

アーチダムおよび基礎上の地震動観測

OBSERVATION OF EARTHQUAKES ON AN ARCH DAM AND ITS ABUTMENT

岡本 舜三*・伯野 元彦**
 加藤 勝行***・大多和 道子****
 By Shunzo Okamoto, Motohiko Hakuno
 Katsuyuki Kato and Michiko Otawa

1. 概 説

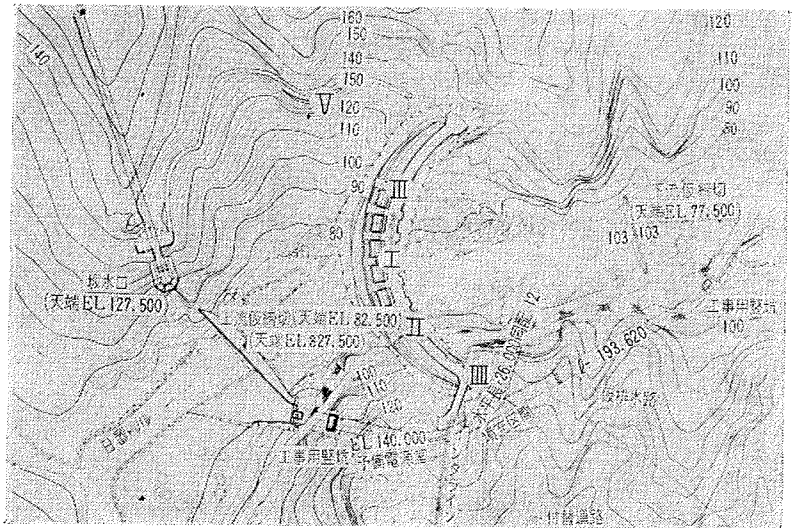
前報¹⁾に報告したように筆者らは 1959 年末から高さ 62m のドーム型アーチ ダムの堤体上および基盤上に地震計を設置して地震動観測を続けてきたが一応観測を終ったので 1963 年 3 月電磁式地震計を撤収した。その後は比較的大きな地震動のみについて残置された石本式加速度計によって管理者が観測を続けている。本文はこの期間に電磁式地震計によって得られた記録を整理したものである。

地震計を設置した位置は図一 1 および 表一 1 に示す I~Ⅷであり、これらの測点の基礎はコンクリートで作られている。

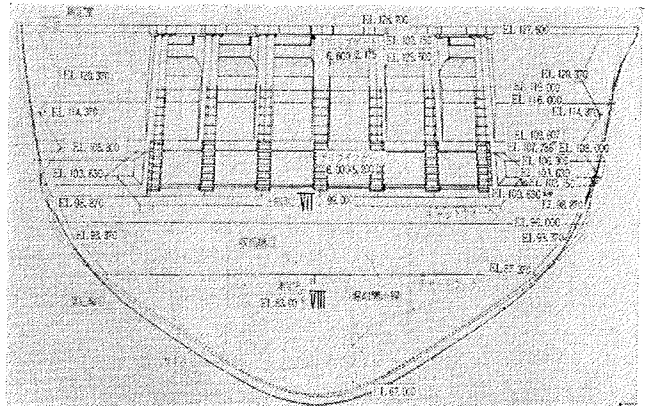
測定系は電磁式地震計とオッシロ グラフよりなる。オッシロ グラフは地震動の発生とともに自動的に駆動される。しかしこの駆動装置は地震発生時刻の自記装置および自動感度切換装置をもたなかった。そのため、とくに大きな地震のほかは発生時刻を知り得ず、したがって震源、規模などを調査するこ

とができなかった。また振幅の大きい地震に対してはしばしば記録が紙外にはみだし主部の記録をとりえない場合があった。地震計の固有振動周期は水平 1.0 秒, 上下 1.5 秒であり, オッシロ グラフ 振動子の 固有振動数は 30 cps である。検定によればこの測定系は 3~15 cps の範囲においては速度に対して一定の感度をもっている。

図一 (a) 地震計設置位置図



図一 (b) 地震計設置位置図



表一 1 地震計設置位置

I	: ダム頂部アーチ中央 (E.L. 127.5 m)
II	: ダム頂部アーチ 1/4 点 (右岸側)
III	: 同上 (左岸側)
IV	: 右岸アバットメント背後の岩盤 (E.L. 131.0 m)
V	: 左岸アバットメント上流 40 m の岩盤 (E.L. 127.5 m)
VI	: 右岸アバットメント上流 40 m の岩盤 (E.L. 140.0 m)
VII	: クラウンカンチレバー下流面上部測定坑 (E.L. 99.0 m)
VIII	: 同上下部測定坑 (E.L. 83.0 m)

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所長

** 正会員 工博 東京大学講師 生産技術研究所

*** 正会員 東京大学生産技術研究所

**** 東京大学生産技術研究所

地震計によって測定せる地動の方向、観測せる期間および得られた記録を整理する場合の記号を一括して表一2 に示した。

表一2 地震計要項および地震記録記号一覧表

設置位置	測定方向	地震計(周期)	ガルバ(振動数)	観測期間	地震記録記号
I	河流方向	電磁式速度計(1.0秒)	30A(30 cps)	1959年7月-1963年3月	DCS
I	ダム軸方向	同上	同上	同上	DCA
I	上下方向	同上(1.5秒)	同上	1959年10月-1963年3月	DCU
II	半径方向	同上(1.0秒)	同上	1959年10月-1960年8月(1962年8月-1963年3月)	DRQ
III	半径方向	同上	同上	同上	DLQ
V	河流方向	同上	同上	1960年8月-1963年3月	RLS
V	ダム軸方向	同上	同上	同上	RLA
IV	河流方向	同上	同上	1959年7月-1960年11月	RRS-1
IV	上下方向	同上(1.5秒)	同上	同上	RRA-1
IV	上下方向	同上(1.5秒)	同上	1959年10月-1960年11月	RRU-1
VI	河流方向	同上(1.0秒)	同上	1960年11月-1963年3月	RRS-2
VI	ダム軸方向	同上	同上	同上	RRA-2
VI	上下方向	同上(1.5秒)	同上	同上	RRU-2
VII	河流方向	同上(1.0秒)	同上	1962年8月-1963年3月	DCM
VII	河流方向	同上	同上	同上	DCB

観測期間中にかなり多数の地震が記録されたがそのうち主要なもの 28 地震(表一3)について主部を整理することにした。記録が紙外にはみ出し主部が整理できなかった場合には主部につぐ部分を整理した。表一3 第3欄

表一3 地震記録一覧表

周分期別	周分	地番	最大速度(kine)	発生年月日	貯水位	VI 整理された記録															
						DCS	DCA	DCU	DRQ	DLQ	RLS	RLA	RRS-1	RRA-1	RRU-1	RRS-2	RRA-2	RRU-2	DCS	DCB	
A	L	28*	12.9	1962.12.26		○															
		32*		1961.2.11		●	●	○				○	○								
		42*				●	●	●				●	●								
	46	19.9以上	1963.3.27	●		●	●				●	●									
	62(前半)			●		●	●				●	●									
	62(後半)	10.8	〃	●		●	●				●	●									
M	44	10.0		●	●	●				●	●										
	53	13.3以上	1962.9.8	●	●	●				●	●										
	55		1962.10.7	○	○	○	○	○	○												
B	L	5	24.7	1959.9.24		●	●					●	●								
	48	6.03		○	○																
	M	40	3.96	1961.6.12		●	●					●	●								
59	4.57		●	●	●				●	●											
S	31	2.37	1961.2.7		●	●	●														
C	L	16	1.55			●						●									
	M	2	1.32	1959.8.23		○	○						○	○							
		7	0.31	1959.11.29		○	○							○							
		13	1.16	1960.5.11		●	●		●	●			●								
		22	0.84		●	●	●				●	●									
		37	1.30	1961.3.1		○	○	○													
	S	6	0.75	1959.11.18		○	○						○								
		8	1.33	1960.3.11		○	○						○	○							
		9	0.59	1960.3.16		○	○						○	○							
		10	1.20	1960.3.18		○	○						○	○							
19		1.00	1960.8.9		○	○	○					○	○								
25	0.95		○	○	○						○	○									
29	1.38		○	○	○								○	○	○						
33	0.36	1961.2.11	○	○	○								○	○	○						
34	0.35	1961.2.14	○	○	○								○	○	○						

に*印を付したのがそれである。表一3には地震を主部振動の大きさおよび振動数別に分級してあるが、ここに地震動の大きさについては左岸岩盤上(それを欠く場合は右岸岩盤上)の河流方向の最大速度が7kine以上のものをA級、7~2kineのものをB級、2kine以下のものをC級とし、振動数については主振動の振動数が2cps以下のものをL組、2~5cpsのものをM組、5cpsをこえるものをS組とした。これらの大きさおよび振動数はすべて記録から視察によって判別したものである。これらの地震のうち7地震については必要な関連事項を調べることができたのでそれを表一4に示した。

表一4

地震番号	発生年月日	震央	M	震央距離
28	1960.12.26	34°2'N, 136°2'E	6.0	80 km
32	1961.2.11	33°53'N, 135°36'E	—	20
40	1961.6.12	33°57'N, 135°20'E	—	36
42	1962.1.4	33°38'N, 135°13'E	6.4	32
44	1962.1.4	33°41'N, 135°18'E	—	25
53	1962.9.8	33°47'N, 134°58'E	4.6	55
55	1962.10.7	33°39'N, 135°21'E	4.7	20
62	1963.3.27	35°47'N, 135°46'E	6.9	230

記録の整理は2個の方法によった。1つは記録を視察することによって波形の性質および波形相互の間にある

表-5 ダムの振動増幅率および減衰定数

基準振動 次数	固有 振動数	DCS/ RLS	修正係数	基準振動 の増幅率	減衰定数 h	h'
対称1次	5.8 cps	25	2.0	12.5	0.04	0.025~0.027
対称2次	10.5	10	0.807	12.4	0.04	0.015~0.016
逆対称1次	5.3	5.0	1.29	3.88	0.13	0.039~0.046

関係を見出すことである。他の1つは波形をフーリエ分析し、スペクトルの性質およびスペクトル相互間の関係を見出すことである。後者の場合には地震動主部をふくむ8~12秒間をとり、その前後の振動はないものと仮定してこの部分の波形をフーリエ積分で表わしスペクトルを画いた。このとき円振動数 ω に対する速度スペクトルは次式によって計算した。

$$\frac{1}{\pi} \sqrt{\left(\int_0^T f(t) \cos \omega t dt\right)^2 + \left(\int_0^T f(t) \sin \omega t dt\right)^2}$$

ここに $f(t)$ は得られた記録による地震動速度、 T は整理区間の長さである。分析は $f(t)$ の間を約1/50秒ごとによみとって行なわれたので2/50秒より長い周期をもつ波の成分は分析しうるはずである。記録のうちフーリエ分析の行なわれたものは表-3に黒丸をもって示し、行なわれなかったものは白丸をもって示した。

得られた地震記録からダムおよび岩盤の地震動について種々の知識をうる事ができる。ここには主として兩岸の岩盤の振動の差異、基盤上における地震動の性質、ダムの主要なる固有振動周期、ダムの振動減衰定数について注目した。これらはいずれも前論文¹⁾においてもふれた問題であるが、後に追加された資料をも参照して再び考察を加えたものである。これらの考察のはじめに断っておかなければならないことは地盤の地震動の性質は個々の地震によってかなりの差があり、したがって以下にのべる性質は平均的な性質であって、実際にはこれからはずれる例が少なからずあることである。

2. 兩岸の基盤上における地震動の相違

ダムがまたがっている兩岸の岩盤上で観測された地震動相互の間に差があるかどうかについて調査した。前論文までの結果では兩岸における地震動波形はほぼ同形で位相差は認めにくく、ただ高周波領域においてのみ右岸に若干の卓越が認められていた。今回の調査によっても兩岸は低周波領域においてはほぼ同様の振幅をもって振動して

いる。兩岸の位相差については、その後行なわれた他のダム地点における観測ではかなり顕著なものが認められた例があるが²⁾ 本観測地点ではやはり顕著な差はみられなかった。しかし高周波領域における兩岸の振動状況の相違はかなり顕著であってそれをフーリエ分析の結果からみると図-2のごとくである。図-2は兩岸岩盤上の地震動速度の周波数別の成分の比を示したもので図の黒丸はA級の地震、白丸はB・C級の地震に関するものである。大丸印は黑白合わせた記録についてとった相乗平均値である。これで見ると河流方向の地震動については約4cpsより長い波では両者にほとんど差はないがそれより短い波については一般に右岸の地震動振幅は左岸のそれより大きくその比は2~3となっている。また河流直交方向の地震動についても河流方向のそれとはほぼ同様の傾向が認められる。

右岸と左岸は地質的にはよくもっていても堅硬な礫岩よりなる。しかし地形は異なっていて地震計設置位置は右岸は突出部であり左岸は反対に凹部である。この地形の差が兩岸の地震動の高周波領域での差を生じた一因ではないかと推察される。山の突出した部分では波動

図-2 (a) 兩岸岩盤上における河流直交方向地震動の周波別成分化

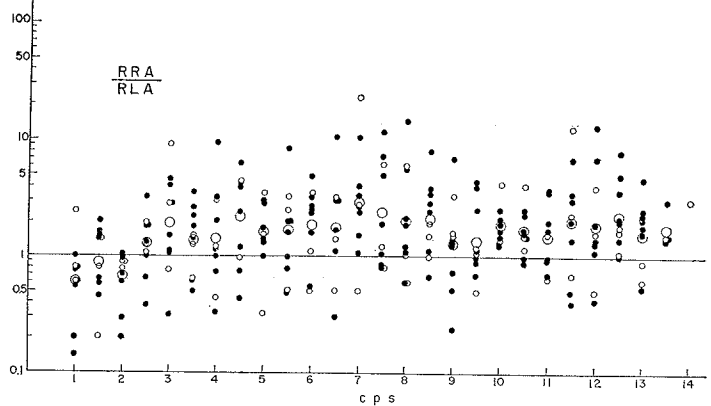


図-2 (b) 兩岸岩盤上における河流方向地震動の周波別成分化

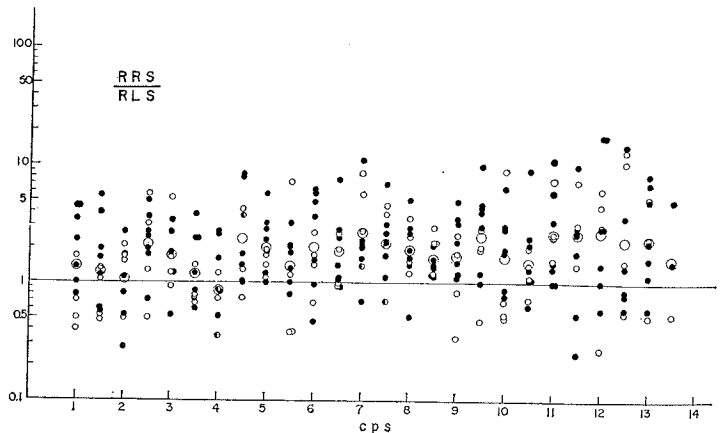
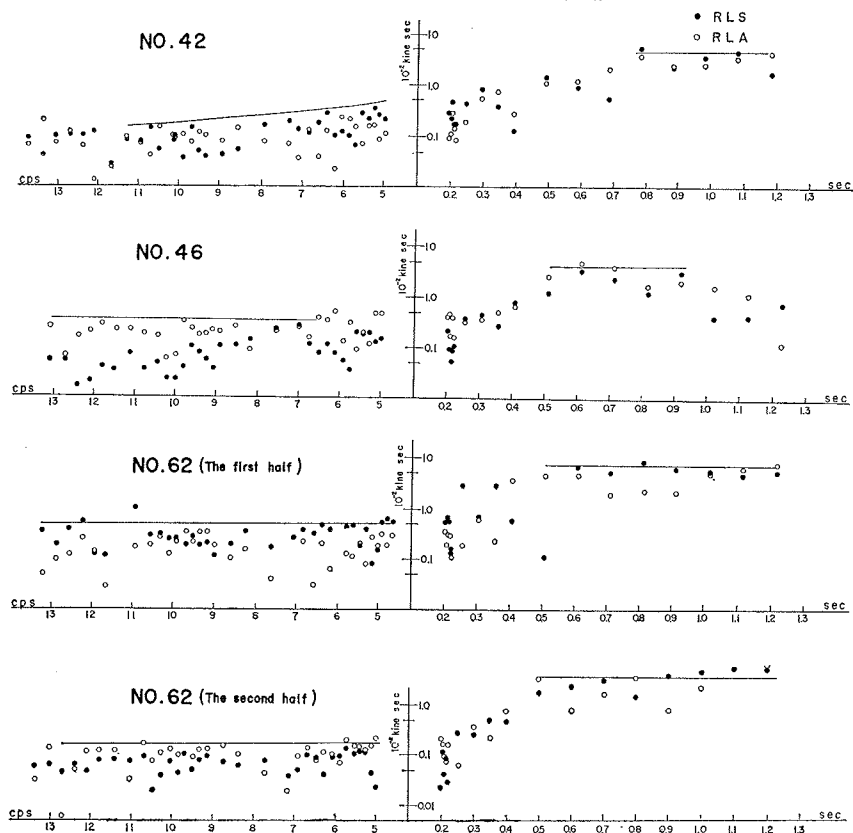


図-3 岩盤上地震動速度スペクトル (A級)



の反射を考えると場所によって特定の周期の波の振幅が大きくなることはありうべきことであり、それがここに現われたのではないと思われる。

3. 岩盤上の地震動の性質

この観測によって兩岸の岩盤上において多くの地震記録がえられた。地盤は岩盤であるからこれらを岩盤上の地震動記録の一例と考えてその性質を調べておくことは有意義である。地盤上の記録のうち右岸のものは山鼻部の地形的影響をうけているおそれがある。それゆえ岩盤における地震動の一般的性質としては左岸の地震動 (RLA と RLS) の記録に注目するのが適当であると思われる。図-3, 4 はそれぞれ RLA と RLS の速度スペクトルであって白丸は RLA, 黒丸は RLS である。その横軸は短周期領域では振動数で、長周期領域では周期で目盛っている。図-3 は A 級、図-4 は B, C 級の地震について整理したものである。スペクトルの形はかなり凸凹がはげしいがしかしそれを包絡する線を画くことによっておおよそつぎのような性質をみとめることができる。

速度成分の大きい周波数領域を主要なる周波数領域と名づければ、主要なる周波数領域は 0.2~0.5 秒から

0.8~1.2 秒の間にまたがっている。そして主要なる周波数領域においては速度成分はほぼ一定の大きさをもっている。主要なる周波数領域より長い周期に対しては速度成分はこの領域における地震計の感度低下を考慮に入れても周期とともに漸次減少しているのが認められる。主要なる周波数領域より短い周期に対しても速度成分は減少している。とくに 0.15~0.3 秒より短周期の領域では速度成分と振動数の間の関係を

$$v = Cn^{-\alpha}$$

(v : 速度成分, C : 比例定数, n : 振動数, α : パラメータ) と表わすと

$$\alpha = 0 \sim 2.0$$

の範囲にある。しかしいずれの場合にもその絶対値は主要なる周波数領域における速度成分の値に比較するとかなり小さい。主要なる周波数の上下の限界をなす周波数は地震によって異なっているがそれは震源距離、地震の規模、発電機構等によるものであろうと思われる。

地震動のスペクトルに関する上記の性質はおおむねこれまで仮定されていたところであるが、岩盤上においてもこの仮定を裏書きするような結果がこの観測によって得られたのである。

図-4 (a) 岩盤上地震動速度スペクトル (B・C級)

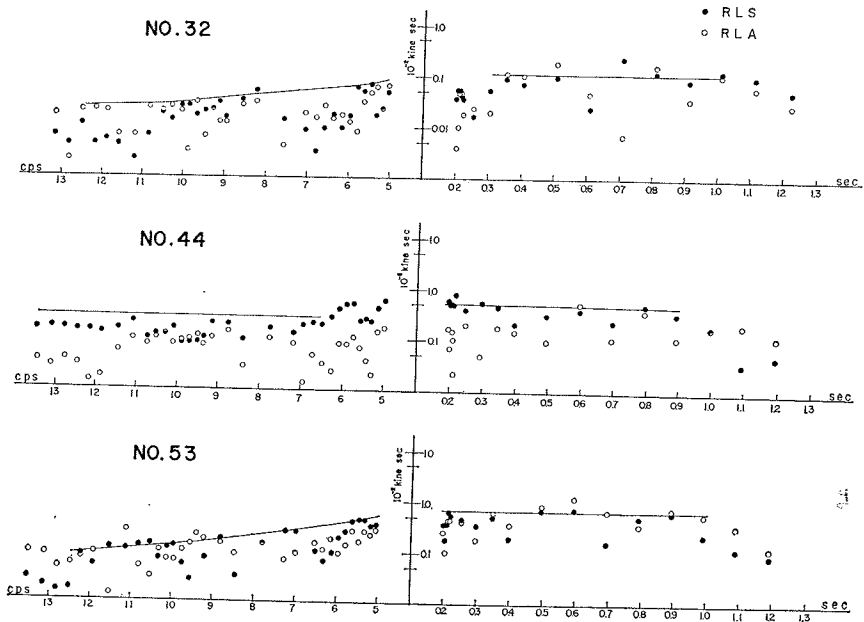


図-4 (b) 同 上 (B・C級)

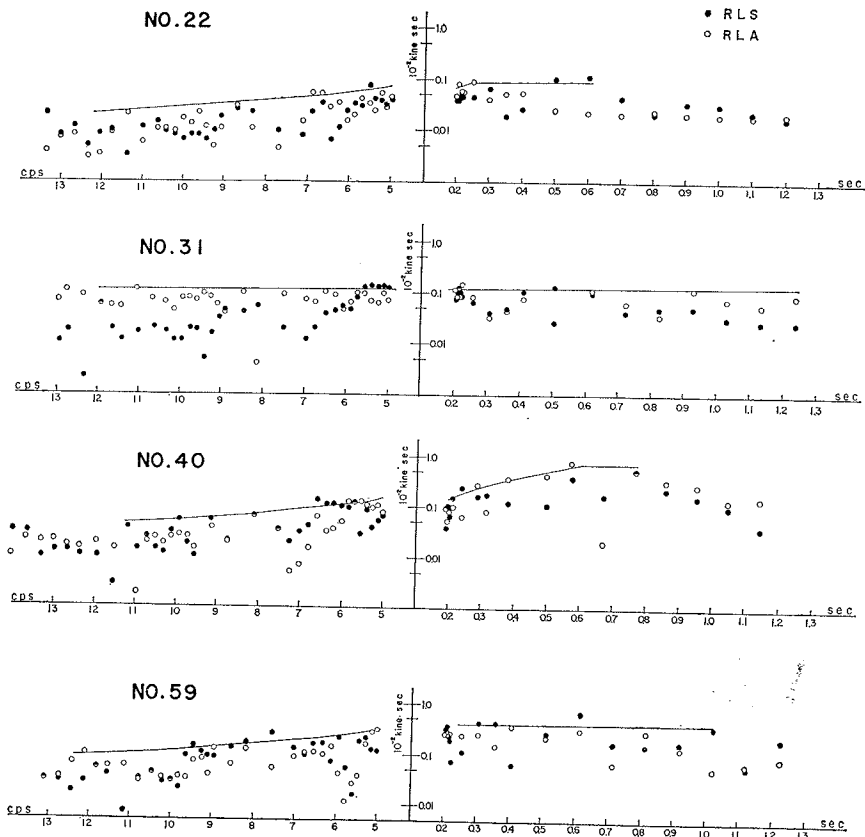
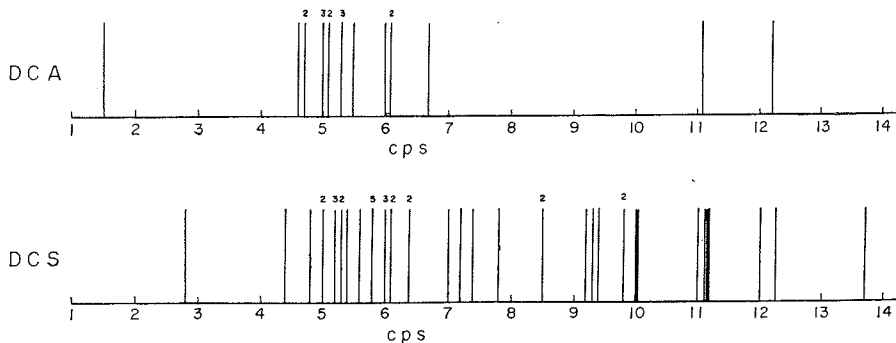


図-5 堤頂上振動の卓越振動数



4. ダムの固有振動周期

アーチダムの振動は模型実験からもわかるように非常に複雑なものである。これはダム体が2次元体であることに起因している。したがって堤体上の地震記録のフーリエ分析曲線をもて凹凸はかなりはげしく、ピークと考へべきかどうかの判定に苦しむ場合が多い。いまスペクトルにおいて顕著であるとしてピークと判定される周波数をとりだすと図-5のごとくなる。図-5のスペクトルをみるとDCAについては5 cps強に、DCSについては5 cps強、6 cps弱、9~10 cpsにピークが集まっているのが認められる。これをダムの振動試験の結果と比較してみると²⁾5 cpsのピークは逆対称1次、6 cpsのピークは対称1次、9~10 cpsのピークは対称2次のそれぞれ固有振動が卓越しているものと考えられる。この場合にDCSにも5 cpsのピークが卓越しているのはダムが地盤までふくめて完全には対称ではないためにおきた現象であると思われる。

このような周波数の卓越からみて地震時には低次の固有振動、このダムの場合にはとくに対称固有振動がおこりやすいことが知られる。なおたとえば前論文²⁾図-6に示したような地動振幅が小さくかつ主要動に短周期の波がとくに多い地震記録(このような波についてはフーリエ分析はほとんど行なわなかった)のみについてみるときは、ほとんどすべての場合において、DCSが地動に比して非常に増幅されている。その振

動数は約23 cpsであってこれは模型実験の結果³⁾と比較してダムの対称3次振動が誘起されているものと推測される。

5. ダム頂の振動増幅

地震記録をみると堤頂の振動は地盤の振動より一般に

図-6

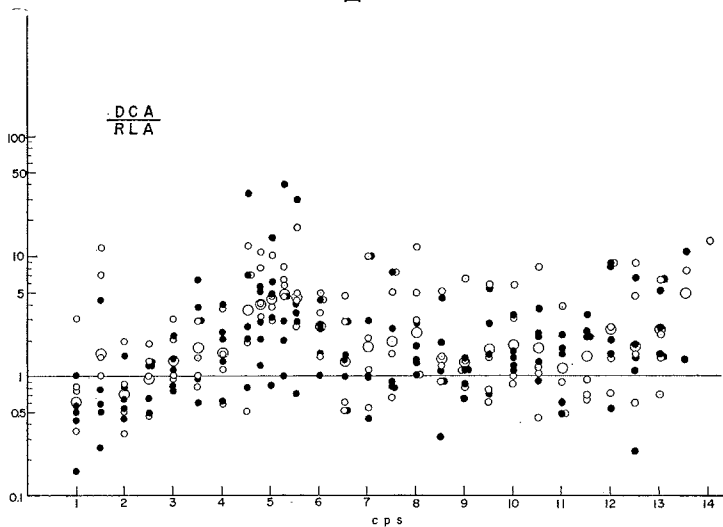
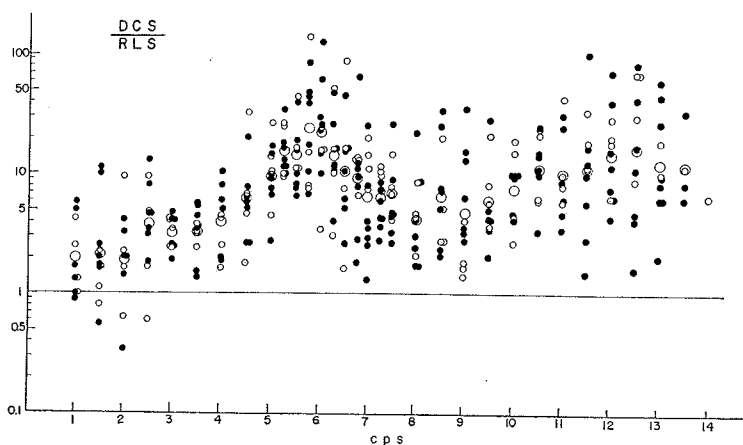


図-7



大きい。それゆえスペクトルについて堤頂中央部の振幅と地盤上の振幅の比を調べた。このとき地盤上の振動としては 3. に述べた理由によって左岸の記録をとることにし、その比を河流方向と河流直交方向について求め 図-6,7 に示した。これはいわゆる周波数応答関数にかならない。図の黒丸は A 級の地震、白丸は BC 級の地震、大丸印は黒白合わせた全記録についてとった相乗平均である。DCS/RLS についてみると 6 cps 付近にピークが認められ、さらに明瞭ではないが 12~13 cps の付近にも振幅のいちじるしい増幅がみられる。そして増幅率は 5.75 cps に対し 25 倍、10.5 cps に対し 10 倍となっている。これらのピークをそれぞれ固有振動と考えれば、これらの増幅率からそれぞれの固有振動の減衰定数を算出することができる。その計算に当たっては測点が堤頂中央であるがための増幅を考慮して補正を加えなければならないが、その値は前者を対称 1 次、後者を対称 2 次固有振動と考えれば模型実験によってそれぞれ 1.21 および 0.807 と与えられている³⁾。したがって前記の増幅率を補正係数をもって除すれば規準振動系としての増幅率はそれぞれ対称 1 次振動に対し 20.6、対称 2 次振動に対し 12.4 となり、これより減衰定数（実際の減衰と臨界減衰の比） h を計算すると 0.025 および 0.04 となる。

しかしながらこの考察には実験結果と矛盾する点がある。上記の考察によれば、ダム の 1 次固有振動数よりはるかに少ない振動数である 1 cps 付近では堤頂の振動は補正係数と同じ値すなわち 1.2 倍に増幅されておらねばならないが 図-6 によれば 1 cps 付近の増幅率は約 2 倍となっている。この差の原因として考えられることは模型実験から推定された補正係数が過少なのではないかということである。そこでさかのぼって模型実験の Mode³⁾ と、起振機を用いて現地で行なわれたダムの振動試験によってえられた Mode¹⁾ を天端アーチについて比較すると 図-8 のごとく両者は節点の位置においてはよく一致しているが、振幅においては若干の差があり、実物で

は模型の場合よりも中央部の変位が比較的に大きくなっている。このことは実物の補正係数が模型の補正係数にくらべて大なることを示している。この点を考えて対称 1 次固有振動に対する補正係数を 2.0 と仮定すればその増幅率は 12.5、減衰定数は 0.04 となる。対称 2 次固有振動に対してはこのような考察を行ないうる資料がないので模型実験による補正係数を用いるの他はないが対称 1 次振動については地震観測から推定される補正係数を用いる方がより正しい減衰係数を与えていると思われる。

図-8

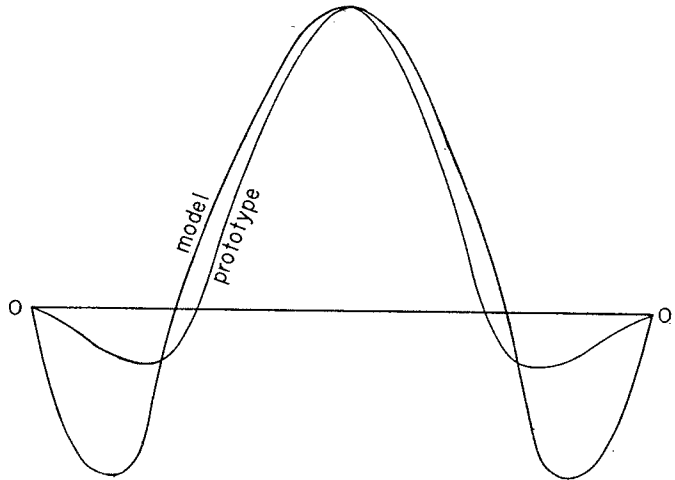


図-9

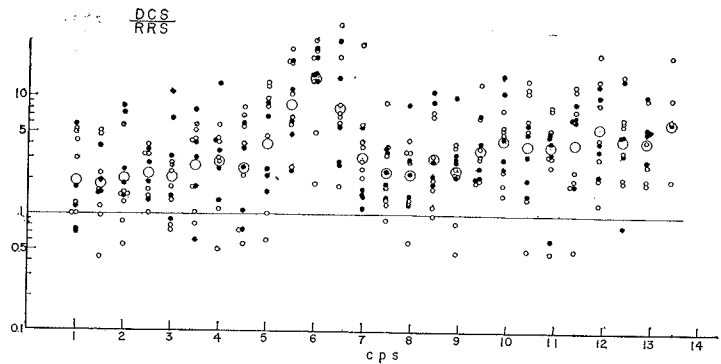
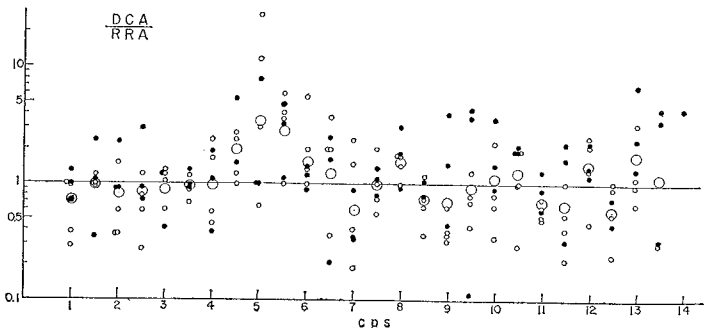


図-10



DCA/RLA についてみると 5.25 cps にピークが認められ他には顕著なピークがない。そしてその増幅率は 5.0 である。これを逆対称 1 次振動と考え、測点が堤頂中央であるがための補正係数として模型実験から得られた値 1.29 を採用して補正すれば逆対称 1 次基準振動に対する増幅率として 3.88 が得られる。図-7 において 1 cps 程度のゆるい振動に対する堤頂振動の増幅率は模型実験による補正係数とはほぼ同じとみられる。したがって前記の増幅率をそのまま用いて減衰係数を計算すれば 0.13 となり対称振動の減衰定数に比してかなり大なる値であることが知られる。以上の結果を表示すると表-5 のごとくなる。

参考のために右岸岩盤上の振動と堤頂中央の振動の比を図示すると図-9,10 のごとくなり、右岸の地動が地形の局部的影響をうけていると考えたと減衰定数についてはほぼ同様の結果が導かれる。

さきに現地において行なった起振機による振動試験から求められた減衰定数は h' (表-5) のごとくである¹⁾。これを h と比較すると両者は傾向において一致しているが数値的には地震動観測から得た値の方が振動試験から得た値よりも大きくなっている。しかし前者が平均値であってそのばらつきがかなりひどいことを考えると両者は order 的に一致しているといえることができるであろう。

6. 結 語

このアーチダムにおける地震観測の結果知られた主要なる性質はつぎのように要約される。

(1) 地盤上の地震動の性質は個々の地震によってかなり差異がある。そしてその一般の性質に関して統計的に述べられた性質からはずれる場合は少なからずある。

(2) 兩岸の地盤上における地震動は低周波振動についてはほぼ同じ振幅をもち顕著な位相差は認められない。しかし約 4 cps 以上の高周波領域においては振幅は右岸における方が左岸におけるよりも大きい。これは主として地形の影響と考えられる。このダムのアバットメントは地形の変化の比較的少ない位置にあるから設計上問題になることはないが地形変化の多いダムサイトでは設計に採用する地震動の強さは地形が地盤の局所的振動におよぼす影響を考えてきめられなければならない場合がおきるであろう。

(3) 岩盤上の地震動の速度振幅についてはその主要周波数領域においては速度成分一定なる関係がほぼ成立している。

(4) ダムには地震時には低次固有振動が顕著に現われる。堤体全体の設計に最も大きな影響をもつものは 1

次振動モードであることは間違いがないが少なくとも 3 次までの高次振動はしばしば卓越することがあるとみるのが適当であろう。それゆえそれが大きな影響をもつような堤頂部付近の局所応力に対してはこの点を考慮する必要がある。

(5) 地震時には多くの場合堤頂部の振動は地盤のそれに比してかなりの程度増幅される。増幅率から推測したアーチダムの減衰定数は起振機を用いて行なわれた振動試験による減衰定数と order 的には一致している。その値は一般の建築物の減衰定数の約 1/2 にすぎず、アーチダムが振動ししやすい構造であることを示している。

(6) 固有振動数、減定数等の振動に関する基本量については地震動の場合と起振機による振動試験の場合とを比較すると前者はよく一致し後者も order 的に一致している。したがってこれまで多くのダムについて行なわれた起振機による振動試験の結果は、ダムの地震時挙動に対して直接に参考となる資料を与えるものと考えられることができる。

(7) 以上の観測および従来の諸研究などからみてアーチダムの地震応力を弾性理論にもとづいて算出することは適当と考えられる。このとき弾性計算の手段は数理的手段でも実験的手段でもそれぞれの場合に適当な方を選べばよい。また弾性計算に必要な諸物理量は実在するダムの振動試験結果からえられた先例に則して定めればそれは実際の地震に対しても適切であるような値を与えるものと考えられる。

以上の考察では問題のもっぱら弾性範囲に限られ終局強度の問題にはふれていない。しかしダムのような重要構造物はいかなる場合にも応力は弾性限を越えることは許されない。したがってダムの安定に対して第 1 次的に重要なのは弾性範囲についての考察であろう。この他にも重要な問題でまだ十分には解明されていない問題、たとえば動水圧の問題、アバット部の山の地震時安定の問題等があるがこれらは将来の課題として残されている。

本研究に当たって関西電力 K K 建設部長吉田登博士ならびに宮城義暉、楯薫両氏および東京大学生産技術研究所横井勇 (現勝島製作所)、山本友子、小森和雄の諸氏の非常なる援助をうけた。謹んで謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岡本舜三・加藤勝行・伯野元彦・宮越義暉：アーチダムの地震動観測，土木学会論文集 76 号，1961。
- 2) 中山謙治・吉田 正・馬場恭平：各種ダムの地震観測，第 6 回土木学会地震工学研究発表会講演概要，1963
- 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 75 号，1961

(1964.5.26・受付)