変動に対応することが知られており、図-9にも両者の相関が認められる。しかしピエゾメトリック水頭の変化は、付近に存在する多数のドレーン孔の影響を受けていると考えられるので、上述の岩盤変位との相関に際しては、より広い領域の地下水位の変化を表わすドレーン流出量をとりあげた。

このような岩盤の張り出し現象によるアーチ弦長の変

化は、図-10に示すジオジメータの測定によると、ほぼ同一の貯水位において13 mm程度である。一般に空隙をもつ材料に水が浸透した場合、間隙水圧および材料の種類によっては材料自体の膨潤によって、全体が膨張する現象のあることが知られている。地山に降雨があると、地下に供給される水によって地下水位が上昇すると同時に

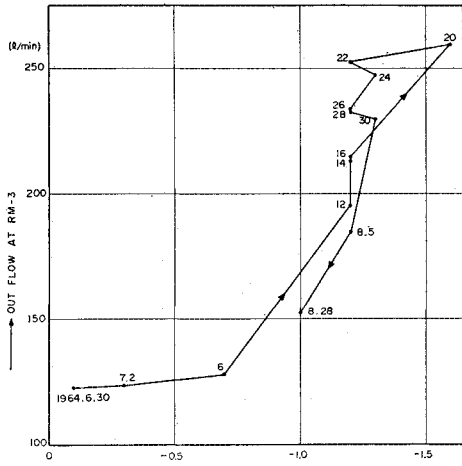


図-6 RM-3 におけるドレーン流出流と倒立下げ振り P₁ による基礎岩盤の変位

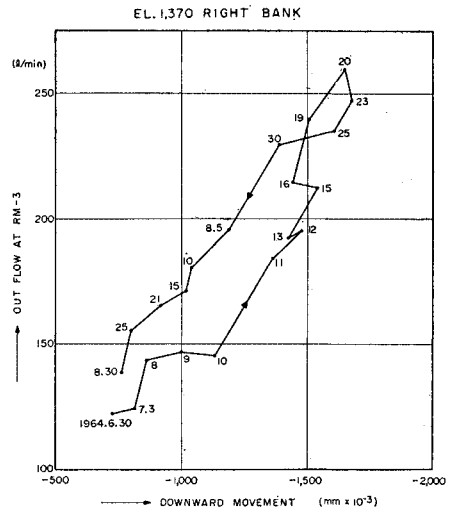


図-7 RM-3 におけるドレーン流出量と水管傾斜計による基礎岩盤の変位

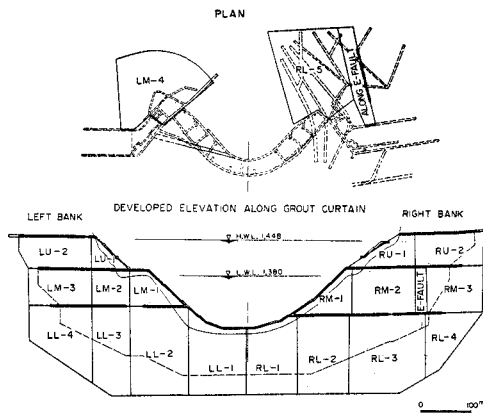


図-8 ドレーン孔およびピエゾメーター孔の配置区分

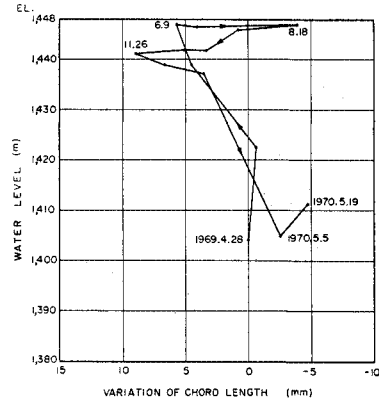


図-10 貯水位とジオジメータによるアーチ弦長の変化の関係

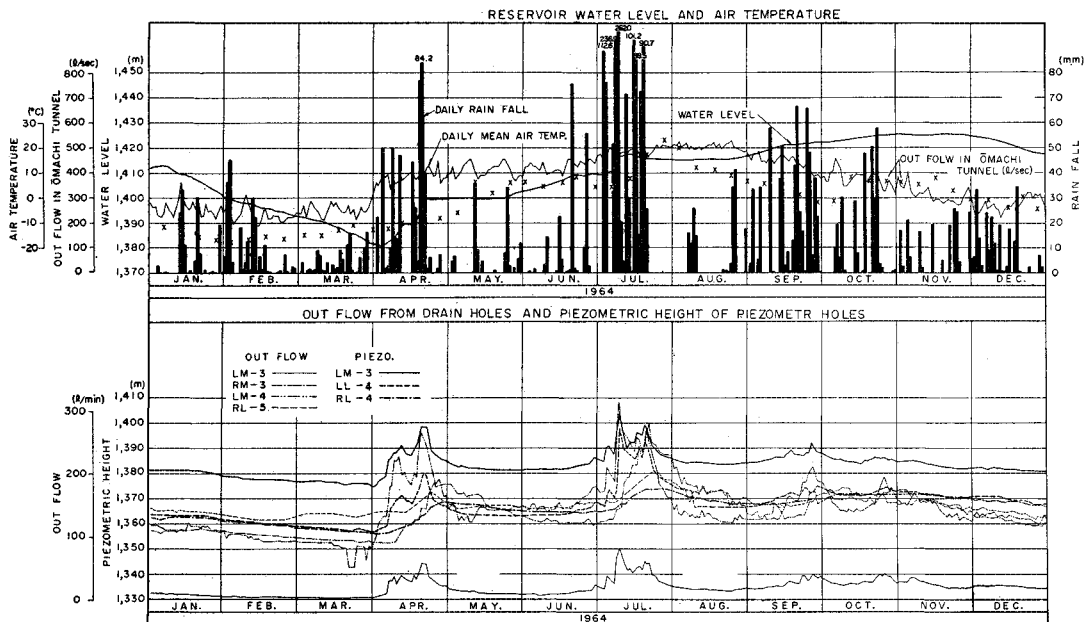


図-9 降水量, 日平均気温, 貯水位, 大町トンネル流出量, ドレーン流出量およびピエゾメトリック水頭の変化

不飽和帯の含水量も増加するので、間隙水圧の上昇による有効応力の減少と岩盤の間に介在する粘土物質の吸水による体積膨張によって、地山が膨張するのは十分首肯できる現象である。この現象がダムの挙動に与える影響は、後述するように無視できないものがあり、測定値が計算値から年周期的な変化をもって逸脱することから理解される。

図-11 は、岩盤内に設置した下げ振りによって計測した基礎岩盤の水平変位を、河に平行な X 方向と河に直角な Y 方向成分について、それぞれ水位変化との対応で示したものの一例である。図中の数字は月を、変位は下流向きおよび右岸向きをそれぞれ正とした。岩盤変位の X 成分は、全体としてかなり可逆的な傾向を示している。しかしながら、たとえば P-7 では時間の経過につれて測点が徐々に上流側に移行している。この原因は、おそらく岩盤の局所的な変形性の差異に加えて、上部標高ではアバットメントの安定性の向上を計る目的で、ドレーン孔によって強制的に地下水位を EL. 1310 m 付近まで低下させているのに対して、固定点とみなしている下部標高は地下水面下にあるので飽和状態にあり、しかも下部標高ほど荷重継続時間が長いために、固定点自体が下流側へ移動することによるものではないかと推測される。固定点がボーリング技術上十分深くとれないために、同様のことが他の下げ振りについても想定

され、したがって岩盤の絶対変位量は、上述の下げ振りによる実測値をかなり上回るものと推測される。Y 方向変位で目立つのは、貯水位の上昇時と下降時における同一水位に対する変位が異なる点である。すなわち、水位上昇時は降雨期に相当し、下降時は降雪期に相当するので、その差は上述の降雨期における山の河側へのはらみだしによるものと考えられ、その量は 1~2 mm に相当する。この周期的な山の動きは、後述のように片持ばりのたわみおよびアーチ断面力に大きく影響し、また山の地下水位の変動とも対応している。

岩盤の変位は、毎年荷重が増加しているので増大しているが、その増分には岩盤のクリープ、すなわち経時的な変化も含まれている。経時的な基礎岩盤の変位が最も大きな影響を与えるのは、アーチの弦張増加に対してであり、大型岩盤試験の結果^{5)~7), 13)}によると破壊荷重に比べてかなり低い荷重の繰り返しに対しても、変形が収束するためには図-12のごとく数百回を要することが知られている。その間の弦長増加によるアーチ応力の増大は、当然のことながら許容値以内に収束する必要があり、安全性の確認上きわめて重要である。黒部ダムの場合、ロック・デフォーメータ・ネットおよび下げ振りによって計測しているが、図-13に示すごとく弦長増加はおおむね収束しているものとみなし得る。

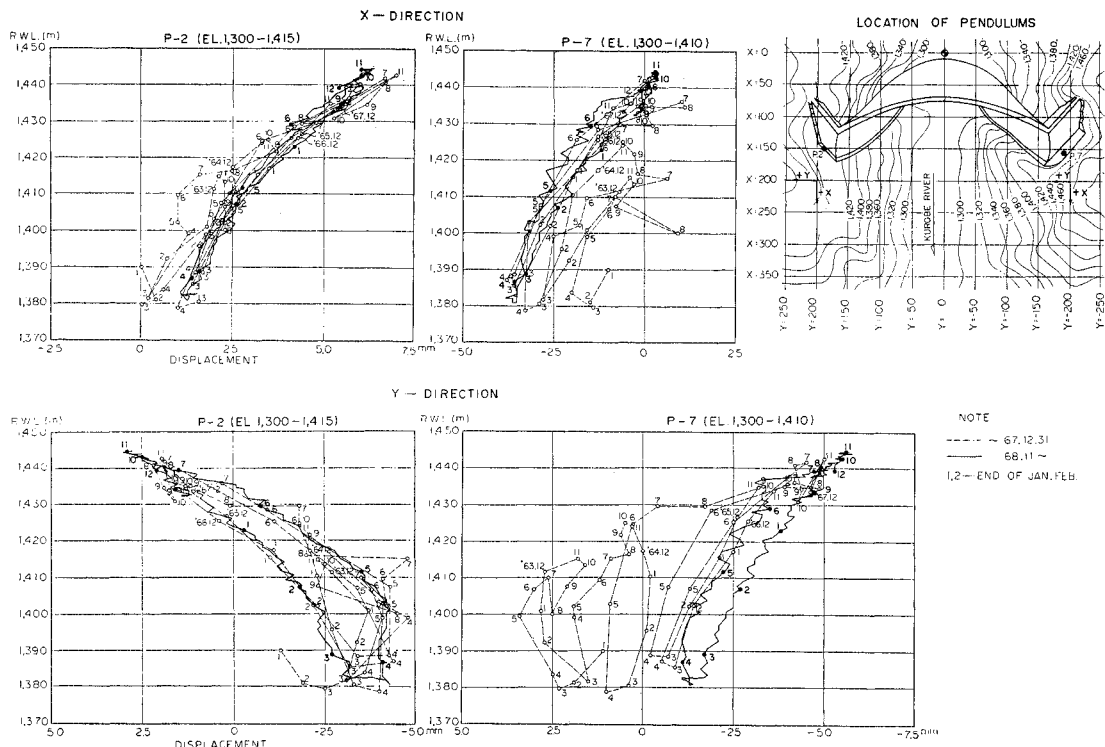


図-11 貯水位と倒立下げ振りによる水平変位

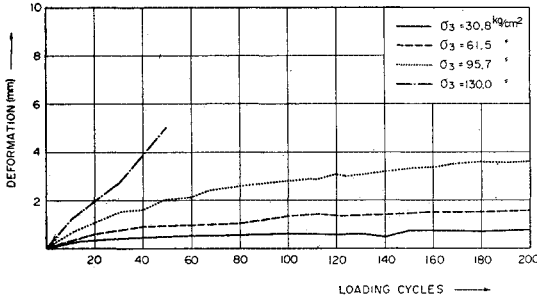


図-12 載荷回数と変形との関係

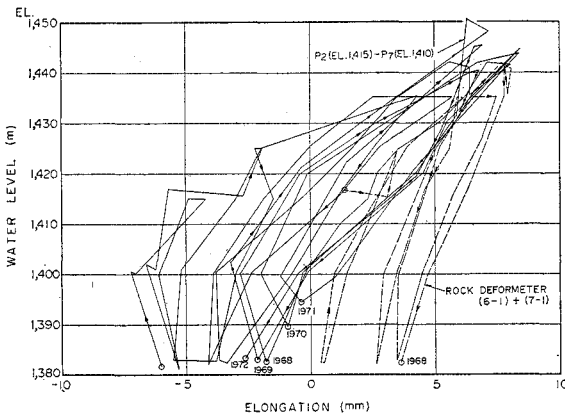


図-13 貯水位とアーチ弦長の変化の関係

(2) 片持り底面の変位に関する実測値と計算値の対応

中央片持り底面の水平変位は、ダムの下流面 EL. 1290 m の標的に対する精密三角測量と、岩盤内 EL. 1218 m を基準点とする倒立下げ振り17 P₀によって得られる。この倒立下げ振りは1965年から作動を開始した。

図-14 は、半径方向変位の実測値と計算値 (S.A.C.A.) を対比したものである。三角測量および S.A.C.A. における全変位量約 30 mm はかなりよい一致を示し、また下げ振りの記録もその勾配に着目すると、三角測量および S.A.C.A. の示すところとよく符合している。毎年新たな水位上昇、すなわち新たな荷重領域にはいるための非弾性変形量を前述の E_{r1} および E_{r2} を用いて計算すると、1961 年からの増分は図示するように低水位 EL. 1380 m 以上に対して約 7 mm となる。低水位の時期はちょうど積雪期に当たり、三角測量が不可能なために、測量から新荷重による残留変形量を求めることができなかったが、下げ振りによる残留変形量と S.A.C.A. のそれとは表-2 のようになりによく一致した。

図-15 は、中央片持り底面における下げ振りによる実測変位量と、実測ひずみから算出した変位量および

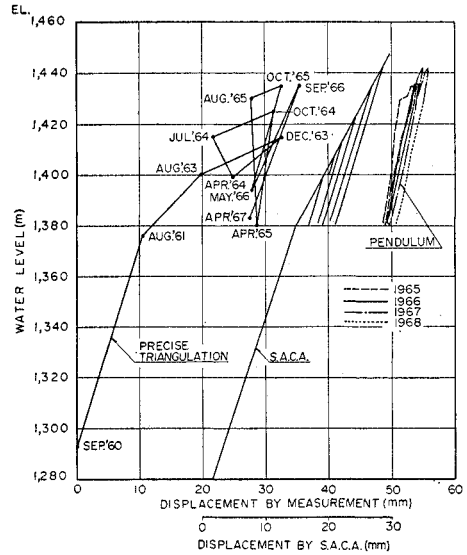


図-14 中央片持り底面の半径方向変位

表-2 実測および計算による残留変形

| Period | By Measurement | By Calculation |
|-----------|----------------|----------------|
| 1965~1966 | 0.6 mm | .8 mm |
| 1965~1968 | 2.8 mm | 2.4 mm |

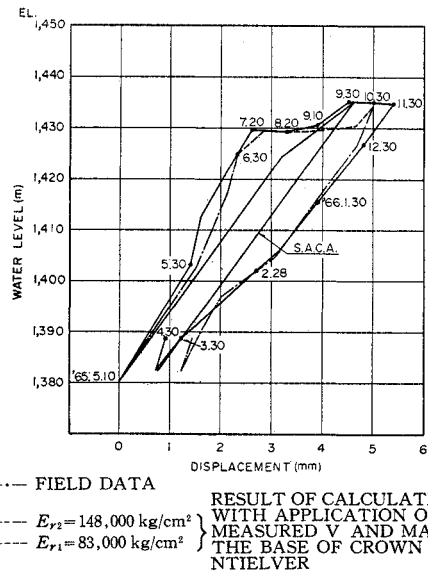


図-15 中央片持り底面における下げ振りと計算による変位の比較

S.A.C.A. による変位量をそれぞれ比較したものである。この場合実測ひずみによるものは、EL. 1281 m におけるダムコンクリート内のひずみ計グループによる計測値から、岩盤に伝わるせん断力と曲げモーメントを求めて、F. Vogt の式によって算出した。図示するように、実測変位量と実測ひずみから算出した変位量とはかなりよい一致を示した。比較した期間は1965年5月から

1966年4月までで、この間 EL. 1425 m 以上の水位は新荷重である。実測ひずみから算出した変位量は、岩盤の変形係数を種々に変えて試算したところ、W.L. 1425 m 以下の経験荷重に対して $E_{r_2}=148\,000\text{ kg/cm}^2$ 、W.L. 1425 m 以上の処女荷重に対して $E_{r_1}=83\,000\text{ kg/cm}^2$ を与えたときに、実測変位量と最も接近した。上述の変形係数は前出の 図-5 に示す河床部 (EL. 1270 m) における値とほぼ同等であり、両者の比 $E_{r_1}/E_{r_2}=0.56$ も同図の値とほぼ一致している。

次に、図-15 における S.A.C.A. による変位量と実測変位量を比較すると、残留変形量は一致しているが、変位の履歴に大きな差異があり、実測変位には水位変動以外の原因によって、片持ばりの底面に季節的なせん断力の変化が現われていることがわかる。7~11月に設定した2回の水位一定期間中に生じた変位と実測値に現われたせん断力の増加は、時期的に温度の影響が連想されるが、この期間における実測温度変化によるせん断力の変化を計算すると、きわめてわずかで無視できる量であった。すなわち、水位が EL. 1430 m の一定期間中に温度変化によって生ずるせん断力の変化は、上流向きにダム単位幅当り 11 t/m であり、また水位が EL. 1435 m の一定期間中には下流向きに 16 t/m で、いずれも実測ひずみから求めたせん断力の変化 750 t/m に比べてきわめてわずかである。また一定水位期間中の変形の進行は、ほぼそれと見合う実測ひずみから求まるせん断力と曲げモーメントの増加に裏付けされることおよび図-15 において最低水位時に残留ひずみの実測値と計算値が一致することから、クリープの進行でもない。したがって、この水圧荷重や温度荷重に無関係な片持ばり底面の半径方向せん断力および変位の変化は、他の諸測定値からも裏付けされるように、季節的な地下水の変動にともなう基礎岩盤の年周期的な変位による変化であると考えざるを得ない。

当ダム・サイトでは、12~3月の間は降雪期に当たり地下水の補給が絶たれるので、地下水位は3月頃に最低となり、また降雨期の6~7月中旬に最高となる。この現象は、図-9 に示すダム・サイト両岸部のドレーン孔の湧水量、および大町トンネルの湧水量の変化から歴然としている。したがって、図-15 の7月20日から9月10日に至る水位一定期間は、地下水位の下降期に相当するので、間隙水圧の減少に伴う基礎岩盤の山側への後退によって、ダム

は弦長増加を強制される時期に相当する。3. に述べる基礎岩盤に強制変位を与えた計算結果によると、アーチ・アバットメントの1 mm の後退 (2 mm の弦長増加) は、中央片持ばり底面に 192 t/m の下流向きのせん断力を与える。上述の水位一定期間 (7月20日~9月10日) に増加した実測ひずみから求まるせん断力は 470 t/m で、この力がアバットメントの後退に由来するものとする、その後退量は $470\text{ t/m}/192\text{ t/m/mm}=2.4\text{ mm}$ となる。ジオジメータによる谷幅の年間変動量は、13 mm 程度 (アバットメントの後退量にして $13\text{ mm}/2=6.5\text{ mm}$ 程度) であるため、上述の水位一定期間中にこの現象によって 2.4 mm すなわち年間変動量の 37% に相当するアバットメントの強制変位を生じ、その結果片持ばり底面のせん断力と変位に、水位と温度に無関係な変化をきたしたものと考えられる。

(3) 片持ばりのたわみに関する実測値と計算値の対応

中央片持ばりのたわみには、ダムおよび基礎の挙動が総合して反映されるので、ダム計測の中で最も基本的なものとされている。ダムのたわみに関する因子はきわめて多種にわたり、荷重としては静水圧荷重、温度変化のほかにも上述したような基礎岩盤に生ずる季節的な強制変位があり、一方材料の物理的性質としては、材令によって変化するコンクリートの弾性係数、クリープ特性、熱に関する諸定数、また場所と荷重履歴によって変化する岩盤の変形係数などがあって、ダムのたわみを支配する要因はかなり複雑である。

中央片持ばりのたわみは、下げ振り、視準測量および精密三角測量によって計測される。下げ振りによる計測は基準点とする最深部の動きが問題となるが、ダムの基礎から 30 m および 60 m 下のボーリング孔底にそれぞ

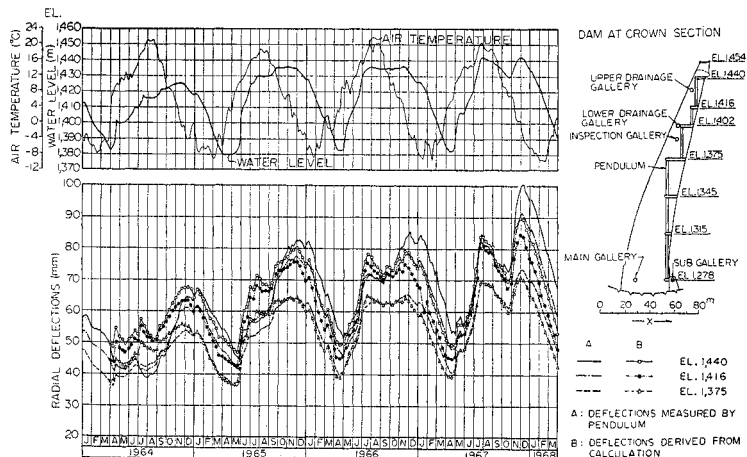


図-16 半径方向たわみの実測値と計算値の比較

れ基準点を設けて以後は、絶対変位に近いものが得られており、計測方法が他の方法に比べて単純であるだけに信頼度が高い。図-16は、半径方向たわみの実測値とS.A.C.A.による計算値を、EL. 1440, 1416 および1375 mの3標高で比較したものである。この場合両者のたわみは、いずれも EL. 1278 m に対する相対量であり、また計算値の始点は比較の便宜上 1964年3月末の実測値に合わせた。計算においては、岩盤の変形係数を荷重履歴に応じて前出の図-5に示す E_{r1} および E_{r2} とし、コンクリートの弾性係数はクリープ・テストの結果を勘案して $300\,000\text{ kg/cm}^2$ とした。温度荷重によるたわみ量を算出するのに必要な温度分布は、上下流面の実測温度変化を用いて、厚さ1 m ごとに理論計算によって求めた。またコンクリートの熱膨張係数は、試験室における測定値およびダム内に埋設されている無応力ひずみ計から算出される値に基づいて 7×10^{-6} とした。一方実測値には、上述したように EL. 1278 m 以下のコンクリートと基礎岩盤の変形を含まないが、その量は基準点を60 m 下げて EL. 1218 m とした場合に、最高水位時に6 mm 程度の増加に止まる。

図-16から指摘されるように、実測値と計算値の間にはかなり大きな差がみられ、この差は季節によって著しく変動する。図-17は、この間の関係を明らかにするために、EL. 1278~1440 m の間の実測たわみから計算による温度たわみ、温度たわみ+静水圧たわみおよび温度たわみ+静水圧たわみ+クリープによる影響をそれぞれ差し引いたものである。図中の曲線③は、実測値

から計算による温度たわみ+静水圧たわみを差し引いたものであり、ダムなたわみが静水圧荷重と温度荷重のみによるものであれば、曲線③は水平な直線であればならないが、なお変動する要素が認められる。

計算値は、上述したように基礎岩盤の弾性係数を荷重履歴に応じて E_{r1} および E_{r2} として、一応岩盤の非弾性変形量を加味してはいるが、曲線③にはこの方法によっては被えない岩盤とコンクリートのクリープによる経年的なたわみの増加も含まれている。その量は曲線③上で各年の同時点を結ぶ曲線によって得られるが、地下水位の変動の影響を避けるために、降雪期に当たる11, 12, 1および2月の各月末を選んで毎年のクリープによるたわみの増加量を求め、その平均値を用いて曲線③からクリープの影響を除去したのが曲線④である。

曲線④からみられるように、1964年3月末を基準とした場合に、各年とも7月にその差が最大値を示し、定期的に高温時に当たるので、コンクリートの熱膨張係数の過少評価による差のごとき感を抱かせるが、コンクリート温度のピークは9~10月であることから、その理由にはできない。図-18には1968年から開始したジオメータによるコード長の変化をも示したが、曲線④との相関が明らかである。

図-19は、上述の中央片持ばりの実測たわみから計算による温度たわみを差し引いたものと、温度荷重を考慮しないS.A.C.A.による計算結果を貯水位との対応で比較したものである。図にみられるように、実測値の水位たわみ曲線の勾配はほぼS.A.C.A.のそれと類似してい

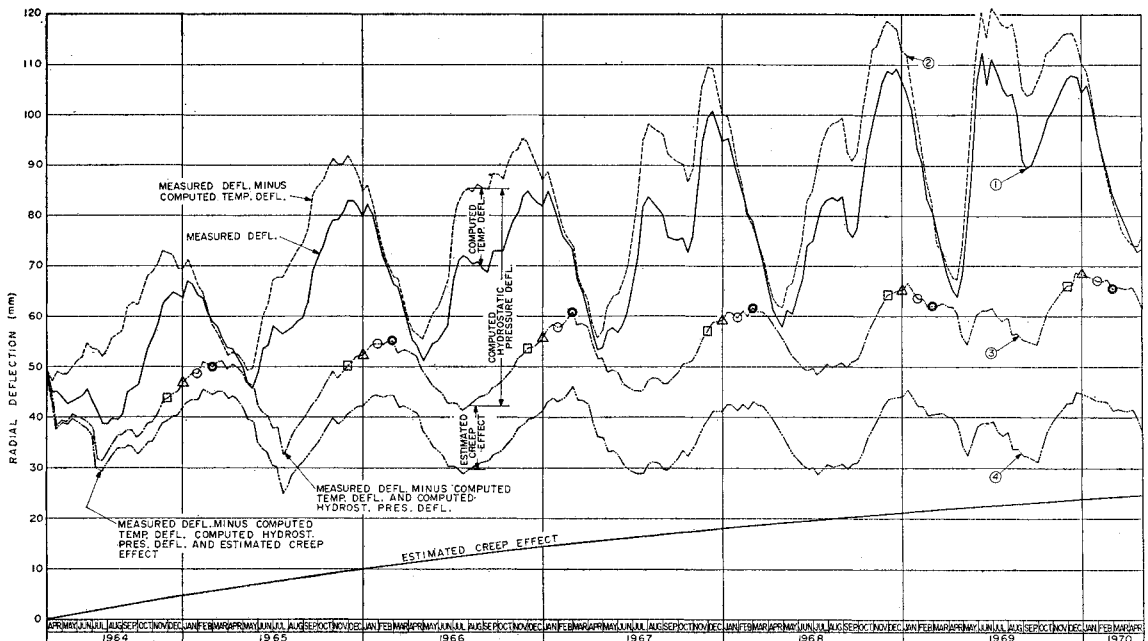


図-17 半径方向たわみ (EL. 1440~1278 m) の測定値と計算値の差異

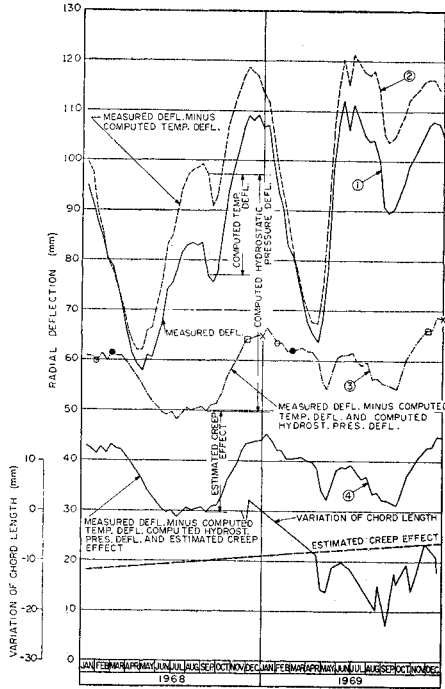


図-18 半径方向たわみ (EL. 1440~1278 m) とアーチ弦長の変化の関係

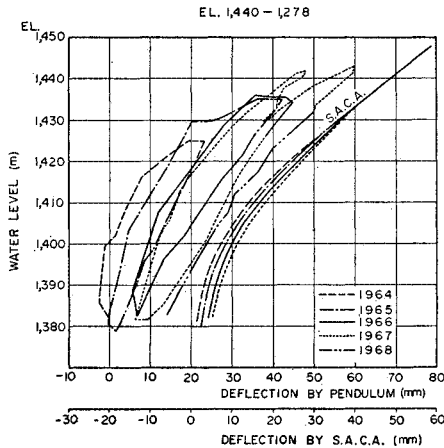


図-19 水圧荷重によるダムたわみ

るが、毎年の最低水位時に特に明らかになる非弾性変形量の経年的な増加は実測値のほうが大であり、また実測値の履歴は温度の影響を除いても、水位の上昇時と下降時における同一水位に対するたわみ量が異なり、前述の岩盤内の下げ振りの Y 方向変位と同様に、ダムたわみは季節的変動をもつことを示している。

この水圧荷重および温度荷重やクリープに無関係な片持ばりのたわみ量を、1967年1月23日 (W.L. 1420.1 m) と同年6月26日 (W.L. 1420.4 m) の2時点について求めてみると、表-3に示すようになる。すなわち、

表-3 片持ばりのたわみ
(1964年3月末を基準にした時の)
(EL. 1440 m~1278 m 間の相対量)

| Date | Measured Deflection | Deflection due to Hydrostatic Press. | Deflection due to Temp. | Creep | Residual |
|---------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------------|---------|-----------|
| | A | B | C | D | A-(B+C+D) |
| 23, Jan., '67 | 33.5 mm | 24.1 mm | -2.6 mm | 10.7 mm | 1.3 mm |
| 26, June, '67 | 12.5 mm | 24.4 mm | -10.2 mm | 11.9 mm | -13.6 mm |

前者は降雪期に相当し後者は降雨期に相当するので、降雨期には降雪期に比して山の張り出しのために、片持ばりが約 15 mm 上流側へ押しもどされていることを示している。3. に述べる基礎岩盤に強制変位を与えた計算結果によると、両岸にそれぞれ 1 mm の張り出しがあると、中央片持ばり (EL. 1440~1278 m 間) は上流側へ 2.36 mm たわむことになる。したがって、表-3 に示すたわみ量の差が 14.9 mm であることから、片側アバットメントの張り出し量は $14.9/2.36=6.3$ mm となる。この量は、同一水位におけるジオジメータによる谷幅の年間最大変化量 13 mm の 1/2 とほぼ一致するので、ここでも片持ばりのたわみ量に関する実測値と計算値の差異を、岩盤内の間隙水圧の季節的変動によるアバットメントの強制変位によって説明することができる。

(4) アーチの断面力に関する実測値と計算値の対応

ダム内のひずみ変化は、図-1 に示すひずみ計グループによって得られる。すなわち、ひずみ計をダムの厚みの中央に9成分、上下流面からそれぞれ 2 m 内側に5成分ずつ設置し、設置箇所にはさらに無応力ひずみ計、温度計および応力計を1個ずつ付属させた。これらのひずみ計から応力を求める際に必要なコンクリートの弾性係数は、クリープ・テストの結果を勘案して 300 000 kg/cm² とした。また一般によく知られているように、コンクリートがほぼ弾性的な挙動を示す以前の応力をひずみ計による計測値から推定することは困難であることから、本文ではコンクリートがほぼ弾性的とみなされる時期以降の応力変化について考察することにした。

a) アーチのアバットメントにおける分力と合力

図-20 は、1964年3月末 (W.L. 1380 m) を基準点にとって、実測と S.A.C.A. 計算によるアーチ推力の着岩面に垂直な成分 H の変化を比較したものである。図にみられるように、全般的な傾向として EL. 1400 および 1320 m では実測値より計算値のほうが大きく、逆に EL. 1380 および 1340 m の中間標高では実測値の方が大きい。この両者間の差は、水位の上昇につれて増大する以外に、季節的な変化があり夏から秋にかけて最大となり、差の最大値は左岸 EL. 1320 m におけるアーチの単位幅当たり 11 月末で 6000 t にもおよぶ。図にお

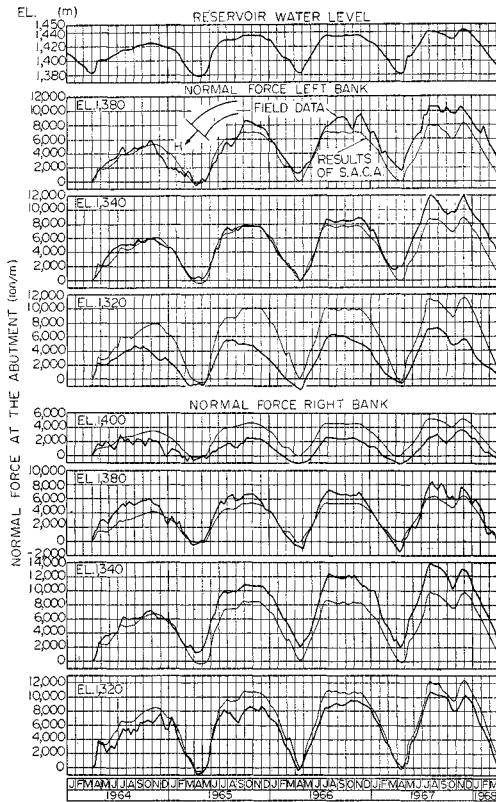


図-20 アバットメントにおける鉛直力

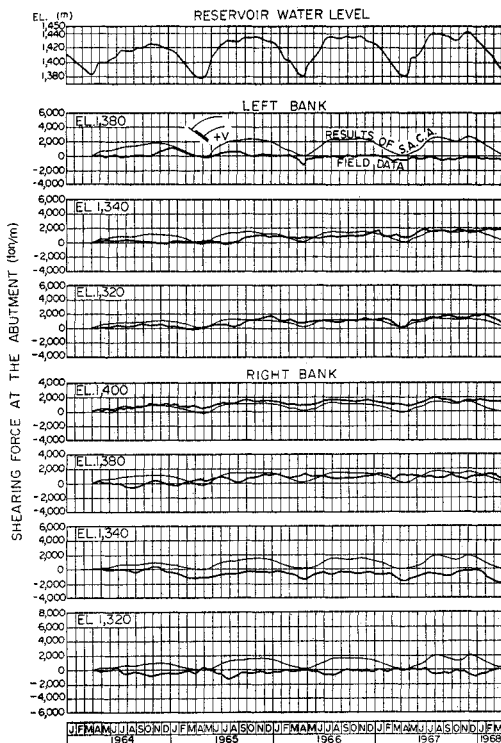


図-21 アバットメントにおけるせん断力

いて3月末を基準点とした理由は、貯水位が毎年最低であり、コンクリートの平均温度が最も低く、さらに融雪の開始前で山岳内は最も乾燥した状態にあることから、1年周期で変動する貯水位、コンクリート温度、地下水位あるいは岩盤の含水比などのような、ダムと基礎の挙動に影響を与える要因がすべてこの時期を基点として変動するので、アーチの断面力もこの時期からの変化量でとらえるのが適切であると考えられるからである。

アバットメントにおけるせん断力 (V 力) について、 H 力と同様に実測値と S.A.C.A. による計算値を比較して図-21 に示す。実測された V 力は全般的に変動が小さく、S.A.C.A. のような貯水位の変化にともなう規則的な変動がみられるのは、左岸 EL. 1320 m と右岸 EL. 1400 および 1340 m のみである。このことは、アーチ推力は水位変化にほとんど関係なく、おおむね着岸面に直角に近い角度で加わることにほかならない。

図-22 に、右岸 EL. 1320, 1340, 1380, 1400 m と左岸 EL. 1320, 1340, 1380 m におけるアバットメントの合力を示す。この図は 1967 年 4 月 10 日 (W.L. 1382 m) を基準にして、6 月 22 日 (W.L. 1418 m), 7 月 10 日 (W.L. 1432 m), 7 月 22 日 (W.L. 1442 m) における合力の増分を、それぞれベクトル表示したものである。図からアバットメントにおける合力は、実測値の方が山側に指向し、特に7月に著しいことがわかる。

実測値と S.A.C.A. による計算値の間に見出される H 力および V 力の上述の差は、アバットメントにおける水平方向の合力の大きさや方向の差異に基づくものであるため、この合力を河に平行な力と直角な力に分けて、再度実測値と S.A.C.A. による計算値を比較してみた。その結果、河に平行な分力 (P 力) についてはかなり良好な一致が見られたが、河に直角な分力 (Q 力) については後述するような差が認められた。

b) アーチ推力の河に直角な分力

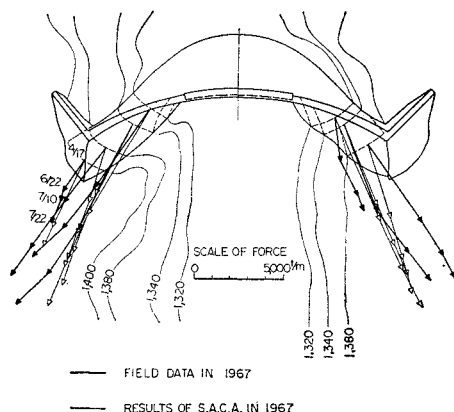


図-22 アバットメントにおける水平力

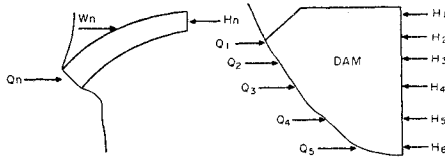


図-23 河に直角方向の力のつり合い

アーチ推力の河に直角な分力 (Q 力) について、まず実測値の精度を検証するために、図-23 において

H : アーチ・クラウンにおける垂直力の実測値または計算値

Q : アバットメントにおける河に直角な分力の実測値または計算値

W : 河に直角な方向の水圧の分力

とすれば、 $\Sigma H = \Sigma Q + \Sigma W$ が成立しなければならない。一例として、右岸における 1966 年 3 月末から 7 月末までの間の増分について上記の関係を求めてみると、表-4 に示すごとく実測値の信頼度はかなり高いといえる。

図-24 は、 ΣQ と貯水位の関係を示したもので、縦

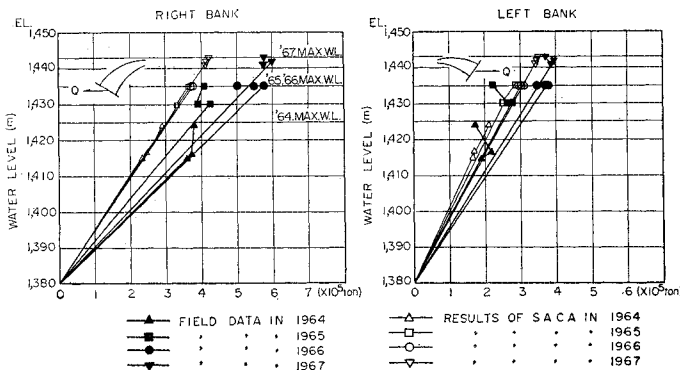


図-24 水位変化に伴う Q 力の集計

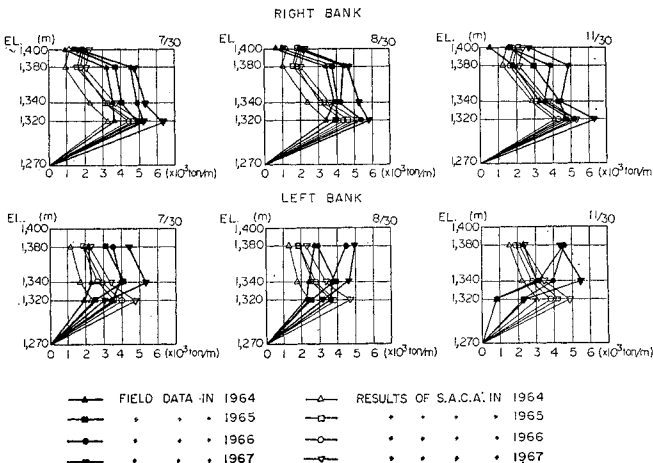


図-25 アバットメント沿いの Q 力の分布

表-4

| | Field measured | Calculated |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ΣH | 849 680 t | 725 215 t |
| $\Sigma Q + \Sigma W$ | 866 609 t | 704 247 t |
| $\Sigma H - (\Sigma Q + \Sigma W)$ | -16 929 t (2% approx.) | 20 968 t (3% approx.) |

軸は貯水位、横軸には 1964~1967 年のそれぞれ 3 月末からその年の 7 月末、8 月末および 11 月末に至る間の Q 力の増分をとった。ここで、最高水位に当たる 11 月末のほかに夏季をとり上げた理由は、前述のようにアーチ推力の実測値と計算値の差が夏季に大きいことが、 ΣQ にどのように現われるかを検討するためである。図に示すように、全体的な傾向としては、実測値のほうが計算による Q 力よりも大きく冬季における減少が目立つ。

図-25 は各年の 3 月末を基準にして、その年の夏季および最高水位の時期における Q 力の増分の鉛直方向の分布を示したものである。図から両岸ともに、実測値と計算値の差は夏季における EL. 1380 m 付近に著しく現われており、山の張り出し現象が中間標高の反力に大きな影響を与えていることがわかる。

e) アーチ・クラウンにおける断面力

EL. 1380 m のひずみ計グループが故障したので、断面力を求めることが可能な EL. 1426 および 1340 m の 2 標高について、このような比較的うすいアーチダムにおいては、山の張り出し現象の影響が顕著に表われる、クラウンの曲げモーメントについて実測値と計算値を比較すると、上述の他の実測値から予測される同様な差が生じている。

図-26 は、上述の 2 標高のアーチ・クラウンにおける水平面内の曲げモーメント M の経時的変化を、S.A.C.A. による計算値と比較したものである。M は EL. 1426 m では、アーチがこの標高では着岩していないために図のごとく小さく両者間の差も少ないが、EL. 1340 m での差はかなり大きい。この差の時間的変化は、図-27 に示す中央片持ばりのたわみにおける実測値と計算値の差のそれと、ピーク、周期ともによく一致していて、山岳内の間隙水圧の変化による山の張り出し現象に対するダムの対応が理解される。

3. 基礎岩盤の強制変位がダムにおよぼす影響

ダムの基礎岩盤が、一般にいうダムの荷

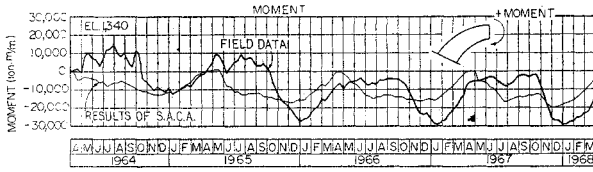


図-26 アーチ・クラウンにおける曲げモーメント

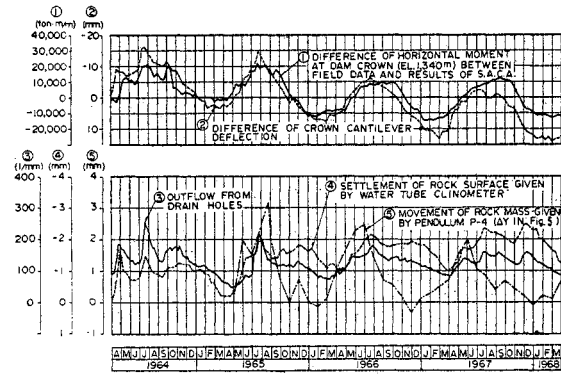


図-27 地山のはらみ出しに関する諸現象

重と無関係に季節的な変動を繰り返す、この変位は降雨あるいはドレーン孔からの流出量などと相関があり、7月と3~4月にそれぞれ極値を示し、その原因が山岳内における地下水位の周期的な変化にあると推定されることは、すでに述べたとおりである。したがって、この現象をダムの実測値の解釈に際して考慮しなければ、ダムの挙動を正しく理解できないと同時に、設計時にもこの現象を考慮する必要があるものと考えられる。すなわち、S.A.C.A.による計算で仮定している基礎岩盤の変位と実測変位の間に差があると、その差は当然ダムの変位に現われ、予想外の応力が生ずることも想定される。

黒部ダムについてこの影響を調べるために、基礎岩盤に各種の変位を与えた場合のダムの反応について検討した。すなわち、図-28に示すような6種類の単位変位を基礎岩盤に与えた場合のダムの変位と応力を求めた。その結果によると、兩岸の基礎岩盤がそれぞれ1mm張り出した場合に、中央片持ばりは上流側に2.3mm程度押しもどされることになる。中央片持ばりに対する山の張り出しの影響は、2.(3)に述べたごとく年間約15mm程度あるので、山の張り出し量を片持ばりのたわみから逆算すると $15\text{ mm} / 2.3\text{ mm/mm} = 6.3\text{ mm}$ となり、この量はジオジメータによるダムの弦長の年間変動量約13mmの1/2とほぼ符合する。またこの計算結果によると、兩岸の山の張り出し量各1mmに対するクラウンの断面力の増分は、標高によって異なるが大きい部分で単位幅当たり垂直力236 t/m およびモーメント $2000\text{ t}\cdot\text{m/m}$ に達し、その結果繊維応力の変化は上流面で 2 kg/cm^2 程度引張側へ、下流面で 0.4 kg/cm^2 程度

圧縮側へ移行するような影響をダムに与える。

このような山の張り出し現象のダムに与える影響は、もちろんダムの形状と部分によって大いに異なり、黒部ダムのようなかなり可撓的な形状ではその影響は主として変形量に現われるが、形状の選び方によっては意外に大きな応力を生じ、コンクリートおよび基礎岩盤の安定に思わぬ支障をきたすことも考えられよう。

4. むすび

黒部ダムの湛水過程を通じて、荷重変動にともなうダムの変形および断面力の変化と、基礎岩盤の変形の変化を測定解析し、その結果を現行の設計手法による計算結果と対比して両者間の差異を求め、その差の原因を究明することによって基礎岩盤の挙動を解明し、ダムに強制変位として作用する特異な変位現象を明

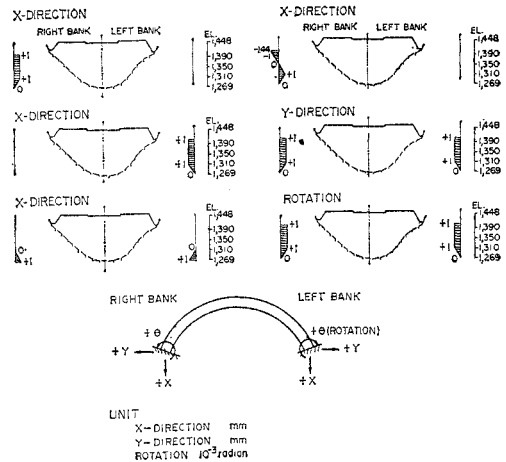


図-28 アバットメントの単位変位

らかにするとともに、大規模なアーチ・ダムを設計する際に留意すべき基礎岩盤の取り扱いについて考察した。

実測値と計算値の対比から得られた主要な差異について概観すると、次のとおりである。

(1) 中央片持ばりの実測たわみには、計算値に比べて経年的な差以外に季節的に大きな差があり、3月と7月に差が極大(約15mm程度)となる。

(2) アーチの実測断面力も計算値と異なり、したがって、アーチから基礎岩盤に伝えられる推力の大きさや方向も異なる。その相違は河に直角な方向の分力の大きさが季節的に変動することと、その分力の鉛直方向の分布が異なっている点にある。

(3) アーチのアバットメントおよび中央片持ばり底

面における実測変位もまた計算値と異なっている。

アーチ・アバットメントの実測変位は、上述の(2)のアーチ推力の計算値との相違から想定されるように、計算値に比べて山側に指向し、かつ季節的変動性をもっている。

中央片持ばり底面の実測変位は、計算値に比べて夏季は上流向きに、冬季は下流向きに大きく相違する。またこの季節的な変動は、片持ばりの底面に埋設したひずみ計から求まるせん断力の増減と合致する。

(4) 基礎岩盤には、ダムに起因する荷重とは無関係な季節的に変動する変位現象が認められる。

(5) すべての実測変位に、経年のないし荷重経歴的な変形の進行が認められる。特に岩盤では荷重履歴によって変形係数が大幅に異なることと、同一荷重に対しても変形が収束するのにかなりの繰り返しが必要である。

以上が、実測値と計算値の対比から明らかになった主要な点であって、これらの差異は次の2つの理由から説明することができる。

(1) 計算には算入されていない、山岳内の地下水面の年周期的な変動に起因する基礎岩盤の季節的な変位が、ダムに強制変位として作用するために生じた差異である。

(2) コンクリートおよび特に岩盤の非弾性的な性質によるものである。

従来、基礎岩盤は外力によってのみ変位するものとして取り扱われてきたが、岩盤がダムに起因する荷重と無関係に変位し、高次な不静定構造物に強制変位を与えることは、ダムの安定に重要な影響をもつことになる。その1つはコンクリートの応力の増加、特にアーチ・クラウンにおけるモーメントの増加によるものであるが、さらに重要なことは、アーチ・アバットメントにおけるアーチ推力の大きさや方向におよぼす影響である。

岩盤の強制変位によるアーチ推力の増大は、アーチの形状や山岳の状況によって異なるが、黒部ダムの例によると単位高さ当たり6000 t/mにおよぶ大きな力となる。元来、強度の低い岩盤は変形性が大きいのが通例であるので、基礎岩盤のせん断破壊に対する安全上の配慮からアーチをフラットにして、ダムからの推力を山側に向けることが多い。このような場合に、岩盤の周期的な張り出しに対する反力が設計時に注目されずに重合されると、変形性の大きい岩盤であればあるほど、アーチが岩盤へ押し込まれる量が累積し、思わぬ弦長増加によってコンクリートの応力に破たんをきたす恐れがないとはいえない。

したがって、上述のような設計方針をとる場合には、岩盤の強度と変形性をよく調べて、そのバランスを見き

わめてアーチの基本形状を決定するとともに、アバットメント付近でフレットなどによるアーチの増幅を行って岩盤に伝わる応力を下げ、同時に岩盤の周期的な変位および特に経年的な弦長増に対する応力的な余裕をダムの形状とコンクリートに見込んでおく必要がある。また保安上から弦長変化に関する計測を、その変化がほぼ弾性的な状態に落ち着くまで、なるべく直接的方法で継続することが必要であろう。

終りにのぞみ、本検討の基本的な問題に対して多くのご示唆を賜った埼玉大学 岡本舜三教授および東京大学 国分正胤教授のご指導に対して深く感謝するとともに、現地における計測にたずさわった関西電力建設部と新日本技術コンサルタントの諸氏の協力に対して、厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 田中治雄ほか：黒部川第4地点の地質，電力中央研究所報告，地質 64001，1964.7.
- 2) 増田秀夫：黒部川第4ダム地点における岩盤の弾性係数について，電力中央研究所報告，土物 57006，1957.9.
- 3) 君島博次：マス・コンクリートのクリープに関する研究，電力中央研究所報 Vol. 10, No. 5, 6, 1960. 12.
- 4) 関 慎吾ほか：黒部ダム・コンクリートのクリープ試験，電力中央研究所報告，土木 67008，1967.4.
- 5) 野瀬正儀：ダム基礎岩盤の現地試験に関する研究，東京大学工学部学位論文 1965.5.
- 6) 野瀬正儀：黒部川第4ダム地点の岩盤試験と基盤内の浸透流に関する実験的研究について，岩の力学国内シンポジウム講演集，1964.
- 7) 発電水力：黒四特集号，No. 70，1964.
- 8) Vogt, F.: Über die Berechnung der Fundament-Deformation, OSLO 1 KOMMISSION HOS JACOB DYBWAD 1925.
- 9) U.S.B.R.: Trial Load Method of Analyzing Arch Dams, Bulletin No. 1, Part V, Boulder Canyon Project Final Report, 1938.
- 10) U.S.B.R.: Arch Dams, Treatise on Dams, Chap. 10, Reclamation Manual, Oct. 1950.
- 11) 新日本技術コンサルタント：黒部ダム応力計算報告書一その1 & 3, 1965. 11.
- 12) U.S.B.R.: Cooling of Concrete Dams, Bulletin No. 3 Part VII, Boulder Canyon Project Final Report, 1938.
- 13) 関西電力(株)：黒部川第4発電所工事誌，1966.5.
- 14) Carlson, R.W. and Raphool, J.M.: Measurement of Structural Action in Dams, James J. Gillick and Co., Berkeley California 1954.
- 15) 応力測定技術研究会：応力測定法，朝倉書店 1960.7.
- 16) 関西電力(株)：アーチ・ダムの安定計算，黒部川工事実施認可申請書 1953.8.
- 17) 藤田益夫・川本眺万：有限要素解析法の二次元問題への応用，土木学会誌 52 巻8号，1967.8.
- 18) Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K.: The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, 1967.
- 19) Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K.: Stress in Buttress Dams, Water Power, 17, p. 69, 1965.

(1974.7.31・受付)