

土 木 研 究 所 資 料

第 1 1 7 3 号

湛水にともなうフィルダムの挙動と安全管理

昭 和 51 年 9 月

建 設 省 土 木 研 究 所
フ ィ ル ダ ム 研 究 室

目 次

1976年9月30日

松 本 徳 久

北 村 康 雄

1. ま え が き	1
2. 漏 水 量	2
2-1 堤体下流法尻に設けた締切り堰による測定	2
2-2 より改良した漏水量の測定	4
2-3 基礎の浸透流の測定	7
2-4 表面遮水壁型ダム of 漏水	11
2-5 漏水量測定 of まとめ	12
3. 変 形	14
3-1 外部変形	14
3-2 内部変形	18
3-3 堤体変形測定 of まとめ	20
4. 間隙水圧	22
4-1 間隙水圧 of 測定	22
4-2 二次元浸透流計算	22
4-3 間隙水圧測定 of まとめ	27
5. その他の項目 of 計測	28
6. 安全管理 of ための計測	30
7. あ と が き	32

1. ま え が き

本報告書の目的は、湛水にともなうフィルダムの挙動を調査・分析し、安全管理のための計測を考察することにある。すでにコンクリートダムにおいては、我が国のダム技術は多くの経験を積み、安全管理の手法も一定の水準に達している。¹⁾しかしフィルダムでは、まだ経験が少なく、またコンクリートダムに比べ、堤体の物性も複雑で計測装置も設けにくいため、やや不明の点があった。たとえば、堤体の力学特性としては、コンクリートはかなり弾性的であり、力を受けたときの変形量は理論的に求められ、変形の限界のようなものも設定できるが、フィルダムの場合には、材料・施工によって大きく異なり、しかも弾性的部分は少ないので変形量の限界のようなものは決め難い。また漏水量の測定にしても、コンクリートダムの方が計測設備は設けやすい。

本年(1976年)6月5日に米国アイダホ州のティートンダムの決壊は、なお生々しい事故であるがこの事故について設計、施工上の欠陥はもちろん指適されようが、さらに事故の当日まで何ら危険の徴候が捕えられずに放置されてきたという安全管理上の問題も大きい。ティートンダムのみならずセントフランシスダムやマルバツセダムの事故でも、大ダムの事故は初めての湛水が満水に至るまでの間の事故で、この期間における安全管理は重要なものである。

この報告書で扱ったフィルダムは、主として高さが数十m以上のゾーン型ダムで、遮水ゾーンの位置は1例を除きすべて中央コア型である。したがってこの報告書の内容はすべてのフィルダムを対象としたものではない。

なお、ダムにおける安全管理には、ここで取り扱ったものの他に、貯水池周辺の地山の安定・貯水池の堆砂・放流などの問題もあるが、ここではふれていない。

2. 漏 水 量

2-1 堤体下流法尻に設けた締切り堰による測定

フィルダムにおける漏水量の測定は、図-1に示すように堤体下流法尻に締切り堰を設け、ここを流れる流量をダムの漏水量として測定する場合が多い。この方法は谷がU字型やV字型で河床堆積物の少ない河川では適用が容易である。このような方法による測定では“漏水量”として測定される量には、

- ① 堤体からの漏水
- ② 基礎の浸透流
- ③ 地山の湧水
- ④ 沢水（地表水）
- ⑤ 堤体下流面の降雨

が含まれている。

まずはじめに、図-1の方法による漏水量の測定結果の2～3の例を示そう。

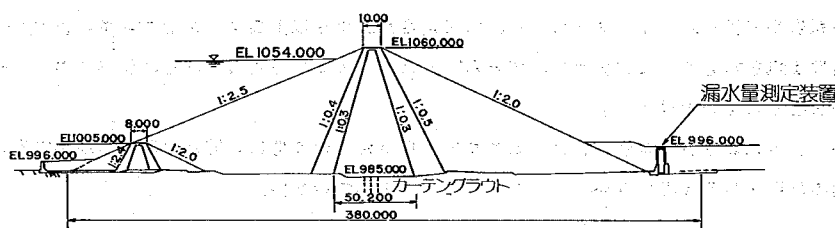


図-1 下流法尻締切り堰による漏水量計測装置

図-2は、Aダムの湛水開始より貯水位が満水となり3カ月経るまでの漏水量・降雨量・貯水位を示したものである。湛水開始は2月下旬であるが、貯水位が2.5m以上になると漏水量は増加しはじめる。4月には貯水位は約30～40mとなるが、漏水量は3000ℓ/分～6000ℓ/分の間で大きく変動する。この時期の漏水量の一時的増大は降雨による沢水を測定しているためと考えられる。5月以降貯水位は上昇するが、漏水量は逆に少なくなる。貯水がほぼ満水となり、水位が一定となる7月には、降雨が少なく地表水の影響がほとんどなくなり漏水量は漸減する。8月・9月には、降雨があったために一時的に漏水量は5000ℓ/分となることもある。Aダムの漏水量は、降雨の少ない7月において約1000ℓ/分であり、湛水前に約200ℓ/分の“漏水量”がすでにあったのでこれを差し引いた800ℓ/分が貯水による漏水量と推定される。

図-3はBダムの漏水量・貯水位・降雨量の経年変化を示したものである。漏水量は300ℓ/分程度から7000ℓ/分近くまで変動が激しいが500ℓ/分を越える漏水の大部分は降雨による地表水が堤体下流面に流れ込んだためである。11月から3月までの時期は、降雨量が少ないが、

このとき貯水位

9.5 mから6.5 mに下がるに応じて漏水量は350 l/分から150 l/分に対応している。従って約200 l/分が貯水位3.0 m(6.5 m~6.5 m)に対応した堤体および基礎からの漏水量と推定される。図

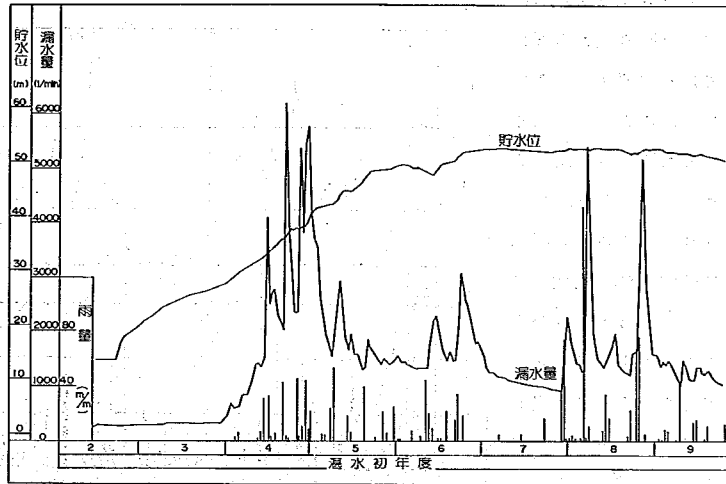


図-2 Aダムの漏水量・貯水位・降雨量

一3の漏水量は湛水開始後3年までしか示されていないが、約6年後には200 l/分~150 l/分に落ちついており、経年的には貯水による漏水は減少の傾向にあることがわかる。

図-4はCダムの場合について漏水量・貯水位・降雨量の経年変化を示したものであるが、漏水量が雨量の影響を強く受けているの

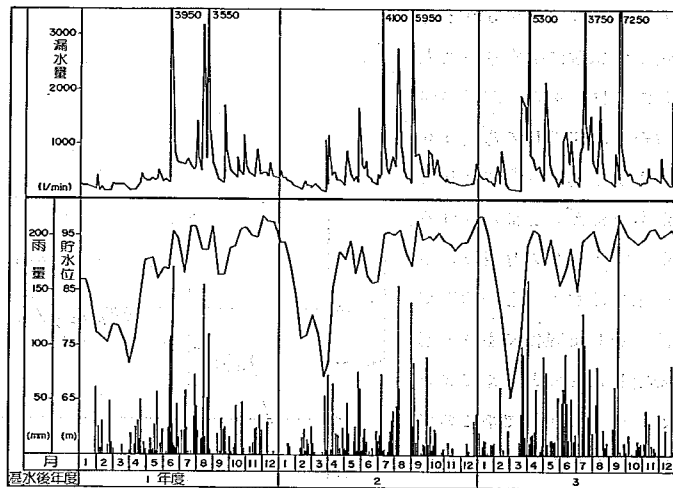


図-3 Bダムの漏水量・貯水位・降雨量

はBダムの図-3の場合と同様である。毎年2~4月に漏水量が非常に少なくなるのは、Bダムのサイトが寒冷の地であるために地表水が凍結するためである。

図-2~4は、図-1の方法で漏水量を測定すると地表水の影響を受けて漏水量の測定が困難であることを示しているが、図-1の方法でも地表水の流入が少なければ堤体および基礎の漏水量はかなり精度よく測定できる。

図-5はDダムの漏

水量を貯水位との関係で、湛水開始より1年2ヶ月後まで示したものである。湛水開始より2カ月で貯水位は約50mとなるが、漏水量は貯水位に比例して増加し約300ℓ/分となる。さらに70mまで貯水位を上げる過程では、漏水量は急激に増加し、貯水位50～70mで貯水位と漏水量は別の一定した比例関係

となる。貯水位が50mを越えて急激に漏水量が増大したのは、ダムの左岸の岩盤の貯水位にして標高50mよりも高い位置に風化帯があったためと推定される。湛水開始後2カ月目以降の漏水量は貯水位との関係では一定した関係にあり一応安定したものと考えてよいが、やや大き目であるのでもうしばらくは漏水量の変化に注意を払った計測を続けるべきである。

2-2 より改良した漏

水量の測定

2-1に述べた漏水量の測定では、地表水の影響を

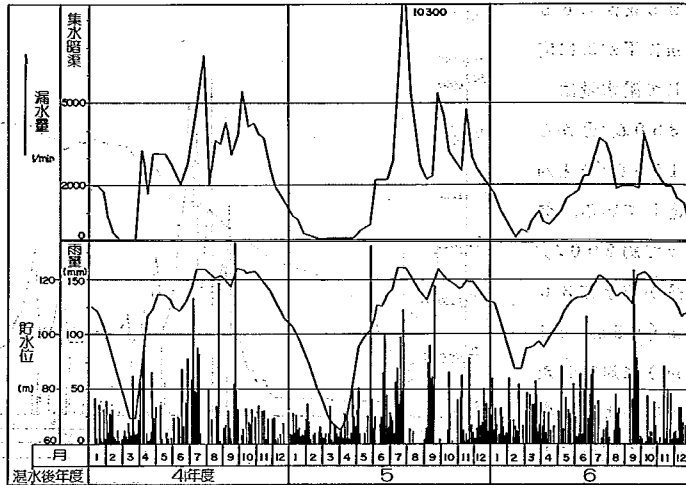


図-4 Cダムの漏水量・貯水位・降雨量

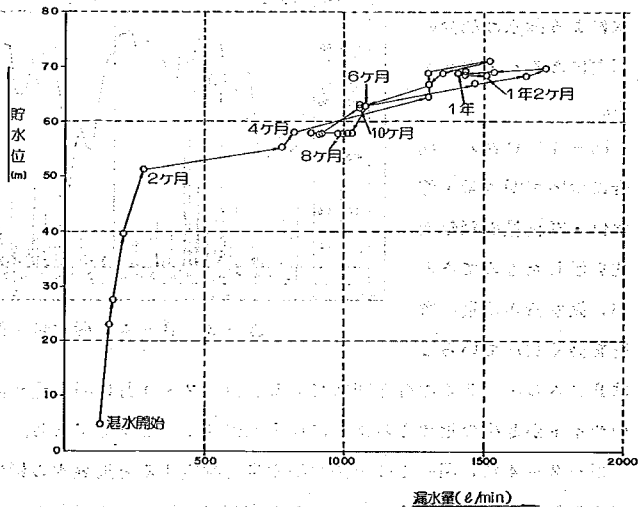


図-5 Dダムの漏水量と貯水位との関係

受けやすく、たとえ地表水の影響が小さい図-5のような場合でも漏水の全量はわかるが、この部分からの漏水かわからないので、コンクリートダムの場合の漏水量の測定に比べ安全管理上精度の落ちたものと云わざるを得ない。

そこで最近ではフィルダムの漏水量の測定にこのような欠点を改良する試みがなされてきた。

図-6はEダムの漏水集水系統図であり、縦断方向に4カ所小さな集水堰をコアゾーン下流に設け、それぞれ集水された漏水を専用のドレーンパイプで監査廊又は堤外に排水し漏水量を測定している。

図-7は、図-6の計測設備によって測定されたEダムの漏水量である。図-7によれば、漏水量はA、B、C、Dルートとも高々10~20 $\text{l}/\text{分}$ 程度であり、旧河道部のFルートにおいても80 $\text{l}/\text{分}$ であり、堤体からは漏水が非常に少ないことがわかる。

図-8は、A~Fルートの漏水量の合計を示したものであるが、雨量に影響されことなく貯水位ときれいな対応関係にあることがわかる。従ってこの方法はフィルダムの堤体からの漏水を測定する方法として安全管理上極めて優れたものであると言える。

今までに述べた方法は、ダムの下流水深が低い場合の例であり、下流水深が一定程

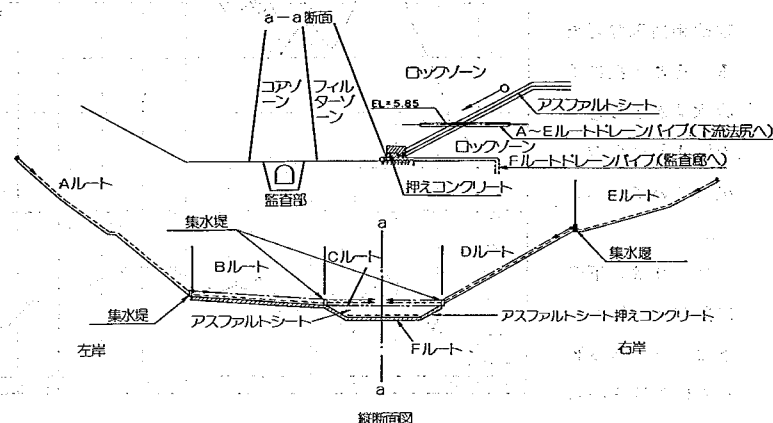


図-6 Eダムの漏水集水系統図

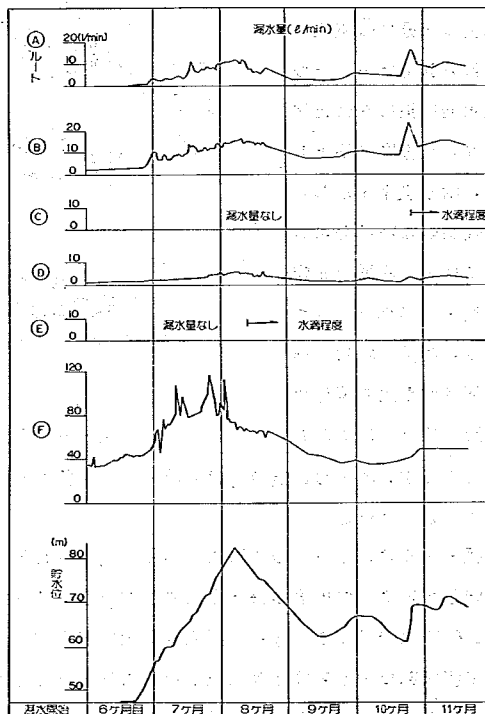


図-7 Eダムの各ルート別の漏水量

度以上あるときには、標高の低い部分での漏水量の測定は相当困難となる。そこで次に下流水深があるときの漏水量の測定方法について述べよう。

図-9は、下流に調整池を持ち、下流水位のあるFダムにおける漏水量計測設備の概要

である。このダムでは左・右岸とも一定標高以上の部分に監査廊が入れている。上段集水堤に集められた漏水は、監査廊に落として、漏水量を測定し、監査廊のない部分については下流法尻の測定立坑まで専用パイプで送る。測量立坑は、通常下流調整池の関係で下流水位以下にあるわ

けであるが、漏水の測定時には立坑内の水を排水し、集水パイプの流量を三角堰で測定できる仕組みとなっている。

図-10は、図-9の方法によって測定されたFダムの漏水量を示したものである。監査廊で測定している上位標高の漏水量は左・右岸ともほぼ等しく、貯水位に比例して増加し満水時に約30ℓ/分である。中位標高の漏水量も大体貯水位に比例し満水時に70ℓ/分である。これらに対して河床部の漏水量は下流水位が高くなると著しく増加しており、図-9の集水堤(A)の堤体又は基礎より上流側へかなり大量の浸透流があることがわかる。下流水位が低いときだけの漏水量

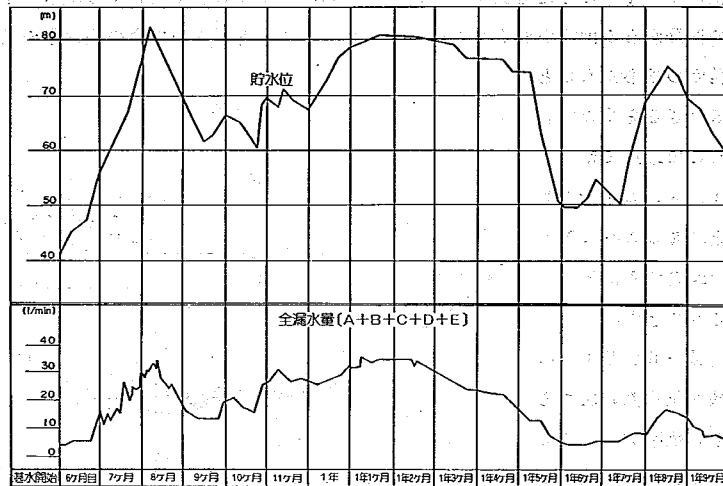


図-8 Eダムの全漏水量

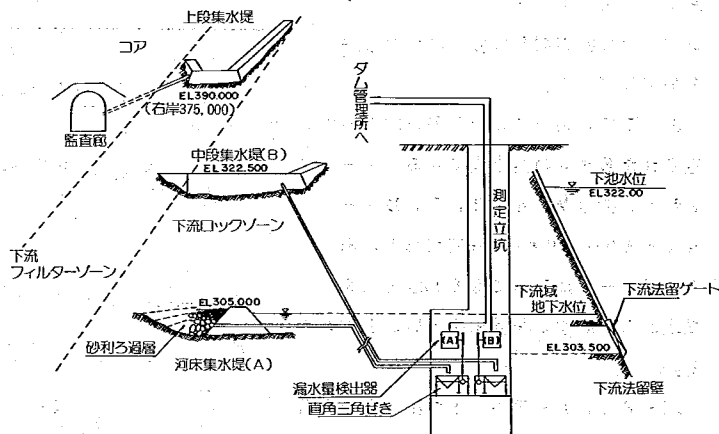


図-9 Fダムの漏水量計測設備

をみるとほぼ貯水位に比例していると考えられ、満水時にあって100ℓ/分程度である。ただしこの100ℓ/分という量は、河床部の漏水の一部であり、下流水位が上流へ浸透している事実の逆を考えれば他の一部は、排水パイプに流入せず河床集水堤(A)や基礎を浸透して下流を排水されているわけである。

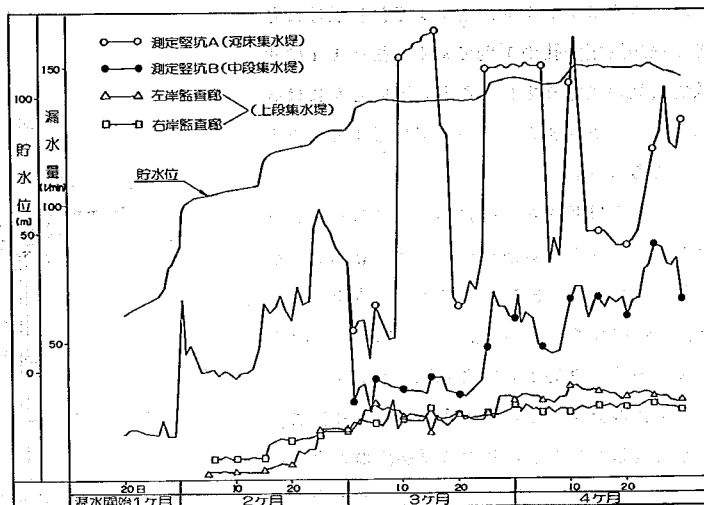


図-10 Fダムの各漏水量

2-3 基礎の浸透流の測定

2-1, 2-2で述べた漏水は、主としてフィルダムの堤体からの漏水である。ダムの管全管理上は堤体からの漏水も重要であるが、基礎からの漏水はより重要なものである。なぜならば、最近の大規模なロックフィルダムでは、遮水材料とその施工は一定水準に達しており、堤体からの大規模な漏水は想定しにくいに対して、基礎岩盤は相当、透水性の高いものもあり止水工法の効果の確実な確認が困難であるからである。

基礎岩盤での浸透流は、埋設した間隙水圧計、ボーリング孔による水位および監査廊や排水トンネル等からの漏水の測定によって推定されるが、フィルダムの安全管理上は浸透流の水圧ではなく量が重要である。

基礎の漏水については、浅い部分の浸透流と深い部分の浸透流は性質が異なり、前者がダムの安全にとって、より重要なので以下では主として岩盤の浅い部分の浸透流について述べる。

重力式コンクリートダムでは一般に、グラウトカーテン下流には揚圧力を軽減するためにドレーン孔が設けられ、湛水時には揚圧力と漏水量が測定され、基礎の止水工の効果が確認される。

フィルダムにおいては揚圧力を軽減する必要はないが、基礎岩盤に監査廊が設けられておれば重力式コンクリートダムと同様、グラウトカーテン下流に観測孔を設けることによって基礎の浅い部分の浸透流の動静を把握することができる。初期湛水時にこの観測孔からの漏水量を測定すれば、止水工の効果はかなり適確に確認することができ、もし漏水量が多ければ追加グラウトを実施し、岩盤の止水性を改良すれば、ダムの安全性は著しく向上する。

図-1.1はグラウトカーテン下流に設けた基礎の浸透流観測孔の1例である。図-1.1は比較的岩盤の良好な場合であり、悪いときには観測孔はケーシングとフィルタで保護することも必要であろう。

図-1.2はEダムの監査廊に設けられたグラウトカーテン下流の観測孔の漏水量と水圧を示したものである。観測孔の漏水量・水圧ともほぼ貯水位に比例している。漏水量については5-2孔の方が多いが、間隙水圧については逆に5-1孔の方が高く、間隙水圧と漏水量は必ずしも比例しておらず、基礎の浸透流の安全管理のためには、間隙水圧の測定だけでは不十分であることがわかる。

図-1.3は同じくEダムの図-1.2とは別の観測孔の測定結果である。湛水後6カ月経て貯水位は80m近くになるが、このとき2-1孔の漏水量は約70ℓ/分となる。いままでのコンクリートダムの経験によれば、1孔よりの漏水量は100ℓ/分程度までは危険なものではないが、このダムでは水位を下げ、2-1孔付近の追加コンソリデーショングラウトを実施した。その結果、追加グラウト工事は成功して、2-1孔の漏水量は2ℓ/分とほとんど零になり、基礎の浸透流は確実に抑止された。なお間隙水圧の値は、7.0mの貯水位に対して追加グラウト工事前は4kg/cm²であり、後は4.5kg/cm²と逆に増加している。すなわちこれは、浸透流量は岩盤中の流路の閉塞により小さくなくても、間隙水圧は逆に増加することを示しているわけで、前に述べたように、浸透流量は間隙水圧からは知ることができないという別の例である。

次に仮排水トンネルおよび監査廊での漏水の例を示そう。

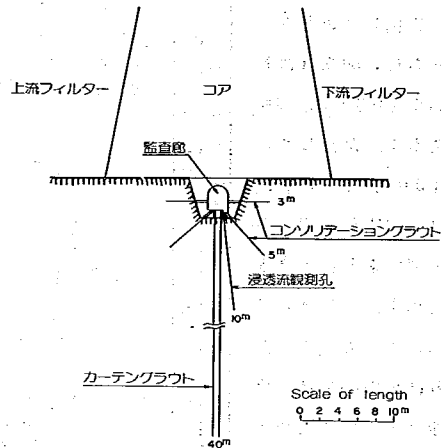


図-1.1 基礎の浸透流観測孔

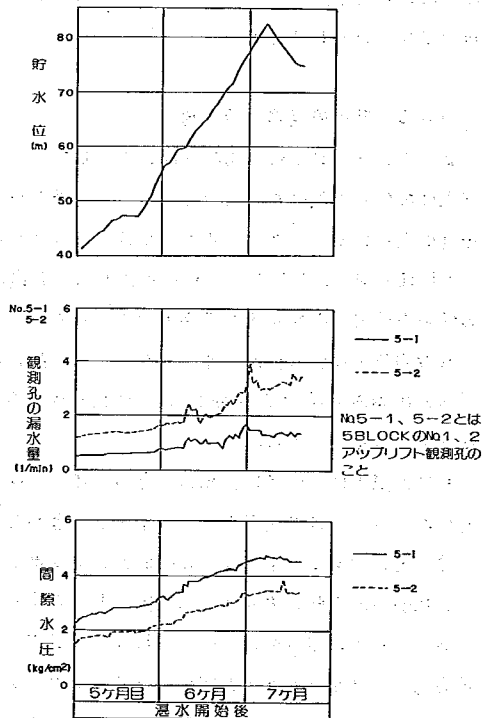


図-1.2 Eダムの観測孔(No.5-1, 2)の漏水量・間隙水圧と貯水位

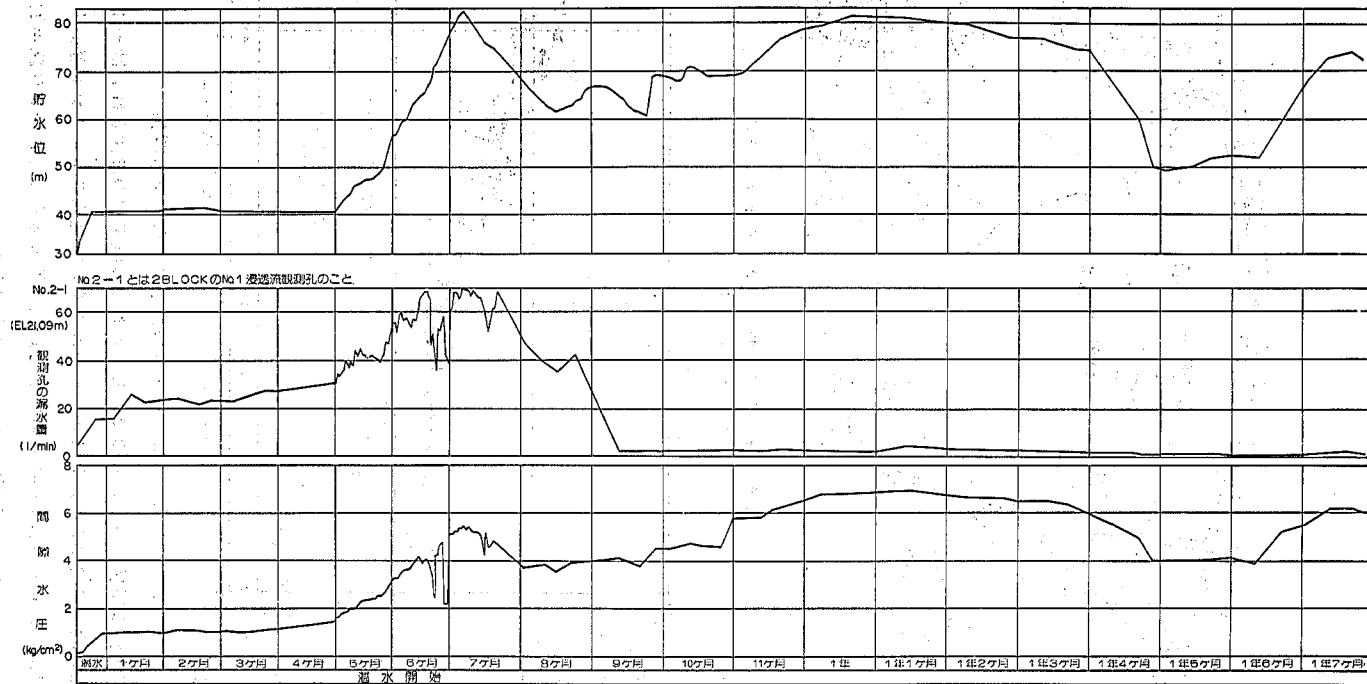


図-13 Eダムの観測孔 (No. 2-1) の漏水量・間隙水圧と貯水位の関係

図-14

は、Gダムの堤体より下流側の平面図である。このダムでは左岸に仮排水路トンネル、右岸に2本のグラウトトンネル、右岸に2本のグラウトトンネルが設けられており、この

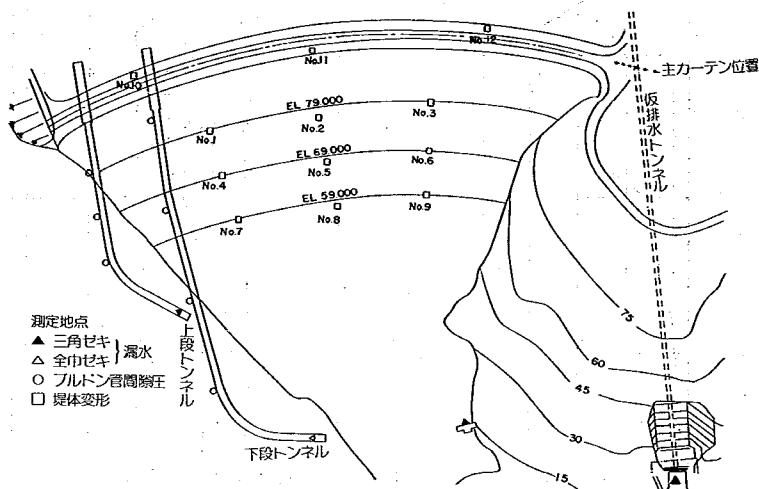


図-14 Gダムの平面図(グラウトトンネル・パイパストンネル)

トンネルの漏水量を示したのが図-15である。仮排水路トンネルの漏水はプラグからの漏水であり満水時において約400 L/分、上段グラウトトンネルのそれは約200 L/分である。両者ともほぼ貯水位に比例している。

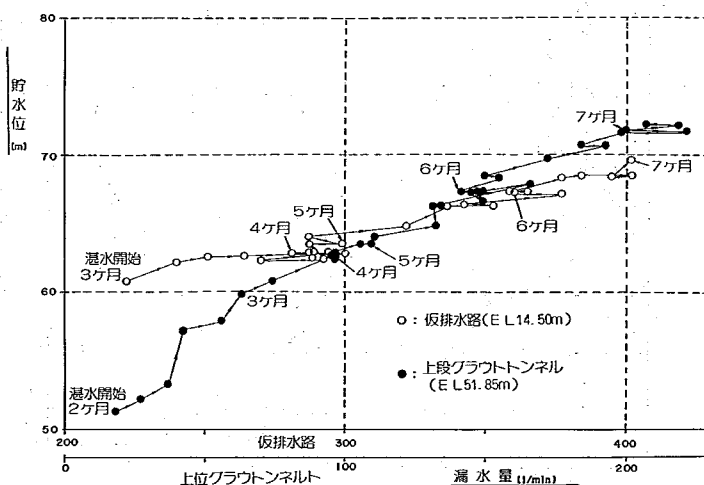


図-15 Gダムの漏水量と貯水位の関係

図-16は、Cダムの監査廊にお

ける全漏水量と貯水位の関係を示したものである。ここでの監査廊の漏水とは、図-12～13の意識的に観測孔を設けて漏水を測定しているのではなく、監査廊のジョイント等からの漏水である。図-16では、おおまかには漏水は貯水位と比例関係にあること、および経年的には次第に浸透流路が閉塞されて、減少する傾向にあることが示されている。

さて、基礎岩盤での漏水量の測定例の最後に、基礎の深い部分の漏水量の特徴をみておこう。

図-17はCダムの基礎岩盤の深い部分に下された立坑での漏水量である。図-17において漏水量は、貯水位に対して非常に鈍い関係にあることがわかる。これは基礎の深い部分の漏水の特徴であり、この

ような漏水は、ダムの安全性にとってそれほど大きな影響を与えない。図-17においても図-16と同様、経年的には漏水量はわずかつ減少の傾向にあり、岩盤中の浸透流路が閉じて安定化の方向にあることが示されて

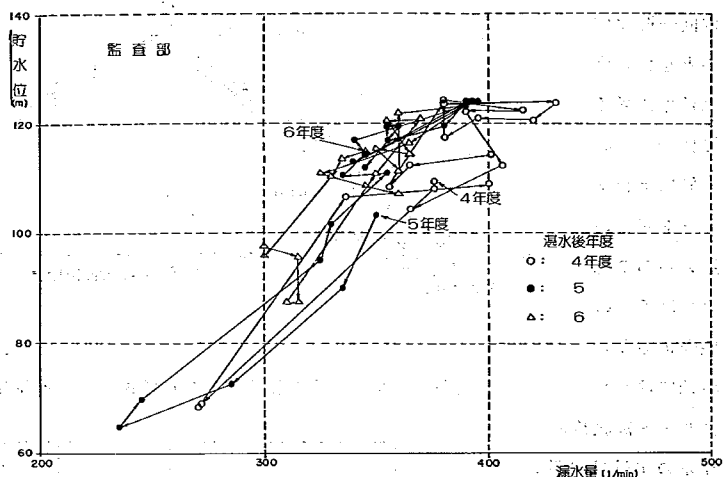


図-16 Cダムの監査廊の漏水量と貯水位の関係

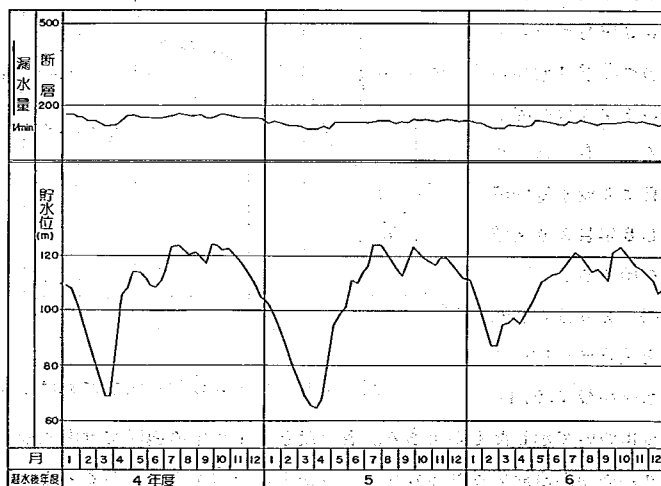


図-17 Cダムの基礎の深い部分の漏水量

2-4 表面遮水壁型ダムの漏水

図-18はコンクリートスラブ表面遮水壁を持つHダムの標準断面である。このダムでは図-1の方法と同じく、下流法尻に漏水量集水堰を設けて漏水量を測定している。したがってここでの漏水量には、堤体と基礎の両方からの漏水が含まれている。図-19は湛水開始後12年間に

おける漏水量を、同一貯水位について夏冬に分けて示したものである。図-19によれば、湛水

開始後2年間

は同一貯水位

のときに、漏

水は冬に多く

夏に少ない。

一般にコンク

リートダム

の継目からの漏

水もほぼこの

傾向にあり、

冬期にはコン

クリートは温度収縮

するので継目が開く

ため漏水は増加する。

湛水開始後2年目

以降5.5年目までわず

がづつ漏水は増加し

ているがこの原因は

よくわからない。6

年目より漏水量は減

少し8年目より又増

加を始める。

図-20は、貯水位と漏水量の関係を
湛水開始後7,9,11

年目について示したものである。各年度とも1カ年の範囲では漏水量と貯水位には線型の関係にあり、表面遮水版又は基礎の浅い部分からの漏水が主であることを示している。図-20のように経年的に漏水量が増加するのはダムの安全管理上、十分な注意が必要である。遮水版からの漏水は、中央コア型ダムの遮水ゾーンや基礎岩盤からの漏水と異なり、きれつの目が閉じる自癒作用が期待できないので漏水が一定以上増加したら貯水位を下げで補修が必要となる。

2-5 漏水量測定のとめ

今までいくつかのダムの漏水観測の具体例について述べてきたが、ここで安全管理上の観点より漏水観測の留意点についてまとめておく。

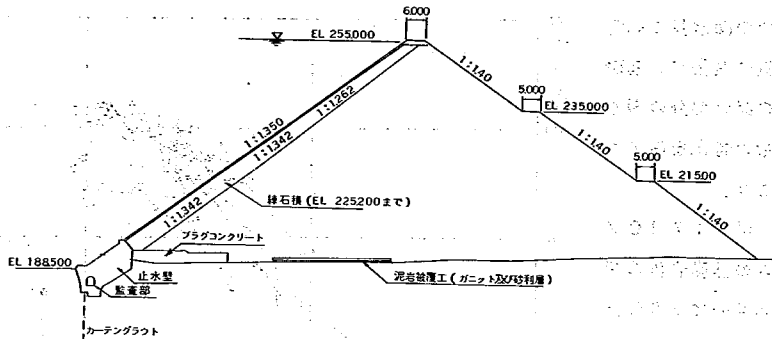


図-18 表面遮水壁型ダム(Hダム)の標準断面図

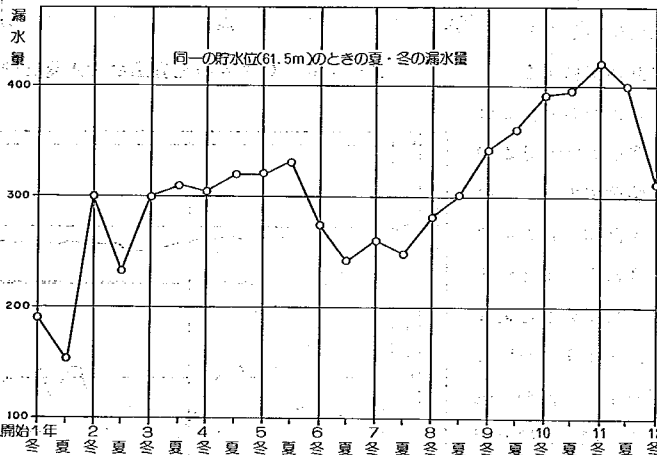
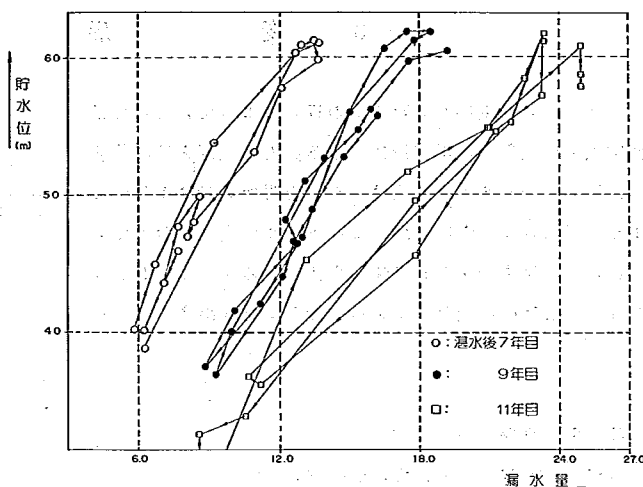


図-19 Hダムの同一水位における夏・冬の漏水量

1. 堤体下流法尻に締切り

堰を設ける漏水測定（図一１）では、地表水の影響を受け易いのでこの堰に流入する沢水を極力抑制しなければならない。また、湛水開始前1カ年位“漏水量”を測定しておき、降雨や湧水の影響を把握しておかないと貯水による真の漏水量を抽出できない。



図一20 Hダムの漏水量と貯水位の関係

2. ソーン型フィルダムで

は遮水ゾーンの直ぐ下流

に小さな堰を設け、ここから集水した漏水をパイプで監査廊又は堤外に導く方法（図一6又は図一9）は、フィルダムの堤体からの漏水を測定する方法として優れたものである。この方法によれば、図一1の方法と異なり地表水等に影響されることなく漏水を測定することができる。

3. ダムの安全管理上、基礎の浅い部分の浸透流は堤体のそれに増して重要である。基礎の浅い部分の浸透流を測定するためには、岩盤中に監査廊を設けグラウトカーテン下流に観測孔を設ける方法（図一11）が優れている。観測孔は常時はバルブを閉じておき、ブルドン管に通じておく。湛水を始めたら毎日一定時間毎にバルブを開き漏水量を測定する。もし1孔からの漏水量が一定量（100ℓ/分程度）以上ある場合には、貯水位を一定に保ち漏水量が増加の方向にあるのか一定なのかを判断する。又、漏水量が多いときには追加グラウティングによって基礎の浸透流を抑制することが望ましい。このような方式によって安全が確認されつつ満水となったダムは、基礎岩盤の浸透流に対する安全度が確かなものである。

4. 堤体および基礎の漏水量は、経年的にわずかつ減少する場合が多い。したがって特に湛水開始より満水に至るまでの安全管理が重要である。

5. 4の性質にもかかわらず、表面遮水型ダムの遮水壁からの漏水は漏水に対する自癒作用が期待できず、経年的には漏水が増大する場合がある。したがってこの型式のダムでは一定期間経たら水位を下げて、補修が必要となる可能性があることを計画時点から考慮しておかねばならない。

3. 変 形

フィルダムの変形を測定方法の違いによって、ここでは便宜上外部変形と内部変形に分ける。外部変形とは堤体表面に標的（図-21）を設け、これを視準測量することによって得られる。内部変形は堤体内部に測定孔を設けておき、これに探索子を下して変形を測定するか（図-22）又は傾斜計等の埋設計器によって変形量を検出する。

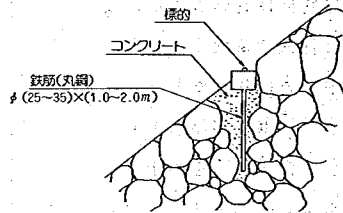


図-21 外部変形測定のための標的

3-1 外部変形

外部変形を測定するための標的は、通常天端に5~10点、下流面に5~15点（上流面は、貯水池の使用計画によって異なる）程度設けられる。

図-23はAダムの天端中央における沈下および水平変位を時間を横軸として表わしたものである。沈下は施工中から生じているが、ここでは天端まで盛立が終了した時点を中心点としている。沈下量は6ヵ月後の満水時に約10cmであり、貯水位をほぼ一定に保っているその後の6ヵ月間は沈下のスピードはやや遅くなる。次いで1年2ヵ月後に水位を下げると沈下は又急に促進されて約7.5cm沈下する。

また、水平変位はほぼ水圧に比例している。すなわち貯水位を上げれば下流側へたわみ、貯水位を下げれば上流側へ戻っている。ただし貯水位を下げたとき原点よりも上流側へ戻っているのは、あるいは測量の精度上の問題であるかも知れない。

図-24はDダムの天端中央における沈下と水平変位である。沈下量は最大25mm程度であるから非常に小さく、測量の精度の問題もあるが、ややばらつきのある挙動を示している。おおまかには、水位を下げる過程で沈下の速度が速く、これは図-23と同様の傾向である。Dダムにおいて沈下量が少ないのは盛立完了後1ヵ年を経て湛水を開始したため、沈下がすでに盛立完了時に相当終了していたためと推定される。水平変位についてはAダムと同様貯水位によく比例

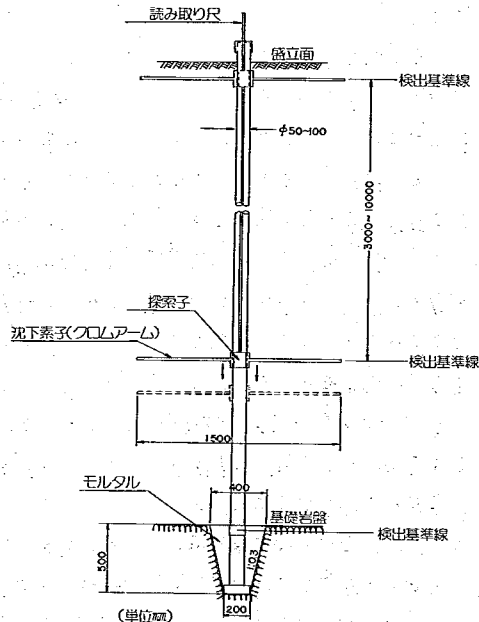


図-22 内部変形測定装置の例

している。

図-2.3~2.4
からわかるように、
これらダムにおい
てはフィルダムの
沈下量は圧密的で
あると同時に、貯
水位を上げるとき
には、堤体に浮力
が加わり鉛直上向
きの力を受け、貯
水位を下げるとき
には逆に堤体材料
中の有効応力を増

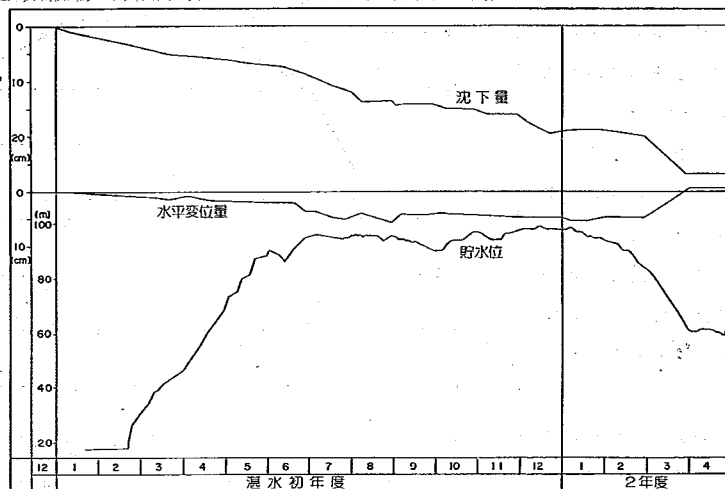


図-2.3 Aダムの天端中央の変形

加させ沈下を促進していると理解される。
水平変位には弾性変形量と塑性変形量の
両者が含まれており弾性変形量がかなり
多くの部分を占めている。

さて以上は天端中央の1点の変形量に
ついてのみ着目したが、次に天端全体の
変形をみてみよう。

図-2.5はEダムの天端の沈下および
水平変位である。水平変位は弾性的であ
り最初の満水で10 cm程度変形し、それ
以後はほとんど変わらない。これに対し沈
下は圧密的であるので時間とともに沈下
は継続している(6 cm~9 cm)。

図-2.6はCダムの湛水初年度より
14年目までの沈下および水平変位であ
る。天端中央における沈下は1年目で約
3.5 cm, 14年目で6.5 cm, 水平変位は、
1年目に4.1 cm, 14年目で5.4 cmであ
る。

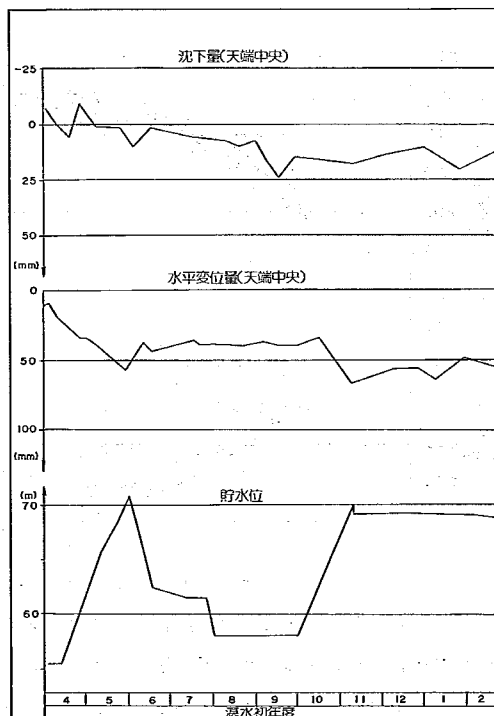


図-2.4 Dダムの天端中央の変形

図-27は同じCダムの沈下と水平変位を貯水位とともに時間の関数で示した。

図-26～27によつて、フィルダムの変形は前述のように沈下はクリープ的で、水平変位は弾性変形+塑性変形であることがわかる。

図-28はBダムの湛水開始より7年目までの天端の変形を示し

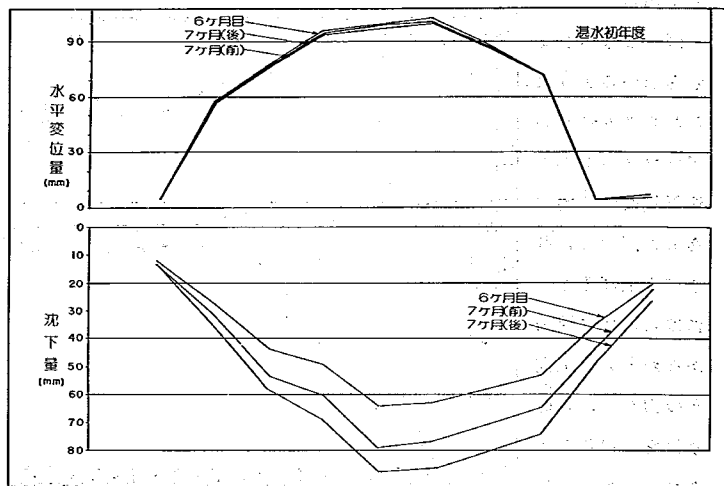


図-25 Eダムの天端における変形の経年変化

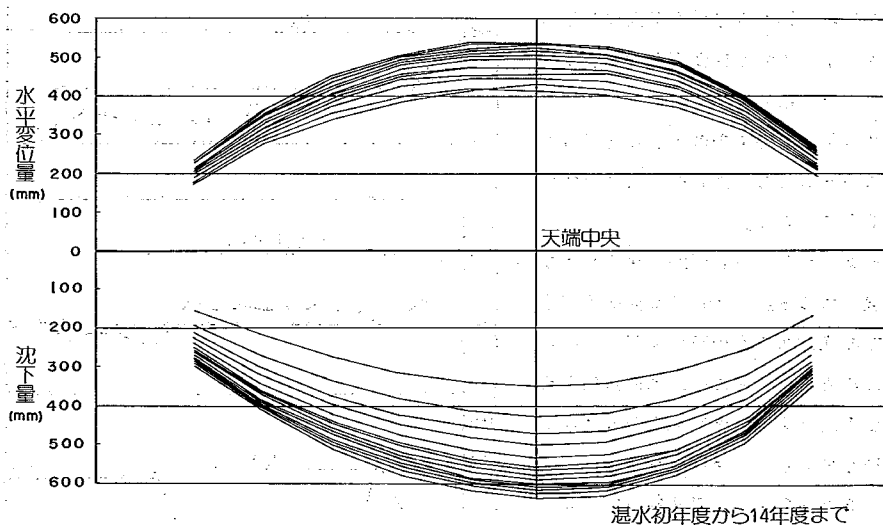


図-26 Cダムの天端における変形の経年変化

たものである。図-28より、天端における最大沈下量および最大水平変形量は、1年目にそれぞれ12cm、8cm、7年目でそれぞれ42cm、13cmである。図-28で注目すべきは、沈下の分布で天端中央のダム高の最も高い地点よりも右岸寄りで最大の沈下を示している。これは右岸が急峻なアバットでこの影響によるものと推定される。直ちに危険というわけではないが、観測にあたっては留意しておくべきである。

図-26~28

のCダム、Bダムにおける変形量は図-22~24のAダム、Dダム、Eダムよりもやや大き目である。その理由は、Cダム、Bダムではロックゾーンの薄層転圧工法を採用していないことになり。

最後に、A~E

ダムの天端中央の最大変位量をダム

高に対する比率でまとめて表-1に示す。

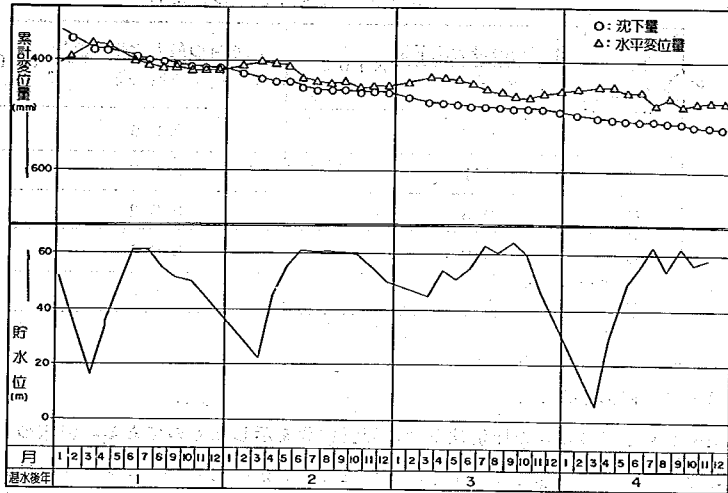


図-27 Cダムの変形と貯水位との関係

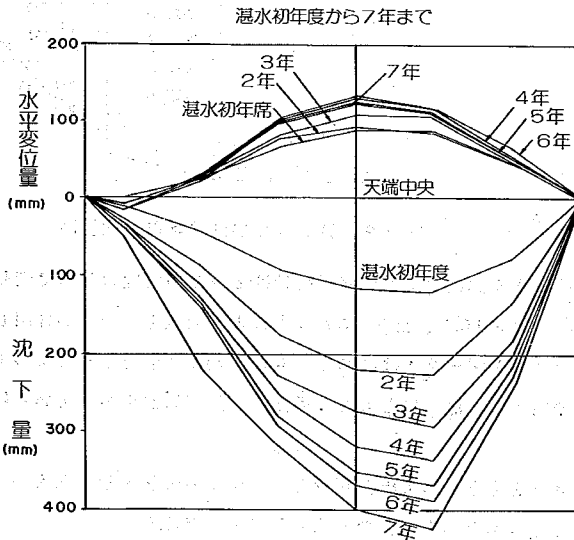


図-28 Bダムの天端における変形の経年変化

表-1 A～Eダムの変形量

ダム名	1年後の最大沈下量 ダム高 $\times 100$ (%)	満水時の最大水平変位量 ダム高 $\times 100$ (%)
A	0.2	0.05
B	0.1	0.08
C	0.3	0.32
D	0.2	0.09
E	0.1	0.06

3-2 内部変形

図-29は、Dダムの層別沈下計の配置位置を示したものである。河床の1番深いところに1本、それよりやや右岸寄りに1本設けてある。測定のためのクロスアームは10m間隔である。

図-30は、図-29における図-29の沈下計の計測結果を示す。横軸は盛立開始後の時間であるが、縦軸は層間の圧縮量を示している。たとえば1-2というのは、測点1、測点2の間の圧縮量

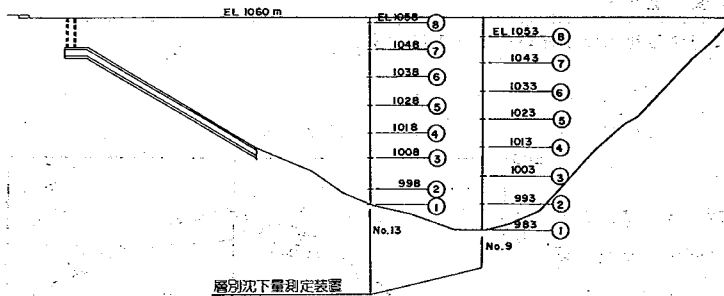


図-29 Dダムの層別沈下計の配置図

である。図-30では湛水を開始すると層間圧縮量は1～3cm程度の範囲で変動しており、これは歪に直すと $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$ に当る。これは水による鉛直上方の力が作用した結果と推定される。外部変形の項で述べた図-24は同じDダムの天端の変形を示したものであるが、湛水後の複雑な沈下の動向の内容は、湛水にともなう堤体内の鉛直歪が変動している結果であることがわかる。

図-31は、図-30をもとにして圧縮歪量と上載荷重の関係を示したものである。図-31は、時間による変位量も含んだ応力と歪の関係とみてよいだろう。

さて次にゾーン型ダムにおいて、ゾーン間の変形性が異なるかどうかを実測した例をみてみよう。もし、たとえばコアゾーンとフィルタゾーンとで沈下量が大きく異なれば、ゾーンの境界部はせん断されてずれが生じるであろう。もともとゾーン型フィルダムでは、ゾーン間の剛性はで

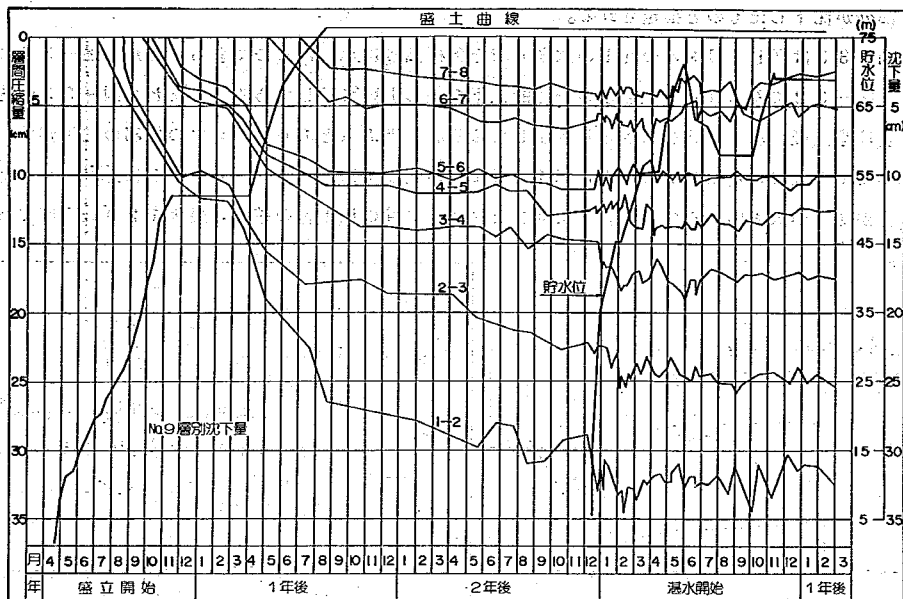


図-30 Dダムの沈下量

きるだけ漸変させるよう設計するものであるが、このような問題を実測によって検討してみたわけである。

図-32は、ある標高まで盛立てた時点で水平に傾斜計を設置し、盛立進行後、各計器の傾斜角を測定することによって沈下量を推定したものである(Eダム)。傾斜計による推定であるので絶対変位はわからず、相対変位であるので便宜上測点0を基準点としている。この図によれば、コアゾーンの線において極端な沈下があることがわかる。Eダムでは、コアゾーンはまき出し厚20cm、シープスフットローラー12回転圧、フィルターゾーンはまき出し厚30cm、ブルドーザー4回転圧であった。コアゾーンとフィルターゾーンの境界は、段差があり、シープスフットローラーの転圧も十分行なうことは困難であるため、コアゾーンの線は転圧不十分となり、盛立が進行すると転圧不十分

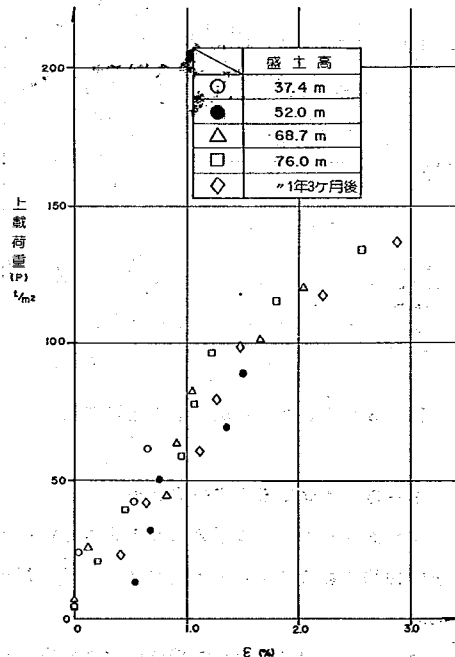


図-31 (Dダムの)盛土荷重とひずみ量

な部分が沈下したものと推定される。

図-33は同じくEダムの沈下の水平分布を各標高別に示したものである。ただし図-33では、図-32にみられる盛土直後の一時的沈下を差し引いて示してある。すなわち図-33の沈下量は盛土後、約10日を原点として示してある。測点No.8とNo.6は、コアの縁部の沈下が他に比べてやや大である傾向があるが、No.4とNo.10の測点ではフィルタ・ロック部に比べ、コア部の方が沈下が大ききようである。またコアとフィルタ間の沈下量の差は、最大120mm程度である。

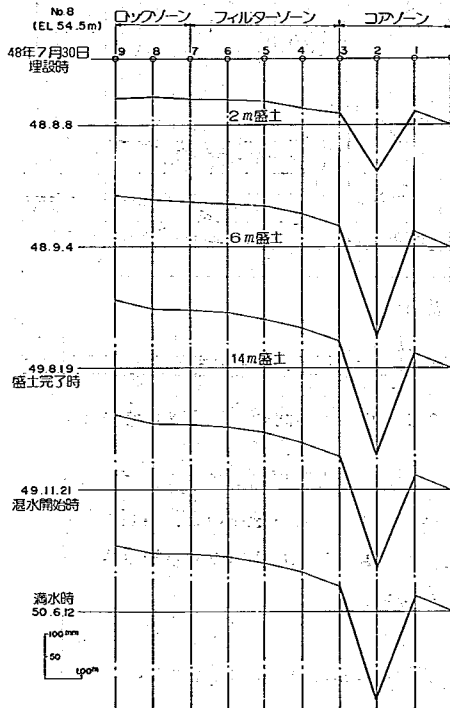


図-32 Eダムの沈下量の経年変化

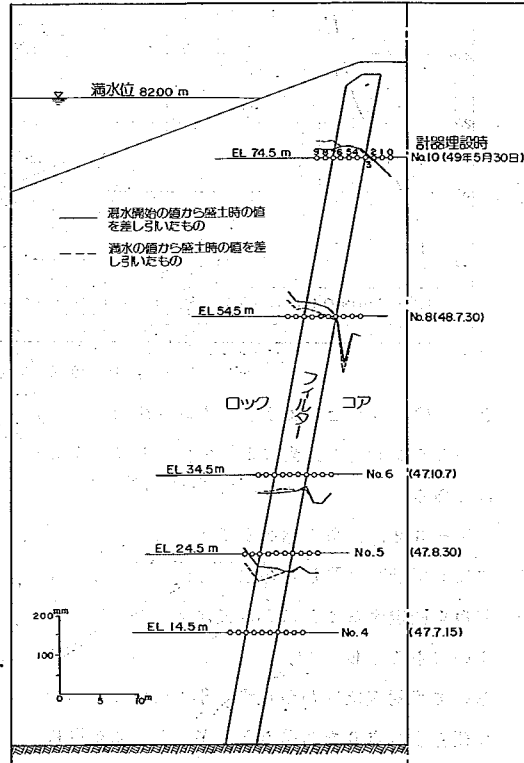


図-33 Eダムの沈下の水平分布

3-3 堤体変形測定のみとめ

コンクリートダムの場合には、堤体材料(コンクリート)の変形特性がフィルダムに比べてより弾性的であるので、変形量がフィルダムよりも明確な意義を持ち、安全管理の有力な指標となる。

フィルダムでは堤体の変形特性がより複雑で変形特性が材料と施工によって大きく異なるので、変形量の許容限界のようなものは決めるににくい。したがって安全管理のためのフィルダムの変形計

測では、変形の分布や変形の時間的変化に着目することが重要である。フィルダムにおける変形の特徴を以下に列記する。

1. 鉛直変位（沈下）はクリープ的であり、盛立完了後1年間にダム高の0.1～0.3%程度沈下する。その後沈下は継続し、10年後には最初の1年の2～4倍程度となる。
2. 沈下は水位に対して水平変位ほど敏感に対応しないが、水位を上げる過程では浮力を受け沈下スピードが落ち、水位を下げる時には有効応力が増大するために沈下は促進される。
3. フィルダムの水平変位は、貯水位に対してかなり弾性的に対応する。初期湛水で満水となった時に天端中央の水平変位はダム高の0.05～0.3%程度であり、よく締固められた堤体のフィルダムではこのうちかなりの部分が弾性変形で、水位を下げると又上流側に戻る。水平変位は沈下と異なり、経年的な変位の進行は少ない。すなわち弾性変形と塑性変形が主体をなしている。
4. 変形量の絶対値は堤体材料および転圧工法によって異なる。一般にロックゾーンを薄層転圧工法によって締固めたフィルダムでは沈下量は少ない。
5. 安全管理上の変形の測定では外部変形を主体としてよく、内部変形の測定は設計のための情報を与えてくれる。

4. 間 隙 水 圧

間隙水圧は測定する場所によって堤体内の間隙水圧と基礎岩盤内の間隙水圧に分けられるが、後者についてはすでに2-3で述べているのでここでは主として前者について述べる。

また、ダルシーの法則を満足する定常浸透流について二次元数値計算を行ない実測結果と比較した。

4-1 間隙水圧の測定

図-34はCダムの湛水4ヶ月後の時点における間隙水圧分布である。上流側のフィルタでは水圧100多、下流側のフィルタでは水圧零で、遮水機能はもっぱらコアゾーンによっていることがわかる。またこのような薄い中央コア型ダムでは、中央コアの下位標高下流部の動水勾配がかなりきつくなっているようである。

図-35はAダムの湛水1年5ヶ月後の間隙水圧分布であるが下位標高部に水圧コンタの山がまだ残っており、残留間隙水圧が消散しきっていないことがわかる。このダムのコア材料は風化岩で均等係数が大きく透水係数の小さなものであった。中央コア型ダムにおいて図-35程度の残留間隙水圧があってもフィルタゾーンとロックゾーンには残留間隙圧は全くなくコアゾーンは大きな有効側圧を受けられるので、安定上の問題は生じない。

図-36はDダムの貯水位と間隙水圧の関係を示した。この図においても上流側フィルタには100多水圧が加わり、コアが遮水機能を果し、堤体内の間隙水圧が水位によく対応していることがわかる。

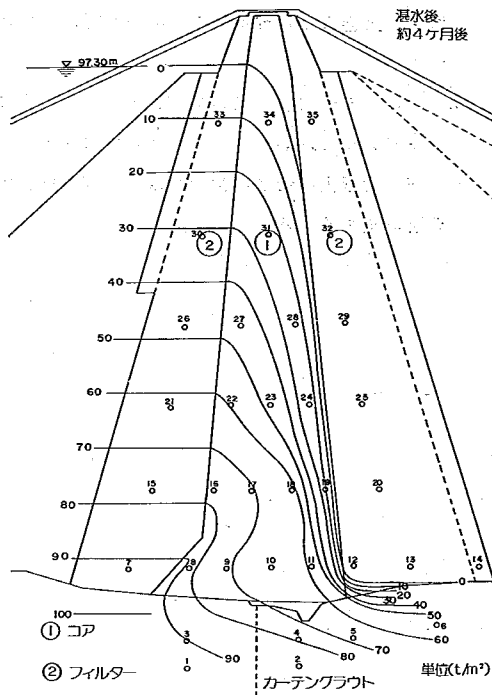


図-34 Cダムの間隙水圧分布

4-2 二次元浸透流計算

フィルダムの堤体内の浸透流は近似的にダルシーの法則が成立すると仮定できるので、数値解析を行ない実測結果と比較してみた。

図-37はEダムの間隙水圧の実測結果である。そこで図-37の遮水ゾーンおよび基礎を図

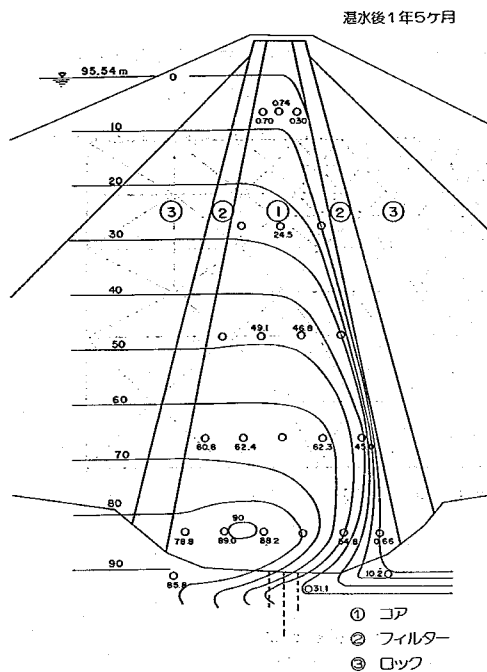


図-35 Aダムの間隙水圧分布

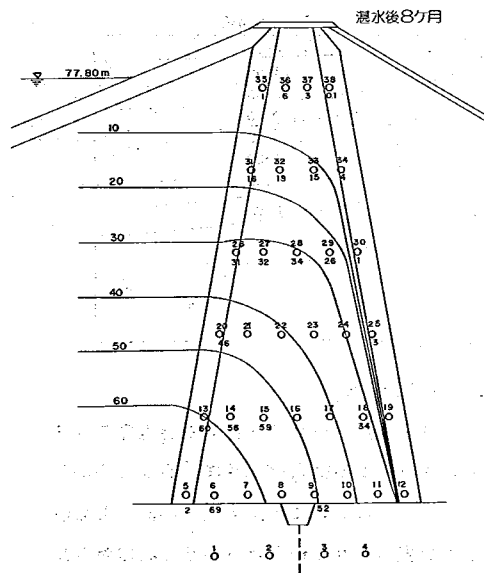


図-37 Eダムの間隙水圧分布

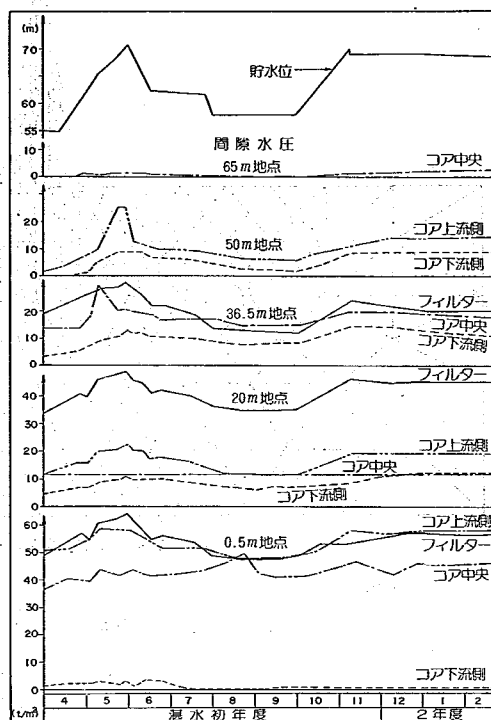


図-36 Dダムの間隙水圧と貯水位の関係

一38のように有限要素法によるモデル化を行ない、二次元定常浸透流の数値解析を行なった。²⁾なお、計算に用いた物性値は図中に示してある。

図-39はコア、グラウトカーテン、基礎の透水係数をそれぞれ $0.5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、 $2.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、 $8.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ とした場合(ケース1)の水圧分布である。また図-40はそのときの流速分布である。図-39および図-40より、ケース1のような物性の仮定では浸透流は堤体よりむしろ基礎に多く、グラウトカーテンによる水圧降下はそれほど大でない事がわかる。

図-41、42はプランケットグラウチングがあるときで、グラウトゾーンの透水係数

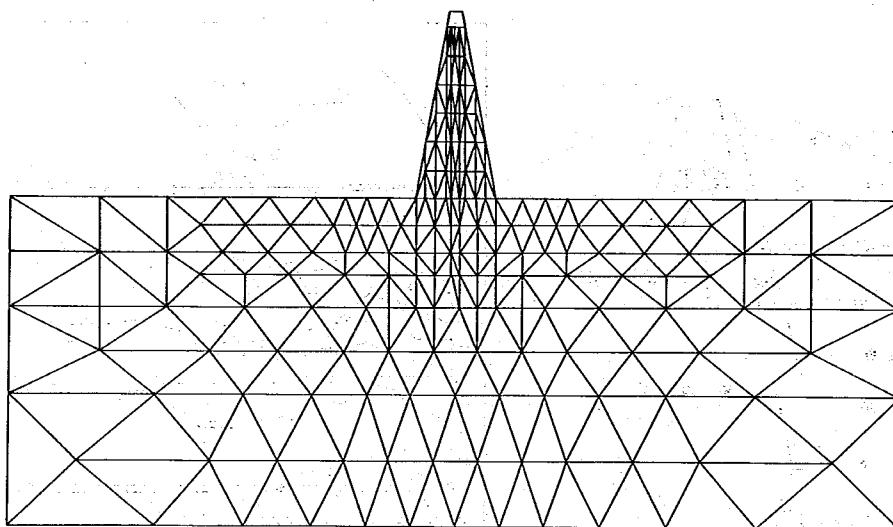


図-38 有限要素法によるモデル図

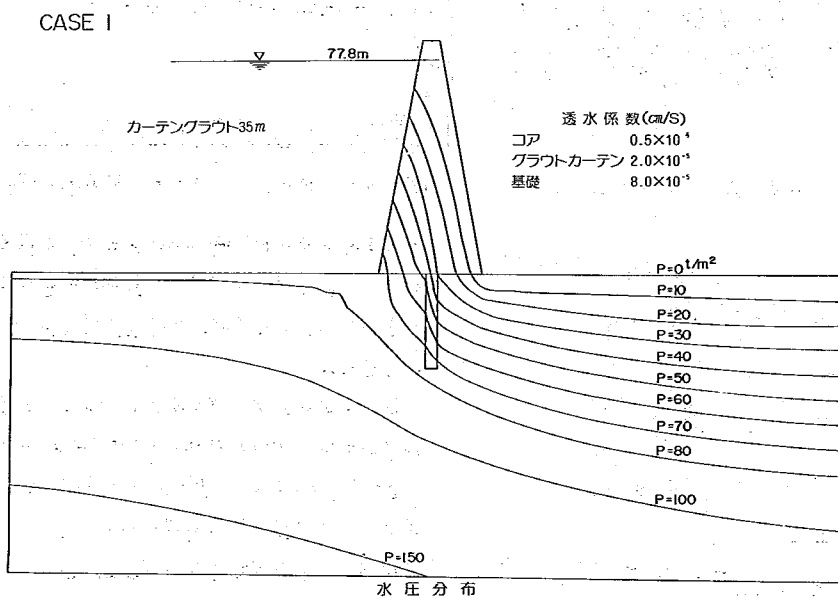


図-39 Case 1 の水圧分布

を $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ とケース 1 に比べやや大にした (ケース 2)。ケース 2 では基礎の透水係数が $8 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ でグラウトゾーンと似かよっているため、グラウトの効果はそれほど明瞭ではない。

表-2 はケース 1 およびケース 2 についてダム幅 1m 当たりについて浸透流量を集計したものである。谷幅が 100m であれば (高さ一様として) この表の 100 倍となるわけで堤体および

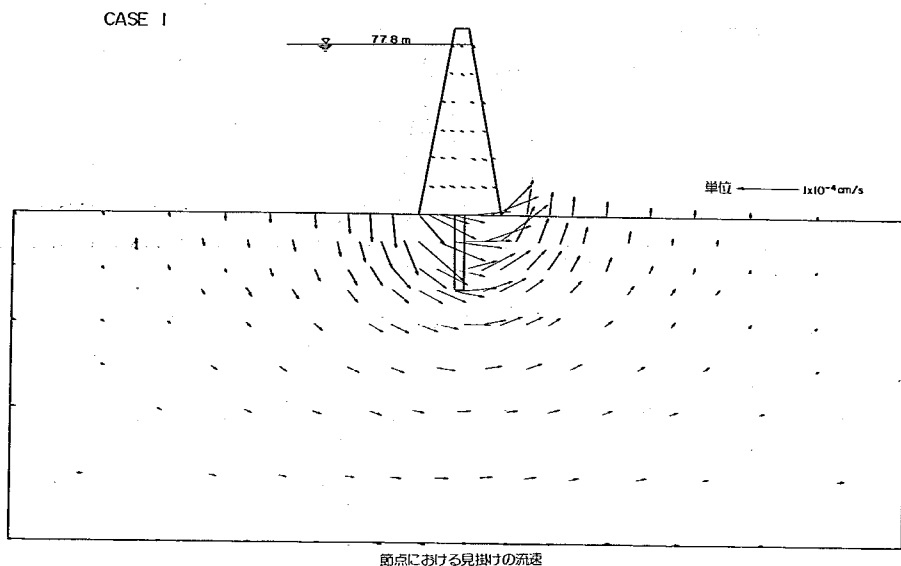


図-40 Case 1 の流速分布

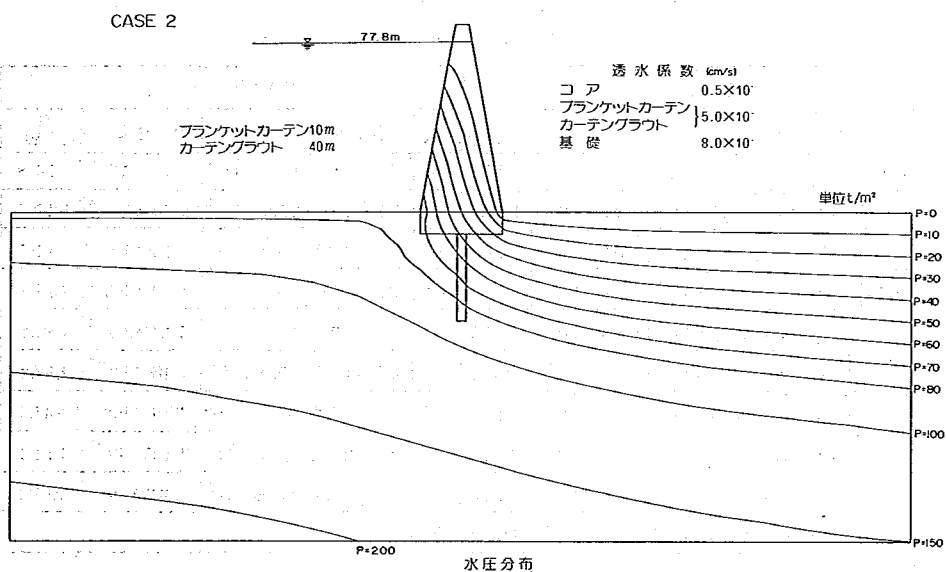


図-41 Case 2 の水圧分布

基礎の漏水量は、以上の計算条件のもとではそれぞれ約 30 l, 200 l 程度である。これは図-37 のダムの実測結果と比較して、オーダーとしては大体等しいといってよいだろう。

CASE 2

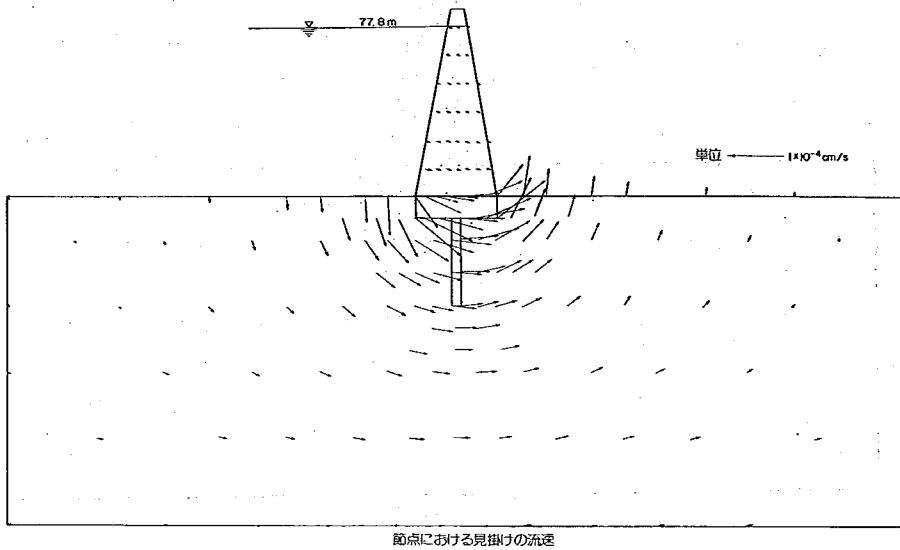


図-42 Case 2 の流速分布

表-2 EダムのCase 1, 2の浸透流量

CASE 1						CASE 2					
	節点	幅(m)	$A (\text{cm}^2)$	$v (\text{cm/s})$	$Q (\text{cm}^3/\text{min})$		節点	幅(m)	$A (\text{cm}^2)$	$v (\text{cm/s})$	$Q (\text{cm}^3/\text{min})$
堤体	35	12.9	12.9×10^4	4.69×10^{-6}	36.3	堤体	24	12.9	12.9×10^4	4.76×10^{-6}	36.8
"	42	25.9	25.9×10^4	8.21×10^{-6}	127.6	"	31	25.9	25.9×10^4	8.22×10^{-6}	127.7
"	47	26.0	26.0×10^4	1.01×10^{-5}	157.6	"	36	26.0	26.0×10^4	1.03×10^{-5}	160.7
岩盤	50	5.9	5.9×10^4	7.59×10^{-5}	268.7	岩盤	39	5.9	5.9×10^4	7.19×10^{-5}	254.5
"	116	10.9	10.9×10^4	6.63×10^{-5}	433.6	"	66	10.9	10.9×10^4	7.35×10^{-5}	480.7
"	117	10.0	10.0×10^4	4.83×10^{-5}	289.8	"	67	15.0	15.0×10^4	4.98×10^{-5}	448.2
"	118	12.5	12.5×10^4	3.74×10^{-5}	280.5	"	68	17.5	17.5×10^4	3.26×10^{-5}	342.3
"	119	17.5	17.5×10^4	2.79×10^{-5}	292.3	"	69	25.0	25.0×10^4	2.35×10^{-5}	352.5
"	120	20.0	20.0×10^4	1.94×10^{-5}	232.8	"	70	37.5	37.5×10^4	1.33×10^{-5}	299.3
"	121	22.5	22.5×10^4	1.39×10^{-5}	187.7	"					
堤体流量 0.285 L/min 岩盤流量 1.985 L/min						堤体流量 0.325 L/min 岩盤流量 2.178 L/min					

4-3 間隙水圧測定のおおまかめ

1. 均一型ダム又は含水比の高い細粒の粘性土を遮水ゾーンに用いたダムでは、施工中に間隙水圧が消散しにくく、大きな残留間隙圧を発生し堤体の安定を損うことがある。したがってこのようなダムでは間隙水圧の測定は施工中の安全管理に必須のものである。
2. 適当に粗粒な材料を含むコア材を使ったゾーン型ダムでは、残留間隙圧は問題とならないことが多い。
3. 間隙水圧計は一般に代表的な1~2断面に埋設するが、湛水にともなう安全管理上からは天端中央のたわみや全漏水量とは異なり、ある特定の断面の状態しかわからないからいわば部分の現象を測定しているにすぎない。また、たとえひとつの計器が異常な値を示したとしても、真に異常なのか計器の故障によるものか判断がつかないこともある。したがって、堤体内の間隙水圧の測定でダム全体の安全性を判断するのは難しい。
4. 堤体内の浸透流は二次元のダルシーフローでかなりよく近似できる。通常の岩盤基礎上のゾーン型ダムでは堤体よりも基礎の方が浸透流量が大きい。

5. その他の項目の計測

フィルダムの堤体内の埋設計器としては、以上に述べた他に地震計と土圧計とがある。地震計は湛水ともなう挙動とは直接関係ないのでここではふれない。土圧計についても、調査研究目的では意味があるが、安全管理目的からは4-3の間隙水圧のまとめ3.で述べたのと同じような理由から重要性が低いのでここでは省略する。

さて、ここではやや特殊ではあるが堤体内の温度分布について述べてみたい。

最近のロックフィルダムでは、ロック材が堅硬なものばかりとは言えず、長年月の間には風化が進むことが懸念される場合もある。このようなときにはゾーニングを考え、最も風化し易い部分に堅硬な岩石を配置するよう設計するわけであるが、それでは最も風化しやすい場所はどこかということを知る必要がある。岩石の風化に影響する要素としては、乾湿の繰り返し（水位変動）、温度、応力状態などが考えられるが、ここではまず温度について着目したわけである。

図-43はEダムにおける温度計の配置位置を示す。図-44が湛水後の温度分布を時間の関数で示したものである。このダムは冬期に-30℃

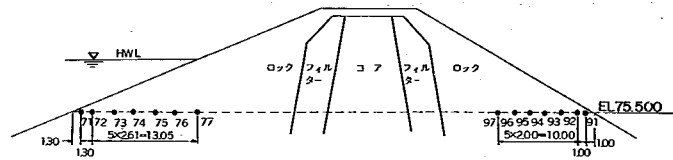


図-43 Eダムの温度計の配置図

以下に下がる気候の地方のダムであることを念頭におかれたい。

湛水開始時期においては外側ほど温度が低く内側ほど温度が高い。また上流側と下流側の温度を比べると、上流側が下流側より温度が高いがこれは上流側の日照時間が下流側より

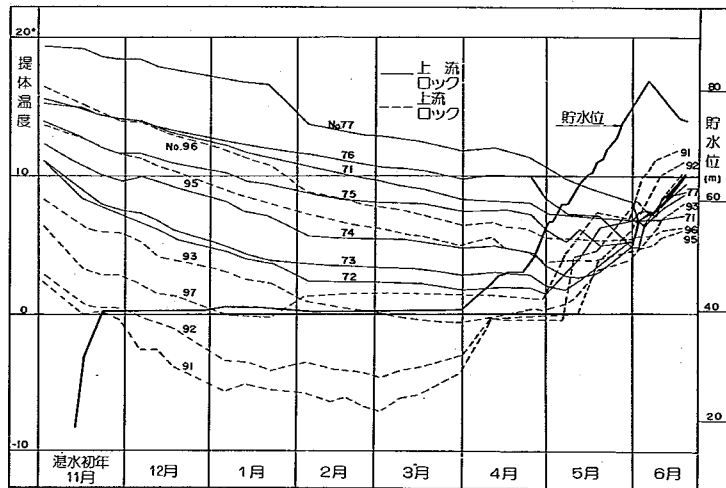


図-44 Eダムの温度分布配置図

も長く、下流側には谷風が吹き当たっていることによる。湛水開始後5ヶ月で温度計を埋設した標高まで貯水位が上昇すると、上流側の温度計は全て水の温度に当然等しくなる。下流側ロックの

温度は水温の影響はほとんどなく外気温の影響で外側ほど温度が高くなる。

したがって下流側ロックの温度は、その後季節的変動を続けるわけで、外側ほど大きな温度変化となるはずである。内側のロックは外気温の変化に対して時間的ずれがあり、したがってロックゾーンには温度勾配が生じていることがわかる。図-45は1年間における最大の温度差を示す。

昭和50年6月～51年6月の1年間に
おける温度差

ロック上流側		ロック下流側	
測点番号	温度差	測点番号	温度差
No. 71	5.7°	No. 91	—
72	15.4	92	23.0°
73	15.0	93	14.7
74	12.1	94	—
75	11.6	95	9.4
76	10.4	96	6.1
77	7.8	97	—

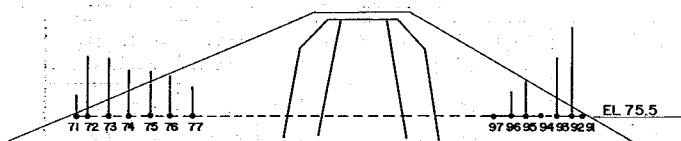


図-45 1年間における最大の温度差

以上より堤体内の温度変化分布は図-46のように示されよう。①、②ゾーンは水中にあって外気中であつたりするので温度変化は大きい。

特に①ゾーンは外側なので温度変化大である。③ゾーンは外気温の変化の影響が大きい。④ゾーンは外気温の影響を受けるが内側なので比較的溫度変化は少ない。⑤ゾーンは常に水中にあるので、常に水温に等しくこの標高の水温はそれほど変化しないから温度変化は比較的小さい。

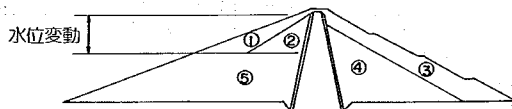


図-46 堤体内の温度変化分布

ただし、以上の例はあくまでも比較的寒冷の地の場合の説明である。

6. 安全管理のための計測

ダム の 計測装置についての法的義務は、河川管理施設等構造令（政令）において表－3のように定められている。ただし堤高が100m以上のダム又は特殊な設計によるダムには、表－3に規定するもののほか当該ダムの管理上特に必要と認められる事項を計測するための装置を設けるものとされている。

また、日本大ダム会議制定のダム構造物管理基準では管理の期間を次の3区分とし表－4のような計測回数を定めている。

表－3 ダムの種類別の計測事項（構造令）

ダムの種類		計測事項
重力式コンクリートダム	50m未満	漏水量、揚圧力
	50m以上	漏水量、変形、揚圧力
アーチ式コンクリートダム	30m未満	漏水量、変形
	30m以上	漏水量、変形、揚圧力
フィルダム	均一型	漏水量、変形、浸潤線
	均一型以外	漏水量、変形

表－4 測定回数（管理基準）

	100m以上の重力ダム 30m以上のアーチダム	100m未満の重力ダム* 30m未満のアーチダム**	均一型 フィルダム	その他の フィルダム
漏水量 第1期	1回/1日	1回/1日	1回/1日	1回/1日
第2期	1回/1週	1回/1週	1回/1週	1回/1週
第3期	1回/1ヵ月	1回/1ヵ月	1回/1ヵ月	1回/1ヵ月
揚圧力 第1期	1回/1週	1回/1週	1回/1週 1回/1ヵ月 1回/3ヵ月	1回/1週 1回/1ヵ月 1回/3ヵ月
第2期	1回/1ヵ月	1回/1ヵ月		
第3期	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月		
浸潤線 第1期	1回/1週 1回/1ヵ月 1回/3ヵ月	1回/1週 1回/1ヵ月 1回/3ヵ月	1回/1週	1回/1週
第2期			1回/1ヵ月	1回/1ヵ月
第3期			1回/3ヵ月	1回/3ヵ月
変形 第1期	1回/1日	1回/1週	1回/1週	1回/1週
第2期	1回/1週	1回/1ヵ月	1回/1ヵ月	1回/1ヵ月
第3期	1回/1ヵ月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月

* ただし50m未満の重力ダムでは変形は測定しなくてもよい。

** ただし30m未満のアーチダムでは揚圧力は測定しなくてもよい。

第1期：湛水開始から満水以後所要期間を経過するまで

第2期：第一期経過以後ダムの挙動が定常状態に達するまで

第3期：第二期経過以降

第一期において測定間隔が密である。なぜならばこの期間は湛水といういわば荷重増加に対して、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き重要な期間であり、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

き点があるかどうかなどを検討すべき期間であるからである。

1976年6月5日、米国アイダホ州のティートンダムが決壊も初めての湛水がほぼ満水となつた時の事故であり(写真-1)、設計・施工に欠点はあつたろうが、事故が起こる当日まで危険の徴候が捕えられずに放置されていた点は、初期湛水におけるフィルダムの安全管理について大きな教訓を残した。³⁾

コンクリートダムの湛水にともなう挙動についてはすでに測定例も多く、これに基づく安全管理手法もかなり定式化が進んでいる。しかしフィルダムについては、我が国では大規模なものは比較的最近建設されたものであり経験が浅く、またフィルダムの堤体材料はコンクリートダムのコンクリートに比べ、各ダム毎に固有のものであるためにフィルダムの安全管理手法の整理は遅れていた。したがって湛水にともなうフィルダムの安全検査の水準をコンクリートダム並に引き上げることが、フィルダムの安全性を確保する上で重要な事項である。そのためには、これまで述べてきた本報告書の調査結果が何らかの役に立てると考える。その中でも特に漏水量を精度よく測定することが一番重要である。そのためには、底設の監査廊を設けることは意義が

大きい。監査廊があれば、堤体および基礎の漏水量と漏水個所がわかり、漏水量が予想以上に多い場合には補修できる。また、安全管理では全体の現象を適確にとらえるのがまず重要で、部分の現象をとらえるのは次となる。この意味で土圧や歪(層別沈下計)よりも、巨視的な漏水や外部変形が重要である。測定データの解釈にあたっては、本報告書の実測例が参考となるだろう。

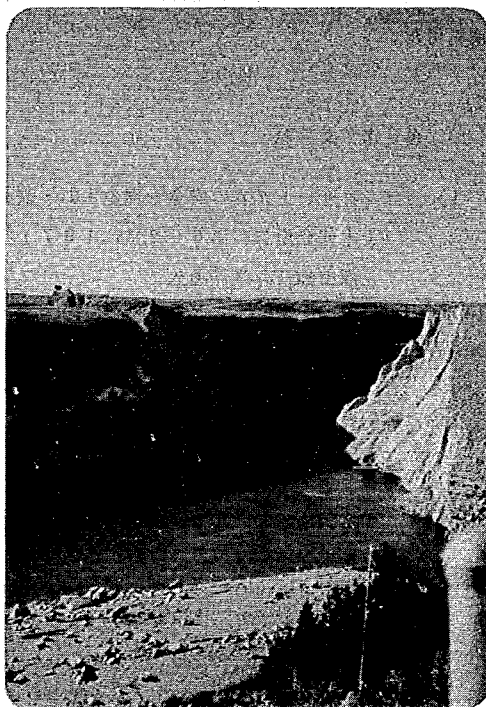


写真 - 1

7. あ と が き

本報告書をまとめるに当って、国、府県、水資源開発公団、電力会社の各現場担当者の方々の大きな協力をいただいた。ここに厚く感謝いたします。また、飯田隆一ダム部長からは多くの示唆を得た。

参 考 文 献

- 1) コンクリートダムの安全管理の手引・改訂版
土木研究所資料第692号、1971年11月
飯田隆一、米 道久
- 2) 有限要素法による浸透流の解析（定常流の場合）
土木研究所資料第558号
飯田隆一、朝倉 肇
- 3) ティートンダムの決壊
土木技術資料 1976年8月号
松本徳久