

生研式アーチダム振動模型実験

“Seiken-shiki” Vibration Model Test of Arch Dams

岡 本 舜 三・田 村 重 四 郎・加 藤 勝 行

Shunzo OKAMOTO, Choshiro TAMURA and Katsuyuki KATO

1. 概 要

アーチダムの応力分布に対しては、これを支持する地山の条件が大きな影響をもつ。地山の条件とは地盤の形状、構造、性質に関するものであり、一般にははなはしく複雑である。これを数理的モデルに再現することも、実物モデルに再現することもそれぞれに困難を持っているが、2個の方法はそれぞれに特長をもち互に欠点を補うものである。したがって数理的モデルによる解析の著しい進歩にもかかわらず、実物モデルによる試験はますますその有用性を増しつつある。

模型による構造物の耐震試験において最も普通に行なわれる方法は、振動台上に模型を据えて振動台を正弦波状に、あるいは地震波状に振動させることである。建築、橋脚、重力ダム、フィルタイプダムについてはこの方法が一般に使われている。アーチダムに対してこの方法を用いる場合には地山模型をも振動台上に据えなければならぬが、地山部分が非常に重いことがこの実験に対して大きな困難を課している。

すなわち振動台容量は著しく大きなものが要請され、一方またダムの縮尺は小さくなり、その結果としてダム模型の固有振動周期が非常に短くなる。大容量振動台を高振動数で振動させることは非常にむずかしいことである。地山を振動台にのせないで、ダムの耐震試験をする方法が東大生研において開発された。この方法では、地盤上にある構造物の地盤振動による応力は、地盤を静止させ、構造物に地盤振動による慣性力を加えた状態での構造物の振動応力に等しいという力学的原理に基礎をおいている。

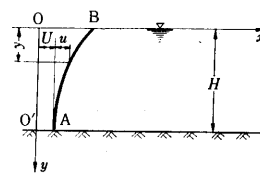
提体質量に対してこの方法を用いることは比較的簡単であるが、貯水に対しては特別の配慮が必要である。貯水についての他の困難として、動水圧の測定技術がある。動水圧の測定は固体のひずみを測るよりは一般にむずかしいが、とくに振動的な動水圧においては振動数の高いものほど測定しにくくなる。普通の模型振動試験では振動数は一般に数 10 サイクルを超えるので、動水圧を直接に測ることはかなりむずかしいことである。

この方法では動水圧による提体応力の測定は2段階の手段を経て行なわれる。第1段階ではダムを変形しないものとした場合の地震動による動水圧を測定する。ダムは変形しないものと仮定されているために、地山の影響もダムの振動性も考える必要はない。したがって試験は

小型の軽い模型を用いて、しかも動水圧を測ることが可能な程度のおそい振動のもとに行なうことができる。

こうして測定された動水圧は、第2の模型ダムに対して提体慣性力とともに電磁力として与えられる。この模型ダムは提体慣性力と今述べた動水圧とを電磁的力としてうけた状態において振動する。そのときダムが変形することによって生ずる提体慣性力と貯水の影響が新しく加わるので、提体に生ずる応力は地震時におけるダムの応力を再現することになる。第2の模型試験による動水圧を正確に測ることはむずかしいかも知れないが、われわれの必要とするダムの応力の方は正確に測ることができる。もし高振動数の動水圧が測れるようになれば、第1段階の振動実験の振動数を第2段階のそれと同調させ、第1段階で実測されている動水圧を必要な大きさに増幅して直接に第2の模型ダムの加振器に加え、両者を連動させることもできるであろう。

2. 湛水時のダムの振動の基礎理論



簡単のためにダムのかわりに片持梁を考え、地震動は調和振動であるとする。振動を2次元運動と考え直角座標 x, y をとる。梁の常時水圧下の位置を OO'

とし、地震によって変位した位置を AB とする。このうち U は地盤の変位であり、 u は梁の地盤に対する相対変位である。梁の運動方程式は

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 (U+u)}{\partial t^2} = -p$$

ここに、 EI : 梁のまげ剛度 m : 梁の単位長当たり質量 p : 動水圧 (圧力を正とす)

$$\therefore EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - p \quad (1)$$

地動を加速度振幅 α 、変位振幅 U_0 、円振動数 ω なる単弦振動とすると

$$U = U_0 \cos \omega t = \frac{\alpha}{\omega^2} \cos \omega t \quad (2)$$

よって (1) 式は、

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = m\alpha \cos \omega t - p \quad (3)$$

一方貯水池内における水の運動は非圧縮性流体として取り扱えらるとすれば、

$$\xi = \partial\phi/\partial x, \quad \eta = \partial\phi/\partial y \quad (4)$$

ここに ξ, η : 水の速度の座標軸方向の成分
 ϕ は速度 potential であって次式を満足する.

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

水の振動に対する運動方程式は、 γ を貯水の単位体積当たり重量として次のようになる.

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\therefore p = -\frac{\gamma}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (6)$$

境界条件は次の 4 個である.

$$x = \infty \text{ にて } \phi = 0 \quad (7)$$

$$y = 0 \text{ にて } \partial\phi/\partial t = 0 \quad (8)$$

$$y = H \text{ にて } \partial\phi/\partial y = 0 \quad (9)$$

$$x = 0 \text{ にて } \frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10)$$

問題が線形であることを考慮して ϕ を 2 個の potential にわけ

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (11)$$

とおく. ϕ_1, ϕ_2 は

$$\frac{\partial^2\phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi_1}{\partial y^2} = 0 \quad \frac{\partial^2\phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi_2}{\partial y^2} = 0 \quad (12)$$

を満足する. ϕ_1 は境界条件 (7)(8)(9) と

$$x = 0 \text{ にて } \partial\phi_1/\partial x = \partial U/\partial t \quad (13)$$

を満足し, ϕ_2 は (7)(8)(9) と

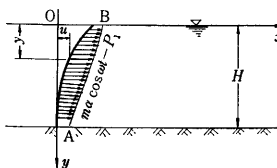
$$x = 0 \text{ にて } \partial\phi_2/\partial x = \partial u/\partial t \quad (14)$$

を満足する.

いま ϕ_1 , したがってまた, それによる動水圧 p_1 が解析的あるいは実験的に得られたとすると (3) 式は

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (m\alpha \cos \omega t - p_1) - p_2 \quad (15)$$

p_2 は ϕ_2 による動水圧である. (15) 式を実験的にとくには A 端を固定した梁 AB に $m\alpha \cos \omega t - p_1$ なる動荷重を外部から与えた状態において梁を振動せしめる.



このとき貯水が梁に及ぼす動水圧は p_2 である. なぜなら ϕ_2 に対して境界条件 (7)(8)(9) と (14) とが満足されているからである.

3. 実験方法

実験は 2 段階に分けて行なわれる. 第 1 段階は p_1 に

関するものであり, 第 2 段階は p_2 に関するものである.

(第 1 実験) 小型振動台上に木製の貯水池およびダム壁模型を作り池に水をためる. これを数 cps 程度のおそい振動数で比較的大きな振幅で正弦波状に振動させる. 池には当然静振現象が見られるであろうが, 現在の目的からは静振現象はさけることが望ましい. そのためには, 池の対岸部に適当な消波装置をおいて反射波を消す工夫が必要である. この実験において, ダム壁上各部の動水圧と, 振動台の加速度と, ダムの縮尺とが記録にとめられなければならない.

(第 2 実験) 石膏珪藻土を用いてダムと地盤の模型を作り, ダム前面に液体をためる. ダム模型が大きいため貯水池の模型を再現することはとてもできないが, なるべく広い水槽で十分な消波装置が必要である. 液体の比重は後節でのべるように, 模型ダム材料/コンクリートなる比重, すなわち水より若干軽いものであることが必要である. 加振器を通じて電磁力を加える. 各加振器に加える力は提体の質量分布と, 第 1 実験によって測定された動水圧分布を考慮して決定される. 加振器の数はできるだけ多い方がよく, 1 個当たりでうけもつ提体質量が同じになるように配置するのが便利である.

この場合に生ずるダムのひずみと変位が測定される.

貯水用液体として水以外の液体を用いることは実際には困難が多い. したがって所定の条件を満足しないことになるが, これをさけるには模型材料の比重を高めればよい. それには鋼粒を石膏珪藻土にまぜるといような方法で弾性係数をあげないで比重をます工夫が必要である.

4. 相 似 則

ダムの地震応力を求める上記の方法では提体に作用する力は次の 4 種の力の重畳と考えられる.

- 1) 提体に変形せぬとしたときの地動による慣性力 (剛体慣性力)
- 2) 提体に変形せぬとしたときの貯水の及ぼす動水圧 (剛体動水圧)
- 3) 地盤に対する提体の相対変位による慣性力 (変形慣性力)
- 4) 地盤に対する提体の相対変位による動水圧 (変形動水圧)

ここに提体の変形は上記 4 種の合力によってひきおこされた変形である.

第 1 実験において剛体動水圧は地動加速度係数, 貯水比重, 水深に比例すると考えられるから次の相似則がなりたつ.

$$\frac{p'_m}{p_p} = \frac{k'_m \gamma'_m H'_m}{k_p \gamma_p H_p}$$

研 究 速 報

$$\therefore p_p = p_{m'} \cdot \frac{k_p}{k_{m'}} \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_{m'}} \cdot \frac{H_p}{H_{m'}} \quad (16)$$

記号の説明は末尾に一括して示してある。模型貯水に水を用いるときは

$$p_p = p_{m'} \cdot \frac{k_p}{k_{m'}} \cdot \frac{H_p}{H_{m'}} \quad (17)$$

となる。

第2実験においては模型上で測られたひずみがそのまま実物のひずみをあらわすようにする。模型の縮尺を λ とする。

$$H_m/H_p = \lambda \quad (18)$$

提体の地動に対する相対変位は各部分のひずみによっておこっているものであるから

$$u_m = \lambda u_p \quad (19)$$

模型と実物のポアソン比が同一であると仮定する。

$$\begin{aligned} \sigma_m/E_m &= \sigma_p/E_p \\ \sigma_m/\sigma_p &= E_m/E_p \end{aligned} \quad (20)$$

提体内部の応力が (20) 式に示す比になるためには提体上に作用する4個の力の単位面積当たりの大きさの比が (20) 式と同じ値にならねばならない。変形慣性力は $\omega D \frac{u}{t^2}$ であるから相似則は

$$\begin{aligned} \frac{\omega_m D_m \frac{u_m}{t_m^2}}{\omega_p D_p \frac{u_p}{t_p^2}} &= \frac{E_m}{E_p} \\ \therefore \frac{t_m}{t_p} &= \frac{D_m}{D_p} \sqrt{\frac{\omega_m \cdot E_p}{\omega_p \cdot E_m}} = \tau \quad (\text{とおく}) \end{aligned} \quad (21)$$

一方ダム固有振動周期は $D\sqrt{\omega/E}$ に比例するから、もし模型と実物の間の時間の縮尺を

$$t_m/t_p = \tau \quad (22)$$

と定めれば固有振動周期についても相似性が保たれる。

変形動水圧は $\gamma H \frac{u}{t^2}$ に比例すると考えられるから、

$$\frac{p_m}{p_p} = \frac{\partial_m H_m \frac{u_m}{t_m^2}}{\partial_p H_p \frac{u_p}{t_p^2}} = \frac{E_m}{E_p}$$

がなりたつためには

$$\gamma_m/\gamma_p = \omega_m/\omega_p \quad (23)$$

でなければならない。よって模型貯水の比重はこの関係が満されるように選ばなければならない。

剛体慣性力は加振器を通じて、電磁力として加えられる。模型単位面積当たりに加えられる電磁力を F とすると

$$F = k_m \omega_m D_m$$

ゆえに電磁力 F を加えていることは地動加速度係数

$$k_m = F/\omega_m D_m \quad (24)$$

を加えていることに等しい。これに対する実物の地動加

速度係数は

$$F/k_p \omega_p D_p = E_m/E_p$$

なる関係より次のように定められる。

$$k_p = \frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{F}{\omega_p D_p} = \frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{\omega_m D_m}{\omega_p D_p} \cdot \frac{F}{\omega_m D_m} = \frac{\tau^2}{\lambda} \frac{F}{\omega_m D_m} \quad (25)$$

加振器が F を均等に受けもつように配置されているときは $F/\omega_m D_m$ は F の合力を提体全重量で除すことによって容易に求められる。剛体動水圧も電磁的に加振器を通じて加えられる。実物の地動加速度係数が (25) 式によって与えられればこれに対する剛体動水圧は (16) 式によって第1実験の実測値から算出される。

かくして求められた実物に対する剛体動水圧を p_p とすると模型に加わべき電磁力は単位面積当たり次式で示される。

$$-p_m = -\frac{E_m}{E_p} p_p \quad (26)$$

このとき模型ダムの上で測られる動水圧の E_p/E_m 倍が実物ダムの変形動水圧であり、真の動水圧はこれに p_p を加算して得られる。また模型ダム上で測られるひずみはそのまま実物のひずみを示し模型ダムの変位の方が実物ダムの相対変位を与えている。以上の議論は正弦波状をなす地震波動について行なわれたが、任意の波形は異なった振動数をもつ多くの成分正弦波の重畳と考えられるから、上記の模型試験法はそのまま任意波形の地震動に適用することができる。

記 号 説 明

- t : 正弦振動の振動周期
- p : 動水圧
- θ : 貯水単位体積当り重量
- w : 提体単位体積当り重量
- H : 提高
- σ : 部材応力
- E : 提体材料弾性係数
- D : 提体厚
- k : 地盤の地震動加速度/重力加速度

第1実験の模型に関する量には脚付号 m を付し肩にダッシュを付し、第2実験の模型に関する量には脚付号 m を付し、実物ダムに関するものには脚付号 p を付した。一般的議論においてはとくに脚付号を付さない。

(1967年9月11日受理)

