



土 木 研 究 所 資 料

第 692 号

コンクリートダム of 安全管理の手引・改訂版

昭和 46 年 11 月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

ま え が き

「コンクリートダムの安全管理の手引」初版は昭和43年5月に印刷されているが、その後も測定方法、解析方法についての改善が続けられ、この結果、初版の内容につけ加える、或いは訂正すべき部分が随所に生じており、ここに改訂版を出版する事とした。

当研究室では昭和36年以来、多くのダム管理所の協力を得て「実測資料に基づくダム本体及び岩盤の挙動に関する研究」を行なってきたが、現在までに一定の成果が得られたと考えられ、更にダムの安全管理についてはその管理方法はほぼ確立されたと見做し得る段階に達しており、従って本書はこれらの総まとめと考えるものである。

現在、日本大ダム会議において「ダム構造物管理規準」が作成されつつある。この管理規準と矛盾しないよう配慮したが、何分にも作成途上にあつて未だ十分に議論がつめられていない部分が多いため、管理規準が完成した暁には本書の内容と部分的に異なった箇所が生ずることも考えられるので御了承いただきたい。この点については、本書の内容はあくまでも、ここ数年来の研究の結果に基づいた筆者らの考え方を示したものであつて、本書が実際に測定及び整理、測定値の解析等の作業に当られる方々に多少とも役立てていただければ幸甚である。

コンクリートダムの安全管理の手引・改訂版

ダム部ダム構造研究室

飯 田 隆 一
米 道 久

目 次

1. 概 説	1
2. 測定計器の種類と構造	2
2.1 埋 設 計 器	2
2.1.1 Carlson 型埋設計器	2
2.1.1.1 温 度 計	2
2.1.1.2 歪 計	2
2.1.1.3 継 目 計	3
2.1.1.4 応 力 計	4
2.1.1.5 間隔水压計	4
2.1.2 フルブリッジ型埋設計器	5
2.2 たわみの測定	6
2.2.1 精密三角測量	6
2.2.2 視 準 測 量	7
2.2.3 プラムライン	7
2.3 岩盤の変位の測定	8
2.3.1 岩盤圧縮変位計	8
2.3.2 逆プラムライン	9
2.3.3 岩盤内に設けた三角形網による変位の測定	9
2.4 揚 圧 力 の 測 定	9
2.5 漏 水 量 の 測 定	10
2.5.1 個々の排水孔の漏水量の測定	10
2.5.2 全漏水量の測定	10
3. 測定計器の特性と使用方法	12
3.1 計器の温度補正	12

3.2	計器の設置	13
3.3	応力の測定	13
3.4	たわみの測定	14
3.5	岩盤の変位の測定	14
3.6	揚圧力の測定	15
4.	測定の目的と重点の置き方	16
4.1	施工管理	16
4.2	ダムの安全管理	16
4.3	構造解析	19
5.	配置計画	20
5.1	施工管理を目的とした配置計画	20
5.2	ダムの安全管理を目的とした配置計画	22
5.3	構造解析を目的とした配置計画	24
6.	測定間隔	26
6.1	施工管理を目的とした場合	26
6.2	安全管理を目的とした場合	26
6.3	構造解析を目的とした場合	29
7.	施工管理のための測定および解析	30
7.1	温度の測定および解析	30
7.2	継目の開閉の測定および解析	30
8.	安全管理のための測定と解析	34
8.1	漏水量	34
8.2	揚圧力	41
8.3	たわみ	49
8.3.1	図解法	49
8.3.1.1	アーチダム	49
8.3.1.2	重力ダム	50
8.3.1.3	図解法の特性	50
8.3.2	ダムの撓みに影響を与える因子と重回帰分析法	51
8.3.2.1	アーチダム	53
8.3.2.2	重力ダム	61
8.3.2.3	重回帰分析法の特性	70

8.3.3 撓みの重回帰分析結果による安全管理	70
8.4 歪 の 解 析	72
8.4.1 歪の生死判定	73
8.4.2 重回帰分析	78
8.4.3 解 析	78
9. 構造解析のための測定と解析	82
9.1 堤内温度とダム厚	82
9.2 た わ み	84
9.3 岩盤の変形	92
9.3.1 重力ダムの岩盤の温度変化の影響	92
9.3.2 計算値と実測値の対比	94
9.4 歪および応力	95
9.4.1 歪の解析方法	95
9.4.2 解 析 例	97
9.5 岩 盤 の 挙 動	99

1. 概 説

貯水を目的としたダムは万一破損を生じた場合には下流に著しい被害を生ずることはアメリカのセントフランシスダム、フランスのマルパッセダム、イタリアのバイヨントダムの例でも明らかである。幸い我が国では未だこのような大きな事故は起っていないが、今後ともダムを安全に管理するために充分安全なダムを建設するように努力するとともに、概にでき上ったダムについても充分安全にその機能を果すように管理し、更に若しダムに異常がある場合でも、できるだけ早くその徴候を捕え、軽度の補修ですませ得るように努力することは極めて重要なことである。特に我が国においては完成したダムの数も既に 300 を越え、世界第二位になっている現在、ダムの安全管理は社会的にも極めて重要度の高いものとなっている。

ダムの安全管理を目的とした測定については戦前に完成したダムについても、既に漏水量、揚圧力の測定等は行なわれて来たが、戦後測定器の進歩と相まって種々の計器が設置されるようになり、温度、継目の開閉、歪、応力、撓み等、多岐にわたる測定が行なわれるようになって来た。

これらの測定により一部のダムではダムおよびその基礎岩盤の挙動について優れた解析を行なっているが、多くのダムでは測定計器が未だ不備な点が多く、よいデータが得られていない上、測定資料も多すぎるために充分な資料整理が行なわれていないため、構造解析はもちろんの事、ダムの安全管理も充分に行なわれていないのが現状である。

現在、非常に数多くのダムにおいて歪計、応力計等が数多く設置され、構造解析をも行ない得ようになっているが、これらのすべてのダムで構造解析を行なうことは不必要であるし、また人員的にみて困難である。多くのダムは測定の目的をダムの安全管理にしばって、充分な管理体制をひくことが大切であると考えられる。

本書はダムの安全管理を行なうための測定方法、解析方法を中心にとりまとめたものであるが、一部のダムでは構造解析を目的とした測定、解析を行なうこともあり得るので、これらについても簡単にふれることにした。

2. 測定計器の種類と構造

現在ダムに用いられている測定計器としてはかなりの種類にのぼっており、例えば埋設計器についても Carlson 型、Maihak 型、Telemac 型、Galileo 型等かなりの種類がある。このうち我が国では Carlson 型がほとんどであるので Carlson 型を中心として述べ、外部変形の測定器、揚圧力測定器等について主として用いられているものを中心に述べることにする。

尚、測定計器は年々改良、開発が試みられており、最近では現在の埋設計器の欠点を補う幾つかの長所を有すフルブリッジシステムの計器が開発されている。将来多くのダムにこの型の計器が用いられる事が予想されるので、ここでは Carlson 型計器と対比して述べることにする。

2.1 埋設計器

埋設計器としては温度計、歪計、継目計、応力計、鉄筋計、間隙水压計等があげられる。これらの計器は前述したように種々種類があるが、現在我が国では Carlson 型のものが主として用いられ、今後はフルブリッジシステムのものが主として用いられる事が予想されるので、両者について述べる事にする。

2.1.1 Carlson 型埋設計器

2.1.1.1 温度計

温度計の構造は図-1に示すように、温度計内にある絶縁心棒に銅線

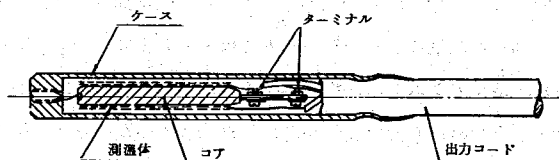


図-1 Carlson 型温度計

が巻きつけてあり、この銅線の抵抗変化により、温度変化を測定することになっている。

温度変化と抵抗変化との関係は白金が最も直線性がよく、銅はこれよりもやや劣るとされているが、ダムの温度測定で問題となる $-5^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ の範囲内では充分直線性があるということで用いられている。

測定は温度計から出ているキャプタイヤーコードをホイーストブリッジにつなぎ、ブリッジにより抵抗値を測定している。また温度計専用の指示器を用いれば、直接温度が指示される。

2.1.1.2 歪 計

歪計の構造は図-2に示すように、歪計内にある鋼棒に二つのコイルが巻きつけられており、このうち一つのコイルは歪計の長さが減少したときコイル長は減少し、もう一つのコイルはコイル長が増加するようになっている。この二つのコイルはほぼ同じ抵抗を持っており、更に歪計の長さが変化したときに符号が

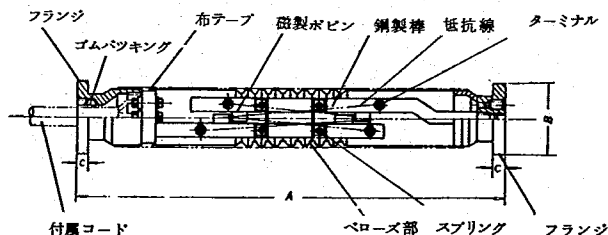


図-2 Carlson 型ひずみ計

反対ではほぼ同じ値の抵抗変化が起るようになっている。

今、各々のコイルの抵抗を R_1, R_2 とし、温度変化および歪計の長さの変化により夫々 $\Delta R_t, \Delta R_s$ の抵抗変化が生じたとすると、変化後各々のコイルの抵抗は

$$R_1' = R_1 + \Delta R_t + \Delta R_s$$

$$R_2' = R_2 + \Delta R_t - \Delta R_s$$

となる。今、図-3(a)に示すように R_1' と R_2' を直列につないでブリッジの一辺につなぐと

$$R_1' + R_2' = R_1 + R_2 + 2 \Delta R_t$$

となるから、ブリッジが平衡するように R_v を変化させると

$$\frac{R_1 + R_2 + 2 \Delta R_t}{R_s} = \frac{R_v}{R_s}$$

$$2 \Delta R_t = R_v - (R_1 + R_2)$$

ΔR_t は温度に比例する量であるから

$$\Delta T = 2 \alpha \Delta R_t = \alpha (R_v - R_1 - R_2)$$

また 0°C のときの $R_1 + R_2$ の値を R_0 とすれば

$$T = \alpha (R_1 + R_2 + 2 \Delta R_t - R_0) = \alpha (R_v - R_0)$$

として温度が求められる。

次に図-3(b)に示すように R_1 と R_2 を分けてブリッジの二辺につなぐと

$$\frac{R_1 + \Delta R_t + \Delta R_s}{R_v} = \frac{R_2 + \Delta R_t - \Delta R_s}{2 R_s}$$

$$\frac{R_1 + \Delta R_t}{R_2 + \Delta R_t} \left(1 + \frac{\Delta R_s}{R_1 + \Delta R_t}\right) \left(1 + \frac{\Delta R_s}{R_2 + \Delta R_t}\right) = \frac{R_v}{2 R_s}$$

$R_1 = R_2$ であるから、 $\frac{R_v}{2 R_s}$ の初期値を Z_0 とすれば

$$\Delta \varepsilon = f(Z - Z_0)$$

により歪が求められる。

このように歪計では温度変化が直接抵抗比には影響しないようになっているが、温度変化により計器自身も伸縮が生ずるのでこれに対する補正が必要となる。即ち補正された歪は

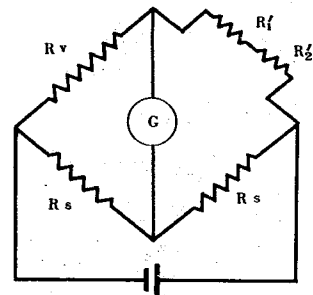
$$\Delta \varepsilon = f(Z - Z_0) - b \Delta T$$

として計算される。

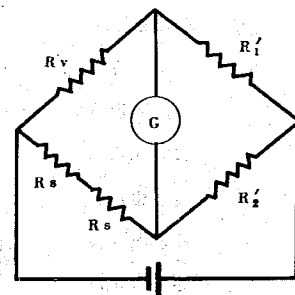
測定範囲は圧縮に対して $800 \sim 1000 \times 10^{-6}$ 、引張に対し $400 \sim 500 \times 10^{-6}$ である。

2.1.1.3 継目計

継目計の構造は図-4に示す如くで、構造、測定原理は歪計と基本的には同一である。



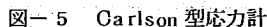
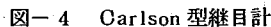
(a) 温度測定



(b) 歪測定

図 - 3

また、大きな長さの変化を測定しているの
で、測定値に対する温度変化による計器の長さの変化は無視し得る
として計器



測定範囲は閉じが0.7~6.0mm、開きが6~12mmである。

応力計の構造は図-5に示す如くである。受圧板にかかる応力を水銀圧に変え、この水銀圧を小円板の変形に変え、この小円板の変形を歪計と同じ原理で測定し、応力を求めるようになっている。

測定範囲は $0 \sim 30$ ないし $0 \sim 120 \text{ Kg/cm}^2$ である。

間隙水圧計の構造は図-6に示す如くである。則ち先端に多孔性填材のつまった筒があり、筒の内部には油または特殊なゼリーを介して薄膜平板がある。多孔性填材中を浸透した水は介在する油に圧力を伝え、この圧力で生ずる薄膜のたわみを歪計で測定し、水圧の大きさを

求めるもの
である。測
定範囲は 1
~16kg/cm²
程度である。

2.1.2 フルブリッジ
式埋設計器
カールソン型
計器は図-3に
示した様に計器
内の抵抗素子に

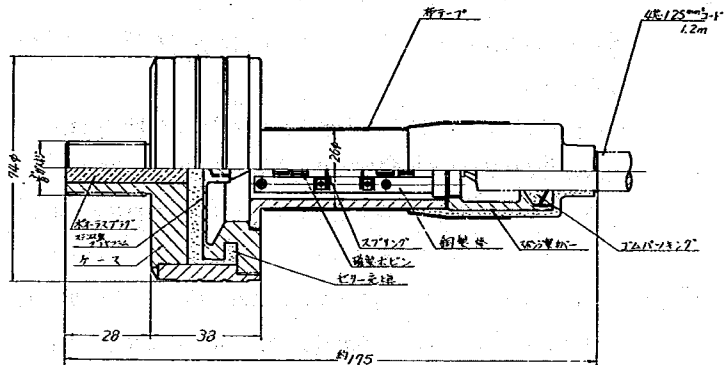


図-6 Carlson 型間隙水圧計

より受感された抵抗をブリッジ回路の 1 辺または 2 辺に組み入れ、対応する可動抵抗の変化量を
読み取るという測定方法がとられている。これに対してフルブリッジ式計器は図-7 の如く 4 辺
の抵抗でなすブリッジ回路そのものが一個の計器をなし、
入力電圧に対する出力電圧の読みから測定される。

$$(e = \frac{e_i}{4} K \sum_j \epsilon_j)$$

このフルブリッジ式計器についてひずみ計を例にとつ
て述べてみよう。

ひずみ計の概略構造を示すと図-8 の如くである。歪
計の全長を L とし、受感したひずみを ϵ とするとひずみ
計の長さ変化は $\Delta L = \epsilon L$ だけ生ずる。 ΔL はロッドを
介して板バネに伝達され ΔL に比例する撓みを生じさせ

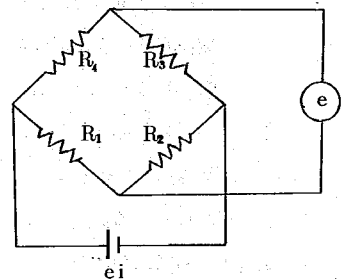


図-7

る。板バネにはひずみゲージが接着してあり、その表面ひずみを検出してホイーストンブリッジ
により電圧変換する。温度補正係数は非常に小さくほとんど無視してもよい。

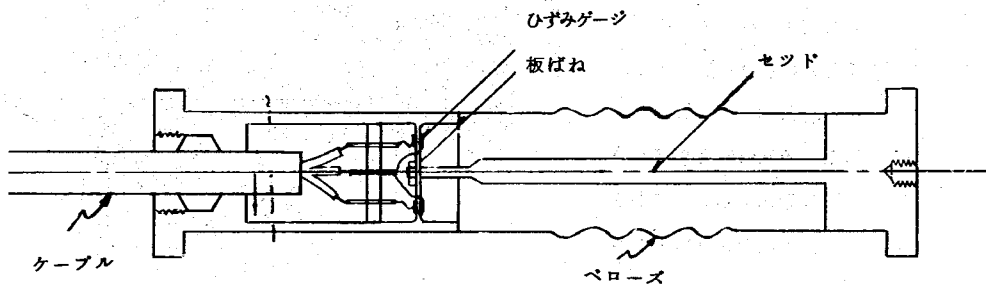


図-8 ひずみ計の構造

前にも述べた通りこのフルブリッジ式計器は現在使用されている埋設計器の不良な点を改良する意味で最近開発されたものであるが、カールソン型計器と比べて優れる点を列挙すると以下の如くである。

- (i) 図-7の如く、4辺の抵抗からなるブリッジ回路そのものが一個の計器に納められており、入力電圧に対する出力電圧の読みから測定される。従って、カールソン型計器の様に4辺の中の一辺を逐次切換える際に生じるスイッチの接触抵抗の影響は除去され、しかも電圧測定であるためケーブル抵抗の影響が非常に小さくなり、ケーブルの延長を計る事が出来る。
- (ii) ひずみゲージの温度補正係数は、これを接着する受感部材質の線膨張係数で打消され予め調整する事が出来るので、温度補正の必要は殆んどなくなる。
- (iii) 抵抗部分には既成のひずみゲージを用いるので、従来のカールソン型計器の抵抗素子に比べ感度が高められ、従って精度の向上を計る事が出来る。

等があげられる。尚、(i)についてはA・D変換器を用いて電圧から周波数に変換すればケーブル抵抗、スイッチの接触抵抗の影響は殆んどなくなり、更に将来計測システムの確立を計る事も可能となるので、この意味からも電圧出力のブリッジ型のものが望ましいと云える。但し、A・D変換器は温度、湿度の変化に非常に敏感であるので現在これを直ちに計器内に取り付る事には問題があるが、今后これら変換器の改良、開発が進められれば、近い将来使用可能となろう。

2.2 たわみの測定

ダムのたわみの測定は一般に精密三角測量、視準測量による方法、プラムラインによる方法等が行われている。

2.2.1 精密三角測量

精密三角測量は図-9に示すように、ダムの下流側の岩盤にベースラインおよび視準点を設け、さらにダムの下流面にいくつかの標的を設け、ベースラインおよび視準点是不動であるとして、Wild T-3により精密三角測量によりダムのたわみを求める方法である。

この方法の利点はダムの絶対変位が求められることと、ダムの下流面のいくつかの点の変位を同時に求め

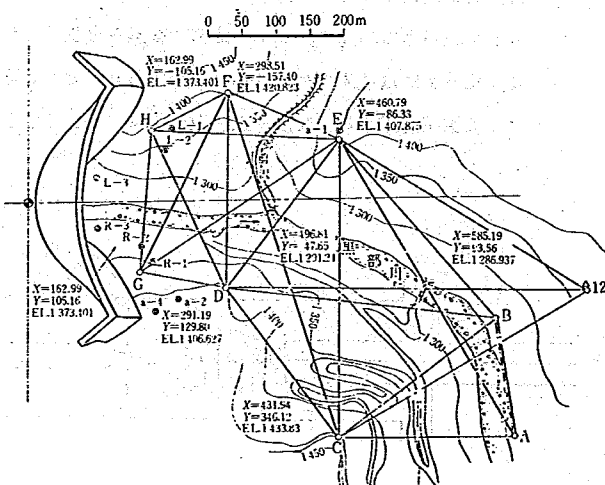


図-9 精密三角測量基準点綱図

得る点で優れているが、

- (i) 規準点、ベースラインが比較的表面の岩盤に取りつけられているので、天候、季節などの変化により動くことが多く、或るダムではベースラインの長さを測定するたびに長さが異なり、最大6 mmの差があったという例がある。このため測定結果の精度が思わしくない。
- (ii) Wild T-3の分解能は約1秒で、これは100 mの視準距離にして1 mmに相当する。一般にダムのスパンは凡そ200 m~400 mであるため、測定結果に1~3 mmの誤差は避けられない。これに反し、ダムのたわみは重力ダムで1~5 mm、アーチダムで10~100 mmで誤差が比較的大きい。
- (iii) 精密三角測量は外業に1~2週間、内業に1~2週間要する。このため外業中にダムのたわみが増加する可能性があり、更に費用と労力が大きいため回数多く測定することが困難である。このような欠点があるため、特殊な研究目的で行う以外はダム管理の目的からは不向きである。

2.2.2 視準測量

視準測量は図-10に示すようにダムの兩岸に規準点と視準点を設け、この二点を含む鉛直平面上のダムの先端に視準点を設ける。

先ず視準点にWild T-3または視準測量の倍率の高いトランシットをすえ、対岸の視準点を視準する。次にトランシットを鉛直面にふってダムの天端の標的を視準し、標的がトランシットの中央で視準されるように移動させ、その移動量からダムのたわみを測定する。

この場合に、ダムの天端の視準点を固定し、対岸の視準点を移動させて測定する方法もある。

この方法の利点は

- (i) 絶対変位が測定し得ること。
- (ii) 測定が容易であること。
- (iii) 天端のたわみしか測定し得ないが視準線を適当にとれば数点の測定が可能である。

等であるが欠点は

- (i) 精密三角測量の場合と同様にWild T-3を用いても1~2 mmの測定誤差は避けられない。
- (ii) 冬期の積雪の多い地方では冬期の測定は困難である。

等である。

2.2.3 プラムライン

プラムラインは図-11に示すようにダム本体に鉛直に直径30 cm程度の鉄管を埋設し、この中にピアノ線を下げ、その先端に垂錘を下げ、このピアノ線の移動量からダムの相対変位を測定

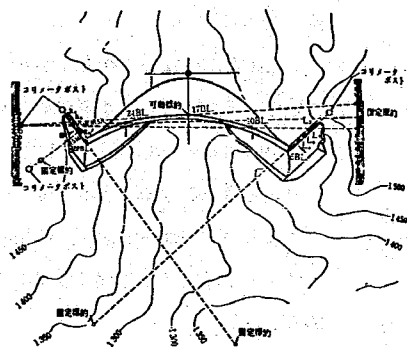


図-10 視準測量測点配置図

する。測定方法としては

(i) 望遠鏡による方法

この方法は図-1.2に示すように、上下流方向と堤軸方向の移動量を測定し得るようなバーニアをピアノ線の側に設置し、このバーニアの上に望遠鏡を取りつけ、この望遠鏡でピアノ線を視準し、望遠鏡のクローヘヤーとピアノ線と一致するように望遠鏡を移動させ、この移動量をバーニアで測定する。この方法では $\frac{1}{20}mm$ の精度で測定し得る。

(ii) 距離計による方法

この方法は写真機等に用いられる距離計と全く同じ原理を用いたもので、距離計をピアノ線のわきに設けられた台にとりつけ、距離計内に現われる二つの像を合わせるように調節すれば上下流方向および堤軸方向の移動量が同時に測定し得る。この方法の精度は $\frac{1}{10} \sim \frac{2}{10}mm$ 程度である。

(iii) 電気的な方法

上記の二つはいずれも光学的な方法を用いているが、このほか電気的な方法として熱線による方法(玉屋)、差動トランスの原理を用いる方法(土木測器)等がある。これらの方法は遠隔測定、連続測定が可能であるが精度は(ii)と同程度である。

等がある。

これらを測定の容易さから云えば(iii)(ii)(i)の順であり、測定結果の精度および信頼性から云えば(i)(ii)(iii)の順である。

いずれの方法による場合でも測定値の精度、信頼性は精密三角測量、視準測量よりはるかに優れておりたわみの測定の中では最も優れたものである。

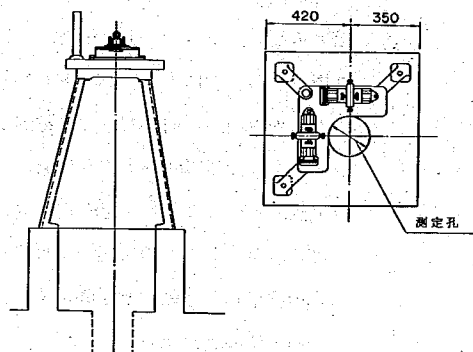


図-1.2 たわみ測定装置

2.3 岩盤の変位の測定

最近、基礎岩盤の変位の安定性が重視され、ダムの基礎岩盤の測定もかなり行われるようになってきた。これらのうち主なものをあげると、岩盤圧縮変位計、逆ブラムライン等である。

2.3.1 岩盤圧縮変位計

圧縮側に測定範囲を広くとった継目計にパイプを取りつけて10~40m位に長さを長くしたものである。これをダムの基礎にボーリングし、埋設したものである。

計器の構造、測定方法は継目計と同一である。

2.3.2 逆プラムライン

逆プラムラインは図-13に示すようにダムの基礎に直径220mmのボーリングで穿孔しピアノ線をボーリング底にアンカーし、ピアノ線を引き上げ、ドーナツ型の水槽に浮かせたドーナツ型のフロートにピアノ線を取りつけ、このピアノ線の移動量から岩盤の変位を測定するものである。測定器はプラムラインと全く同様である。

この方法は岩盤の変位の測定方法としては極めて優れた方法で、精度、信頼性も極めて高い。

2.3.3 岩盤内に設けた三角形網による変位の測定

この方法は川俣ダム、黒部第四ダムで行われた方法で、岩盤内に設けた監査廊からボーリングを行ない、図-14に示すような三角形網を作り、このボーリング孔内にロッドを入れ、先端だけを固定し、ロッドの自由

端の移動量から岩盤の変位を測定する方法である。

この移動量の測定には継目計による方法と、機械的な計器による方法とがある。

この測定方法は岩盤内部の変位の分布を知る上では極めて有効であるが、どちらかと云えばダムの安全管理のためよりは研究的な目的のためのものである。

2.4 揚圧力の測定

揚圧力の測定は一般に排水孔にブルドン管圧力計を取り付けて測定する方法と、間隙水圧計による方法とが用いられている。間隙水圧計については埋設計器のところで述べたので省略することにする。

排水孔にブルドン管圧力計を取り付けて測定する方法は測定も簡単なので最も広く用いられている方法である。この方法についてはいまさら説明を加える必要はないと考えられるが、注意事項を

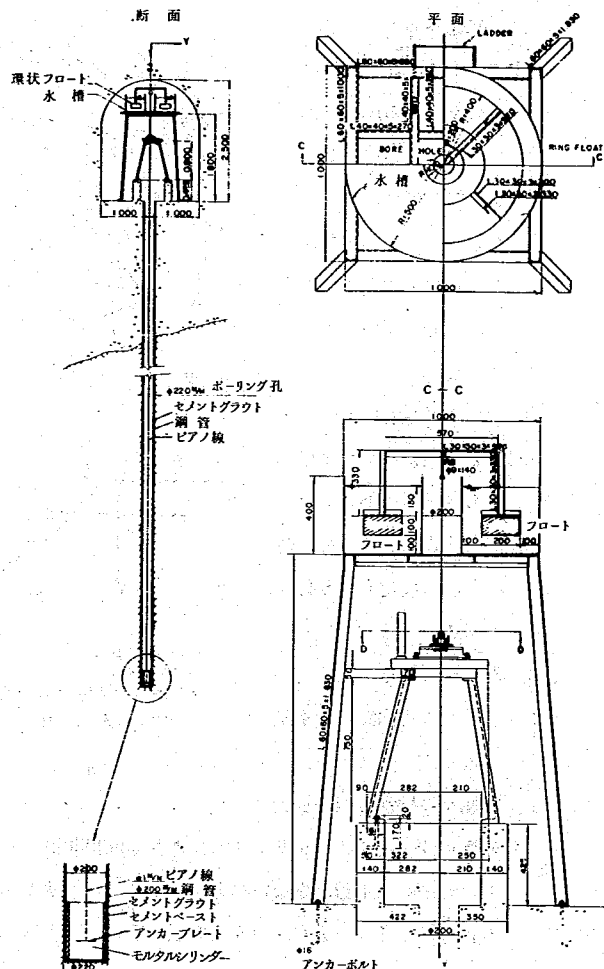


図-13 逆プラムライン詳細図

二、三述べると、

(i) ブルドン管圧力計はフルスケールの圧力に比して小さい圧力に対して測定精度が低い。従って満水位時の揚圧力がフルスケールの $\frac{1}{2}$ 以上になるような計器を用いるべきである。

(ii) ブルドン管圧力計は破損し易い。従って予備の圧力計を持つとともに、圧力検定器を持って、時々計器の検定を行う必要がある。

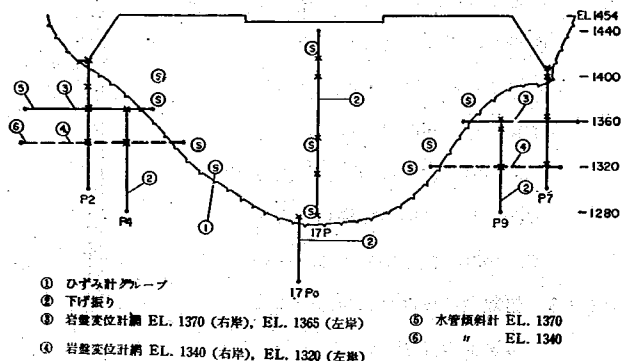
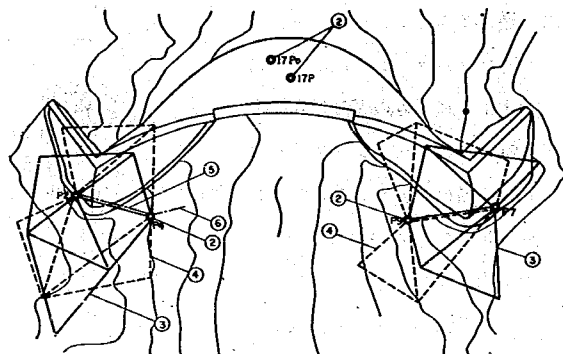


図-14 黒部第4ダムの岩盤変位測定

2.5 漏水量の検定

2.5.1 個々の排水孔の漏水量の測定

個々の排水孔の漏水量

の測定は一般にメスシリンダーにより単位時間当りの漏水量を測定する方法が用いられている。この方法は漏水量が少ない場合にはかなりの精度で測定し得るが、漏水量が多い場合にはかなり不正確となる。一方ダムの安全管理の面から云えば漏水量が少ない排水孔については特に留意して測定する必要はなく、漏水量が多い排水孔について注意して測定する必要がある。従って漏水量が多く、メスシリンダーによる測定の精度が思わしくない場合（毎分50ℓ以上）には何か他の測定方法を検討する必要がある。即ち低圧力で測定が可能な流量計（愛知時計翼車型PK-40、金門製作所PW型）等を用いるのも一法であるが、これらの計器はいずれも圧力が加わることで動くので、流量が低く測定される可能性がある。特に漏水量は多いが、揚圧力の小さい排水孔では注意を要する。

しかし漏水量の測定は絶対値が問題ではなく、時間的な変化が問題であることを考えるならば、揚圧力が 2 kg/cm^2 前後の値を持ち、漏水量が多い排水孔では充分使用し得ると考えられる。

2.5.2 全漏水量の測定

全漏水量の測定は一般に次の三つの方法が用いられている。

(i) 個々の排水孔の漏水量の和として求める方法

この方法は測定に労力を要し、誤差が多い。従ってかなり用いられている方法であるが良

い方法とは云い得ない。

(ii) 三角堰による方法

この方法は漏水が監査廊の側溝を流下して、下流に放流される場合に側溝に三角堰を設け、これにより、測定する方法である。この方法は測定が簡単で、絶対値はとにかくとして安定した測定値が得られ、漏水量の増減が極めて容易に把握できる。この方法を用いるときに注意すべきことは三角堰に遊離石灰が付着したり、三角堰が腐蝕したりして、三角堰のナイフエッジが丸くなると精度が低下することである。従って時々三角堰をとりかえる必要がある。

(iii) 集水水槽の水位上昇により測定する方法

監査廊、排水孔が下流水位より低い所にある場合に、漏水を集水水槽に集めポンプにて排水する方法がとられる。この場合にポンプが止まっているときの単位時間の水面の上昇から測定する方法である。

この方法も測定が容易で、精度も高く優れた方法であるが、水槽の側壁に遊離石灰が付着して水槽の体積が減少するので、遊離石灰を時々取りのぞくか水槽の寸法を測定することが必要であり、更に水槽が一杯になり背水が側溝に及んでいるときは測定しないようにすることが必要である。

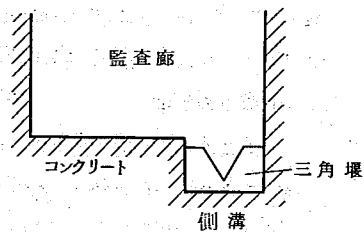


図-15

3. 測定計器の特性と使用方法

前章においてダムの測定に用いられる主要な計器の種類と構造について述べた。しかし、現在用いられている測定計器による測定値は必ずしも良好な値を示しているとは限らず、使用方法の検討、あるいは計器の改善が進められている。筆者が取り扱ったいくつかのダムの測定値を見ると、プラムライン、漏水量、揚圧力の測定値は水位および外気温の変化に比較的良好に対応した値を示しているが、歪計の測定値は理解し難い動きをしているものが多い。

従って現在の計器を使用する場合にはどのような点に留意すべきかについて述べ、更に最近開発されたフルブリッジ式埋設計器の特性を述べることにする。

3.1 計器の温度補正

ダムにおける測定は長期間にわたっての測定であるため、現在の計器を使用した場合計器は温度補正を受け、これに対する補正が必要となることが多い。ブルドン管圧力計による揚圧力の測定、漏水量の測定においては温度補正は必要ないが、他の計器はほとんど温度補正が必要となる。例えば現在多く用いられている Carlson 型の埋設計器は温度変化により電気抵抗は変化しないように造られているが、温度変化により計器自身が伸縮するため測定値に差が生じ、温度補正が必要となってくる。この温度補正値が測定値の 10~20% 以下であれば問題はないが、それ以上になると測定値の信頼性が問題になってくる。事実、歪計においては温度補正値が測定値の数倍に達していることがある。

そこで温度補正の面から眺めてみよう。前章に述べたように、一般に Carlson 型の計器は全抵抗 R と抵抗比 $\frac{\Delta R}{R}$ を測定し、

$$T = \alpha (R - R_0)$$

より温度を求め

$$f \times \frac{\Delta R}{R}$$

より歪、応力等のみかけの測定値を求め、さらに計器の温度補正として $b \times T$ をひいている。Carlson 型の種々の計器の係数を示すと表-1 の如くである。表-1 によると、温度補正係数は、継目計、間隙水圧計、応力計はかなり小さいが、鉄筋計、歪計ではかなり大きい。このことは鉄筋計、歪計では温度補正係数または温度測定の僅かな誤差が、測定結果に大きな影響を与えることになる。

	温度係数 α	補正係数 f'	温度補正係数 b
継目計	6.00~7.00	0.02~0.03	0
間隙水圧計	5.50~5.00	0.006	0.01~0.02
応力計	5.50~5.00	0.35~0.45	0.10~0.20
鉄筋計	5.50~5.00	12.0~13.0	5.00~5.50
歪計	5.50~4.50	3.50~5.00	13.60

表-1 Carlson 型計器の諸係数

事実我々の経験では継目計、間隙水圧計はかなり信頼できる測定結果が得られているが、鉄筋計、

歪計では信頼性のある結果が得られ難い。これは次節で述べる計器埋設の問題もあるが、温度補正の大きい計器の測定値は信頼性に乏しいと云い得る。

次にフルブリッジ式埋設計器は求める値を A 、計器の指示値を S_r 、較正係数を f としたとすれば、

$$A = f \cdot S_r$$

により求められ、更に温度補正係数を b 、変化温度を t とすると、 $b \times t$ を引いたものが温度補正をした値となる。しかし、フルブリッジ式計器に使用しているひずみゲージの抵抗温度係数はこれを接着する受感部材質の線膨係数で打消されるよう予め調整されたものを使用し、フルブリッジ回路の温度出力は非常に小さく製造できるので、測定量の定格出力に対する比は $0.1\% f \cdot s/^\circ C$ 以下となっており、Carlson 型計器の $1 \sim 2\% f \cdot s/^\circ C$ に比べ非常に小さく、温度補正係数 b もほとんど 0 に近い。従ってフルブリッジ式計器を使用した場合には温度補正はほとんど考慮する必要はない。

またブラムラインによる測定はダムの測定の中では最もよい結果を与えている。ブラムラインが温度変化を受けた場合には当然ピアノ線の伸縮は生ずる筈である。しかし、ピアノ線が伸縮しても、上下流方向、堤軸方向の変位を測定しているかぎりでは測定値に影響を与えない。

3.2 計器の設置

測定値の良否は計器の設置条件にも強く支配される。計器の感度が高い場合、設置条件が悪いと測定値の信頼性は特に低下してくる。

ブラムライン、ブルドン管圧力計のように、コンクリート打設後に設置される計器については、その感度が充分発揮されるように設置することは容易である。しかし、コンクリート打設中に設置される計器については細心の注意が必要である。

現在の埋設計器を用いた場合、温度計、継目計については感度も低いので、充分その性能を発揮する場合が多い。しかし、歪計は極めて高感度で約 $1/1000 mm$ 程度の移動量を測定するようになっている。このような高感度の計器は一般に実験室においては極めて慎重な取り扱いを要求されている。しかも歪計は応力を測定するのではなく、歪を測定するのであるから、周囲の材料に順応して変形するようになっており、計器の剛性も極めて小さい。このため、埋設時に破損し易く、埋設する際に入念な取り扱いが必要となってくる。

しかし、最近開発されたフルブリッジ式埋設計器はひずみゲージを受感部に接着して使用しているので構造的に耐衝撃性が大きく Carlson 型計器の 5 倍程度の衝撃加速度に耐え得る。とくに埋設計器は埋設後破損しても補修することができず、このため破損後、或は計器に寿命のきたした後に測定し得なくなる。従ってダムの安全管理を目的とした測定においては、より堅固な構造の計器を用いることが望まれる。

3.3 応力の測定

応力の測定は主として歪計、応力計等の埋設計器により行なわれている。これらの計器は先に述

べたように、測定値の信頼性についてはやや問題があるが、応力の測定は研究的な目的以外にも、ダム安全管理のためにもダムの湛水後数年間、ダムの安全性を確認する上で、部分部分の現象を知るために必要となる場合がある。

歪計と応力計とを比較すると、応力計の方が温度補正もはるかに小さく、計器の剛性も大きいため概して安定した値が得られるようである。しかし応力計には引張応力を測定し得ないことと、歪計に比して感度が低いという欠点があり、筆者の経験では最大応力が 15 Kg/cm^2 以下の所では外荷重の変動の影響よりもノイズの方が目立ち、定性的な判断も下し難い場合が多い。従って 100 m 以下の重力ダム等では応力計による応力測定では十分な成果が得られない可能性が強いが、 100 m 以上の重力ダム、アーチダム等では応力の高い部分に応力計を埋設した場合には可成りの成果が期待し得る。

またダムの安全管理の面から云うならば 100 m 以上の重力ダム、アーチダムのように応力の高いダムでは応力に着目した測定も必要となろう。しかし、 100 m 以下の重力ダムのように応力の低いダムでは応力に着目した測定はそれ程高くはないとも考えられる。

しかし、特別な場合には 100 m 以下の重力ダムでもダムの安全管理の上からも応力に着目した測定が必要になる場合があろうし、また横継目を設けてもダムが一体として働いているかどうか、横継目を通して力が伝達されているかどうか等の研究目的のために応力を測定することは考えられる。このような場合には応力計より感度の高い歪計を用いる必要が出てくる。しかし、歪計は前述したように温度補正が大きいことと、埋設時に破損し易いという欠点をもっている。このため、このような場合には一本一本の歪計の温度補正係数を充分検定するとともに、コンクリートの熱膨張係数を正確に把握するために無応力歪計を用い、更に埋設時には入念な取り扱いが必要となってくる。

3.4 たわみの測定

たわみの測定ではブラムラインによる測定が最もよいことは前章で述べた。ブラムラインはダムのたわみを $2/10 \sim 1/20 \text{ mm}$ の精度で測定することが可能であり、その測定結果も極めて良好である。しかし、ブラムラインは完成したダムに新規に取りつけることは極めて困難である。

一方、視準測量は精度の点ではブラムラインより劣るが、たわみの大きいダムではかなりの成果が得られている。また視準測量は完成したダムに対しても新規の測定を開始することは比較的容易である。このため、ブラムラインの設置が困難な場合、或は新規の測定が必要となった場合、たわみが 10 mm 以上になることが予測されるときは視準測量は有効である。

3.5 岩盤の変位の測定

岩盤の変位の測定は岩盤圧縮変位計、逆ブラムラインにより測定されていることは前章に既に述べた。岩盤圧縮変位計は継目計をパイプで延長したものである。継目計は一般には温度補正係数は 0 としているが、これは継目計により測定される移動量に比して、温度変化による計器の伸縮は無視し得る程度であるからで、計器の長さが長くなれば当然温度補正は考慮しなければならない。岩盤圧縮変位計は岩盤の中に埋設されるので温度変化は小さいが、地表に近い所では或る程度の温度

変化はまぬがれない。事実下釜ダムの特種コンソリーショングラウトにおいて施工管理のためにこの種の計器を用いたが、温度変化によりはっきりした結果が得られなかったと報告されている。

逆プラムラインはボーリングに多大の費用を要する。しかし、プラムラインの場合と同様に、その測定結果は極めて良好である。従ってダムの安全管理から、或は研究的な目的から岩盤の変位を測定する必要がある場合には、できるなら逆プラムラインにより測定することが望ましい。

3.6 揚圧力の測定

揚圧力の測定は一般に排水孔にブルドン管圧力計を取りつけて測定する方法と、間隙水圧計による方法が用いられている。

グラウトカーテンより下流側での揚圧力は当然ブルドン管圧力計により測定すべきであろう。しかし、ダムの上流端附近、グラウトカーテン内或はグラウトカーテンより上流側の揚圧力を測定するときは、このような場所に排水孔を設けることは危険であるので、間隙水圧計を用いる以外になり。幸い間隙水圧計は良い測定結果を与えていることが多いので、このような場合には充分その成果が期待し得る。

4. 測定の方法と重点の置き方

ダムにおける測定の方法は大別して

(i) 施工管理 (ii) ダムの安全管理 (iii) 構造解析

に分けられる。これらについて測定の方法の置き方について述べてみよう。

4.1 施工管理

施工管理を目的とした測定は主としてコンクリートの温度規制のための温度の測定と、継目グラウトを行なうダムにおいては継目グラウトを行なう時期の選定、継目グラウトの施工中の継目の開閉状況を見るための継目の開度の測定である。これらの測定は現在コンクリートダムの施工には不可欠なものとなっており、今後更に必要性は高まっていくと考えられる。

最近では高圧グラウトの施工管理のために逆ブラムラインを始めとしていくつかの計器が用いられており、今後新しい施工技術が導入される毎に新しい計器が開発され、新しい測定が行われなければならないと考えられる。

4.2 ダムの安全管理

ダムの安全管理方法を検討するに当たって過去のダムの破壊例をふりかえてみるのは参考になると考えられる。

ダムの破壊例として我々の記憶に生々しく残っているのはアメリカのセントフランシスダム、フランスのマルパッセダム、イタリーのパイアントダムである。このうちパイアントダムは地這りによる越流でダム本体は大きな破損を受けていないので除外することになると、セントフランシスダムとマルパッセダムの2つであるが、これはいずれも十分な測定が行なわれていなかったため、破壊前にどのような現象が現われていたか明確な報告はない。しかし、いずれも基礎岩盤の欠点から生じたもので、破壊の直前に急激な漏水量の増加が報告されている。従って漏水量の急激な増加は明らかな危険信号であるといえる。しかし、この状態でダムの異常を発見したのでは手遅れである場合もあり、或いは直ちに水位を下げて対策を検討する必要があるであろう。我々のダムの安全管理の主目的はこのような状態になる前に、できるだけ早い時期にダムの異常を捕え、水位を下げる等、事態に至る以前に対策を講ずるにある。

ダムの異常を捕える方法として設計値と比較することが考えられる。しかし、実際には設計々算は多くの仮定と省略の上に成り立っており、さらにダムの挙動に影響を与える全因子を考慮しているとは言い得ないので、必ずしも適当な方法とは言い得ない。

次に考えられる方法としてはダムに異常が現われるとしたら、どのような形で現われるかを想定し、これからダムの異常を早期に発見するように努めることである。この方法は極めて現実的な考え方であるように思われる。そこでもう一度材料の性質にもどって考察を加えてみよう。

一般に完全弾性体に荷重をかけた場合には載荷時間を長くしても変位の増加はないから図-16(a)

のような変位・時間曲線を描く。次にコンクリート、岩盤等はかなり低い応力でもクリープする性質があるから、破壊強度より或る程度小さい応力をかけた場合、図-16(b)に示すような変位・時間曲線を示す。この場合、変位の増加する割合は時間とともに減少し、或る一定値に変位が達すると、その後は変位は増加しなくなる。

次にコンクリート、岩盤等に破壊荷重に近い荷重をかけたとき、および軟い金属材料に弾性限界をこえた荷重をかけたときは図-16(c)に示すような変位・時間曲線を示す。この場合或る程度まで変位が増加すると破壊が生ずる。

更に図-16(c)に示した場合よりも破壊荷重に近い荷重をかけた場合には図-16(d)に示すような変位・時間曲線が現われる。この場合には変位の増加する割合が時間とともに増加し遂に破壊に至る。

このような材料の性質を考慮して、ダムでの測定値をみたときに次のような段階が考えられる。

- (i) 漏水量、揚圧力、たわみ、応力等の測定値が外荷重の変動によって増減するが、同一の荷重状態でみるときに時間とともに減少する場合。
- (ii) 測定値が同一の荷重状態でみるときに時間に無関係に一定している場合。
- (iii) 測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加しているが、その増加している割合が時間とともに減少している場合。
- (iv) 測定値が水位の上昇等荷重の増加に対して増加するが、荷重の減少によって減少しない場合。
- (v) 測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加していて、その増加する割合が時間に無関係に一定している場合。
- (vi) 測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加していて、その増加する割合が時間とともに増加している場合。
- (vii) 測定値が同一の荷重状態で急激に増加していく場合。

これらのうち、(i)は完成後、数年以上経過したダムでよく見られる現象で極めて安定した状態にあると云い得る。(ii)は、図-16(a)に相当するもので極めて安定した状態にあると云い得る。(iii)は湛水直後のダムによく見られる現象で、図-19(b)に相当するものである。この状態は図-16(b)からも容易に想像されるように、いずれは安定化する傾向を示しており、危険な状態とは云い得ない。

(iv)は(i)~(vii)の段階の中ではやや異質で、それが(iii)の段階にあって生じたものか、(v)~(vii)の

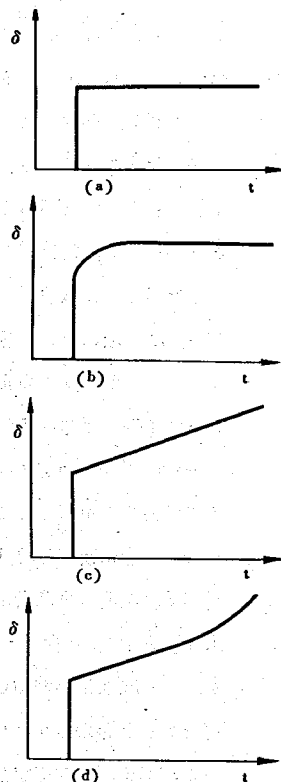


図-16 クリープ曲線

段階にあって生じたものか明確に見きわめる必要がある。しかし少なくともそれはダム の安定性に余裕のないことを示しており、一つの危険信号であることは間違いない。このような現象が現われた場合に (iii) の段階にあるか、或いは (v) ~ (vii) の段階にあるかはその前後の動きを観察する以外にない。筆者は或るダムにおいてこのような現象を観察したことがある。しかし幸い前後の動きを観察するに、明らかに測定値の増加は収斂する方向を示していたので (ii) の段階にあると判断し、そのまま観測を継続した。このダムは現在ほぼ (ii) の状態に達している。

(v) は危険な状態にあると云える。しかし、(iii) の状態にあって収斂が遅い場合にも (v) の状態にあるように見えることがある。この場合にはいずれにせよ安全性の余裕は小さいことを示しているのだから原因、対策等の調査をしておく必要がある。

(vi) は明らかに危険な状態であり、急速な対策が必要となる。

(vii) は破壊に近い状態であり、それが部分的な現象にとどまっているか否かによりその対策は異なってくるが、ダム の安全性に大きな影響を与える部分の測定値がこのようになったときは、水位を下げる等の緊急な処置が必要となろう。

一般にダム の測定数は数百個に達する。この各々について以上述べたような観察を下すことは極めて労力のかかることであり、またその必要はないと考えられる。ダム の安全管理に目的をしぼるならば入念に観察し続ける必要のある測定値はかなり限定される筈である。

例えば全漏水量は安定した値を示しているが、比較的漏水量が少ない (例えば $10 \sim 20 \text{ l/min}$) 排水孔の漏水量が増加したとする。この場合にその排水孔の漏水量は注意深く観察は続けるであろうが、その漏水量が増加したからと云って直ちにダム が危険であると考えたり、或いは緊急処置が必要であると考えたりはしないであろう。

また例えば他の測定値が安定しているのに、或る歪計または応力計が異常な値を示したとする。この場合にも恐らく、その計器が故障しているか、或いは蜂の巣とかヘヤークラック等により部分的には異常な現象が起っているがダム 全体としては危険であるとは考えないであろう。

このようにダム の安全管理を行なうに当って、巨視的な測定と微視的な測定とに分けて行なう必要があるが、どのような測定が巨視的な測定であり、どのような測定が微視的な測定であるかについて考察を加えてみよう。

一般に構造物が変形する場合に

$$\epsilon = \frac{M}{E I} Z$$

$$\theta = \int \frac{M}{E I} dx$$

$$\delta = \iint \frac{M}{E I} dx \cdot dx$$

にて示されるように、まず外荷重により各部に歪が生じ、それが積分されて廻転が生じ、さらに廻

転が積分されたものとしてたわみが生ずる。従って歪は部分部分の現象を示し、たわみは構造物全体の総合現象を示していると云い得る。

このような観点に立つと、例えばダムのある部分のひずみの測定値が異常を示しても、総合現象としてのたわみの測定値に異常を示さない限り、ダムは異常であると判断することは出来ない。しかしたわみの測定値に異常を示した場合に、たわみの測定値のみからその原因と対策を検討することは困難であり、部分部分の現象を示すひずみの測定値が必要となってくる。

このことを我々の体に例えるならば、健康を維持するためには常に或るいは定期的に体温、血沈、体のだるさの有無に留意すべきであり、これらに異常がなければほぼ健康な状態であると判断できる。しかし、もし異常が認められても体温、血沈等からだけでは病気の原因や治療方法を明らかにする事は困難であり、この場合には更にレントゲン写真、心電図といった精密検査が必要となろう。この精密検査については健康管理上からは常に行なう必要はないが、病因を探って適切な治療方法を知ろうとする場合に大きな役割を果たすことは勿論のことである。ここで、たわみを体の健康か否かを示す体温、血沈、体のだるさの有無に相当すると考えると、ひずみの測定はレントゲン写真、心電図のような個々の部分の精密検査に相当するものということが出来る。すなわちたわみの測定はダムの全体的な安定性を判断する巨視的な測定であるに対し、ひずみの測定はダムに異常が生じた場合に、その原因と対策を検討するために必要な微視的な測定であるといえる。

これと同様のことは漏水量についても云える。すなわち、全漏水量は総合現象を示し、個々の漏水量は部分部分の現象を示しており、このような見方からすれば揚圧力の測定は部分部分の現象の測定であると云える。

以上から、ダムの総合現象の測定として全漏水量の測定とたわみの測定があげられ、部分部分の現象の測定として個々の排水孔の漏水量の測定と、揚圧力の測定と応力、歪の測定とがあげられてくる。

ダムの安全管理を行うに当って、ダムの巨視的な測定により安定性を絶えず判断するとともに、ダムの総合現象に異常が生じた場合に備えて微視的な測定を行ない、その測定値を整理しておき、万一の場合に直ちにその原因と対策を検討し得るようにしておくことが必要となる。

4.3 構造解析

研究的な目的のための測定は、そのダムの特徴に応じて種々とられて来た。例えば重力ダムの縦継目の作用、横継目をグラウトする場合の力の分布の仕方、或はアーチダムの実際の応力分布と実験値、計算値との対比等である。これらは多種多様にわたっており、ここで一般的に論ずることは困難であり、また本書の目的でもない。そのいくつかの例については9章で述べることにする。

5. 配 置 計 画

測定計器の配置計画はその目的が充分果し得るように立てられなければならない。そこで前章で述べた目的別に述べることにする。

5.1 施工管理を目的とした配置計画

施工管理の上で行われる測定は主として温度と継目の開閉である。

温度の測定は温度管理を目的として行われ、ひびわれ防止、継目グラウトの時期の選定にとって不可欠のものである。即ち、ひびわれ防止について云えば、ひびわれの大半はコンクリート打設直後に生ずるコンクリートの水和熱による温度上昇のため生ずる。コンクリートの表面と内部の温度差、或はその後に生ずる温度降下による収縮によるものである。このためダム施工に当ってはコンクリートの表面と内部の温度差をなくし、最高温度を低くするような種々な温度管理が行なわれる。このような温度管理を行なうためには温度の測定は不可欠であり、更に万一ひびわれが生じたとき、その補修方法および今後のコンクリートにひびわれが再び生じないような対策を検討する上にも温度の測定値は不可欠である。

また、継目グラウトを行なうダムにおいては、継目が最も開いた最終安定状態でグラウトする必要がある。このような場合には二次冷却を行なう必要があるか、また行なう場合にはどの程度の期間を行なう必要があるかを知る上で温度測定が必要であり、また継目の開閉の測定も必要となってくる。更に継目の開閉の測定はグラウト時期の選定のみならず継目グラウトの作業中、グラウトの圧力により継目が押し開けられる傾向を有するが、これが或る程度以上になると既にグラウトの終了した部分を再び開けることがあり、これを防ぐためにも継目の開閉の測定がグラウト作業中に必要となる。また継目の開閉の測定はリグラウトの必要か否かの決定にとっても重要である。

このような目的から、コンクリートの温度は各ブロック、各グラウトリフト毎に大凡の状況を把握する必要があり、理想的な配置としては各ブロック、各グラウトリフト毎に上下流方向に数本の温度計を埋設し、上下流方向の温度分布を把握し、温度勾配と平均温度とを知り得るようにすることであろう。しかしこのような配置を行なうと温度計の数が多くなり、測定する手間も多くなるので不経済である。一般にコンクリート内の温度分布はダムの厚さと、打設してからの日数に支配される。そのため打設した時期が同じで厚さも似かよっているときは温度分布はほぼ似ていると考えて支障ない。このため、ダムの鉛直最大断面で3～5標高に上下流方向の温度分布を求めるようにし、他のブロック、グラウトリフトでは中央の温度から推定するように配置すればよいと考えられる。

上下流方向の温度分布を求める場合、コンクリート内の温度分布は表面近くでは温度勾配は著しく、内部では温度勾配はほとんど生じないので表面近くで密に、内部で疎に温度計を配置するとよい。また縦継目を有する重力ダムでの温度分布を求める場合に先行ブロックでは縦継目の近くでは

かなりの温度勾配は形成されるが、後行ブロックが打設されて或る程度経過した後は温度勾配はかなり小さくなる。従って、縦目グラウト時の選定に測定の重点をおくときは縦継目の近くに特に温度計を密に配置する必要はない。

また、ブロックの中央の温度を測定する場合に挿入式温度計を用いることがある。これは温度計の数が少して数多くの測定が行なえる点で便利であるが、温度計が周囲になじむまでには案外時間がかかり、不正確になる恐れがあり、埋設式の方がよいようである。

継目の開閉の測定も同様に各継目、各グラウト毎に行なう必要がある。この測定はダイヤルゲージ等の機械的な計器によりダムの表面で行なうことも考えられるが、一般に継目は表面では一日の間の温度変化により 0.5 mm 以上の開閉を行っており、一方継目グラウトを行なう場合、グラウト圧力による継目の開きの増加を 0.5 mm 以下に規定している場合が多いので、表面での継目の開閉の測定では充分な施工管理が行ない得ない恐れがある。従って継目面の中央に継目計を埋設するのが

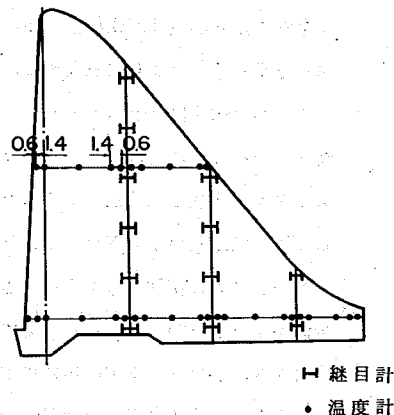


図-17 重力ダムの施工管理を目的とした配置例

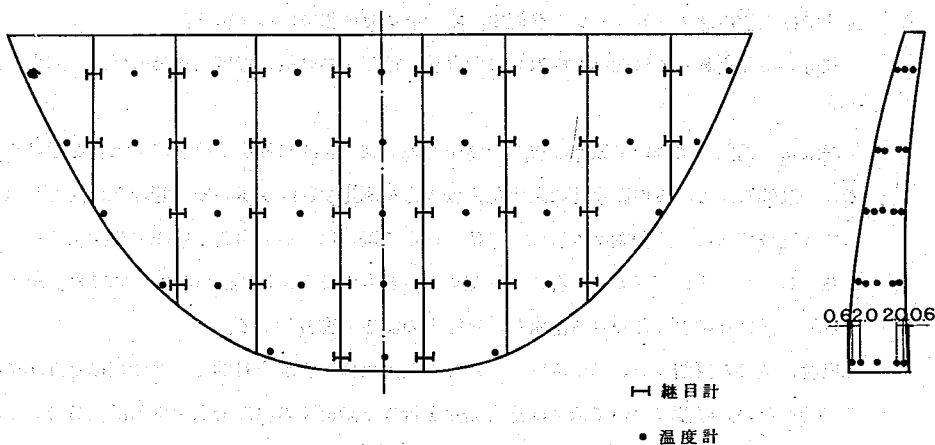


図-18 アーチダムの施工管理を目的とした配置例

よい。

なお温度計、継目計とも比較的信頼性が高いので余分に設置する必要はない。

最近、グラウトの施工管理にかなり測定計器が用いられてきている。しかしこれについては未だ実例も少ないので今後の検討課題としてここにはふれないことにする。

5.2 ダムの安全管理を目的とした配置計画

ダムの安全管理を行なうに当たってはダムの安全性を巨視的に把握することが大切であり、このためには全漏水量の測定とたわみの測定が最も適していることは前章で述べた。

全漏水量の測定は河床部、左岸側、右岸側と三つ位に分けて測定し得れば便利であろう。測定方法は2章に述べたように三角堰または集水水槽により測定するのがよい。

たわみの測定はブラムラインまたは視準測量により行なわれているが、このうちブラムラインが優れていることは既に述べた。ブラムラインは少なくとも最大断面に一つ設置することが望ましい。もしダムの形状その他からブラムラインの設置が困難な場合には最大断面の天端のたわみを視準測量により測定し得るようにしたいと考えられる。

アーチダムは横継目もグラウトされ、一体として挙動する構造物であるから最大断面のたわみが全体の挙動を表わしていると考えて差し支えないが、横継目をグラウトしない重力ダムおよび中空重力ダムは各ブロック毎に単独で安定をはかると考え、設計されているので必ずしも最大断面のたわみをもって全体の現象を把握し得るとは限らない。しかし、最大断面では応力も最も高く、また岩盤にかかる力も最も大きいから他に地質的、或は地形的に特に不利な断面がない限り最大断面のたわみから、ダムの安全性を判断しても支障ないと考えられる。しかし、地質的、地形的に問題があるブロックには追加してブラムラインを設置した方がよい。このことはアーチダムの場合でも全ブロックが一体として動くとはいえ、同様に考慮すべきことであろう。また、これらの問題がある部分では岩盤に逆ブラムラインを設置すれば現象が更に明確に捕え得る。

部分的な測定としては個々の排水孔の漏水量、揚圧力の測定、温度、継目の開度、応力の測定がある。

漏水量、揚圧力について言えば現在、揚圧力の低減の目的で適当な間隔に排水孔が設けられている。一般的にはこれらの排水孔の漏水量、揚圧力を測定すればダムの安全管理を目的とした測定としては充分であろう。勿論ダムによってはこれらの測定以外に漏水量、揚圧力を測定すべき場合もある。しかし、それはダムの状況により定めるべきもので、特に問題のないダムでは揚圧力の低減の目的で設けた排水孔における漏水量、揚圧力の測定で充分である。

温度、継目の開閉について言えば、これらの測定は施工管理を目的とした測定ほど詳細に測定する必要はない。温度について言えば応力測定を行なう断面での温度分布を知れば充分であり、継目の開閉について言えば継目がグラウト後、開いているか閉じているか判定すれば充分である。従って施工管理の目的で設置した計器以外に増設する必要があるのは応力計を埋設する断面における温度計のみである。

応力の測定については現在主として歪計と応力計とが用いられている。しかし3章にも述べたように歪計は感度が高く、温度補正量が大きいので安定した値が得がたいので、ダムの安全管理を目的とした場合には応力計を用いた方がよいと考えられる。応力計は歪計に比して安定した値を示すが、応力が $10\text{Kg}/\text{cm}^2$ 前後の場合には水位変動に対応した応力の変動を測定することは困難である。

従って高さが100m以下の重力ダムに使用した場合には十分な目的を達することは困難であろう。しかし、高さが100m前後の重力ダムではダム本体の欠点により事故が生ずることは考え難いので、地形、地質上に問題のある点については本体にブラムラインを設置するなり、岩盤に逆ブラムラインを設置すれば部分的な測定としても充分であろう。

100m以上の重力ダムおよびアーチダムでは発生する応力もかなり高くなり、応力の高い部分に応力計を設置すれば水位変動に対応した応力の変動も測定し得るのでかなりの成果を期待することができる。測定の目的がダムの安全管理にある場合には応力の高い部分のみ応力を測定すれば充分であり、従って重力ダムではダムベース附近をアーチダムではダムベース、アーチのクラウン、アバットメントのみの応力を測定すれば充分であろう。応力の測定を行なう場合に注意すべきことは応力は水位のみならず温度分布の影響を強く受けるので、応力測定を行なう断面では上下流方向の温度分布を明確に把握する必要がある、これが可能なように温度計を配置しておく必要があることである。またアーチダムではたわみが温度変化の影響を強く受けるので少なくとも3～5標高で上下流方向の温度分布を測定する必要がある。

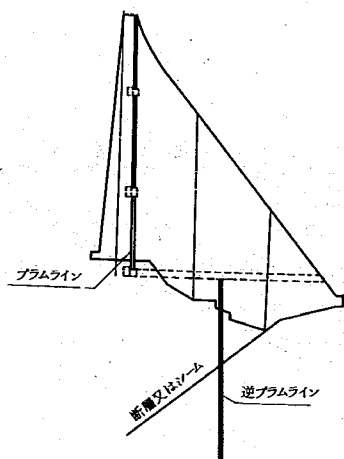


図-19 重力ダム，ダムの安全管理を目的とした計器の配置

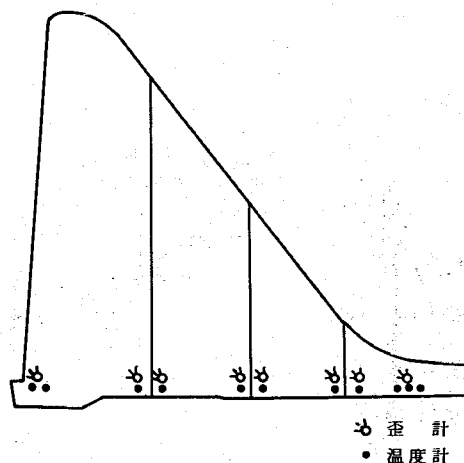


図-20 重力ダム，ダムの安全管理を目的とした計器の配置

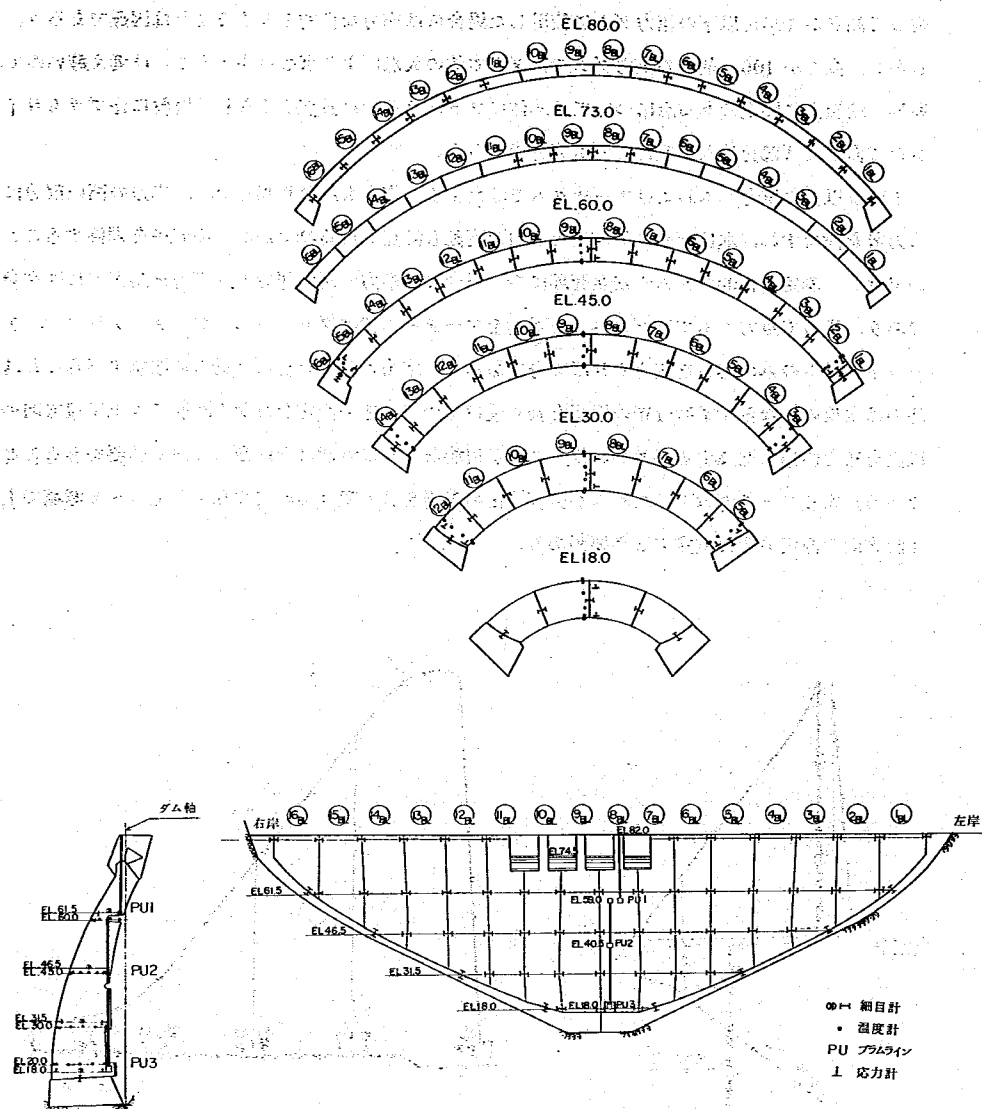


図-21 アーチダム、ダムの安全管理を目的とした計器配置

5.3 構造解析を目的とした配置計画

構造解析を目的とした測定としては、

- (i) 設計計算方法の検討
- (ii) 設計荷重の検討

を主とした目的として行なわれており、詳しくは

(i) 三次元的な応力の分布状態の検討

(ii) 継目の作用の検討

(iii) 施工中の応力の検討

(iv) 岩盤の動きの検討

等を目的として行なわれてきた。この夫々の目的、ダムの特徴に応じ配置計画が必要となってくるが、本書の主目的はダムの安全管理にあるので、これらについては省略することにする。

ただ構造解析を目的とした測定を計画するに当って注意すべきことは

(i) 解析の目的をしぼり、集中した測定を行なうことが大切である。すなわち既に述べたように、ダムの応力には水位のみならず温度等、種々な因子の影響を受ける。このため解析を行なうにはこれらの因子の影響を分離する必要がある、これらの因子がどのように変化しているか、またどのように影響を与えているかについて検討する必要がある。更に設置する計器の信頼性にも問題があるので或る程度重複した配置も必要となる。このため、あまり広範な解析目的を立て、計器を分散して配置すると解釈不能となる場合が多い。

(ii) 構造解析を目的とした解析を行なう場合に、感度が高い計器を用いる必要が生じ歪計を用いる場合が多い。歪計には3章にも述べたような問題点があるが、今迄に用いられたものがすべて不良であったというのではなく、埋設時に十分な注意が払われ、計器、コンクリートの膨脹係数等に対し、十分な検討がなされている場合には或る程度の成果が得られている。(上椎葉ダム、井川ダム) 要は他の計器に比して取り扱いに特に慎重を要し、更に十分な測定計画が必要であるということである。従ってこのような場合には慎重、且つ組織的な測定計画を立てるとともに、計器の設置に当っては入念な取り扱いが必要となってくる。

等である。このように構造解析を目的とした測定には入念な配置計画と計器の設置が必要となり、更に解析には多大の労力が必要となる。従ってこの種の測定はいずれのダムにおいても行なうという性質のものではなく、限定されたダムにおいてそのダムの特徴に応じた解析目的を立てて行なうべきものであろう。

6. 測定間隔

測定間隔は当然その目的により異ってくる。そこで、4章に述べた3つの目的に分けて述べることにする。

6.1 施工管理を目的とした場合

施工管理を目的とした測定を時期的に見れば次の3つの期間に分けて考えることができる。

- (i) コンクリートの打設後1ヶ月間。
- (ii) コンクリートの打設後1ヶ月より二次冷却開始まで。
- (iii) 二次冷却開始より継目グラウト終了まで。

施工管理を目的とした測定には前節で述べたように温度計と継目計が主として用いられている。

測定間隔は温度計、継目計いずれの測定も(i)および(iii)の期間は毎日1回、(ii)の期間は週1回程度必要である。

尚、継目グラウトの施工中はグラウトを行なっている継目のグラウトリフトのみならず、上下、左右のグラウトリフトに設置された継目計の測定を絶えず行なう必要がある。

6.2 安全管理を目的とした場合

安全管理の観点からは次の3つの期間に分けて考えることができる。

- (iv) 湛水開始後初めての満水まで、またはダムに異常が発見された場合にその対策が講ぜられるまで。
- (v) 最初の満水から、ダムが安定した状態に達するまで。
- (vi) ダムが安定した状態に達した時より以降。

すなわち(iv)の期間はダムが予期したように安定して行くかどうかを観察すべく重要な期間であると同時に、ダムを定常的な管理に移行するに当って補修すべき点があるかどうか、さらにその後の管理において留意すべき点があるかなどを検討する期間でもある。従って、すべての測定について測定間隔を密に行なう必要がある。

また、一般にコンクリートダムは最初の満水後3ヶ月ないし2年程度で安定した挙動を示すようになる。すなわち(v)の期間であるが、念のためダムがほぼ安定した状態に達したとみられた以降1年間はこの期間にあるとしてダムの安定性を確認すべきである。豪雪地帯において、管理段階では冬期に人を常駐させることが困難なダムであるが、少なくともこの期間は人を常駐させる必要があると考えられる。

(vi)の期間はダムが安定した状態に達した以降であって、この期間においてダムに異常が生ずる危険性は非常に少なく、従って(iv)、(v)の期間に比べ測定間隔は粗となる。

以上の3つの期間における測定間隔を、重要度の高い測定について示せば表-2の如くである。

表 - 2

期 間	計測項目 型式及び高さ		漏 水 量	揚 圧 力	変 形	歪又は応力	内 部 温 度
湛 水 開 始 よ り 満 水 まで	重 力 及 中 空 重 力	30m未満	毎 日	毎 日	週1回		
		30m以上 70m未満	毎 日	毎 日	週1回		
		70m以上	毎 日	毎 日	毎 日	週1回	週1回
	ア ー チ	30m未満	毎 日		週1回		
		30m以上 70m未満	毎 日	毎 日	毎 日		週1回
		70m以上	毎 日	毎 日	毎 日	週1回	週1回
満 水 後 3 年 ま で	重 力 及 中 空 重 力	30m未満	週1回	半月毎1回	月1回		
		30m以上 70m未満	週1回	半月毎1回	月1回		
		70m以上	週1回	半月毎1回	週1回	月1回	月1回
	ア ー チ	30m未満	週1回		月1回		
		30m以上 70m未満	週1回	半月毎1回	週1回		
		70m以上	週1回	半月毎1回	週1回	月1回	月1回
満 水 後 3 年 を 経 過 し た 以 降	重 力 及 中 空 重 力	30m未満	月1回		3月毎1回		
		30m以上 70m未満	月1回	月1回	3月毎1回		
		70m以上	月1回	月1回	月1回		
	ア ー チ	30m未満	月1回		3月毎1回		
		30m以上 70m未満	月1回	月1回	月1回		
		70m以上	月1回	月1回	月1回		3月毎1回

表-2は日本大ダム会議における「ダム構造物管理規準」の作成途上にあつて、主要な測定についての測定間隔としてとりまとめられたものである。これを70m以上のダムの場合を例にとり、更に詳細にわたる測定間隔及び整理方法をも含めて筆者らの考えを示すと表-3の如くである。

表 - 3 測定間隔および整理方法一欄表

測 定 の 種 類		全漏水量	漏水量1	漏水量2	揚圧力1	揚圧力2	たわみ	温度計1	温度計2	継目計	応力計 歪 計 1	応力計 歪 計 2
		左, 右岸, 河床部に 分けると よい。	全漏水量 に支配的 な影響を 与えるも の。または 50 $\frac{L}{min}$ 以上の もの5 ~ 10本	前項以外 のもの	0.2H以上 の揚圧力 を示すも ののみ	前項以外 のもの	本体および 岩盤のブラ ムライン, アライメン ト(岩盤圧 縮変位計, 応力計に準 ずる)	施工管理 用のもの	応力計2と同 一断面, 同一 標高のものお よびアーチダ ムにおいて最 大断面に3 ~ 5標高に上下 流方向に数本 埋設したもの	全計器	安全管理の みを目的と するもの。 応力の大き い部分のみ 10 ~ 50本	構造解析を 目的とする もの。 全計器
測 定 間 隔	コンクリート打設後1ヶ月間	/	/	/	/	/	岩盤の逆ブラ ムライン は施工管理 に用いるこ とがある この場合は 毎日1回	毎日1回	毎日1回	週1回	週1回	毎日1回
	コンクリート打設1ヶ月後より, 二次冷却開始まで	/	/	/	/	/	毎日1回	週1回	週1回	週1回	週1回	週1回
	二次冷却期間	/	/	/	/	/	毎日1回	毎日1回	毎日1回	毎日1回	週1回	週1回
	湛水開始後初めての満水まで, 又はダムに異常があったとき	毎日1回	毎日1回	毎日1回	毎日1回	毎日1回	毎日1回	/	週1回	継目グラウト 後1 ~ 2年で 中止	週1回	週1回
	初めての満水から湛水後5年まで	週1回	週1回	月1回	週1回	月1回	週1回	/	週1回	/	月1回	週1回
	湛水後5年以上10年以内	月1回	月1回	3月1回	月1回	3月1回	月1回	/	月1回	/	月1回 (この間測定点 数をかなり間 引く)	月1回
	湛水後10年以上	月1回	月1回	3月1回	月1回	3月1回	月1回	/	/	/	/	/
整 理 方 法	縦軸測定値 横軸時間のグラフ	○	○	/	○	/	○	○	○	○	○	/
	縦軸水位, 横軸測定値のグラフ	○	○	/	○	/	/	/	/	/	/	/
	表	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

すなわち、(iv)の期間は巨視的な測定のみならず微視的な測定についても測定間隔を密にし、入念な測定が必要であって、巨視的な測定である全漏水量、たわみについては毎日1回の測定が必要であり、さらに微視的な測定のうち個々の排水孔の漏水量と揚圧力についても毎日1回の測定が必要である。この期間に個々の排水孔の漏水量と揚圧力についてはその後の期間で注意して測定を継続すべきものを選び出す必要がある。すなわち漏水量について云えば、全漏水量に支配的な影響を与えるもの及び満水時に 50 L/min 以上のもの、同一水位で増加する傾向にあるもの、濁りのあるもの等を選び出す必要があり、また揚圧力については 0.2 H 以上の値を示すものを選び出す必要がある。内部温度、応力、ひずみについては週1回測定する必要がある。

(v)の期間は全漏水量、たわみの他に(iv)の期間に重要であると判断された個々の排水孔の漏水量、揚圧力及び応力、ひずみ、内部温度については週1回程度の測定が必要となる。また、(iv)の期間に重要でないと判断された漏水量、揚圧力については月1回程度で充分であろう。

(vi)の期間は、巨視的な測定を中心に、微視的な測定のうち重要度の高いもののみについて週1回程度の測定を継続し、応力計、ひずみ計については(iv)、(v)の期間でダムの高さの10~20%程度の急激な水位変動に対してははっきりした対応関係を示さなかったものについては測定を打切っても差し支えない。特に温度計、応力計、歪計等はいずれも埋設後に補修することは不可能であり、湛水後10年近く経過した後はもし測定し得たにしても、その値に信頼性があるかどうかは疑わしい。従って5年ないし10年後に測定器または切替スイッチが故障した時点をもって測定を打切っても差し支えない。これは、ダムの安全管理の面から測定が不必要というのではないが、一般にダムは湛水後5年程度でほぼ完全に安定化しており、それ以降においてダムに異常が生ずることは特殊な場合を除いて殆んど無いことと、計器の寿命を考えるならば妥当な処理であろう。

尚、継目計についてはその目的は主として施工管理であるが、ダムの安全管理の面からも各ジョイントが開いているか閉じているかは、現象を解釈する上で参考になる。従って継目グラウト後1~2年の間は月1回程度の測定を行ない、以後は測定を打切ってよい。

6.3 構造解析を目的とした場合

その目的が施工中の応力の解析にある場合には埋設後24時間から始めて以後1ヶ月間は毎日1回、以降週1回測定する。

完成後の挙動を解析する場合にはこれらの目的に使用する計器(歪計、応力計、温度計、継目計等)については週1回測定する。

これらの計器はその寿命から考えて湛水後5年で測定を打切ってよい。

7. 施工管理のための測定および解析

7.1 温度の測定および解析

施工管理のための温度の測定は 4.1 で述べた様にコンクリート打設直後の温度規制と二次冷却開始時期の選定、継目グラウト時期の選定のために行なわれる。

コンクリートの打設直後に生ずるひびわれは主としてコンクリートの平均温度、表面近くに生ずる温度勾配とコンクリートの強度が関係する。従って温度規制のための測定はコンクリートの平均温度と表面近くに形成される温度勾配を把握し得るものでなければならないが、これらの値を各ブロック、各標高で測定することは実際には不可能である。しかし、コンクリートの熱的性質が主として骨材により支配されることと、一つのダムで場所により骨材が大きく変わることは考え難いことを考慮するならば、いくつかの標高で上下流方向の温度分布を把握しこれに近い厚さの所ではブロック中央の温度から温度分布を推定するのがより实际的であろう。

また二次冷却開始時期および継目グラウト時期の選定のためにはコンクリートの平均温度の把握が必要となってくる。これについても温度規制の場合と同様な取扱いをすればよい。

これらの管理をより正確に行なうには、上下流方向に密に温度計を埋設した標高での上下流方向の温度分布の履歴を把握した後に、計算に用いるべき係数を逆算し、これを用いて各ブロック、各標高での温度分布の履歴を実際の打設工程に合わせて計算し、これと各ブロック、各標高の中央に埋設した温度計の測定値と対比して管理すればよい。この種の計算はかなり煩雑であり極めて労力を要するので以前は実際には不可能に近かったが、現在では電子計算機により処理し得るので容易に計算し得るようになっている。

測定値の整理方法としては先ず上下流方向に密に温度計を埋設した標高では、これらの測定値を縦軸測定値、横軸時間のグラフを描く。この場合同一ブロックで同一標高の測定値は記号を変えて一つのグラフに描くと理解し易い。また、上下流方向の温度分布図は打設後1ヶ月間は週1回以後は月1回程度描くとよい。1例を示せば図-22の如くである。また各グラウトリフトの各ブロックの中央附近に埋設された温度計については縦軸測定値、横軸時間のグラフを描く。

7.2 継目の開閉の測定と解析

継目の開閉の測定は継目グラウト時期の選定、継目グラウト時の圧力管理のために行なわれる。

これらの測定値は縦軸に測定値、横軸に時間をとったグラフを描くとよい。尚このグラフに継目計により測定された温度を併記するとよい。

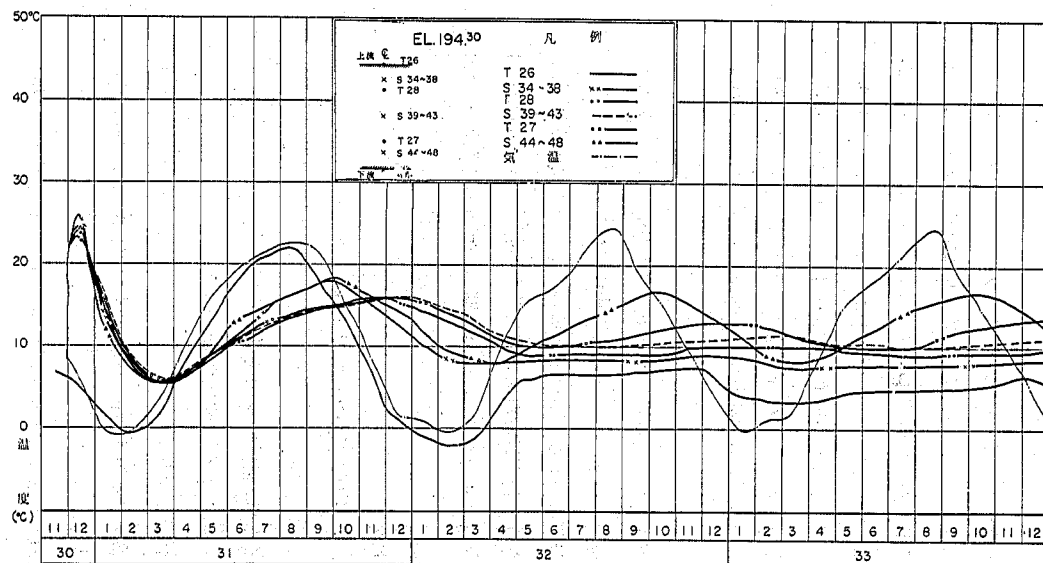


図 2 2(a) 鳴子ダム E.L. 194.30 温度分布図

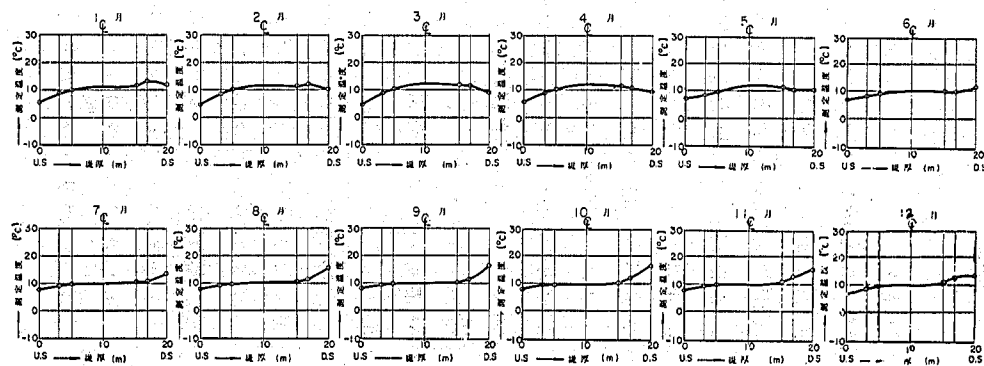


図 2 2(b) 鳴子ダム E.L. 194.30 温度分布図 (1~12)

図-23は継目計の測定値をグラフ化したものである。図-23(a)は継目計の測定値の1例を示しているが、このグラウトリフトは31年3月に継目グラウトが行なわれた。図-23(a)をみると継目グラウト以後、測定値は一定してほとんど変化していない。このことはこの継目のグラウトリフトについては継目グラウトは極めて良好であり、継目グラウト以降閉じた状態にあることを示している。

図-23(b)は継目計の測定値のもう1つの例を示しているが、このグラウトリフトは35年4月に継目グラウトが行なわれ、次いですぐ上のグラウトリフトが35年1月に継目グラウトが行なわれた。この図を見るに34年4月より、35年1月までの間は測定値はほぼ一定しているが、35年1月と3月の間に上部のグラウト作業により継目が1.5mm程度開かされており、これ以後4～5の継目計の温度が最も低下した時期に、継目が最も開き、温度が最も上昇する10～11月に最も閉じ、継目の開度の年間の差は0.2mm程度となっている。これは上部のグラウトリフトのグラウトにより下部のグラウトリフトの継目を開かせてしまった典型的な例で、以後、コンクリートの温度変化に対応して開閉を繰返している。

このように上部グラウトリフトのグラウトにより、下部のグラウトリフトの継目を開かせることはよくあることで、このようなことを避けるためにも、グラウト施工中に継目計を測定することが必要となってくる。また継目グラウトが充分行なわれなかったときはコンクリートの温度に対応して開閉するのが一般であり、これも継目グラウト後継目計が開いているかの判断の基礎となる。即ち継目グラウトにより継目がセメントミルクにより満たされ、継目が閉じた状態にあるときは測定値には、

- (i) 継目の開度が継目グラウト後一定値を示す
 - (ii) 上部のグラウトリフトのグラウト中、継目の開度が変化したとき
- の2つの条件を満足しており、
- (i) 継目開度がコンクリートの温度に対応して開閉しているとき
 - (ii) 上部のグラウトリフトのグラウト中、継目の開度が変化したとき
- のいずれかのとき継目は開いていると判断される。

このような方法から継目が開いているか否か判断し得るが、若しリグラウトが可能であれば、開いた継目にリグラウトすればよりよい結果が得られる。

尚、継目が開いているか否かはダムの挙動を解釈する上で重要であるので、継目グラウト後1～2年は測定を行なって各継目、各グラウトリフトとも継目が閉じているか否か判断することはダムの安全管理の面からも重要である。

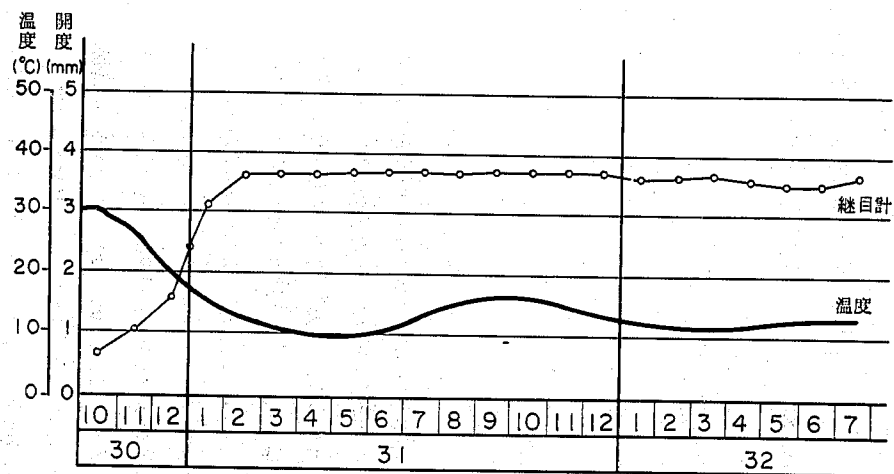


図-2 3(a) 鳴子ダム継目計測定図 (J 8.7 B-EL. 178.0)

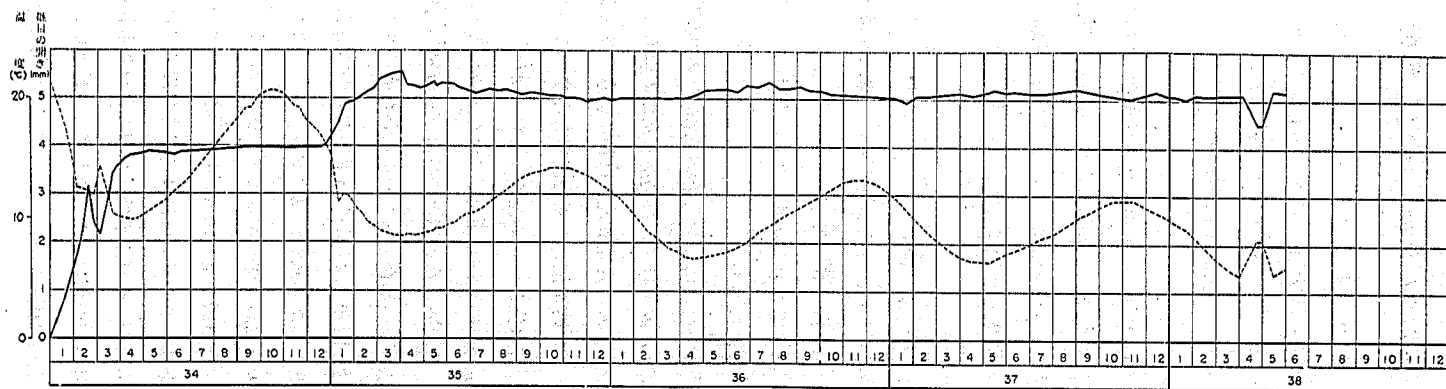


図-2 3(b) Eダム継目計測定図 (J 8. EL. 245.0)

8. 安全管理のための測定と解析

8.1 漏水量

ダムの破壊例として我々の記憶に生々しく残っているのはアメリカのセントフランシスダム、フランスのマルパッセダムなどであるが、これらは破壊の前に急激な漏水量の増加が認められている。これらの事実からも明らかなように、漏水量の測定はダムの安全性を判断する上でも極めて重要なものである。

漏水量は多くの場合設計の段階で検討されないことが多い。また時には基礎の透水系数から漏水量を推定することがあるが、基礎が岩盤である場合には実際と一致しないことが多いので同一の水位で漏水量が増加しているか否かで判断される。

漏水量は一般に排水孔、継目、クラックなどで生ずる。漏水の原因としては

(i) 地下水

(ii) 貯水池

が考えられ、さらに(ii)の場合の透水経路としては

(a) 岩盤内

(b) 堤体および堤体近傍の岩盤

が考えられる。

(i)の場合には漏水量は貯水位との対応関係はなく、天候、特に雨量と強い対応関係を持つ。このような漏水はダムを築造したためのものではなく、ダムを築造する以前からの湧水と見做し得るので、ダムの安全管理上は特に留意する必要はないと考えられる。(ii)の貯水池からの漏水ははっきりとした貯水位との対応関係を示す。このため湛水初期にあたっては、各排水孔はどの漏水量について貯水位との対応性があるか、雨量との対応性があるかについて調査し、それが貯水池からのものか否かについて識別しておく必要がある。

貯水池からの漏水で貯水位との対応関係を示しながらはっきりとした季節的な変動を示す場合と示さない場合とある。すなわち図-24はBダムの貯水位がEL 120m, 118mのときの全漏水量を昭和32年から38年の間の測定値からプロットしたものである。このダムの漏水量ははっきりとした季節的な変動を示しており、2~4月には漏水量は極めて多いが、9~11月には同じ水位でも極めて少なく凡そ $1/5$ 程度である。

一方図-25はAダムの昭和40年から41年の間の貯水位と全漏水量との関係を示したものである。このダムでは41年5月以前には個々の排水孔の漏水量の測定値の合計により全漏水量を求めたが、それ以後は三角堰および集水槽の水位により測定を行なった。図-25によると41年5月以前の値はバラツキが多く、貯水位と全漏水量との対応関係は安定していないが、それ以降の測定値は極めて安定した貯水位との対応関係を示している。この図から明らかなように、このダムの

全漏水量は貯水位に対してのみはつきりした対応関係を示し、季節的な変動を示していない。

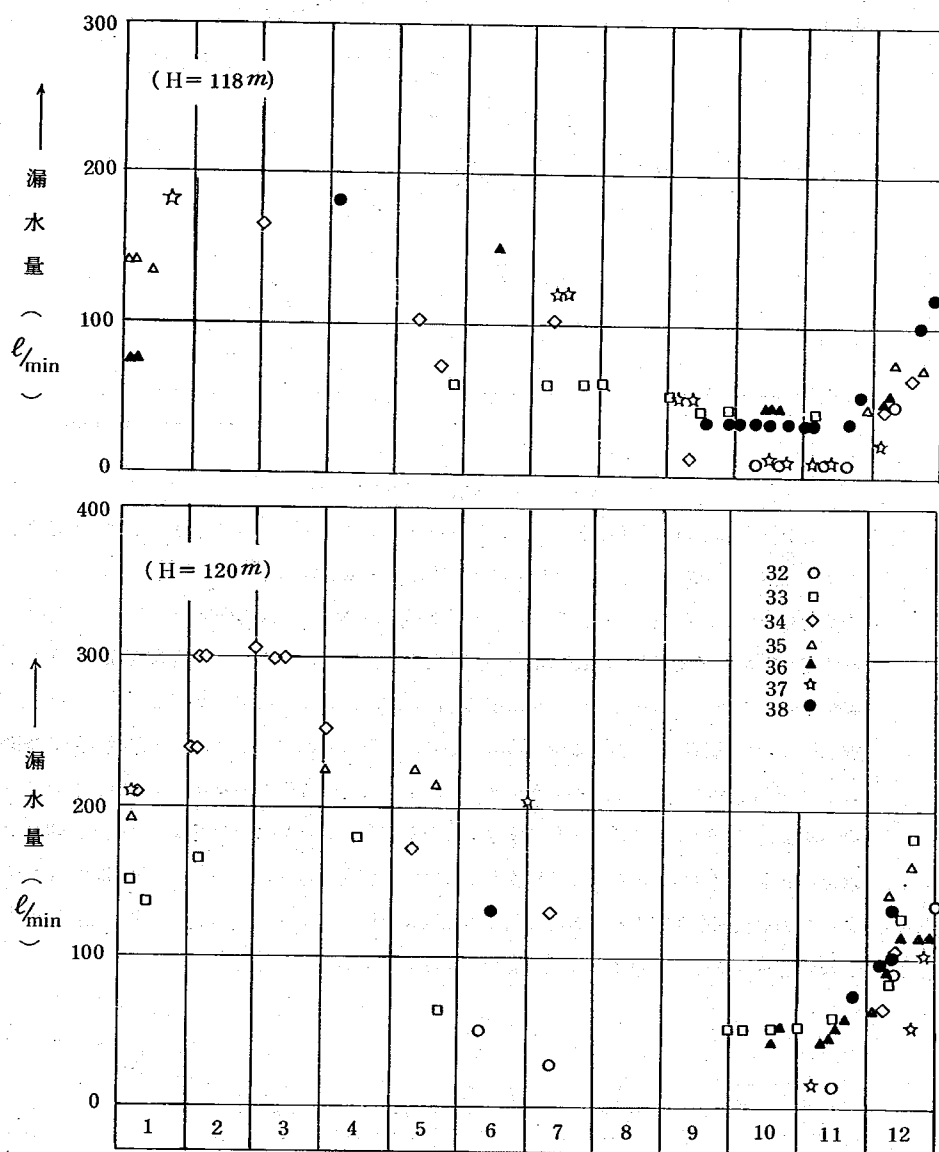


図-24 Bダム漏水量～時間

このように漏水量には季節的な変動を示すものと、示さないものがあるが、前者は明らかにその透水経路が季節的な温度変化により開閉している場合で、堤体および堤体附近の岩盤を透水経路としていと考えられるのに対し、後者は透水経路が季節的な温度変化を受けない岩盤内であると考えられる。事実、調査結果によると、Aダムの透水経路は岩盤内であったが、Bダムの場合は主として堤体内および着岩附近であった。

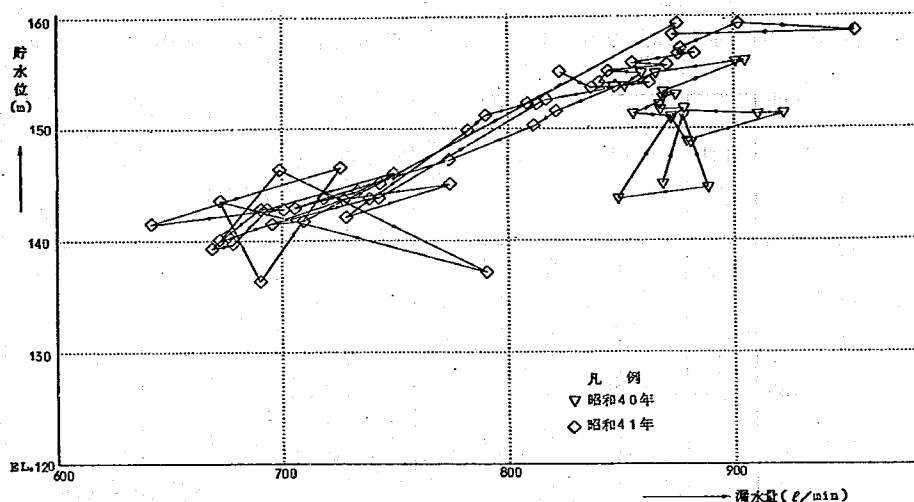
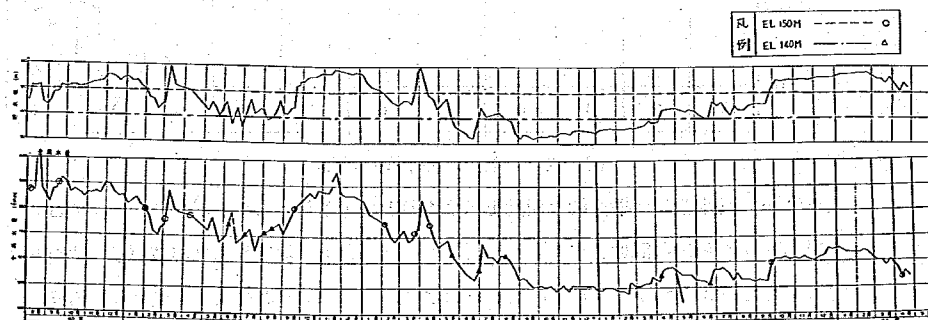


図25—Aダム水位と漏水量の関係

以上から漏水量の整理方法としては、図—26に示すように横軸に時間、縦軸に測定値をとったグラフを描き、それに貯水位の変動も併記して、漏水量が貯水位のみに対応しているか、或は季節的変動も受けているかを調べ、その主たる透水経路が堤体または着岩部であるか、岩盤内であるかの判定を行なう必要がある。漏水量が季節的変動を受けていなく、その透水経路が岩盤内であると判断される場合には図—25のように横軸に測定値、縦軸に貯水位をとったグラフを描き、同一の貯水位に対し漏水量が増加する傾向にあるか否かを正確に調べるとよい。一方漏水量が季節的な変動を受けるときは、図—24のようなグラフにより安定性を確かめる以外にない。このように漏水量が季節的変動を受けている場合に漏水状況が安定しているか否かを見るには同一の時期で同一の水位のときの漏水量を比較しなければならないので判定に時間がかかるが、短期的には水位を一定に保ち漏水状況を観察することにより或る程度は可能であり、特に漏水量が多く堤内温度の変化が少ない2月～5月にこのような測定を行なえば有効であろう。



図—26 (a) Aダム全漏水量

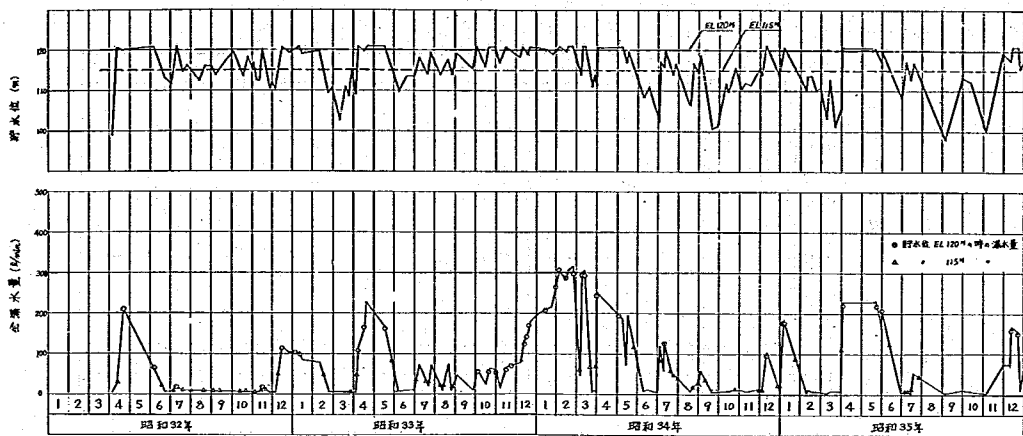


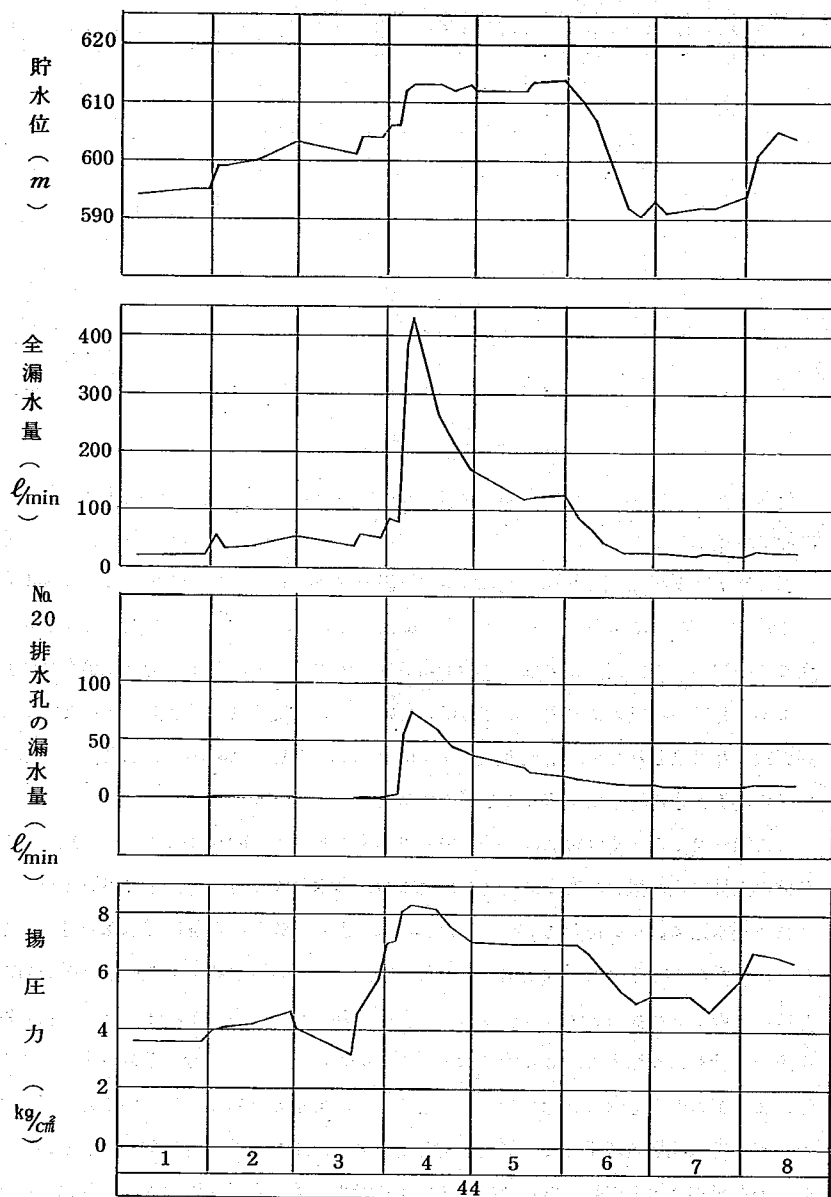
図-26 (b) Bダム全漏水量

漏水のもう一つの現象としては、最初の湛水の時に或る水位（満水位に近い場合が多い）から急に漏水が多くなることが時々見られる。これについて、2、3のダムの場合を例にとり述べてみよう。

図-27はFダムの貯水位、全漏水量、一個の排水孔（№20）の漏水量及び揚圧力の関係を示している。Fダムは昭和43年7月に湛水開始しており、満水位に至った昭和44年4月に急激な漏水量の増加がみられる。しかし、全漏水量が400 ℓ/min を越えた時点で漏水量は減少に変わり、44年6月以降は極めて安定した値を示している。この現象は、満水位に達した時点で新しい透水路が次々と形成されたが、全漏水量が400 ℓ/min を越えた頃から透水路は塞り始め、約3ヶ月で元の透水状態に戻ったとみることができる。

また図-27の一孔の漏水量と揚圧力を対比すると両者の動きは必ずしも一致しておらず、特に急激な上昇の後の減少の期間においては揚圧力は漏水量に比べて減少速度がおそいのが観察される。これは透水路に徐々に浮遊物がつまった場合に、塞りの程度は顕著に漏水量の減少となって現われるが、透水の圧力そのものは変化していないので、同一の排水孔での漏水量と揚圧力を比較した場合に、このような現象があらわれるものと考えられる。但し半年とか1年という長い期間でみると揚圧力も徐々に減少し、最終的には急増する前の状態に戻って行く場合が多い。この揚圧力の急増によりダムの安定性に懸念が持たれる場合には、排水孔を新たに設け揚圧力を低下させる以外にないが、排水孔を新設することは動水勾配を高め、透水路を拡大させたり、透水路が自然に閉塞されるのを阻害する可能性があるので、止水工を行なって漏水量を減少させた後に行なうべきであろう。

次に図-28はDダムの貯水位と一個の排水孔（S-6）の漏水量の関係を示すものである。Dダムは昭和45年10月に第三次湛水を開始し、同年12月にほぼ満水位に達しているが、この間水位の上昇に伴って漏水量は急激に増加した。しかし46年1月以降は貯水位の下降、上昇に拘らず一定した値となっている。これは、湛水期間の水位の上昇に伴って新しい透水路が形成されていったが、満水位に達した時点でほぼ透水路の拡大は止まり、その後は殆んど変化していないと見



図一27 Fダム貯水位・漏水量・揚圧力図

做し得る。従ってDダムのS-6の漏水量については、現時点では一応危険性は無いが、今後も充分注意して観察を続ける必要があると判断された。

また図一29はCダムの貯水位と一個の排水孔（No.20）の漏水量の関係を示すものである。

Cダムでは昭和40年10月～12月に第4次湛水を、また昭和41年2月～4月に第5次湛水を行なっており、第5次湛水期間の水位の上昇に伴って急激な漏水量の増加がみられた。しかも

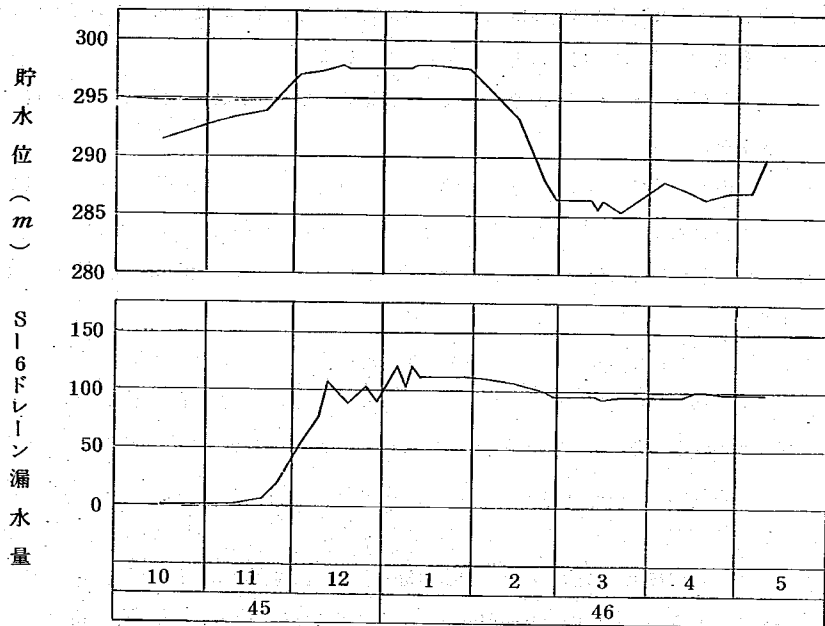


図-28 Dダム貯水位・漏水量図

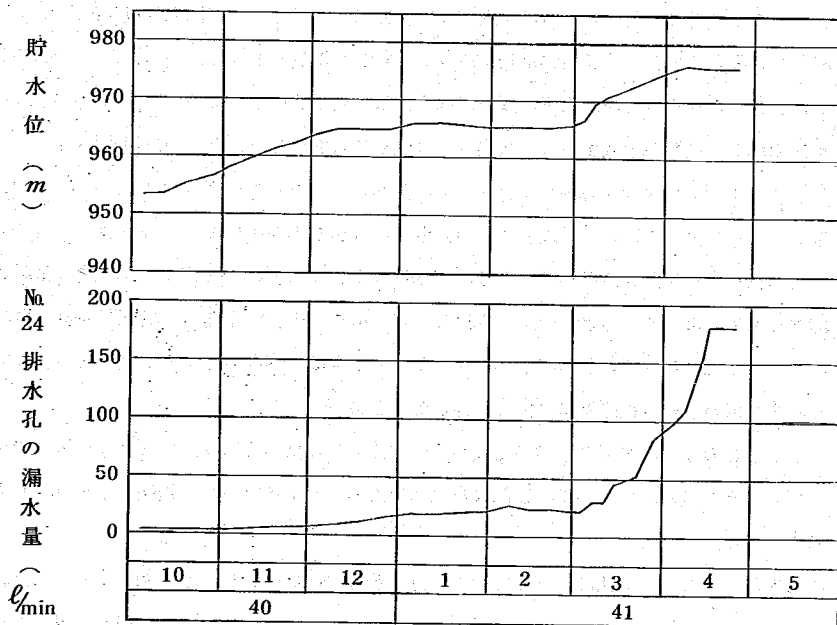


図-29 Cダム貯水位・漏水量図

満水位に達した以降も漏水量は増加を続けたため、水位を低下シグラウトを施すに至ったものである。

このように湛水初期における漏水量の急増は新しい透水路が形成されたためであって一応警戒すべき事態であるが、この場合に先ず注意すべきことは

- i) 漏水が濁っているか否か、また漏水を試験管等にとって漏水中に微粒の懸濁物質を含んでいるか否かを調べる。
- ii) 工事中の調査試料から、漏水の急増した部分の近くに断層、破碎帯、シーム等漏水により粘土等が洗い流され、透水路が拡大される可能性がある弱層が存在しているか否かについて調査する。
- iii) 漏水が急増した部分の各排水孔の漏水量とその部分の合計の漏水量の時間的な経過状況を調査する。

等がある。すなわち漏水が濁っている場合には透水路が拡大されつつあると考えられるので、直ちに透水路の調査と同時にグラウト等による補修対策に着手すべきであろう。漏水が全く濁っていない場合でも漏水が急増した付近に断層等の弱層が存在する場合には透水路が拡大される可能性があるため、直ちにその断層付近に対し追加グラウト等の止水対策に着手すべきであろう。

ところで、F、D、Cダムはいずれも湛水初期の水位の上昇に伴って急激な漏水量の増加がみられるが、ほぼ満水位に達した以降の漏水量の変化状況はそれぞれ異っている。これら3つのダムの一孔の排水孔の漏水量の値を観察すれば、Fダムでは最大値が75ℓ/min 前後であるのに対し、Dダムでは120ℓ/min、Cダムでは180ℓ/min に達している。従って、漏水に濁りが全く認められず、その付近に断層等の弱層が存在しない場合でも、一孔当りの漏水量が100ℓ/min を上廻り、漏水が急増した部分の合計の漏水量が300ℓ/minを上廻るときは、新しい透水路の流速はかなり早いと考えられるので、透水路の調査、補修工事に着手すべきであろう。特にその部分の漏水の日々に増加する割合が増大するような場合には直ちに貯水位を下げる等の処置も必要となろう。しかし、このように漏水量が急増した場合でも、漏水に全く濁りが認められず、その付近に断層等の弱層も認められず、また増加の最も著しい排水孔の漏水も高々100ℓ/min 前後で、その部分の合計の漏水量が300ℓ/min以下のときは、漏水により運び込まれた物質により、透水路がせばめられ、漏水が減少しだすことも多いので、水位を一定に保ち、その後の漏水の状況を入念に観察し続けるのがよいと考えられる。若し漏水が減少しだしたときは、漏水がほぼ一定量に安定するまで水位をそのまま保ち、その後徐々に水位を上昇させるとよい。

しかしこのような漏水の急増が比較的低い水位で生じた場合には、たとえその水位で漏水が減少しても、その後の水位上昇で再び漏水の急増を来す場合が多いので、補修工事を行った方がよいと考えられる。

漏水量の少ない排水孔については特に注意する必要はない。しかし、初めての満水以降でも増加したりする危険性はあるので、月1回測定し、表-4に示すような表に整理し、異常な増加がないかをみればよい。若し同じ水位に対し漏水量が増加する傾向があるときは、その排水孔は漏水量の多い排水孔と同じ扱いにし、細かに観察する必要がある。

い筈であり、また設計値と対比し得る値を示している。従って排水孔にブルドン管を取付けて測定する場合には研究的に排水孔間の圧力分布を知るためには両側の排水孔が開いた場合および閉じた場合等の圧力から、排水孔間の圧力分布を推定することが必要となってくると考えられる。しかし実際には基礎岩盤における揚圧力の分布はかなり局所的な影響を受け、圧力分布の推定はかなり困難であり、またこの種の研究はあまりなされていない。

ダム の安全管理を目的とする場合には、ここまでの検討は不必要であり、排水孔のcockを閉めたときの圧力を目安に管理すれば充分であるが、ここで注意すべきことは圧力はcockを閉めてからの時間により異なることである。従ってcockをしめてから、どの程度時間が経過してから揚圧力を測定すべきかということが問題になって来るが、現在の所これに対してはつきりとした規準は設けられていない。そこで筆者は二、三のダムで排水孔のcockをしめてから揚圧力の変化する状況を測定してみた。

即ち、五十里ダム、菌原ダム、二瀬ダム、鶴田ダムにおいて、揚圧力の特に大きい排水孔に対し、48～72時間の間ひんばんに測定し、揚圧力がcockをしめてから時間が経過するに従って変化する状況を調査してみた。尚、五十里ダムと菌原ダムにおいては水位の異なる二つの時期に測定し、貯水位と揚圧力の変化する状況との関係についても調査した。これらのダムでの排水孔の揚圧力とcockをしめた以降の経過時間との関係は図—33に示されている。尚、五十里ダム、菌原ダムについては異った水位において測定しているので、水位が異った場合にも同じような増加曲線を示すかどうかを調べるために揚圧力と水位との比(P/H)をとり、この増加状況を示せば図—31の如くである。

これらの図を観察すると

- (i) 圧力の増加していく状況は排水孔によりかなり異っており、圧力の大きさとも関係がない。
- (ii) 最初の1時間での増加は著しく、多くの排水孔は2時間以降の増加は僅かである。しかし、8時間位までかなりの増加を示すものもあり、30時間位まで或る程度の増加を示すものもある。
- (iii) 水位が異なる場合の増加状況を図—32でみると、水位が異っても P/H の増加の仕方は個々の排水孔においてはかなり類似しており、一、二 P/H の増加状況がやや異なるものもあるが、全般的にみて、 P/H の増加状況は水位には無関係で、各排水孔個々の曲線を示すと考えて差し支えないようである。

元来、排水孔は排水することにより、揚圧力を低下させることを目的として設けられるものである。従って、揚圧力を測定するために長時間cockをしめることは好ましいことではない。更に、排水孔の揚圧力は前述したように、設計と対比すべき値ではない。このため揚圧力の測定は排水孔の目的から云っても、測定の労力から云っても、cockをしめてから短時間に測定を終了すべきである。しかし図—31からも明らかなように、cockをしめてから1～2時間経過した後の値は小さいが、最終的にはかなり大きな値を示す排水孔もあるので、揚圧力を測定する排水孔については一応cockをしめた後の揚圧力を知っておく必要がある。

以上から、排水孔の揚圧力を測定する場合には、予め図—31のようなコックをしめた後の揚圧力の変化状況を測定し、平常の測定はコックをしめた後1～2時間後に行なうことにし、2時間後の揚圧力と最終的な揚圧力との比を各排水孔毎に求め、平常の測定の際は2時間後の測定値に前述の比を乗ずることにより、最終的な揚圧力を推定するのがよいと考えられる。

尚、この揚圧力～時間曲線は湛水後時間を経過するに従って変化していく可能性がある。特に漏水量、揚圧力が変化した場合には変化する可能性が強い。従って揚圧力～時間曲線は湛水初期には半年に1回、その後は2年に1回程度は測定する必要がある。

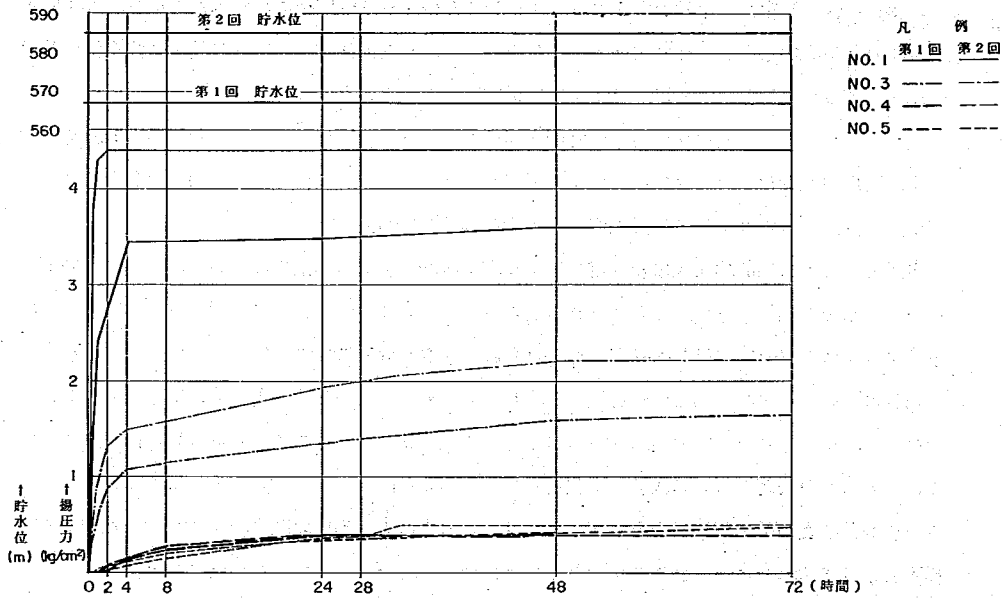
揚圧力の測定は局部的な現象の測定であつて、全体的な現象の測定ではない。従ってダム の安定 に対し、重要な関係を有すると考えられる所の揚圧力のみについて充分に注意すればよい。一般に重力ダムでは上流面に平行な監査廊にうけられた排水孔の位置で0.2 Hの揚圧力で設計される。この値は前述したように過去の測定例からすれば大きめの値であるので監査廊の位置で0.2 H以上の揚圧力を示すものは揚圧力が大きいものと考えて差し支えなく、これらの排水孔の揚圧力についてはダムの安全管理上からは注意して測定しておく必要がある。また間隙水圧計により、グラウトカーテン内または前面の揚圧力を測定する場合には0.2 Hより高い揚圧力を示すのは当然であるし、排水孔より下流側では0.2 Hよりかなり下廻った値を示さなくてはならない筈である。またアーチダム、中空重力ダムの場合にはダムの厚さも、排水孔の位置、揚圧力の測定箇所も重力ダムの規準で論ずることは出来ない。このような場合にはダムの厚さ、排水孔の位置、揚圧力の測定箇所も重力ダムの規準で論ずることは出来ない。このような場合にはダムの厚さ、排水孔の位置、揚圧力の測定する位置、およびグラウトカーテンとの相対的な位置関係により異つて来るのでどの程度の圧力から注意すべきか一概に決めることはできない。一般にグラウトカーテン内または前面での揚圧力は0.5 H程度でも特に注意する必要はなく、ダムの下流端近くでは0.1～0.2 H 程度でも一応注意すべきであろう。

測定は湛水開始より最初の満水まで毎日1回測定を行ない、排水孔にて測定する場合にはコックをしめてから1～2時間後に測定を行う。排水孔において揚圧力を測定するものについては、この間に0.15 H以上の揚圧力を示したものについて前述した揚圧力とコックをしめた後の経過時間との関係を測定し、最終圧力が0.2 H以上になるものについてのみ以後週1回の測定を行なう。この際最終圧力とコックをしめてから1～2時間後の圧力との比を求め、以後の測定値にこの比を乗じたものを揚圧力とする。即ち、揚圧力はコックをしめてから1時間後に測定すると決めたとする。図—33に示すような揚圧力とコックをしめてからの経過時間との関係を測定した際の最終圧力を P_f 、測定時（ここではコックをしめてから1時間後）の揚圧力を P_m とする。今、図—33に示すような測定を行なった後任意の水位での揚圧力をコックをしめてから1時間後に測定したところ P' であったとする。この時の最終圧力は

$$P = P' \times P_f / P_m \quad (8.1)$$

にて推定される。このようにして求められた揚圧力を整理すればよい。0.2 H以下の揚圧力を示す

(a) 五十里ダム



(b) 箇原ダム

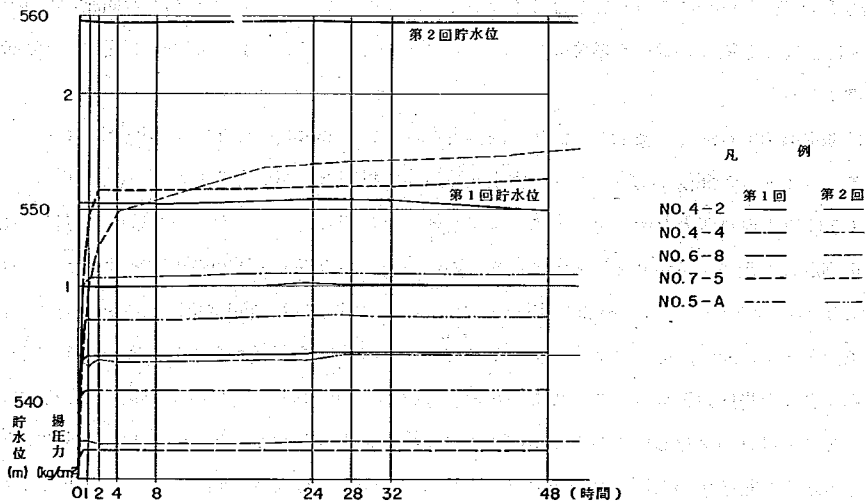


図-31 揚圧力-時間曲線図

(c) 二瀬ダム

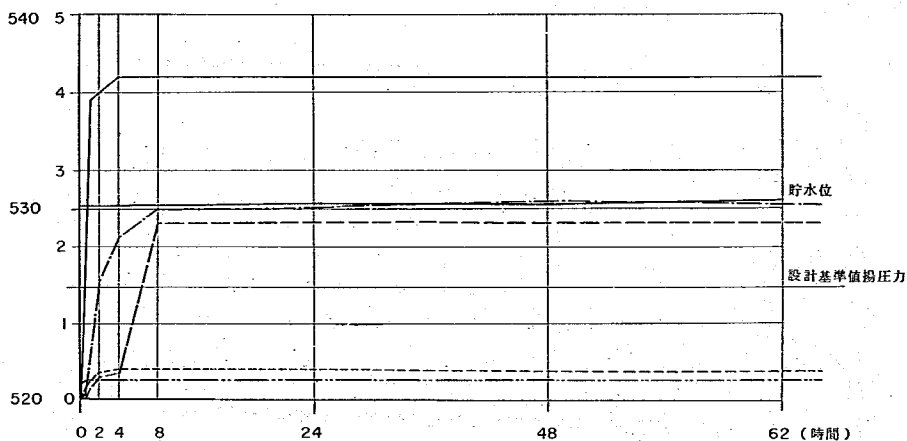
貯水
水位
(m)

揚
圧
力
(kg/cm²)

11月15日~18日

凡 例

— NO. 2
— NO. 3
— NO. 4
- - NO. 5
- - NO. 6



(d) 鶴田ダム

貯水
水位
(m)

揚
圧
力
(kg/cm²)

凡 例

I4-1 —
P-18 —
L4-3 —
PL-4 —
I5-4 —

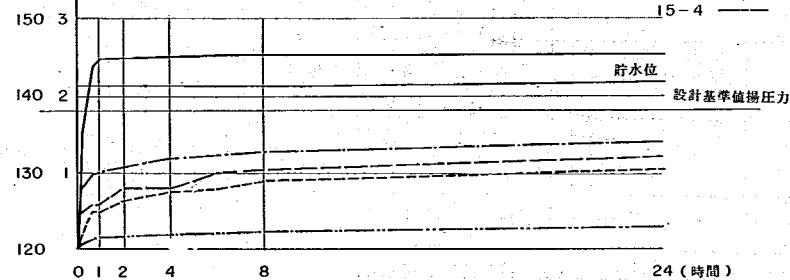


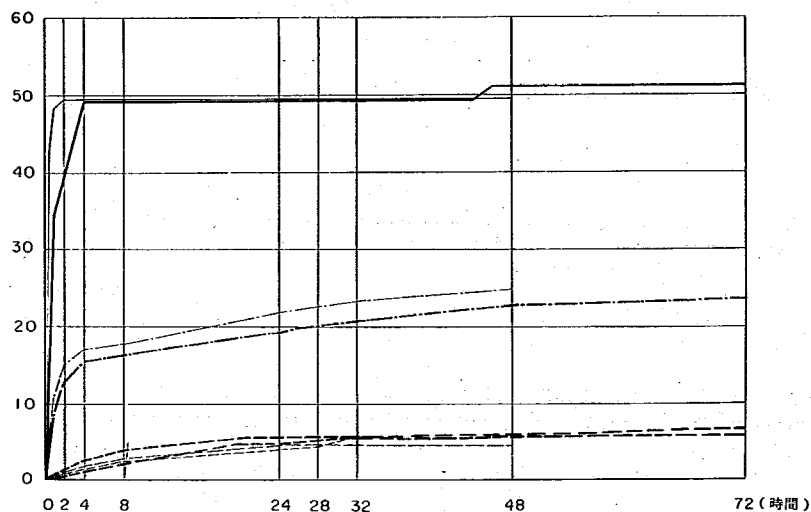
図-31 揚圧力-時間曲線図

(a) 五十里ダム

$\frac{P}{H}$
(%)

第1回 第2回
H 70.5 M 89.0

凡例
第1回 第2回
NO. 1 ———
NO. 3 ———
NO. 4 ———
NO. 5 ———



(b) 菌原ダム

$\frac{P}{H}$
(%)

第1回 第2回
H. 50.3 M 59.7

凡例
第1回 第2回
NO. 4-2 ———
NO. 4-4 ———
NO. 6-8 ———
NO. 7-5 ———
NO. 5-A ———

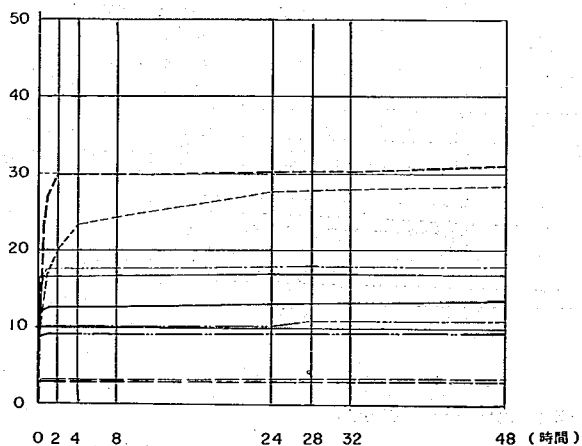
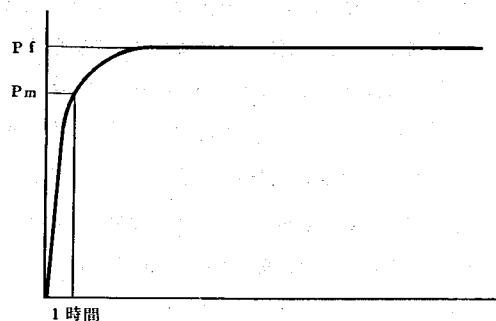


図-32 $\frac{P}{H}$ —時間曲線図

排水孔については以後1回の測定を行なえばよい。図一33に示したような揚圧力と、コックをしめてからの経過時間との関係は水位が低いときは圧力が小さく誤差も大きいので、満水位の70~80%以上の水位で行なうこととし、最初の測定は最初の満水の前後とする。なおこの関係は前述したように、その排水孔からの漏水量および揚圧力に変化したときは変わると考えられるので、漏水量



図一33

揚圧力が変化し易い湛水初期には時々調査する必要があるので最初に測定してから半年後にもう一度測定し、更に漏水量、揚圧力に大きな変化がないときは以後2年に1回測定し、 P_f/P_m の値を修正するものとする。

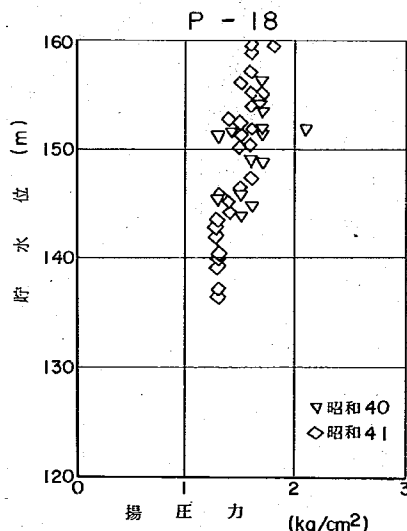
間隙水圧計により測定した値についてはこのような修正を行なう必要はない。一般に間隙水圧計は特殊な研究目的のためか、排水孔を設け難い所に設けられる。従って排水孔により測定する場合のように、0.2Hという規準で判断することはできない。このため、その測定目的から云っても最初の満水以後も週1回の測定を行なうべきであろう。

整理方法については最初の満水以降も週1回の測定を行なう揚圧力は漏水量の場合と同様に、縦軸に揚圧力を横軸に湛水開始後の経過時間をとったグラフと縦軸に水位、横軸に揚圧力をとった図を描くとよい。

前述したように揚圧力は局所的な影響を強く受ける。従って1~2孔、高い圧力を示しても同一の水位における揚圧力が同じかやや減少している傾向を示している限り、一応安全であると考えても差支えない。しかし、或る部分が全般に異常に高い圧力を示すときは何らかの対策が必要となり、漏水量が小さいときは排水孔を増設する等により揚圧力の低下を計る必要がある。

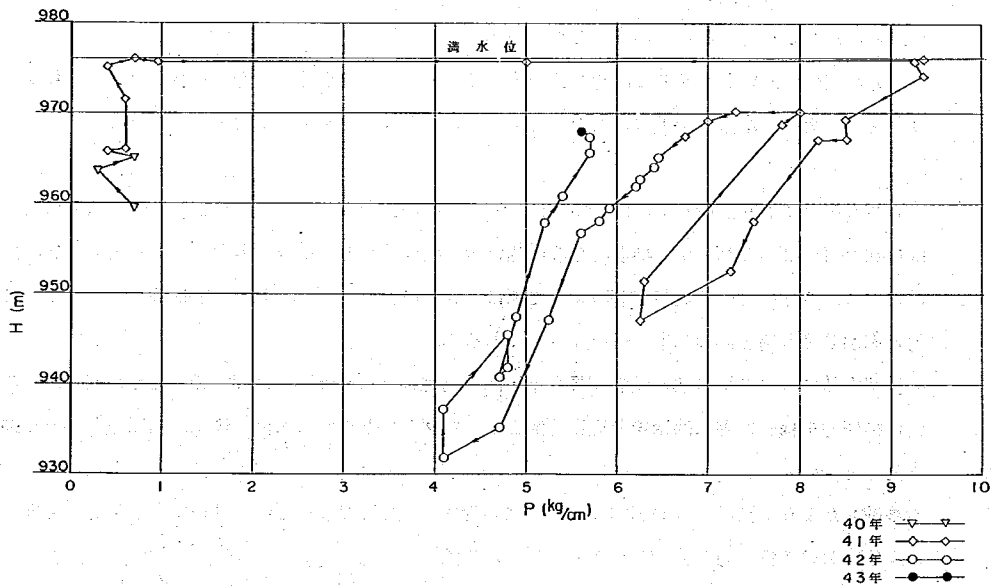
図一34はAダムにおける測定値を示している。これから、揚圧力は水位と強い対応性を示しており、また揚圧力は僅かではあるが40年に比して41年は減少していることを示している。

図一35はCダムにおける揚圧力を示している。このダムは41年3月末に初めて満水し、5月まで満水を維持したが4月中旬に急激に揚圧力の上昇を来し、水位の80%以上の揚圧力を示した。これは水圧の増加により新たな水みちが形成された



図一34 Aダム水位—揚圧力図

ことを意味する。この場合、このような現象が生じているのが局部的であるか、またどの程度の範囲であるか、更にこれによりダムの安全性に問題はないか、パイピングが生じないかである。このダムはアーチダムであつたので、直ちにダムの安全性が損われる危険性はなかったが、このまま新しい水みちが発達すればダムの安全性も問題になると考えられたので、直ちに調査が開始され、このような異常に揚圧力が高い部分は局部的であり、またこの部分の漏水量が特に増加していないので、新しい水みちはごく局部的のものであると判断された。その後の測定値をみるとこの新しい水みちは再びつまり、次第に揚圧力は低下していく傾向を示している。



図— 35 — Cダム水位—揚圧力図

8.3 たわみ

ダム本体および基礎岩盤のたわみはダムの構造的な巨視的現象を示すものとして、ダムの安全管理を行なう上で最も重要な測定の一つである。

たわみの測定値を測定するに当って重要なことは、ダムのたわみは漏水量、揚圧力のように貯水位のみに対応して変動するのではなく、季節的な変動も強く受ける点である。元来アーチダムは外気温、水温の変化の影響を強く受け、設計にも温度荷重が加味されているので、たわみが季節の変動の影響を受けることは知られていたが、一般に重力ダム、中空重力ダムのたわみは季節の変動を受けるとは考えられていなかった。しかし筆者が取扱った2～3の重力ダムではいずれもはっきりとした季節の変動を示していた。なおダム本体およびそのごく近傍に透水路を持つ漏水の場合も季節的な変動を受けることは既に述べたが、その解析方法については詳細に論じなかったので、ここでは簡単な図解法、影響を与える因子、統計的解析方法、それらを用いての安全管理方法について述べることにする。

8.3.1 図解法

8.3.1.1 アーチダム

図-36は鳴子ダム(アーチダム)の貯水位およびたわみを縦軸にとり、横軸に時間をとったグラフである。この図には貯水位がEL 240 m, EL 245 m, EL 250 mのときのたわみを図からプロットし、同じ貯水位でのたわみを結んだ線が描かれている。これからこのダムは年間に20 mm程度の温度変化によるたわみの変化が生じている事がわかる。さらに同じ月、日の同じ水位でのたわみを比較すると昭和32年5月から33年5月に大幅に増加しているが、それ以降は各年での差は少なくなり、しかも僅かながら減少している。これは湛水開始後数ヶ月の間にクリープ等下流向きの撓みが生じたが、或る時期以降は値が一定し、さらに下流側に撓みにくくなってきているとみることができる。従って、このダムは非常に安定した状態にあると判断される。

これと同様な方法で湯田ダム(重力アーチダム)の場合についても検討を行なった。これを示すと図-37の如くである。この図には貯水位がEL 230 m, EL 225 m, EL 220 mのときのたわみをプロットし、同じ貯水位でのたわみを結んだ線が描かれており、これからこのダムは年間に10～12 mmの温度変化によるたわみの変化が生じていることがわかる。なお同じ

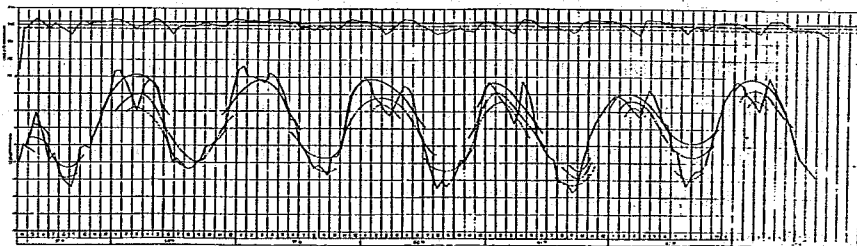


図-36 鳴子ダム撓み図

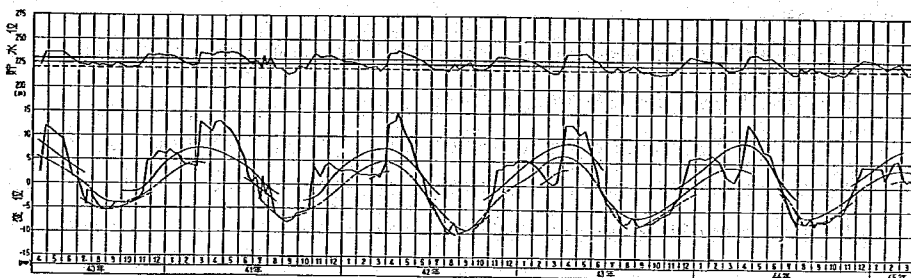


図-37 湯田ダム撓み図

月、日の同じ水位でのたわみを比較すると、各年の値は多少異なるが、その変化は一定の方向を示していないことから年毎の外気温の差に起因すると解すべきであり、ダムは比較的安定した状態にあると判断される。

8.3.1.2 重力ダム

次に重力ダムの撓みの図解法による解析を、Aダムの場合を例に述べる事にする。

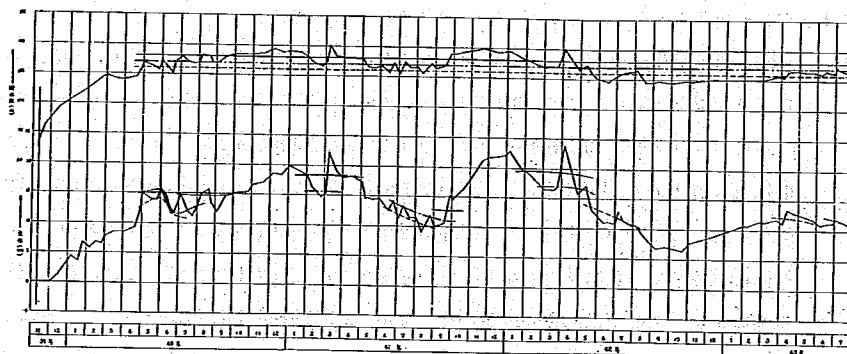


図-38 Aダム(NP-17)撓み図

図-38はAダムの貯水位と最大断面(17 Block)のプラムラインの測定値を示している。この図にはEL 140m, EL 145m, EL 150mの貯水位の時の撓みを各々破線、一点鎖線、実線で結んだものが記入されている。これらを観察すると、

- i) 一点鎖線、実線より、わずかながら周期的な温度変化による撓みが生じているのが見られる。
- ii) 貯水位及び温度を同一条件のもとに撓みの変化を検討するため、点線の5月～6月を年毎に比較すれば、41年以降は殆んど変化がなく、徐々にではあるが上流向の値に移行している。従って、41年以降は下流側に撓みにくくなって来ている事を示しており、ダムは安定した状態に向っていると判断出来る。

8.3.1.3 図解法の特性

以上、アーチダムと重力ダムについて図解法による撓み解析例を示したが、図解法の欠点と

して

- 1) 貯水位の変化が季節的周期性を持っていて、その間の水位変化が少ないときは季節的なたわみの変化を量的に把握することが困難である。
- 2) 同じ時期の同一水位でのたわみを年毎に完全に捕えることは出来ない。従って、ダムがどの時期から安定化したかを捕えることは困難である。

等が考えられる。しかし、長所としては

- 1) 貯水位の上下に対し、撓みがはっきりとした対応関係を示しているか、また或る時期の水位変動により撓みの急増が生じていないかなどを簡単に観察することによりダムの異常を発見する事が出来る。
- 2) ダムの撓みの特徴について、定性的な把握が可能である。
- 3) ダムが安定した状態にあるか否かについて、凡その判断は可能である。

などがあり、極めて簡単な方法であるから、ダムの安全管理を行なう上で不可欠の方法であると考えられる。尚、より明確に量的に把握するためには以下に述べる統計的な方法が必要となる。

8.3.2 ダムの撓みに影響を与える因子と重回帰分析法

ダムのたわみを統計的な手法により解析するに当って先ずダムのたわみに影響を与える因子について考察する必要がある。前項にも述べたようにダムのたわみには貯水位の他に季節的な温度変化の影響がある。

そこで先ずダムのたわみに季節的な温度変化がどのような形で影響を与えているかについて考察してみる。コンクリートの内部温度は図-13に示すような曲線分布をしており、もし断面に何も拘束がないときは各点の温度に比例した膨張が生ずる筈である。しかし実際に断面は連続体の一部であるために拘束があり、実際の温度分布とモーメントおよび面積が等しい直線的な温度分布を受けたと同じ伸びと廻転を生じ、実際の温度分布と直線的な温度分布との差(図-3.9の斜線部分)による熱膨張は拘束応力に転化する。

この直線的な温度分布を等置直線温度分布と名づけると、実際の温度分布と等置直線温度分布との差による拘束応力は他の部分の応力、変位に影響を与えないが、等置直線温度分布により生ずる伸びと廻転は他の部分の応力、変位に影響を与える。この伸びはその断面の平均温度(t_i)により生じ、廻転は等置直線温度分布の勾配(α_i)(以後温度分布と呼ぶ)により生ずる。

したがってたわみに影響を与える温度変化としては、いくつかの断面での平均温度と温度勾配をとればよい。

なおこれらの各断面の平均温度、温度勾配の変化はいずれも外気温の変化により生ずるもので

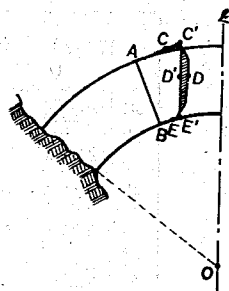


図-3.9

ある。平均温度、温度勾配の振幅は断面の厚さが厚くなるに従って小さくなる。温度勾配の位相の遅れは断面の厚さとはほとんど関係なく僅かであるが、平均温度の位相の遅れは厚さが厚くなるに従って大きくなり、厚さが10m程度で約1ヶ月、厚さ30m程度で約3ヶ月となる。従って各断面の温度勾配、平均温度は外気温または外気温に半月～3ヶ月の位相の遅れを持ったものに比例したものである筈である。事実、鳴子ダム、綾北ダム、室牧ダム、二瀬ダム、湯田ダム、天ヶ瀬ダム、川俣ダム等の内部温度を解析した結果は上記の事を裏付けていた。この中で鳴子ダムと湯田ダムの場合のダム厚と平均温度、温度勾配の振幅及び位相の関係を示すと表-5(a)、(b)の如くである。

表-5 (a)

鳴子ダム

	標高 (m)	位置	ダム厚 (m)	振巾 (mm)	位相 (日)	最 高		最 低		摘 要
						温度	月 日	温度	月 日	
平均温度	242.3	クラウン	6.6	8	-25	21.0	9月 5日	4.6	3月 5日	
	225.3	クラウン	11.2	3.3	-45	14.3	10月10日	7.9	3月20日	
	210.3	クラウン	14.8	2	-53	13.6	10月 5日	7.9	4月10日	
	194.3	クラウン	19.0	1.5	-37	11.5	9月15日	8.7	3月30日	
	178.3	クラウン	26.3	2.3	-73	15.0	10月15日	8.0	5月10日	
温度勾配	242.3	クラウン	6.6	0.6	29	1.0	7月10日	-0.75	1月25日	
	225.3	クラウン	11.2	0.8	3	1.25	8月10日	-0.4	2月15日	
	210.3	クラウン	14.8	0.6	-27	1.5	9月 5日	0	3月20日	
	194.3	クラウン	19.0	0.4	-27	0.8	9月10日	-0.15	3月15日	
	178.3	クラウン	26.3	0.3	-99	0.45	11月10日	-0.2	6月 5日	

表-5 (b)

湯田ダム

	標高 (m)	位置	ダム厚 (m)	振巾 (mm)	位相 (日)	最 高		最 低		摘 要
						温度	月 日	温度	月 日	
平均温度	227.5	11ブロック	6.0	9.0	0	17.3	8月15日	-0.7	2月15日	
	207.5	クラウン	14.0	4.4	-40	14.0	9月23日	5.2	3月26日	
	177.5	クラウン	25.7	1.6	-65	8.7	10月20日	5.5	4月20日	
温度勾配	227.5	11ブロック	6.0	—	—	—	—	—	—	
	207.5	クラウン	14.0	0.40	+13	0.55	8月15日	-0.25	1月20日	
	177.5	クラウン	25.7	0.14	-31	0.23	9月20日	-0.04	3月12日	

(但し位相は外気温との位相差を示し、外気温より遅えるものを⊖、早いものを⊕とする。)

アーチダムの場合は平均温度の変化、温度勾配の変化ともたわみにはっきりとした影響を与えるが、一般に薄肉のときは平均温度の変化の影響が著しく、厚肉になるに従って平均温度の変化の影響が小さくなり、温度勾配の変化の影響が大きくなって重力ダムでは温度勾配の変化の影響

のみとなる。

温度変化のほかにダムのだわみに影響を与える因子としては貯水位の変動と経年変化(岩盤、コンクリートのクリープによるもの)があげられる。これらの因子がダムのだわみにどのような形で変化するかについて考察すると、温度変化の影響は平均温度、温度勾配とも1次の式で表わされる事は理論的にも証明されているが、水位変動によるたわみはどのような形で表わされるか不定である。そこで一応 $f(h)$ の式で表わされるとし、時間と共に変化する量を $\log \frac{1+\theta}{1+g_j}$ (θ は時間) とし、ダムのだわみを

$$\delta = \sum a_i t_i + \sum b_i \alpha_i + f(h) + \sum k_j \log \frac{1+\theta}{1+g_j} \dots\dots\dots (8.2)$$

で表わされたとする。

ここに t_i, α_i は各標高の平均温度、温度勾配とし、 h は貯水位、 θ は時間、 a_i, b_i, k_j は統計的に求められる係数とする。

8.3.2.1 アーチダム

この解析を鳴子ダムを例にとって述べる。

まず水位によるたわみを2次式で表わされたとし、次に3次、4次式で表わされたとして比較検討した。

2次式で表わされたと仮定して解析した結果、

$$\begin{aligned} \delta(h^2) = & -8.2789 + 1.5869(t_i - 88840) - 0.9679(t_3 - 6144) - 15.899 \\ & (\alpha_1 - 0.1267) + 0.0051093(h - 179.6)^2 + 2.6917 \log \frac{1+\theta}{101} \\ & - 4.0293 \log \frac{1+\theta}{466} + 8.1563 \log \frac{1+\theta}{1561} \end{aligned} \quad (8.3)$$

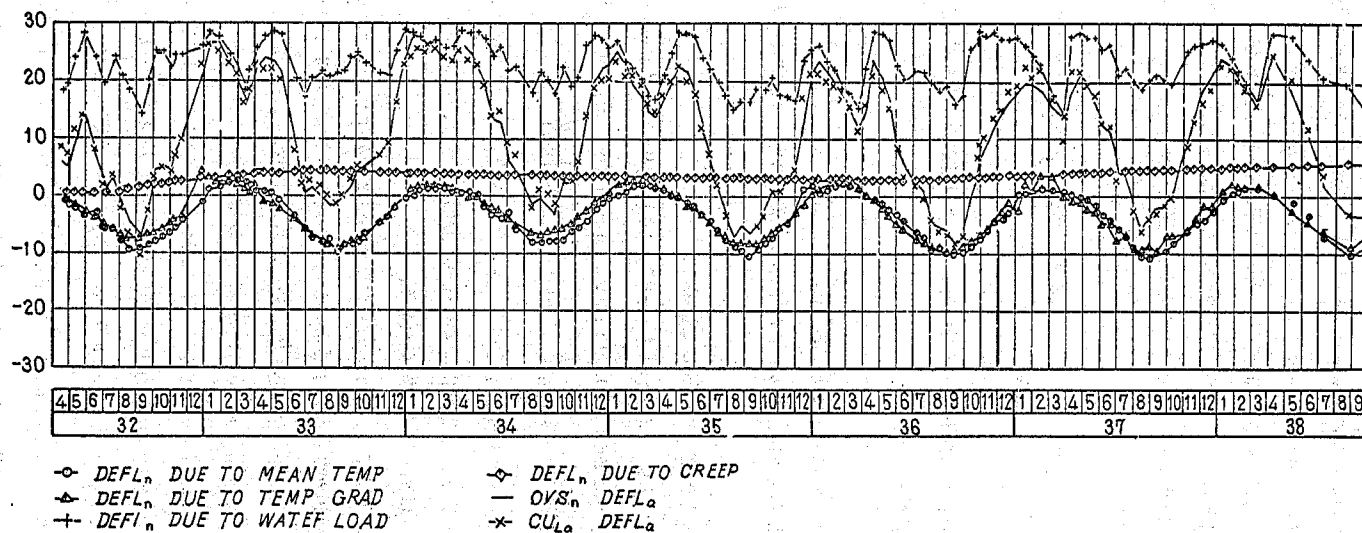
なる式が得られた。この解析結果にもとづき、水位による撓み、平均温度の変化による撓み、温度勾配の変化による撓み、経年変化による撓みに分離し、(8.3)式により求めた値と実測値との比較を図示すれば図-40の如くである。

この結果によると、(8.3)式による計算値と実測値とはかなりよく一致しており、また経年変化(大部分は岩盤のクリープによるものと考えられるが)は昭和33年6月以降は変化はほとんどなくなり、ダムはその後安定した状態にあると云い得る。

次に比較のために $f(h)$ を h^3, h^4 の形で解析した結果は夫々

$$\begin{aligned} \delta(h^3) = & 1.4716(t_i - 8884) - 1.0929(t_3 - 6144) - 12.198(\alpha_1 - 0.1267) \\ & - 0.80317(\alpha_3 - 0.0562) + 0.000050442(h - 179.6)^3 + 2.4889 \\ & \log\left(\frac{1+\theta}{101}\right) - 3.9785 \log \frac{1+\theta}{465} + 7.5854 \log \frac{1+\theta}{1561} \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} \delta(h^4) = & 2.5910 + 1.4156(t_i - 8884) - 1.0430(t_3 - 6144) - 1.2689 \\ & (\alpha_1 - 0.1267) - 0.76636(\alpha_3 - 0.0562) + 0.0000059259(h - 179.6)^4 \\ & + 2.7448 \log\left(\frac{1+\theta}{101}\right) - 4.3076 \log \frac{1+\theta}{465} + 7.6544 \log \frac{1+\theta}{1561} \end{aligned} \quad (8.5)$$



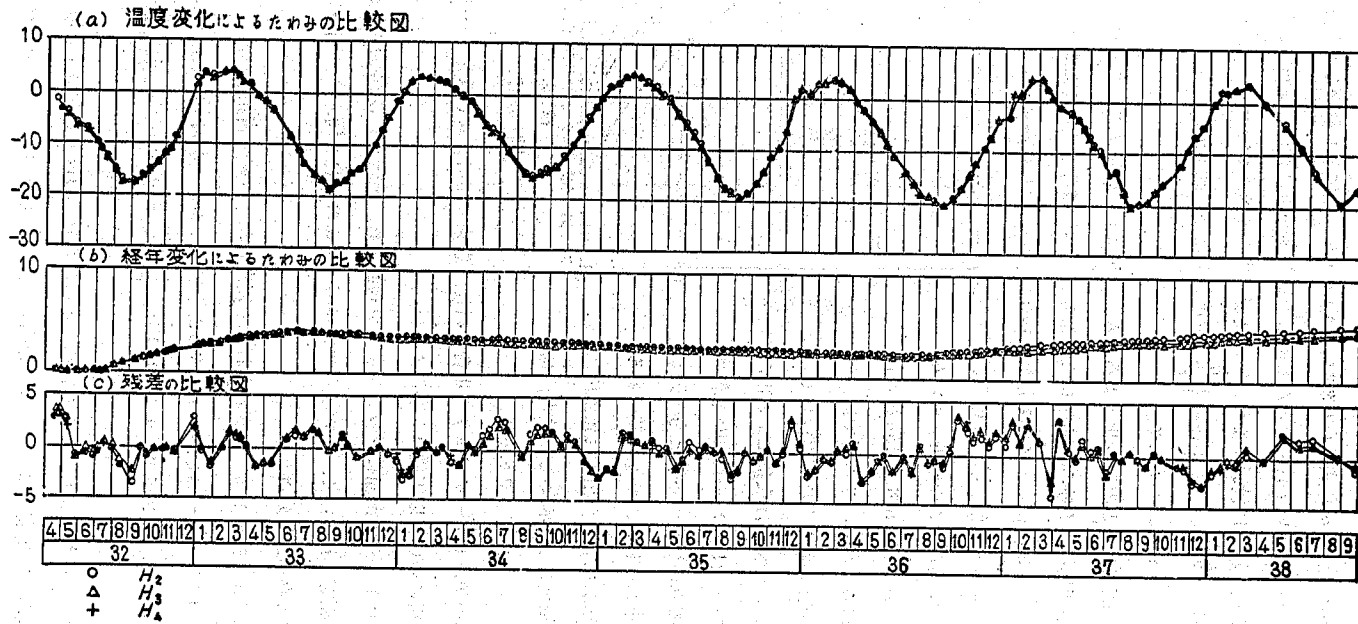


图 - 41

なる結果が得られた。さて (8.3), (8.4), (8.5) 式を比べると個々の係数はかなり異っているものがある。しかし残差 ((8.3)(8.4)(8.5) 式により計算した値と実測値との差) の不偏分散の平方根はいずれもほとんど同じで統計学的に優劣はつけ難い状態にある。そこでこれらの点を更に詳細に検討するために温度変化による撓み ($\partial T = \sum a_i t_i + \sum b_i \alpha_i$) と経年変化による撓み ($\partial \theta = \sum_j K_j \log \frac{1+\theta}{1+g}$) との残差について (8.3), (8.4), (8.5) 式の結果を比較した所図-41 の如くである。

図-41 を観察すると温度変化による撓みと残差は (8.3)~(8.5) では極めてよく一致しているが、経年変化による撓みと水位による撓みは互いに或る程度の差はある。これを更に詳細に観察すると、経年変化による撓みは湛水後1年以降では (8.3)~(8.5) の差はほとんど変化しておらず、ほぼ一定値を示している。

一方水位による撓みはこの解析に用いたデータは水位が EL 238m~254mの間が大部分を占めており、その間では $\partial H-h$ 曲線は各解ともほぼ平行している。これを云いかえれば水位による撓みは EL 238m~254mの間では水位変動に対する撓みの変化は各解とも一致しているが、その値にはかなりの差がある。

重回帰分析算により分離された水位による撓み、温度による撓みを示すと、図-42, 図-43 の如くである。

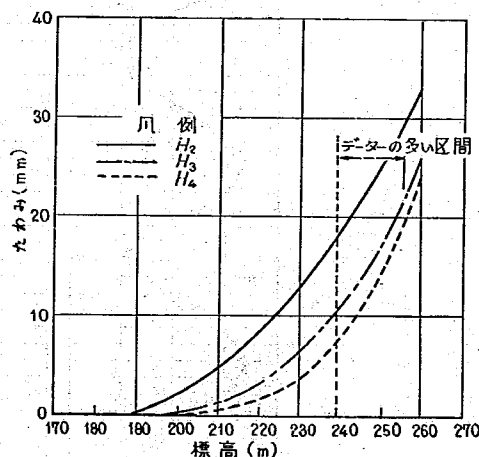


図-42

次に、鳴子ダム (アーチダム) の場合と対比の意味で湯田ダム (重力アーチダム) の場合の撓み重回帰分析について以下述べる事にする。

湯田ダムは中央最大断面にブラムラインが設置され、天端 (EL 240m) と標高 162m の間の撓みが測定されている。この撓みを先の鳴子ダムの場合と同様に重回帰分析計算を行ない各因子別の撓みに分離分析した。

まず水位による撓みを h^2 で表わされると仮定したときの解析結果は、

$$\begin{aligned} \partial(h^2) = & 0.76663 - 3.4824(t_1 - 7.82) - 11.667(\alpha_1 - 0.041) - 5.1015(\alpha_2 - 0.27) \\ & + 0.019071(h - 211.9)^2 + 2.6021 \log \frac{1+\theta}{1+100} - 3.1006 \log \frac{1+\theta}{1+190} \end{aligned} \quad (8.6)$$

が得られた。この解析にもとづき水位による撓み、平均温度の変化による撓み、温度勾配の変化による撓み、経年変化による撓みに分離し、更に (8.6) 式により求めた値と実測値とを比較したのが図-44 である。

この結果によれば (8.6) 式による実測解析値と実測値はかなりよく一致しており、また経年

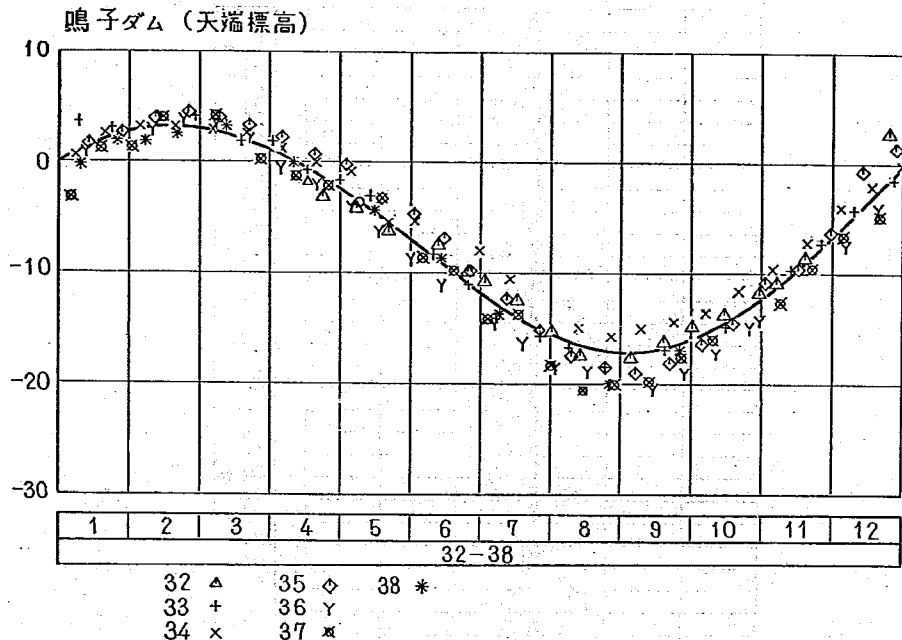


図-43

変化による撓みは昭和40年10月以降ほとんど変化がなくなり、ダムは安定した状態にあると云い得る。

次に比較検討のため $f(h)$ を h^3 , h^4 の形で解析した結果は、

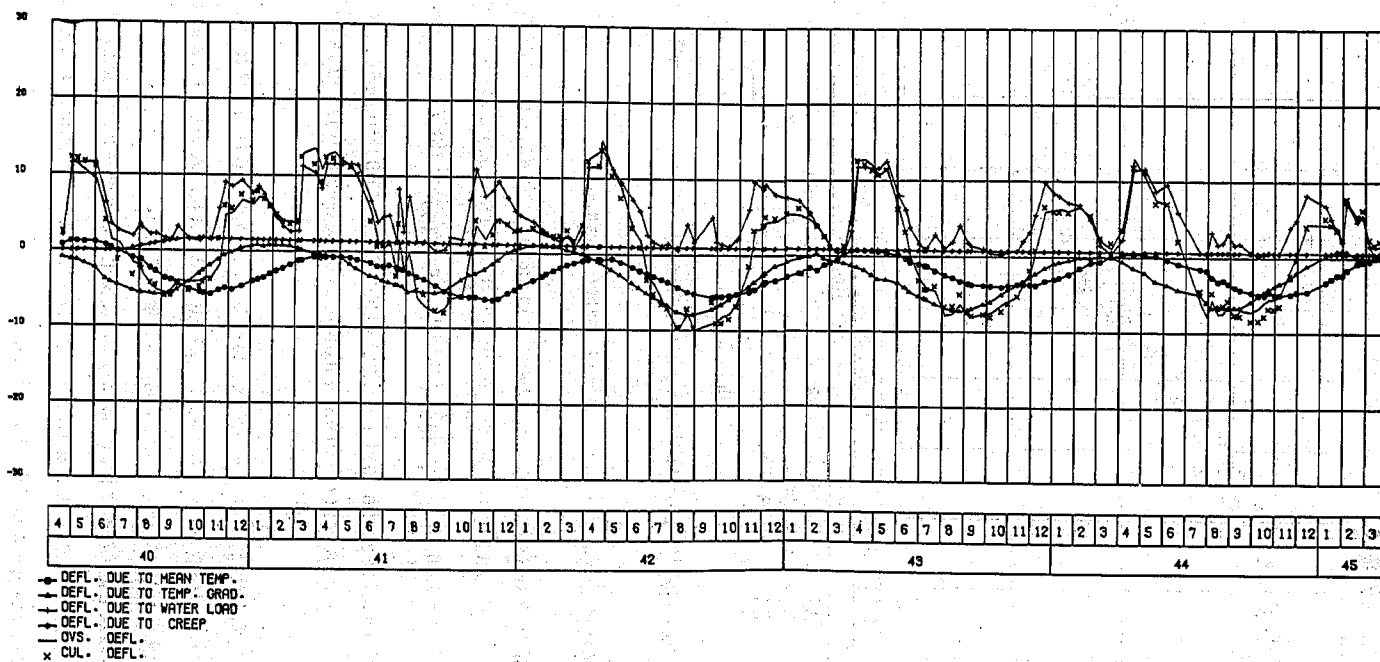
$$\begin{aligned} \delta(h^3) = & 2.3654 - 2.6753(t_1 - 7.82) - 0.16814(t_3 - 1.65) - 12.806(\alpha_1 - 0.041) \\ & - 2.7346(\alpha_2 - 0.27) + 0.19962(\alpha_3 - 0.95) + 0.00071607(h - 211.9)^3 \\ & + 1.8663 \log \frac{1+\theta}{1+100} - 2.1402 \log \frac{1+\theta}{1+190} - 198.77 \log \frac{1+\theta}{1+1800} \quad (8.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta(h^4) = & 3.8102 - 1.6802(t_1 - 7.82) - 0.35183(t_3 - 1.65) - 0.14542(\alpha_1 - 0.041) \\ & + 0.38472(\alpha_3 - 0.95) + 0.000027975(h - 211.90)^4 - 258.49 \log \frac{1+\theta}{1+1800} \quad (8.8) \end{aligned}$$

なる結果が得られた。(8.6)~(8.8)式を比べると、個々の係数はかなり異っているものもあるが、残差の不偏分散の平方根は(8.6)式が0.87383、(8.7)式が0.91039、(8.8)式が1.1046と殆んど大差なく、統計学的に優劣をつけ難い。

これらの点を更に詳細に検討するために温度変化による撓みと経年変化による撓みと残差について(8.6)~(8.8)式を比較したのが図-45である。又、水位による撓み、温度による撓みを示したのが図-46、図-47である。

図-37を観察すると(8.6)~(8.8)式を計算した温度変化による撓みと残差はよく一致しているが、経年変化による撓みと水位による撓みは各々或る程度の相違がある。これを更に



図一 4 4 撓み重回帰分析図

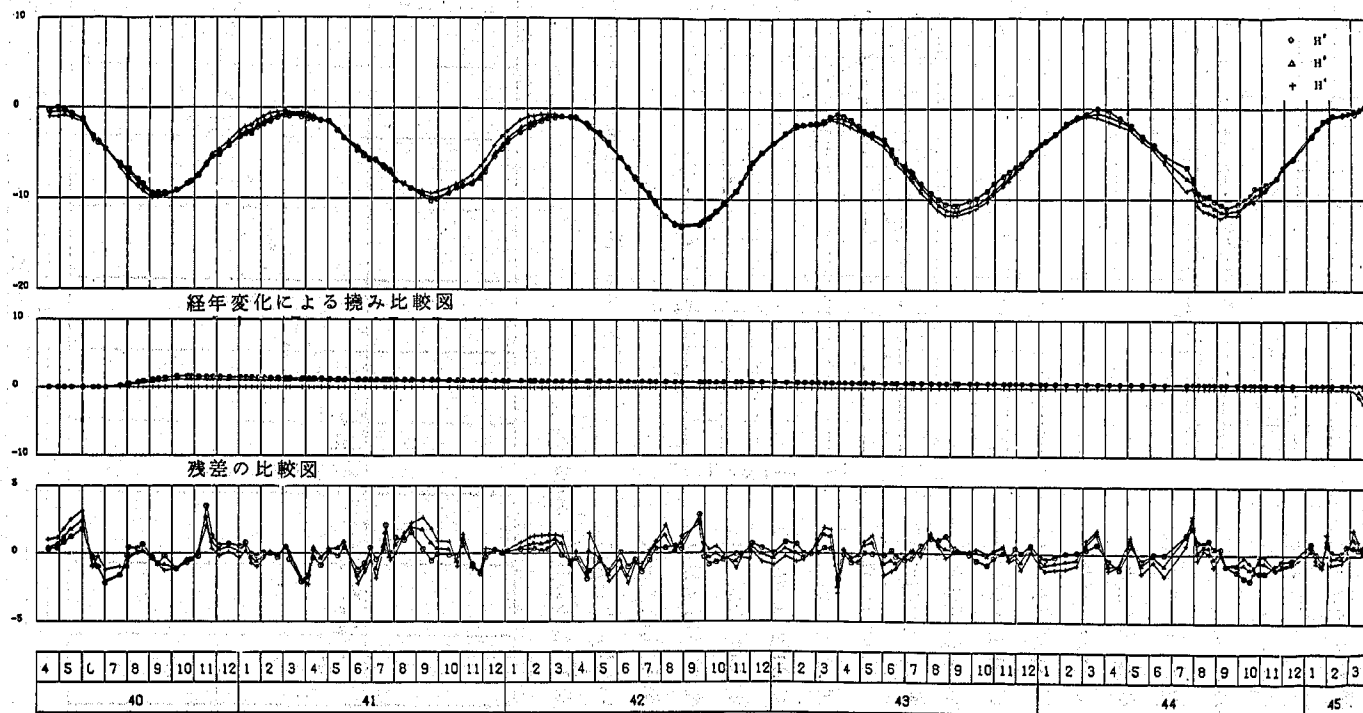


図-45 温度による撓み比較図

観察すると経年変化による撓みは湛水後1年以降では(8.6)~(8.8)式の相互の差はほとんど変化しておらず、ほぼ一定値を示している。一方水位による撓みについていえば、この解析に用いたデーターは水位が(EL220m~EL235m)がほとんどであり、この間での $\partial H-h$ 曲線は各解ともほぼ平行している。従ってEL220m~EL235mの間での水位変動に対する撓みの変化は各解とも一致しているが、その値にはかなりの差のあることがわかる。

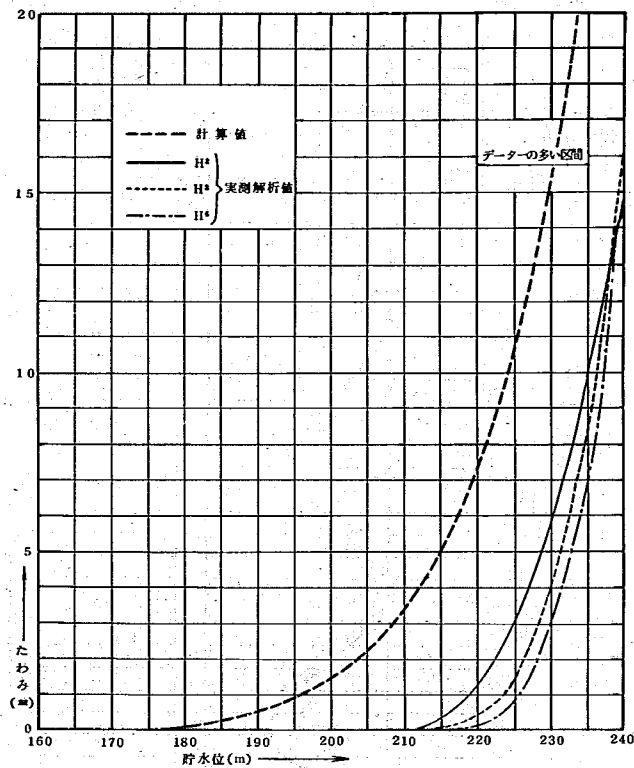


図-46 湯田ダム水位～たわみ図

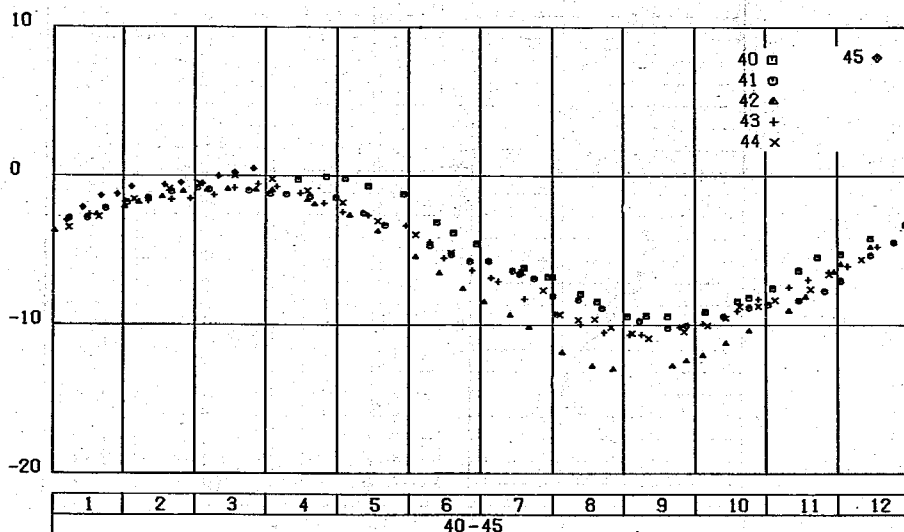


図-47 温度による撓み図

8.3.2.2 重力ダム

従来、重力ダムの撓みは水位の影響を受けるが、温度変化の影響は受けないと見て差し支えないとされていた。ところがAダム（重力ダム）の撓みについてアーチダムの解析例で述べたと同様の方法で重回帰分析を行なった結果、重力ダムの場合も温度変化の影響を受ける事が定量的にも明らかとなり、重力ダムの撓みに影響を与える因子として温度変化も考慮すべきである事が確認された。以下、Aダムの重回帰分析について述べよう。

Aダムには8, 11, 17, 22 ブロックの4断面にブラムラインが設置されており、これら4断面の撓みを水位による撓み $f(h)$ が h^2 の形で表わされると仮定して重回帰分析を行なった。

その結果、各々次のような撓み式が得られた。

$$\begin{aligned} \delta_{NP-8} = & 1.4879 + 0.18576(t_1 - 4.2) - 0.28548(t_3 - 0) + 0.0023379(H - 91.8)^2 \\ & + 4.027 \log \frac{1+\theta}{1+190} - 4.11 \log \frac{1+\theta}{1+465} - 4.2852 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{NP-11} = & 2.3353 + 0.15852(t_1 - 4.2) - 0.25528(t_3 - 0) + 0.0032068(H - 91.8)^2 \\ & + 3.4992 \log \frac{1+\theta}{1+190} - 1.3857 \log \frac{1+\theta}{1+465} - 9.5603 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{NP-17} = & -1.1639 + 0.2688(t_1 - 4.2) - 0.46366(t_3 - 0) + 0.0037627(H - 91.8)^2 \\ & + 4.5996 \log \frac{1+\theta}{1+100} - 3.8168 \log \frac{1+\theta}{1+190} - 6.3896 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{NP-22} = & 3.7575 + 0.34104(t_1 - 4.2) - 0.70936(t_3 - 0) + 0.23649(t_4 - 2.6) \\ & + 0.25661(H - 91.8)^2 + 7.0876 \log \frac{1+\theta}{1+190} - 6.3039 \log \frac{1+\theta}{1+465} \\ & + 5.4828 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{RP-8} = & 0.06654(t_1 - 4.2) - 0.10637(t_3 - 0) + 0.010471(H - 91.8)^2 \\ & + 5.0829 \log \frac{1+\theta}{1+100} - 3.2099 \log \frac{1+\theta}{1+465} - 1.7528 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{RP-11} = & 2.1478 - 0.07896(t_1 - 4.2) + 0.18954(t_2 - 2.3) - 0.14418(t_3 - 0) \\ & + 0.0012354(H - 91.8)^2 + 3.1588 \log \frac{1+\theta}{1+100} + 2.9508 \log \frac{1+\theta}{1+190} \\ & - 4.3613 \log \frac{1+\theta}{1+465} \dots\dots\dots (8.14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{RP-17} = & 2.4008 + 2.8405(t_1 - 4.2) - 0.18203(t_2 - 2.3) + 0.0023247(H - 91.8)^2 \\ & + 3.4474 \log \frac{1+\theta}{1+100} + 4.2472 \log \frac{1+\theta}{1+190} - 5.1695 \log \frac{1+\theta}{1+465} \\ & - 6.522 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{RP-22} = & 1.0170 + 0.22092(t_1 - 4.2) - 0.31982(t_3 - 0) + 0.0017359(H - 91.8)^2 \\ & + 1.0821 \log \frac{1+\theta}{1+100} - 9.5714 \log \frac{1+\theta}{1+190} + 5.7535 \log \frac{1+\theta}{1+465} \\ & - 6.5707 \log \frac{1+\theta}{1+830} \dots\dots\dots (8.16)\end{aligned}$$

この解析結果にもとづき、原因別に水位による撓み、温度による撓み、経年変化による撓みに分離したのが図-48である。又、水位と撓みの関係を示したのが図-49、温度による撓みを示したのが図-50である。以上の解析結果を考察すれば

- i) 図-48より実測値と実測解析値は極めてよく一致している。
- ii) 図-48及び図-50より周期的な温度変化による撓みがはっきりと表われている。従って、従来重力ダムの撓みは貯水位の影響のみを受け温度変化の影響は受けないと考えられていたが、この解析結果から重力ダムの場合もアーチダム同様に温度変化の影響を考慮する必要がある事が明確となった。
- iii) 経年変化による撓みは一般に湛水開始より約1年~1年半で安定した状態に入る。本ダムの場合もブロックにより多少の違いはあるが、昭和41年8月以降はほぼ一定した値を示している。従って図解法で述べた解析結果はほぼ妥当であった事が確認された。
- iv) 水位による撓みは図-49の如くであるが、この場合水位データーの多いEL145m~155mの区間での水位-撓み曲線は一応正しいと思われるが、他の区間では信頼性に乏しい。

等のことが云い得る。

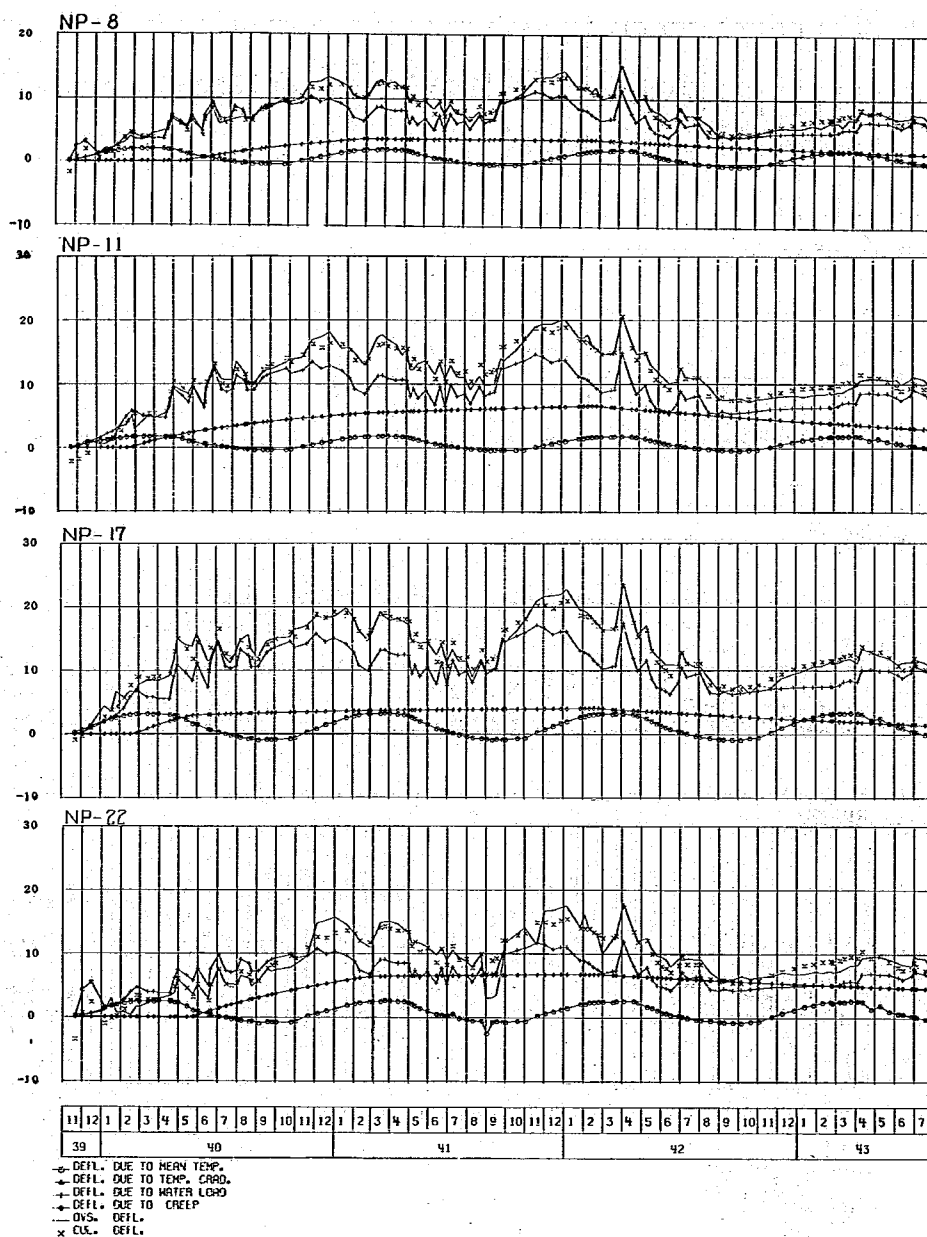


図-48 Aダム重回帰分析図(a)

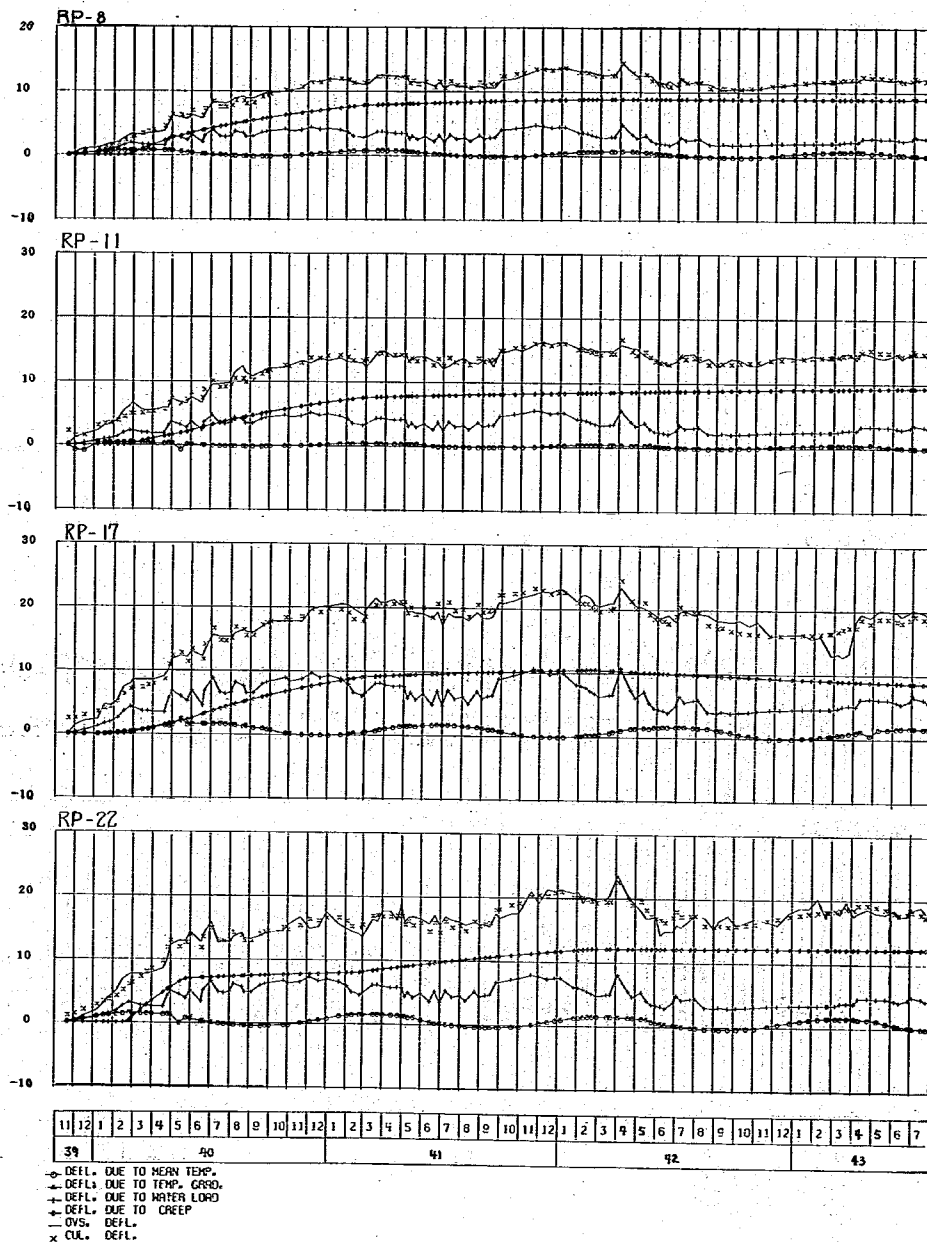


図-48 Aダム重回帰分析図(b)

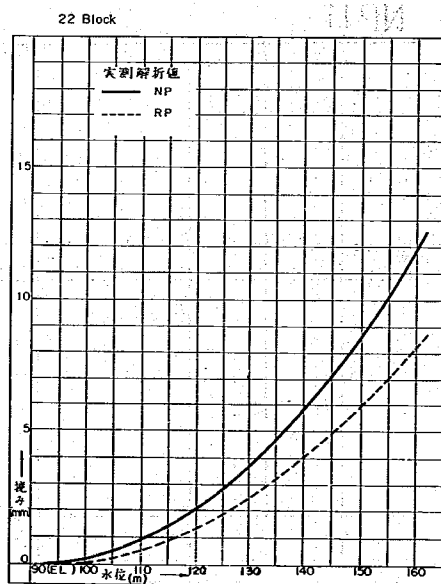
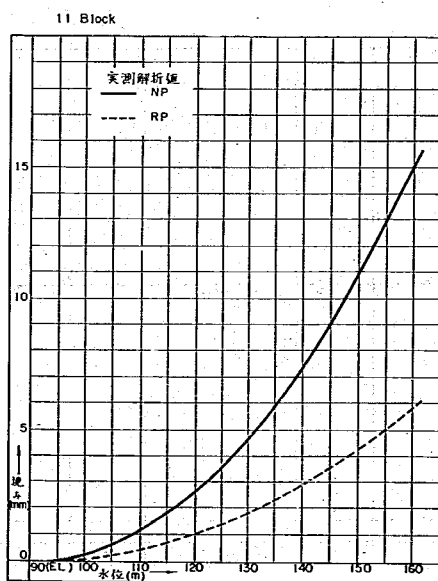
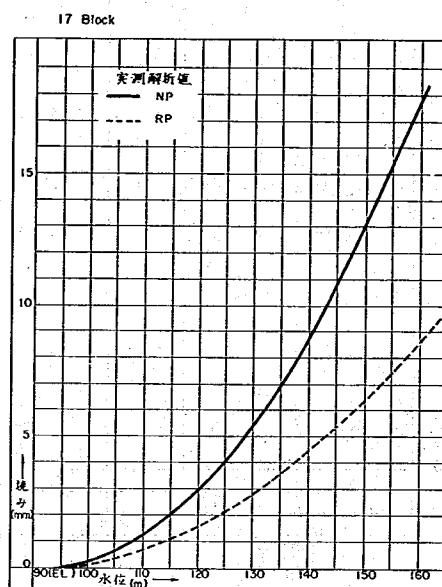
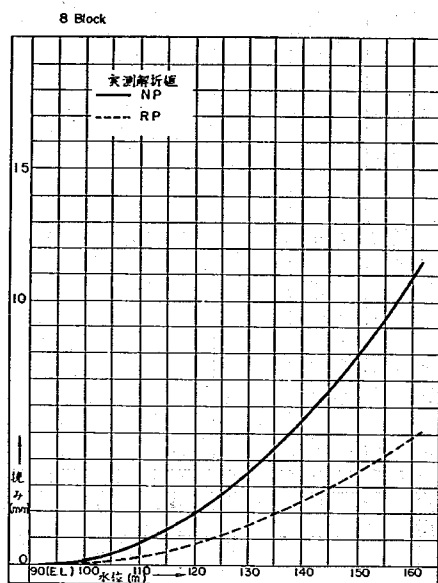
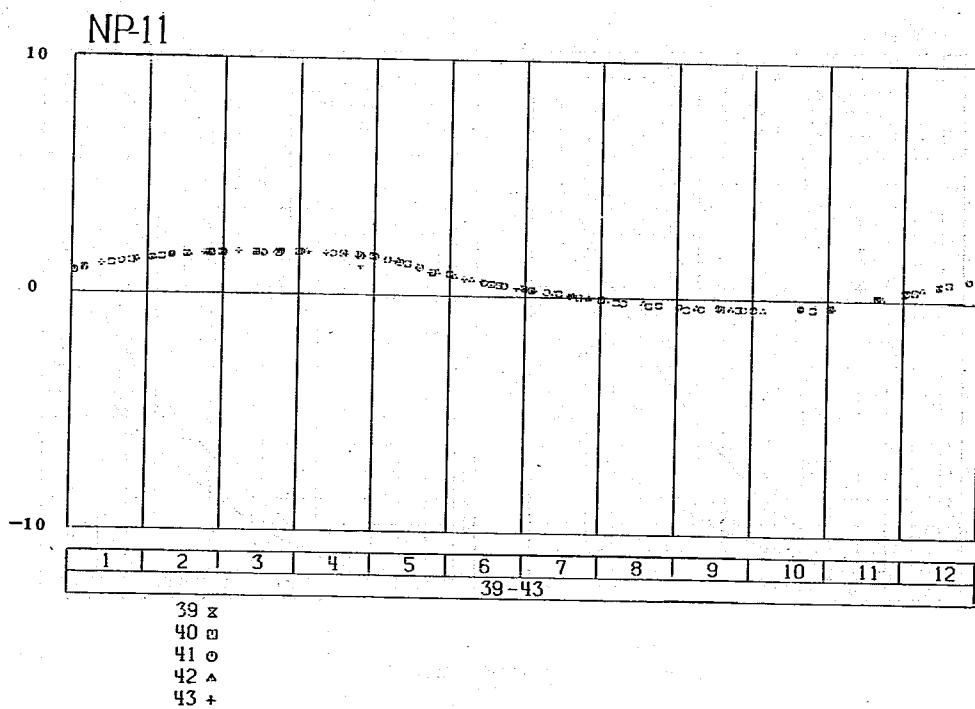
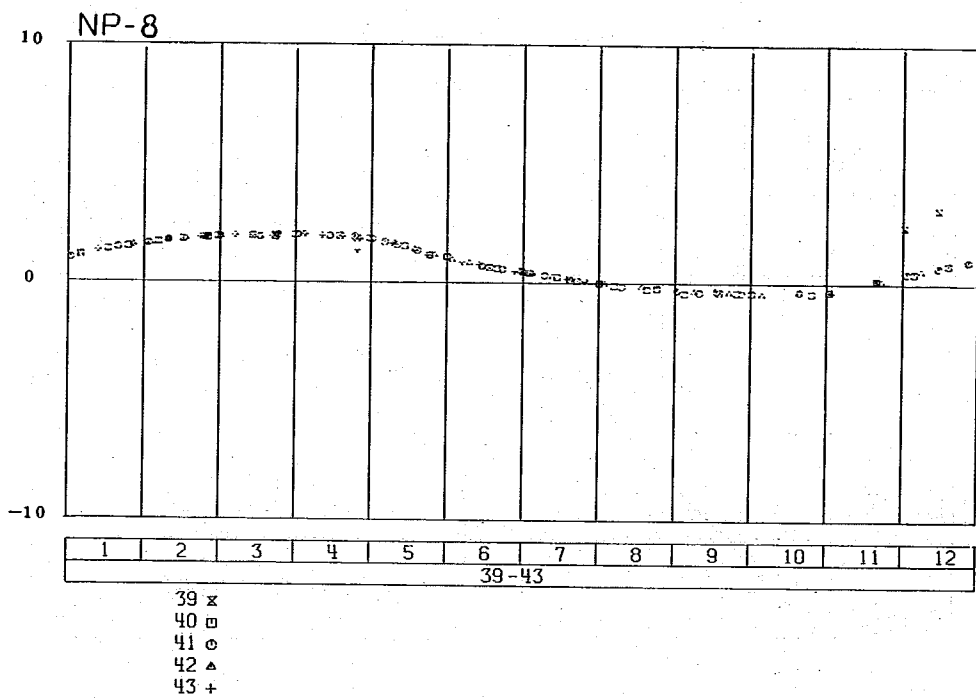
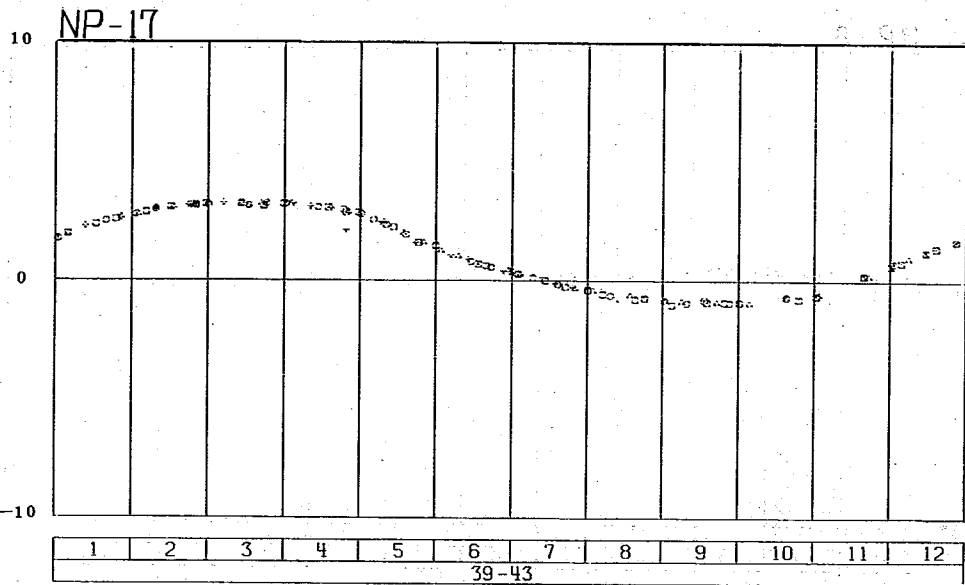


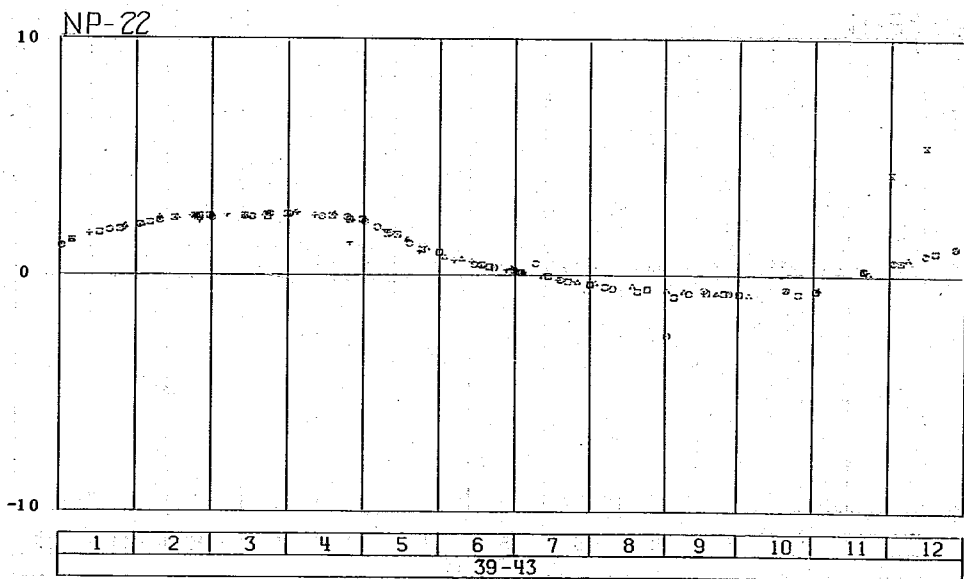
図 - 49 Aダム水位～たわみ図



図一50 Aダム温度による撓み図(a)



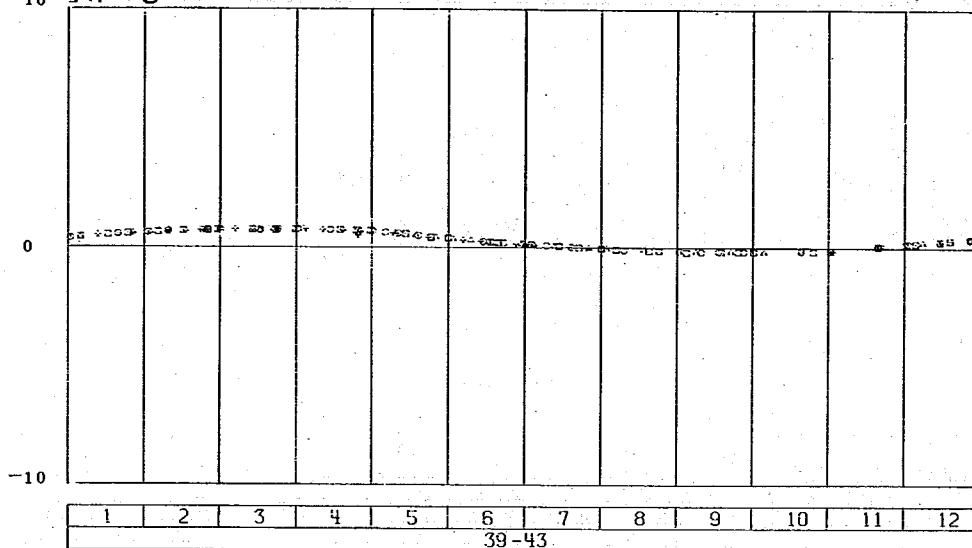
39 x
40 □
41 ○
42 ▲
43 +



39 x
40 □
41 ○
42 ▲
43 +

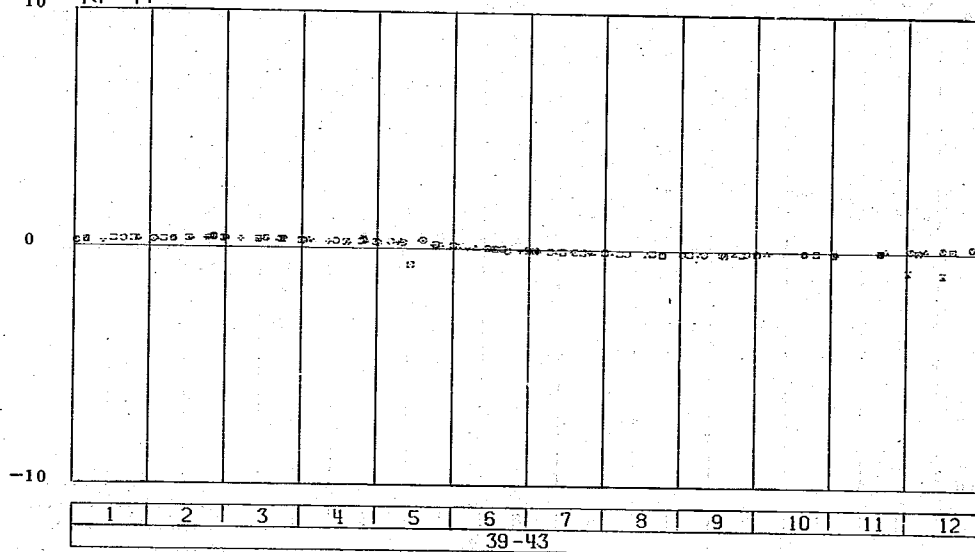
図一50 Aダム温度による撓み図(b)

10 RP-8



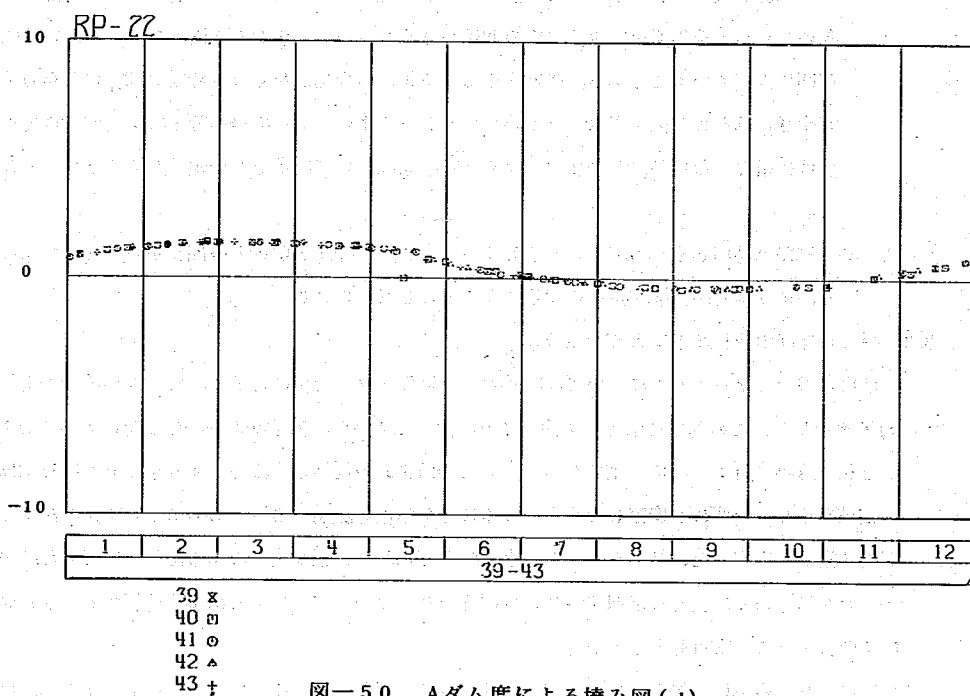
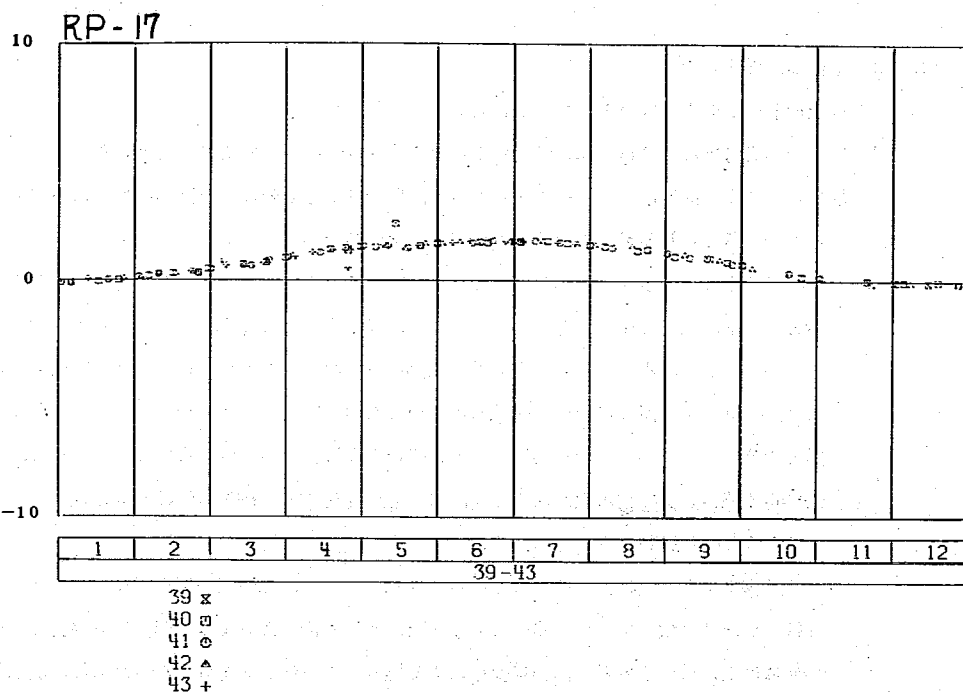
39 x
40 □
41 ○
42 △
43 +

10 RP-11



39 x
40 □
41 ○
42 △
43 +

図—50 Aダム温度による撓み図(c)



図一50 Aダム度による撓み図(d)

8.3.2.3 重回帰分析の特性

以上の解析結果より次のような事が云える。

- (i) 重回帰分析により得られた温度変化による撓みは一応正しいものと考えられる。
- (ii) 水位による撓みはデーターの多い水位の区間では水位変動による撓みの変化は一応正しいものと考えられるが、その値については信頼性がない。
- (iii) 経年変化による撓みの各解が異なることから考えて、水位による撓みと経年変化による撓みとの分離が充分でないと考えられる。これは経年変化による撓みの大半が湛水初期に生じていることと、水位が低いときも湛水初期にしかなく、この時期のデーターは数も少ないため、水位による撓みに対する関数形が妥当なものでないときは、データーの多い水位区間での $\delta_H - h$ 曲線の勾配を実際のものに近いように統計的に解が求められるために、水位による撓みの値に信頼性がなくなり、また経年変化による撓みの値にも信頼性がなくなってくるものと思われる。
- (iv) 経年変化による撓みは各解ともその値は異っているが、その値の変化がなくなる時期は各解ともほぼ一致している。前項にも述べたように水位による撓みの関数形が妥当でない場合には水位による撓みと、経年変化による撓みとの分離が不充分になるために、湛水初期の水位が低いときの水位による撓みの一部が経年変化の撓みに入り込んでいる可能性は強い。しかし経年変化による撓みの変化がなくなるかなり前から水位はデーターの多い水位区間に入っていることから、経年変化による撓みの変化がなくなる時期は両者の分離の不完全さにはあまり強く影響されていないと考えてよい。従って経年変化による撓みはその値は信頼性はないが、その変化がなくなる時期についてはかなり信頼性があると考えられる。
- (v) 残差は各解とも極めてよく一致している。これは残差が解析上の問題から出たのではなく、撓み測定か温度測定での誤差によるものと考えられる。

8.3.3 撓みの重回帰分析結果による安全管理

前項においてアーチダムについては鳴子ダム及び湯田ダムを例にとって、たわみの重回帰分析結果を示した。この解析結果を示す図-40、図-44から、鳴子ダムの経年変化によるたわみは昭和33年6月よりほぼ一定値を示し、また湯田ダムの経年変化は昭和40年10月以降ほぼ一定値を示し、いずれも安定した状態にあることがわかる。図-36~38に示した図解法では、どの時期から安定した状態になったか、水位によるたわみ、温度変化によるたわみはどの程度であったかについては量的に把握することは困難であったが、重回帰分析により解析するときは量的に把握することも可能となる。

次にこれらの解析結果を用いて、ダムの安全管理を行なう方法について、これも鳴子ダム、湯田ダムの場合を例にとって述べる事にする。

統計的手法により鳴子ダムのたわみを解析したところ(8.3)~(8.5)式なる挙動方程式を

得た。前項に述べたようにこれらの式は水位データーの多い標高 238 m ~ 254 m の区間で精度を有するもので、解析後の時点で、水位および温度条件を代入して求めた実測解析値と実測値とを比較することにより、ダムが解析を行った期間と同じ動きをしているか否かを判断し、ダムの安定性を検討することが出来る。しかし、この解析結果(2)~(4)式)を用いて解析後のダムを管理する場合、各標高の平均温度、温度勾配を求めるなどかなり複雑な手続きが必要で実用的でない。そこで月日と貯水位とがわかれば簡単で近似的に求める方法を示したのが表-6である。

表-6 鳴子ダム撓み計算表

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
	常数	$\sum a_i t_i + \sum b_i d_i$ (温度変化による撓み)	$f(h)$ (水位変動による撓み)	$\sum k_i \log \frac{1+\theta}{1+g_j}$ (経年変化による撓み)	$\frac{(1)+(2)}{(3)+(4)}$ (全撓み)	
(2)	-8.3	図-16の実線	$0.0051093 (h-179.6)^2$ 又は図-17の実線	4.0	"	
(3)	1.5	図-16の実線	$0.000050442 (h-179.6)^3$ 又は図-17の点線	"	"	
(4)	-2.6	図-16の実線	$0.00000059259 (h-179.6)^4$ 又は図-17の1点鎖線	"	"	
ex.	-8.3	-16.0	19.0	4.0	-1.3	実測の撓み -0.3

表-6下段は昭和37年10月10日の貯水位が241.22m、実測のたわみが-0.3mmのときの表-6の使用例を示したものである。経年変化によるたわみは昭和33年6月以降はほぼ一定値を示しているので定数とした。

なお、昭和37年10月10日は(2)~(4)式の解析期間であるので、解析後ダムが解析期間と同じ動きをしているかをしらべる例としてではなく、表-6の使用法の例として見ていただきたい。

しかし、図-14~15によれば、ダムのたわみは年間で+2.5mmから-8mmの間で変動しており、残差も最大±3mmはあり、不偏分散も1mm以上であることから一致度はよいと云い得る。なお図-40での昭和37年10月10日の残差は0.4mmであるが、表-6の簡易法の実測値と実測解析値の差が1mmであった。これは図-43の温度変化によるたわみが年により1~2mm変わる可能性があるか、これを昭和32~38年の平均的な値で用いたためである。

同様に湯田ダムの重回析分析結果((8.6)~(8.8))を用いて簡単に安全管理を行う方法を示したのが表-7である。

このようにたわみは近似的に且つ簡単に求めることが出来るがこれらの計算を行い、実測値と対比する場合に留意すべきことは、

- 1) (2)~(4)式は水位データーの多い区間にのみ適用できる。
- 2) 解析誤差および外気温度が年により多少異なるため、温度変化によるたわみは年により多少異なり、これらの差を考慮して対比する。
- 3) 解析後この種の対比を行なうときは、月日が経過するに従って一致度は悪くなる。

図 - 7

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
	常 数	^(mn) 温度変化による撓み	^(mn) 水位変動による撓み	^(mn) 経年変化による撓み	^(mn) 全撓み	
	C	$\Sigma a_i t_i + \Sigma b_i d_i$	f (h)	$\Sigma K_i \log \frac{1+\theta}{1+g}$	$\frac{(1)+(2)}{+(3)+(4)}$	
(2)	0.766	図-7の実線	$0.01907(h-2119)^2$ 又は図-6の実線	0.533	✓	
(3)	2.365	図-7の実線	$0.00071607(h-2119)^3$ 又は図-6の点線	0.576		
(4)	3.810	図-7の実線	$0.000027975(h-2119)^3$ 又は図-6の1点鎖線	0		
ex.	0.766	-3.15	6.60	0.533	4.75	実測の撓み 4.30

但し h……m

などである。特に3)について説明を加えると、解析後の時点で実測解析値を求めることは、一種の外挿計算を行なっていることになるが、一般に外挿計算は内挿計算に比して精度が劣ると云われている。この点について鳴子ダムと二瀬ダムにおいて、2～3年の間隔をおいて、前後2回解析を行なったが、1回目の解析以降で2回目の解析期間に含まれる各時点について、1回目の挙動方程式より得られた実測解析値との比較を行なった。その結果、解析後解析期間の50%程度度の経過するまでは、外挿による誤差は10%以下であるが、それ以上経過すると外挿による誤差が10%以上となることが明らかとなった。これから、解析期間の50%程度経過した時点で解析しなおすことが望ましい。

8.4 歪の解析

歪はダムの局部現象を示すもので、ダムの安全性を巨視的に見る場合には必要ないが、ダムに異常が生じたときその原因と対策を検討するのに必要となってくる。

ところで2章で述べたように、現在使用している歪計は局部的現象を捕え過ぎる、即ち計器附近のコンクリートの状態(例えばヘアークラックや空隙)に強く影響を受ける欠点があるが、その他に計器特有の欠点として次のようなものがある。

- i) 他の計器に比べかなり感度が高く、埋設時の取扱いに細心の注意を要する。
- ii) 温度補正係数が大き過ぎ、このため歪の値が不正確である。
- iii) ブリッジの2辺のみが計器の中に入っているため途中のリード線の温度変化、接触不良の影響を受け易い。

このように、現在使用されている歪計は幾つかの欠点を有するため破損あるいは理解し難い測定値を示すものも多く、万一の場合に備え測定し続けるにしても、局部現象を示す測定資料として利用出来ないものであるならば無駄な労力をかけたことになる。そこで適当な時期に各計器の測定値がダムの局部現象を示す測定資料として利用出来るか否かを知るために歪計の生死判定を行ない、更に重回帰分析を行なうことによって定量的に確める方法で幾つかのダムについて検討した。

以下、歪の測定値が温度変化とよく対応している例として天ヶ瀬ダムの場合も、また水位変動とよく対応している例として湯田ダムの場合をとり歪計生死判定方法及び重回帰分析について述べる。

8.4.1 歪の生死判定

歪の生死判定方法は、歪に影響を与える因子（貯水位、平均温度、温度勾配）の変動と歪値の変化の対応性を検討するものであるが、判定の手順としては、

- (1) まず、実測値の歪補正計算（温度補正）を行ない、これを図化する。この場合、歪は撓みと同様に貯水位及び温度変化の影響を受けるので、図の上部に貯水位、平均温度、温度勾配を併記する。
- (2) 貯水位のグラフにより急激な水位変動区間及び他の水位変動の区間を区分する。
- (3) 急激な水位変動区間において、水位の上昇、下降に伴ない歪の値が(+)側に変動するか(-)側に変動するかを調べ、その結果にもとづき他の水位変動区間での水位との対応性を調べる。
- (4) 温度変化との対応性を調べる。
- (5) 水位変動との対応及び温度変化との対応を総合判断し、計器の良否を定める。

の方法を用いた。この場合、判定表を準備し、逐次水位及び温度変化との対応性を記入し、総合判断の結果良いと思われるものから順に 1. 2. 3. 4. 5. の点数をつけ判定を行なう。

天ヶ瀬ダムは図-51に示すような個所に歪計が埋設されているが、その中の9ブロック EL 4 6.5 m の下流側に埋設された歪計の測定値について歪補正計算を行ない、歪値と水位及び温度との対応を示したのが図-52であり、判定の結果を示すと表-8の如くである。

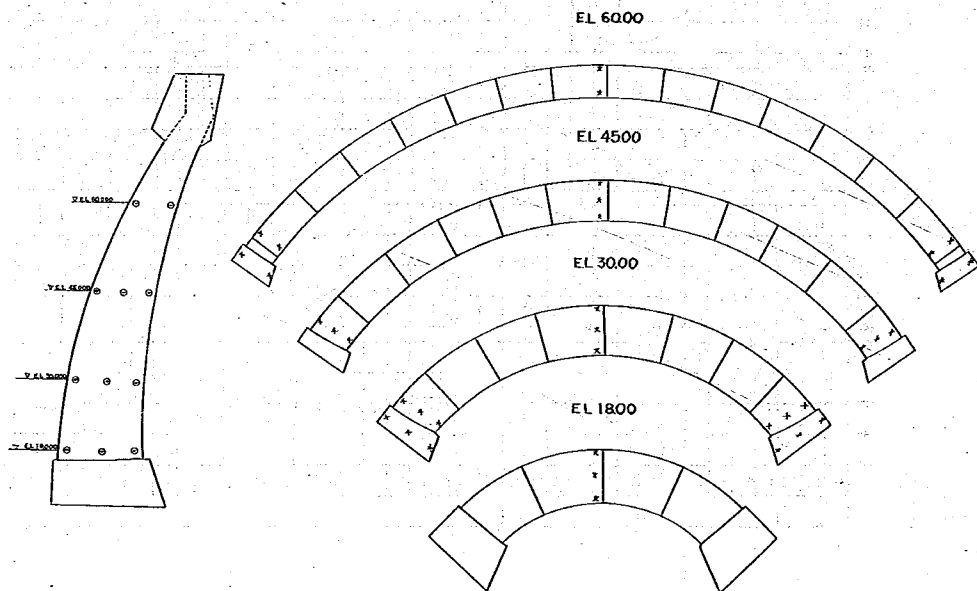


図-51 天ヶ瀬ダム歪計埋設位置図

同様に湯田ダムについて歪計の埋設位置を示すと図-53の如くであり、その中の6ブロック-E L 163mの下流側に埋設された歪計測定値と貯水位、平均温度及び温度勾配との関係を示すと図-54の如くに、またこの計器の判定結果を示すと表-9の如くとなる。

天ヶ瀬ダム、湯田ダムの歪計の判定を行なった結果、歪は撓みの測定値に比べはるかに理解し難い値を示すものが多く判定が困難であるが、更に

表-8 天ヶ瀬ダム歪計判定表

判定事項	BLOCK E L 成分	9 下								
		4 6.5-S ₂₄ (S ₁ ~S ₇)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
水位の急激な変動	[I]	×	×	×	×	×	×	×		
"	[II]	○	○	○	◎	◎	◎	○		
"	[III]	□	□	□	□	□	△	□		
"	[IV]	◎	×	×	×	×	×	×		
その他の水位変動	(a)	△	△	△	△	△	△	△		
"	(b)	△	△	△	△	△	△	△		
"	(c)	△	△	△	△	△	△	□		
"	(d)	×	◎	◎	○	◎	○	□		
"	(e)	△	◎	△	○	□	△	△		
"	(f)	×	○	×	□	×	□	△		
"	(g)	×	×	×	×	□	△	△		
水位の総合判断		△	△	△	△	△	△	△		
平均温度の対応性										
温度勾配の "		◎	◎	◎	◎	◎	○	□		
総合判断		◎	◎	◎	◎	◎	○	□		
点		1	1	1	1	1	2	3		

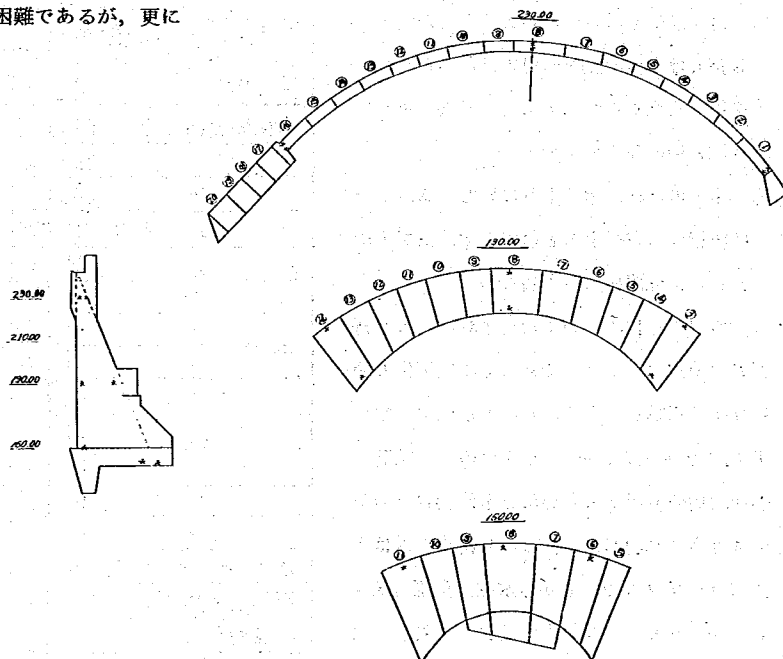


図-53 湯田ダム歪計埋設位置図

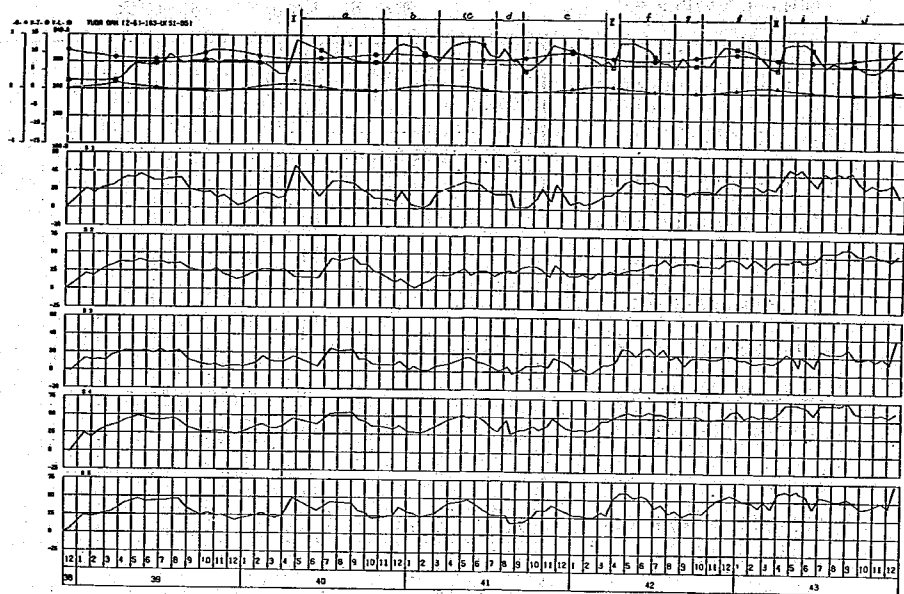


図-54 湯田ダム歪図

次の様な現象が見られる。

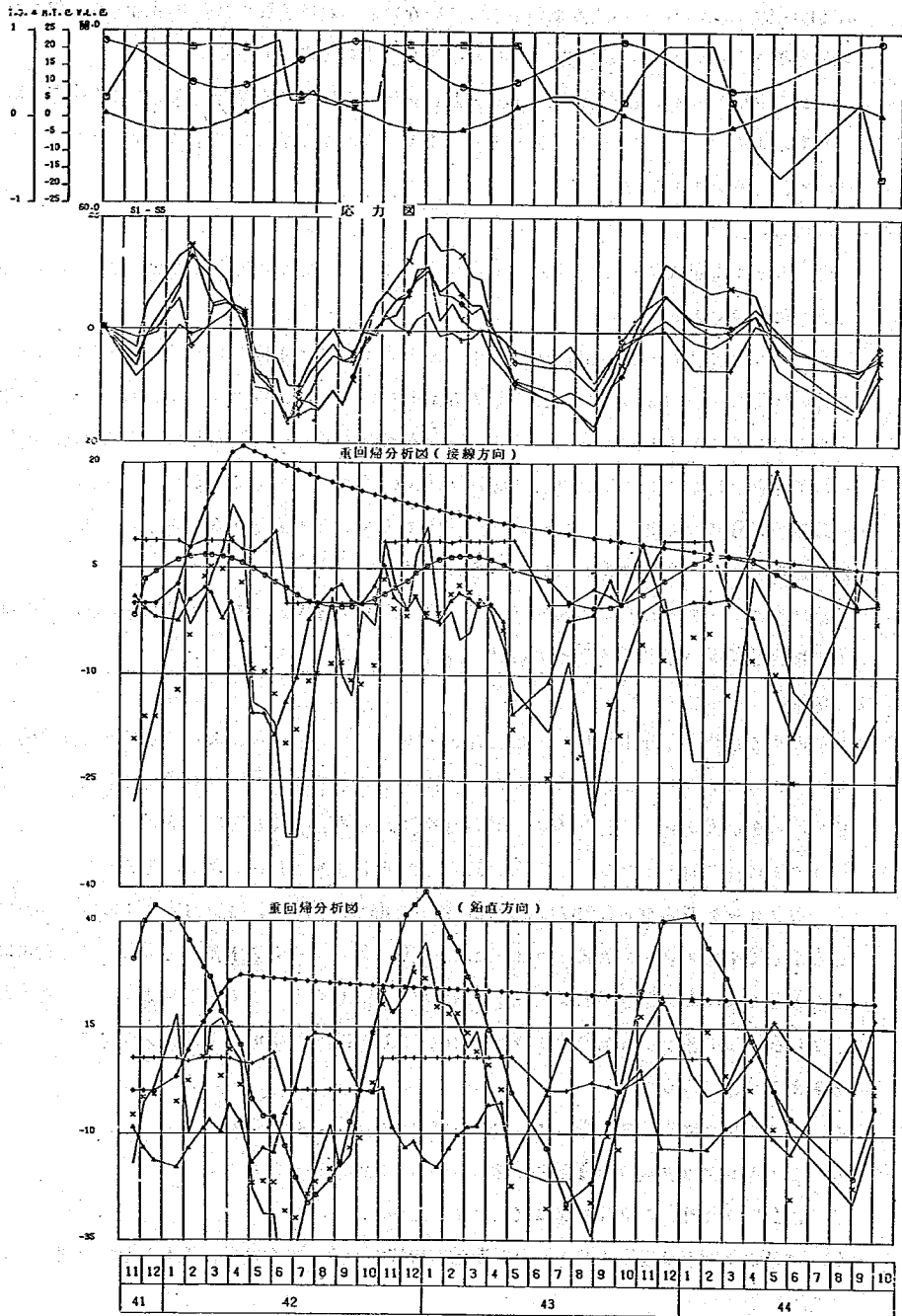
- i) 温度変化との対応性がよくあらわれている歪計は水位変動との対応性はあらわれにくく、またあらわれてもその度合は小さい。
- ii) i)と逆の現象も生ずる。
- iii) 全ての計器が水位上昇に対し引張側または圧縮側に移行するとは限らず、設置方向あるいは位置によって異なる。

この中で、i)について検討すれば、天ヶ瀬ダムは薄肉アーチダムであって温度変化の歪に与える影響が大きく、しかも水位変動幅が $EL. 7.2m \sim 7.8m$ と小さいので、顕著な季節的周期変動上に現われる水位変動との対応は非常に判別し難い。しかし湯田ダムは重力式アーチダムで、しかも水位変動幅も天ヶ瀬ダムより大きいので水位変動との対応は温度変化との対応と区別し易いが、水位の上昇或いは下降に対して歪値の変動する方向 (+)

表-9 湯田ダム歪計判定表

判定事項	Block EL 成分	7-3 190-U				
		1	2	3	4	5
水位の急激な上昇 (I)		□	○	○	○	○
" (II)		○	×	○	○	○
" (III)		×	○	△	○	○
水位の上下変動 (a)		×	□	△	△	△
" (b)		○	△	○	×	×
" (c)		□	□	○	○	○
" (d)		□	□	△	□	□
" (e)		△	○	□	□	○
" (f)		×	□	□	○	□
" (g)		×	○	△	○	□
" (h)		×	□	△	○	○
" (i)		□	×	□	○	○
" (j)		○	□	○	○	○
水位の総合判断		□	○	○	○	○
平均温度による対応性		△	△	○	□	△
温度勾配 "						
総合判断		△	○	○	○	○
点		4	3	2	2	1

EL46.5 (下流側)



側又は(-)側)あるいはその変動量が定まっていない。これは歪計の精度に起因する、即ちケーブル抵抗或いはスイッチの接触抵抗の影響が現われたものと考えられる。

ここに示した歪計生死判定は天ヶ瀬ダム及び湯田ダムにおける歪計の判定のごく一部であるが、この現象は殆んどの歪計について云える事であり、これからも2章で述べたフルブリッジ式埋設計器の普及が望まれる訳である。

8.4.2 重回帰分析

図-55は前節に述べた天ヶ瀬ダムの9-4 6.5-Dの歪値の応力計算を行ない、更に重回帰分析したものである。

図-55を観察すると、鉛直方向の計器(S_1)については水位の影響が現われているが、それ以外の計器($S_2 \sim S_4$)には水位の影響が現われていない。この理由としては、歪計生死判定のところでも述べた通り天ヶ瀬ダムに於いては水位変動が周期的な変動をなして温度変化と似かよった動きを示しており、また水位変動幅も小さい。このため水位によるものと温度によるものと分離が充分ではなく、このような現象が現われたものと考えられる。従って、表-9の歪の判定の正当性が、この重回帰分析により確認された。

尚、ここではアーチダムの場合を例にとり歪の解析方法を述べて来たが重力ダム、中空重力ダムの場合も同様の方法で解析を行なえばよい。

8.4.3 解析

前項まで歪計、応力計の生死の判定方法について述べた。本項において述べる解析は構造作用解析のための解析ではなく、ダムの安全管理のための解析例としてダムに異常が生じたとき歪計、応力計の測定値を用いてその原因と対策を検討した例を述べることにする。

Eダムは高さ約80mのアーチダムであり、4月に湛水を開始したが、その年の11月7日より中央ブロック下部のEL237m打設面に沿って漏水が始まり、12月末までに漏水部分は順次ひろがって中央ブロック全部にわたったが、翌年1月に入ると漏水量は減少し、2月初旬にはほとんどなくなった。この漏水は12月にはかなりの量になり、ダムの下端までぬれる程であった。

この場合に問題になったのはこの漏水を生じた打継面の下流面近くにはクラックが入っていると考えるべきであるが、

- (i) このキレツは施工中に生じたものか、湛水後生じたものであるか。
- (ii) このキレツはダムの上流面まで達していると考えるべきか否か。
- (iii) 何故に11月から2月の間に漏水が生じたか。
- (iv) 1月末に漏水は止ったがキレツが遊離石灰等でつまって今後再び漏水しないと考えて差し支えないか否か。
- (v) 特にこの部分は計算でも模型実験でも鉛直方向にはかなり大きい圧縮応力が示されていたが何故にこのような現象を示したか。
- (vi) このような漏水により、ダムの安全上懸念をいさぐ必要はないか否か。

(vii) 何か対策を構ずる必要はないか否か。

(viii) 対策を構ずるとしたらどのような方法がよいか。

等であった。

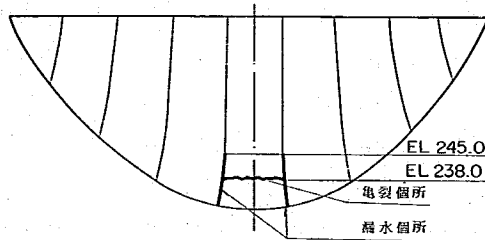


図-56 Eダム亀裂漏水状況

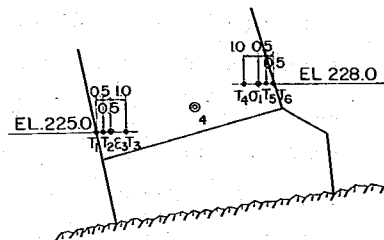


図-57 埋設計器配置図

これらの問題を解決するために、このキレットに最も近い EL. 228m に埋設されている歪計、応力計の測定値に対し検討を行なってみた。尚、現象をよりよく理解するためにこの標高に埋設されている平均温度と温度勾配も求め、併記した。またここに示した応力計は鉛直方向に埋設されており、歪計は温度補正、体積膨張補正、Poisson 比の補正を行なった鉛直方向の歪の値を示している。(図-58)

図-58から湛水開始以後の応力、歪の動きを見るに、ダムの下流側では明らかに春から夏にかけて次第に圧縮側に变化して(応力では正が圧縮、歪では負が圧縮)8月に最も圧縮側の値を

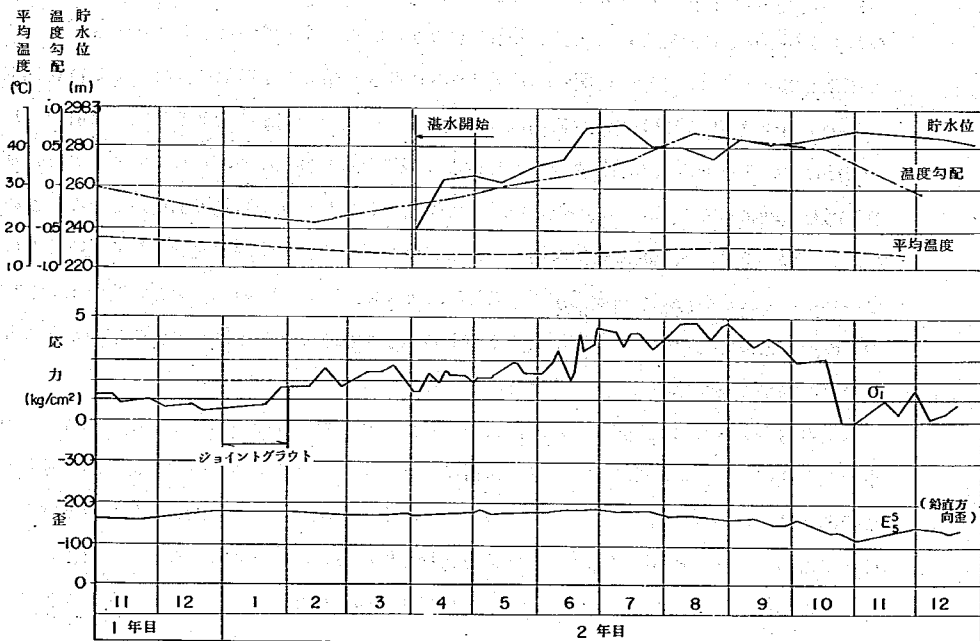


図-58 Eダム EL 228.0埋設計器測定値

示し、以後次第に引張側に変化しだしていた。温度勾配は8月に最大値を示しているが平均温度は9月に最大値を示していることから考えて、この部分の鉛直応力は温度勾配の影響をより強く受けていたことを示している。温度勾配は10月から11月にかけて急激に減少しだしていたが、応力計は10月下旬から、歪計は11月初旬から急に引張側に変化しなくなっている。応力計のみが引張側に変化しなくなった場合には応力計は引張応力を測定し難いためとも考えられるが、歪計も同様な現象を示していることからして、この時期にキレッツが開口したと考えるべきであろう。この時期は実際に漏水が始まり、キレッツが発見された時期よりも少し前であるから、応力計、歪計がこのような値を示したのは、キレッツが開口して応力が開放されたものと見るべきであろう。

このキレッツは施工中に生じたものか、湛水後に生じたものかについてはこれらの調査からは明らかではない。しかし11月初旬に初めて開口したことは明らかである。またこの時期の水位は特に高くはなかったがキレッツが開口したのは温度勾配が低下したためである事も明らかである。一般に温度勾配は外気温の変化と位相はほとんど同じであるが、2月初旬に漏水量が多まったのも、温度勾配が再び増加しだしたためと解すべきであろう。キレッツが開口しはじめた11月初旬は温度勾配、平均温度とも湛水開始した時期よりも高い値を示しているにも拘らず応力、歪とも引張側の値を示しているのは明らかに水圧荷重により引張応力が生じていたと考えられる。

このことは何らかの対策を講じない場合にはより高い水位で冬になった場合より大きくキレッツが開口する恐れがあるので、何らかの対策を行なった方がよいと考えられる。

さて、水圧荷重によるこの部分の鉛直応力は計算、模型実験とも圧縮を示していた。これは計算および模型実験に仮定された状況と実際の状況とはかなり異っていたと考えられる。

E L 225 m ~ E L 245 m の間の継目グラウトは湛水開始より1年前に行なわれているが、E L 245 m 以上の継目グラウトは湛水直前に行なわれた。継目計の測定値を見るに E L 245 m 以下の継目は E L 245 m 以上の継目グラウトを行なう際にかかなり押しひろげられている。これはダムの下流面を観察しても E L 245 m 以下の継目では漏水があることから見て明らかである。このため、この部分では三次元的に一体な構造物として働かず、鉛直な両端固定梁として働いたものと思われる。これから鉛直な両端固定梁 (E L 225 m ~ E L 245 m) のほぼ中央附近の E L 237 m の下流面に引張応力が生じ、冬期に至り下流面の温度が低下したときにこの引張応力が更に大きくなり、水平打継目が開口したものと考えられた。

以上の考察からまた漏水量から見て、このキレッツがダムの上流面に達しているとは考え難い。事実漏水は初め、継目の近くから始まり次第にブロックの中央に伸びていったことから考えると、この漏水は継目からの漏水がキレッツの開口により、毛細管現象により吸出されたものと解された。従ってこのキレッツは直ちにダムの安全性に重大な影響があるとは考えられないが、前述のようにこの年の水位は比較的低く、もしより高い水位で冬を迎えたときは、このキレッツがより開口すると考えられるので何らかの処置は行なった方がよいと考えられた。

この対策については以上の考察から、E L 245 m 以下の継目に対し、平均温度が最も低下する

3月に再注入を行ない、三次元的に一体な構造物として働き得るようにすればこのキレッツ附近の引張応力は減少し、温度勾配の減少によるキレッツの開口を完全になくすことは出来ないにしても、水位が上昇した場合にもキレッツの開口をより大きくすることは防ぎ得ると考えられた。

9. 構造解析のための測定と解析

現在ダム設計は多くの仮定と省略の上で行われている。これらの仮定や省略が妥当なものであるか否かを確かめ、設計を合理化して行くためには、実際のダムでその挙動を測定し、解析することが必要となって来る。これらについては本書の目的からははずれるが、いくつかの工事々務所ではこの種の測定を計画し、いくつかの管理所ではこの種の測定を行なうことがあると考えられるので、今迄に発表されたもののうち代表的なものについて述べることにする。

9.1 堤内温度とダム厚

コンクリートダムの変形に対して温度変化が強い影響を与えることは前に述べた通りであるが、一般に堤内の温度分布状態はダム厚と相関性を示すことが過去幾つかのダムの実測値から知られている。

図-59は鳴子ダム、室牧ダム、俊北ダム、湯田ダム、二瀬ダム、川俣ダム、天ヶ瀬ダムにおける平均温度、温度勾配の振幅、位相とダム厚の関係を示すものである。図-59(a)の一点鎖線はアメリカ開拓局で温度変化量推定式として誘導した式

$$C = 115 / (t + 244) \quad [C; \text{温度変化量}(^{\circ}\text{C}), t; \text{アーチ厚}(m)] \quad (9.1)$$

の値である。

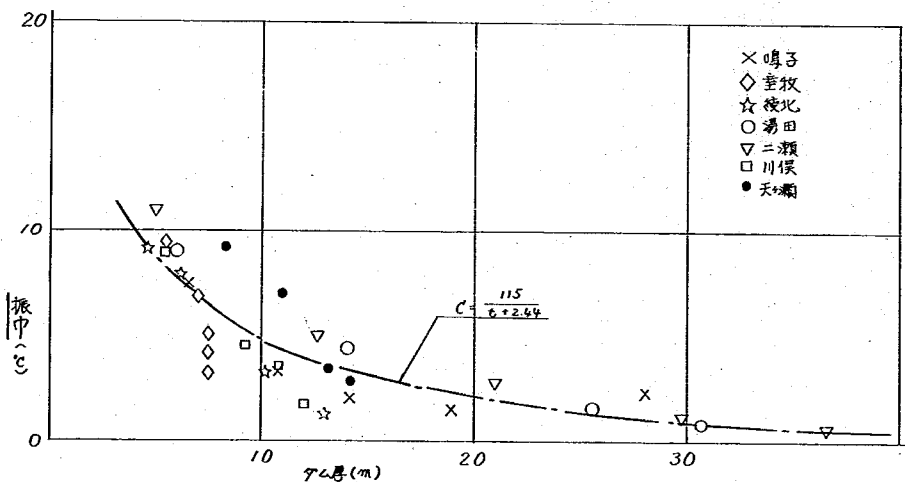


図-59(a) 振幅-ダム厚相関図
(平均温度)

図-59(a)において、(9.1)式を示す一点鎖線と実測値を比較すると、厚肉アーチダム(湯田ダム、二瀬ダム、鳴子ダム)の場合はかなり一致しているが、薄肉アーチダム(室牧ダム、綾川ダム、川俣ダム)の場合は一致せず、ダム厚の増加に伴う振幅の増加の割合が大きい。従って

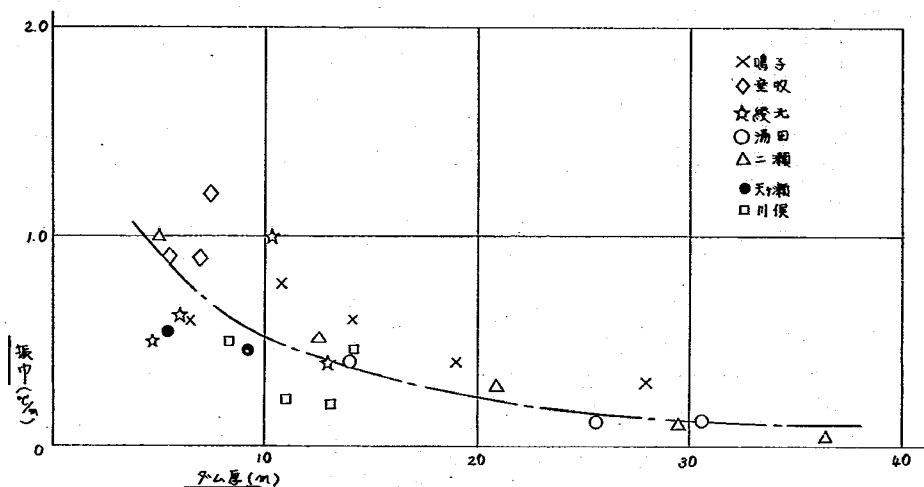


図-59 (b) 振巾-ダム厚相関図
(温度勾配)

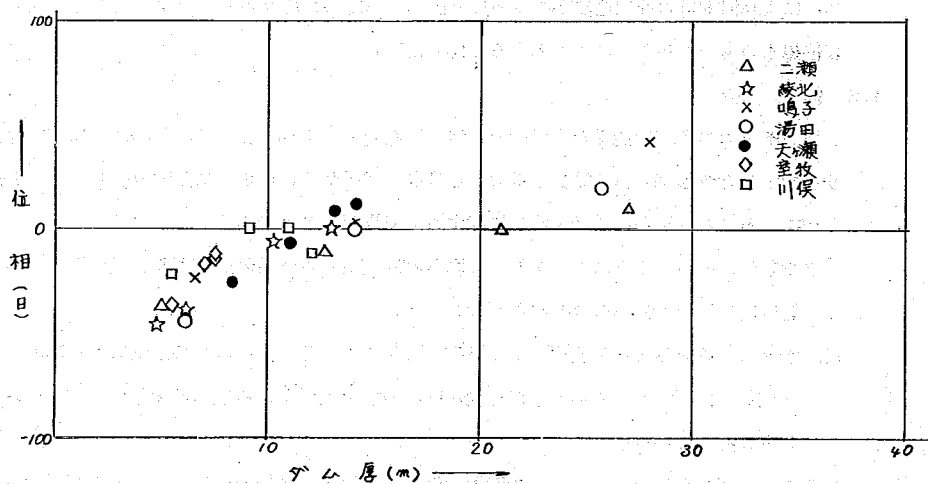


図-59 (c) ダム厚-位相図
(平均温度)

(9.1) 式はダム厚の厚いダムにおいての温度変化量推定に有効であるが、ダム厚が薄い場合に適用しても信頼性に乏しいと云い得る。

図-59(c)・(d)の位相は周期が余弦曲線と一致する場合を0とし、それよりも早い場合を(+), 遅れる場合を(-) としており、平均温度についてはダム厚が10m~15m程度の部分で位相は-10日~+10日位となる。

ダム厚一位相, ダム厚一振幅ともに云えることは、温度勾配は平均温度に比べて各ダムによる値の差が大きい事である。これについて考察すれば、温度勾配は温度計の埋設位置特に上下流面に最

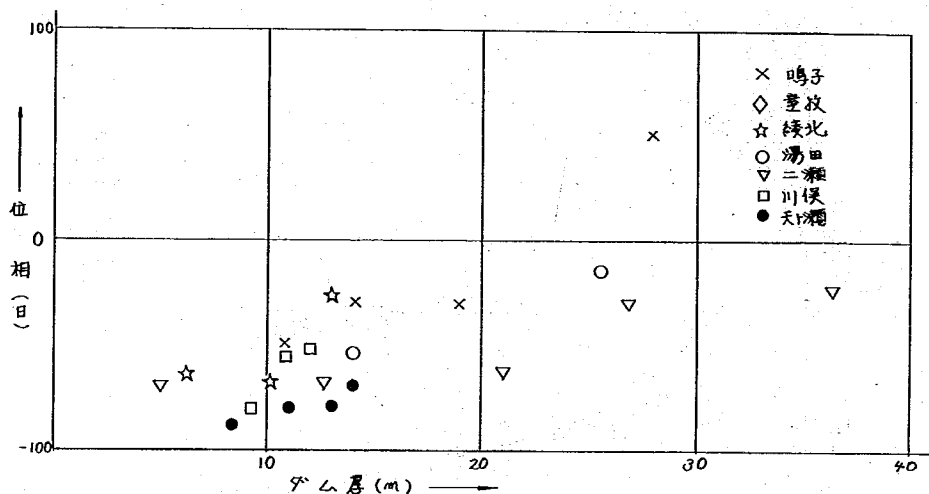


図 - 59 (d) ダム厚 - 位相図
(温度勾配)

も近い位置に埋設された温度計の位置と精度に左右され易い。従って、図-59(b), (d)の現象は各ダムにより温度計の埋設位置が異なる事と計器の精度に起因するものであって、温度勾配の振幅及び位相そのものが各ダムにより異なるとは考え難い。

9.2 撓 み

アーチダムのように撓みが水圧荷重の他に温度変化の影響も強く受ける場合には重回帰分析により解析すると原因別に分離分析し得ることは既に述べた。このように分離分析したものと設計々算と比較することは現在の設計方法を検討する上で重要なことである。

さて前章に述べたようにアーチダムの撓みの測定値を重回帰分析により分離分析した場合に

- (i) 温度変化による撓みの分離はよく行われる。
- (ii) 水位による撓みと経年変化による撓みの分離は不十分で、このため水位による撓みの絶対値は不確かで、データーの多い水位区間における水位変動による撓みの変化する割合のみが確からしさを持っている。

なることが明らかになった。そこで温度変化による撓みと水位変動による撓みの変動を、実測値と計算値とを比較してみよう。計算は荷重分割方法の完全調整計算により、温度荷重としては実際のダムより求められた平均温度と温度勾配とを用いた。

比較を行なったのは鳴子ダム、綾北ダム、天ヶ瀬ダム、川俣ダム、湯田ダムのクラウン天端の半径方向変位、室牧ダムのクラウンの天端と左右岸の天端の半径方向変位と、二瀬ダムのクラウンおよび左右岸の天端の半径方向変位に対して行なった。その結果は表-10と図-60.61に示されている。

まず温度変化による撓みについて考察すると、全般的にみて計算値と実測値とは或る程度一致している。しかし更に詳細に観察すると、半径方向については、二瀬ダム、湯田ダムでは計算の方が大きくなっているが、綾北ダム、天ヶ瀬ダムでは逆に計算値の方が小さくなっている。鳴子ダム、

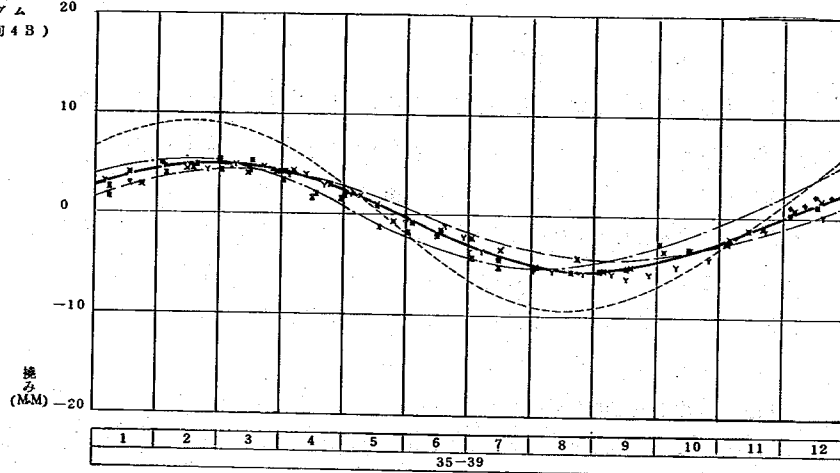
室牧ダム、川俣ダムでは一致度はかなりよい。

また平均温度の変化と温度勾配の変化はいずれも外気温の変化によって生ずるので相関性が強く実測値に重回帰分析を適用しても平均温度の変化による撓みと温度勾配の変化による撓みとに分離することはかなり困難である。しかし、実察のダムから測定した平均温度と温度勾配の変化を荷重分割法に適用して計算すれば、その計算方法が妥当なものであれば、その分離は可能である。図-60 および表-10 によれば温度変化による撓みは計算値と実測値とはかなり一致しているので、計算方法はほぼ妥当なものと考えてよく、従って平均温度の変化による撓みと、温度勾配による撓みの比率も表-10 に示す程度と見做し得る。これから室牧ダムのように薄肉のアーチダムでは平均温度の変化が支配的な影響を与えているが、ダムの厚さが厚くなるに従って温度勾配の影響が強くなり、二瀬ダムなどではむしろ温度勾配の変化による撓みの方が、平均温度の変化による撓みよりも大きくなっている。このことは今後の設計の上からも注意すべきことと考えられる。

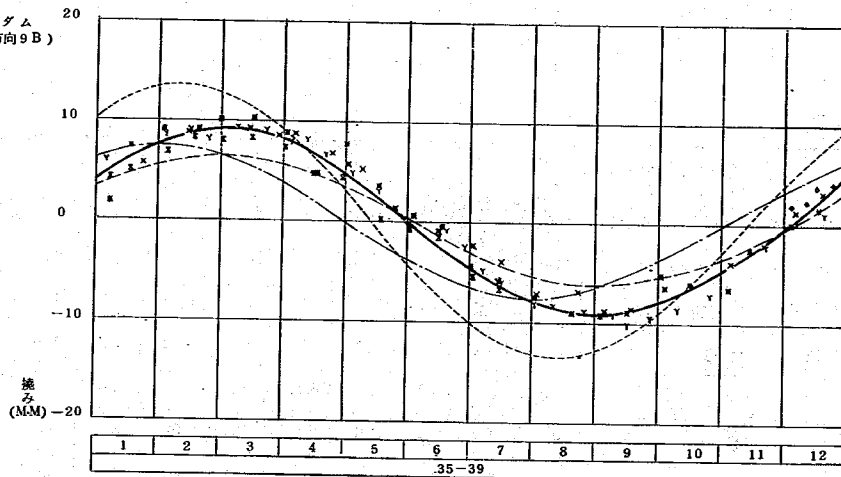
表-10 実測値と計算値の差の計算

ダム名	位 置	実 測 値		計 算 値						実測値 と計算 値の比	水位によ るたわみ
		平均温度、温度 勾配によるもの		平 均 温 度		温 度 勾 配		平 均 温 度 勾 配			
		振 幅	位相差	振 幅	位相差	振 幅	位相差	振 幅	位相差		
二瀬ダム	C r天端半径方向	9.10	29	5.9	27	7.6	58	13.1	45	1.44	17.9
	右岸	5	31	2.4	5	4.2	63	7.1	52	1.42	6.3
	左岸	7.8	39	4.9	27	6.6	61	11.0	46	1.41	7.0
室牧ダム	C r	9.5	47	7.4	46	2.1	7050	8.1	32	0.85	9.3
	右岸	6.3	51	5.7	45	0.4	76	6.0	48	0.95	4.5
	左岸	6.3	46	5.7	45	0.4	76	6.0	48	0.95	4.5
鳴子ダム	C r天端半径方向	11.2	28	5.5	18	6.9	62	11.5	43	1.03	21.9
綾北ダム	〃 〃	12.6	53	6.2	42	4.4	72	9.0	69	0.71	8.6
二瀬ダム	C r天端接線方向	0.57	65	0.1	0	0.22	0.81	0.91	0.91	0.33	1.0
	右岸	0.50	58	0.70	26.56	1.07	0.81	0.63	45.55	1.26	1.7
	左岸	1.2	34	0.68	2839	0.14	1.54	0.58	34.37	0.48	-2.7
川俣ダム	C r天端半径方向	10.8	36	9.4	31	3.1	68	12.1	40	1.12	19.3
天ヶ瀬ダム	〃	13.7	34	9.2	29	1.5	27	10.2	36	0.74	19.0
湯田ダム	〃	4.95	14	5.8	3	4.3	64	5.32	39	1.07	25.0

二瀬ダム
(半径方向4B)



二瀬ダム
(半径方向9B)



二瀬
(半径方向13B)

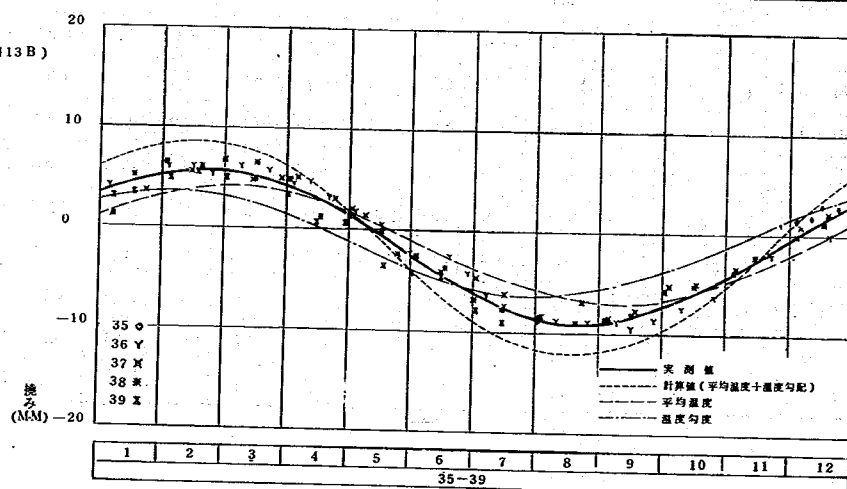


図-60 温度によるたわみ図 (a)

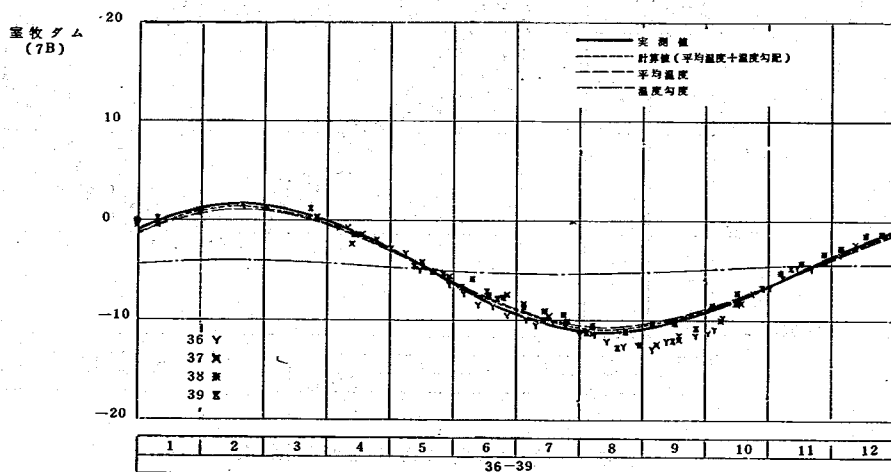
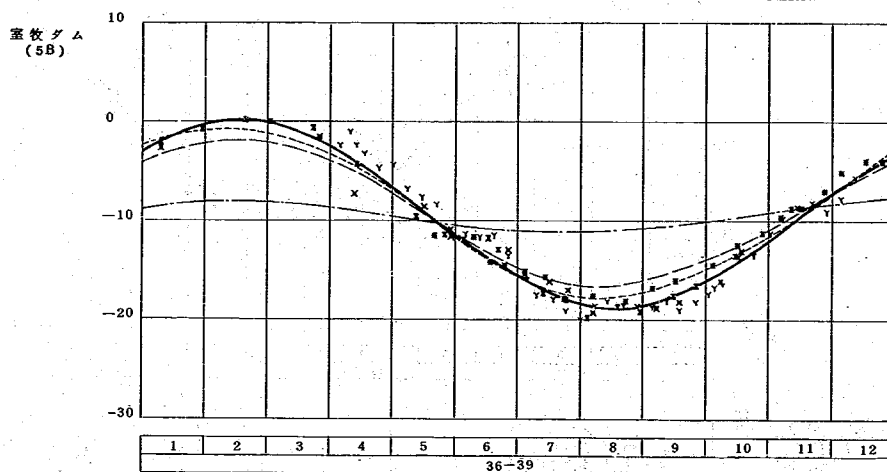
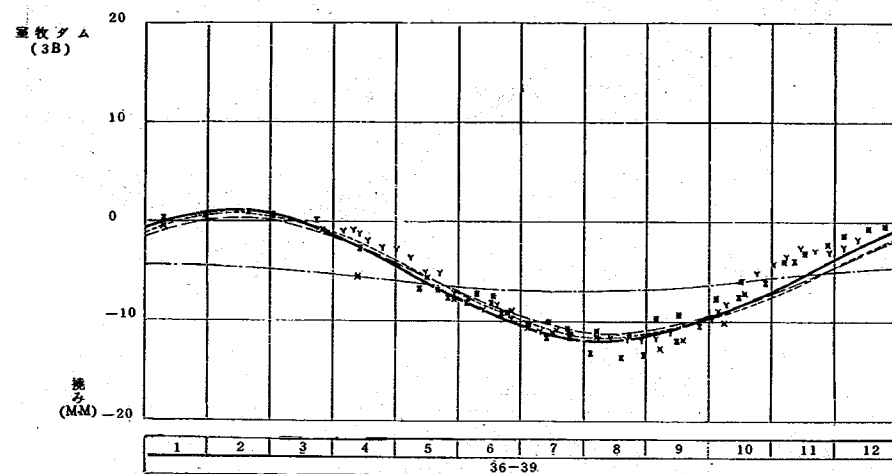
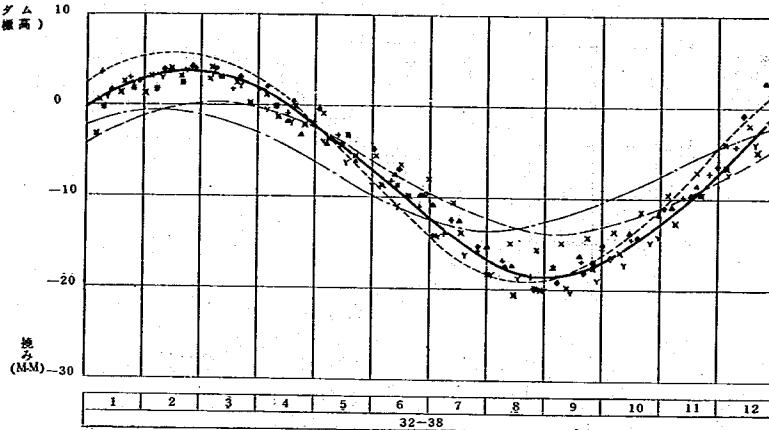
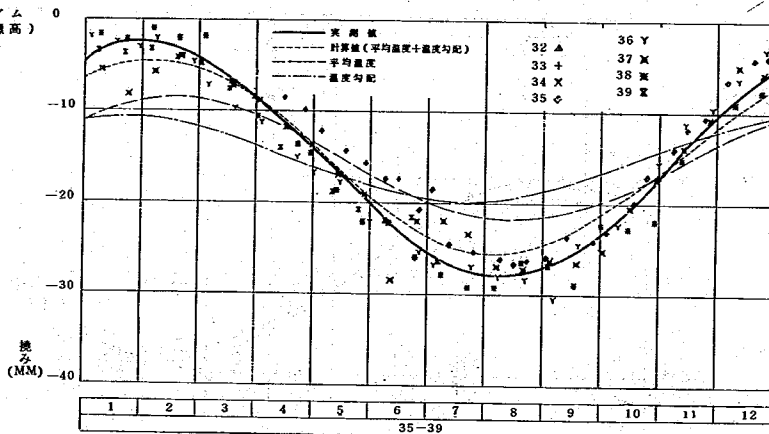


図-60 温度によるたわみ図 (b)

鳴子ダム
(天端標高)



鏡北ダム
(天端標高)



天ヶ瀬ダム
(天端標高)

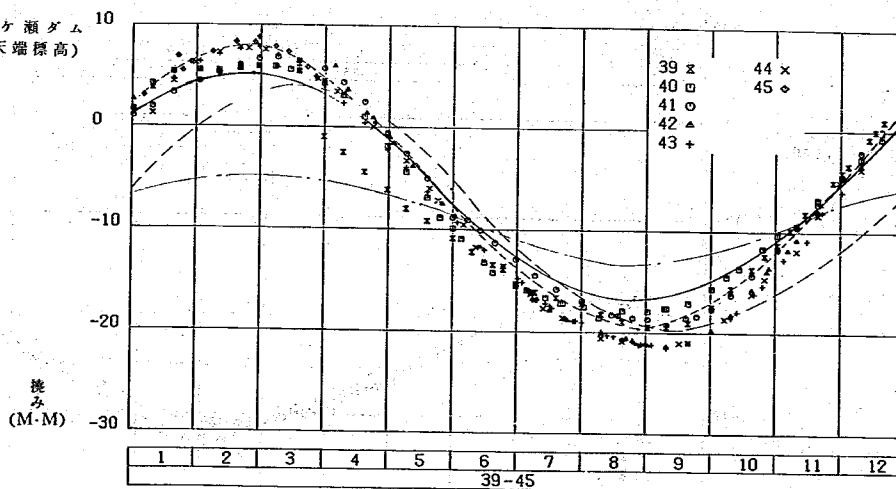
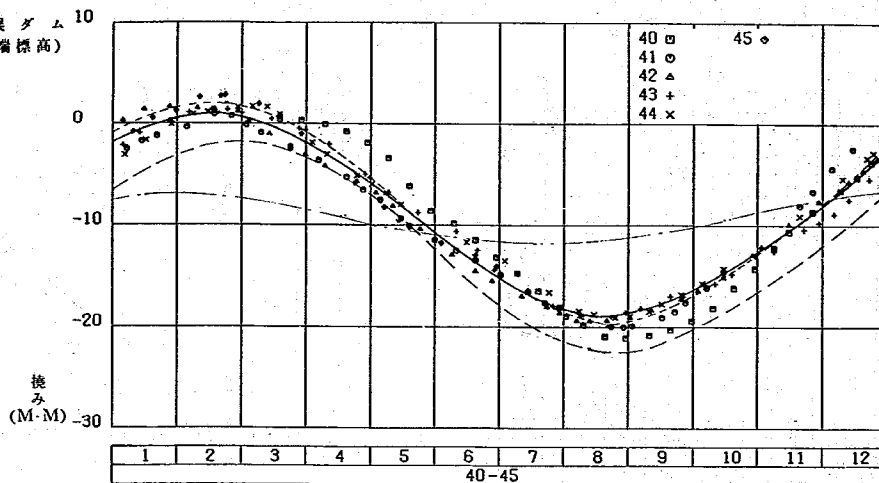


図-60 温度によるたわみ図 (c)

川俣ダム
(天端標高)



湯田ダム
(天端標高)

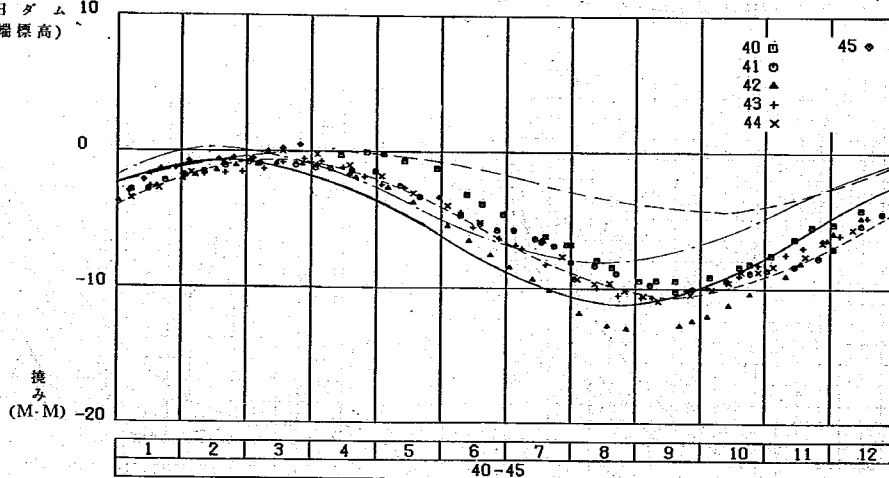


図-60 温度による挠み図 (d)

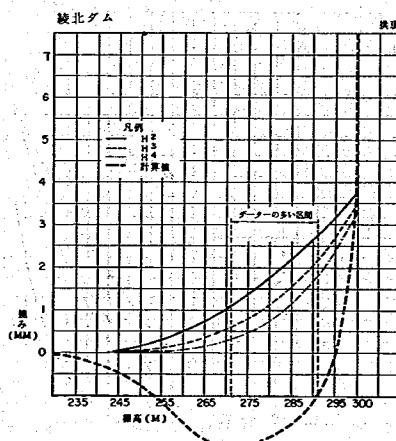
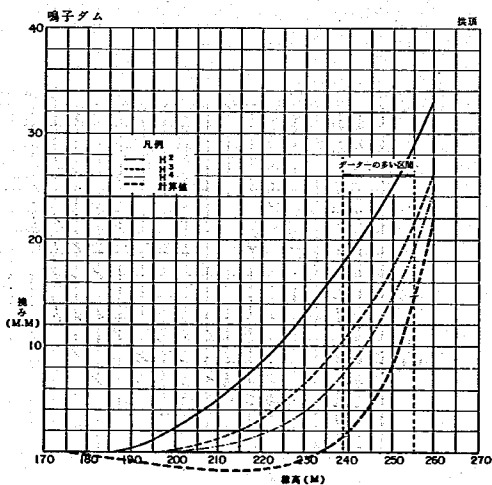


図-61 水位-たわみ曲線 (a)

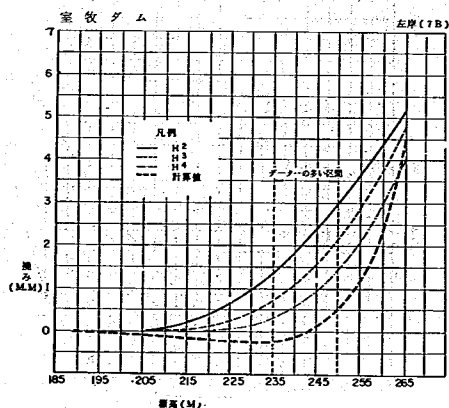
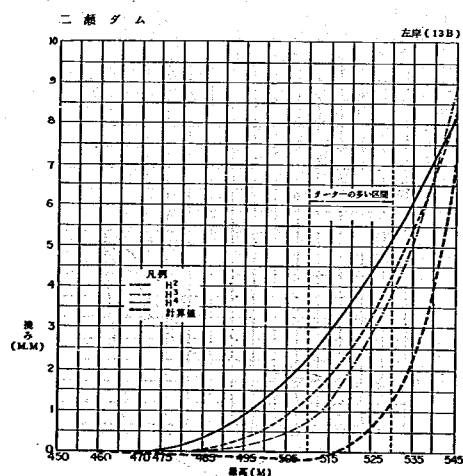
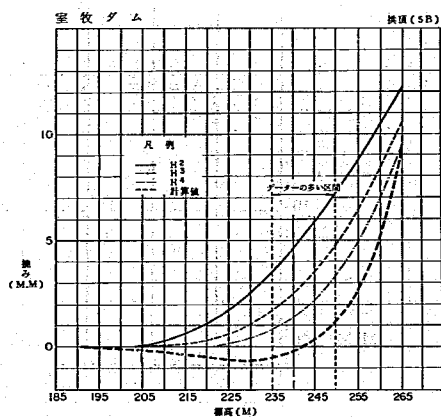
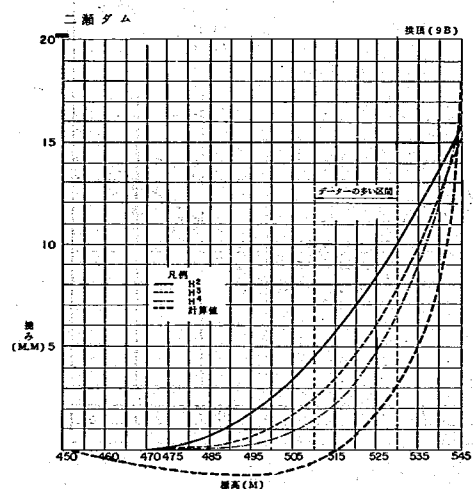
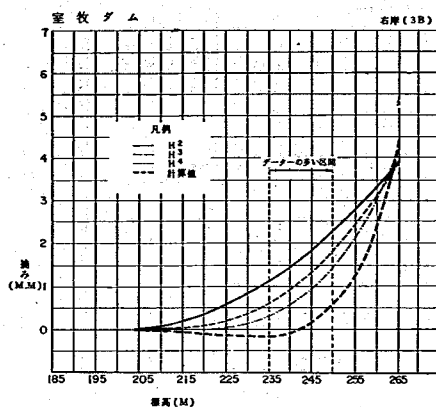
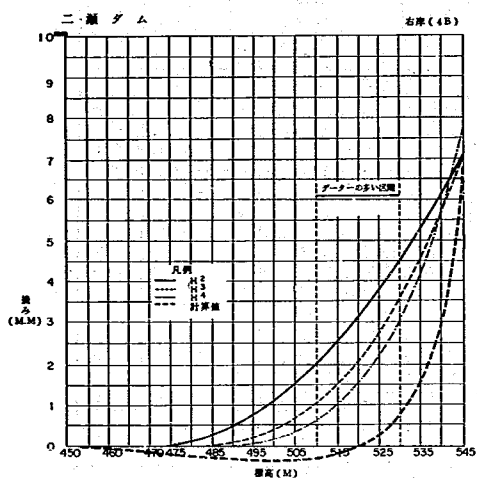


図 - 61 水位 - たわみ曲線 (b)

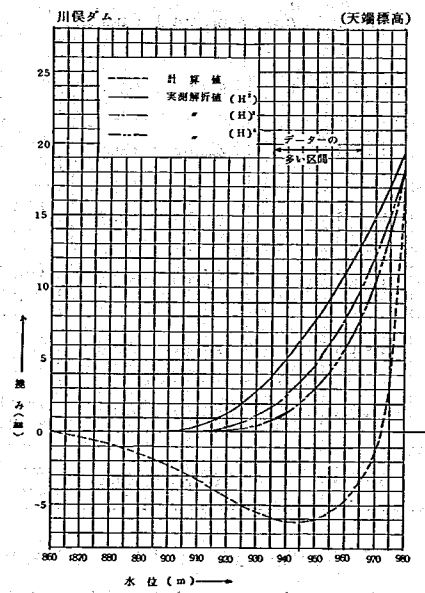
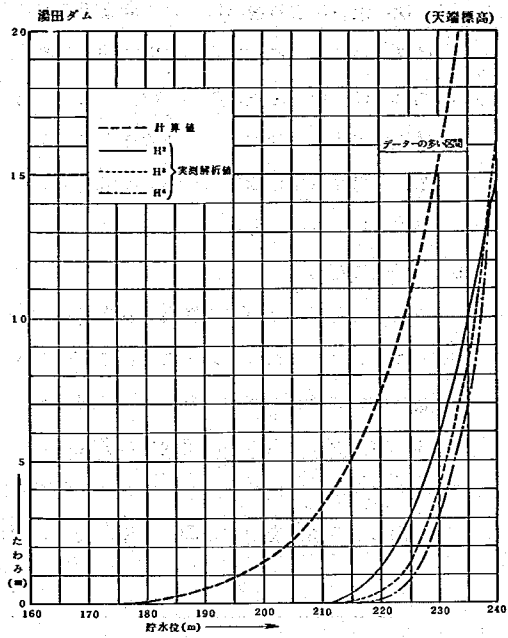
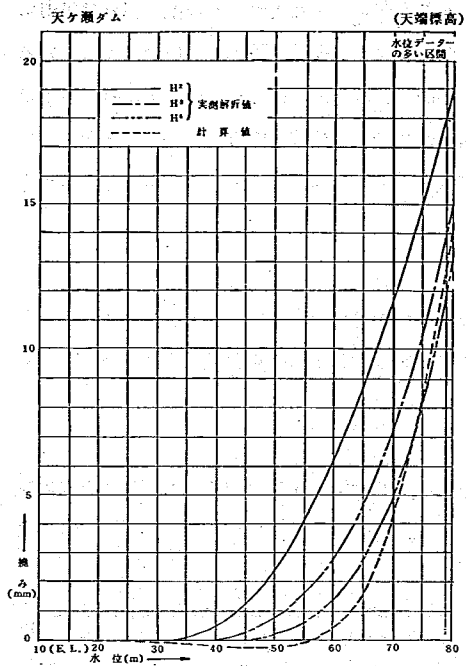


図 - 61 水位 - たわみ曲線 (c)

次に水位による撓みについて考察すると、室牧ダムの7ブロックと川俣ダムの撓み以外は絶対値は異なるが、データの多い水位区間での水位変動に対する撓みの変動は計算値とほぼ一致している。これらについても更に詳細に検討すると、鳴子ダム、湯田ダムでは水位変動に対する撓みの変動は計算値の方がやや大きい。他のダムのクラウンの撓みの変動は計算値と実測値とはほぼ一致している。一方左右岸の撓みについては室牧ダム、二瀬ダムとも水位変動による撓みの変動は計算値の方が小さいようである。

9.3 岩盤の変形

岩盤の変形についても従来の測定経過から種々興味ある結果が観測されている。この中で特筆すべきはAダム(重力ダム)において4つの断面で本体と岩盤の変形の測定がなされているので、これについて詳しく述べてみよう。(図-62)

9.3.1 重力ダムの岩盤の温度変化の影響

Aダムの本体及び岩盤のたわみの重回帰分析結果を示せば図-48の如くであり、また温度変化による撓みを示すと図-50、表11の如くである。

表-11

	ブロック	ダム高	振巾	位 相	一番下流側に撓んだとき 一番上流側に撓んだとき				平 均	
					測定値	月・日	測定値	月・日	測定値	月・日
NP	8	55.0	(MM) 1.25	(日) -12	2.1	3~23	-0.4	9~16	0.85	6~15 12~22
	11	80.0	1.15	-13	1.9	3~25	-0.4	9~13	0.75	6~15 12~16
	17	114.5	2.15	-17	3.4	3~16	-0.9	9~15	1.25	6~8 12~17
	22	72.5	1.75	-4	2.7	4~3	-0.8	9~31	0.95	6~13 1~1
RP	8		0.55	-17	0.8	3~13	-0.3	9~13	0.25	6~17 12~13
	11		0.25	-46	0.3	2~15	-0.2	8~14	0.05	5~16 11~14
	17		0.95	83	1.7	6~26	-0.2	12~20	0.75	3~15 9~25
	22		1.00	-14	1.6	3~24	-0.4	9~27	0.60	6~9 12~7

図-50、表-11よりダム本体は3月20日頃最も下流側に撓み、9月15日頃最も上流側に撓む周期的な変動を繰り返している。振幅はダム高114.5mのところでは2.15mm、55.0mのところでは1.25mm程度であった。

一方、温度変化が生ずると考えられない岩盤でも季節的な温度変化との対応性が表われておりダム高の高い17ブロックでは本体の撓みとは逆に夏に下流側に撓み、ダム高の低い8,22プロ

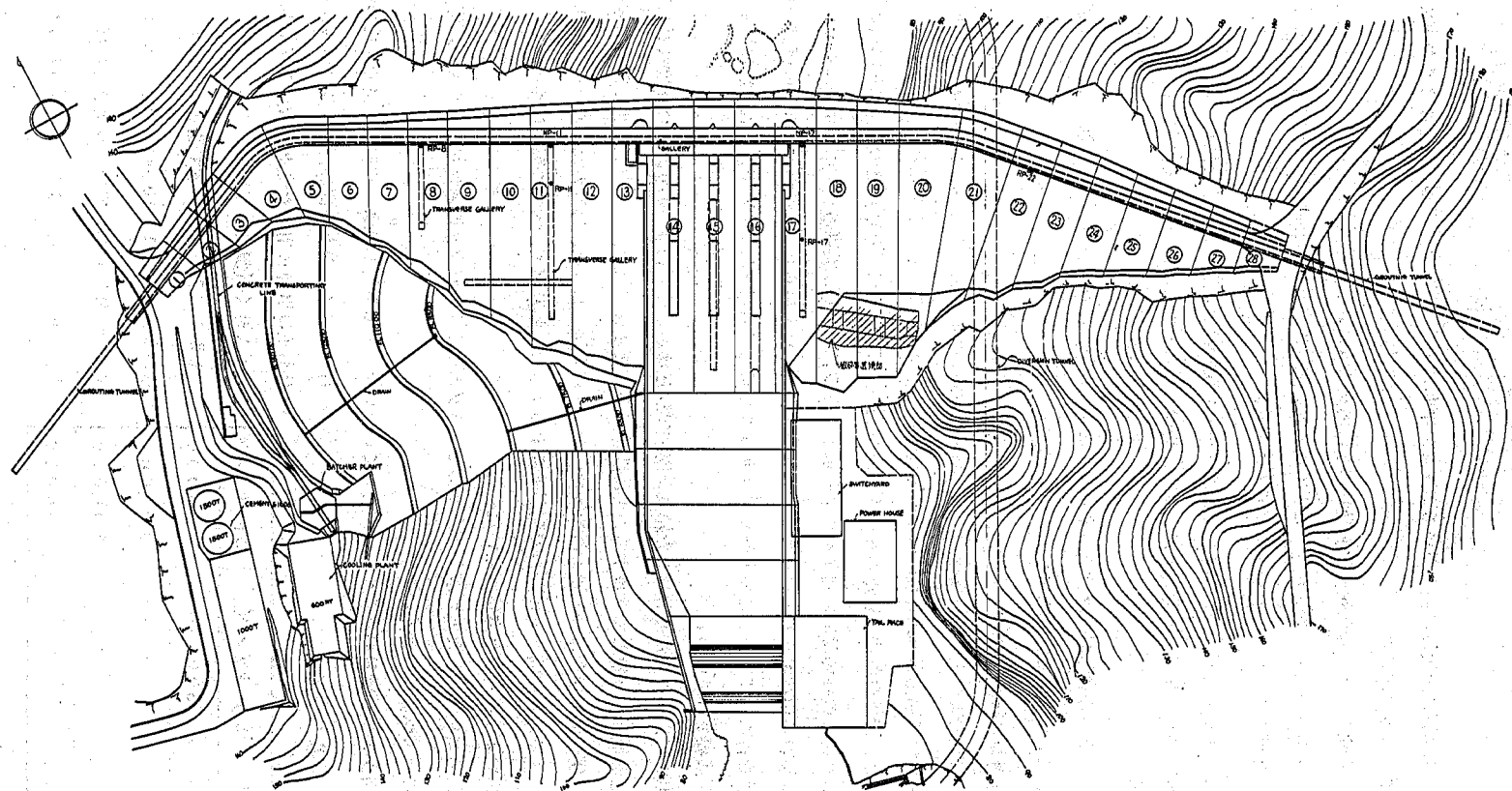


図 - 62 A ダム平面図

ックでは夏に上流側に撓んでいる。また、中間の11ブロックの振幅は最も小さくなっている。

このような現象は

- (i) 岩盤が季節的な温度変化を受けるとは考えられない。
- (ii) ダム高の高い17ブロックとダム高の低い8,22ブロックとは動きは逆になっており、更に中間の11ブロックの動きが極めて小さい。

ことから考えて、ダム本体の季節的な撓みの変動はダム高により差を生じ、このためダム軸方向の拘束が生じて不静定力が発生し、岩盤に伝わる力に季節的温度変化を生じたものと考えられる。

Aダムの横継目はグラウトされていなかったが、僅かであるが継目を通して力の伝達が行われているものと思われる。

9.3.2 計算値と実測値の対比

従来、岩盤の変形計算にはアメリカ開拓局方式が用いられて来たが、これについてAダムの撓みを用いて開拓局方式と実測値との比較検討を行なったので述べる事にする。

現在、荷重分割法で岩盤の変形はFredric - Vogt の導いた半無限体長方形基礎面に矩形載荷した場合の平均変形に関する式より求めている。しかし、実際のダムは平面ではなく、三次元的な複雑な形状をなしているため、ダムの基礎面を平面展開し、矩形とするなどの仮定のもとで計算を行なっている。この方法はアメリカの開拓局で開発されたもので、我国に於いてもこの方法が摘要されている。

しかし、この方法で計算した結果と模型実験とはかなりの相違があり、その原因はダム基礎面を矩形展開と仮定して計算することに問題があるとされて来た。そこでアメリカ開拓局方式による基礎岩盤の変形について検討を行なった。検討方法としては、撓みの重回帰分析により得た水位による撓み(図-49)の勾配が一致するような岩盤及びダム本体の弾性係数を求め、その弾性係数より検討する方法を用いた。

この結果を示したのが表-12である。Aダムは17ブロックの岩盤が最も良く、両岸に行くに従って軟弱になっていた。

当ダムは横継目のグラウチングをしていないが、もし前述したように継目を通して力の伝達が行なわれているならば実際に17ブロックへ働いた荷重は計算に用いた全水压荷重より小さく、変数が大きく計算されている。

表 - 12

ブロック	$E_c \text{ kg/m}^2$	$E_R \text{ kg/m}^2$
8	300,000	700,000
11	"	900,000
17	"	600,000
22	"	600,000

しかし、表-12に示す通り17ブロックの実際の弾性係数は10,000kg/cm²で、Vogtの式による弾性係数を用いて岩盤の変形を計算した場合17ブロックの変数は大きく計算されることは当

然である。このことは、アメリカ開拓局方式で計算した場合、最大断面附近の変形が小さく、兩岸の岩盤の変形は大きく計算される傾向を示していると云い得る。また、アーチダムのクラウンベース上の上流面鉛直応力は実験値よりも計算の方が引張り側の値を示すと云われているが、このような相違は Aダム の基礎岩盤の変形についての上記の実験値と計算値の相違より説明し得るものである。

9.4 歪および応力

9.4.1 歪の解析方法

歪計は一般に 5成分または 9成分のロセットにして埋設される。二次元応力を求めるときに 5成分歪計が、三次元応力を求めるときに 9成分歪計が用いられるが、理論的には二次元応力を用いるときには $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ を求めるのであるから 3成分でよく、三次元応力を求めるときは $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ を求めるのであるから 6成分でよい。このように必要な成分数よりも成分数をふやして測定を行なうのはそのうち 1~2成分が破損したり、城は誤差をもった値を示しても、補正し得るという考えにもとづいている。このような補正を体積膨張補正という。

一般に歪計により測定値に対し計器の温度補正を行なう。これについては既に 3章で述べたのでここでは省略することにする。次にコンクリートの温度補正を行なう。これはコンクリートが温度変化 ΔT を受けた場合に、コンクリートが無拘束であるならば $C \Delta T$ (C はコンクリートの膨張係数) だけ歪が変化する筈であり、若し拘束があって $C \Delta T$ より少い歪の変化しかない場合にはその量だけ拘束応力に転化する筈である。このコンクリートの膨張に対する補正をコンクリートの温度補正と云い、一般に測定値に $-C \Delta T$ を加える ことにより行なわれる。次に行なわれるのが前述した体積膨張補正である。これは理論的に直交する三方向の歪の和はその方向いかに拘らず一定であるという法則がある。5成分の場合にはこのような直交する歪計が 2組、9成分の場合には 3組あるが、これらの歪の和は一致しないのが一般である。これを一致させるように補正するのが体積膨張補正である。

従来は体積膨張補正では誤差を各歪計に均等に配分する方法がとられて来た。しかし前章の歪計の生死の判定の所で述べたように或る歪計ははっきりと水位や温度との対応性を示すに対して、或る歪計は対応性を示さず、理解し得ない動きを示している。このように外荷重に対し対応性を示すものと、対応性を示さないものと同等に扱って誤差を均等に配分することは正しい補正とは云い得ない。むしろ外荷重に対し対応性のよいものに補正量を小さくし、対応性の悪いものに対して補正量を多くする方法を検討すべきであると考えられる。

次にポアソン比の補正を行なう。これは歪から応力に比例する量を求めるために行なわれ、一般に次の式により行なわれる。

$$\epsilon_i = \frac{1}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \{ (1 - \nu)\epsilon_1 + \nu(\epsilon_2 + \epsilon_3) \}$$

さてこれらの補正が行なわれた後に、歪から応力への変換が行なわれる。これには次に述べる三

つの方法が用いられている。

(i) 有効弾性係数法

歪計が埋設されている断面に作用する推力、曲げモーメントが既知で断面内の応力分布が未知のときはきわめて簡単な応力解析方法がある。

温度補正、体積膨張補正、ポアソン比補正が行なわれた歪に弾性係数を乗ずれば応力になる。そこで推力および曲げモーメントが既知である断面に垂直な方向の補正された歪の分布図を描き、これにより囲まれる部分の面積と断面の重心の周りのモーメントを計算する。これらに弾性係数を乗じたものは推力、曲げモーメントに等しいはずであるから、両者の比から弾性係数を求める。このようにして求めた弾性係数の値から応力分布を求める。

この方法はきわめて簡単であるが、静定構造物に対してのみ用い得るものであって、アーチダムのような不静定構造物には利用出来ない。

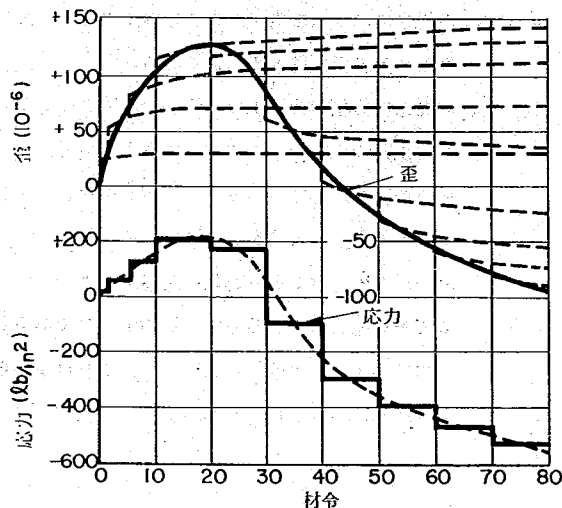
(ii) 米国開拓局の方法

この方法は米国開拓局により発表され、その後多くのダムの実測解析に用いられている方法である。

この方法はコンクリートにはクリープが生ずるが、荷重がその材令での破壊強度の $\frac{1}{2}$ 以下であればクリープ量は荷重に比例し、クリープに対してもポアソン比の値は変わらないという仮定に立脚している。

まず種々の材令でのコンクリートの歪—時間曲線を描く（図—63）。次にポアソン比の補正を行なった歪—時間曲線を描き、若い材令の部分では短かく、材令が増えるに従って長くなる時間区分に分ける。各時間区間に対し、その区間での平均の材令でのクリープ曲線に相似な曲線を描き、これにより囲まれる面積と補正歪—時間曲線に囲まれる面積とが等しいようにする。この各区間の境界における不連続的な歪の増分から、この区間での応力変化のグラフが描かれる。次に不連続な応力変化のグラフにより各区間で囲まれる面積が等しいような平滑な曲線を描く。これが応力の変化図である。このようにして各材令での応力が求められる。

この方法はクリープの影響を加味してあらゆる時期における応力を計算し得るので最も広く用いら



図—63 歪応力—時間曲線

れているが、計算に多くの労力を要し、更にコンクリートのクリープに対する資料が必要であるので、手間を要する方法である。

ここで注意すべきことはこの方法で取扱うクリープはコンクリートのクリープであって、撓みの解析において述べた経年変化とは異っていることである。重回帰分析で現われる経年変化はコンクリートのクリープを含まれるが、主として岩盤のクリープや非可逆的な変形が主であることである。従ってこの方法により解析を行なっても、経年変化は残っていると考えなければならない。

この方法は施工中の応力解析には極めて有力な方法であるが、湛水開始以降の応力を求める場合にはコンクリートの材令は或る程度大きくなっており、コンクリートのクリープはほとんど生じなくなっていると考えられるので、補正された歪に適当な弾性係数を乗ずることにより、応力が求められる。

しかし、この方法によるときは原因別に応力を分離分析出来なく、この点がこの方法の欠点とも云い得る。

(ii) 重回帰分析による方法

この方法は撓みの解析の所で述べた方法を応力、歪に適用する方法である。この方法は原因別に応力、歪を分離分析し得る利点を持っている。しかし、施工中の応力解析に用いるとき、コンクリートの打設面の上昇とクリープが時間に関係しているので分離が困難である。このため施工中の応力を解析する場合には前述した米国開拓局の方法が優れていると云い得る。

またこの方法は前章に述べたように温度変化によるものははっきりと分離されるが、水位によるものと経年変化によるものがはっきりと分離されないため、データーの多い水位区間の水位変動による応力、歪の変化を知り得るのみである。従って水位による応力、歪をはっきりと求めることは出来ないが、原因別に分離分析し得る点で優れており、設計値と比較する上で最も有力な方法となる。

以上から施工中の応力を求める場合には米国開拓局の方法が最もよく、湛水後の応力を求める場合には、重回帰分析による方法が最もよいと考えられる。また更に米国開拓局の方法を用いた後に重回帰分析による方法を適用することも考えられる。

9.4.2 解析例

歪計、応力計等の測定結果を解析した例としては Grand Couleeダム、Shasiaダム、Rossダム、Pieue di Cadoreダム、Cabilダム等数多くあり、我国でも上推葉ダム、井川ダム等が発表されている。しかし全般的にみて、

(i) 歪、応力は局所的な現象は局所的な状況、例えば継目グラウトの状況等により強い影響を受けかなり解析がむづかしい。

(ii) 測定値の不良、バラッキが撓みに比してかなり多く解析がむづかしい。

等により、撓みの場合より解析がかなり困難であるようである。これらのいくつかを通して共

通して見出され、一般的に認められているのは継目グラウト後も開いているのが多く、継目グラウト後も一体化していない動きが多いということであろう。

これに属するもので、代表的なものは Shasta ダムの解析、井川ダムの解析等があげられる。Shasta ダムに於ては図-64 に示すように歪計を埋設して測定を行なった所、図の実線に示すような応力分布が得られた。従来のダムが一体の構造物であるとの考えに立つならば自重による応力は上流端で最大で下流端では最小の鉛直応力を示す筈であるが、実測値は中央部で最大の応力を示している。これはダムが図に示すように柱状のブロックに分けて打設され、各ブロックが個々に自重を受け持ち、変形が生じた後に継目グラウトが行なわれ、一体化されたためと解釈された。事実、そのような仮定で計算された応力は図の破線のようになり、実測値とかなりよく一致している。

井川ダムは高さ 100 m の中空重力ダムであるが、図-65 に示すような施工継目が設けられると共に、継目グラウトが行なわれた。このダムの応力分布を求めるために図-65 に示すように計器を埋設し、君島氏（電力研究所）が解析を行なった。その結果は自重応力のみならず水圧荷重についても、応力分布は継目の所では不連続的に変っており、ダムは一体化していないことが示されている。

これと同じような傾向は米国の重力ダムでも示しており、継目グラウトは継目における応力の不連続性を小さくするが、完全に一体化するものではないようである。

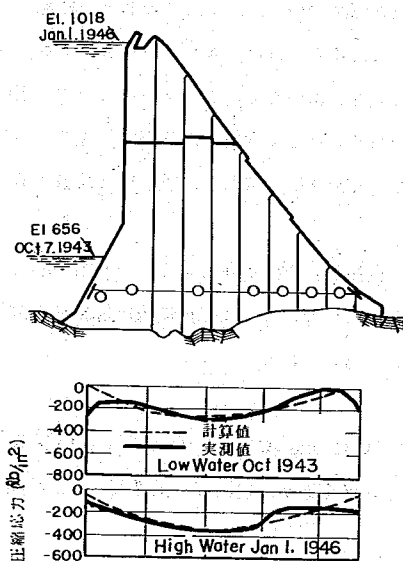


図-64 Shasta damにおける
計算値と実測値の比較

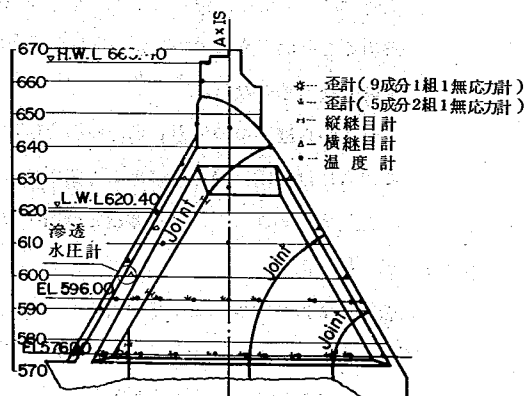


図-65 計器配置図

9.5 岩盤の挙動

マルパッセダム破壊以来基礎岩盤の安定性がダムの安定にとって極めて重要であることが認識され、基礎岩盤の挙動についての測定がかなり行なわれるようになって来た。その代表的なものは黒部第4ダムの測定である。

黒部第4ダムでは図-14に示したように基礎岩盤内に三角形のネットを粗みその変形を測定した。その測定結果に対し電力研究所の色部氏は解析を行ない、アーチの推力と間隙水圧とを受けたときの岩盤内の応力分布を二次元的に求め、これから変位を計算し、実測値との対比を行なった。その結果を示せば図-66の如くである。これによると各標高ともアーチスラストの方向には計算値よりも実測値の方が変位がかなり大きい、他の方向ではほぼ一致している。これから、岩盤内では力の伝わり方は弾性体と異なり、推力の方向に力が集中してかかることがわかる。

EL. 1340

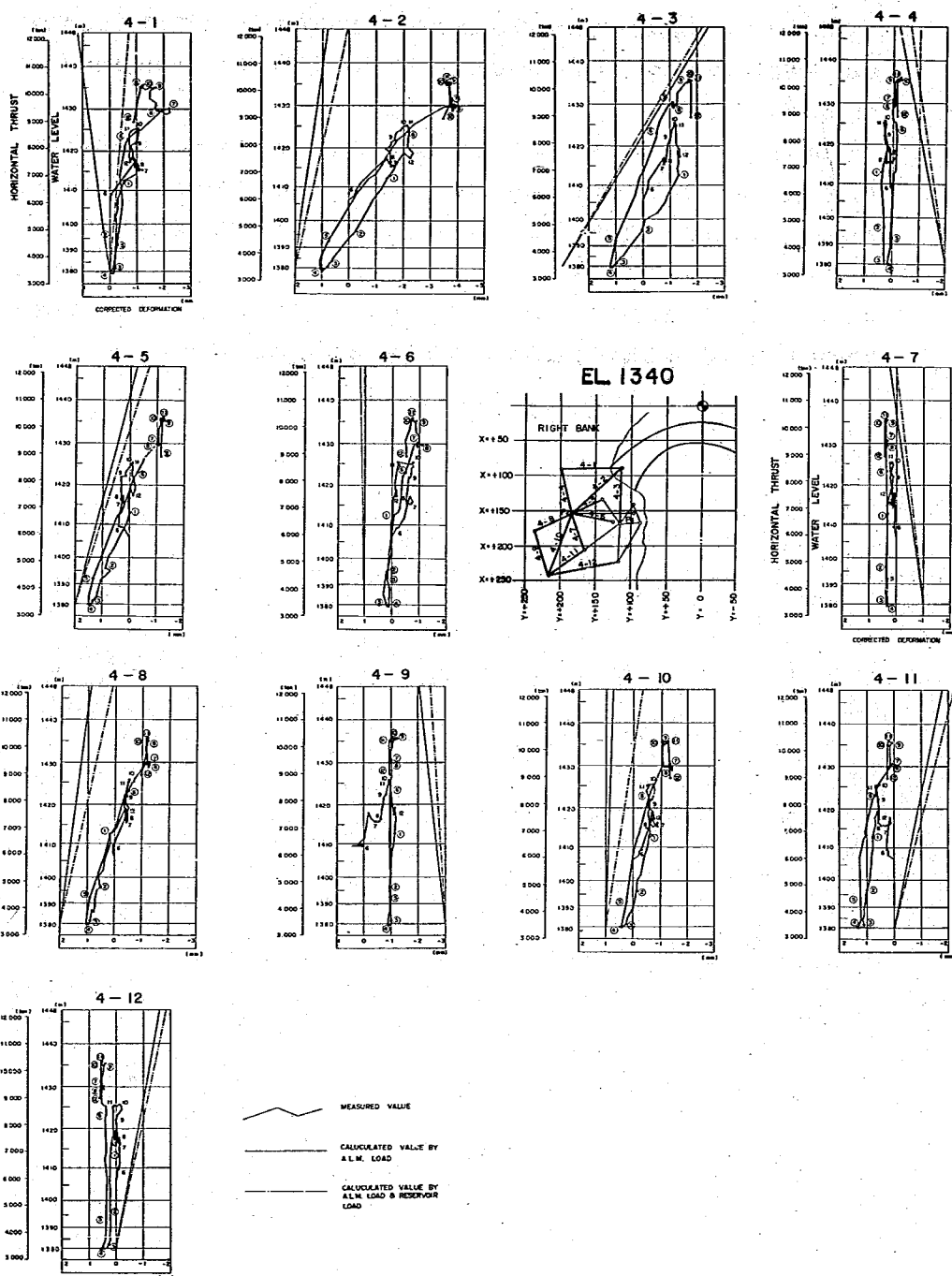
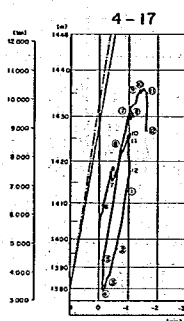
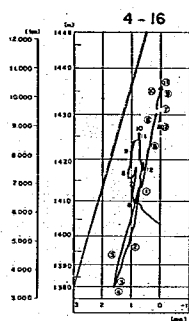
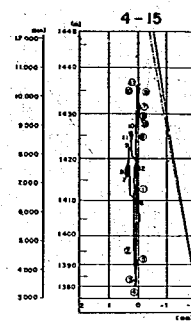
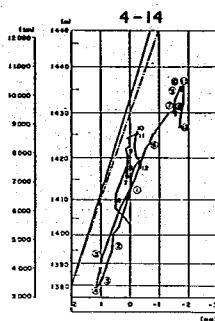
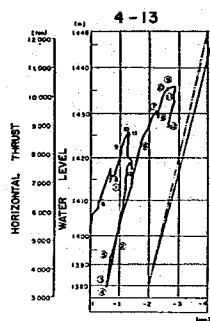
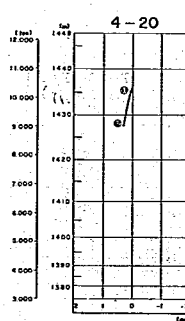
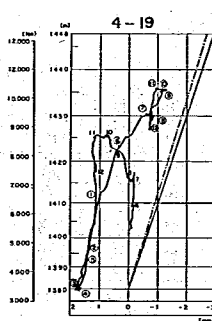
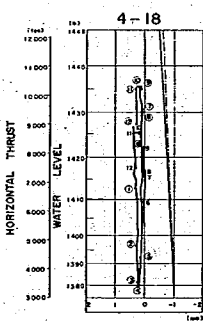
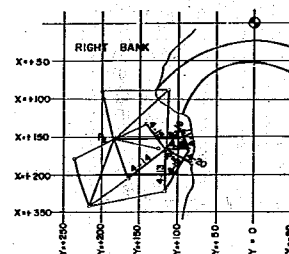


図 - 66 (a) 岩盤変位計による測定結果と計算結果
との比較 (右岸側 EL. 1340 m)

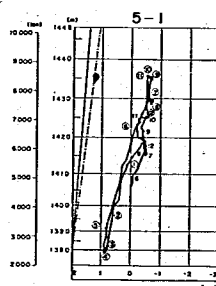
EL. 1340



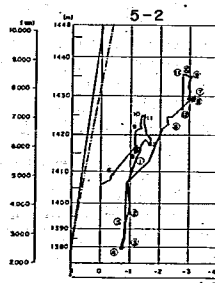
EL. 1340



EL. 1340-1350



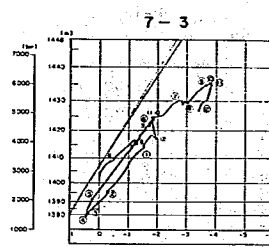
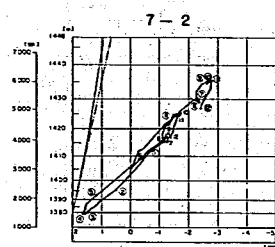
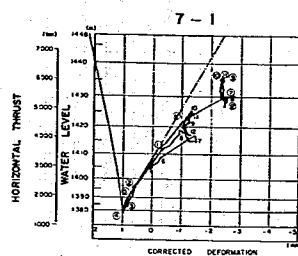
EL. 1350



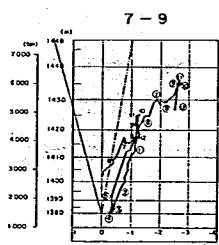
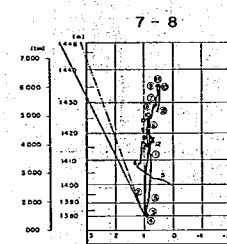
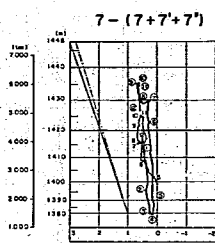
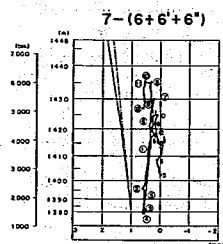
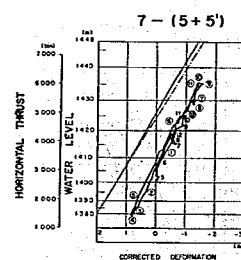
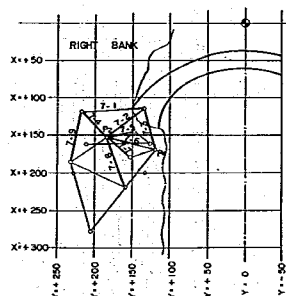
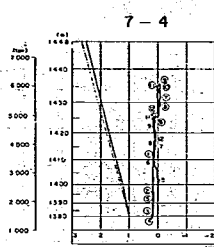
MEASURED VALUE
CALCULATED VALUE BY
ALM. LOAD
CALCULATED VALUE BY
ALM. LOAD & RESERVOIR
LOAD

図 - 66 (b) 岩盤変位計による測定結果と計算結果との比較
(右岸側 EL. 1340 m)

EL. 1370



EL. 1370



MEASURED VALUE
CALCULATED VALUE BY
A.L.M. LOAD
CALCULATED VALUE BY
A.L.M. LOAD & RESERVOIR
LOAD

図 - 66 (c) 岩盤変位計による測定結果と計算結果との比較
(右岸側 EL. 1370 m)