

電磁力加振方式によるアーチダム模型 振動試験方法について

DYNAMIC MODEL TEST OF ARCH DAM USING ELECTROMAGNETIC EXCITING METHOD

岡本 舜三*・加藤 勝行**・小野 公一郎**
By Shinzo Okamoto, Katsuyuki Kato and Kōichiro Ono

1. 序

動水圧をも考慮したアーチダムの地震時応力を評価する研究はこれまで小坪博士、畑野博士らによって行なわれている。小坪博士はダムを剛体とし、貯水の圧縮性を考慮して解析的研究を行なった¹⁾。畑野博士は貯水池の実情を考えると貯水の弾性は考慮する必要はないとし、貯水を非圧縮性流体、ダムを可撓性構造物としてこの問題を数値解析した。しかしこの際ダムの地震時変形は仮定によって定められている²⁾。ダムの変形を実体に即して考慮することは、いまだなされておらず、実験的にせよ、解析的にせよ、その解決が望まれているのであるが、本研究は模型実験によってこの問題の解決を試みたものである。

模型による振動試験は通常はモデルを振動台にのせて振動を与える方法で行なわれる。しかしアーチダムの場合は基礎地山を再現する必要があるため、モデルは重さが重くなり、振動台上にのせて比較的高振動数で振動実験を行なうには適当でない。貯水を考える場合はなおさらである。

この難点を除くために著者は生研式と称する一方法を考案したが³⁾、この方法では模型は固定床につくられその表面にほぼ一様に配置された多数の電磁型加振器を通じて動的外力が模型に加えられる。そしてこの動的外力によって生ずる堤体のひずみと変位が測定され、相似率によって応力と変位が求められるのである。

しかし先の論文では貯水池が空虚の場合について試験方法と試験結果の一例をのべたにすぎなかった。この時点では、貯水時の模型試験は困難と考えられたからである。その後畑野博士の論文⁴⁾よりヒントを得て、満水時における試験を行なう方法を考案した。まだ解決を要す

る問題を若干残してはいるが、大筋においてはこれで問題を解決し得たように思う。

2. 試験方法および装置

貯水のある場合のダムの振動についての解析的研究によれば、水の圧縮性を考慮するとき、貯水はある周波数の地震のもとでは共振現象を起こし、鉛直方向に著しく大きくゆれることになる^{1),5)}。しかし最近畑野博士は通常の貯水池のように池底に泥が堆積している場合は池底における弾性波の反射はなく、この場合には貯水の共振現象は起こらず、したがって水の圧縮性は考慮しなくてもよいことを証明した。また著者らが電源開発(株)に協力して行なっている田子倉ダムの動水圧観測でも、動水圧の共振現象と認められるような現象はこれまではない。それで、ここでは水の圧縮性を無視することにした。こうすると模型の相似性を保つことが比較的容易となり、満水時の模型試験が可能となる。以下に試験法の原理を述べよう。

簡単のためにダムのかわりに片持ばりを考え、地震動は調和振動であるとする(図-1)。振動を2次元運動と考え直角座標 x, y をとる。はり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 ははりの地盤に対する相対変位である。

はりの運動方程式は

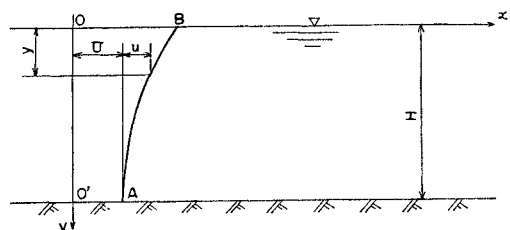


図-1

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 東京大学生産技術研究所

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

ここに EI ：はりの曲げ剛度

m ：はりの単位長当たり質量

p ：動水圧（圧力を正とす）

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

地動を加速度振幅 α_0 ，変位振幅 U_0 ，円振動数 ω なる単弦振動とすると

$$U = U_0 \cos \omega t = \frac{\alpha_0}{\omega^2} \cos \omega t \quad \dots\dots(2)$$

よって式 (1) は

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = m \alpha_0 \cos \omega t - p \quad \dots\dots(3)$$

一方、貯水池内における水の運動は水の非圧縮性を仮定すると

$$\xi = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad \eta = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 ξ, η は水の速度の座標軸方向の成分、 ϕ は速度ポテンシャルであって次式を満足する。

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

水の振動に対する運動方程式は、 r を貯水の単位体積当たり重量としてつぎのようになる。

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

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

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

境界条件はつぎの4個である。

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

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

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

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

問題が線形であることを考慮して ϕ を2個のポテンシャルにわけ

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

とおく。 ϕ_1, ϕ_2 は

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

を満足し、かつ ϕ_1 は境界条件式 (7), (8), (9) と

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

を満足し、 ϕ_2 は式 (7), (8), (9) と

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

を満足するようにする。そして ϕ_1 によって生ずる動水圧を p_1 、 ϕ_2 によって生ずる動水圧を p_2 とする。いま、

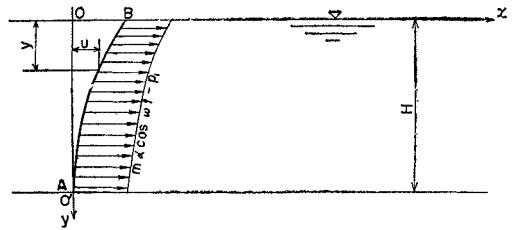
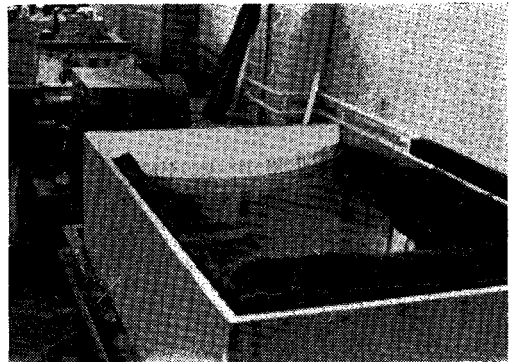
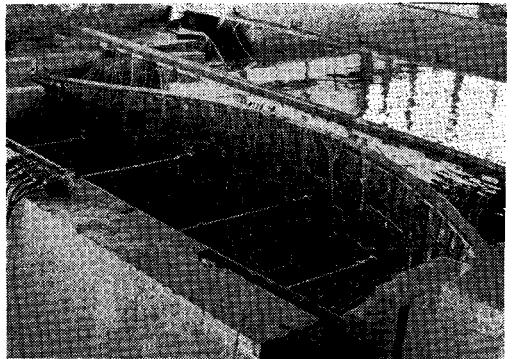


図-2



(The 1st Test of Arch Dam Model)

写真-1 第1実験



(The 2nd Test of Arch Dam Model)

写真-2 第2実験

動水圧 p_1 が解析的に、あるいは実験的に得られたとすると式 (13) は

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (m \alpha_0 \cos \omega t - p_1) - p_2 \quad \dots\dots(15)$$

式 (15) を実験的にとくために、A端を固定したはり AB に $m \alpha_0 \cos \omega t - p_1$ なる動荷重を外部から与えた状態においてははりを振動せしめる (図-2)。このとき貯水がはりにおよぼす動水圧は p_2 である。なぜなら ϕ_2 に対して境界条件式 (7), (8), (9) と (14) とが満足されているからである。

p_1 を実験的に求めるため、ダムを変形しないものとしたときの地震動による動水圧を測定する。これを第1実験という。ダムの変形を無視しているため、ダム堤体や基盤の変形性を考慮に入れる必要がないので、模型の

大きさおよび振動台の測定設備は動水圧測定が可能である程度のものであれば十分である。

つぎにこの試験によって得た動水圧の分布にしたがって計算された式(15)右辺第1項の力を電磁力として第2の模型に灌水状態に加えれば、地震時の動水圧も考えた堤体応力を実験的に求めることができる。これを第2実験という。第2の模型については堤体はもちろん基盤の変形性が詳細に再現される必要があるので模型は大きなものが好ましい。

この試験に必要な装置は、ダム模型および加振装置については、前報文で述べたものと同じであるが、さらにその前方にコンクリート水槽を築造した。水槽は堤高の5倍と3倍の2種類の奥行きのものをつくり、実験と比較した結果では奥行きは堤高の3倍あれば十分であることがわかった。なお先に報告した加振装置では全加振器に一律な加振力を加えるようになっていたが、今回はそれぞれ異なる加振力を加え得るように改良し、また、この機会に装置の加振能力を増大させた。

実験にあたっての技術的困難は消波装置の問題、微小動水圧を測定する問題および貯水用液体の比重の問題であった。消波のためには水槽の側壁と底に厚いむしろをおおうことによって目的を達した。動水圧の測定には、共和電業製 半導体式小型圧力変換器 MPC. 10-SA を用いた。この変換器は感度が高く水柱 1 cm を オシログラフ上に 0.5~1 cm としてあらわすことができる。

堤体が石膏と珪藻土の混合材料でできていてその比重が軽いことを考えると、相似性を満足するために貯水用液体については比重が軽いことが必要である。しかし水以外の液体を用いることは事実上できないので、反対に堤体の比重をますことにした。このために堤体表面に鉛板をボルトではりつけてその比重をコンクリートの比重に一致せしめた。

3. 相似則

本節に用いる記号は、表-1 に示されている。ダムの地震応力を求める前記の方法では堤体に作用する力はつぎの4種の力の重疊と考えられる。

- 1) 堤体が変形せぬとしたときの地動による慣性力(剛体慣性力)
- 2) 堤体が変形せぬとしたときの貯

水のおよぼす動水圧(剛体動水圧)

- 3) 地盤に対する堤体の相対変位による堤体の慣性力(変形慣性力)

- 4) 地盤に対する堤体の相対変位による動水圧(変形動水圧)

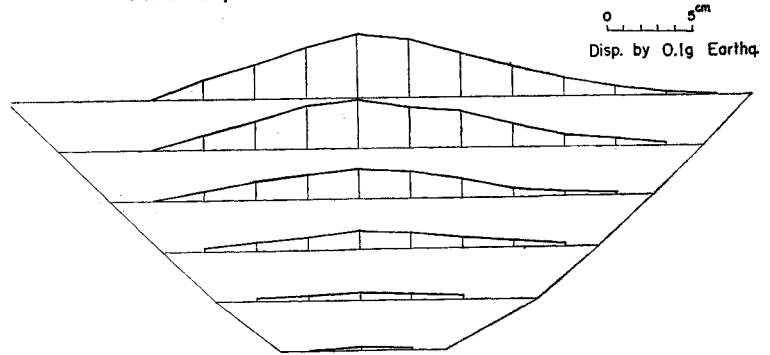
それゆえ堤体の変形は上記4種の合力によってひき起こされた変形である。

第1実験においては剛体動水圧は地動加速度係数(地動加速度/重力加速度)、貯水比重、水深に比例すると考えられるからつぎの相似則が成り立つ。

表-1

	実物	第1模型	第2模型
時間の単位	t_p		t_m
相対変位	u_p		u_m
ひずみ	ϵ_p		ϵ_m
応力	σ_p		σ_m
ヤング係数	E_p		E_m
地動加速度係数	k_p	k_m'	k_m
堤高	H_p	H_m'	H_m
堤体の厚さ	D_p		D_m
貯水の単位体積当り重量	γ_p	γ_m'	γ_m
堤体単位体積当り重量	w_p		w_m
剛体動水圧	$p_{p.1}$	p_m'	
変形動水圧	$p_{p.2}$		p_m

Radial Displacement of 1st Mode. Parabolic Arch Dam



Tangential Displacement of 1st Mode. Parabolic Arch Dam

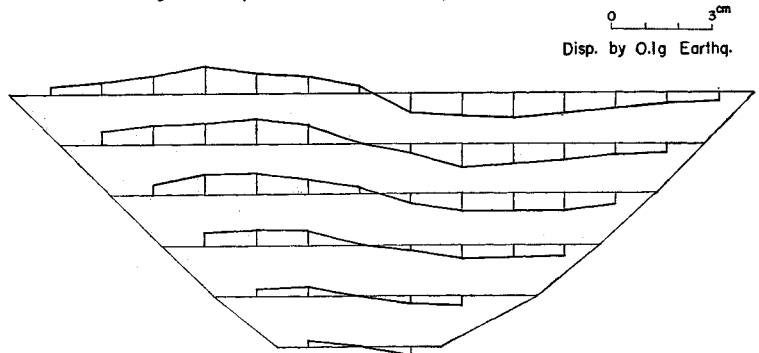


図-3 1次振動モード(変位)放物線アーチダム

$$\frac{p_{m'}}{p_{p.1}} = \frac{k_{m'} \gamma_{m'} H_{m'}}{k_p \gamma_p H_p}$$

$$\therefore p_{p.1} = p_{m'} \cdot \frac{k_p}{k_{m'}} \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_{m'}} \cdot \frac{H_p}{H_{m'}} \dots \dots \dots (16)$$

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

$$\lambda = \frac{H_m}{H_p} \dots \dots \dots (17)$$

堤体の地震に対する相対変位は各部分のひずみによって起こっているものであるから

$$\frac{u_m}{u_p} = \lambda \frac{\epsilon_m}{\epsilon_p} = \lambda \dots \dots \dots (18)$$

模型と実物のポアソン比が同一であると仮定すると、

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{E_m \epsilon_m}{E_p \epsilon_p} = \frac{E_m}{E_p} \dots \dots \dots (19)$$

堤体内部の応力が式(19)に示される関係にあるためには堤体上に作用する4個の荷重の荷重強度の比が式(19)と同じ値にならねばならない。変形慣性力は堤体質量と相対加速度の積であるから相似則は

$$\frac{w_m D_m \frac{u_m}{t_m^2}}{w_p D_p \frac{u_p}{t_p^2}} = \frac{E_m}{E_p}$$

$$\therefore \frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\frac{D_m u_m}{D_p u_p}} \cdot \sqrt{\frac{w_m E_p}{w_p E_m}} = \lambda \sqrt{\frac{w_m E_p}{w_p E_m}} \dots \dots \dots (20)$$

時間の縮尺を

$$\frac{t_m}{t_p} = \tau \dots \dots \dots (21)$$

と定める。変形動水圧は、貯水の比重、水深、堤体の相対加速度の積に比例すると考えられるから相似則は

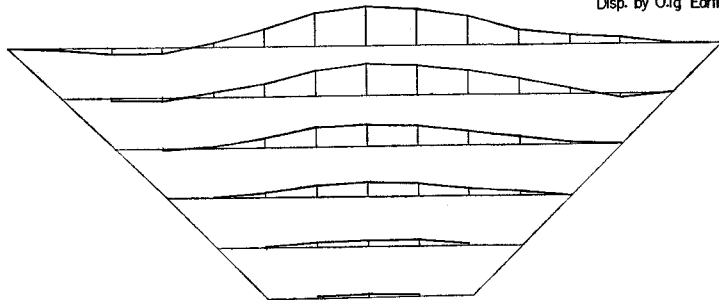
$$\frac{p_m}{p_{p.2}} = \frac{\gamma_m H_m \frac{u_m}{t_m^2}}{\gamma_p H_p \frac{u_p}{t_p^2}} = \frac{E_m}{E_p} \dots \dots \dots (22)$$

この関係が成りたつためには式(20)により、つぎの関係が成りたたねばならない。

$$\frac{\gamma_m}{\gamma_p} = \frac{w_m}{w_p} \dots \dots \dots (23)$$

よって模型貯水の比重はこの関係が

Radial Displacement of 1st Mode. Circular Arch Dam
0 5cm
Disp. by 0.1g Earthq.



Tangential Displacement of 1st Mode. Circular Arch Dam
0 2cm
Disp. by 0.1g Earthq.

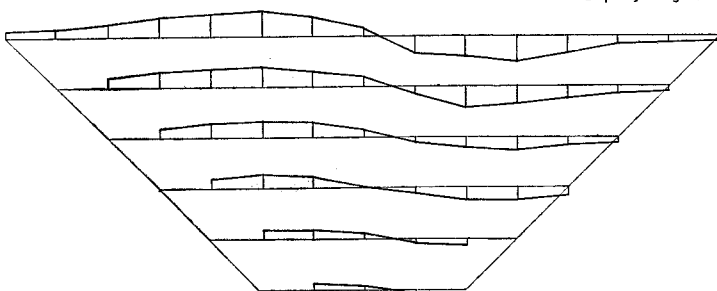
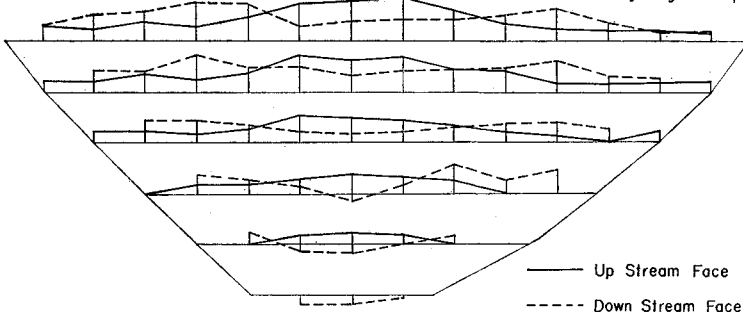


図-4 1次振動モード(変位)円形アーチダム

Arch Strain of 1st Mode. Parabolic Arch Dam
0 200 x 10^-4
Strain by 0.1g Earthq.



Cantilever Strain of 1st Mode. Parabolic Arch Dam
0 200 x 10^-4
Strain by 0.1g Earthq.

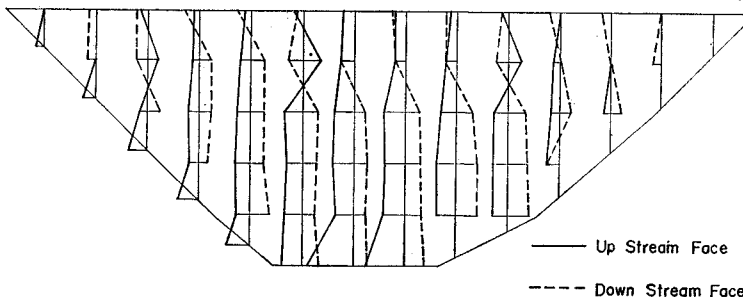


図-5 1次振動モード(ひずみ)放物線アーチダム

満たされるように選ばなければならない。実際には模型貯水に水以外の液体を用いることはむずかしいから水を使用するとすれば $r_m=r_p$ となり、したがって

$$w_p = w_m \dots \dots \dots (24)$$

となる。

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

$$F = k_m w_m D_m$$

ゆえに電磁力 F を加えていることはモデルに地動加速度係数

$$k_m = \frac{F}{w_m D_m} \dots \dots \dots (25)$$

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

$$\frac{F}{k_p w_p D_p} = \frac{E_m}{E_p}$$

なる関係より、つぎのように定められる。

$$k_p = \frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{F}{w_p D_p} = \frac{\tau^2}{\lambda} \frac{F}{w_m D_m} \dots \dots \dots (26)$$

各加振器を通じて加える加振力が F を均等に加えるように調整されているときは $F/w_m D_m$ は F の合力を堤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。その大きさは実物の地動加速度係数が式 (26) によって与えられれば第1実験の実測値から式 (16) によって算出される。

4. 試験結果

(1) 模型の寸法

高さ 100 m, 堤頂長 320 m, 堤頂中央部厚 5 m, 堤体中央部底厚 20 m の放物線形アーチおよび高さ 100 m 堤頂長 325 m, 堤頂中央部厚 5.4 m 堤体中央部底厚 21.4 m の円形アーチのダムについて試験を行なった。この両形式のダムにおいて谷の形と基盤の条件は同じにした。模型の縮尺は第1模型は 0.23/100, 第2模型は 1/100 である。

(2) 固有振動周期およびモード

模型試験の結果から相似則によって

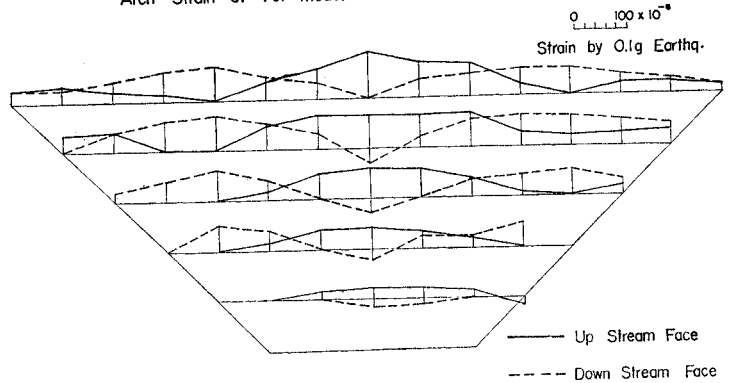
ダムの固有振動周期を算出することができる。それを表-2 に示す。

これで見ると放物線アーチの固有周期は円形アーチの固有周期の空虚時で 1.1~1.2 倍, 満水時で 1.3~1.4

表-2

ダム形式	空 虚 時		満 水 時	
	1次対称 (sec)	1次逆対称 (sec)	1次対称 (sec)	1次逆対称 (sec)
放物線形	0.268	0.270	0.388	0.365
円 形	0.231	0.240	0.275	0.276

Arch Strain of 1st Mode. Circular Arch Dam



Cantilever Strain of 1st Mode. Circular Arch Dam

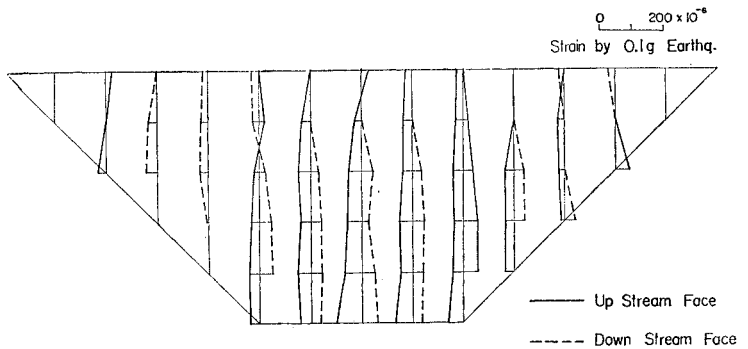


図-6 1次振動モード(ひずみ)円形アーチダム

Dynamic Water Pressure Assuming Dam Is Rigid

Ground Acc. = 0.1g

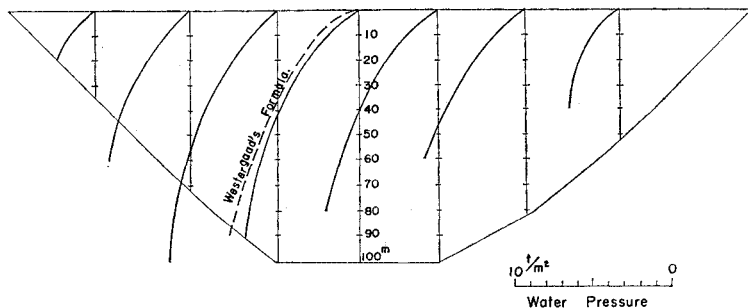


図-7 剛体動水位

倍になっていて放物線アーチは円形アーチに比してやや剛性が低いことが認められる。1次対称振動の半径方向および切線方向の振動モードを図-3~4に、アーチ方向および上下方向のひずみを図-5~6に示してある。これらはいずれも地盤加速度0.1gの場合の値である。

(3) 動水圧

剛体動水圧および変形動水圧を測定した結果を相似則によって実物になおした値を示すと図-7, 8, 9のごとくである。ここで地盤加速度は0.1gである。

試験結果によると地盤加速度に対して剛体動水圧は同位相であり、変形動水圧は90°の位相差が認められる。

(4) 模型ダムの振動減衰定数

模型ダムの振動減衰定数(減衰係数/限界減衰係数)は減衰が小なる場合次式によって与えられる。

$$h = \frac{a \sum mu}{2 \sum mu^2} \dots \dots \dots (27)$$

ここに

m : 堤体質量

u : 堤体の相対変位振幅

a : 地動変位振幅

対称一次の振動について実験結果を用いて計算した h の値は、放物線アーチにおいては、空虚時 0.034、満水時 0.12、円形アーチにおいては空虚時 0.037、満水時 0.083 となった。これらの値はこれまでに行なわれた現場実測による値と同じオーダーの値である。したがって図-5~6に示したひずみは実物ダムのひずみを大体あらわすものと考えられる。

5. 結 語

貯水を非圧縮性流体として取扱うことによって、貯水ある場合にまで生研式アーチダム試験方法を拡張し、それが実際に実施しうるものであることを実例によって示した。振動減衰性について模型と実物の相似をなり立たせる方法は未解決であるが、この場合偶然にも模型の減衰定数はおおよそ実物のそれと同じオーダーであった。

Dynamic Water Pressure due to Flexure of Dam (Parabolic Arch Dam)

Ground Acc. = 0.1g

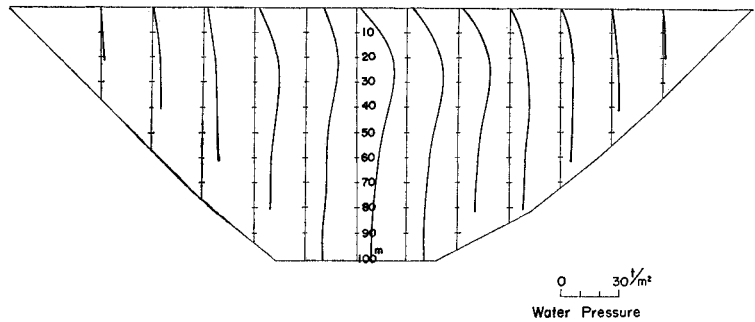


図-8 変形動水位(放物線アーチダム)

Dynamic Water Pressure due to Flexure of Dam (Circular Arch Dam)

Ground Acc. = 0.1g

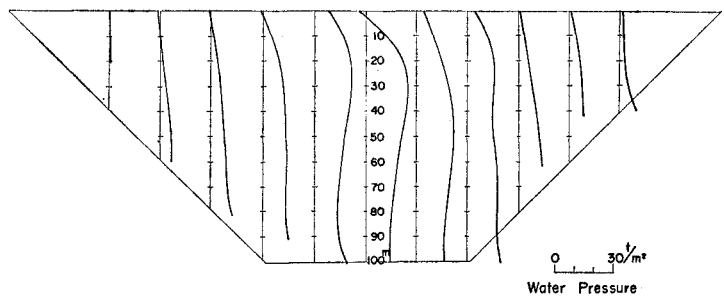


図-9 変形動水圧(円形アーチダム)

ここに述べた方法は谷の形がとくに複雑な場合、岩盤がはなはだしく不均一、あるいは局部的に異常のある場合、堤体に比較的大きな異質構造物が接続してある場合など数値計算の遂行がむずかしいような場合に、とくに便利に使えるものと思われる。

本研究にあたって東京大学助教授田村重四郎氏、助手森地重暉氏、建設技官岸本幸彦氏、同柴田功氏のご協力を得た。厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 小坪清真：アーチダムに働く地震時動水圧，土木学会論文集，第44号，1957
- 2) 畑野 正・今野 浩：アーチダムに作用する地震時動水圧の数値解，土木学会論文集，第131号，1966
- 3) 岡本舜三・加藤勝行・伯野元彦：生研式アーチダム模型振動試験方法について，土木学会論文集，第75号，1961
- 4) 畑野 正：水の弾性による地震時動水圧の共振に関する吟味，土木学会論文集，第129号，1966
- 5) Westergaard, H.M. : Water Pressure on Dams During Earthquakes, Proc. ASCE, Nov. 1931
- 6) Okamoto, S. : A Method of Dynamic Model Test of Arch Dam, 4th World Conference of Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969

(1969.6.24・受付)