

# アーチダムの地震動観測

正員 岡 本 舜 三\*  
 正員 加 藤 勝 行\*\*  
 正員 伯 野 元 彦\*\*\*  
 正員 宮 越 義 暉\*\*\*\*

## 1. 振動試験

アーチダムのような複雑な形状をもつ可撓性構造物が地震のような不規則な強制外力をうける場合に生ずる弾性振動を論ずるには modal method が適していることは古くから知られている。ただこの方法を用いるには地震動の性質と構造物の各基準振動の性質が明らかにされていることが必要である。本文は以上についての情報をうるために行なった実在するアーチダムの地震観測についての報告であって調査の対象となったダムの特性

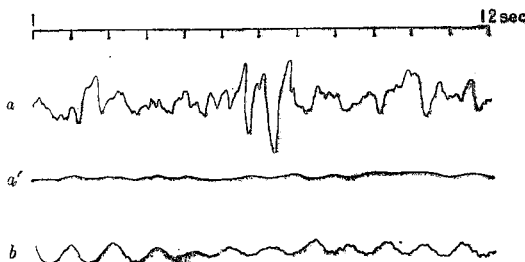
表-1 実測アーチダムの特性

基礎岩盤: 礫岩	越流頂標高: EL. 123.500 m
常時満水位: EL. 125.000 m	設計堆砂面標高: EL. 92.000 m
計画洪水水位: EL. 125.000 m	堤体基準高: 62.000 m
計画洪水量: 3000 m <sup>3</sup> /sec	堤体余裕高: 2.500 m
堤体型式: 変心D-型ア	堤体天端長: 128.692 m
天端標高: EL. 127.500 m	堤体天端巾: 4.399 m
最低基礎標高: EL. 63.000 m	堤体最大厚: 12.408 m

は表-1に示してある。同種のダムに比していちじるしい特徴は、サドルと周辺継目をもつことおよび中腹部に大口径のオリフィス6門を持つことである<sup>2)</sup>。

地震観測に先だちその基本的性質を知るために常時微動の測定と堤体の振動試験を行なった。図-1 a, a' は右岸側河底部堤体寄り岩盤上、b は堤頂門扉巻上機室内における常時微動記録であるが、これによると常時微動はきわめて微弱かつかなり不規則であるが、そのなかに周期1秒前後の長

Fig. 1 Micro-Tremor Record at Dam Site



\* 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  
 \*\*\*\* 関西電力KK建設部

周波の存在が推察される。堤体の振動試験は貯水位標高125 m (常時満水位) と標高112 m (最低利用水位) の場合に行なわれた。後者は水深において全水深の約20%の低下であり、このときの低次基準振動の周期は貯水池空虚時のそれとほとんど差がないことが他の試験例から類推される<sup>1), 9)</sup>。

ダムを起振するには偏心動輪3個をもつ起振機(動輪半径25 cm, 最大回転数12 cps, 最大起振力1.74 t)を用いた。これをダム頂部中央にすえ、ダム軸方向およびこれに直交方向に起振しダムに対称形および逆対称形の振動を生ぜしめた。ダムの振動は電磁式の測定系で測った。感振器の固有振動数は水平動計1.0秒、上下動計1.5秒であって、オシログラフと結んで振動速度が記録される。ダム軸に直交方向の起振力によるダム頂中央の半径方向の変位振巾とダム軸方向の起振力による頂部アーチの1/4断面における半径方向の変位振巾の応答曲線を

Fig. 2(a) Response Curve of Symmetric Vibration

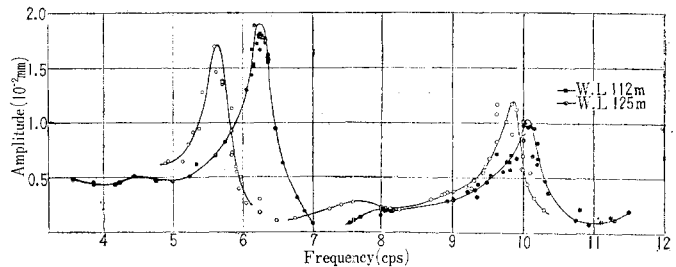


Fig. 2(b) Response Curve of Antisymmetric Vibration

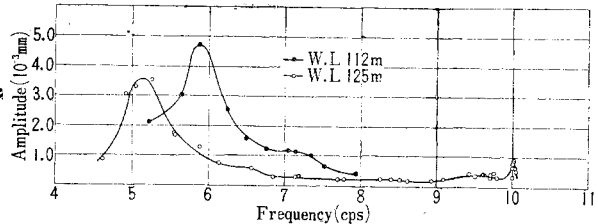


図-2に示す。外力振巾は1 tである。前者を対称後者を逆対称振動とよぶことにする。

おのおのの応答曲線はそれぞれ減衰の少ない2個の振動系の応答曲線の重複なることを示している。一つは1次基準振動他は2次基準振動と考えられ、その固有振動数は6 cps および10 cps 付近にある2個の山によってあらわされる。固有振動数は1次振動については逆対称

振動の方が対称振動より少なく2次振動については両者はほぼ等しい。これは高次基準振動では振動エネルギーのうちアーチ要素の軸圧縮によるエネルギーがかなりの比率を占めることを示すもので、このことから3次振動においては対称振動の方が逆対称振動よりも振動数が小さくなるものと推定される。応答曲線より減衰常数を求

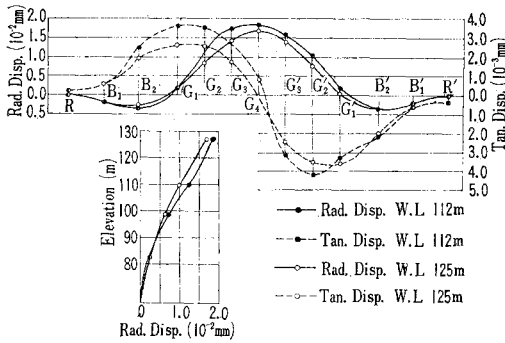
めると表-2のようになる。2次逆対称振動に対する振動数は正確には求められないが、それはかなり小さいと推定される。

振動が共振状態に入ったときの頂部アーチと中央片持ばりの変位は図-3に示されている。1次対称振動の振動形(図-3(a))では半径方向変位は中央断面で最大となる。頂部アーチには1/4断面付近に節があり、その位置は2個の水位に対してほとんど変わっていない。中央片持ばりには節はない。切線方向の変位の最大値は半径方向変位の最大値の約1/5である。2次対称振動の振動形(図-3(b))では中央片持ばりには1個の節があり、頂部アーチには低水時に右岸側

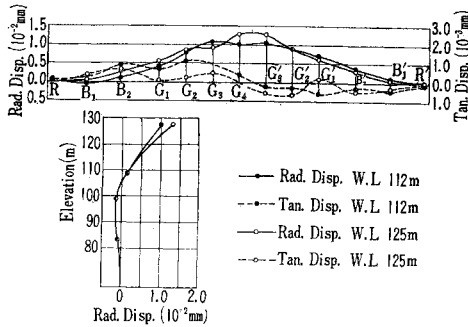
表-2 固有振動数および減衰常数

振動形	次数	貯水位 EL. 125 m			貯水位 EL. 112 m		
		固有振動数	最大振巾	減衰常数	固有振動数	最大振巾	減衰常数
対称振動	1次	5.6 cps	$1.7 \times 10^{-2}$ mm	2.7%	6.2 cps	$1.9 \times 10^{-2}$ mm	2.5%
	2次	9.8	1.2	1.5	10.5	1.04	1.6
逆対称振動	1次	5.2	3.6	4.6	5.9	4.7	3.9

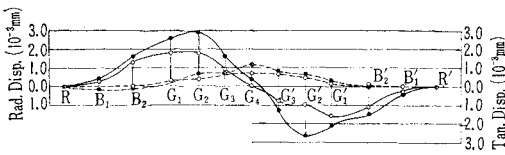
Fig. 3 Modes of Natural Vibrations (a) 1st order Symmetric



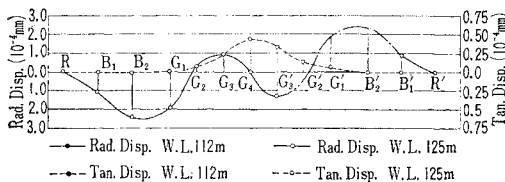
(b) 2nd order Symmetric



(c) 1st order Antisymmetric



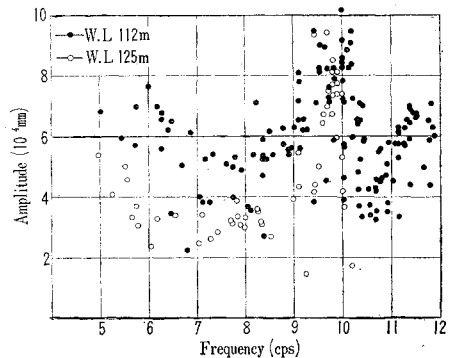
(d) 2nd order Antisymmetric



りには1個の節があり、頂部アーチには低水時に右岸側拱台に近く1個の節がみられるほかには節はみられない。頂部中央における半径方向変位の大きさは1次対称振動の場合の6~8割である。切線方向変位の最大値は半径方向変位の最大値の約1/10となっている。振動形がアーチの2次振動形として普通に推定される形とは異なって節の位置がはなはだしく起拱点近くによっているのはダムが大きなオリフィス孔をもつためであると思われる。1次逆対称振動の振動形(図-3(c))は頂部アーチの半径方向変位について中央に1個の節をもつ。満水時の変位は低水時の変位と形においては同様であるが大きさにおいてはやや小さい。切線方向変位の最大値は半径方向変位の最大値の約1/3になっている。2次逆対称振動の振動形(図-3(d))は頂部アーチの半径方向変位について比較的中央に近く3個の節をもつ。切線方向変位には節はなく、その最大値は半径方向変位の最大値の約1/6となっている。

起振機をダム頂中央にすえ上下方向に振動外力を与えると、ダムを上下方向に起振させることができる。そのとき頂部に生ずる上下方向変位の応答曲線は図-4のようになる。観測値はかなりばらついているが水位112mのとき6.0, 10および11.5 cpsに水位125mのとき5.5, 9.8 cpsに山があることが推定される。2個の低次

Fig. 4 Response Curve of Vertical Vibration



共振振動数は水平駆動の場合のそれと一致していて、この時生じている頂部アーチの水平変位の形は水平駆動によって生ずる変形とほぼ同じである。したがって、これらの2個の周期をもつ振動は水平運動を主とする基準振動が誘起されたもので、これはダムが下流側にそっているために生じた現象と考えられる。11.5 cpsの振動数をもつ起振力によるダムの振動には水平変位はほとんどもなわず鉛直運動が振動の主要部をなしている。

2. 地震観測

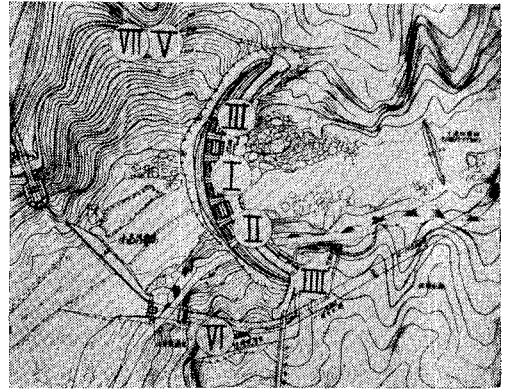
ダムの竣工後間もなく地震観測をはじめ今日におよんでいる。観測の初期においては堤頂中央に石本式3成分加速度計〔固有周期：0.1秒（水平）、0.08秒（上下）、幾何倍率：200（水平上下とも）〕を設置した。数ガル以下程度の加速度をもつ地震動記録がかなり多く得られたが、ここには特別な分析によらずともある特定の周波数の波の卓越を認めうる場合が多かった。表-3にはこの

表-3 堤体上地震加速度の卓越振動周期

月 日	上下方向	水平上下流方向	水平左右岸方向	貯水位標高
1958.12.15	11 cps	— cps	5.5 cps	EL. 119.77
1959. 1. 3	10	5.5	5.0	124.97
3. 3	11	6.0	6.5	111.64
5.22	—	5.5	5.0	125.23
5.26	—	5.5	5.0	125.87
5.28	—	6.0	5.0	124.97
6.28	—	6.5	5.5	116.60
6.28	9	6.0	5.5	116.60
7.12	9	6.0	5.5	118.45
7.29	11	6.0	—	123.23
7.30	11	5.5	5.0	122.76
8. 5	—	6.0	5.0	121.02
8.12	11	10	11	124.82
8.12	11	11	—	124.82
8.23	11	5.5	—	122.85
11.26	11	5.5	—	124.71
11.27	5	5.0	5.0	124.80
12.25	11	—	6.0	124.48
1960. 1.31	9	6.0	5.0	121.70
2. 8	12	6.0	—	119.55
2.17	11	6.0	5.0	117.15
3.17	11	—	5.6	111.48

意味における卓越振動数を示しているが、これには半径方向の水平動には 6 cps、切線方向の水平動には 5~6 cps、上下動には 9~12 cps の振動が卓越している。ついで電磁感振器（固有周期水平動 1.0 秒上下動 1.5 秒）、電磁オシログラフおよびスターターよりなる観測系を追加し詳細な速度記録をとれるように改めた。感振器の設置位置は図-5に示すI~VIである。Iはダム頂中央、IIとIIIは頂部アーチの右側および左側の1/4断面、IVは右岸側拱台背後の岩盤上で標高はダム頂標高より3.5m高く、Vは左岸側拱台より上流側40mにある岩盤上で標高はダム頂標高と同じである。VIは右岸側拱台より約40m上流側の山鼻部の岩盤上にあり標高はダム頂標高より12.5m高い。これらの測点の基礎はコンク

Fig. 5 Installed Points of Electromagnetic Seismometer



リートで作られている。各測点における測定方向は表-4に示してある。

図-6には地震番号 No. 2 より No. 15 までの14個の地震記録が示されているが、横軸は時間(1日盛1.0秒)、縦軸は速度(10<sup>-2</sup> kine)である。

Fig. 6(a)~(c) Velocity Record of Earthquake

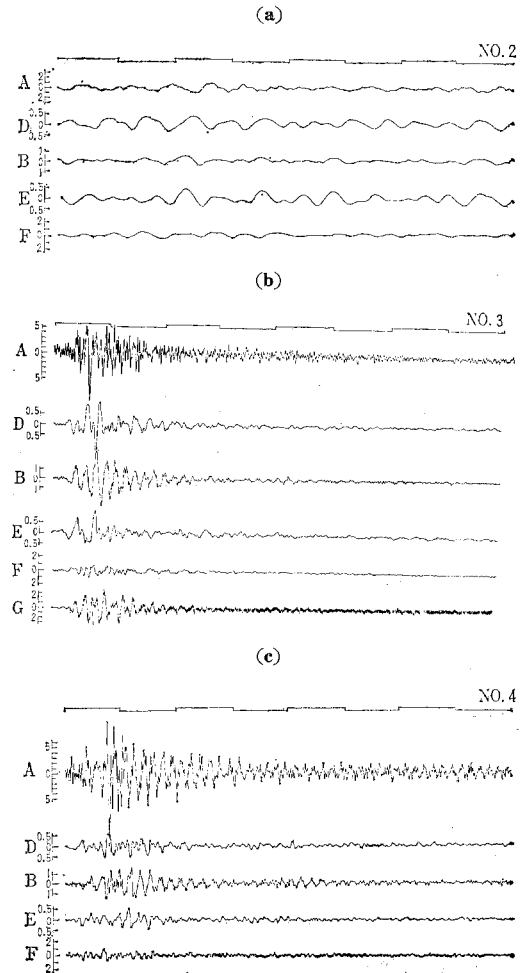


Fig. 8(d)~(n) Velocity Record of Earthquake

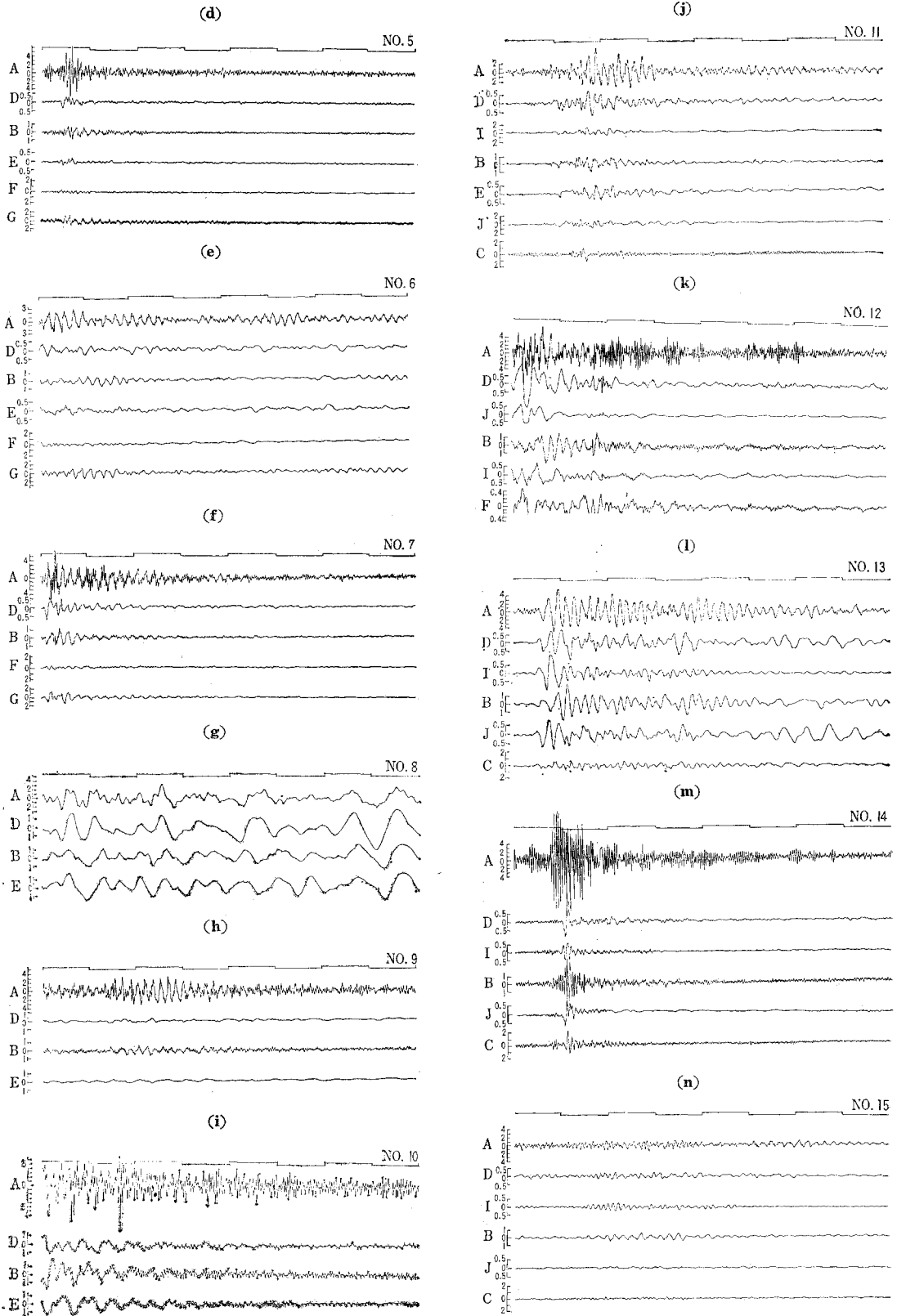


表-4 地震動測点および観測方向

記録記号	測点	位置	感振器	観測方向
A	I	ダム天端中央	水平動	上下流方向
B	I	同上	水平動	左右岸方向
C	I	同上	上下動	
D	IV	右岸側岩盤	水平動	上下流方向
E	IV	同上	水平動	左右岸方向
F	IV	同上	上下動	
G	III	ダム天端左側4分点	水平動	半径方向
H	II	同右側4分点	水平動	半径方向
I	V	左岸側岩盤	水平動	左右岸方向
J	V	同上	水平動	上下流方向
K	VI	右岸側岩盤	水平動	上下流方向
L	VI	同上	水平動	左右岸方向
M	VI	同上	上下動	

岩盤上の地震記録について一般的に認められることははじめに主部とみるべき部分すなわち比較的振巾の大きな部分があり、そのあとに小振巾の振動がしばらく続くことであるが例外的には両者の区別の明瞭でないものもある。No.2, 8 および 13 などはその例であるがこれらはその波形からみて遠地地震の記録と判断される。工学的の重要さからは主部のみに注目すればよいであろう。

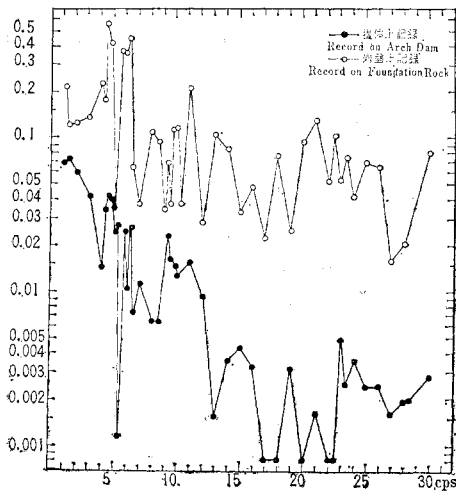
堤体の振動記録については 10 cps をこえるような高周波成分を多数ふくむもの、5 cps 程度の周波成分を多数ふくむもの、それよりさらに小なる振動数の波が主となっているものの3種に大別しうるように見える。それらを代表するものとして No. 6, No. 8 および No. 10 を選んで波形のフーリエ分析を行なった。すなわち  $v$  を記録上の振巾、 $\omega$  を任意の円振動数とするとき

$$A(\omega) = \sqrt{\left[ \int_0^{\infty} v \sin \omega t dt \right]^2 + \left[ \int_0^{\infty} v \cos \omega t dt \right]^2}$$

を  $\omega$  に対して画くと 図-7, 8, 9 となる。ここに白丸は堤頂中央点、黒丸は基礎岩盤上における値である。これ

Fig. 7 Frequency Analysis of No. 6 Record of Earthquake

(a) Component Perpendicular to Dam Axis



(b) Component in Direction of Dam Axis

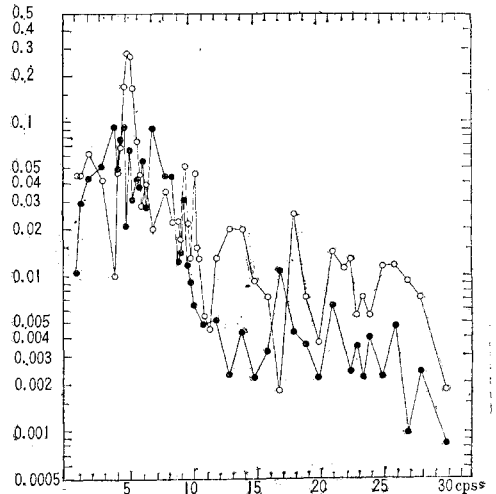
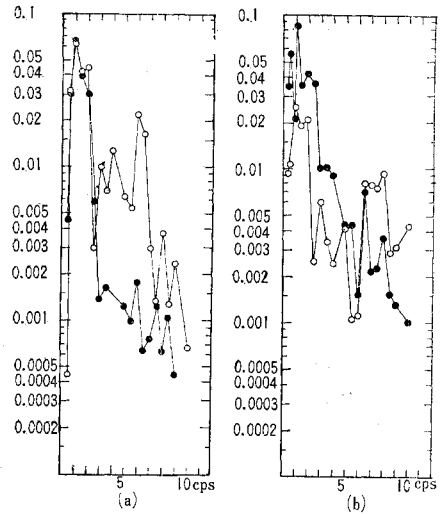


Fig. 8 Frequency Analysis of No. 8 Record of Earthquake

(a) Component Perpendicular to Dam Axis

(b) Component in Direction of Dam Axis



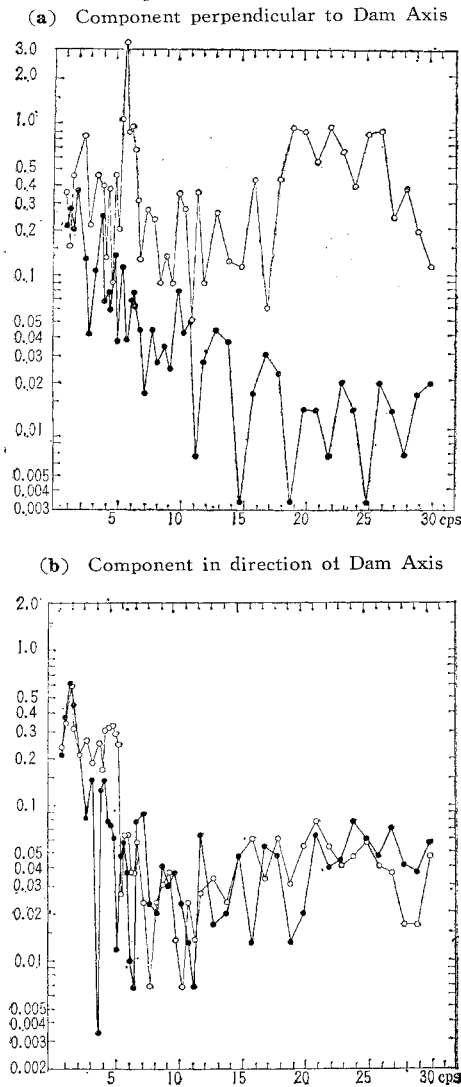
らの図から地震によって堤体には1次および2次の基準振動が卓越することが知られ、また時としては3次程度の高次振動も生じることが推測される。

このとき基準振動の増巾の程度を知ればその減衰常数を求めることができる。地動が河川上下流方向の正弦振動であるとき、その周期がダムの対称形基準振動周期と同じであるときは、該当する基準振動が誘起される。このときダムの天端中央点の半径方向振巾と地動の振巾との間には

$$\frac{v_d}{v_r} = \frac{C_0 \int C_1 dm}{2h \int C^2 dm}$$

なる関係がある。ここに  $v_r$ : 地動振巾,  $v_d$ : ダム天端

Fig. 9 Frequency Analysis of No. 10 Record of Earthquake



中央点の半径方向振巾,  $C_0$ : 基準振動形における天端中央点の半径方向振巾,  $C$ : 基準振動形における各点の変位,  $C_1$ :  $C$ の地動方向の成分,  $dm$ : 堤体の要素質量,  $h$ : 基準振動の減衰常数である。同様に地動が河川左右岸方向の正弦振動であるときは逆対称基準振動が誘起され, このとき堤体の天端中央点の切線方向振巾と地動の振巾との間には

$$\frac{v_d'}{v_r} = \frac{C_0' \int C_1 dm}{2h \int C^2 dm}$$

なる関係がある。ここに  $v_d'$  は堤体天端中央点の切線方向振巾,  $C_0'$  は基準振動形における天端中央点の切線方向振巾である。模型試験<sup>6), 8)</sup>を併用して上記の諸値を計算すると表-5となる。ここに  $v_d/v_r$  の値は共振点付近

表-5

基準振動	$\int C_0 C_1 dm$	No. 6		No. 8		No. 10	
		$v_d/v_r$	$h$	$v_d/v_r$	$h$	$v_d/v_r$	$h$
対称1次	1.21	18	3%	12	5%	30	2%
対称2次	0.807	13	3%	—	—	10	4%
対称3次	0.62	—	—	—	—	—	—
逆対称1次	1.29	7	9%	共振せず	—	6	11%
逆対称2次	0.143	—	—	—	—	—	—
逆対称3次	0.166	—	—	—	—	—	—

の平均値である。こうして得られた減衰常数の値を表-2の値に比すると, 対称1次振動においてはほぼ一致し逆対称1次振動においてやや大きい。

これまでの所論は図-6に示したたかだか2kine程度の微震についてであって, さらに強い地震についてどうなるかは問題である。完全なる弾性的挙動では振巾の大小はその性質に影響しないが, 実在するダムについてはその点も実証の必要があり, 強震の記録が望まれる所以である。1960年12月26日午前10時45分の地震は図-6に示すものとは格段に大きな振動を堤体に与えた。この地震は深さ60km, 東経136°2', 北緯34°1', 尾鷲市付近)に震源をもち震度は京都, 津にてIV, 奈良, 和歌山, 白浜, 洲本, 潮岬, 亀山, 徳島, 彦根, 豊岡, 尾鷲にてIIIと報ぜられている。地震観測せるダムは震度IIIの地域にあり, 震源より約75km西南にある。地震計はダムと岩盤上に配置されていたが, そのあるものは

Fig. 10 Acceleration Record of No. 16 Earthquake

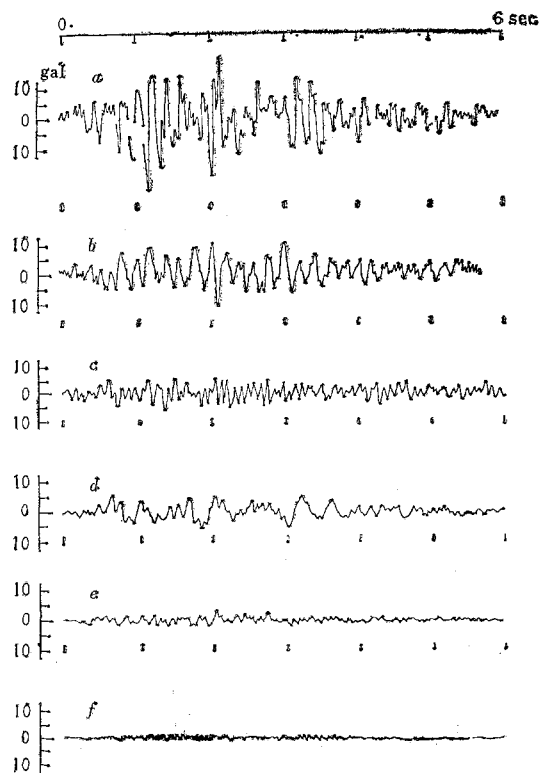


Fig. 11 Velocity Record in Vertical Direction of No. 16 Earthquake (Time : sec, Velocity :  $10^{-2}$  kine)

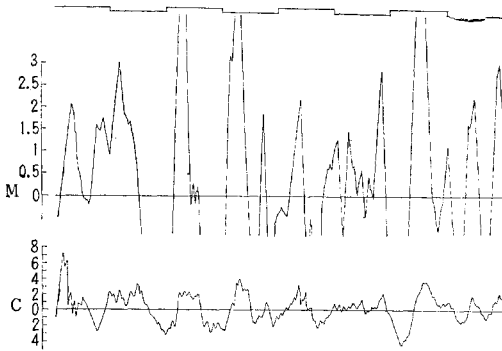
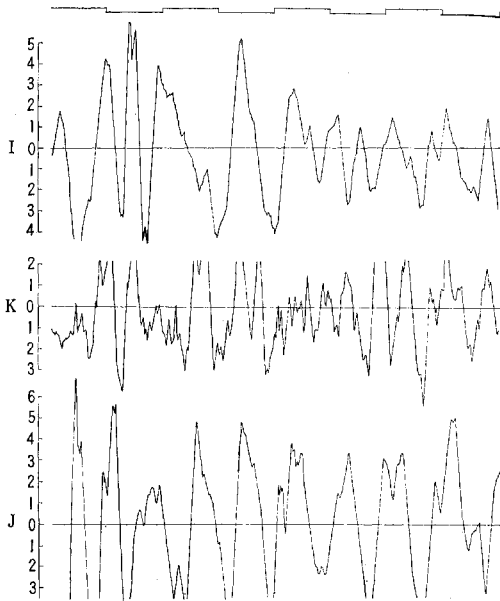


Fig. 12 Velocity Record in Horizontal Direction of No. 16 Earthquake (Time : sec, Velocity :  $10^{-2}$  kine)



不調のため記録をとり得なかった。しかしこの程度の地震は頻発するものではないからとり得ただけの記録からなるべく多くを学びとらねばならない。

図-10は加速度記録であって a,b,c は堤頂中央測点, d,e,f は右岸側岩盤におけるそれぞれダム軸直交方向水平動, ダム軸方向水平動および上下動で時間単位は秒, 加速度単位は gal である。図-11,12 は上下動および水平動の速度記録の一部分であるが, 主部の記録はほとんどスケールアウトし, この図の起点は地震動主部開始後16秒を経た時刻にあっている。地震の主部と認められる部分の継続時間は約4秒であって主部には堤頂中央部の振動に表-6に示すような特定の振動数をもつ振動の卓越が認められる。これは前述の微弱な地震動の際にも認められたと同じく,1次の対称および逆対称と上下動の

表-6

測点および振動方向		振動数	最大加速度
水平動 (上下流方向)	堤頂中央	5.5 cps	18.4 gal
	右岸側岩盤	9.2	5.0
水平動 (左右岸方向)	堤頂中央	5.4	10.7
	右岸側岩盤		2.6
上下動	堤頂中央	12.0	6.3
	右岸側岩盤	約 25	

基準振動が誘起されているものと解される。最大加速度を表示すると表-6のごとくなり, 岩盤における値に比して堤頂中央点の値は3.6倍になっている。図-11の上下動記録に認められる性質は岩盤にも堤体にも周期1秒程度の長周波の波形が卓越していること, さらに堤体には約12 cpsの高周波がこれに乗っていることである。前者は堤体において増巾されている傾向はなく岩盤振動自身のもつ性質と考えられ, 後者は前述の堤体の上下振動基準振動の誘起されたものであると解される。前者は基盤の特性か地震動の性質か不明であるが, その周波数が常時微動においてしばしばあらわれた波形の周期と一致していることは深い関心をひく点である。図-12の水平動のKとJは対岸の2測点における同方向の振動記録であるが低周波の振動においては両者は振動方向および波形においてはほぼ一致している。しかしKには約11 cpsの小振動の高周波の振動があり, JにはそれがなくJには約0.9秒の周期をもつ振動が顕著に現われている。Jと同一測定で方向がこれと直交しているIについても高周波振動は認められない。

### 3. 考 察

筆者等がこのような実測に着手するに当たって, アーチダム設計条件について確認しておきたい若干の事項があった。観測結果は必ずしも十分とはいえないがかなりの情報を与えてくれている。それは次の諸点である。

(1) 岩盤の振動は左岸と右岸とで異なるか 地震時に兩岸の変位にいちじるしい差があれば堤体地震応力に影響があるので, この点は一般に注目されている。われわれの観測したダムでは兩岸の地震動が同時に記録されたものは河流方向について No. 11, 12, 13, 14, 16, 対岸方向については No. 11 である。それによるといずれの場合にも波形はほぼ同形で相互間の位相差はない。一般に岩盤は谷に望んで複雑な起伏をしているから突出部には局部的に固有な振動がおこることはあり得ると思われ, それが左右岸の変位の多少の差となってあらわれているのではないと思われるが, この記録の範囲では両者の間に顕著な位相差を生ずるには至っていない。同様な結果は最近電源開発KKによって得られた田子倉ダム基礎岩盤における地震観測からも得られている。

(2) 岩盤振動に卓越周期があるか 主部の波形は比較的長周期大振巾の波に短周期小振巾の波が重なって

るのが普通であるが両種の波ともその生起について顕著な規則性はなく、特に前者の波の生起は全く不規則のように思われる。周期は区々で長周期波では 1~10 cps, 短周期波では 9~19 cps に涉っている。長周期大振巾の波と短周期小振巾の波の加速度を比較すると前者は後者の数倍である場合が多い。上下動についても水平動と同様に特に規則的な波形はなく長周期波で 1.6~10 cps, 短周期波で 11~17 cps に涉っている。

以上の結果からは特にこの岩盤地帯に顕著な卓越周期があるとは認めにくいのだが1個の資料ではあるが No. 16 の弱震記録は若干の問題を提起している。すなわち岩盤には上下方向に約 1 秒、水平方向に約 0.9 秒の振動が卓越していて、しかもこのような長周期の波動は常時微動にしばしば現われていることである。貯水の静振の周期はこれよりはるかに長いことを考慮すれば地盤に固有な周期であるかも知れない。また右岸側岩盤上測点VIにのみ認められる高周波振動はこの部分が突出した山鼻であり、風化による表面層によるかあるいは片持ばり状の地形による固有振動であるかも知れない。いずれも今後の資料の蓄積をまって明らかにされる問題である。以上の結果を総合してみると従来応々にして信ぜられているが山中部では地震時に短周期の波動が卓越すると速断することには無理があり、ダム地点の地震動の性質は工事着工前に数年間地震観測を行ないその結果から判断すべきものと思われる。

(3) 上下動は水平動より小さいか 岩盤上の記録に

ついて上下動と水平動の最大速度振巾を比較してその比を表-7に示した。波形からみて、No. 2 は遠地震記録その他は近地震記録と思われるがそのいずれに対しても上下動と水平動の大きさの間に顕著な差異は認めにくい。

表-7 岩盤上における水平動と上下動の比

地震番号	水 平 動				上下動
	D	E	I	J	
2	0.64	0.73			1.0
3	1.1	1.1			1.0
4	0.88	0.75			1.0
5	1.5	1.0			1.0
6	2.0	1.5			1.0
7	3.5				1.0
12	3.0		1.4	1.0	1.0

(4) 地震時に堤体に主としておきる振動形はおおむねいかなる形であるか 表-2, 表-6 からみると地震時に堤体に主として誘起されているのは水平にも上下にも低次の基準振動である。そのうち工学的に重要なのは1次振動であると思われ、われわれの観測では対称形のものが卓越している場合が多い。しかしほかのダムでの研究では1次逆対称振動の卓越が報告されていて対称逆対称のいずれが主に現われるかは堤体の形状によると考えられる。この考えによれば地震時の設計条件としては現行方法とは反対側の極端なる場合を想定して基礎部を不動としダムの変位を基準振動形に一致するとおく方が適當のように思われ、このときは在来の動水圧の計算の仮

表-8 アーチダムの振動減衰常教

ダム名	高さ	堤頂長	堤厚	基盤	振動数	減衰常教	振動形	測定方法	観測者
佐々並	67.4 m	127.3 m	2.4~8.8 m	石英斑岩	4.3 cps	3 %	逆対称1次(満水時)	振動試験	電研 <sup>(2)</sup>
					5.5	1.8	同上(低水時)	〃	
					5.5	2.0	対称1次(満水時)	〃	
					6.7	1.8	同上(低水時)	〃	
					6.8	3.7	対称2次(満水時)	〃	
					8.7	2.0	逆対称2次(満水時)	〃	
上椎葉	110.0	310.0	7.0~27.7	硬砂岩	3.8		対称1次(満水時)	〃	電研 <sup>(4)</sup>
					5.3	3.5~4.5	対称3次(満水時)	〃	
					6.3	3.5~4.5	同上(低水時)	〃	
					4.3	4~5	逆対称2次(低水時)	〃	
					4.7	3.5~4.5	同上(低水時)	〃	
櫛俣	14.0	72.4	0.6~1.6	石英粗面岩	12.5	8.3	対称(低水時)	〃	東京電力 <sup>(1)</sup>
					10.8	10.1	対称(満水時)	〃	
					17.5	10.0		地震観測	
雲川	39.0	95.0	2.84~11.0	硬閃緑岩	9.2	4.4	逆対称1次(満水時)	振動試験	東大生研 <sup>(3)</sup>
					12.1	2.3	対称2次(満水時)	〃	
殿山	62.0	128.7	4.4~12.4	礫岩	5.6	2.7	対称1次(満水時)	〃	東大生研
					6.2	2.5	同上(低水時)	〃	
					9.8	1.5	対称2次(満水時)	〃	
					10.5	1.6	同上(低水時)	〃	
					5.2	4.6	逆対称1次(満水時)	〃	
					5.9	3.9	同上(低水時)	〃	
						2~5	対称1次	地震観測	
						3~4	対称2次	〃	
						9~11	逆対称1次	〃	



定に再考の余地が生ずる。とくに地震の主振動方向が左右岸方向である場合在来の考え方ではダムは左右岸方向にのみ動くことになるが、前記の考え方では1次逆対称振動が誘起され、半径方向にも大きな変位を生ずるので動水圧計算の仮定に疑義を生ずることになるのである。

(5) 堤体に生ずる上下動の性質 地震によるダムの上下動は従来は水平動に対するほど重視されていなかったが、アーチダムのように張応力が問題になる構造物ではその検討が必要である。地震観測の結果は上下動についても堤体の縦振動としての共振現象が存在することを示している。したがって上下動による応力もまた動的考察によって評価せねば過少評価に陥るおそれがある。

(6) 減衰常数の大きさ 減衰常数について従来発表された値は表-8のようである。その正確な評価は振動勢力の逸散を径路別に分析しえてはじめてなしうことで、今日まだその段階に達せず、したがって多くの資料を集めることが必要である。本観測もまた表-8に掲げたように若干の資料を加えることができた。これで見ると実在するアーチダムの減衰常数は2~11%の範囲にあり、高さの高いダムではいくぶん小さい値をもつ傾向があること、逆対称振動では対称振動におけるよりいくぶん大きい値をもつ傾向があることなどが認められる。

減衰常数の値は一般に小さくその結果頂部中央点のように堤体のうちで最も動きやすい部分の震度は地盤震度の10倍程度に達する場合もあることは注目に値する。

この研究には関西電力KKの非常なる御協力をえた。また同社の依頼研究費、東大生研特別研究費、文部省科学研究費(総合)を使用した。実測および整理については榎薫氏(関西電力)、荒川常昭氏(日本交通技術KK)横井勇氏(東大生研)、大多和道子氏(東大生研)の非常な助力をうけた。ここに厚く御礼を申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) 東京電力KKアーチダム研究会：アーチダムの実験的研究(英文)、第5回国際大ダム会議々事録、1955
- 2) 関西電力KK：殿山発電所工事誌、1959
- 3) 岡本・加藤・佐藤・荒川：雲川アーチダム振動試験報告、1958
- 4) 高橋・堤・増子：アーチダムの振動性状(英文)、電力技術研究所技術報告、C-5905、1959
- 5) 建設技術研究所：アーチダムの振動試験(英文)、1960
- 6) 岡本・高橋：地震時におけるアーチダムの挙動(英文)、第2回世界地震工学会議々事録、1960
- 7) 電力技術研究所：佐々並川アーチダムの振動性状、電研報告書番号II第6002、1960
- 8) 岡本・加藤・伯野：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  
(原稿受付：1961.2.13)

## OBSERVATION OF EARTHQUAKES ON AN ARCH DAM

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

The modal method is one of the appropriate methods to analyse elastic vibrations of an arch dam due to irregularly oscillating forces such as earthquakes. In case of applying this method to the analysis, the characteristics of earthquake motions and the properties of natural vibrations of the structure must be made clear. For this purpose vibrations of an existing arch dam during earthquakes were observed and in addition, measurements were made while the dam was excited into motion by artificial means in order to develop a better understanding of the motions of the dam caused by earthquake.

#### **Vibration test of the dam**

The dam in question is a dome type dam, 62 m in height and 128.7 m in crest length. Vibration generator was installed at the center of the crest of the dam and the oscillating horizontal forces in the direction of dam axis, those in the direction perpendicular to the dam axis and the oscillating vertical forces were applied to the dam. Response curves of the vibration of the dam under these exciting forces are shown in Figs. 2 and 4 respectively (see original paper). In these figures, the curves connecting white circles are the response curves, when the reservoir is full and the curves connecting black circles are those, when the reservoir is at the low water level.

Frequencies of the lowest two natural vibrations of the dam were thus determined and given in Table 2, and their deflection modes are shown in Fig. 3. In these natural vibrations, the horizontal components of deflections are much larger than vertical ones. As seen in Fig. 4, these two modes of vibration appeared in the motions excited by the vertical oscillating force and this is presumably caused by the double curvatures of the dam.

The natural vibration of frequency 11.5 cps which is shown in Fig. 4, is a vibration in which the vertical components of deflections are much

larger than horizontal one and it is appropriate to call it vertical vibration practically.

#### **Observation of earthquakes on the arch dam and its foundation rock.**

Seismometers of Ishimoto type and electro-magnetic type were installed on the crest of the dam and its foundation as shown in Fig. 5. Some earthquake records obtained are shown in Fig. 6, and No. 6, No. 8 and No. 10 records were analysed by Fourier analysis (see Fig. 7~9). Comparing these results with those of vibration tests, it is disclosed that the normal vibrations of the low order are usually predominant in earthquake motions of the dam and sometimes high frequency vibrations are excited, too.

The damping constants in the dam was evaluated from the dynamic magnification of the natural vibration as well as from the breadth of the resonance curves. The ratio of actual damping to critical damping thus determined are given in Table 2.

These results were drawn from the observations of weak shocks of earthquakes, whose velocity is at most 2 kine. Since the dynamic properties of structures presumably depend upon the amplitude of the motion, the records of vibration of the dam by strong motion earthquakes are keenly wanted. In last December, a strong earthquake occurred near the dam site. Fig. 10 shows its acceleration records. (a), (b) and (c) show accelerations at the crest of the dam in the horizontal direction perpendicular to the dam axis, those in the horizontal direction along to the dam axis and those in the vertical direction. (d), (e) and (f) show accelerations on the foundation in the direction corresponding to (a) (b) and (c), Figs. 11 and 12 show a part of velocity records on the dam during this earthquake.

From these records it is recognized that in this case the natural vibration of the lower order

in the horizontal and vertical direction are also excited similar to the case of weak shocks.

### Discussion

According to these studies the following information about a design criteria of an arch dam may be drawn.

1. Is there a phase difference between the motion of both abutments during earthquakes?

This problem is noticed by many people since a much difference of the displacement of each abutment considerably affect the dynamic stresses in an arch dam. There is hardly found any remarkable difference between earthquake motion in each abutment in our records.

2. Is there a predominant frequencies in earthquakes on the rocky area?

In our records, the frequencies of earthquake motions on the rock foundation were scattered over wide range, so it seems that there are no predominant frequencies in this rocky area. However, it is noticeable that the frequency of 1 cps, which is found predominantly in records of microtremors at this site, also predominates in the earthquake motion as shown in Fig 6. No. 16. Whether this is the predominant period of the rock foundation or not should be discussed after many records are obtained.

3. Is the magnitude of the vertical component of earthquakes smaller than that of the horizontal

one?

Table. 7 shows the ratio of the velocity amplitude of the horizontal component of earthquakes on the foundation to that of the vertical one. Remarkable difference is not found between them.

4. What kind of modes of the vibration is apt to be excited in an arch dam during earthquakes?

From Tables 2 and 6, the lower order natural vibrations are usually excited both in the horizontal and the vertical direction. Among them for engineering purposes the 1st order vibrations are thought to be most important.

5. Is there any resonance of the vertical vibration in an arch dam during earthquakes?

Results of the earthquake observation shows that there exists also a resonance phenomenon in the vertical vibration of the arch dam which is a kind of extensional one.

The influence of the vertical vibration cannot be underestimated for a design of an arch dam.

6. The values of damping coefficients.

The values which have been collected so far in Japan are shown in Table 8. They are 2~11% and the values of high dams are slightly smaller than those of low dams and those of the symmetric vibration are apt to be slightly smaller than those of the unsymmetric one.