

# 生研式アーチダム模型振動試験方法について

正 員 岡 本 舜 三\*

正 員 加 藤 勝 行\*\*

正 員 伯 野 元 彦\*\*\*

## 1. 試験方法および装置

アーチダムの地震時挙動の観測によれば、地震時にはダムの低次固有振動が誘起されやすい。それゆえ堤体の地震応力を求めるには modal method によるのが適当であり、modal method を具体的に適用するに必要な低次基準振動の特性を知るには模型実験が有効である。

在来の模型試験法は模型をのせた台に振動を与える方法であるが、この方法には利点もあるが欠点もある。すなわち大型模型に対しては模型および振動台の質量が大きくなってこれに早い振動を与えることがむずかしく、小型模型に対しては相似率を満足させるほど早い振動を与えることがむずかしく、いずれの場合にも最低次以外の基準振動を模型に現出させることがかなりむずかしくなるのが普通である。これらの困難をさけるために筆者等は一方法を案じこれを生研式振動試験装置となすけた。最初の試作品であるから欠陥もあるが、これらは設備費の若干の追補によって除きうる性質のものと思う。

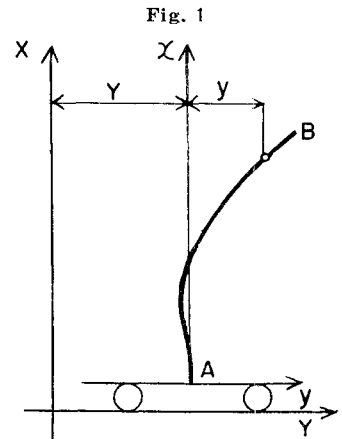
この方法では模型は固定床上に作られる。模型の各質量には同一大きさの質量に対しては同一大きさの力が加えられるように配置された電磁型加振器を通じて動的な外力が加えられる。外力を正弦的に変化する力にすれば、それによって模型に標準振動をおこさせることができ、外力を地震の加速度と同じ波形に選べばその地震下に生ずるダムのひずみを模型に生ぜしめることができる。

この新しい装置は次の原理のもとづいている。空間に固定された座標に関しては振動台上に設置された模型の要素質量片の上に働らく力は2種の力、慣性力と弾性復元力とからなる。しかしもし系が振動台に固定された座標に関して考えられるならば、みかけの外力が追加される。みかけの力は台の加速度を各要素片の質量に乘じた大いさをもつ。したがって振動台上の模型に生ずる応力状態を固定台上の模型に再現せんがためには各要素片質量に振動台の加速度をかけた値に比例する力を各要素質量片に外力として加えればよい。

この関係は次の簡単な例題によってさらによく理解されよう。振動台  $(x, y)$  の上に片持ばり  $AB$  をたて振

動台を固定座標  $(X, Y)$  に対して水平に加速度  $\ddot{Y}$  をもって振動させる (図-1)。はりの要素片に働らく慣性力

はその部分の固定座標に対する加速度と質量の積であり、その部分に働らく復元力のはりの平衡位置からの相対変位によって定まる。 $EI$  ははりの曲げ剛度、 $m$  ははりの単位長さ当り質量とすると、はりの運動方程式は次のごとくなる。



$$m \frac{\partial^2}{\partial t^2} (Y+y) + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

境界条件は A 端にて

$$y=0, \frac{\partial y}{\partial x}=0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

B 端にて

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=0, \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}=0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。(1) 式より

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -m \ddot{Y} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(2), (3), (4) 式をあわせれば振動台に対するはりの運動ははりの質量要素片に  $m \ddot{Y}$  なる力を外部より加えた時に生ずるはりの運動と同じであることがわかる。

生研法の特長は大馬力の装置を用いることなしに大型の模型が試験できることと、高周波の振動を容易に模型に与えることである。模型が大型であることは測定の精度や現場の実情の再現性の精度を高め、かつ模型の固有振動数を低める利点がある。また高周波を与えることは模型に高次固有振動を生ぜしめることを可能にし、また地震波と同形の振動作用を直接に模型に与えることを可能にする。図-2 は電磁加振器である。それは電磁コイルの中にそう入した鉄心よりなり鉄心の一端はアルミ製の付属具を通じて、接着剤で模型表面にとりつけられる。このとき鉄心の変位に対して電磁力が変わらないことを要するが、われわれの装置では許容変位は全振

\* 工博 東京大学教授 生産技術研究所  
\*\* 東京大学生産技術研究所第一部  
\*\*\* 東京大学大学院学生数物系研究科

Fig. 2 Electro-magnetic exciter

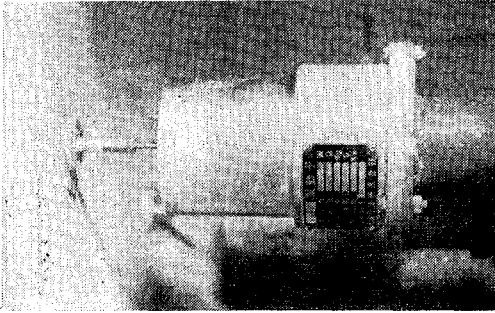


Fig. 3(a) Distribution of exciters (Perpendicular to dam axis)

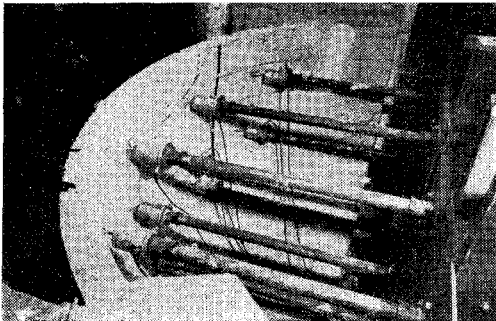
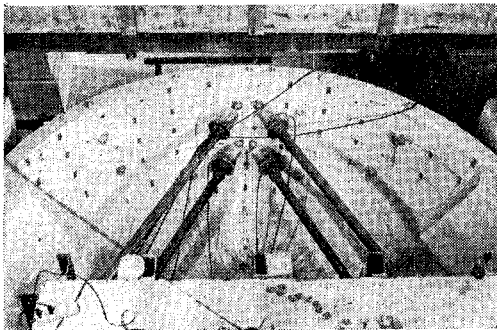


Fig. 3(b) Distribution of exciters (along to dam axis)



巾 2mm である。加振力器は一端を丈夫なコンクリート壁につけられた鉄棒の先につけて模型表面に配置するが、そのとき各加振力器のうけもつ模型質量が均分されることが必要である。われわれは 10 個の加振力器を配置したが 図-3 (a) はダム軸に直交方向、図-3 (b) はダム軸方向、図-4 は上下方向に働く地震作用を実現するための配置を示している。上下動に対しては加振力器は各質量要素片に対して均分されていないが、装置上やむをえなかった。図-5 は電源、増巾、発振各部の設計で帝国電波 K K に依頼して試作したものである。全出力は 100 W、安定なる増巾範囲は 5~2000 cps である。1 個の加振力器の出力は 10 W、出しうる力は 1.8kg である。加振力はわれわれの試験範囲 30~400 cps では周波数に関せず一定であり、またこの範囲では入力に対する出力の位相おくれは認められな

Fig. 3(c) Distribution of exciters (along to dam axis)

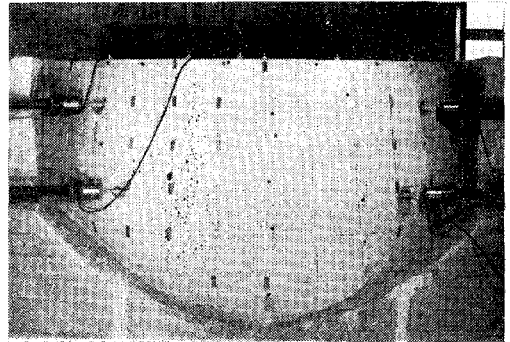
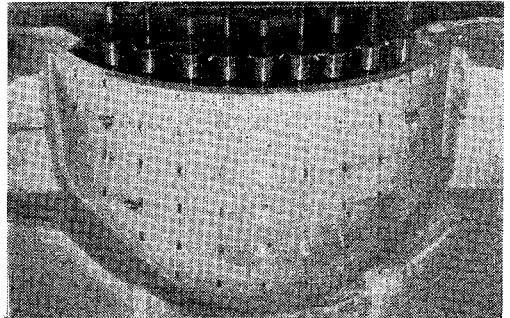


Fig. 4 Distribution of exciters (vertical direction)



った。外力として正弦波形の力を加えるときはこの装置がそのまま使われるが、地震波形の力を与える時は録音テープにとられた地震波を直接に増巾部に入れる。図-6 a, b は録音テープよりとった入力波形、a', b' はそれぞれそれに対応して電磁加振力器よりとった出力波形であって a' は加振力器の鉄心を固定した場合、b' は鉄心をダム模型にとりつけてダムを振動させる状態においたものである。a' と b' とはほぼ同形で鉄心がダムとともに動くことの影響はほとんど認めがたいことを示している。

模型材料としては石膏、珪藻土、水を 1:1:1.76 重量比にまぜた材料を用いた。その比重  $\rho_m=1.1$ 、ヤング係数  $E_m=1800 \text{ kg/cm}^2$  である。ポアソン比は 0.2 であって、コンクリートのそれにほぼ等しいとみなしてよい。

Fig. 5(a) Block diagram

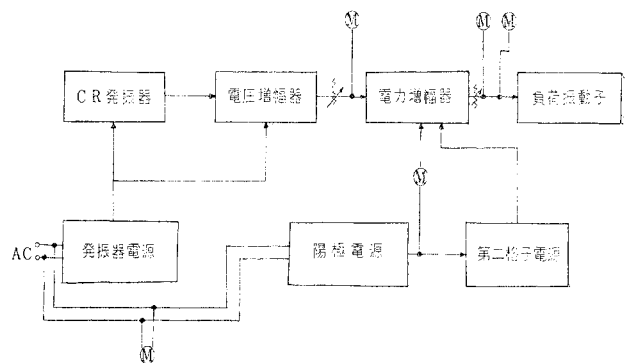


Fig.5(b) Network for oscillator

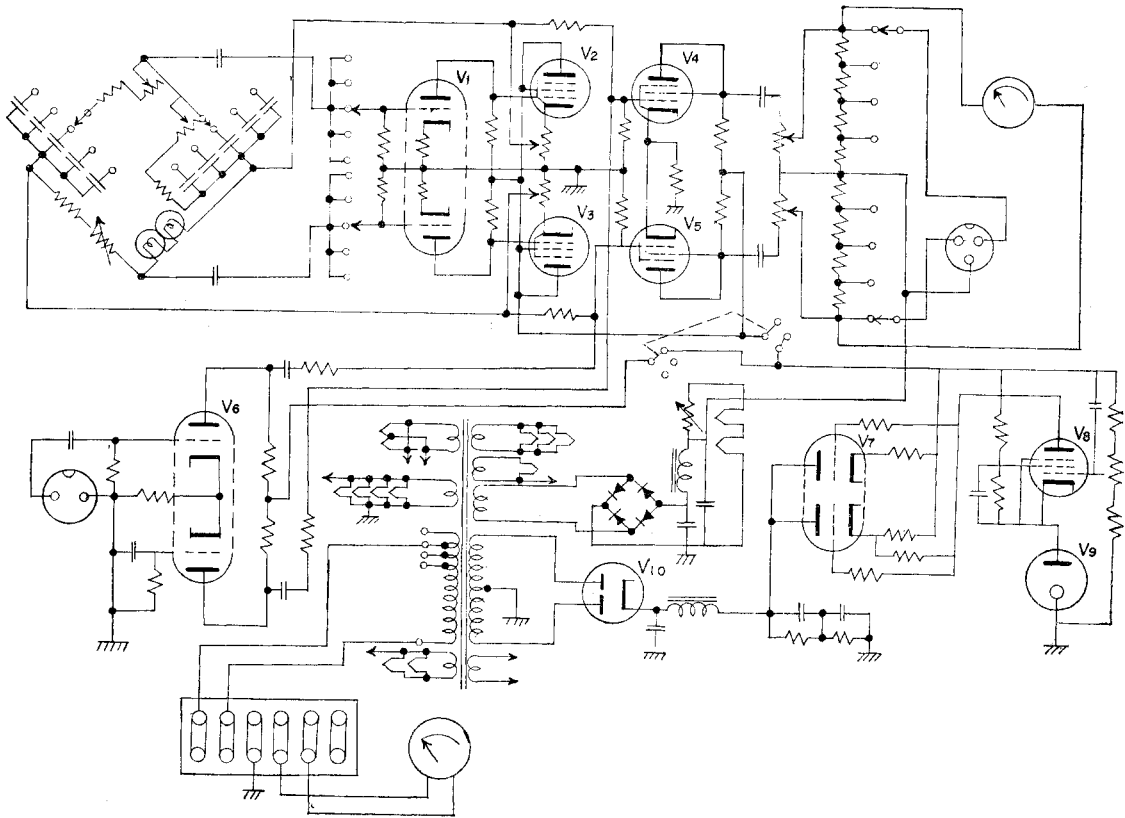


Fig. 5(c) Network for output part

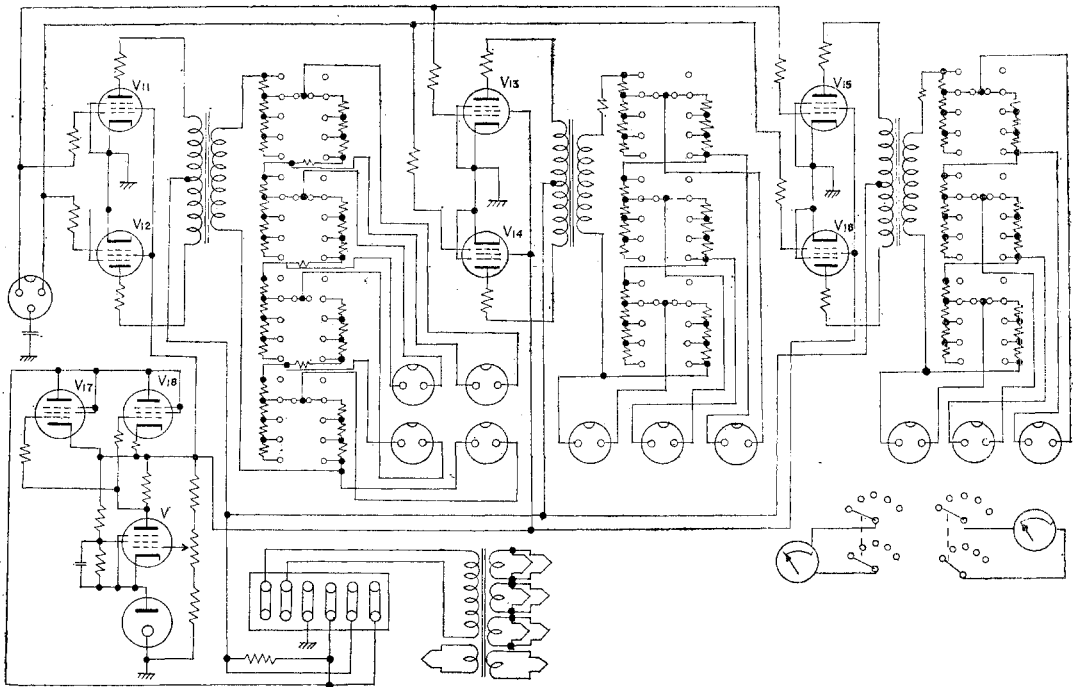


Fig. 5(d) Network for power source

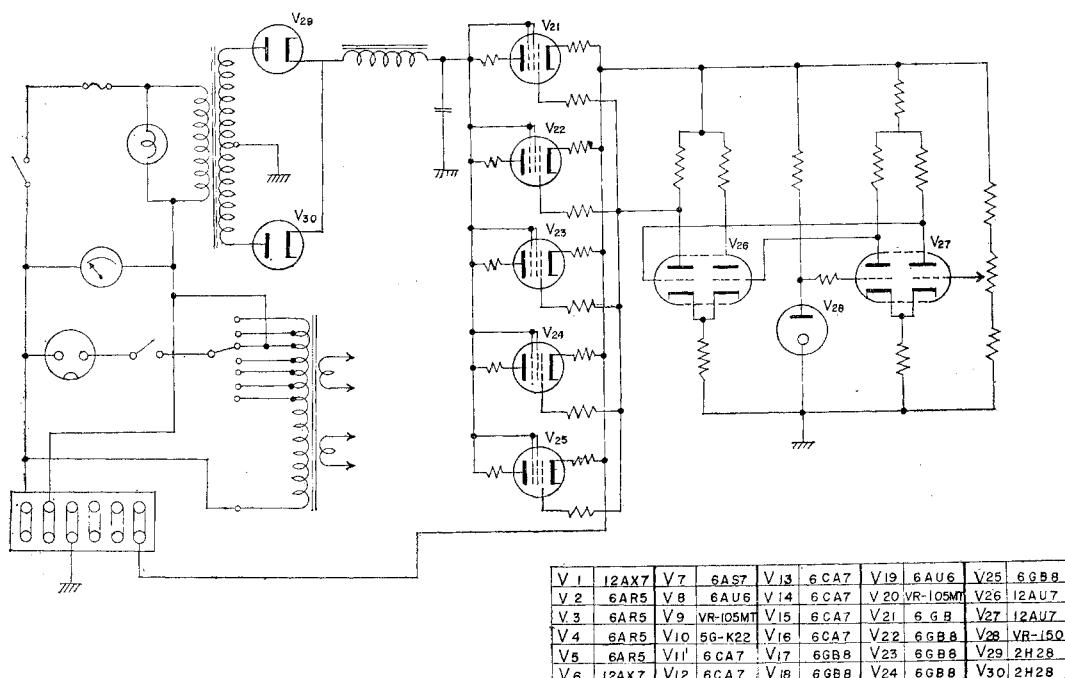


Table 1 Characteristics of model dam

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Foundation Rock : Same material with dam body | Crest Length : 1.29 m       |
| Type of Dam : Dome type Arch                  | Thickness of Crest : 0.09 m |
| Hight : 1.22 m                                | Max. Thickness : 0.25 m     |

であろう。実験した模型ダムの特性は表-1に示してある。これはわれわれが別途に現場において地震観測および振動試験を行なったアーチダムの1/50縮尺模型であるが<sup>(1)</sup>、異なる点は模型では基礎岩盤が堤体と同材料で作られているが実物では硬い礫岩であること、実物には縦継目および周辺継目があるが模型にはないこと、実物は放水施設として堤頂に越流ぜきと中腹に6個の大口径のオリフィスをもつが模型にはそれらが再現されていないことである。ただしオリフィスがなくとも堤体全体としての剛性の配分は実物と変わらないよう模型断面の決定にあたって配慮されている。

## 2. 試験結果

図-7(a)は図-3(a)に示す加振力器の配置のもとにすべての加振力を同位相に正弦的に振動させたときに生ずるダム頂中央における半径方向変位を示し、図-7(b)は加振力器の同じ配置のもとに右半と左半の加振力を逆位相にして、正弦的に振動させた

ときに生ずるダム頂1/4断面における半径方向変位である。かりに前者を対称振動後者を逆対称振動とよべば、これらはそれぞれ対称および逆対称振動に対する応答曲線であって、そこに現れた山は基準振動の固有振動数をあたえる。便宜上これに次数を図示のごとくつけておく。基準振動数に対する相似性が保たれるためには時間の相似率を次のようにとらねばならない。

$$\tau = \lambda \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$\tau$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $D$  および  $E$  はそれぞれ模型と実物の時間、長さ、密度、堤厚および弾性係数の比である。われわれの場合には模型縮尺は  $\lambda = 0.02$  であって、 $\rho_m$ ,  $E_m$  は前記の値をもつ。実物については  $\rho_p$  は 2.3 と推定され  $E_p$  は正確には評価しにくいが  $150\,000 \sim 200\,000 \text{ kg/cm}^2$  と推定される。したがって

$$\tau = 0.126 \sim 0.146 \quad \dots \dots \dots (6)$$

基準振動の振動数について模型試験による値、(6) 式に

Table 2 Natural frequencies of model dam

| Vibration type    | Frequencies of model dam | Frequencies reduced to prototype |                                  | Frdquencies measured in prototype |
|-------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                   |                          | $E_p = 200\,000 \text{ kg/cm}^2$ | $E_p = 150\,000 \text{ kg/cm}^2$ |                                   |
| 1st Symmetric     | 56 cps                   | 8.2 cps                          | 7.1                              | 6.2                               |
| 2nd Symmetric     | 98                       | 14.3                             | 12.3                             | 10.5                              |
| 3rd Symmetric     | 148                      | 21.6                             | 18.6                             |                                   |
| 1st Antisymmetric | 46                       | 6.7                              | 5.8                              | 5.9                               |
| 2nd Antisymmetric | 100                      | 14.6                             | 12.6                             |                                   |
| 3rd Antisymmetric | 162                      | 23.7                             | 20.4                             |                                   |

Fig. 6 Input and out put wave form

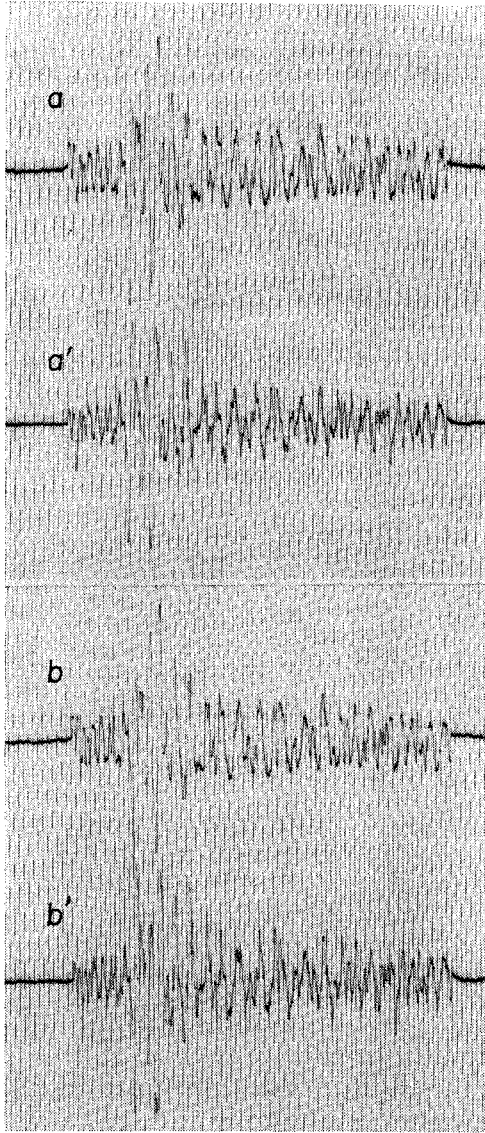


Fig. 8 Measuring points

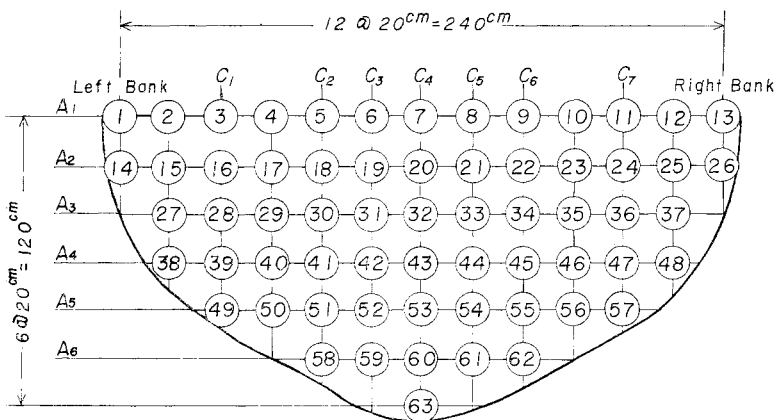


Fig. 7 Response curve of model dam

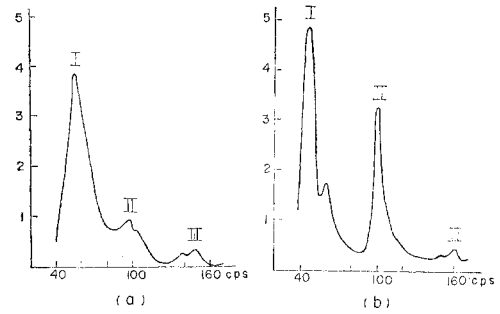
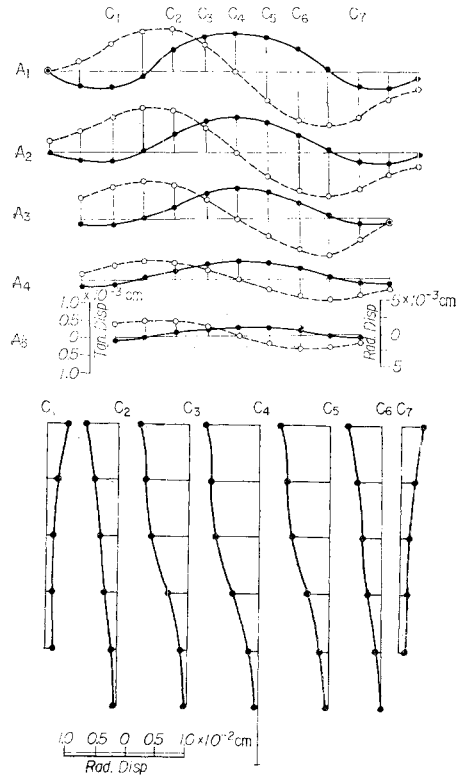


Fig. 9 Displacement mode (a) 1st order symmetric



よって換算した実物ダムの推定値，実物ダムについての振動試験からの実測値を比較して示すと表-2のごとくなる。これらの基準振動に対する振動形およびひずみは図-9，図-10のごとくなる。図-9において実線は半径方向変位を破線は接線方向変位を示す。図-10には各標高アーチにおける接線方向ひずみと各片持ばりにおける片持ばり方向ひずみを示す。なお図-10の実線は上流面ひずみを

Fig. 9 Displacement mode (b) 2nd order Symmetric

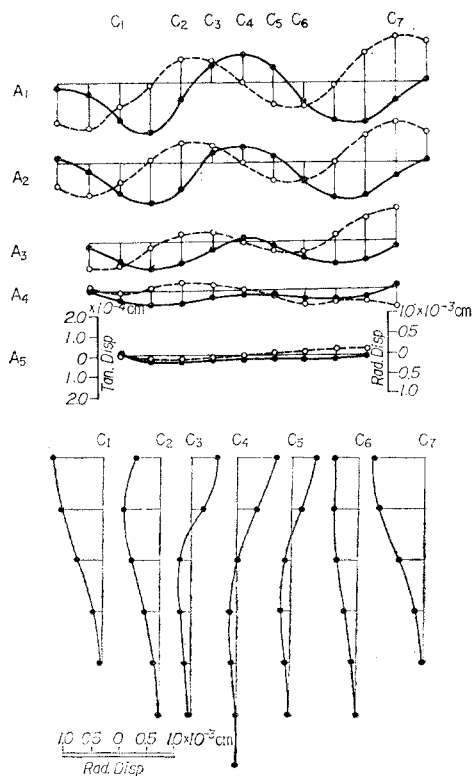


Fig. 9 Displacement mode (c) 3rd order Symmetric

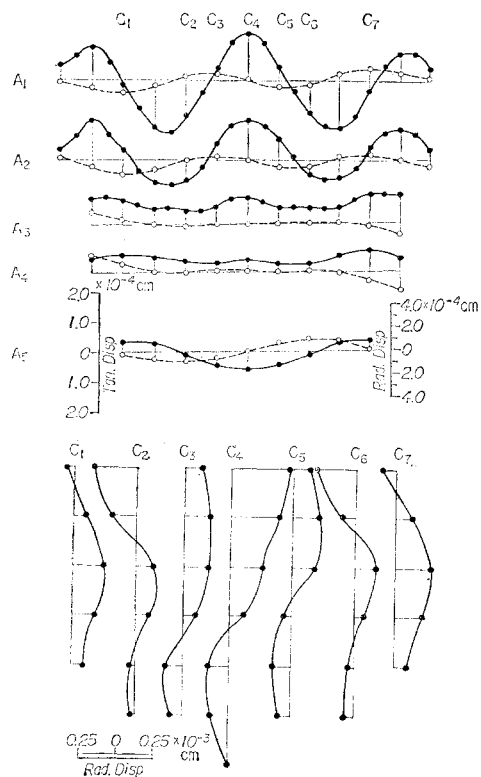


Fig. 9 Displacement mode (d) 1st order Antisymmetric

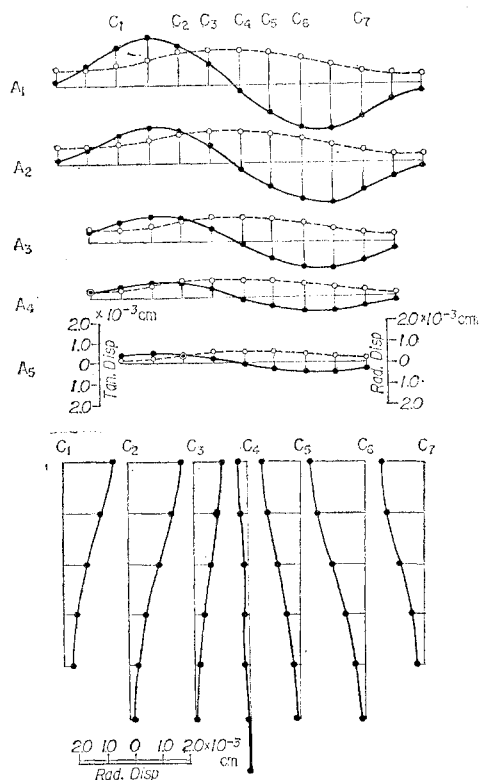


Fig. 9 Displacement mode (e) 2nd order Antisymmetric

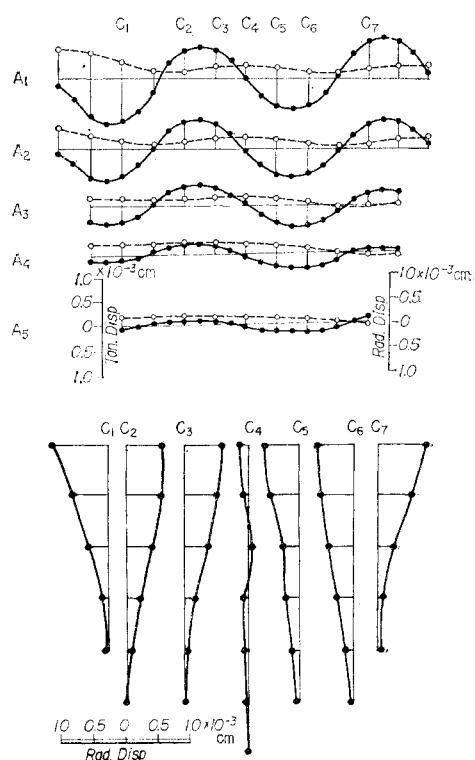


Fig. 9 Displacement mode (f) 3rd order Antisymmetric

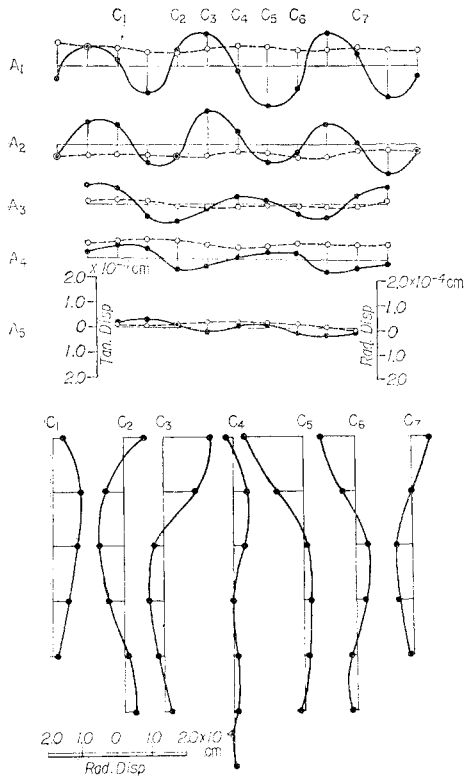
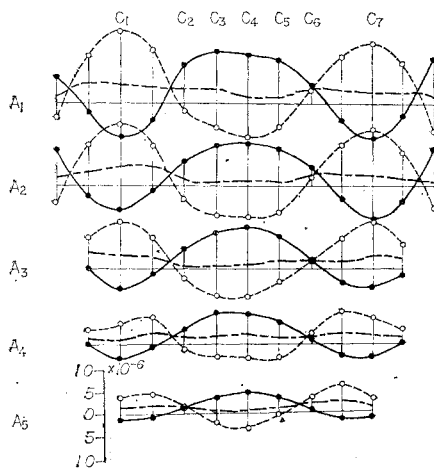


Fig. 10 Strain mode (a) 1st order Symmetric



破線は下流面ひずみを鎖線は上下流面ひずみの平均値を示している。図-8には変形およびひずみの測点を示してある。図-11は各基準振動の節線を示したものである。節線の位置が正確に評価されればダランベルの原理を使って振動応力を静力学的手段によってかなり正確に評価することも可能となる。

模型によって得られた変位およびひずみは次の関係によって実物にうつされる。模型ダムに対して振巾  $\eta_m$ 、円振動数  $\omega_m$  なる正弦波的地震動を与えたとするとこれ

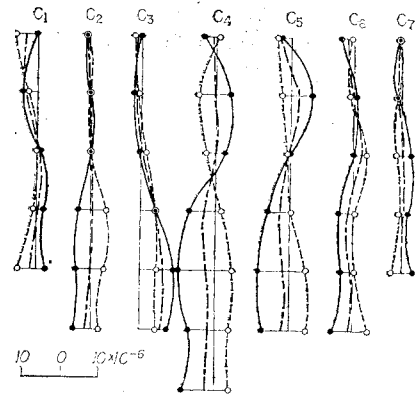
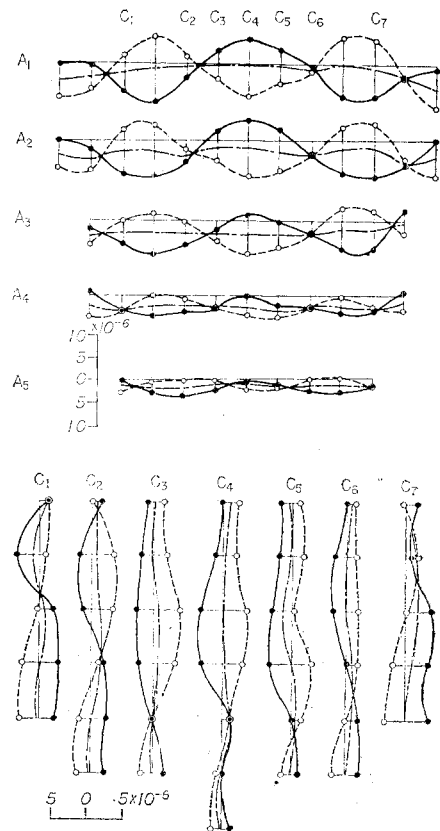


Fig. 10 Strain mode (b) 2nd order Symmetric



は実物に対しては振巾  $\frac{\eta_m}{\lambda}$ 、振動数  $\tau\omega_m$  なる正弦波的地震動を与えたことに相当する。この場合模型の単位面積に対して振巾が  $\rho_m D_m \eta_m \omega_m^2$  で円振動数が  $\omega_m$  なる振動的外力を加えることになる。したがってこの時模型と実物に生ずる応力の比は

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{\rho_m D_m \eta_m \omega_m^2}{\rho_p D_p \eta_p \omega_p^2} = \frac{\lambda^2 \rho_m}{\tau^2 \rho_p} = \frac{E_m}{E_p} \dots\dots (7)$$

となりひずみの比は

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_p} = \frac{\sigma_m E_p}{\sigma_p E_m} = 1 \dots\dots (8)$$

Fig. 10 Strain mode (c) 3rd order Symmetric

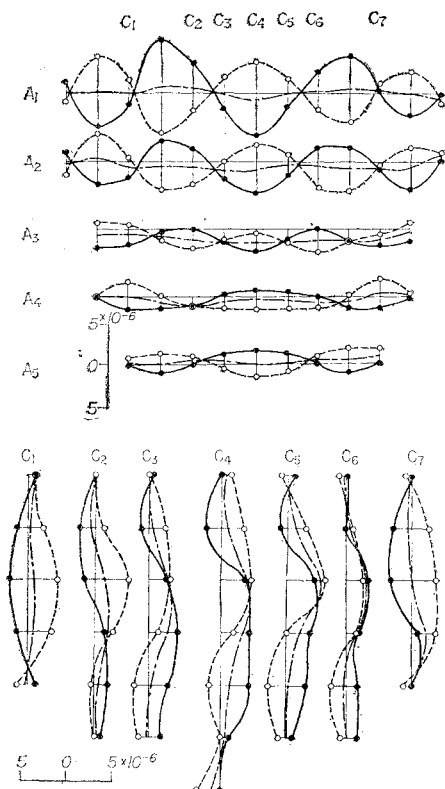


Fig. 10 Strain mode (d) 1st order Antisymmetric

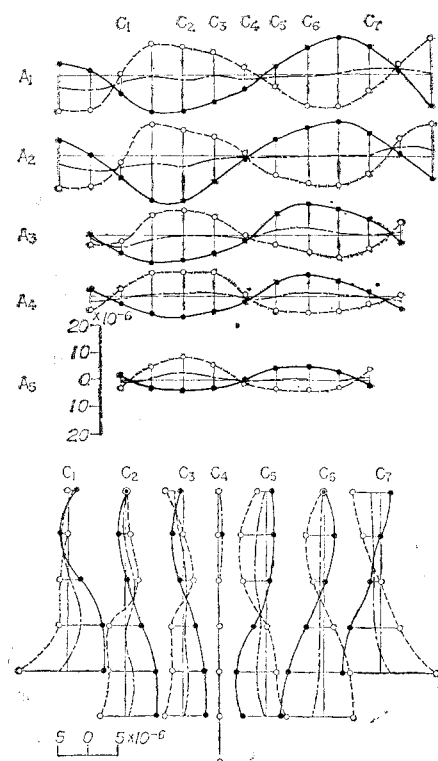


Fig. 10 Strain mode (e) 2nd order Antisymmetric

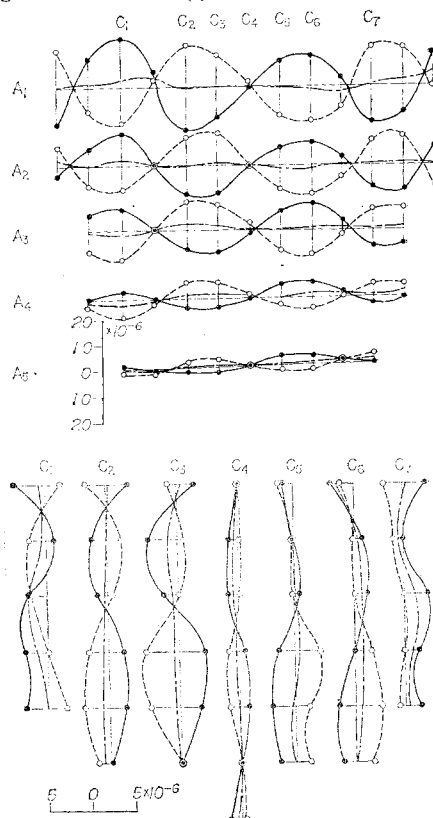


Fig. 10 Strain mode (f) 3rd order Antisymmetric

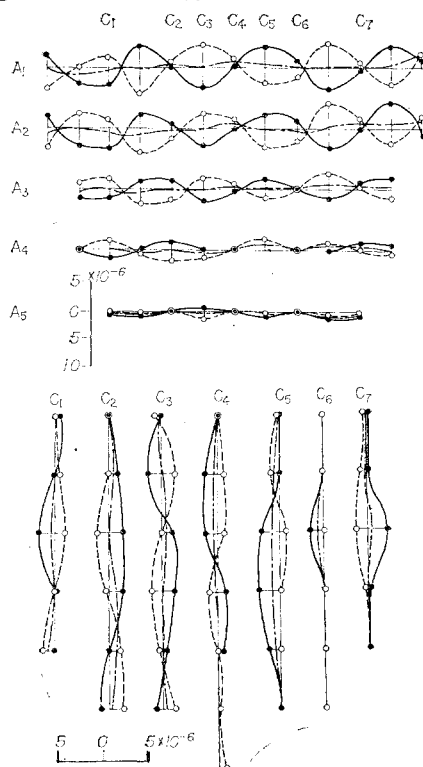
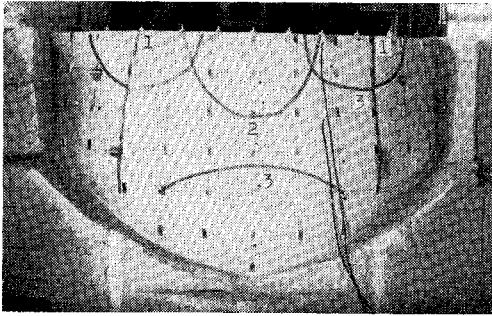


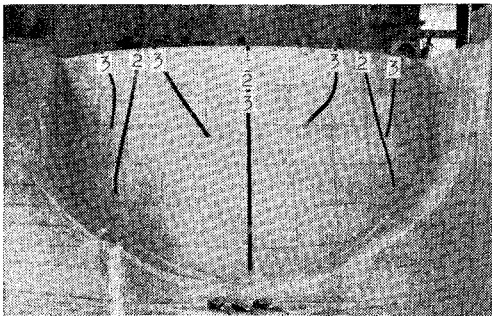


Fig. 11 Nodal lines of normal vibrations

(a) Symmetric vibration



(b) Antisymmetric vibration



となる。すなわち模型のひずみは実物のひずみをあらわす。またたわみは

$$\frac{y_m}{y_p} = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \frac{l_m}{l_p} = \lambda \dots \dots \dots (9)$$

となる。たとえば模型の単位質量に与える力が  $f_m \sin \omega_m t$  であるときは

$$\rho_m D_m \eta_m \omega_m^2 = \rho_m D_m f_m$$

$$\therefore \frac{\eta_m}{\lambda} = \frac{f_m}{\lambda \omega_m^2} = \frac{f_m}{\lambda} \frac{\tau^2}{\omega_p^2}$$

であるから模型に生ずるひずみは

$$Y = \frac{f_m \tau^2}{\lambda \omega_p^2} \sin \omega_p t, \quad \omega_p = \tau \omega_m \dots \dots \dots (10)$$

なる地震変位のもとに生ずる実物ダムのひずみに等しい。

対称振動は地動が上下流むきであるときに生じ、逆対称振動は地動が左右岸むきであるときに生ずる。地動の加速度振巾が 100 gal であるときにダムに生ずる変位とひずみは (10) 式によれば 図-9, 10 の値に 表-3 に示す係数を乗じた値となる。

Table 3

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| 1st Symmetric 3:3 | 1st Antisymmetric 2.9 |
| 2nd Symmetric 3:3 | 2nd Antisymmetric 3.2 |
| 3rd Symmetric 3:3 |                       |

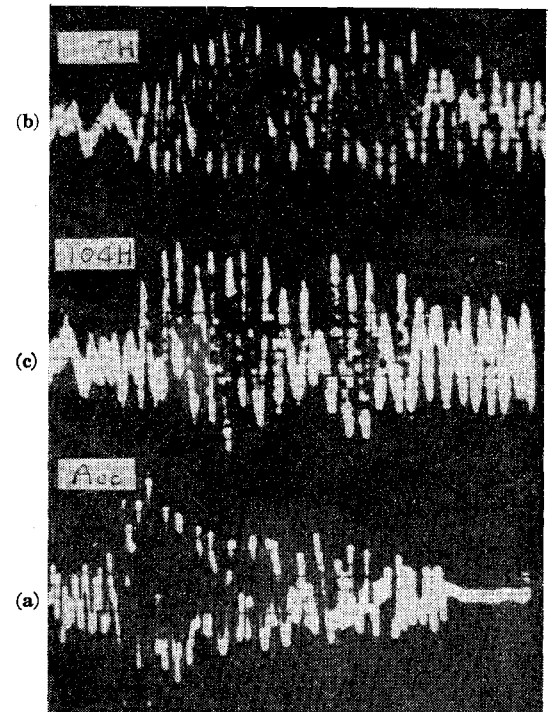
各基準振動の性質が明らかにされた後は任意の波形をもつ地震動による堤体の振動は modal method によって求めることができるが、実在するアーチダムの地震

観測によれば地震時に誘起される基準振動は低次のものが主であるから、低次基準振動の応力分布を吟味することは地震時応力を推定する上に実際上有用である。図-10 によると 堤体慣性力による地震応力は天端アーチのアーチ応力および比較的頂部に近い部分の片持ばり応力において大きいことが注目される。

堤体の地震時安定は地震応力に他種の応力が重合されてきまるのであるが、地震応力が正負両方の値をとる応力であることは特に脆性材料よりなる構造物には重要な意味をもつ。Oberti, G. 教授の試験によれば振動による模型アーチダムの破壊力所は堤体の比較的上部であるがこれが地震による弾性応力の大きな部分にあたっていることは興味あることである。

もし模型の減衰常数を各基準座標についてすべて実物のそれと一致させることができるならば、任意の波形をもつ地震動による堤体応力は地震波形と同じ波形の電圧を加振力器に入れることによって直接に模型上に実現することができる。われわれの模型の対称 1 次振動に対する減衰常数は約 5 % であり、実物のそれは実測によれば 3 % 程度である。前者の方がやや大きい幸いにして大差ない値である。われわれは実在ダムの減衰常数に関してわずかな資料をもつにすぎないし、一方模型の減衰常数を意のままに作る技術を知らない。したがって減衰性に関する研究は将来に残されているが、それが明らかにされたときにはこの方法で直接模型上に地震応力を測定することができるであろう。図-12(a) はダム現場岩盤

Fig. 12 Strain in model dam due to earthquake force



上で記録された微小地震の記録であって、これを入力として加えた時に模型上に生じたひずみを図-12(b), (c)に示した。(b)は上流面測点7(図-8参照)における水平方向ひずみであり、(c)は下流面測点4における水平方向ひずみである。実物に換算すると地震最大加速度が1 gal の場合

上流面測点 7      0.067 kg/cm<sup>2</sup>

下流面測点 4      0.074 kg/cm<sup>2</sup>

となる。模型の方が実物より減衰常数がやや大きいので、かりに1次対称振動の減衰常数の0.4乗に逆比例して修正するならば、上記の応力は約23%増加されることになる。

### 3. 考 察

先にのべたごとく、この模型に相当する実物ダムについては、地震観測ならびに振動試験を行ない対称および逆対称固有振動数と固有振動形を天端アーチおよび冠片持ばりについて測定した。その結果を実物と模型について比較してみると、大体においては良好な一致を示しているが、次のような点で相違がみられる。

(1) 表-2に示したように模型の固有振動数がやや大である。

(2) 1次対称振動形において天端アーチに2個の節があり、片持ばりに節がない点では両者は定性的に一致しているが、天端アーチの節の位置は模型の方が実物より中央部に寄っている。

(3) 2次対称振動形において冠片持ばりに1個の節があることは両者において一致しているが、天端アーチの節の位置は模型では実物におけるよりはるかに内側によっている。

以上の原因として考えられることは第一には先にのべたように、模型ダムは実物のような縦および周辺継目と放水施設をもたないことである。これらはいずれも模型ダムの固有振動周期を高める原因となるものであるから、これらをできるだけ忠実に再現すれば両者の相異を軽減するものと期待される。第二に構造物の弾性的性質に支持条件が大きな影響をもつことは明らかなことで、模型試験においても解析計算におけると同じく妥当な支持条件を再現しなければ正しい結果はえられない。とはいえ現状では基盤の動的性質についてのわれわれの知識

は少なく妥当な支持条件を合理的に評価することはむずかしいが、やがてこの問題が解決されてはじめて推定値は実測値と十分な一致をみることになるであろう。もちろんこの問題は模型試験に特有な問題ではなく、さらに根本的な問題であるが、このような困難を蔵しているとはいえアーチダムの動的応力算定について模型試験が有力な手段であることは変わらないと思われる。地震応力の解析手段による算定は高速度の計算機械の進歩により近い将来に開拓されると思われるが、現段階では多くを模型実験にたよっている。しかしこれまでの振動台方式では振動数の問題やひずみ測定技術の上で種々の困難があり、一方また多数の施設費を要するので、従来は模型試験も実際にはきわめて簡単なことが行なわれていたにすぎず、最近ようやく本格的施設が電力中央研究所内に完成をみた程度である<sup>(2)</sup>。

生研式試験方法はアーチダムの板状の構造である特長を利用した試験方法であって、在来の方法に比して簡単な施設で、高次までの振動を出しえてしかも容易に堤体のひずみや変位を測定しうる点、および減衰定数の相似を行ないうれば容易に任意の地震波形による地震応力を求めうる点に特長がある。しかもこれによる模型実験の結果は境界条件を忠実に再現し得れば信頼すべき結果を与えるものと考えられる。

最近重要なアーチダムの静的応力の算定にはほとんど常に模型実験が行なわれる。この模型がはなはだしく過少でない限りは生研式動的試験方法をこの模型に應用することができるから、この試験方式は地震応力算定を容易にするものであると考えられる。

この設備の試作には電源開発KKよりの研究費を用い電源部の試作には帝国電波KKをわずらわした。またひずみ測定について大井光四郎氏(東大助教授)は助言を与えられ、模型試験については荒川常昭(日本交通技術)、横井 勇(東大生研)、大多和道子(東大生研)諸氏の協力をうけた。ここに記して厚く謝意を表わすものである。

### 参 考 文 献

- 1) 岡本舜三・加藤勝行・伯野元彦・荒川常昭: アーチダムの振動観測, 生産研究 11巻 12号, 1959.
- 2) 新井義輔・中山謙治: アーチダムの大型振動実験設備, 発電水力 No. 49, 1960.

(原稿受付: 1961.1.14)

## A NEW METHOD OF DYNAMIC MODEL TEST OF ARCH DAM

*By Dr. Eng., Shunzo Okamoto, C.E. Member Katsuyuki Kato,  
C.E. Member, Motohiko Hakuno, C.E. Member*

1. The modal method is an effective one for estimating seismic stresses in an arch dam. However, in order to apply the modal method to the stress analysis of dam, it is necessary to have a good knowledge of characteristics of its normal vibrations. For the purpose of disclosing the characteristics of normal vibrations of lower order, a model test is one of the most effectual methods. In the ordinary procedure of the dynamic test, a model arch dam is mounted on the shaking table and rocked. However, in this case, as the mass of the model dam and its foundation is too large, it is not easy to rock the table rapidly and to reproduce natural vibrations of higher order of the dam. To avoid this difficulty, a new method of dynamic model test, named Seiken Method, has been developed in our laboratory. In the case of the Seiken Method a model is put on a fixed floor. On the surface of the model dam, a dynamic force is applied by means of electromagnetic exciters which are distributed over the surface of the model so as to the each exciter takes the same amount of the model mass in its charge. When applied force is harmonic, the normal vibration can be excited and when seismic force is applied, seismic strain can be reproduced in the model.

2. This method is based on the following principle. Referring to the coordinates, which are fixed to the floor, force acting on the elemental mass of the model, which is mounted on the shaking table, is considered to be composed of two kinds of forces, the inertia force and elastic restoring force. However, if the system is considered, referring to the coordinates which are fixed to the shaking table, an apparent force must be added to each elemental mass of the model. The magnitude of the apparent force is equal to the product of each elemental mass and the acceleration of the

shaking table. Therefore, in order to reproduce dynamic stresses of the model, which is mounted on the shaking table, in the model which is put on the fixed floor, the above mentioned apparent force should be applied to the model. In the case of the Seiken Method, this apparent force is applied by exciters electromagnetically. It is a merit of this method that it is possible to produce high frequency vibrations of the model without using a large driving force and accordingly to use a large scale model in which complicated ground conditions of a prototype can be easily reproduced and moreover it is possible to apply the complicated dynamic forces such as seismic force to the model without difficulty. Fig. 2, in original paper, shows an exciter whose core is attached to the surface of the model by some suitable binding agent. The allowable displacement of the core should be limited within 2 mm to keep the exciting force constant. Figs. 3 and 4 show the arrangement of exciters for giving the horizontal and vertical vibrations to the model. Fig. 5 shows electric networks for driving exciters. A harmonic vibration is made by this electric network and the irregular vibration such as seismic vibration is magnetically recorded on a suitable taperecorder and afterwards is put into the electric network from the taperecorder. Figs. 6 (a) and (b) show the input currents from taperecorder and (a') and (b') are corresponding currents at the exciter. (a') shows current when the exciter is fixed to a rigid wall and (b') shows that when the exciter is attached to the vibrating model dam. Curves (a') and (b') are nearly coincident with each other and because of this agreement it seems that the influence of movement of the core with the model on the modulation of the exciting force is practically negligible.

3. The model dam, 1/50 in scale of the existing arch dam for which we have already performed dynamic tests and observed its dyna-

mic behaviors during earthquakes, was used for our experimental studies. The dam body and the foundation rock are made of a plaster, diatom earth and water in proportion of 1:1:1.76 in weight. Fig. 7 shows response curves of the model dam to the harmonic exciting force and Figs. 9 and 10 show the distribution of deformation and strain of the symmetric and asymmetric normal vibrations of the 1st, 2nd and 3rd order respectively. In Fig. 9, solid lines show radial displacements and dotted lines show tangential displacements. In Fig. 10 solid lines show the strains on the up-stream surface and dotted lines those on the down-stream surface and chain lines, those on the middle surface. Values measured by means of the model are converted to those of the prototype according to the following laws of similitude.

Formula of similitude for time is represented by eq. (5) in order to hold the similitude of natural frequency, and the notations used therein are shown in Table 1. The application of the harmonic force of amplitude  $\eta_m$  and of circular frequency  $\omega_m$  to the model is corresponding to the application of harmonic force of amplitude  $\eta_m/\lambda$  and of circular frequency  $\tau\omega_m$  to the prototype. In this case, harmonic force, whose amplitude is  $\rho_m D_m \eta_m \omega_m^2$  and circular frequency  $\omega_m$ , is applied to the unit area of the model. Therefore, the ratio of the stresses produced in the model and the prototype is given by eq. (7) and that of the strains is given by eq. (8). For instance, when a force applied to the unit area of the model is equal to  $f_m \sin \omega_m t$ , the strain produced in the model is equal to the strain produced in the prototype which is under the harmonic force whose amplitude and circular frequency are given by eq. (10).

4. The observation of earthquake has revealed that the vibration same as the normal vibration of lower order of the existing arch dam generally takes place predominantly and therefore we can generally suppose that the pattern of the seismic strain on the surface of the dam is practically similar to that shown in Fig. (10). Moreover, if necessary, it is possible

to measure seismic stresses directly on the surface of the model dam by applying the electromagnetic exciting force, whose wave form is similar to that of the earthquake motion on the ground, to the model dam, assuming that the influence of the difference of damping constants between the model and the prototype can be corrected. The damping constant of the first symmetric normal vibration of our model is 5%, whereas that of the existing arch dam is about 3% and their difference is not so large that the influence of their difference on the seismic stresses can be theoretically corrected.

However, it is future problem to make the model which has the same damping characteristics of existing dams for all their normal vibrations. Fig. 12 (a) shows the acceleration of earthquake observed at the foundation rock and (b) and (c) show examples of strain due to the earthquake (a) being determined by the model test. From these records, for instance, it can be seen that the maximum seismic arch stress on the up-stream surface is  $6.7 \text{ kg/cm}^2$  and that of on the down-stream surface is  $7.4 \text{ kg/cm}^2$ , when the maximum acceleration on the ground is 100 gals assuming that the damping constant of the dam is 5%.

5. From the above studies, it is seen that this apparatus is able easily to reproduce a high frequency vibration of the dam during earthquake as well as its low frequency vibration and also is able to be used for large scale model test as well as for small scale model test. Moreover, as it is inexpensive, the availability of this new method of dynamic test of model dam for estimating the precise distribution of the seismic stresses on the dam is assured.

Table 1

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $\tau, \lambda, \rho, E$ | : ratios of time interval, length, density and Young's modulus of the model to those of the prototype respectively, |
| $\sigma$                 | : stress,   |
| $D$                      | : thickness of the dam,   |
| $\epsilon$               | : strain,   |
| $y$                      | : displacement,   |
| $l$                      | : length,   |
| $\eta, \omega$           | : amplitude and circular frequency of earthquake motion respectively.   |

Suffixes  $m$  and  $p$  mean the values for the model and prototype respectively.