

岩盤力学 ③

ダム基礎

吉越盛次*

1. はじめに

ダムの破壊によってひき起こされる災害は、人間のつくる構造物の破壊にとまらぬ災害のうちで最も大きなものの一つであろう。近年諸外国で発生したダムの事故は、このことを人々に強く感じさせたにちがいない。このような災害をひき起こすダムの破壊は、基礎岩盤の破壊によって生ずることが多い。参考までにその二、三の例をあげれば表-1のようなになる(バイオントダムの例は基礎の破壊の例ではないが、貯水池周辺地山の崩壊の問題も大きな問題であるので例示した)。

これらのダムには、いずれも新しい設計が取り入れられ設計者もダム建設に関して多くの経験をつんだ人々であったが、そのような人々においてもなおこのような事故の発生を予想することができなかった。わが国においては近年幸いにしてこのような事故の発生をみていないが、だからといって問題を軽く見ることは許されるものではなく、他の国々における以上にこの問題の解決は必要視されてきている。特に近年ダムおよび貯水池を建設する要請が強いのに反し、良好な未開発ダム地点の数は漸次減少してきており、今後は基礎の状態があまりよくない地点にもダムをつくっていかねばならない状況になってきている。

現在ダムをつくる場合に、その基礎に関して問題とされるのはろう水の問題もさることながら、基礎の安定の問題が一番であろう。基礎の安定の問題については、ダムの形式が関係してくる。フィルタイプダムではこれが特に問題となることは少なく、重力ダム、アーチダムではこれが相当問題となってくるが、基礎に働く荷重強度、および荷重の方向などの点から、アーチダムの基礎岩盤の安定、特にアーチダムのアバットメントの岩盤のすべりが問題となることが多いように思われる。特に地山の地質が悪い場合、または地山が薄い場合、あるいは卓越した断層がアバットメント岩盤内に存在する場合などは、これがすべるかどうかが問題となるだろう。この場合断層沿いに地山がすべりやすい傾向にあることはわかっても、それではこれがすべるかどうかを定量的に調べることはなかなかむずかしいことであって、現在のところまだこれといった決定的な判定方法はない。なぜすべりの問題を定量的に調べるのがむずかしいかということ、それは岩盤の力学的性質があまりにも複雑でよくわからないからであると思われる。ダムの基礎は、地表の他の構造物のそれにくらべて作用する力が非常に大きく、また直接基礎に高い水圧が働くために問題はやっかいになるが、これらの要因はその大きさがはっきりわかっているから問題の解決を特に不可能にするものではない。

また現在ダムを建設する場合に、多額の基礎処理費を投入することが多く、ある場合にはダム本体工事費を上まわることもある。この基礎処理工事の適正規模なり、あるいは適正工法なりは、前述の定量的判定方法が確立されて始めて合理的に決定できることになるものと思われる。

結局基礎岩盤の問題は、岩盤の力学的性質を解明し、岩盤の安定性の定量的な判定方法を確立することによって始めて解決することになるものと思われる。基礎の安定の問題は、今始めて発生した問題ではないが前に述べた意味からも、今後ますますわれわれダム建設関係者は

表-1 ダムの破壊例

名称	ダム		地質	事故概要	
	形式	高さ(m)			長さ(m)
マルバッセ (フランス)	アーチ	62	248	片麻岩	貯水池が初めて満水に達した時、左岸のアバットメント地山がアーチのスラストによって、シームに沿って崩壊し、その結果ダムも崩壊した。(1959年事故発生)
バイオント (イタリー)	アーチ	266	190	石灰岩 ドロマイト	大雨のあとで、ダム直上流の左岸地山が貯水池内に崩壊し、ダムから大量の水があふれた。(1963年事故発生)
フライレイ (ベルー)	アーチ	74	90	安山岩	貯水池が満水になる前に、ダム下流の左岸アバットメント地山がアーチのスラストによって節理面に沿って崩壊した。この時は雨期であった。(1961年事故発生)
セントフランシス (アメリカ)	アーチ重力	63	230	片麻岩	左右両岸のダム基礎の地山が水を含んで脆弱化して崩壊し、ダムも崩壊した。(1928年、事故発生)

* 正員 工博 電源開発KK 土木部次長

定量的判定方法の確立に向けて努力をはらわなければならない立場にある。

2. 基礎岩盤の力学的性質

(1) ひびわれの影響

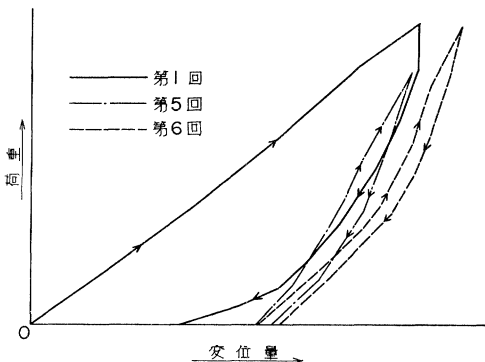
岩盤内部には無数の節理・割目・シーム・断層などのひびわれ面が存在する。岩盤はこれらのひびわれ面において接している岩石の集合体であるとも考えられる。岩石はそれ自身ほぼ弾性体であり、もし岩盤にひびわれ面が存在しなければ岩盤の力学は簡単に弾性力学によって解くことが可能であろうが、実際にはこのひびわれ面が存在するために岩盤の力学は複雑なものとなってくる。

ひびわれ面が岩盤の力学的性質に与える影響は、大まかに分けて三つあると考えられる。その第1は岩盤の強度を低下させることであり、第2は変形をある程度不可逆的にすることであり、第3は強度、変形などの力学的性質に方向性を与えることである。

第1の点については、岩盤を構成している岩石の一つ一つは強いものであって、普通ダム基礎岩盤内部に発生する応力程度で圧潰することはほとんどないが、岩盤全体として考えるとその内部に弱点となるひびわれ面が存在するために、岩盤の強さはひびわれ面の強さによって支配されその岩盤を構成している岩石そのものの強さとは一応無関係となるようである。

第2の変形を不可逆にする点については、ジャッキ試験による岩盤の荷重変位曲線を見ると岩盤の変形性状がわかる。ジャッキ試験は普通くり返し载荷方法で行なわれるが、この結果得られる荷重変位曲線は図-1のようなものが多い。すなわち、第1回の载荷時の変位および除荷時の残存変位は大きく、変位は不可逆的であり、2回以後回を重ねるにつれて荷重変位曲線は弾性履歴に近くなっている。これを推測するに、第1回目は载荷点付近のひびわれ面のすき間がくっつき、あるいはすべるために変位は大きくかつ不可逆的になるものと思われ、第2回目以後は、ひびわれ面のすき間がくっついた状態か

図-1 ジャッキ試験による岩盤の荷重-変位曲線の一例



ら変位が始まるために、その曲線は弾性履歴に近いものとなるのであろう。さらに推測すればひびわれ面のすべりやすき間の接触が生じる範囲は、応力度の大きい载荷点付近だけに限られ、载荷点のある程度はなれたところでは応力度が小さいためにそれらの面に沿ったすべりは生じないで、最初から弾性変形をするだろうということも考えられる。

第3の影響すなわちひびわれ面が岩盤の変形や強度に方向性を与えることについては、ひびわれ面に垂直に力が働いてもすべりは生じないが、斜め（摩擦角以上の角度）に力を働かせればすべりが生じると考えられるし、またひびわれ面はその面に垂直に力が働いたときに最もすき間がくっつきやすいと考えられることなどから、岩盤は力学的に方向性をもつことになるものと思われる。そして以上のような影響が複雑にからみ合うために、岩盤内部の力の伝播がきわめて不明確になってしまうのであろう。

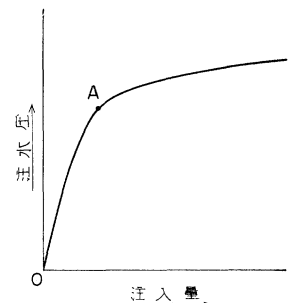
(2) 地下水の影響

基礎岩盤は前述のとおり節理面、断層面によって寸断されている。これらのひびわれ面が水をふくむとその力学的抵抗性は減少する。特に風化の進んだ岩盤は節理面にいろいろ軟弱な材料をふくんでいて、これらの物質は水をふくめば強度がいちじるしく低下する。したがって水をふくんだ場合とふくまない場合とでは基礎岩盤の支持力は大きく変化してくる。またダムの場合貯水池から節理などのすき間を通ってくる水はカーテン グラウト工や排水工が不完全であればなおのこと、それを十分おこなっても、なおかなりの圧力を持った水となる。この水はひびわれ面を押し開き、岩盤の一体性をさまたげる作用をする。

ひびわれ面のせん断抵抗力をクーロン式によって $C + N \tan \phi$ とした場合、圧力を持った水（間げき水圧 u ）が入ってくれば、 C は脆弱化して0に近くなり、 ϕ は減少して ϕ' となり、その面に働く垂直力 N は減少して $N - u$ となるだろう。そして結果としてすべりに対する抵抗力は $(N - u) \tan \phi'$ となって大いに減少するだろう。

またすき間が水圧によって押し開かれた場合、その開きがある限度を越せば、あるいは流速がある限度を越せば、そのすき間に詰っている軟弱な材料は流され始めるだろう。これによってひびわれ面の力学的強度はさらにまた大きく低下するも

図-2 水押しテストにおける注水圧と注入量の関係



のと思われる。ダム基礎グラウト工の場合、水押しテストをグラウト工の前におこなえば、注水圧と注入量の関係は図-2のようになる場合がある。この図において曲線が急に勾配を変える点Aは、前述の限界点ではなからうか、そしてこれは見方によっては岩盤の破壊ともいえるのではなからうか。マルパッセダムにおいても、バイオントダムにおいても、岩盤崩壊の直接原因は岩盤が水をふくんだことにあったものと思われる。ダムのように巨大な水圧が直接岩盤に作用する構造物においては、岩盤の安定性を云々する場合、この内部の水の問題は忘れてはならない問題である。

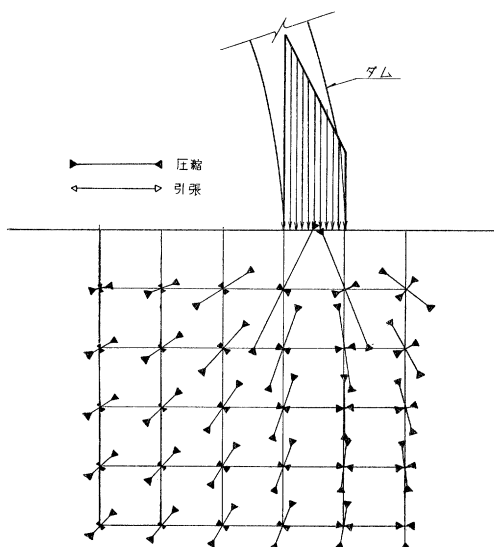
3. 現在用いられている検討方法

(1) 現在の方法

1. 述べた、アーチダムのアバットメントの岩盤の断面に沿いのすべりを、現在どのように取り扱っているかを以下に述べよう。普通に用いられる方法は、岩盤を弾性体とみなし、断層をふくむ想定すべり面上の応力を求め、一方、岩盤試験によって岩盤の強度を求めて、この両者を比較する方法である。想定すべり面上の応力は、地形や地質条件が簡単な場合とか、すべりに対して大ざっぱな見当をつけるだけの場合には弾性論にしたがった計算によって求め、それらの条件が複雑な場合にはそれらの影響をできるだけ織り込んだ模型について応力測定をおこなうなどして求める(図-3, 4 参照)。

岩盤の強度(厳密には粘着力と内部摩擦角)は、現地岩盤試験などによって求める。この場合岩盤の強度は場所によっても、力の方向によっても、あるいは含水量によっても変わるから、サンプリングその他には十分注意

図-3 地形の影響(その1)半無限体の場合の主応力の一例



する。応力と強度の比較は、想定すべり面上のせん断摩擦安全率を計算することによっておこなう。この場合もシュミットネット(図-5 参照)などを参考にして、できるだけ用いる強度に方向性を考えたものにする。模型実験による場合は、破壊実験によってこれをチェックする。

(2) 問題点

前節の方法にはつぎのような問題がある。その第1は力の伝播の問題である。実際の岩盤の力学的性質は前述のように非常に複雑であるから、想定すべり面上の応力分布は前述の方法で求めた値とかなり異なるものと思われる。その第2は強度試験によって得られた結果を計算に用いる場合にその用い方が非常にむずかしい点にある。どんなに注意をはらっても、岩盤試験の場合はコンクリート試験からダム本体の強度を類推するような具合にはいかない。特に水をふくんだ場合、岩盤の強度がどの程度低下するかを求めることはむずかしい。その第3は、応力および強度がかりに正しく求められたにしても、せん断摩擦安全率としてどのような値を採るかに問題がある。採るべき値としては、すべり面全域の総合せん断摩擦安全率と、すべり面上の任意点の安全率とが考えられるが、総合安全率が規定の値(例えば4)より大きくても、載荷位置付近では点の安全率がずっと小さい場合がある。このような場合はこの点から逐次破壊が生ずることも考えられる。現在ではこの逐次破壊の問題がわからないために、安全率がどの位かはっきりした結論を下すことができない。

(3) 問題点解決への努力

前節の問題点を解決しようとして、沢山の人がいろいろ

図-4 地形の影響(その2)下流側が薄い場合の主応力の一例

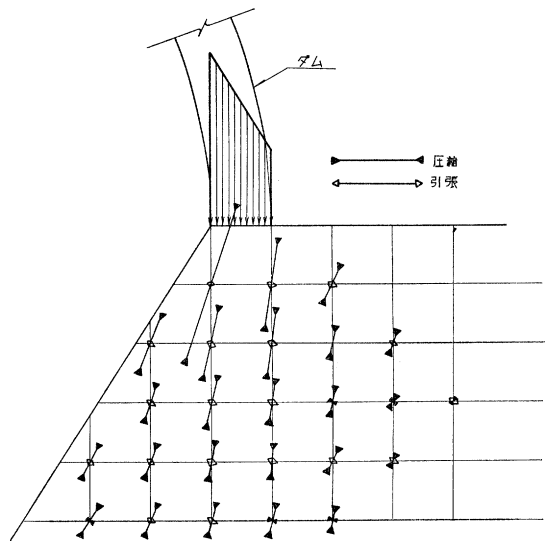
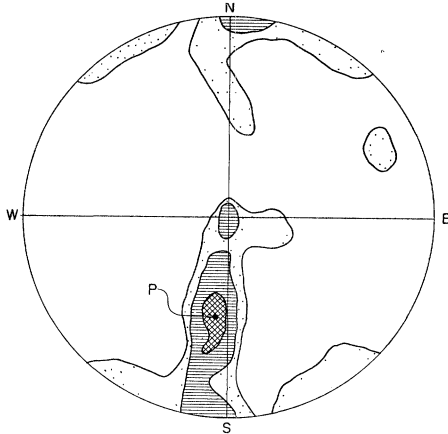
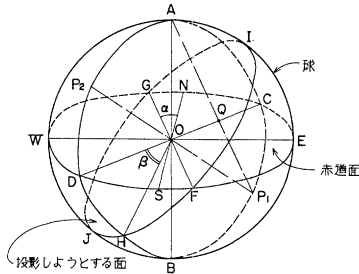


図-5 シュミットネットの一例

図の説明：上の図：節離面の走向傾斜を極座標的に示すものである。中心からの距離は傾斜，規準軸からの角度は走向を示すようになっている。また図に示される曲線は存在する節理面の方向の等頻度線である。この図においては、P点で示される走向傾斜が一番卓越していることがわかる。
 下の図：シュミットネット上の点の意味を説明するためのものである。一つの節理面（走向 $N\alpha^{\circ}W$ 傾斜， $\beta^{\circ}SW$ ）に垂線を立てて得られる。仮想球との交点のうちの下半球との交点 P_1 と上半球の極とを直線で結んだときに，その直線と仮想球の赤道面との交点 Q がシュミットネット上の点である。



頻度
 0-2%
 2-7%
 7-16%
 16-28%



ろな研究をおこなっている。Biot は層構造をもつ岩盤解明の一つの手がかりとして，剛体に接する有限厚さ z_0 の弾性体の表面に垂直な集中荷重あるいは線荷重が作用した場合について解いて，その剛体面と接触する面上の鉛直応力の値を与えた。これの集中荷重の場合を例示すれば次式のようになる²⁾ (図-6 参照)。

図-6 剛体の上に存在する有限厚さの弾性体に力が作用した場合

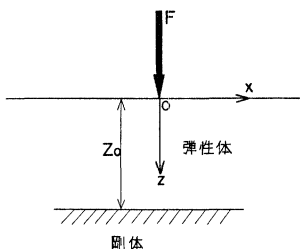


表-2 垂直応力の比較

	集中荷重	線荷重
等方等質半無限体の場合(Boussinesq)	$1000 \times \frac{3}{2\pi} \frac{F}{z_0^2}$	$1000 \times \frac{2}{\pi} \frac{F}{z_0}$
剛体面が粘着力をもつ場合(Biot)	$1557 \times \frac{3}{2\pi} \frac{F}{z_0^2}$	$1281 \times \frac{2}{\pi} \frac{F}{z_0}$
剛体面が完全になめらかな場合(Melan)	$1711 \times \frac{3}{2\pi} \frac{F}{z_0^2}$	$1441 \times \frac{2}{\pi} \frac{F}{z_0}$

$$\sigma_z = \frac{F}{z_0^2} \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{z_0}\right)^2\right]^{5/2}}$$

さらに Melan も同様な研究をおこなっている。参考までにこれらの結果を半無限弾性体の場合と比較すると表-2 のようになる²⁾。林は岩盤を多層基盤あるいは立方体の積み重ねとして模型化し光弾性実験によって応力の伝播性を調べている。また林は岩盤を互い違いに組み合わせさせた立方体の積み重ねとし，ひびわれ面の粘着力や摩擦力の変化で力の伝播がどう変化するかについて研究している³⁾ (図-7~11 参照)。

逐次破壊の問題そのものではないが，林はこれに関連する問題として，岩盤内の任意点のせん断摩擦安全率を求め，これらの点のうち規定の値を下まわる点をすべてふくむ領域をもって要処理領域とすることを提案してい

図-7 水平な軟層が存在する基盤における軟層面上の垂直応力

(軟層の弾性係数は堅岩の弾性係数の 1/10)

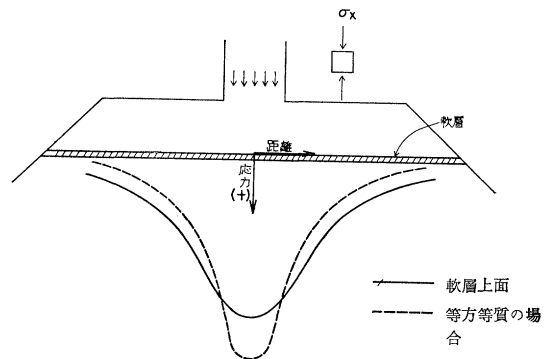


図-8 斜め方向に軟層の存在する基盤の軟層面上の垂直応力

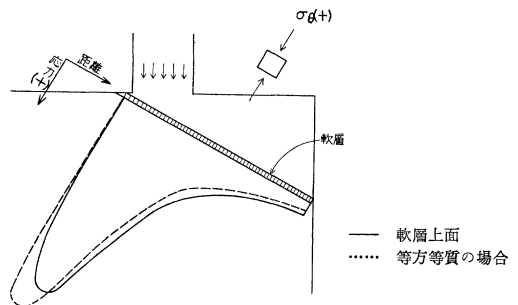


図-9 斜めの方向に軟層が存在する基盤における軟層面上のせん断応力
(軟層の弾性係数は堅岩の弾性係数の 1/10)

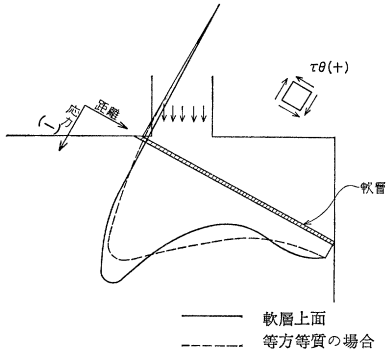


図-10 ひびわれ面の粘着力と鉛直応力の関係(その1)

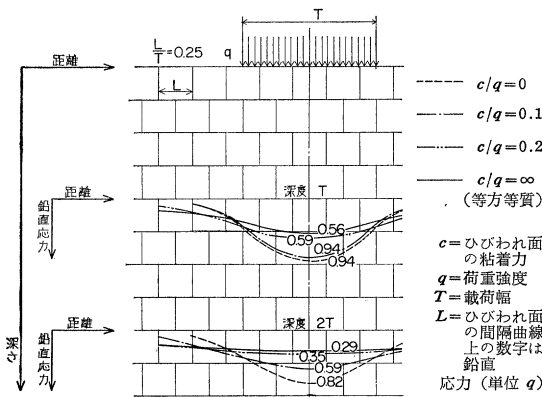


図-11 ひびわれ面の粘着力と鉛直応力の関係(その2)

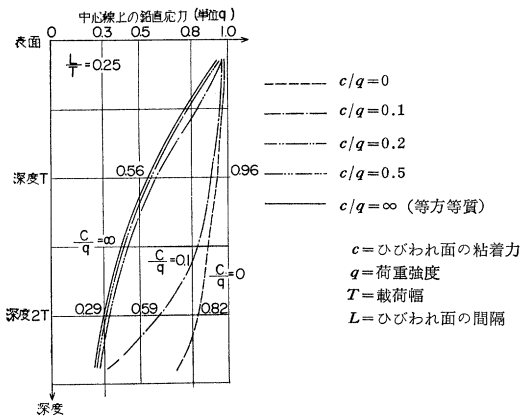
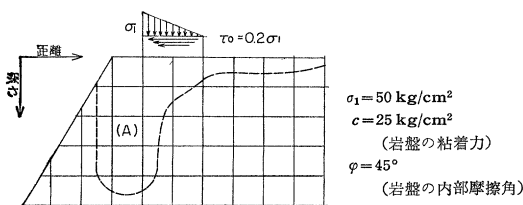


図-12 アバットメント岩盤の要処理領域(A)の一例



る³⁾(図-12 参照)。

高野は模型に現実岩盤との相似性を与え、これを破壊させた結果をもとにして、基礎岩盤の安定性をせん断摩擦安全率などによらないで推定している⁴⁾。

Talobre はある程度やわらかい岩盤に対しては、塑性論によってこれを検討することを提案している。そして実際の具体的方法として Prandtl が発表した塑性体の表面に垂直力が働いた場合の支持力を与える式(図-13 参照)

$$f = r z_1 \alpha + c(\alpha - 1) \cot \varphi$$

ここに f = 支持力, $\alpha = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) e^{\pi \tan \varphi}$

c = 粘着力, r = 比重, φ = 内部摩擦角,

z_1 = 表面から基礎面までの深さ

あるいはこれを発展させ、基礎面に垂直力とせん断力が働いた場合について、Sokolovsky が与えた式

$$P_0 = r z_1 \beta + c(\beta - 1) \cot \varphi$$

ここに, $\beta = \frac{\cos^2 \psi (1 + \cos \varphi \sqrt{\tan^2 \varphi - \tan^2 \psi})}{1 - \sin \varphi}$

$$e^{(\pi + \varphi + \text{Arc sin } \psi / \sin \varphi) \tan \varphi}$$

r = 比重, P_0 = 塑性体表面に作用する垂直力, t_0 = 塑性体表面に働くせん断力, $\psi = \tan^{-1}(t_0/P_0 + c \cot \varphi)$, φ = 内部摩擦角, c = 粘着力, z_1 = 表面から基礎面までの深さ

等によって計算する方法をあげている。また彼はアーチ

図-13 半無限塑性体の支持力

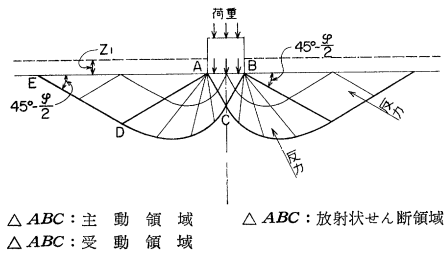
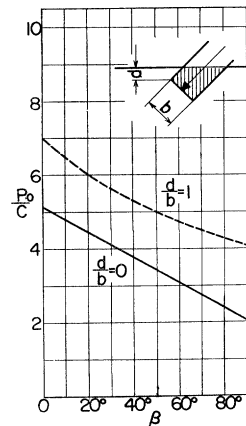
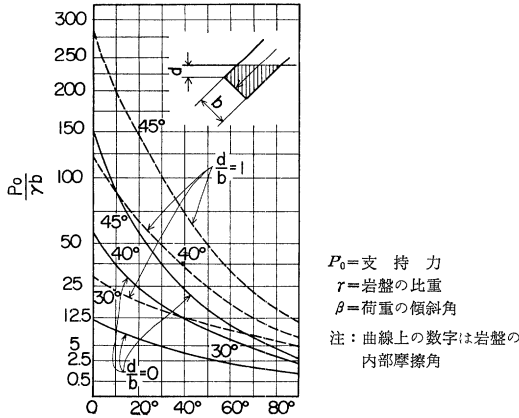


図-14 傾斜した基礎の支持力(内部摩擦角=0 の場合)



図一15 傾斜した基礎の支持力（岩盤の粘着力=0 の場合）

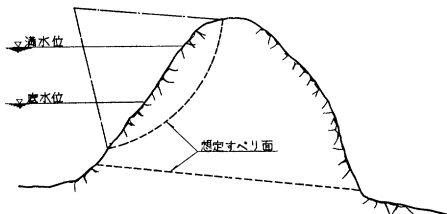


ダムのアバットメントにおけるごとく、力の作用方向が岩盤表面に斜めに働く場合については Meyerhof が発表した結果、すなわち半無限塑性体表面に斜めに力が働いた場合の支持力を与える結果によって、支持力を検討することを考えている³⁾（図一14, 15 参照）。

4. 貯水池周辺地山の安定

ダムと同様に貯水池周辺地山の安定も問題となる。これらの地山は貯水池が貯水することによってそれまでの力学的安定の状態を乱されてしまうことになる。パイオントダムの場合も、貯水池水位の低下という状態の急変によって、強度を失なった地山が自重をささえきれずに崩壊したのではないかという見方もある。しかしながら、上流地形の起伏が大きい場合、全地山についてそれらが池の中に崩壊するかどうかを検討することは量的に不可能に近いし、また仮りにそのような問題となる地山の数が少なくても、それが落ちるかどうか調べる方法は、地質状況、地形状況から判断する以外に現在のところ方法がない。強いて定量的に検討するとすれば、フィルタイプダムの場合におけるような円形すべり面に沿った滑動計算をおこなうというような方法も考えられるが、この問題はこのような簡単な方法で崩壊の有無が判断できるような性質の問題ではないものと思われる。また貯水池周辺に図一16 に示すような薄い地山が存在す

図一16 貯水池周辺地山が急な場合あるいは薄い場合のすべり



るような場合には、池の中への地山の崩壊の心配と同時に、池から外側へ向って山がすべる心配も生じてくるので、さらに問題はむずかしくなってくるだろう。

5. ダム基礎安定性の検討例

参考までに、ダム基礎の安定性を検討した二つの例を以下紹介する。

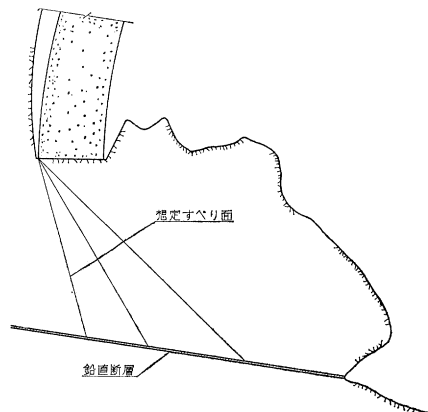
(1) 池原ダム

池原ダムは、紀伊半島を流れる北山川に電源開発KKが現在建設しているコンクリートアーチダムである。ダムは、高さが111m、ダム長さが460mで、体積は640000m³である。谷の幅が非常に広いためにダムに作用する水圧の総量も巨大であり、このためアバットメントに作用するダムからの堆力は片側のアバットメントに対し1000000tにも達する。

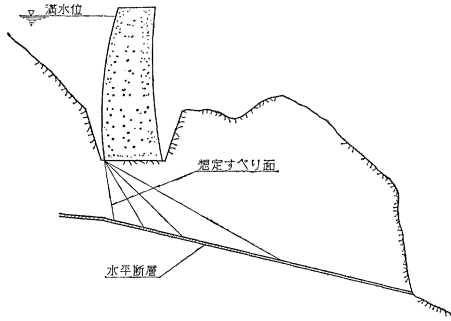
基礎岩盤は主として健硬なる粘板岩であるが、右岸アバットメント岩盤にはほぼ鉛直な断層と水平な断層が存在するので、これらの断層面に沿って、岩盤が滑動することがないかどうかの問題について検討がおこなわれた。計算に際しては基礎岩盤は半無限弾性体と考えられ、ダムからの堆力およびせん断力、さらに貯水池水圧が作用した場合の岩盤内の断層をふくむ想定すべり面上の応力が地山の重量等を考慮して算出され⁵⁾、一方大口徑ボーリング機械によって切り出された節理をふくんだ岩盤供試体(15cm×30cm)が三軸試験されて岩盤強度が求められ、すべり面上の総合せん断摩擦安全率が計算された。

計算にさいしては、岩盤は水平要素と鉛直要素にわけて考えられ、ダムのアーチ要素から作用する力は岩盤の水平要素に作用し（図一17参照）、ダムの片持ばり要素からの力および地山の重量は岩盤の鉛直要素に作用するものと考えられた（図一18参照）。このような計算の結果、両要素のおのおのに対して安全率が以上あることが判明した。

図一17 ダム基礎水平断面の一例



図一18 ダム基礎鉛直断面の一例

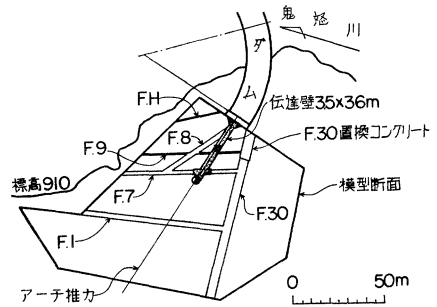


(2) 川俣ダム³⁾

川俣ダムは鬼怒川上流部に建設省が建設したコンクリートアーチダムである。ダムは高さが120m、ダム長が137mで体積は168000m³である。ダム地点は全体としては堅硬な石英粗面岩からなり、急峻な狭い谷を形成しているが、左岩アバットメント岩盤にはいくつかの軟弱層が存在している(図一19参照)。そしてまたダムのすぐ下流において山が薄いため、ダムから作用する推力に対してこの岩盤が断層沿いにすべることが県念された。このため岩盤をロッキーピラーとして取り扱い、裏山の反力を差し引いた力がピラーによってささえられるとして安定計算がおこなわれた結果、F・8-F・7に沿ったすべり面では軟弱層の粘着力を0として安全率は1.9、F・30-F・1に沿ったすべり面では7.3となった。このためF・7を越えて岩盤内深くアーチ推力を伝える伝達壁によってF・7までを一体化させることが考えられ、その場合の伝達壁の形状が石膏模型実験によって検討された。

模型材料は、現地の岩盤試験の結果と弾性係数を一致させるように定められた。実験は、破壊実験および応力測定のため両方がおこなわれ、壁の厚みおよび先端の形状がいろいろと検討された。その結果、壁厚を3.5mとし、先端部分で応力集中を避けられるような方法をとれば安全率4.0以上となることが判明した。また応力測定の結果では(図一2参照)伝達壁を設けない場合にF・7、F・

図一19 川俣ダムの岩盤模型実験



8、F・9に発生していた大きなせん断応力は、伝達壁を設けることによって大幅に減少し、材料の破壊までにはかなりの余裕が生じることが判明した。

6. おわりに

本文では、ダム基礎の一番重要な問題と思われるすべりに対する安定の問題について述べてきた。ダムの基礎岩盤の力学に関する問題として、この他にダム基礎の変形、特にクリープの問題あるいは爆破による岩盤のゆるみの問題等々が考えられるが、これらに関してもまだ不明確な点が多い。

なお本文には多くの方々の研究の結果をのせさせていただいた。深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 吉田勝英：ダムの基礎岩盤グラウト施工規準の定め方に関する一提案，土木学会論文集第77号，1961.
- 2) Talobre, J: "La Mécanique des Roches", appliquée aux travaux publics, 1957.
- 3) 岩盤研究会：第1回岩盤力学シンポジウム，1962.
- 4) 高野 稔：アーチダムの基礎の安全性に関する実験的検討方法に関する研究，土木学会論文集第78号，1962.
- 5) 垣谷正道：基礎岩盤の応力分布を求める方法について，電力中央研究所，第2号印刷物，1960.
青木謙三：一ツ瀬アーチダム基礎に関する諸測定，発電水力 No. 56, 57, 1962.
電力中央研究所技術研究所報告，土木 63001，境川ダム地点の岩盤研究 1963.
土木学会岩盤力学委員会：第2回岩盤力学に関するシンポジウム，1963.

最近の基礎工法頒布

内 容：●基礎地盤の調査／三木五三郎●基礎施工法と土質／最上武雄●鋼ぐい基礎／大崎順彦●基礎工事の機械化／中島 武●国鉄新幹線の基礎／池原武一郎●名神高速道路の基礎／高橋脩一●ダムの基礎とその改良工法／村 幸雄●ダムの岩盤基礎／広田孝一●地下鉄施工法／西嶋国造●軟弱地盤上の盛土築堤の基礎地盤と安定処理／竹中準之介●付録／日本沖積層分布図

体 裁：B5判8ボ一段組 本文 324 ページ 付録 日本沖積層分布図(2色刷・B全紙) 図表・写真多数

定 価：1000円(送料120円) 会員特価：800円(120円)