

岩盤力学とコンクリートダムの安全性

1964年8月

J. A. Talobre

フランスのコンサルタント エンジニアである J. A. タローブル氏は、フランス電力公社で長年にわたりアーチダム、圧力トンネル、地下発電所などの設計にたずさわり、特に岩盤の安定性について造詣が深く、その著書「Mécanique des Roches」で、世界ではじめていわゆる「岩盤力学」という名を創設した人として知られている。同氏は 1964 年 8 月 1 日、関西電力 KK の招きで来日され、この機会に 8 月 31 日土木学会岩盤力学委員会の主催した懇談会において、各委員と岩盤力学について種々意見を交換した。また、9 月 2 日 日工学技術協会の主催による講演会において、岩盤力学とコンクリートダムの安全性について講演をされた。以下は岩盤力学委員会が適当と認めその講演の原稿をほん訳したもので、現在わが国でアーチダムの基礎の安定性について種々論議されている折から、この問題について有益な示唆を数多く含んでいて興味深いものである。

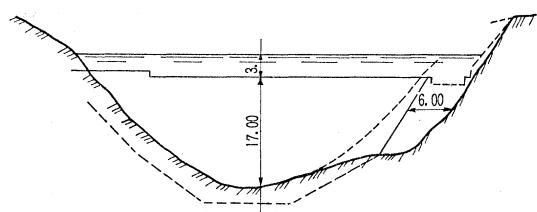
(編集部)



ダムのもたらす危険性について、ダム建設技術者は近年増え深い注意を払うようになってきている。技術者はいかなる形式のダムであろうと、それが破壊する危険性がないとはいえないことをよく知っている。過去においてダム、特にアーチダムにおいてしばしば破壊があったことはまぎれもない事実である。もちろんアーチダムの破壊はアースダムの破壊よりその例はずっと少ないが、つい先年の Malpasset の惨害は、アーチダムもまた破壊するものであることをまざまざとみせつけた。事実、アーチダムの破壊例は一指に止まるものではない。今、このようないくつかのアーチダムの破壊例の意味するものについて考えてみるとことは、意義あることと思われる。

Mo耶ie River アーチダムは、アイダホ州にある高さ 17 m、アーチの半径 20 m、ダム頂の厚さ 60 cm のアーチダムであり、アーチの平均圧縮応力は約 20 kg/cm^2 であった。洪水吐はダムの左翼に設けられていた。左岸はやせ尾根であって、その厚さは頂部で約 15 m であった。岩盤の目は、傾斜 30 度で下流側に傾斜していた。1926 年にこのダムは大洪水に見舞われ、ダムを越流する水による侵食は、岩盤内の応力の増加によってさらに一層激しいものとなった。そして左岸地山表面の厚さ 6 m の岩盤は逐次洗い流されていった(図-1)。ノースカロライナの Lanier Lake ダムは、高さ 19 m、アーチ半径 45 m、ダム頂の厚さわずか 60 cm のアーチダムで

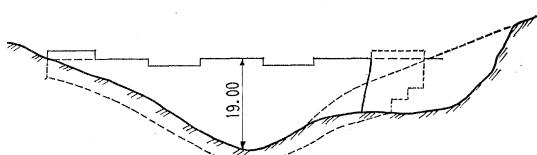
図-1 Mo耶ie River ダム
(アメリカ アイダホ州)



あった。左岸は岩盤の状態がやや悪く、岩盤内には多くの粘土シームが存在した。したがって基礎掘削において不良岩盤部が深部まで掘り取られただけでなく、さらにダムの左翼はスラストブロックによって補強された。

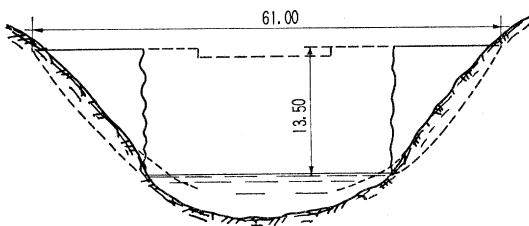
ダムの平均応力は約 25 kg/cm^2 であった。1925 年にダムは大洪水に見舞われ、Mo耶ie ダムの場合と同様に左岸は流失してしまった(図-2)。

図-2 Lanier Lake ダム
(アメリカ ノースカロライナ州)



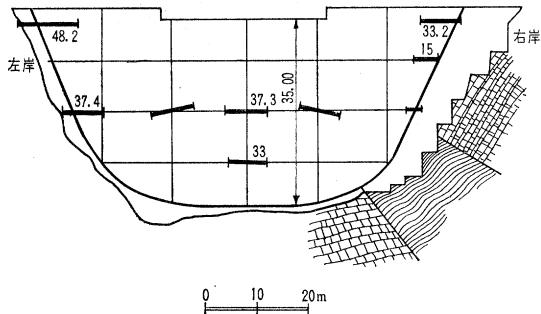
オーストリアの Finsingbach ダムは、高さ 15 m のアーチダムであったが、洪水中にダム基礎は侵透水によって穴を明けられてしまった。基礎岩盤(石英質片麻岩)は洗い流され、アーチダムの中央部は崩壊してしまった(図-3)。

図-3 Finsingbach ダム
(オーストリア)



ユーゴスラビアの Idbar ダムは、高さ 38 m、ダム頂の厚さ 1.10 m、半径 100 m のアーチ ダムであり、ダム内部の平均応力は最大荷重時に約 48 kg/cm^2 であった。洪水吐はダムの中央に設けられていた。基礎岩盤は主として石灰岩よりなっていたが、左岸には頁岩の薄い層が存在した。そして石灰岩の弾性係数は $40\,000 \text{ kg/cm}^2$ であったが、頁岩のそれはわずかに $5\,000 \text{ kg/cm}^2$ に過ぎなかった。また石灰岩はあまり水密なものではなかった。したがって、多額の工事費を計上して大がかりなグラウト工が計画されたが、1959 年 12 月の Malpasset の惨害の後数日を経ずして大雨がこのダムをおそい、貯水池を満杯したとき、グラウト工はまだ施工完了とはなっていなかった（図-4）。最大荷重を受けて、このダムの左岸

図-4 Idbar ダム上流面
(ユーゴスラビア)



の不良岩部は変位し、左岸アバットメントの水平変位量は 10 cm にも達した。そして石灰岩内部に存在した割れ目は逐次開孔し、岩盤表面からの湧水現象が見られるようになつた。このため、爆破工によって非常用排水路を急拠設けることが必要となつた。

カリフォルニアに存在した San Francis ダムは、高さ 62 m、ダム天端の曲率半径 152 m のアーチ重力式ダムであり、基礎岩盤には最大約 30 kg/cm^2 の圧縮応力がダムから伝達された。基礎岩盤は大部分雲母片岩であったが、この岩はひびわれを多く含んだものであつて、ひびわれには粘土および石膏がはさまれていた。

また、右岸には厚さ約 1 m の断層が河流方向に平行

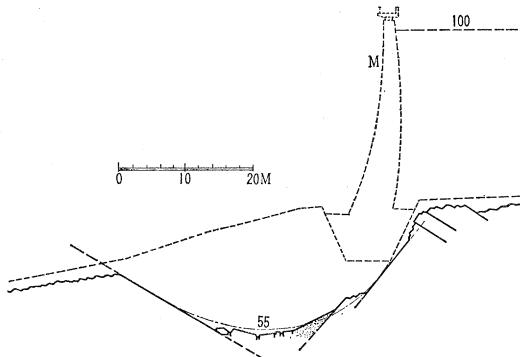
に走っていた。この断層は粘土、角礫で満たされており、断層付近の雲母片岩は破碎帶を構成していた。1928 年、貯水池は最高水位に達したが、3 月 12 日、ダムは突然崩壊してしまつた。この経過を考えてみると、まず断層が下に走っていた右岸側ダムがまず崩壊した後、すぐ左岸側が崩壊したものと考えられる。ダムの中央部は破壊せずに残つてゐた。

この奇妙な現象に対する唯一の説明は、右岸の破壊によって過大な推力が左岸に働き、そして左岸岩盤が圧潰したということであつて、事実、深さ 20 m にわたつて左岸はえぐり取られていた。

ペルーの Frayle ダムは高さ 90m のアーチ ダムである。基礎岩盤は火成岩であり、岩盤の目は鉛直ではなくて河川に平行であった。満水に達したとき、左岸の岩盤の一部が破壊したが、ダムは破壊をまぬがれた。この場合は、強い揚圧力（間げき水圧）が働いたことも岩盤が破壊した原因の一つと確かに考えられるが、しかし、ダムから岩盤への推力も、またこの破壊を呼びおこしたものであることは確かである。

フランスの Malpasset アーチ ダムは 1955 年に完成了。このダムは高さ 60 m、最大厚さ 9 m であつて、アーチに働く最大応力は約 50 kg/cm^2 であった。左岸には、天端標高付近にスラスト ブロックが設けられており、洪水吐はダム中央越流自由落下式であった。また直径 3 m のスルース バルブがダム底部に設けられていた（図-5）。

図-5 Malpasset ダム事故発生後の断面図



ダム地点の岩盤は雲母片岩からなつていて、所々にレンズ状の片麻岩が介入していた。そしてこの片麻岩は風化しており、その一部は分解しているものすらあり、ひびわれ、および断層を含むものであった。また、火山岩が貫入していた。川は過去 4 年間ほとんど渇水状態であったが、1959 年の暮近く、この付近は突然の豪雨におそわれた。ダムの底部においては変位の測定が行なわれ最大荷重ではなかつたが、測定用標的の下流方向への変位は 7 mm に達した。すぐに毎秒 10 l の湧水が、

右岸の下から $1/3$ の所に発生した。同時に、ダム下流の洪水吐減勢池の張りコンクリート側壁にクラックが発生した。クラックは、まず右岸側壁について左岸側壁に発生した。このことは河床の基礎岩盤がふくれてきたことを証明するものであった。そして 1959 年 12 月 2 日の夜、ついにダムの左岸側の部分が突然崩壊した。左岸アバットメントの岩盤はすべてダムの基礎掘削面にそって移動し、スラストブロックは下流方向へ 2 m 移動した。ダムは、左岸側の部分および中央部分が崩壊した（写真-1）。

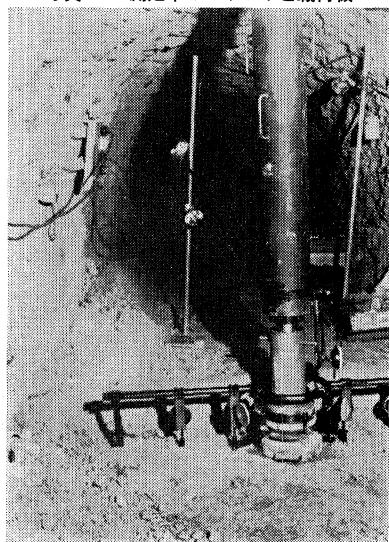
写真-1 崩壊前の Malpasset ダム



この破壊の原因を調査するための地質調査（工学的岩盤調査）が、技術的に問題を追求する面からの要請で、専門家によって行なわれた。このとき私は私の考案したジャッキ法によって調査を行なうことを提案し、この提案は受諾された（写真-2）。

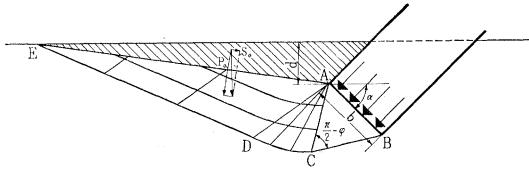
2 本の調査用横坑が左岸に掘削され、岩盤の圧縮試験が行なわれた。この試験の結果、片麻岩の性質は、場所によって非常に相異なることが判明した。しかし、いずれにせよこれら片麻岩の性質は、不良な部数に属するものであって、基礎の支持力は比較的低い値のものであ

写真-2 測定中のジャッキと載荷板



った。私は、Malpasset の崩壊は基礎破壊の代表的な例であるとの意見を述べた。理論計算の結果と、実際の現象とを比較すればそのことが一目瞭然であることがおわかりになると思う（図-6）。

図-6 破壊領域の理論断面



結論として、われわれはつぎにのべる 3 点を得る。

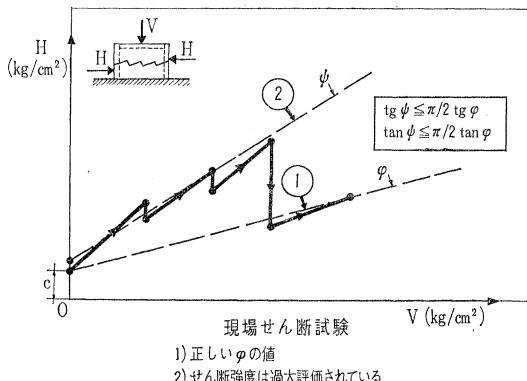
- ① 前記各ダムのほとんどは、貯水池が最初に満水したときに事故が発生している。
- ② ダムに最初に設計荷重を作用させる場合においても、調査段階における岩盤試験の場合においても、いずれの場合にも十分なステップを踏んで、ことを運んでいない。
- ③ いずれの場合においても、基礎岩盤の支持力が僅少である。

しかり、支持力のとぼしい岩盤は、ダムの安全をおびやかす重大な原因であると考えられる。

のことから、地質調査は、たとえそれが正しく行なわれた場合でも、ダムの全くの安全性を保証するにはほど遠いものである。確かに地質学の述べることは有益な物であるけれども、地質学は本質的に叙述的な科学である。地質学によれば、岩盤の力学的性質について何らくわしい説明が行なわれ得ない。かつて 30 年前、私が若い技術者であったとき、応用地質学の創始者であるスイスの著名な地質学者 Maurice LUGEON 氏に協力して多くのダム地点の調査を行なう機会を得た。

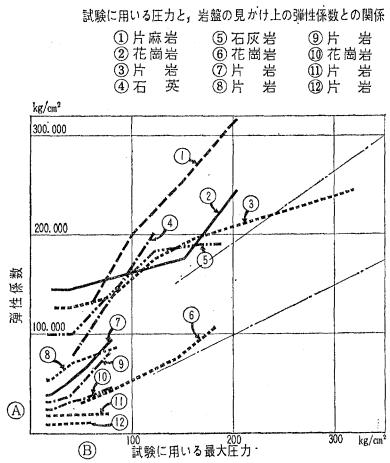
私が、地質学の欠陥についていたいた考えは、長い経験から得られたものである。私は、地質学がかかる非常に簡単な技術問題以外に何も解決しなかったと思っている。この理由で、私は 1940 年以前から新しい工学を手がけるようになった。この工学に、私は岩盤力学という名称を与えた。そして、岩盤の性質については正確で、かつくわしい知識を持つことが最も重要なことであることをみて、岩盤試験はあらゆる場合に不可欠のものといいうことができる。しかし、どんな試験でも良いといいうのではない（図-7）。現在、一般に行なわれている岩盤の弾性係数の測定試験をもって、もはや十分満足すべきものと考えてはいけない。ただ一回の測定で得られる結果は、片寄った結果であることがしばしばある。したがって、得られた測定結果のいくつかは無意味なものと考えられる。さらに、多くの要因が測定結果に大きな影響を与える。これら要因のうち、岩盤内にす

図-7



に存在していた自然応力が最も大きな影響を与える。さらに最後に述べれば、弾性係数は基礎の強さを示す規準とは決してなり得ないのである（図-8）。

図-8



現在、縮尺の岩盤試験によつて、より信頼できる結果が得られるという意見が一般に多い。しかし、この意見の裏付けの理由は妥当なものではない。岩盤のもたらす最大の危険はその不等質性（雑種性）にある。

全体として Malpasset の岩盤は満足すべきものに思われたが、この岩盤の一部に弱い部分があり、破壊はこの弱い部分から発生したのであった。同じことを San Francis ダムについてもいふことができる。破壊はまず断層部分から発生した。IDBAR ダムの基礎岩盤は良好な石灰岩であったが、河床の一部に悪い所があった。このことから平均値の考え方で岩盤を判断することは避けるべきであると結論される。大縮尺試験は費用もかかり時間もかかる。大縮尺試験は、任意に何回も行なうことができない。

また、大縮尺試験は、大ダムの大きさからみればずっと小さいものであるから、実際は大縮尺試験の名に値しないものである。

以上述べたことが、私が、各種の試験を多数行ない、

ダムの推力を受ける範囲の岩盤のできるだけ全体を調査する必要があると主張するゆえんである。もちろんこのような場合に行なう試験は、費用も少なく、短時間でできるものでなければならない。

10 年間にわたって、私はいわゆるタローブル ジャッキを用いてきた。この機械は、簡単で丈夫であり、鋼製の柱と、ジャッキ、および剛体載荷板から構成される（図-9）。載荷板の変位は一組のゲージで測定される。

ジャッキは横

図-9 タローブル式 50t ジャッキ

坑内に設置される。試験は、載荷、除荷をくり返す方法で行なわれ、載荷荷重はサイクルごとに増加していく。そして、4 サイクルないし 5 サイクルの載荷が行なわれ、最大圧力は一般に 100 kg/cm² である（図-10）。

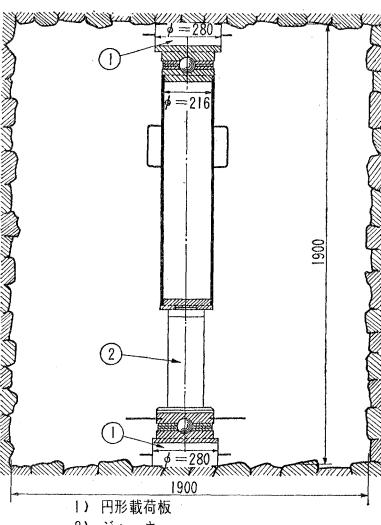
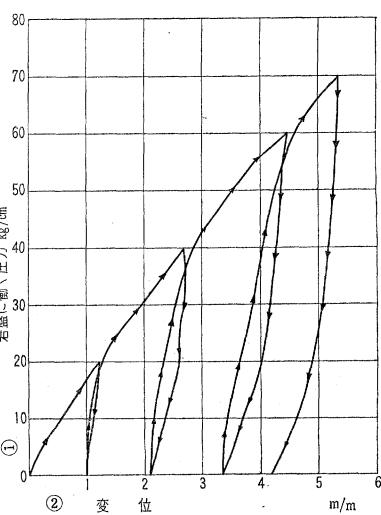


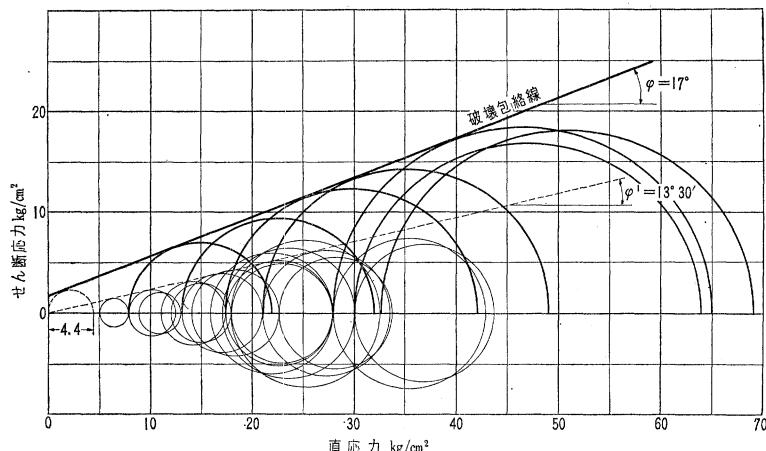
図-10



ジャッキの圧力が変われば、同時に岩盤内の三方向の応力も変化することはいうまでもない。精密なる測定に裏付けられた理論から、モールの破壊包絡線はジャッキ試験からも得られることが証明された。

このモール包絡線から基礎の許容支持力を決めることができ可能となる。ダムの安全率は、岩盤の不可逆変形に対

図-11

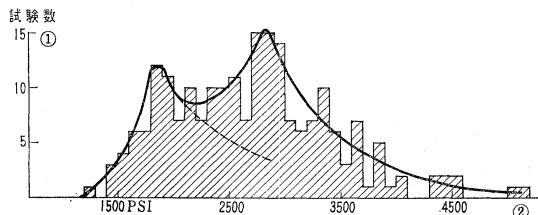


して少なくとも1, 破壊に対して5(全支持力)でなければならない(図-11)。

このような試験方法は、30地点以上のダム基礎に適用され、特にイランのChah Pahlaviダムに適用された。このダムは、高さ203mの薄いアーチダムであった。このダム地点では46点についてジャッキによる圧縮試験が行なわれ、他のダム地点における場合と同様に、いろいろな領域の岩盤についての確率曲線が画かれた。

その一例を図-12に示す。この結果岩盤は2種類の

図-12 無拘束載荷による試験の結果の分布状態



岩盤からなっていることが判明した。安全性をとるために、値の低い方の岩盤の値をもって岩盤の値とした。この場合、平均値を採用することは、冒険的であると思われる。

しかしながら、調査横坑の掘削は、費用がかかり、時間もかかる。試験をより簡単に行ない、あるいは、完成後のダムにおいてすら試験を簡単に行なえるように、ボーリング孔内で試験を行なうことのできる新しい装置を私は製作した。これが、新しい自動式タロープルジャッキである。この装置は膨張可能な金属円筒ジャッキ(写真-3)と、操作盤付記録装置(写真-4)の2つから構成されている。

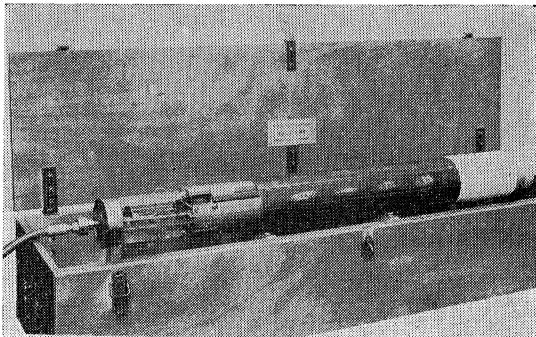
同筒ジャッキは内径115mmのボーリング孔の中の任意の位置に設置できる。ジャッキは200kg/cm²まで昇圧可能で、現場三軸試験を行なうためのものである。

私は最近フランスの道路省関係の仕事である大断面のトンネル現場にこの装置を使った。このトンネルは、フランスとベルギーを結ぶ新しい水路となるものであった。

図-13は、ダムのアバットメントにどのように、三軸試験用ボーリングを行なえばよいかを示すものである。試験の数が増すほど、岩盤の不等質性についてのくわしい知識が得られ、したがってダム破壊の危険性の有無についてのくわしい知識が得られる。統計的手法と試験の対象となる岩盤を検査する過程は、この危険性の大

きさを計るのに大いに役立つものである。この方法を用いることによって、私は、Chah Pahlaviダムの崩壊の

写真-3 自動式タロープルジャッキの円筒形ジャッキ本体



可能性の値を
5/1 000 000と
見積ったこ
とがある。現
在実在する
ダムの数が、
約10 000であ
るのに対し、
毎年ダムの崩
壊事故が発生
していること
から見れば、
上記の確率
値は非常に小
さいもので
ある。 Chah
Pahlaviダム
は岩盤試験終
了の後2年を
待たずして完

写真-4 自動式タローグルジャッキの操作盤

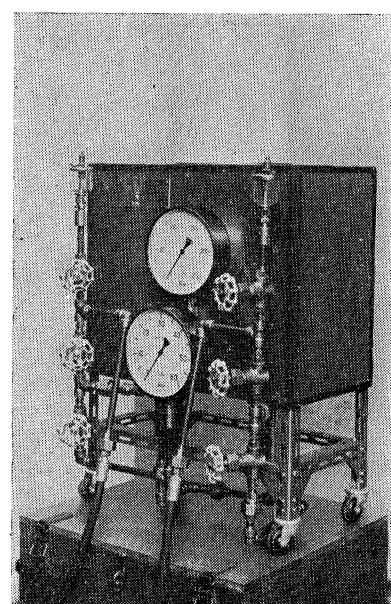
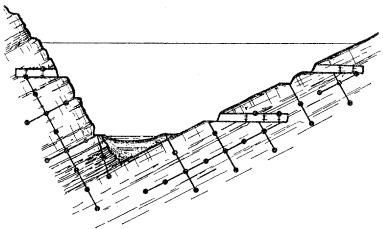


図-13 ダム建設地点における岩盤試験用ボーリング孔の配置



成し、ただちに貯水状態に入った。このことは、岩盤力学的に正確に行なわれた調査は常に非常に役に立つものであることを裏書きするものである。たとえ、ダム基礎岩盤の力学的強度が大であることが非常に大切なことであったとしても、このことがダムの安全性に対する唯一の鍵であることにはならない。ダムの安定性は、あらゆる点からみた総合的なものから判断されねばならない。

一般にダムというものは正確に設計され、慎重に施工される。しかしながらそれでも不完全な事態が発生することがある。実際、多くのダムにおいてクラックの発生が面倒な事態をひき起こす大きな原因となっている。コルシカにある某ダムの場合などにおいては、重大なクラックが発生したためにせっかく建設したダムを放棄せねばならなくなってしまった。

明らかにクラックは予測しなかった引張応力によって発生する。便利的な方法では、当然予測されねばならない正確なダムの内部応力状態を予測することができない。圧縮応力の値の予測に間違いがある以上、それはめったに大した結果を呼ばないが、もし、引張応力が予測したものより大きなものであると、事態は楽觀を許さなくなる。いったんクラックが発生すれば、ダムの力学的

つりあい状態は突然変化することになる。このような応力推定の間違いはいくつかの原因によってひき起こされる。ダムおよび基礎の変形は、いずれも弾性的でもなければ等方等質的でもない。また、コンクリートの収縮や膨張は、温度および含水量によって支配される。クリープは応力の大きさと継続時間に支配される。その他いろいろ応力推定を間違わせる要因がある。

ダムの安定性の解析を大幅に改良するために、私はダムの応力の全く新しい計算方法を確立した。この方法は三次元的かつ厳密なものである。この計算方法には、時間、水位の変動、揚圧力、温度変化、コンクリートおよび岩盤のクリープ、その他の要因の影響が含まれている。成功に到る唯一の道は、適切なデータを利用することにある。ダムの性質に関する、あるいはいろいろな要因の影響に関する必要な知識は、数多くの正確な測定によってのみ得られるものである。

結論として、コンクリートダムの安全性は画期的に改善されたといえよう。ただしこれが実際完全に行なわれるには、岩盤の性質を測定するための最も効果的装置を用い、正しく岩盤力学の問題に適用し、ダム解析の最も近代的手法を用いた場合に限る。いかなる場合にも仕事の各段階の質の向上が最も大切なことである。特にわれわれは、測定はそれが正しく行なわれ、その結果が正しく用いられないときは全く価値のないものになるということを銘記する必要がある。貧弱な設計、および貧弱な施工は、いかなる場合にも好ましからざる事態をまねき、将来の過恨を残す原因となる。

(電源開発 KK 進藤一夫・訳)

書評

インドにおける第2回地震工学シンポジウム報告

ルーキー大学(インド)

ど応用地震学の問題が述べられ、その他実験用振動台や振動測定器の試作設計などが紹介されている。構造物の振動解析の部門では、アメリカ、日本の二教授がそれぞれ、高いビルの振動応力計算設計ビルの地震応答、アナログ計算を紹介しており、また、高層フレームやアーチ、レンガ積などの各種構造物の振動が論ぜられている。地震地帯における地質学の問題では、ダムその他水力地點における断層についての地震活動性を論じ、設計震度を想定することを述べている。

インドにおいて地震工学が注目され始めてからわずか数年、研究者、研究施設の規模が次第に拡大され研究報告がこのようにインド人自身により多数発表されるようになったことは、きわめて大きな進歩といえよう。今のところアースダムをふくめた水力構造物についての関心が最も大きいように見えるが、住宅その他各方面の構造物に対する関心も次第に大きくなることが期待される。要するに本報告によってインドにおける地震工学の現状がよく理解され得るであろう。

(電力中央研究所 畑野 正・記)

インドでは、近年アッサムその他の地震地帯に大規模な土木構造物が建設されるようになり、地震工学が重要な分野であるとして、ルーキー大学に初めて土木構造物の動的な研究の部門がもたらされ、1959年には第1回の地震工学シンポジウムが開かれるに至った。その後、1960年同大学に地震工学の研究と訓練の学校が設けられ、地震工学に対する関心もさらに大となって、1962年第2回のシンポジウムが開かれた。ここに紹介するのはこの第2回シンポジウムの報告である。

出席者の数は約100人および、ダムの耐震設計、土の動的性質、地震学および振動測定、構造物の振動解析、地震地帯における地質学の問題の5部会にわかれ、全部で41編の論文が集められている。

ダムの耐震設計では主としてアースダムの耐震安定や動水圧の問題が論ぜられているが、主として従来知られた諸研究を実用的な形に解説したものが多い。土の動的性質では、動土圧の問題をも含めた解説的なものと、土の粘弹性や振動時の飽和土の安定など基本的な研究をも含んでいる。地震学および振動測定ではインドにおける地震学一般の紹介や震度分布の調査地盤の卓越周期な