

ダム

林 正 夫*

緒 言

ダムでは調査、計画、設計、施工、完成後の保守等のために広範な測定をしているが、ここではつぎのものは述べる余裕がない。

① 水文、水理、岩盤等の調査、土、コンクリート等の材料試験（基礎編）、② 実験室内での構造、水理等

表-1 主要な測定事項

	項 目	方 法
施 工	岩 盤 グラウト試験（注入セメント量） 斜面や断層の滑り、崩落等に対する保安、 地下水位	ボーリング孔内で水押しや、注入セメント量の測定 傾斜計、地すべり警報器、 岩盤変位計など ボーリング孔で測定
	コンクリート構造 マス コンクリートの温度（ひびわれ防止、継目グラウト時期の判定） 継目グラウト時のブロックの変位 マスコンクリート内のひずみ 応力打設ブロックのたわみ 無応力計の動き 継目計等	温度計 ひずみ計 継目計 視準測量
中	フィル構造 粒度分布、乾燥密度、含水比、強度、透水係数、突固め等	土質試験法に準ずる（基礎編参照）
	気 象 雨量、水位、流量、気温、水温等	（基礎編参照）
完 成	ダム（岩盤もこれに準ずる） ろう水量、ろう水経路 変位、傾斜、沈下	ウェアー、色素（後述） 変位計、傾斜計、測量、下げ振り、逆振り、沈下計
	水位、水温、雨量、流量	（基礎編参照）
	浸透水圧、揚圧力 継目間げき	圧力計、水位計 継目計、せん断変位計
	ひずみ、応力 堤体内温度	ひずみ計、応力計 温度計、カールソンひずみ計
後	ひびわれ調査 地震、振動 洗掘、堆砂 諸計器の絶縁抵抗検定	超音波法、電気抵抗法 加速度計、速度計、変位計 写真測量、深淺測量

* 正会員 工博 電力中央研究所 技術研究所 土木第二部

の模型実験、⑧ 特殊な研究目的の測定。

したがって、ここでは各種ダムの施工中と完成後の表-1のような測定から話題をひろって、会員の参考に供するに止める。保守上の最小限の測定として、通産省の水力技術基準では表-2のような項目をあげている。

表-2 保守のための測定

形式 高さ (mm)	アーチダム	中空ダム	フィルタイプダム
30 以下	ろう水量	ろう水量	ろう水量
30~70	ろう水量、揚圧力、たわみ	ろう水量と揚圧力	ろう水量、沈下量移動量
70 以上	ろう水量、揚圧力、たわみ、コンクリート温度、継目の開き	ろう水量、揚圧力とたわみ	ろう水量、沈下量、移動量、間げき水圧

測定計器は、簡便、正確、集中計測、安定性等を考えて、最近では電気抵抗変化を用いたものが圧倒的に多い。その仕様の詳細は、各メーカーの型録に譲るがその信頼度は使用者で十分に確かめる態度が大切である。測定器の配置は図-1にアーチダムの例を示したように、広域になるので配線費がかなりの経費となる。したがって、計測の集中化の程度についても工夫を要することが多い。

1. ダムの測定での二、三の特徴的な事項

(1) マス コンクリート内での計測

マス コンクリートは打設後に次第に発熱し、硬化し、強くなる。持続荷重を受けるといわゆるクリープを生じてひずみが増していく。応力よりもひずみが計測しやすいので、ひずみに対応する応力値は有効弾性係数を用いてひずみから換算することが多いが、この係数が材令、載荷時間、水分の状態、側面からの応力のかかり方、コンクリートの配合等に左右されて、一義的に定めにくい。そこで、応力計、無応力計、クリープ特性値にもとづく有効弾性係数の決定等の工夫をして、マス コンクリート内の応力をより精度よく求めるべく努めている。

a) 応力計

ひずみ計は上述の難点があるので、直接に応力を知るためにこの計器が生れた。その原理はつぎのような弾性理論の知識¹⁾に基づいている。図-2で弾性係数 E_1 の円筒状挿入物（直径 $D \times$ 高さ H で側面は自由）が弾性係数 E の材料の中にあり、応力 σ を受けたとき、挿入物の平均応力 $\sigma_1 (= \sigma/r)$ は H/D が小さく扁平なほど本来の応力 σ に近く ($r \rightarrow 1$)、また挿入物が十分かたいと $E_1 \gg E$ なので、応力集中度 r はその形 H/D で左右され、 E_1/E にはほとんど関係がなくなる。したがって、コンクリートの剛性がかなり変化しても、扁平な挿入物なら応力集中度 r は一定値とみなしてよく、この

図-1 測定器の配置 (一ツ瀬アーナダム)

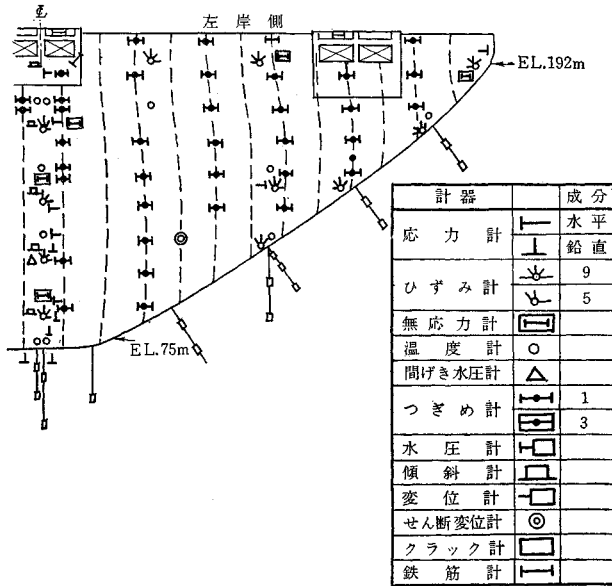


図-2 応力計の原理

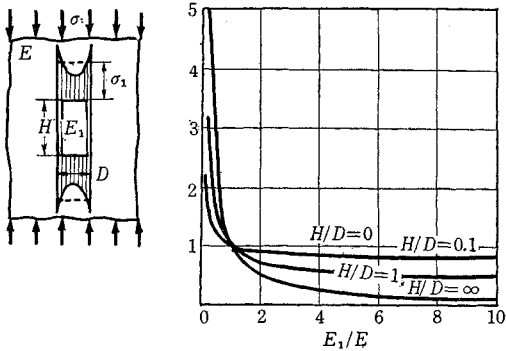


図-3 カールソン型応力計

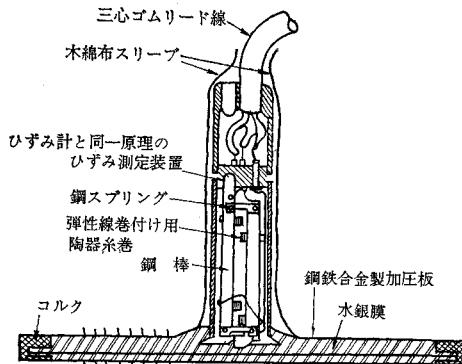
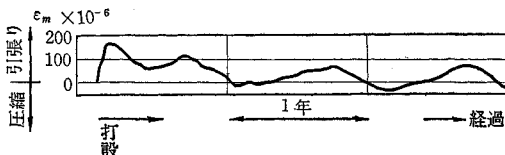


図-4 無応力ひずみ計の経時変化の例



ことが応力計の基本的な原理となっている。しかしながら、図-3 のようなカールソン型の応力計の円板をマス コンクリート内に埋込むときに、空洞や水溜りができ致命的な誤差源となることがあり、十分に注意をして埋める。そのために、敷きモルタル上に応力計を押し込んでから、約 10~20 kg の重錘を半日ほどの間載せたり、傾けて設置する場合には、あらかじめ傾斜面を箱抜きでつくり、圧着が完全にいくように注意する。

b) 無応力ひずみ計

マス コンクリートが外部から応力を受けなくても、湿度の変化、コンクリートの自己成長、コンクリートの収縮および温度変化等の原因でひずみ計の読み ϵ_m が図-4 の例のように変動する。これらの中で温度変化にもとづくひずみ量は、カールソン型の計器なら温度測定も同時にできるので差し引き計算ができる。しかし他の要因は材令その他複雑な

環境に影響を受け推定できないので、図-5 のようにマス コンクリート内で外応力は受けないが、他の要因によるひずみ ϵ_c だけを検知するいわゆる無応力ひずみ計を要所ごとに設けて、外応力によるひずみ ϵ を $\epsilon_m - \epsilon_c$ として算定することも行ない精度の向上を期することができる。

c) クリープひずみの補正

コンクリートが材令 K_i で応力 $\sigma(K_i)$ を受けると、その瞬間に弾性ひずみ $\sigma(K_i)/E_i$ を生ずるが、その後 t_i の載荷時間の間に $\sigma_i f(K_i) \ln(t_i+1)$ のクリープひずみが発生するとみなすことができ、したがって全ひずみ $\epsilon(t_i)$ は、

$$\epsilon(t_i) = \left\{ \frac{1}{E_i} + f(K_i) \ln(t_i+1) \right\} \sigma_i(K_i)$$

となる。 E_i や $f(K_i)$ 等は、普通は一軸圧縮のクリープ試験で試験室の中で求められる。ダム コンクリートについての例を 図-6 に示す³⁾。クリープ特性 $f(K_i)$ は、研究者の間では、湿度状況、3 軸的な拘束応力状況

図-5 無応力ひずみ計の配置

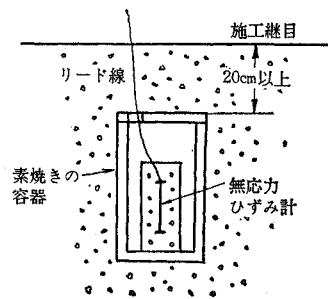


図-6 ダム コンクリート クリープ定数 $f(K_i)$

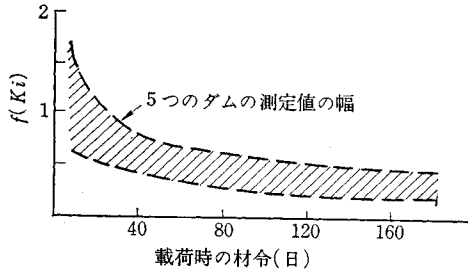


図-7 ひずみ値のクリープに対する補正をして応力の算定

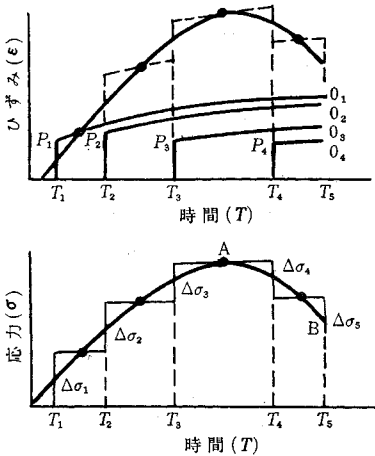


図-8 せん断変位計

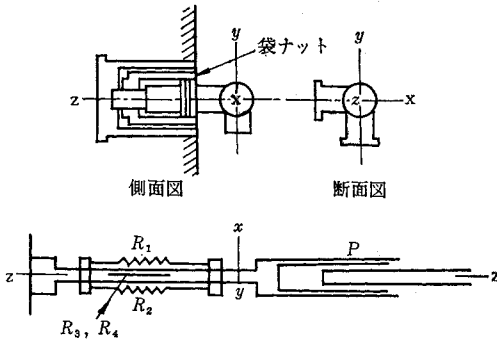
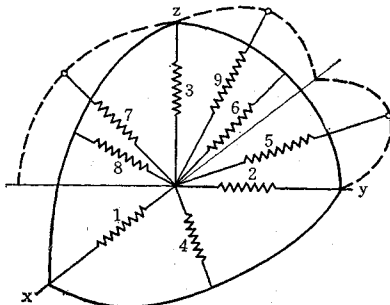


図-9 立体応力の測定のためのひずみ計のロゼット



の影響、応力水準にかかわらず $f(K_i)$ を定数と考へて重ね合わせることは是非、ウェット スクリーニングの影響、および載荷と除荷で $f(K_i)$ が異なること等コンクリート特有のむずかしい問題が研究³⁾されている。通常はつぎの原理で応力を積算している。図-7 の $\epsilon-T$ (時間) 曲線を ΔT_i ごとに分割し、各時間間隔中点 T_i でのひずみ変化 $\Delta \epsilon_i$ に対する応力変化 $\Delta \sigma_i$ を

$$\Delta \sigma_i = \Delta \epsilon_i \left\{ \frac{2}{(E_i)} + f(K_i) \ln(t_i + 1) \right\}$$

により求め、任意の時刻 $T = K_i + t_i$ での応力 σ は、 $\sigma = \sum_j \Delta \sigma_j$ となる。もちろん最近では電子計算機で応力値への換算が行なわれる。通常は、材令1ヵ月以上での安定したひずみに対してクリープの補正計算が行なわれる。

(2) 継目や断層のせん断変位の測定(せん断変位計)

ダムの収縮継目や岩盤の断層のずれを測ることが大切な場合があり、図-7 の原理に基づくせん断変位計を用いることがある。それは図-8 の xy 面がずれの面の場合 xz 面(水平面)内の曲げを測る x 計(図-8 の R_1, R_2 なる縁ひずみを測る)と、 yz 面(鉛直面)内の曲げを測る y 計(R_3, R_4 なる縁ひずみを測る)と x 方向の継目の開きを逃がす P 部分より成る。図-8 の矢印方向のせん断 S に対しては x 計が A を固定された片持ばりとして曲げひずみを感じ、この場合は y 計は感じない。これは一例にすぎないが、巧妙な工夫により種々の測定が開発されている。

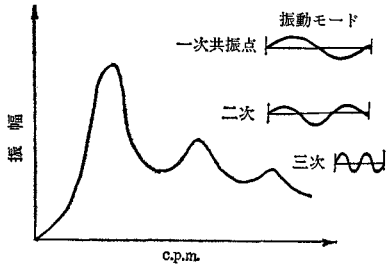
(3) 立体応力を求める多成分ひずみ計

図-9 のように、各方向ひずみを測って応力の立体的な分布を知ることがダムでは必要なときがある。理論的には1, 2, 3, 4, 6, 8 の6成分でよい。しかし、チェックをするのに9成分を測ることがある。ダム表面、監査廊等一つの面 yz が主応力面で自由面のときは2, 3, 6 の3成分でよいが、チェックのために4成分を測ることが多い。立体応力状態でも特定の面、たとえば鉛直面とか水平面内だけの応力を知るには5成分を用いるとよい。チェックには、互いに直交する3方のひずみの和が不変量である条件を適用する。

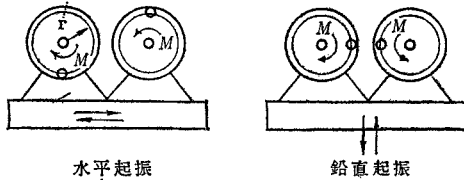
(4) ダムの振動測定

ダムでは、通常は震度法により地震力を静的に換算して設計しているが、その裏には、① 振動台や電磁加振器を用いた模型実験で、共振曲線、基準振動の振幅に対する応力の関係、② 現地測定で実際の地震の波形や減衰係数等を測定して設計条件を検討し、③ 地震がなくなっても、起振機を堤頂や堤内にすえてその起振力の振動

図一10 共振曲線



図一11 起振力 ($P=2Mr\omega^2 \sin \omega t$)



数を徐々に変えて各点での振動を測り、図一10のような共振曲線をつくり、固有振動周波数、減衰定数、振動形態等を知ることができる。その基本知識はこの講座の基礎編で述べられている。起振機(図一11)は、数馬力の変速交流モーターによって偏心回転体を駆動する方式が用いられている。その出力は、偏心距離を変えることによって可変となる。

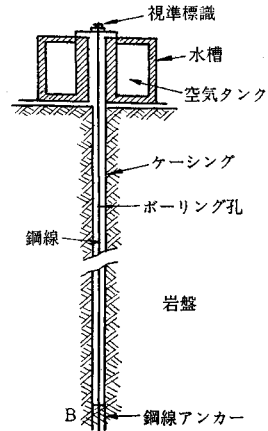
振動測定に当っては、① 多数点の同時観測、② 長時間でも安定で感度不変、③ 保守が簡便で経済的、④ 高感度で小型なこと等に留意する。測定量は従来の加速度、速度、変位に加うるに最近では動ひずみ、動圧力も測るようになってきている。観測装置は、まず感震器で地震を感じてスターターを経て測定装置を起動するようにしている。振動の測定は、動コイル型や、電気抵抗型が多く、出力を抵抗でできているアテネーター回路を通じて検流計によって測る。地動、振子および検流計の固有周期や減衰比の大小関係の選び方によって、加速度、速度、および変位が測れることはこの講座の基礎編で述べてある。動ひずみの測定には、堤体内の静ひずみ測定用のカールソンひずみ計を兼用³⁾できる。ひずみ変化に応じた出力電圧の応答を、増幅器と自働平衡回路を通じて電磁オシログラフに記録させるわけである。スターターは初期微動で動作しはじめ(通常 0.1 gal 程度)、その後の主要震動を自動記録装置で記録するが、スケールアウトするような激震がくれば自動的にアンプからの信号で減衰器が働らき、感度の切りかえが行なわれるように工夫される。計器の設計上予想すべき地震動の振動数範囲はかなり幅広くとるべきで、最大 600 cpm ぐらいまでとの報告がある⁴⁾。

2. ダムの岩盤の測定の一、二について

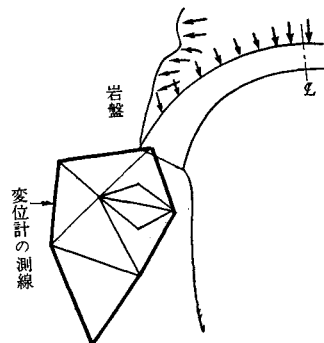
ダムの岩盤の計測では、浸透水圧、岩盤変位(図一12は倒立振子型変位計、図一13は黒部第四ダム⁴⁾の岩盤変位計の測定網)、グラウト工の後でその効果の確認のためのルジオンテスト、および斜面保安のための傾斜測定等が大切である。たん水後の保安のために最近の大きなダムでは、図一13のような測定網を岩盤内に設置して、降雨後や地震後に生じがちな岩盤の変状を定量的に把握することにつとめるようになった。ルジオンテストとは、ボーリング孔内の各深度での透水性を調べるための試験であり、定水圧に保持するのに必要とした補給水量(l)をルジオン単位で呼ぶ。

この単位は、 $l/m/min/10$ 気圧であり、 $\phi 50$ mm 前後のボーリング孔で行なった場合には、ダルシーの透水係数に換算し1ルジオンは 1×10^{-6} cm/sec 程度に理論上は相当する。カーテングラウトを岩盤に施した場合には、1~10 ルジオンが施工目標の大きな目安とされる場合が多い。

図一12 倒立振子型の変位計の原理



図一13 アーチダムの岩盤内の変位計の配置 (黒部第四ダムの例)



岩盤のわれめや風化の程度は、従来は岩盤内の小爆破によって生ずる各孔内での弾性縦波の到来時間の測定値から算定した縦波 (p) 速度によってある程度分類が可能であった。さらに最近では従来は困難視されていた横波 (s) も判定可能になりつつあり、 p 波と s 波の速度値の両方から、岩盤の力学的性質をさらに適確に求めるいう勢にある。速度 $v_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, $v_s = \sqrt{\mu/\rho}$ ポアソン比 $\sigma = \lambda / \{2(\lambda + \mu)\}$ の関係にあり、 λ は岩盤の Lamé の定数、 μ は剛性率、 ρ は密度であるが、 v_p , v_s の測定値より算定したポアソン比 σ が $1/3$ 以下なら、トンネル掘削では支保工が要らず、後普請では落ちを防止する程度であるとの報告もあり⁹⁾、今後の応用がひらけることを期待したい。

岩盤の強さを知るための岩盤の現位置せん断試験や、変形性を測るジャッキ変形試験、水圧室変形試験等については成書⁹⁾を参考されたい。

浸透水の経路を調べるためのトレーサーとしては、食塩、塩化アンモニウム、蛍光染料 (フロレッセイン、フクシン等)、ラジオアイソトープ (ナトリウム、燐、沃素、コバルト、臭素等) を用いるが、その選択に当っては、人体、農作物、魚類などへの影響に注意する。トレーサーの検出にはトレーサーの種類に応じて導電度計、蛍光計、紫外線ランプ、光度計、ガイガーカウンター、比例計数管、シンチレーションカウンター等を用いる。岩盤斜面や土質のり面の施工中の安定は保安上重要で、そのため傾斜計 (図-14) や地すべり警報器が大切である。

3. 施工中の測定

(1) コンクリート ブロック打上り中のひびわれ防止と測定との関連 (中空式重力ダム)

ダイヤモンドヘッドの上流面中央部には、鉛直、上下流方向にひびわれが入りやすい。その原因は、マスコンクリート内の硬化熱と外気温の降下とによる大きな温度勾配、およびコンクリートの乾燥収縮である。大森川ダムの建設に際しては、種々の検討⁷⁾が加えられた。打設後若い材令でのコンクリートの純引張り強度は、 $\phi 15 \times 60$ cm の供試体で4日で 8 kg/cm^2 、7日で 11 kg/cm^2 、14日で 14 kg/cm^2 、28日で 20 kg/cm^2 、純引張りでのクリープ特性と圧縮でのそれを比較してみたところ、図-15のように引張りの場合は圧縮の場合の半分程度しかクリープしなかった (この種の若い材令での比較はまだ例が少なく、今後の研究に待つことが多い)。若い材令でのヤング率 E も4日、7、14、28日で16万、17万、19万、23万 kg/cm^2 と増加した。外気温の各月の最低

図-14 微分傾斜計

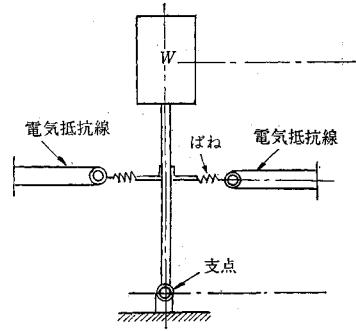


図-15 若い材令でのコンクリートの引張りクリープと圧縮クリープの比較例

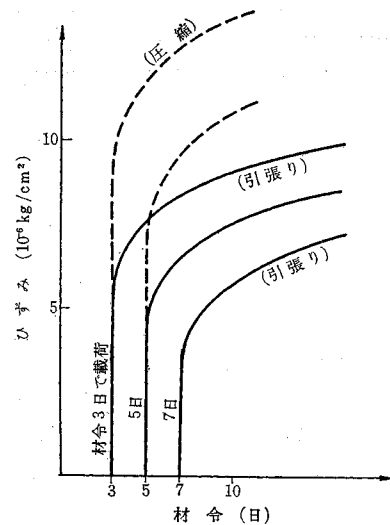
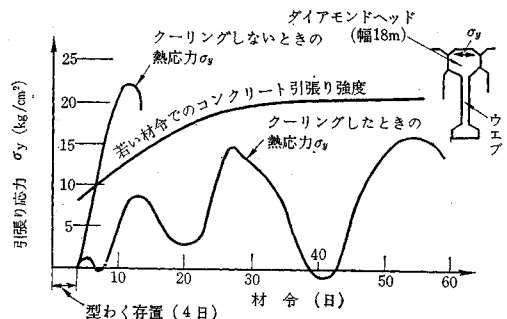


図-16 ダイヤモンドヘッドの熱応力 σ_y (大森川ダム)



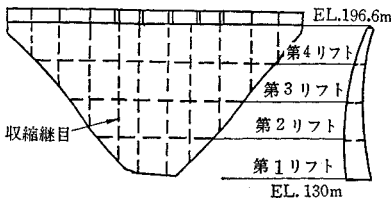
は、10月は -1°C 、11月は -3°C 、12月は -5°C で一方ダイヤモンドヘッド ($18 \times 12 \text{ m}$) の温度分布の測定の結果では、4日間の型わく存置中はほぼ一様に温度は上昇し、型わく取りはずし後は中心部は12~14日まで上昇をたどり、一方周辺部は冷やされて、周辺部での温度勾配は 18°C/m に達する場合もあって、ひびわれが生

じた。しかし、パイプクーリングの結果 $6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ におさまった。実測の温度分布 $\theta(x, y)$ を使って、熱弾性方程式 $\partial^2 x/\partial x^2 + \partial^2 x/\partial y^2 = -\alpha E/(1-\mu) \cdot \rho^2 \theta$ を差分式に直して解き、ダム軸方向の応力 $\sigma_y = \partial^2 x/\partial x^2$ を計算した結果 図-16 が得られている。図-16 では、各材令でのコンクリートの引張り強度やクーリングパイプ通水期間等の関係でのひびわれに対する抵抗性を察知できる。この種のひびわれ防止のために打設速度、型わく取りはずし時期、セメントの質と量、人工冷却、表面撒水、表面鉄筋等いろいろな要点があるが、施工中の温度測定に基づいて温度勾配を数 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ に規制するのがよい。

(2) 継目グラウト工の施工時の測定 (アーチダム)

マスコンクリートの収縮したことを確認した後に、止水およびダムの一体性確保のために継目をセメントでグラウトするが、図-17 の収縮継目にグラウト管網を通じて注入する時期の判定には、堤体内の温度計の読みが低く安定したこと、継目計の読みが $1\sim 2\text{mm}$ 以上の間隔きを指示したこと等が目安となる。あらかじめマスコンクリートの冷却の計算を熱伝導論により計算をしてその時期を予測するのが通例であるが、パイプクーリングやプレクーリングの工程、リフトの打上り工程等の実状に応じて判断するため、上記の測定が重要である。さらに大切なのは注入の圧力でダムブロックに異常な変形や、ひびわれを発生させないための施工管理の測定である。その計測には、継目の開閉とずれをダイヤルゲージや継目計により、堤頂でのたわみを規準測量により、またブロック内のひずみをカールソン型ひずみ計により行なうことが多い。佐々並アーチダムの場合には⁸⁾、各グラウトリフトごとの注入のとき、中央片持ばりの底部の応力変化は $0.2\sim 1.9\text{kg}/\text{cm}^2$ の程度であった。堤頂部のたわみ変化は 1.5mm 程度であったが、この観測では注入の影響よりも、そのときの晴れや曇りによるたわみの変動が卓越することもあった。

図-17 収縮継目の配置



(3) ロックフィルダムの施工中の測定

ロックフィルダムの土質しゃ水壁は十分なしゃ水性、十分なせん断強さを備えるために締固めが大切で、施工中は主としてその含水比を突固め試験により、密度

測定を砂置換法により定時的に実施している。そのほか、粒度分析や透水試験も行なう。フィルタイプダムでは、コンクリートダム以上に施工管理が完成後の安定にとって重要であり、安定した品質の維持に努力が払われている。以下、簡単に統計的な管理を述べておこう。① まず同じ土取場の土を盛った部分、同一日の施工部分、同一締固め方法を適用した部分ごとに試料を数個ずつ採り、含水比や締固め密度の測定値 x の組をつくる。② 各組の平均 \bar{x} や各組の中の最大 x_{\max} と最小 x_{\min} の範囲 $R = x_{\max} - x_{\min}$ を求め、③ n 組について分散 $\sigma^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2/n$ 、標準偏差 σ を計算し、④ 各組の平均 \bar{x} と各組の範囲 R の平均 \bar{R} を求めて、管理図を横軸に組の番号、縦軸に \bar{x} または R をとって作成し、同時に \bar{x} , \bar{R} 等を横線で記入しておく。

“何だか変だ” と思う判定を有意差の判定と呼んでおり、それには通則があり、それは 5% 水準の規則と呼ばれるもので $(\bar{x} \pm 1.96\sigma/\sqrt{n})$ より \bar{x} がはみ出せば作業を続行しながら変動原因を調査し、かなりの頻度で出る場合には再施工することがある。確率論の根拠は、この飛び出しが偶然とみれば 5% 以下の確率でしか生じないので、この差をもっと意味のあるものであろうと考えようとするにある。

(4) ダムコンクリートの品質の変動係数

コンクリートダムでも施工中に各種の材料、まだ固まらないコンクリート、およびコンクリートの品質等を施工中に測定する。認められる変動係数は、ほぼ表-3 のようである。岩盤については明確にしがたいが、その非均質性、不連続性よりしてダムコンクリートに比してかなり大きな変動係数を見こむべきである。変動係数はダムの安全性を推計学的に考えるために重要な事項であり、構造物の安全率をさらに科学的に吟味することが将来行なわれるであろう。

表-3 ダムコンクリートとその素材の変動係数の大略の値

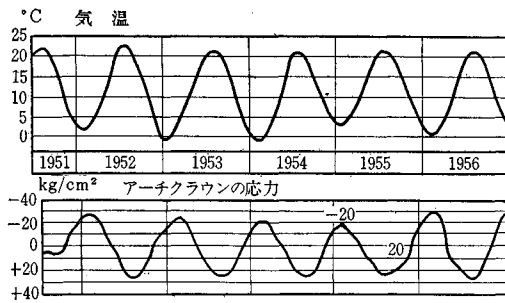
材 料	試 験 項 目	変動係数(%)
セメント	比 重 値	0.1~0.2
	フ ロ ー 曲 げ	3~5
	モ ル タ ル 圧 縮	3~15
	モ ル タ ル 水 和	3~10
砂	粒 度 分 布 (%) 1.2 mm 以上	1~5
	“ 1.2~0.3 mm	2~4
	“ 0.3 mm 以下	2~4
骨 材	表 面 水 量 (細骨材)	5~10
	“ (粗骨材)	1~5
コンクリート	単 位 体 積 重 量	5~15
	ス ラ ン プ	7~20
	空 気 量	5~20
	圧 縮 強 度 (28 日)	10~20

4. 完成後の測定

(1) アーチ ダムの挙動の特徴

アーチ ダムのたわみや応力の実測は、ここ 10 年ほどの間にかなり実施され、設計上いくつかの重要な事項が判明した。その一つは、ダムが貯水池からの水圧によってよりも、外気温の変動に即応して挙動していることで、図-18 のように測定値が周期的に変動する。そして、薄いアーチ ダムほど気温変動による周期的なたわみや応力が静水圧によるものよりも卓越するし、従来の設計基準では考慮していなかった最高温度時に、最大応力が現われる⁹⁾ ことがかなり多いことも明らかとなった。

図-18 アーチ ダムの周期的な温度応力の例



実測のクラウンのたわみ δ の構造式を、標高 i での平均温度 t_i 、温度勾配 α_i 、水位 h 、およびコンクリートや岩盤のクリープ等を因子として、各時点でのたわみから、次式

$$\delta = k + \sum_{i=1}^3 a_i t_i + \sum_{i=1}^3 b_i \alpha_i + \sum_{i=1}^4 C_i h_i + \sum_i \alpha_i \log \left(\frac{1+\theta}{1+\theta_i} \right)$$

の未定係数を多変量解析による統計処理で求めた結果¹⁰⁾ 綾北ダムではたわみの内訳は水圧により 6 mm、平均温度変化により振幅は 20 mm、温度勾配による振幅は 13 mm で、温度変動が支配的にたわみに影響している。この場合の各標高における温度相互、あるいは温度と温度勾配の間の相関が強いので、因子の中の主なものを統計的に検定をして計算をして、信頼度を上げることに特に注意が払われた。

その二つは、設計計算や模型実験と、完成後の実測値がどの程度合致しているかという問題である。一般的に言って実測応力の絶対値の方が小さいといわれているようである²⁾。この理由は、設計条件としては無視しているダム内の各種のつぎ目での応力の調整作用や、コンクリートの準塑性的な性質に基づく応力調整作用が、この複雑な高次の不静定構造物ではきわめて巧妙に生ずる結

果と推論できる。しかし、確証はむずかしい。設計時に問題になりやすい堤底の引張応力については、佐々並川ダムではクラウン片持ばりの底部の鉛直応力が、計算では 4.3 kg/cm²、模型実験では 0.6 kg/cm² のそれぞれ引張応力であったのに、実測では 3 kg/cm² の圧縮応力であった²⁾。しかし、岩盤取付け部のダムの応力は岩盤の状況によって敏感に変わるので、設計や模型実験と対比して ± 5 kg/cm² 以上の精度を期待することは、構造力学上は無理なように感じられる。

(2) 放流時の余水吐の振動測定 (中空式重力ダムの場合)

畑薙第一ダム (高さ 125 m) では、ダム下流面に接して発電所を設け、その屋根が余水吐の敷を兼ねている。1700 m³/sec の放流時に、つぎの事項が実測された¹¹⁾。

- ① 流速 (多孔式ピトー管, 抵抗線式圧力計, 電磁オシシロ),
- ② 水圧分布 (抵抗線式圧力計, ビジグラフ),
- ③ 振動 (水平変位計, 上下変位計),
- ④ 吸気量,
- ⑤ コンクリート面の損傷,
- ⑥ 変位,
- ⑦ 騒音,
- ⑧ 跳水現象,
- ⑨ 河床の洗掘, 等である。図-19 には、実測圧力分布と模型実験との比較を示している。負圧が模型実験で認められたが、実測では 1700 m³/sec のときには認められなかった。800 m³/sec では -1 t/m² の負圧が実測でも表われた。振動は 図-20 のように 0.01~0.03 秒の高周波と、0.06~0.11 秒の低周波が重複した複雑なもので、一方余水吐の敷への動水圧の周期を分析してみると、図-20 のように 0.03 秒であり、屋根の振動とは一致していない。この余水吐の減衰定数は 2~4% であった。今後、高いダムが揚水発電所と連けいする傾向が強まると、この例のように余水吐が即発電所の屋根とする大規模な構造が増えるので、動水力学の新しい応用面の一つとなろう。

図-19 全水吐の敷 (発電所屋根と兼用) の動水圧測定の例 (畑薙第一ダム)

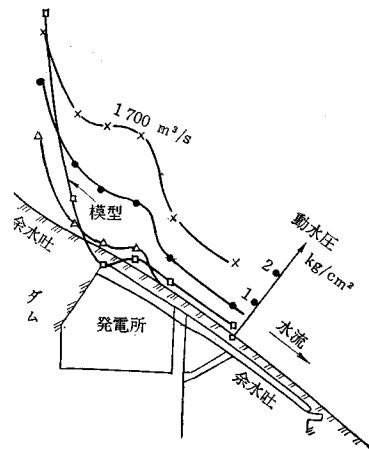
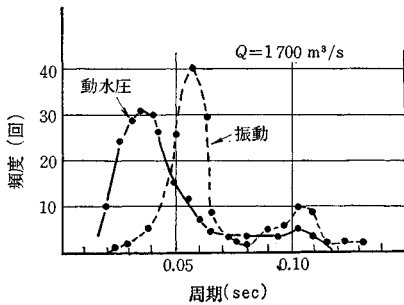


図-20 全水吐の敷（発電所屋根と兼用）の
動水圧と屋根の振動のスペクトラム



(3) 保安のための測定値の管理式（重力ダムの例）

実測値を数式化し、保安のための目安を科学的にする努力が橋樑ダムで払われた¹²⁾。その測定の主な項目は、自然冷却中のダムと岩盤の温度履歴、太陽輻射によるダム表面近くの温度、ダムの温度応力、縦つぎ目の挙動、ダムの基礎面近くの応力、および揚圧力等である。このダム（高さ 73 m）では、8年間のつぎ目の動き、ひずみ、および応力等の挙動 B_i と、水深 h 、気温 t 、3段の既定の標高での内部平均温度 t_i 、平均温度勾配 a_i 、($i=1, 2, 3$)、その他の経時変化要因 τ 等の諸要因の関係を次式で表現できると仮定して、各係数を実測値から定め、今後のダムの管理のための予測式を求め保安上の尺度を得ている。

$$B_i(h, t, a, \tau) = f(h) + \sum_{i=1}^3 A_i t_i + \sum_{i=1}^3 A_i' t_i^2 + \sum_{i=1}^3 B_i a_i + \sum_{i=1}^3 B_i a_i^2 + C_1 t + C_2 t^2 + D_1(1 - e^{-\tau}) + D_2(1 - e^{-0.01\tau}) + D_3(1 - e^{-0.01\tau}) + K$$

その結果、ダムの挙動は竣工後 3~5 年で安定し、各要因の中で温度変化によるものが支配的であることが重力ダムの場合にも認められ、ダムの縦方向打つぎ目にはキーウエイを設けたが、それにはグラウチングを施していないにもかかわらず、このつぎ目の上下流の両ブロックが一体的に安定な挙動を示していることを明らかにしている。

(4) ロックフィル ダムの完成後の測定

ロックフィルダムは、急速な水位低下時の安定、洪水時の越流の絶対防止、および地震時の安定等で完成後の主要な事項であろう。揚水発電用のフィルダムでは、5~6時間で 30 m の水位低下を日々くり返すこともあり、上流面近くの堤内の残留間げき水圧は重要な問題である。その安定性の実測には、カールソン型間げき水圧計および層別沈下計（図-21）等が用いられている。本沢ダム（73 m）での急速水位低下による間げき水圧¹³⁾の

一例は 図-22 に示すとおりである。ロックゾーン、フィルターゾーン、玉石ゾーン等にきわめて敏感に応答が認められ、上部流の排水は良好である反面、上質しゃ水壁部分にはほとんど応答がなく、貯水位の変動の影響がおよんでいないことを示している。

ロックフィルダムは、完成後経年的に沈下と水平移動がかなり認められるが、沈下量はダムの高さの 2% 程度になることと、合成変位の方向は、上流面にほぼ直角に近いことが、内外の多数の実測例から認められる（図-23）。

図-21 層別沈下計

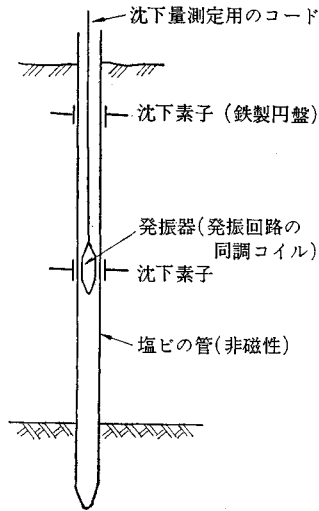


図-22 ロックフィルダムでの急速水位低下時の間げき水圧（本沢ダム）

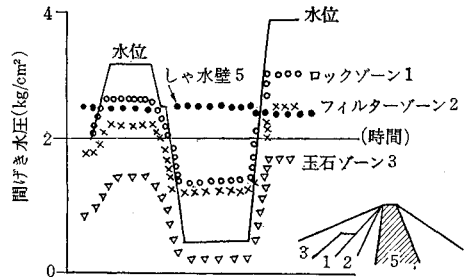
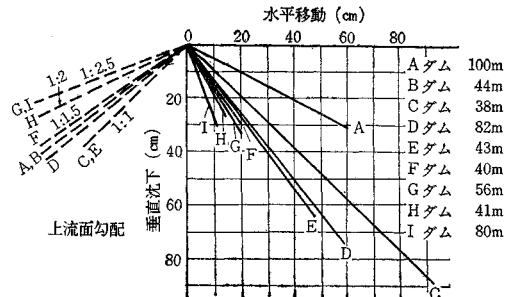


図-23 ロックフィル ダムの変位と上流面勾配の関係の実測例



(5) 測定値の信頼限界

蛇足ながら、測定値がおかしいかどうかを判定する場合の信頼限界なる言葉についてもちょっと述べておく。測定値が 95% (または 99%) まで確率的に生じうる限界 d が、信頼度についての一つの目安となる。これよりもみ出した測定値が出だしたらならば、その原因を考究することが望ましい。

信頼限界 d を求めるには、 n 個の測定値 x_i の平均 \bar{x} と、標準偏差 $S = \sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}$ とし、自由度 $(n-1)$ に対して表-4 の Student の t 分布表から、信頼係数 95% (または 99%) のときの t の値を求め $d = \pm tS / \sqrt{n}$ として計算できる。

表-4 t 分布表

n	信 頼 係 数	
	95%	99%
10	2.228	3.169
15	2.131	2.947
20	2.086	2.845
25	2.042	2.787
30	2.042	2.750
60	2.000	2.660
120	1.980	2.617

(6) アーチ ダムの地震時の観測

アーチ ダムの設計上の残された主要問題は、岩盤の安定と地震時の安定である。いま地震時の観測の二例をあげておく。上椎葉ダムでは¹⁵⁾、震源の遠い場合の振動数は近い場合のそれに比し小さく、低い振動数の震動の方が高い振動数のそれよりも地盤の変位震動は大きい、加速度震動は逆に小さかった。図-24 は岩盤の震動とダムの応答をスペクトル解析したものである。殿山ダムでは¹⁶⁾、1960 年の地震記録の中で堤頂中央での最大加速度は 18~25 gal であった。岩盤の振動数は 1~20 cps と広範囲にわたり、卓越振動数は特は認められないようである。上下震動は水平震動の 1/1~1/5 であり、近地震のときはこの比率は大きい傾向にある。ダムの方は、共振振動が主として低次の基準振動に 図-25 のように誘起されている。従来はあまり取り上げていなかったアーチ ダムの上下震動による応力が、このダムでは設計上考えに入れるべき程度に発生したことも報告されている。アーチ ダムの一次基準振動の減衰定数は、実測例では 2~5% となっている場合が多い。

最近改訂されたアーチ ダムの設計基準では、動力学的な挙動の研究の成果をとり入れて、岩盤の震度の 2 倍 (従来は 1 倍) をダム本体の震度として考慮することになった。反面動的な許容応力は静的なその 30% 増し (従来は 1.5% 割) としている。今後¹⁷⁾はさらに、実際

図-24 地震時の震動周波数スペクトラム (上椎葉ダム)

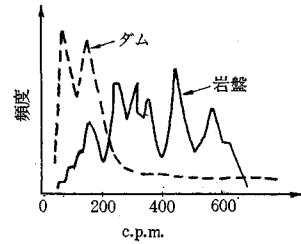


図-25 地震時のダムと岩盤の振動解析 (殿山ダム)

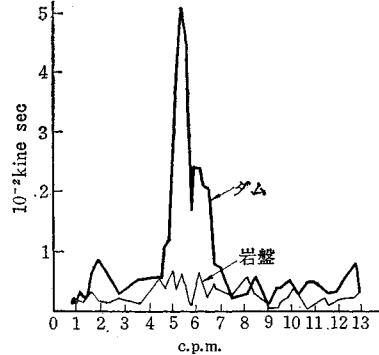
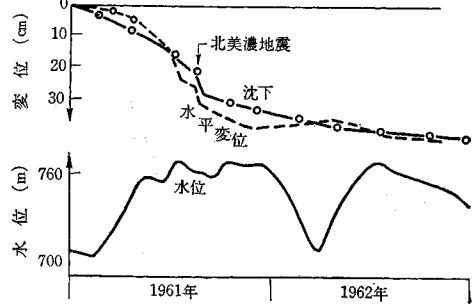


図-26 地震時のロックフィルダムの沈下 (御母衣ダム)



の地震によるダムの応答、特に動的応力、減衰性、地震波の性質等について、実測資料が蓄積され設計の信頼度を高めることになろう。

(7) フィルダムの地震時の挙動

大きなロックフィルダムが大きな地震を受けた経験はまだ少ないが、御母衣ダム (高さ 131 m) は、1961 年の北美濃地震で震央から 20 km の位置にあった。ダムサイトでの加速度は、近辺の地震計記録から、0.1 gal 程度と推定された。地震後は 図-26 のように、堤頂沈下量は約 3 cm、水平変位量は河流方向に約 5 cm の急変が測定された¹⁶⁾が、ろう水は 24 時間程度は濁っていたが旧に復した。要するにかなりの地震でも特に被害を受けなかった。その時はまに合わなかったが、その後は地震計を設置し常時観測されている。

アースダムはしばしば震害を受けているし、最近は堤

高も高くなったので、起振機をすえ人工的に振動モードや減衰定数を定めることも行なわれているが、実際地震の例をここであげておく。山王海ダム(高さ 37 m)で電磁式の加速度計や速度計を用い、両岸地盤、堤頂、のり面中腹、のり尻等で観測したところ¹⁷⁾、新潟地震のときの主部 5 秒の記録のフーリエ解析の結果、堤頂の水平振動スペクトルには二つの卓越周期 2.7 cps と 4.5 cps、上下動では 4.5 cps が認められた。加速度は右岸地盤に比して堤頂は水平動で 2~5 倍、上下動で約 4 倍であった。

(8) 中空式重力ダムの振動

中空式重力ダムは、ダム軸方向の地震力に対する薄いウェブ壁の安定について関心が持たれる。図-27 に井川ダム(高さ 103 m)の場合¹⁵⁾の共振曲線を示す。図-27 では 2 つのピークが現われており、鋭い方が壁の固有振動に相当し 580 cpm である。減衰定数は 1.5% 程度にすぎず、ウェブ壁の振動は減衰しにくいことを示している。

図-27 中空式重力ダムのウェブの共振曲線と振動形態 (井川ダム)

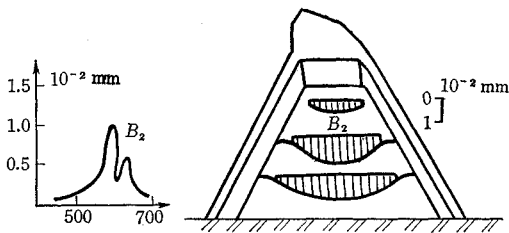
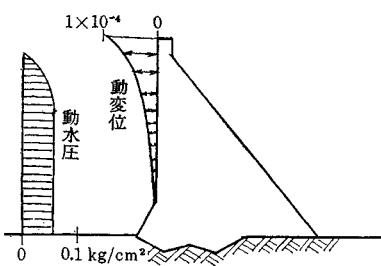


図-28 動水圧分布と動変位分布 (田子倉ダム)



(9) 動水圧の測定

Westergarrd 以来いくつかの理論的研究がある動水圧も、実測の例にあまり多くない。人工的に動水圧を発生させて測定した佐々並ダムや藤原ダムの例¹⁸⁾によると、動水圧の鉛直分布は、全水深の中ぐらいで最大値となっている。田子倉重力ダム(高さ 145 m)では¹⁶⁾、動水圧計として、可動コイル型のピックアップ(1~30 cps)と積分検流計で構成されたものが用いられた。コイルには圧力変化に比例した起電力が発生する。観測値は図-28 に示すようになり、堤頂の加速度はいまだ 10 gal をこ

したものはなく、動水圧の最大値は 0.1 kg/cm² の値程度が観測されている。動力圧の測定に当っては、静水圧の変動分が大きくて動水圧の分が測定誤差にかくれぬように計器を工夫することが大切で、静水圧変化のような長周期の入力変化をサーボ機構によって修正して、静水圧変化によるスケールアウトを防ぎ、動水圧の波形を記録する工夫も行なわれている。

末筆ながらフィルダムについての文献¹⁹⁾、測定一般についての文献¹⁹⁾も、貴重なものであることを述べておく。

むすび

ここ 10 数年間のダムの測定技術の進歩はまことに目ざましく、実測の結果は設計条件の確認や改良、施工中の保安に重要な役割りを果たしてきた。多数の技術者の努力の一端を紹介するにとどまったので、他にも数多くの立派な報告のあることを述べておかなければならない。

終りに電力中央研究所技術研究所 君島博次博士にご査読をわずらわしたことを付記し謝意を表す。

参考文献

- 1) Coutinho, A.: "Theorie de la determination experimentale des contraintes par une methode n' exigeant pas le connaissance precise du module d'elastite". Proc. Int. Assoc. for Bridge and Struct. Eng. Zurich 1949.
- 2) 君島博次: ダムコンクリートのクリープに関する研究, 電力中央研究所報, 第 10 巻 No. 5, 6, 1961 および, 君島博次・北原義浩: マスコンクリートのクリープの進行と回復, 電力中央研究所報, 第 14 巻 No. 6, 1964.
- 3) 高橋 忠・増子芳夫・原 欽五: "新しい震動観測装置について", 第 7 回電研土木, 講演と懇談の会前刷, 1965
- 4) 横田 潤: 黒部ダムの基礎岩盤の挙動について, 第 3 回岩盤力学に関するシンポジウム, 1965 年, 土木学会
- 5) 佐藤忠五郎・梅田貞夫: "岩盤掘削における対象岩盤の性質と調査法", 第 3 回岩盤力学に関するシンポジウム, 1965, 土木学会
- 6) 土木学会編: "土木技術者のための岩盤力学", 1966
- 7) 四国電力 K.K.: マスコンクリートのひびわれ防止に関する研究, 1962
- 8) 鈴紀喜久・関 卓郎: "佐々並川アーチダムのジョイントグラウト", 発電水力, No. 42.
- 9) 林 正夫: "アーチダムの周期的な温度応力—近似計算法と観測値の比較", 土木学会論文集, No. 103, 1964, または電研報 9 巻 5 号および No. 62005, 1962.
- 10) 中村慶一・飯田隆一・三池亮次: "多変量解析によるアーチダムの挙動の分析", 大ダム, No. 27, 1964
- 11) 堀口晋作: "洪水吐を兼ねた発電所屋根の洪水時の放流実験", 第 6 回電研土木, 講演と懇談の会, 1963
- 12) 東京電力建設部: "コンクリートダムの挙動に関する報告", 1965. 6
- 13) 野田和郎・湯山昭雄: "本沢ダムの設計と施工", 発電水力, No. 79, 1965.
- 14) 水越達雄: "ロックフィルダムの設計と施工" 発電水力講習会, 第 2 回, 1960
- 15) 高橋 忠: "コンクリートダムの振動実験および地震観測結果の考察", 大ダム, No. 26, 1963.
- 16) 岡本舜三・吉田 登・中山謙治: "地震時のダムの挙動について", 大ダム, No. 26, 1963
- 17) 岡本・河上・伯野・田村・加藤: "土ダムにおける地震観測", 21 回土木学会年次講演会, I-60, 1966.
- 18) 三国英四郎: "フィルタイプダム遮水材料の締め固めに関する研究", 土と基礎, 10 巻 2 号, 1962
- 19) 電気事業連合会: "ダム管理調査網", 1963