

耐震構造の話

On the Earthquake Resistant Structures

岡 本 舜 三*

Shunzo OKAMOTO

耐震構造設計にあたって、第1には考慮すべき地震の強度および波形、第2には構造物の振動特性、第3には構造物の応答振動が明らかになる必要があり、その各事項について説明した。なお耐震設計においては単にその構造物の問題だけでなく、それが作られたことによる環境の変化が関連地域の地震時安定に及ぼす影響をもつことも慎重に考えなければならないことも述べた。本文は本年度当研究所公開にあたって一般来訪者に対して講演したものである。

日本は地震の多い国である。実際におきた大地震とその全半壊家屋数を戦後のものだけについてあげてみても

昭和21年12月21日	南海地震	28,274戸
昭和23年6月28日	福井地震	46,869戸
昭和27年3月4日	十勝沖地震	2,139戸
昭和35年5月24日	チリ地震津波	3,764戸
昭和39年6月16日	新潟地震	8,600戸
昭和43年5月16日	十勝沖地震	3,670戸

など、5指以上のものがある。しかるに、日本国民のいう盛なる活動力は、このような地震国であるにかかわらずきわめて大規模なる国土建設を要請し、巨大なる構造物が続々と建造されている。高さ147mの霞ヶ関ビルはその一つの象徴である。しかしこの地震の多い国にこのような巨大な構造物が作られる背後には当然これを支える耐震構造学の発達が必要ではない。日本の構造工学者が耐震工学に深い関心を示すのは、当然のことである。

霞ヶ関ビルが耐震設計になっていることは、既によく知られているのでここにはダムの耐震設計について紹介したいと思う。ダムは一般に山奥にあるので、われわれになじみが薄い、万一地震でこれがこわれるようなことがあれば、その及ぼす災害は恐るべきものがあるので、その耐震設計は、きわめて慎重に行なわれている。

耐震設計は、まずダムを作ろうとする場所にはどの程度の地震を想定してダムを設計したら良いかを考えることから始まる。これを計画地震というが、これをきめるために過去においてどの程度の地震がおきたであろうかが調査される。これは過去に地震の多かった所は、将来も多いであろうという考えに基づいている。幸に日本には古い記録がよく保存されているので、過去にいつ、どこを震源として、どの位のマグニチュードの地震がおきたかということがわかっており、それがわかるとあとは計算によってダム建設地点において、いつ、どの位の強さの地震がおきたかということを知ることができる。

(表紙、表紙解説および図1、図2参照)

〔注〕 たとえば

$$\log_{10} A_m = M - 1.73 \log_{10} d + 0.83$$

A_m : 地震動最大振幅 (μ)

M : マグニチュード

d : 震央距離 (km)

また、耐震設計には地震の強さだけでなく波形がどんなであったかということも大きな影響をもっている。ちょっと見ると地震動の波形は地震ごとに千差万別であるように思うが、よく調べてみると、地震の発生する場所や、そこからダム地点までの道すじが波形に影響しているように見える。それゆえ、たとえば鬼怒川にダムを作るのであれば鬼怒川に強い地震をおこすような地震の主な発生場所である茨城あるいは福島沖とか茨城県南西部とか千葉県中部とか相模あるいは房総沖のような地点の地震の波形の特性を知り、それを設計に取り入れなければならないのである。残念ながらまだこういう調査はわずかしかできていない。それで今は、たとえ鬼怒川地点の計画であってもアメリカの地震記録や、万国共通に抽象的に作られた地震波形などが設計に用いられているが、それは元来はおかしいのであって、鬼怒川に影響を及ぼす地震だけが今の場合は当然問題にされるべきである。(図3参照)

このようにして建設地点の地震事情についての自然的条件が明らかにされた後に、構造物が被災した場合の損失を考慮して、計画の対象とすべき地震がきまる。被災した場合の損失の評価は、人命の問題や人間の社会的活動の問題等が含まれているために非常に難しいが、計画すべき地震の大きさをきめるにはこの困難な問題を解決しなければならない。これについてはこれまでに若干の研究が行なわれている。

〔注〕 たとえば

$$T = \frac{1 + \frac{r}{q}}{\frac{p}{q} - f}$$

f : 年間に廃棄される構造物の数の構造物の総数に対

* 東京大学生産技術研究所 第1部

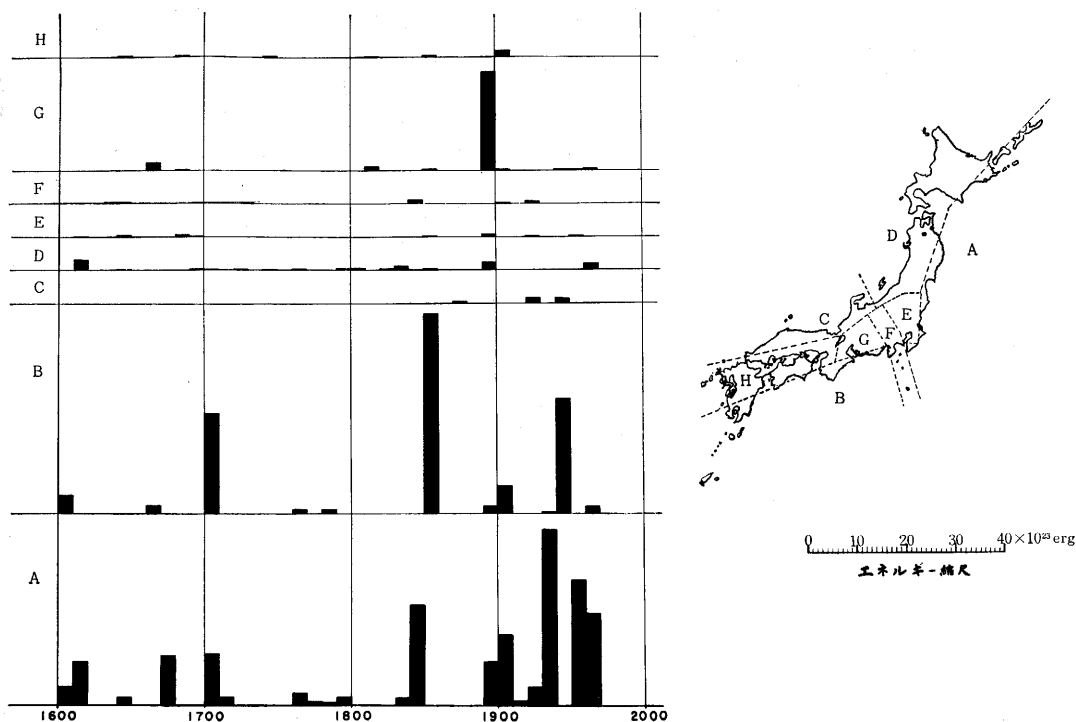


図1 地域別地震発生年表

震央は日本列島の上には分布していない。それでこの図には日本列島をいくつかの地区に分けて、各地区ごとに年代順に、どんな具合にエネルギーの放出が行なわれているかを示した。ただしここにことわっておかねばならないことは、各地域の境界は便宜的にきめたもので物理的意味はないことである。これで見ると各地区はそれぞれ数十年位の間隔で大量のエネルギーを放出していることがわかるが、このようなことからダム地点に影響を与える地震が将来いつ、どこでおきるのかを推測しようと試みるのである。

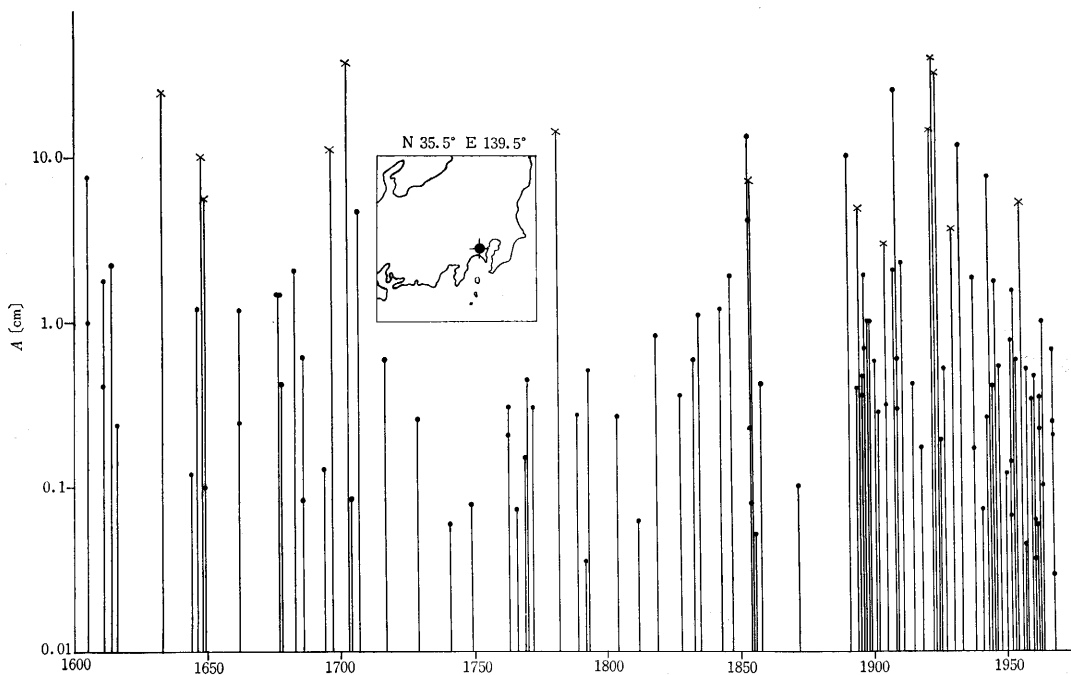


図2 各地地震年表

過去におきた地震のマグニチュードと震央位置がわかるとそれから日本国内の各地にその地震がどの程度の震度の地震をおこしたかを計算することができる。こうして計算された地震の強さを年代順に示したのが図である。このような図が全国を網の目のように刻んで各々の交点に対して作られているが、ここに示したのは東京の例である。東京については大地震69年説があるが、この図をみるとそれが全くの杞憂ではないように思われる。

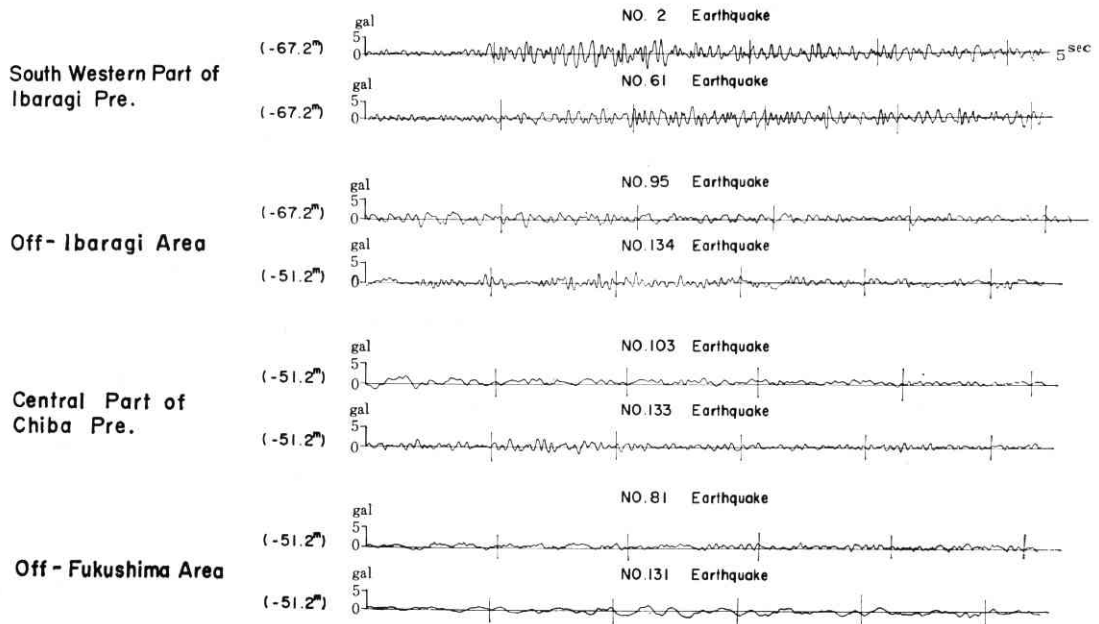


図3 震源別地震記録

図には茨城南西部、茨城沖、千葉県中部、福島沖でおきた地震の鬼怒川発電所の堅坑の底における観測記録をそれぞれ2個ずつ並べてある。震央を同じくするもの同士地震波形は互に似ており、震央を異にするもの同士の波形の間には若干の差異があるように思われる。このようにその土地に影響をもつ地震の波形特性を把握して耐震設計を行なうべきである。

- する比率
 q : 構造物を1個作るに要する1カ
 年当り事業費
 p : 構造物を作ったために生ずる純
 益
 r : 構造物が被災したことによる年
 間間接損害
 T : 耐用年限

次にダム設計上重要なことは、ダムが地震をうけた時どう動くかということである。とくにアーチダムのような背が高く薄い構造では地震の時のゆれ方がよくわかることが絶対に必要である。アーチダムは経済上多くの利点をもつので、外国ではすでに今世紀のはじめころから作られているのに、わが国では昭和30年まで作られなかったのは、地震の関係がよくわからなかったからである。それが高さ110mの上椎葉ダムを作るときになって、耐震に関する種々の基礎研究が行なわれた。そして安全なものを作りうるという自信が得られたので、この大アーチダムの建造にふみ切ることになり、それは着工3年後に見事に竣工したのである。でき上がったダムについてもいろいろと測定が行なわれた結果、その耐震性についての自信がさらに深められて、そ

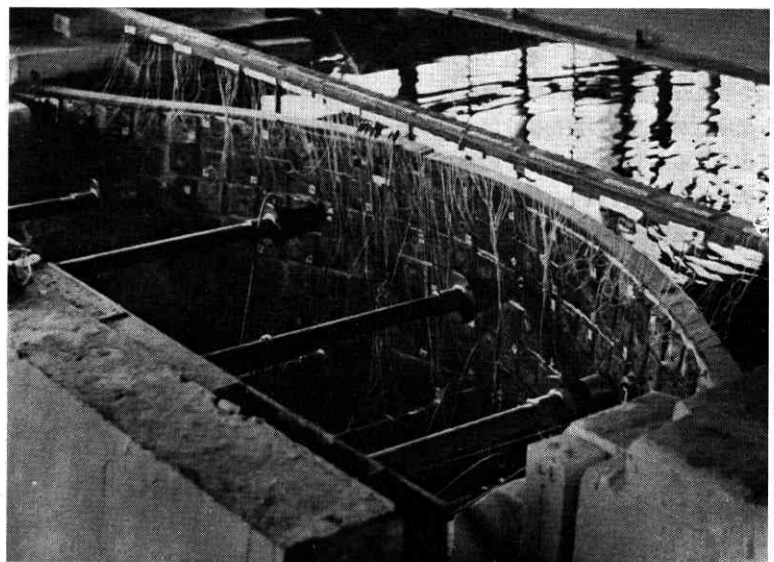


図4 生研式アーチダム模型振動試験装置

模型は高さ1.0m、地震力は模型背後の棒を通じて電磁的に加えられる。模型に生ずるひずみは電気抵抗線ひずみ計で測定される。堤体に鉛鉋がはりつけてあるのは相似率を満足させるためである。

の後は、相ついで多くのアーチダムが作られた。昭和38年にはよく知られている高さ180mの黒部ダムが黒部峡谷に、また本年には高さ150mの奈川渡ダムが梓川に竣工を見るに至ったのである。

現在の最も進んだ耐震設計法の基本的な手法は、地盤の振動がわかっているときに、ダムがどういうゆれ方を

するかをあらかじめ計算して、それに耐えるような強さに構造物の断面をきめることである。地震をうけてダムがどうゆれるかを計算するためには、ダムを自由振動させた時の性能がわかっていなければならないが、この性能をダムの振動特性とよんでいる。そして、この振動特性と、地盤の振動とが与えられるなら、振動理論を用いればその地震をうけた時にダムがどうゆれるかを計算することができるのであって、最近の電子計算機の進歩はこの計算を著しく容易なものにしたのである。

それでは振動特性はどうすればわかるかという、これは一般には、応用力学を用いて計算でわかるのであるが、ダムのように形が不規則な曲面をなし、その周辺が自然の岩盤で囲まれ、しかもその前面には水がたまっているというような複雑なものについては計算が非常にむづかしい。むづかしくてもやらなくてはならないので、そういう計算方法の開発が試みられている一方、また模型実験を併用して、この問題を解決しようとする試みもなされている。とにかく、どちらの方法にせよ振動特性がわかったならば、地震時の振動状態を明らかにすることができ、それに基づいて設計を合理的に進めることができるのである。(図4, 5参照)

地震動をうけて構造物がゆれる時に、構造物の最も大きなゆれが工学的には一番問題である、それで今地震を与えた場合に、構造物の最も大きなゆれが構造物の振動特性によってどうなるかを示したものを応答スペクトルとよんでおり、応答スペクトルが構造物耐震設計のもとになっている。したがって、応答スペクトルは地震によって違うわけで、ダムの設計には、その場所に最もおこりやすい波形が用いられる。しかし実際にはゆれの最大値だけでは不十分である。たとえ大きなゆれでも唯一回ならあまり問題ないが、何回も繰返すと構造物に障害を与えることはよく知られている。そして、ある程度以上の大きさのゆれが何回繰返しておこったかということも大切であって、そういう意味の応答スペクトルも作られている。(図6参照)

(注) 自由度1の弾性構造物では

$$S_v = \left[\int_0^t \alpha e^{-n(t-\tau)} \sin p(t-\tau) d\tau \right]_{\max}$$

S_v : 速度応答

t : 時間

α : 地盤の地震加速度

n : 振動減衰に関する係数

p : 構造物の円振動数

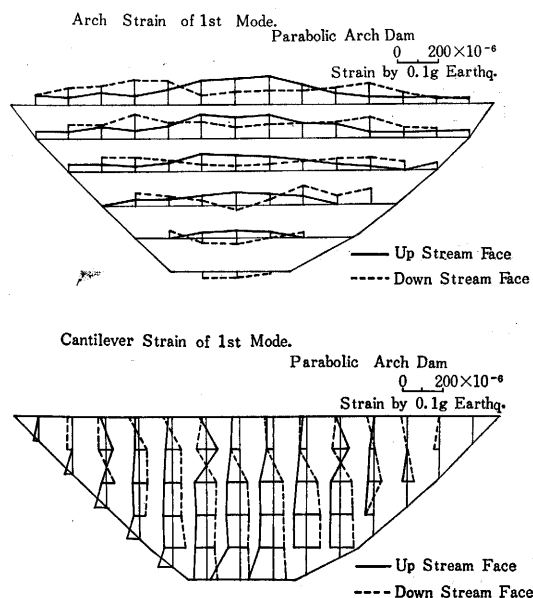


図5 振動ひずみの分布

模型試験によって観測された水平方向及び鉛直方向の縦ひずみを示している。これによると水平方向ひずみは堤頂部において大きく、鉛直方向のひずみは上流面の低部において大きい。なお堤体全面について膜応力が生じていることが注目される。

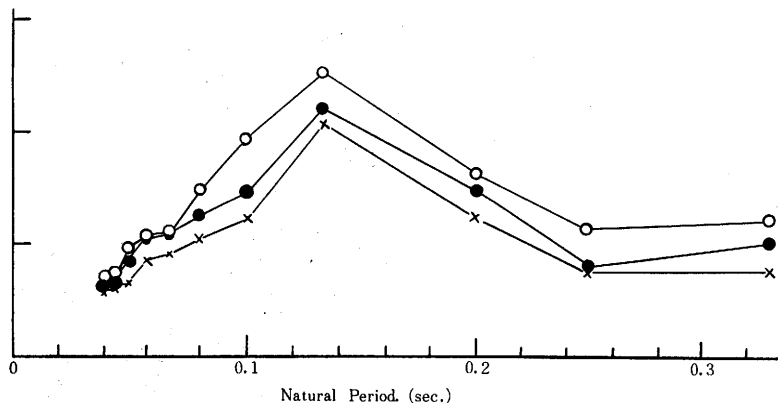


図6 速度応答スペクトル

岩盤地域で記録された地震の速度応答スペクトルである。白丸は最大ピーク値、黒丸は第2ピーク値、×は第3ピーク値をそれぞれ示している。この速度応答スペクトルは沖積層地盤でとられた地震記録による速度応答スペクトルとはかなり異なった様子を示している。

こうしてでき上がったダムについては、実際に予期したようなゆれかただったかどうかを調べて、その安全性を確認するとともに将来の研究資料の収集につとめるのである。今日では重要なダムには大抵多数の地震計が設置されており、貴重な資料が漸次たくわえられつつある。たくわえられた資料は、決して死蔵されているのではなく、ダムの形の改良の研究に使われている。アーチダムの平面形が丸い方がよいのか、拋物線形の方がよいのか、うしろへのそりはどれ位がよいのか、そういう問題の検討に対して、ダムの地震時挙動は岩盤の耐力とともに主要な要素をなしており、実際の地震動記録はその判定の

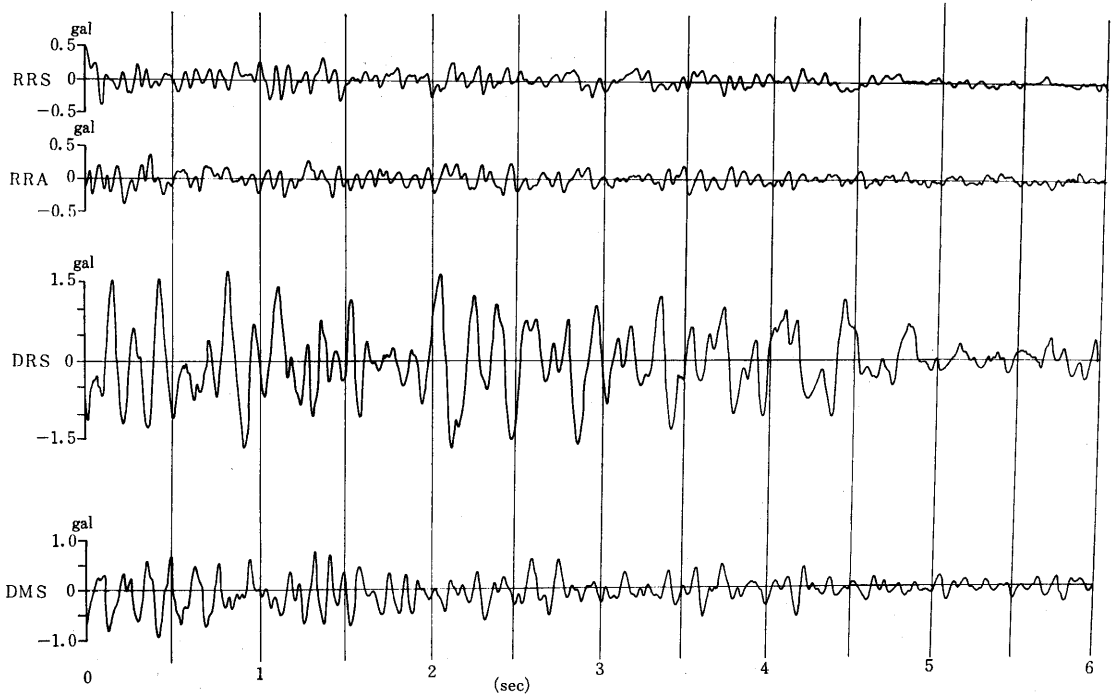


図7 黒部ダムにはダム上及び岩盤の内部に多数の地震計が置いてある。図は松代地震による加速度記録である。

DRS: ダム頂中央部河流行方向, DMS: ダム中腹中央部河流行方向, RRS: 右岸岩盤河流行方向, RRA: 右岸岩盤河流行直交方向
図から堤頂部は岩盤部にくらべて約4倍の動きを示していることが知られる。堤体に対するこのような震力分布は堤体設計や堤頂にとりつけられる水門等の設計に考慮される。

際の貴重なデータとなる。(図7参照)

これまで、おもに堤体について述べたが、ダムの地震時安定の問題は他にも重要な問題がある。一つは岩盤の耐力の問題であり、他の一つは貯水池の山腹崩壊の問題である。アーチダムにおいては、強い水圧を支えているのは谷の両側の岩であるから、この岩の耐力が十分でないと、ダムは安定を保ち得ない。岩は通常かたいものと思われているが、実際の山の岩は風化が進んでいたり、小さい亀裂があったりして、思ったほど堅くない場合が多いし、なおその他に、山の斜面には局部的な断層や大きな亀裂があるので、その耐力の検討はダム工学においては最も重要な問題となっている。さらに地震時には岩の間の亀裂にはさまれている粘土が振動をうけて強度を失う場合もあり、問題は一層複雑になる。

先にのべた模型による応力解析はこうした山のもつ複雑性を模型に再現することをおもなねらいとして考えられたもので、もし堤体振動だけがねらいならば、もっと小さな模型でも良いかも知れないのである。岩盤内の応力解析はこのほか最近急速に発達した有限要素法を使っても行なわれるが、こうした解析の結果、必要ならばしばしば山の耐力の改善が施される。セメントの注入とか、鋼棒でプレストレスをかける等の方法が実際に行なわれているが、大地震の時にこれらの補強処置がどんな影響

をうけるであろうかという問題は今後当然研究しなくてはならないことである。

次に貯水池の斜面が大崩壊をきたす問題は1963年のイタリアのバイオントダムの事件以来非常に注目をひき、日本ではとくに地震国であることを考えて、それは入念に調査されている。貯水地点では今まで水がなかった所に高さ100mをこえるような水深の池ができるのであるから地下水位の状態が大きく変わる。このために、小さい地すべりがおきるのは一般にさけ難いが、これは被害が局部的で対策も容易である。しかし、バイオントのようになると大変である。バイオントの場合は3000万 m^3 の土が貯水池内にすべり込み、あふれ出た水はダムをこえて下流ロンガローネの町に突然流下した。このためピアベ川沿川で2125人の死者を出したのである。これは地震が原因ではないが、地震国たる日本ではこれを他山の石として、十分の要心をしているのである。

以上ダムを例にあげて耐震構造の考え方の筋道を説明したが、ほとんど同じ考え方で橋梁でも建築でも処理されている。しかし構造物の耐震設計をその地震時の挙動に即して行なうようになったのはまだきわめて最近のことで、そこには幾多の未解決の問題が残されており、これを一步一步ときほぐしていくのがこれからの耐震構造学の仕事である。

(1969年5月30日受理)