

# アーチダムの観測記録から求めた固有振動数 とブロックジョイントの影響

上田 稔<sup>1</sup>・豊田幸宏<sup>2</sup>・塩尻弘雄<sup>3</sup>・佐藤正俊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 中部電力(株)電力技術研究所(〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

<sup>3</sup>正会員 工博 日本大学 理工学部土木工学科(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

コンクリートダムの固有振動数は、ダムの地震応答に及ぼす最も重要な値の一つである。2つのアーチダムを対象に、ダムの上部と最低部での地震観測記録や常時微動計測記録、起振実験の共振曲線から固有振動数を算出し、ダムの貯水位や振動レベルと固有振動数の関係について示す。ある貯水位以下になると貯水位が高い場合の固有振動数より低振動数側の固有振動数になることや、比較的強振動時には弱振動時にくらへ固有振動数が低振動数側になり、これらはブロックジョイントの影響によるものであることを述べる。

**Key Words :** arch dam, resonant frequency, water level, acceleration level, contraction joint, earthquake record, forced vibration test, microtremors

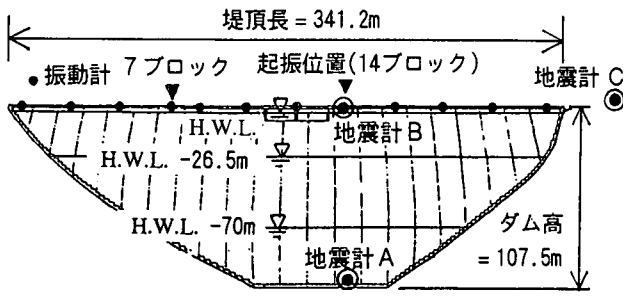
## 1. まえがき

アーチダムの固有振動数は、減衰定数とともにダムの地震時応答特性を示す最も重要な値の一つである。さてアーチダムは、左右岸方向にいくつかのブロックに分割してコンクリートが打設されている。このブロックとブロックの境界はジョイントキーが設けられ、ブロックジョイントと呼ばれている。このアーチダムのブロックジョイント部に作用する水平アーチ方向の応力は、ダム貯水池の貯水位とダムの振動レベルにより大きく異なる。このため地震時のブロックジョイント部の接触状態は、ダム貯水池の貯水位とダムの振動レベルにより異なり、このことがアーチダムの固有振動数に影響を及ぼしていることが考えられる。

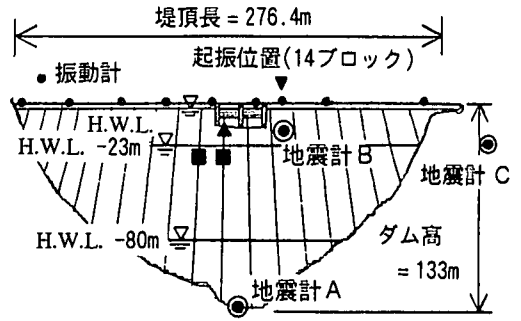
アーチダムの固有振動数を算出している既往の研究を、その場合のダム貯水池の貯水位とダムの振動レベルに着目して試みることにする。まず起振実験でのダム上部で実測した共振曲線から、固有振動数を算出している例がいくつかある<sup>1), 2)</sup>。しかし起振実験は、貯水池の湛水完了後に利用水深の範囲内の高い貯水位で実施されている場合がほとんどである。そして起振実験での振動は、一般的に起振機の起振力の制約から、ダム高 100m 程度以上の大ダムの場合、数 Gal~5Gal (数  $\text{cm/s}^2 \sim 5\text{cm/s}^2$ , 以下本論文では Gal を用いる)

程度の弱振動である。また模型実験により、アーチダムの広い範囲の貯水位と固有振動数の関係が示されている。それによれば、固有振動数は貯水位が満水位からその 60%程度までの範囲で貯水位が低い程大きく、満水位の 60%程度から空虚までの範囲では、ほぼ一定であることが示されている<sup>1)</sup>。しかしこの模型実験では、ブロックジョイントはモデル化されていない。その他には、比較的強振動におけるアーチダム上部での地震観測記録のフーリエスペクトルから、おおよその固有振動数が算出されている例がある。例えば黒部アーチダム<sup>1)</sup>では最大加速度が 120Gal 程度の、奈川渡アーチダム<sup>3)</sup>では最大加速度が 250Gal 程度の記録に対して固有振動数が算出されている。しかし、比較的強振動時と弱振動時の固有振動数との比較がなされている例は、ほとんど見当たらないようである。

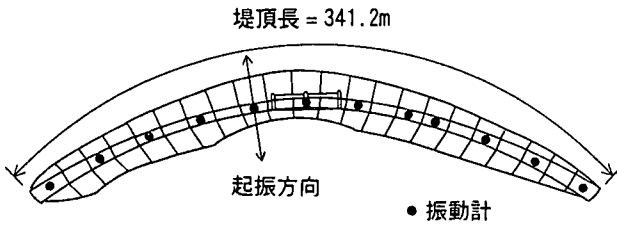
そこで本研究では、2つのアーチダムでの地震観測、常時微動計測や起振実験による実測記録をもとに、ダムの貯水位や振動レベルと固有振動数の関係について調べる。固有振動数に及ぼすブロックジョイントの影響をみるため、ブロックジョイント部の応力状態が大きく異なる広い範囲の貯水位に対して、地震観測や常時微動計測を実施して固有振動数を算出した。またダムの貯水位が高い場合のみならず、空虚に近い場合にも起振実験を実施し、固有振動数を算出した。池原ア



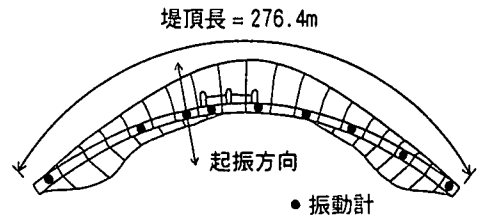
(a) 上流面図



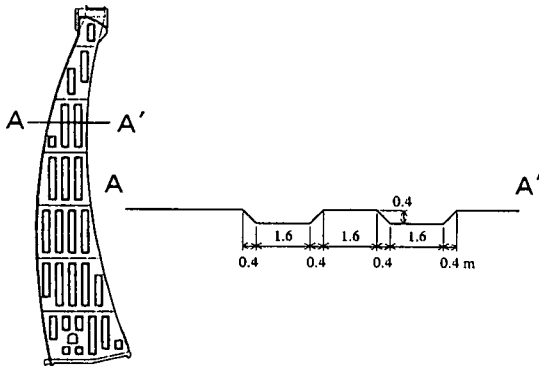
(a) 上流面図



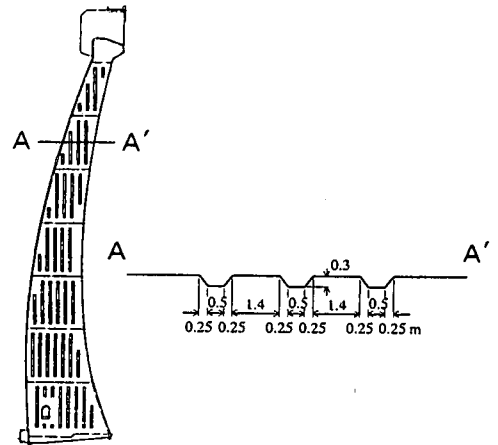
(b) 平面図



(b) 平面図



(c) ジョイントキーの配置 (d) ジョイントキーの断面図 (横断面図)



(c) ジョイントキーの配置 (d) ジョイントキーの断面図 (横断面図)

図-1 川浦アーチダムの説明図

図-2 高根アーチダムの説明図

一チダムでは、弱振動の地震観測記録から算出した固有振動数と広い範囲の貯水位の関係が示されている<sup>4)</sup>。本研究ではこの貴重な結果も参考にす。さらに、ダムの振動レベルと固有振動数については、その関係を検討するために、著者らは長年にわたるダムでの地震観測を継続してきた。得られたダム上部の最大加速度

は 200Gal 程度であり、この記録を含めた比較的強振動時と弱振動時の固有振動数について比較を行う。以上により本研究は、アーチダムの固有振動数にブロックジョイントの影響があることを明らかにするものである。

表-1 地震観測，起振実験，常時微動計測実施時期と起振実験実施時の貯水位

(a)川浦アーチダム

ダム完成	地震観測	起振実験(3回)	常時微動計測(10回)
1992.10		(貯水位)	
	1993.9	1993.11(H.W.L.-70m)	1993.11
	}	1994.10(H.W.L.-26.5m)	}
	1995.5	1994.12(H.W.L.)*	1994.12

\*H.W.L.の水深は99.5m

(b)高根アーチダム

ダム完成	地震観測	起振実験(3回)	常時微動計測(5回)
1968.12		(貯水位)	
		1971.8(H.W.L.)*	
	1984.9	1996.10(H.W.L.-24.6m)	1996.10
	}		}
	1995.3	1996.12(H.W.L.-80m)	1996.11

\*H.W.L.の水深は127m

2.対象アーチダム

対象とするアーチダムは，中部電力(株)所有の川浦アーチダム(ダム高 107.5m，堤頂長 341.5m)と高根アーチダム(ダム高 130m，堤頂長 275m)である。川浦アーチダムは 1992 年，高根アーチダムは 1968 年の竣工である。図-1，2 にそれぞれ，川浦アーチダムと高根アーチダムの説明図を示す。図-1，2(a)にダムの上流面図を示す。ダムは左右岸方向に，川浦アーチダムは 22 ブロック，高根アーチダムは 20 ブロックに分割して，コンクリートが打設されている。図-1，2(c)に，両ダムのジョイントキーの配置を横断面図に，図-1，2(d)にジョイントキーの断面を示す。両ダムともブロック間にはセメントミルクによるジョイントグラウチングが実施されている。ダムサイトの主要な基礎岩盤は，川浦アーチダムが中生代白亜紀の流紋岩，高根アーチダムが古生代のチャートである。

また本論文では，電源開発(株)所有の池原アーチダム(ダム高 111m，堤頂長 460m)で得られている結果<sup>4)</sup>も参考にす。池原アーチダムは 1964 年に竣工で，左右岩方向に 24 ブロックに分割してコンクリートが打設されている。ダムサイトの主要な基礎岩盤は，砂岩粘板岩の互層である。

3.アーチダムの固有振動数の算出

(1)地震観測の概要と地震観測記録に基づく算出

図-1，2 に示すとおり，川浦，高根両アーチダムそれぞれの上部と最低部に加速度計を設置し，地震観測を行った。表-1 に固有振動数を算出するのに対象とした地震観測記録が得られた期間を，起振実験や常時微動計測を実施した時期とともに示す。川浦アーチダムではダム竣工後の湛水開始前から地震観測を行ったので，貯水位がほぼ空虚から満水位(以下 H.W.L.と略す)に近い水位までの広い範囲の地震観測記録が得られた。高根アーチダムの地震観測記録はダム竣工後 15 年以降の約 10 年間のもので，貯水位はダム利用水深内の H.W.L.-35m から H.W.L.に近い水位までの範囲の貯水位に対して地震観測記録が得られた。観測したダム上部の最大加速度は，川浦アーチダムが 120Gal，高根アーチダムが 200Gal 程度である。

固有振動数は，ダム上部(地震計 B)のダム最低部(地震計 A)に対するダム天端水平アーチ半径方向の加速度フーリエスペクトル比から，1 次のピーク値を与える振動数として算出した。地震観測のサンプリング周波数は 200Hz である。対象とした加速度記録は，ダムの固有振動が卓越する主要動あるいは主要動部を含ま

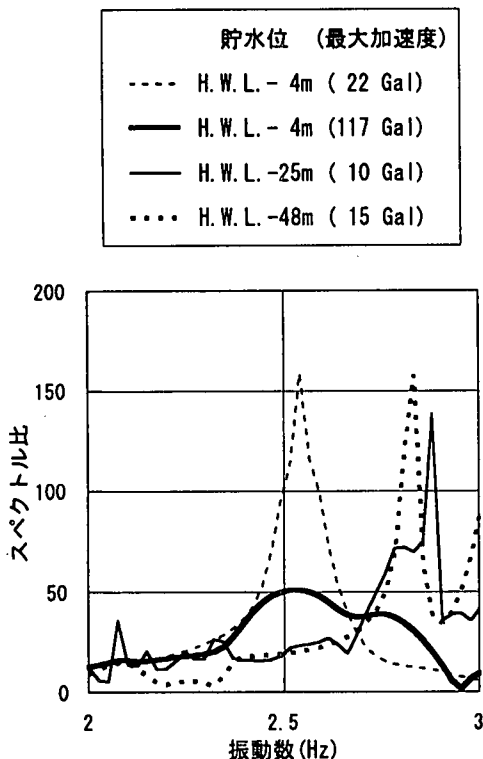


図-3 川浦アーチダムの地震観測記録によるフーリエスペクトル比の例

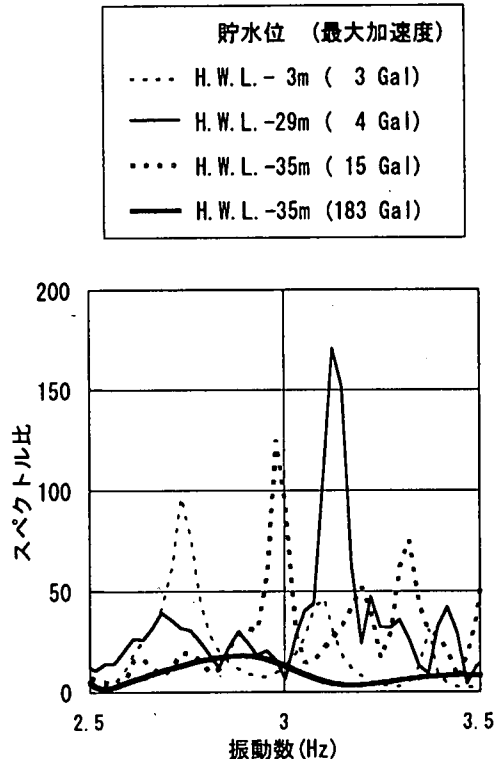


図-4 高根アーチダムの地震観測記録によるフーリエスペクトル比の例

ない主要動終了後の記録である。いずれの場合も、約5秒間の記録（データ数1024個）を4回繰り返したもの（データ数4096個）を用いて固有振動数を算出した。なおスペクトルにはウィンドウをかけていないものを用いた。ダム上部のダム最低部に対するダム天端水平アーチ半径方向の加速度フーリエスペクトル比の川浦アーチダムの例を図-3に、高根アーチダムの例を図-4に示す。

(2)起振実験で得た共振曲線に基づく算出

表-1(a), (b)に示したとおり、両ダムとも、H.W.L.とH.W.L.から25m程度下がり、そしてH.W.L.から70~80m下がりの3つの貯水位で起振実験を実施した。起振実験実施時の貯水位を図-1, 2(a)のダム上流面図に示す。川浦アーチダムの起振実験は、ダム竣工後の湛水の機会を捉えて実施したものである<sup>9)</sup>。高根アーチダムの貯水位がH.W.L.の起振実験は、ダム竣工後の湛水完了時に電力中央研究所が実施したもので<sup>9)</sup>、

その他の貯水位の起振実験は、ダム竣工後27年を経過しての貯水位低下の機会を捉えて実施したものである<sup>7)</sup>。

起振位置はダム天端中央付近の洪水吐きを避けた位置で、両ダムとも14ブロック天端である（図-1, 2(a)）。起振方向はダム天端水平アーチの半径方向（概ねダムの上下流方向）である。起振機は不平衡重錘起振装置の機械的な同期反転により、一方向の正弦波起振力を発生させるものである。起振力は本研究で対象とする1次の固有振動数付近で、川浦アーチダムは貯水位がH.W.L.とH.W.L.-26.5mの場合は196kNで一定、貯水位がH.W.L.-70mの場合は98kNで一定である。高根アーチダムは、貯水位がH.W.L.の場合が40kN、貯水位がH.W.L.-24.6mとH.W.L.-80mの場合が100kN程度である。

振動計はサーボ型の速度計で、ダム天端と下流面に設置しアーチ半径方向の速度を測定した。ダム天端での振動計の配置を、図-1, 2(a), (b)に示す。計測周

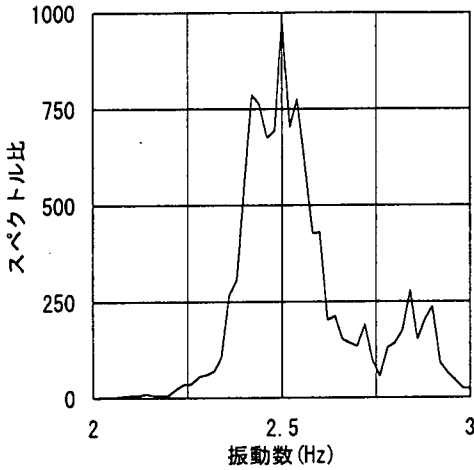


図-5(a) 川浦アーチダムの常時微動計測による  
パワースペクトル比の例  
(14ブロック, 貯水位: H.W.L.-1.5m)

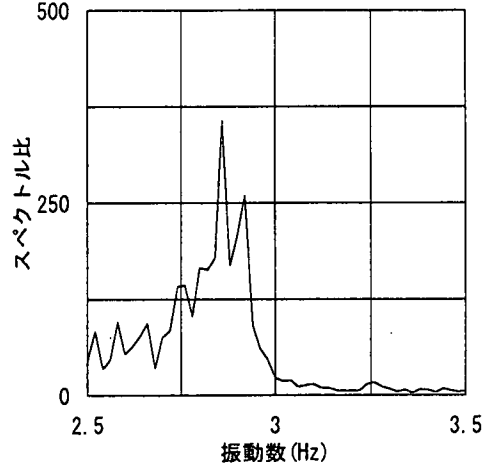


図-5(b) 川浦アーチダムの常時微動計測による  
パワースペクトル比の例  
(7ブロック, 貯水位: H.W.L.-1.5m)

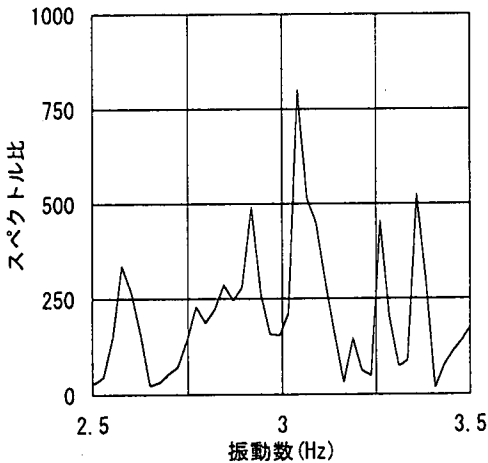


図-6 高根アーチダムの常時微動計測による  
パワースペクトル比の例  
(貯水位: H.W.L.-26m)

### (3)常時微動計測記録に基づく算出

常時微動計測の実施時期は表-1(a), (b)に示とおりで, 川浦アーチダムが起振実験と同時期で, 3回の起振実験実施時と同じ貯水位のときを含めて貯水位の異なる10回である。高根アーチダムは貯水位が H.W.L.-24.6m と H.W.L.-80m の起振実験と同時期で, 起振実験を実施した H.W.L.-24.6m~H.W.L.-66.5m までの貯水位が異なる5回である。

川浦, 高根両アーチダムとも常時微動計測のサンプリング周波数は 200Hz である。固有振動数は, ダム上部のダム最低部に対するダム天端水平アーチ半径方向のパワースペクトル比のピーク値を与える振動数として算出することとし, 収録したデジタルデータを 4096 個ずつに分割し 15 回分の平均値を求めた。スペクトルにはウィンドウをかけていないものを用いた。ダム上部のダム最低部に対するダム天端水平アーチ半径方向のパワースペクトル比を, 川浦アーチダムの例を図-5(a), (b)に, 高根アーチダムの例を図-6に示す。ダム上部の位置は, 川浦アーチダムは図-1(a)に示すが, 対称1次の固有振動数の算出が14ブロック天端, 逆対称1次の固有振動数の算出が7ブロック天端である。高根アーチダムでは逆対称1次の固有振動数しか算出できず, 図-2(a)に示すが, ダム上部の位置は14ブロック天端である。なお, 振動計を起振実験実施時と同じ位置に配置し, ダム最低部を基準にした伝達関数を算出して振動形状の確認を行った。

波数のきざみは, 固有振動数を可能な限り正確に捉えるために, 固有振動数付近は起振機の周波数制御上の限界値まで細かくした。この限界値は川浦アーチダムが 0.01Hz, 高根アーチダムが 0.05Hz である。固有振動数付近以外は, 0.1~0.2Hz 程度のきざみである。1次の固有振動数でのダム天端の最大加速度は, 貯水位により多少異なるが, 川浦アーチダムが 3~5Gal 程度, 高根アーチダムが 4~8Gal 程度である。振動形状は川浦アーチダムが文献5)に, 高根アーチダムが文献6)~8)に示しておりである。

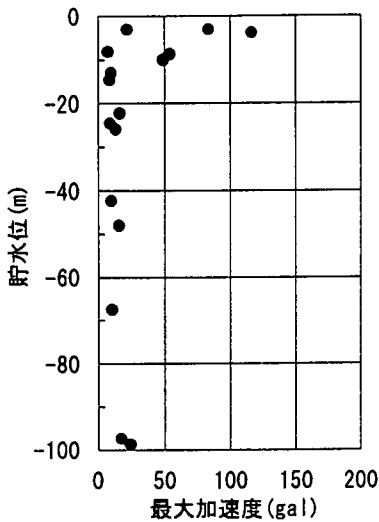


図-7(b) 川浦アーチダムの固有振動数を算出した地震観測記録の最大加速度とその時の貯水位

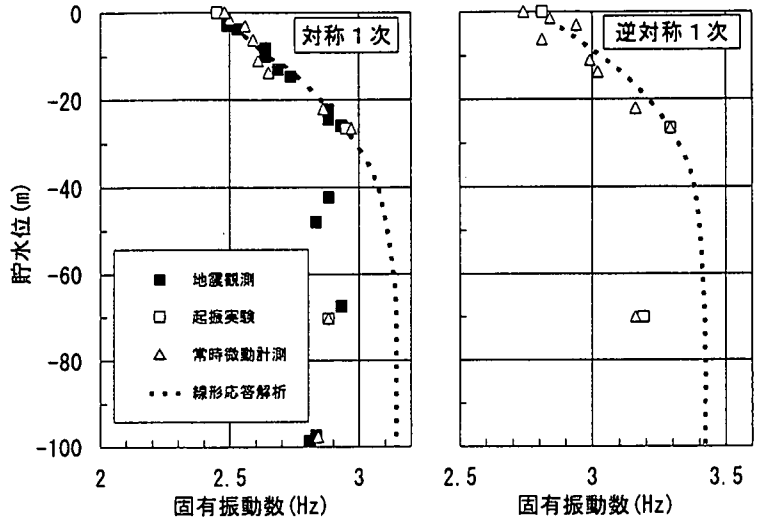


図-7(a) 川浦アーチダムの貯水位と固有振動数の関係

#### 4. 貯水位や振動レベルと固有振動数の関係

##### (1) 観測方法と固有振動数

川浦アーチダムの貯水位と対称1次ならびに逆対称1次の固有振動数の関係を、図-7(a)に示す。図の縦軸には、固有振動数の算出に用いた地震観測記録が得られた時の貯水位を、H.W.L.を0mとしてとってある。固有振動数を算出するための観測方法ごとに、記号を変えて結果を示している。地震観測記録によるものが■印、常時微動計測記録によるものが△印、起振実験の共振曲線によるものが□印である。図-7(a)の左側に示すとおり、地震観測記録による固有振動数は、起振実験や常時微動計測により振動形状が対称1次と確認された場合の固有振動数と貯水位にかかわらずほぼ一致していたので、対称1次の固有振動数と判断した。

図-7(a)と同様に、高根アーチダムの貯水位と固有振動数の関係を図-8(a)に示す。高根アーチダムでは、起振実験、常時微動計測からはスペクトル比の明確なピークがあらわれず、対称1次の固有振動数は算出できなかった。これは、起振実験では起振点がダム天端水平アーチの対称点でなく、若干右岸側に偏し、しかも点加振であったためと思われる。常時微動計測でも対称1次の固有振動数が得られなかったのは、常時微動による震動がダムサイト基礎岩盤の左右岸で位相差を持ったものであることが考えられるが、この点については今後の課題である。

図-8(a)の左側に地震観測記録による固有振動数を示す。図中には、図-8(a)右側の起振実験や常時微動計測による固有振動数のうち、地震観測記録による固

有振動数とほぼ同じ貯水位で得られた結果を( ) 囲んで示す。H.W.L.-25m程度での固有振動数は、起振実験や常時微動計測による値と地震観測記録による値に0.15~0.2Hz程度の差異がある。H.W.L.-25mの貯水位での地震観測記録から固有振動数を算出する際に、逆対称1次の固有振動数付近にスペクトル比のピークがあらわれるかどうか調べた。起振実験や常時微動計測から得た逆対称1次の振動形状から、地震計設置位置は逆対称1次の振動形状での節となる位置でないにもかかわらず、スペクトル比のピークは確認できなかった。このことより、H.W.L.-25mの地震観測記録による固有振動数は、対称1次の振動形状に対するものと判断される。図-8(a)左側の図には、6章で述べるダム-岩盤-貯水の三次元連成解析により求めた貯水位と対称1次、逆対称1次の固有振動数の関係も示す。対称1次と逆対称1次の固有振動数は、貯水位がH.W.L.-20m程度以上の範囲で接近している上に、H.W.L.-15m程度でその大小関係が逆転している。このことから上記のH.W.L.-25m程度の固有振動数を除いて、ダム天端の一点のみの地震観測記録からその振動形状を明確にすることは難しく、図-8(a)左側の図には振動形状は明示していない。

図-7(a)に示すとおり、川浦アーチダムでは貯水位にかかわらず、観測方法が異なっても、ほぼ同程度の固有振動数が得られている。高根アーチダムでは図-8(a)の逆対称1次の固有振動数で、貯水位がH.W.L.-24.6mの場合に、起振実験と常時微動計測による結果が得られたが、両者はほぼ一致している。Xiang Hong

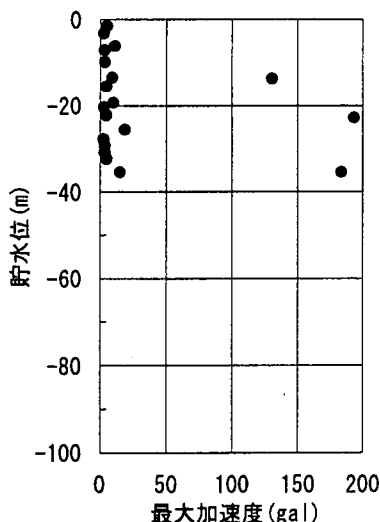


図-8(b) 高根アーチダムの固有振動数を算出した地震観測記録の最大加速度とその時の貯水位

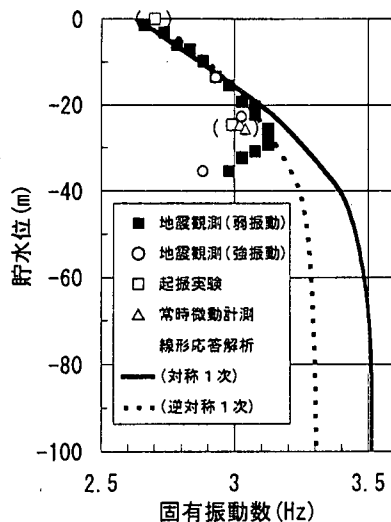
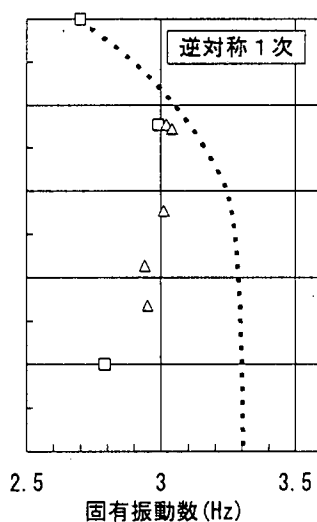


図-8(a) 高根アーチダムの貯水位と固有振動数の関係



Dian 重力アーチダム (ダム高 87.5m, 堤頂長 361m), Quan Shui アーチダム (ダム高 80m, 堤頂長 209m), Techi アーチダム (ダム高 181m, 堤頂長 290m) でも, 起振実験と常時微動計測による固有振動数がほぼ同じであることが示されている<sup>2)</sup>.

る。なお池原アーチダムでは, ダム天端で中央部を含む3カ所で地震観測がなされ, それらの記録の分析により, 図-9(a)の固有振動数は逆対称1次の振動形状に対するものとされている<sup>1)</sup>.

## (2) 貯水位と固有振動数

川浦アーチダムでは H.W.L. から L.W.L. である H.W.L. -26.5m 程度までの, 高根アーチダムでは H.W.L. から H.W.L. -25m 程度までの貯水位の高い範囲で, 貯水位が低下するにつれ固有振動数が大きくなっている。しかしそれ以下の貯水位では, 貯水位が低下すると固有振動数が小さくなっている。先に示したフーリエスペクトル比の例でみれば, 図-3の川浦アーチダムでは, ピークの振動数は H.W.L. -26m の方が H.W.L. -4m より大きい, H.W.L. -48m では H.W.L. -26m より小さい。同様に, 図-4の高根アーチダムでは, ピークの振動数は H.W.L. -29m の方が H.W.L. -5m より大きい, H.W.L. -35m では H.W.L. -29m より小さい。

図-9(a)は, 池原アーチダムの地震観測記録から求められた固有振動数と貯水位の関係である。これは文献4)の結果を, 縦横の目盛りのスケールを図-7, 8(a)と同じにして示したものである。池原アーチダムでも, 貯水位低下の機会を捉えて地震観測がなされ, H.W.L. -65m までの範囲の貯水位に対する固有振動数が求められている。川浦, 高根両アーチダムと同様, このダムでも貯水位が H.W.L. -25m 程度までは, 貯水位が低下するにつれ固有振動数が大きくなり, さらに貯水位が低下すると固有振動数が小さくなる傾向が認められ

## (3) 振動レベルと固有振動数

図-7(b)に, 川浦アーチダムの固有振動数を算出した地震観測記録の最大加速度を示す。最大加速度は, 固有振動数を算出するのに対象とした5秒間の地震観測記録での最大加速度である。最大加速度が異なる地震観測記録が得られた貯水位と, その時の固有振動数がわかるように, 図-7(b)は図-7(a)と縦軸の貯水位の目盛りを同一とし, 横に並べて示している。同様に高根アーチダムに対する関係を図-8(b)に, 池原アーチダムに対する関係を図-9(b)に示す。

川浦アーチダムの起振実験では, 貯水位が L.W.L. (H.W.L. -26.5m) の場合に, 起振力を 196kN の他にその 1/10 と 1/200 の 19.6kN と, 0.98kN と小さくして起振したが, 単位起振力あたりの共振曲線に差異は認められなかった。このことより, ここに得られた固有振動数は, ダムの応答が線形である弱振動に対する値と判断される。なお1次の固有振動数に対するダム天端での最大加速度が, 起振力 196kN の場合が 5Gal, 0.98kN が 0.025 Gal 程度である。Monticello アーチダム (ダム高 93m, 堤頂長 319m) の起振実験 (貯水位は H.W.L. -12.5m) でも起振力を 47~437kN の範囲で変えたが, 1次の固有振動数に非線形性が認められなかったことが述べられている<sup>2)</sup>。Monticello アーチダムの起振実験での最大加速度は, ダム規模と起振力か

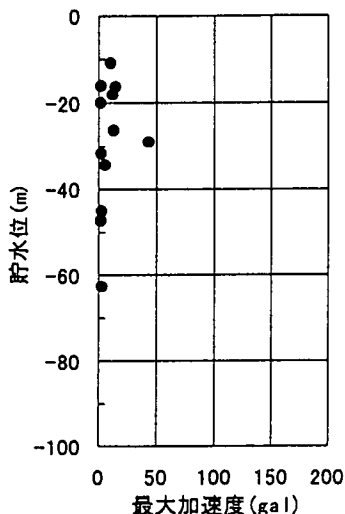


図-9(b) 池原アーチダムの固有振動数を算出した地震観測記録の最大加速度とその時の貯水位

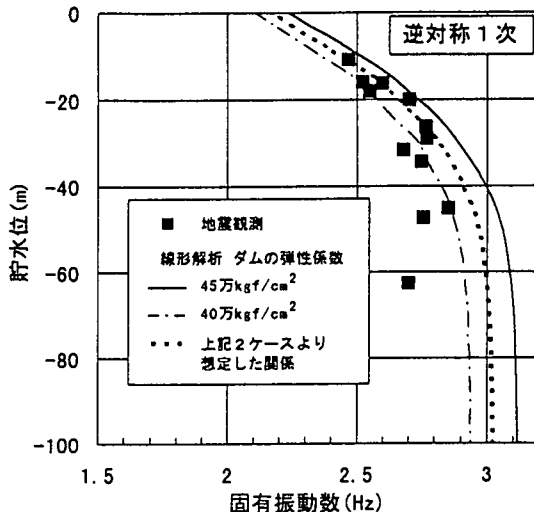


図-9(a) 池原アーチダムの貯水位と固有振動数の関係

ら 10Gal 程度と推定される。

図-7(a), (b)より川浦アーチダムでは、貯水位が H.W.L. -4m で最大加速度が 20, 80, 120Gal 程度の、また H.W.L. -10m の貯水位で最大加速度が 10, 50Gal 程度の記録がそれぞれ得られているが、固有振動数は最大加速度にかかわらず同じである。なお図-3には、貯水位が H.W.L. -4m で最大加速度が 20Gal と 120Gal の加速度記録から求めたスペクトル比を示している。スペクトル比の大きさは異なるものの、そのピークの振動数は同じである。一方高根アーチダムでは、貯水位が H.W.L. -15m 程度で最大加速度が 130Gal 程度の記録が得られているが、固有振動数は弱振動レベルでの固有振動数と同じで、川浦アーチダムの場合と同様である。Techi アーチダムでも貯水位が H.W.L. -15m で、最大加速度が 170Gal 程度の地震観測記録が得られ、そのフーリエスペクトルから求めた固有振動数は、弱振動の固有振動数に相当する起振実験の共振曲線から算出した値と一致したことが述べられている<sup>2)</sup>。これらのことに加え、図-7(a)に示すとおり非常に微弱な振動である常時微動の計測記録から算出したのと、地震観測記録や起振実験の共振曲線から算出した固有振動数に、貯水位にかかわらず差違が認められないことから、ある大きさの振動レベルまでの固有振動数は一定の大きさであるといえる。

図-8(b)に示すとおり、高根アーチダムでは最大加速度が 100Gal 以上の地震観測記録が 3 個得られている。図-8(a)では、この 3 個の記録から得られた固有

振動数を、他の最大加速度が小さな記録から得られた固有振動数と区別して、○印で示している。貯水位が H.W.L. -15m 程度で最大加速度が 130Gal 程度の記録が得られているが、その固有振動数は弱振動に対する値と同じである。これに対し、貯水位が H.W.L. -25m 程度で最大加速度が 200Gal 程度の記録が得られ、その固有振動数を弱振動レベルでの値と比較すると、0.05Hz 程低振動数側にある。さらに、貯水位が H.W.L. -35m で最大加速度が 180Gal 程度の記録が得られ、その固有振動数は、最大加速度が 20Gal 程度の弱振動レベルでの値より 0.15Hz 程低振動数側にある。図-4にはこの両者のスペクトル比を示しており、ピークの振動数に 0.15Hz 程差異があることが確認できる。なお以上の比較を行っている弱振動時と強振動時の固有振動数は、いずれも同一地震に対する記録から求めたものである。

以上、本章では実測記録から明らかになったアーチダムの貯水位や振動レベルと固有振動数の関係について述べた。次章以降では、これらの関係があらわれる理由について検討していく。

## 5. ダム-岩盤-貯水の三次元連成線形解析による貯水位と固有振動数の関係

ダム-岩盤-貯水の連成を考慮した三次元有限要素解析により、貯水位と固有振動数の関係を算出した。



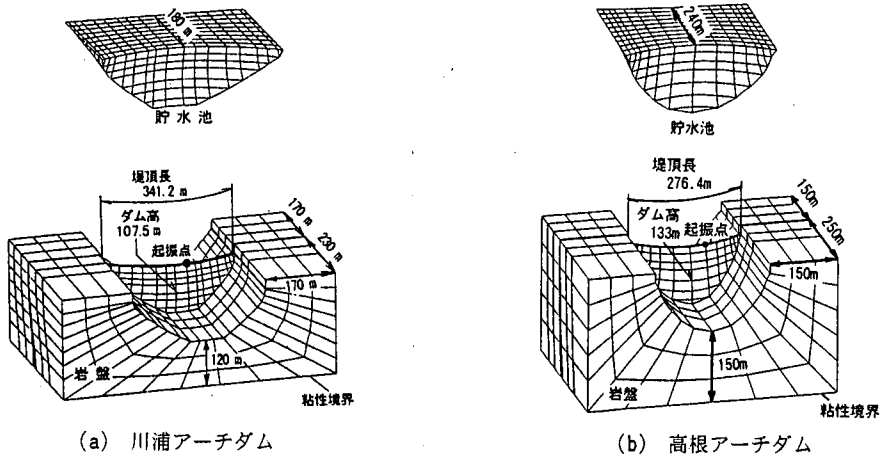


図-10 貯水位と固有振動数の関係を算出した解析モデル

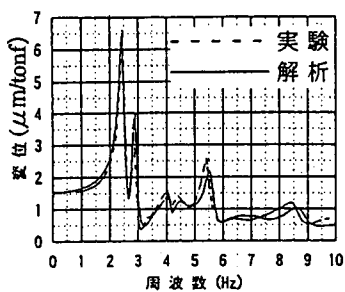
表-2 貯水位と固有振動数の関係の算出における解析条件

(a) 川浦アーチダム

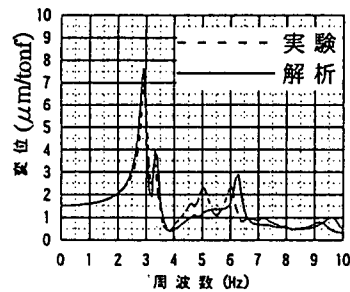
	ダム	岩盤	貯水
弾性係数 $E$ (MPa)	36300	17600	1,400 m/s (水中音速)
ポアソン比 $\nu$	0.20	0.25	
単位体積質量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.50	2.50	1.00
減衰定数 $h$ (%)	1.0	1.0	-

(b) 高根アーチダム

	ダム	岩盤	貯水
弾性係数 $E$ (MPa)	36300	15700	1,400 m/s (水中音速)
ポアソン比 $\nu$	0.20	0.25	
単位体積質量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.50	2.50	1.00
減衰定数 $h$ (%)	1.5	1.5	-



(a) H.W.L.時



(b) L.W.L.時

図-11 川浦アーチダムの起振点の変位の共振曲線のシミュレーション結果

用いた解析モデルと物性値は、既に川浦アーチダム<sup>5)</sup>、高根アーチダム<sup>6)</sup>ともに起振実験のシミュレーション解析により、その妥当性を確認しているものである。図-10(a),(b)に、それぞれ川浦アーチダムと高根アーチダムの解析モデルを示す。例として図-11に、川浦アーチダムの起振点における変位の共振曲線のシ

ミュレーション結果を、貯水位ごとに示す。実測と解析は良好な一致を示している。

このシミュレーション解析での固有振動数を再現する解析モデルや物性値の決定方法は次のとおりである。ダムの固有振動数や応答変位に影響のない解析領域の広さやメッシュサイズを詳細に検討した上で、ダムコ

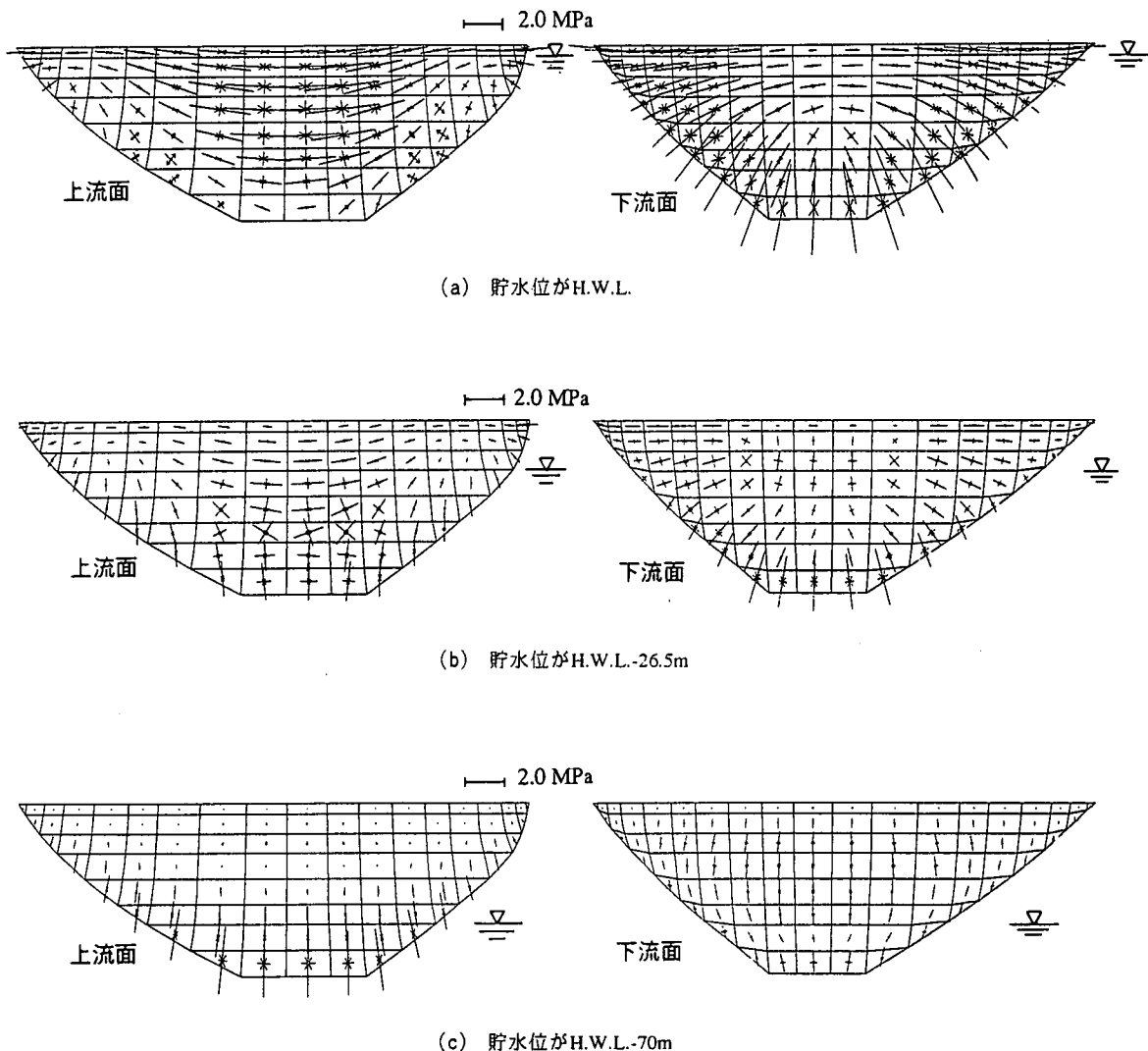


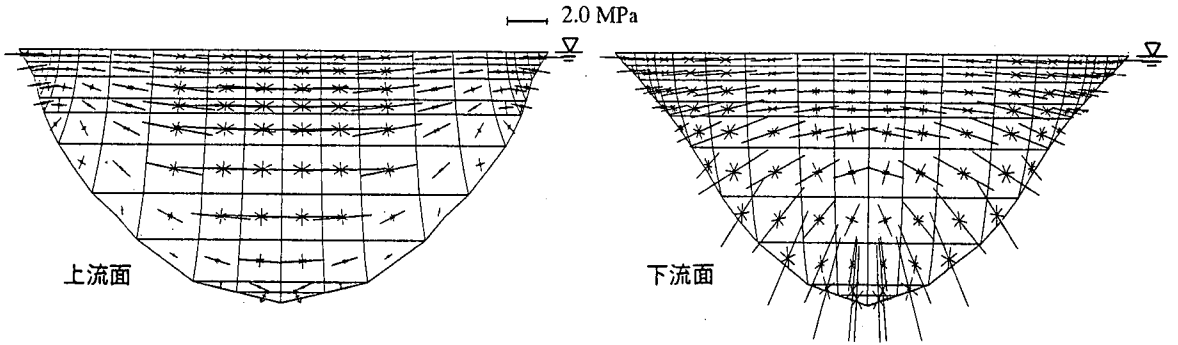
図-12 川浦アーチダムの貯水位と上下流面の静的応力

ンクリートと岩盤の弾性係数は、それぞれ標高差のある2ヶ所の地震観測記録から求めた波動伝播速度による値を用いると、実測の固有振動数がほぼ捉えられる<sup>5), 6)</sup>。なおダムの地震観測記録から求めた波動伝播速度による弾性係数は、ダムコンクリートの静的圧縮試験の初期接線弾性係数と一致する<sup>9)</sup>。

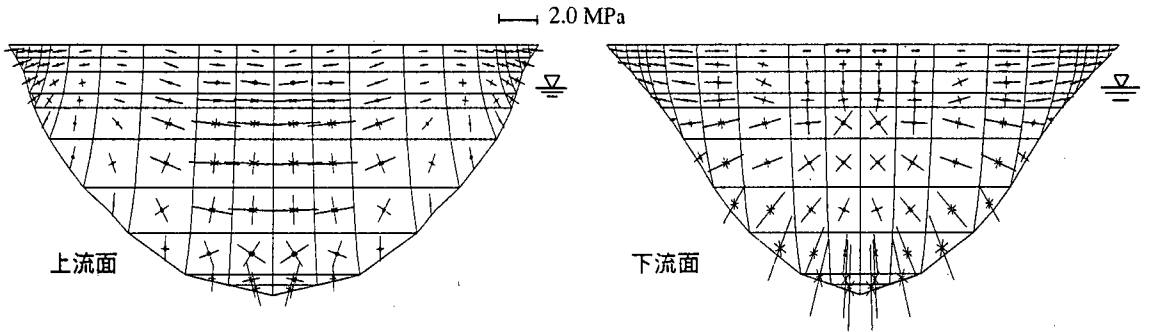
対称1次の固有振動数は、岩盤境界に正弦波を入力した場合のダム上部の最低部に対するダム天端水平アーチ半径方向の伝達関数の、逆対称1次の固有振動数は、起振実験における起振点で正弦波により点加振した場合の起振点でのダム天端水平アーチ半径方向変位の共振曲線の、それぞれピーク値を与える振動数として算出した。なお両アーチダムとも、岩盤境界に正弦波を入力した場合の解析により、逆対称1次の固有振動数を捉えることはできなかった。また川浦アーチダ

ムでは、起振実験における起振点での点加振問題としての解析からも、対称1次の固有振動数を捉えることができ、その値は岩盤境界に正弦波を入力した場合の解析による値と一致した。

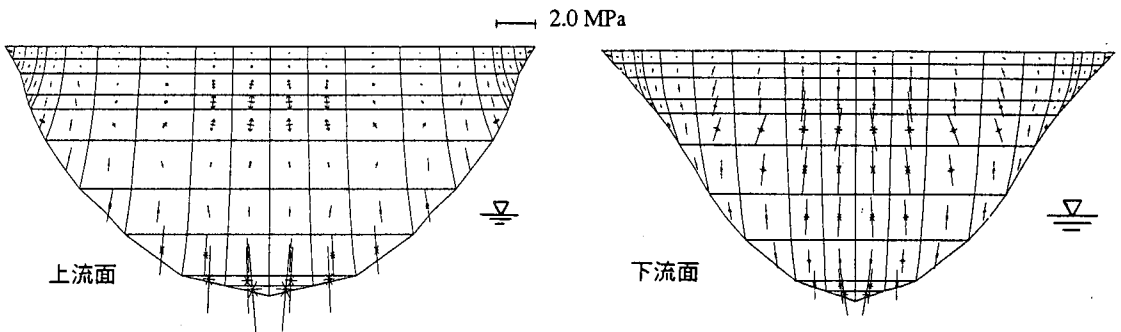
図-7, 8(a)にその結果を示す。川浦、高根両ダムとも高い貯水位では、固有振動数は実測値と解析値でほぼ一致している。しかし貯水位が低下するにもかかわらず固有振動数が小さくなり始める貯水位から、実測値と解析値の固有振動数に差が生じ、貯水位が低い範囲では実測の固有振動数は、解析値より低振動数側にある。池原アーチダムにおいても<sup>4)</sup>、実測と解析による固有振動数と貯水位の関係の比較がなされている。解析ではダムの弾性係数をいくつか変えた結果が示されている。図-9(a)にもそれを、細線と一点鎖線の細線で示している。いまこの両者の結果を参考に、



(a) 貯水位がH.W.L.



(b) 貯水位がH.W.L.-20m



(c) 貯水位がH.W.L.-80m

図-13 高根アーチダムの貯水位と上下流面の静的応力

高い貯水位での貯水位と固有振動数の平均的な関係を満足する線を示したのが、太い点線である。池原アーチダムでも、貯水位が低い範囲では実測の固有振動数は、この太い点線より低振動数側にあることがわかる。

## 6. 貯水位とブロックジョイント部の開口変位

### (1) 貯水位とダムの応力状態

図-12 は、川浦アーチダムの上流面と下流面の静

的応力をダム-岩盤-貯水の三次元連成線形解析により求めたものである。貯水位は起振実験を行った3つの貯水位で H.W.L. と H.W.L.-26.5m と H.W.L.-70m である。左が上流面、右が下流面の主応力図である。荷重はダムの自重と水圧である。ダムの建設過程を考慮すると、自重はブロックジョイント間のグラウチングが実施される前段階で作用するので、まず自重に対しては縦方向の節点を切り離した、ダムが片持ち梁の状態で解析した。次に水圧は、ブロックジョイント間のグラウチングが実施された段階で作用するので、縦

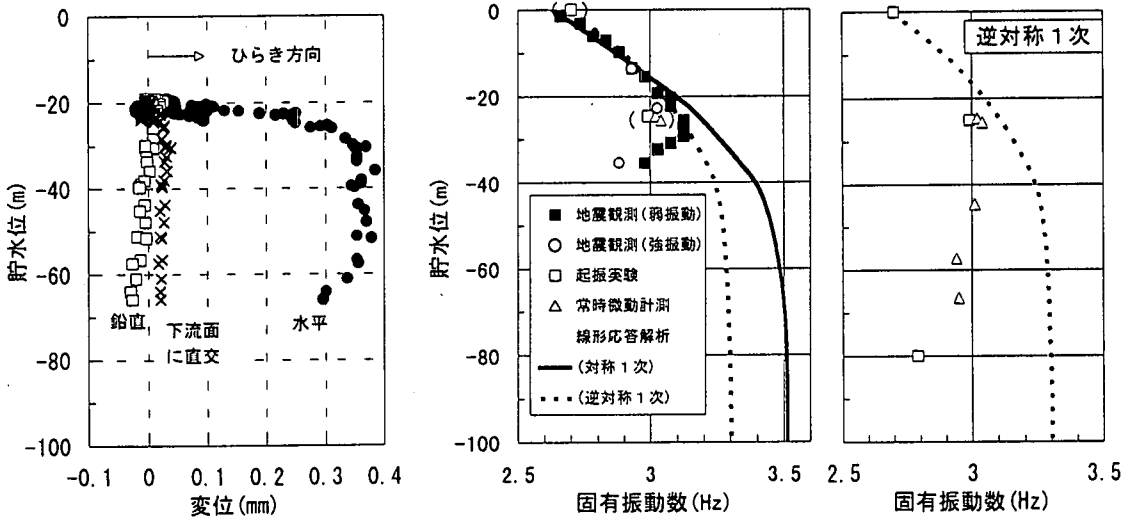


図-14 高根アーチダムの貯水位とダム下流面ジョイント部の変位の関係(左)と高根アーチダムの貯水位と固有振動数の関係(右, 再掲)

方向の節点も接合した、ダムが一体化した状態で解析した。そして両荷重の場合の結果を重ね合わせて、静的応力を求めた。条件は表-2と同じであるが、岩盤の弾性係数だけは、岩盤にダムの自重や水圧により生じる応力は、固有振動数を算出するのに対象としている弱振動時に岩盤に生じる応力にくらべて大きいことを考慮して、原位置平板載荷試験による割線弾性係数相当の値としている。

図-13は図-12と同様に、高根アーチダムの上流面と下流面の静的応力を示したものである。貯水位は起振実験を行ったH.W.L.、H.W.L.-20mとH.W.L.-80mである。応力状態を算出した貯水位のうち、川浦アーチダムのH.W.L.-26.5mと高根アーチダムのH.W.L.-20mの貯水位は、概ね貯水位が低下するにもかかわらず固有振動数が小さくなり始めるとともに、実測と解析で固有振動数に差違が生じ始める貯水位である。

図-12, 13(a)より、川浦アーチダム、高根アーチダムともに、貯水位がH.W.L.ではダムの天端中央付近は上下流面とも水平方向圧縮応力が作用し、その大きさは上流面で3MPa程度、下流面で1MPa程度である。これに対し、図-12, 13(b)の貯水位が低下するにもかかわらず、固有振動数が小さくなり始める貯水位である、川浦アーチダムのH.W.L.-26.5mと高根アーチダムのH.W.L.-20mの貯水位では、ダムの天端中央付近の水平方向圧縮応力は、上流面でかなり小さくなり、下流面ではほぼ零になっている。そしてさらに貯水位が低い図-12, 13(c)の川浦アーチダムの

L.W.L.-70mと高根アーチダムのH.W.L.-80mの貯水位では、上下流面とも広い範囲にわたって水平方向圧縮応力がほとんど零の状態である。以上、貯水位が異なると、ダムの応力状態はかなり異なることがわかる。

## (2)貯水位とブロックジョイント部の開口変位

高根アーチダムで、貯水位と下流面でのジョイント部の変位との関係を調べた<sup>10)</sup>。実施期間は貯水位低下の機会を捉えて行った起振実験や常時微動計測と同時期である。変位の計測を行った位置は図-1(a)に示すJ1, J2, J3の3個所で、J1が継ぎ目計、J2, J3がパイゲージによる測定である。継ぎ目計による計測を行った位置は、ダム上部の地震計設置位置と同標高である。継ぎ目計により、ジョイント部を挟んで10cm間の、水平方向と鉛直方向ならびに下流面に直交する方向の相対変位量を計測した。パイゲージではジョイント部を挟んで5cm間の、水平方向の相対変位量を計測した。

図-14に、継ぎ目計により計測したジョイント部での3方向の相対変位量と貯水位の関係を示す。これよりジョイント部は貯水位の低下とともに、ジョイント部の鉛直方向と下流面に直交する方向の変位はほとんど生じておらず、水平方向に開き変位を生じていることがわかる。なおパイゲージによる水平方向の変位も、同様の計測結果であった。図-14の横には、貯水位と固有振動数の関係を示す図-8(a)を、縦軸の貯水位をそろえて再掲している。両図から、ジョイント部の水平方向変位が急激に増大し始める貯水位は、

上記の下流面の水平方向圧縮応力がほぼ零になり、実測値と解析値で固有振動数に差違が生じはじめる貯水位に、よく対応していることがわかる。

## 7. アーチダムの固有振動数に及ぼすブロックジョイントの影響

### (1)貯水位と固有振動数の関係に及ぼす影響

ダムの貯水位と応力状態の解析結果やジョイント部の開口変位測定結果から、貯水位が高く水平方向に圧縮応力が作用している状態では、ジョイントは閉じている。貯水位が高い範囲では、貯水位と固有振動数の関係は、ダム-岩盤-貯水の三次元連成解析で再現可能であったことから、ダムはジョイント部の影響のない線形挙動を示していると判断される。しかし貯水位の低下とともに、ダムの上部に水平方向圧縮応力がほとんど作用しない部分が生じると、ジョイント部に水平方向の開き変位が生じ、ダムの固有振動数はダムがジョイントのない線形挙動を示すとした場合の値より低振動数側の値となる。

### (2)振動レベルと固有振動数の関係に及ぼす影響

川浦アーチダムでは、貯水位がH.W.L.に近いH.W.L.-4m程度で、最大加速度が120Gal程度までの記録が得られている。著者らは、この地震時のダムの加速度応答シミュレーションを、ダム-岩盤-貯水の三次元連成線形解析により行い、観測値と概ね一致する解析結果を得ている<sup>11)</sup>。この場合の動的応力を解析すると、水平方向引張応力はダムの上部で発生する。その大きさは、最大値(ダム天端中央部の上流面で発生)でも0.3MPa程度で小さい。一方、この場合の貯水位はH.W.L.-4m程度でH.W.L.に近く、図-12(a)からも推察されるとおり、ジョイント部には静的な水平方向圧縮力が作用している。このため観測した最大加速度の範囲では、ジョイント部のほぼ全域で圧縮応力が作用し、ジョイント部が閉合した状態のため、最大加速度に違いがあってもダムは線形挙動を示し、固有振動数にも差違があらわれないと考えられる。高根アーチダムで貯水位がH.W.L.-15m程度で、最大加速度が130Gal程度の記録の固有振動数が、弱振動のときと同じなのも同様の理由である。

これに対し、高根アーチダムで貯水位がH.W.L.-25mとH.W.L.-35mの場合に、それぞれ最大加速度200Galと180Gal程度の比較的強振動時に、固有振動数が弱振動時に比べ低振動数側の値になっている。これはいずれも、ジョイント部が弱振動時の固有振動数にも影響を与えている低い貯水位の場合で、強振動時にはジ

ョイント部の水平方向の開口変位がより大きくなるためと考えられる。最大加速度が200Gal、180Galと同程度であっても、弱振動レベルの固有振動数との差が、貯水位がH.W.L.-25mの場合は0.05Hz程度であるのに対し、H.W.L.-35mの場合は0.15Hz程度と大きくなっている。これは貯水位が低いH.W.L.-35mの方が、水平方向圧縮応力がほぼ零となる範囲が拡大し、ジョイント部の開口変位が生じる範囲が拡大するとともに、開口変位量も増大しているためである。なお先に4章(3)節で述べたが、以上の比較を行っている弱振動時と強振動時の固有振動数は、いずれも同一地震に対する記録から求めたものである。よって、外気温がジョイント部の状態に及ぼす影響には差異がない。

文献12)には、Pacoimaアーチダム(ダム高109m、堤頂長177m)の有限要素法による三次元線形地震応答解析の結果が示されている。対象の地震動はダム近傍の断層による地震動を想定したもので、最大加速度は300Gal程度である。これによれば貯水位がH.W.L.の場合で、静的応力と動的応力を合成して算出した引張応力は、アーチダムの天端中央部で最大10~15MPa程度とかなり大きいことが示されている。本研究で対象とした地震観測記録の最大加速度は200Gal程度の大きさなので、ジョイント部の影響がやすい貯水位が低い場合に固有振動数が低振動数側に変わることが認められたが、上記の解析結果は、より強振動時には貯水位が高い場合にも、ダムの挙動はジョイント部の影響を受け、振動レベルに応じてアーチダムの固有振動数が変化することを示していると考えられる。このことは、アーチダムが非線形な応答特性を有することを示し、アーチダムの耐震性において極めて重要な意味を持つと考えられる。

## 8. 結語

2つのアーチダムを対象に、ダムの上部と最低部での地震観測記録や常時微動計測記録、起振実験の共振曲線から固有振動数を算出し、ダムの貯水位や振動レベルと固有振動数の関係について示すとともに、それにブロックジョイントの影響があることを明らかにした。本研究による主要な成果をまとめると以下のとおりである。

(1)アーチダム上部の最低部に対する地震観測記録や常時微動計測記録の加速度フーリエスペクトル比のピーク値、あるいは起振実験の共振曲線のピーク値を与える振動数として求めた固有振動数は、算出方法にかかわらず一致した。

(2) アーチダムの固有振動数と貯水位の関係は、貯水位が高い範囲では、貯水位が満水位から低下するに従い、固有振動数は大きくなる。しかしある貯水位以下になると逆に固有振動数は小さくなり、さらに低い貯水位以下では概ね一定の固有振動数である。

(3) 貯水位が高い範囲での貯水位が満水位から低下するに従い、固有振動数は大きくなる関係を、ダム-岩盤-貯水の三次元連成線形解析により再現することができた。しかし貯水位と固有振動数の関係が異なるそれ以下の貯水位では、三次元連成線形解析モデルから求めた固有振動数のほうが高振動数側になった。

(4) 貯水位が低下しても固有振動数が大きくなる貯水位は、水圧によるダム上部の水平方向圧縮応力がかかなり小さくなるとともに、ブロックジョイントの水平方向開口変位が増大しはじめる貯水位であることを示した。そして貯水位と固有振動数の関係にブロックジョイントの影響があることを明らかにした。

(5) ダムの振動レベルと固有振動数の関係は、貯水位が高くダム上部の水平方向圧縮応力が数 MPa と大きい場合に対して、最大加速度が 120~130Gal 程度までの記録が得られたが、最大加速度がこの範囲までにおいて固有振動数は振動レベルの大きさに依存しなかった。一方、貯水位が H.W.L. -30m 程度と低く、ダム上部の水平方向圧縮応力がほぼ零になっている場合に対して、最大加速度が 180~200Gal の記録が得られたが、このときの固有振動数は弱振動時のそれに比べ低振動数側にあった。これは、弱振動時の固有振動数にもジョイントの影響がある貯水位の場合で、より強振動時にさらにジョイントの影響があらわれたためである。

今後は、いくつかのアーチダムでの強振動時の固有振動数が求められることが望まれる。ダムでの地震観測はダムの上部では多くなされているが、ダムの最低部でも地震観測がなされている例は比較的少ない。本研究で示したようにダムの上部と最低部の地震観測記録からダムの固有振動数が算出できることから、今後多くのダムでダムの最低部でも地震観測がなされることが望まれる。また地震観測がなされていないダムにおいても、常時微動計測により 1 次の固有振動数の算出が可能であり、本研究で示したように貯水位低下の機会を捉えて、貯水位と固有振動数の関係が多くのダムで明らかにされることが期待される。

謝辞：本研究に際し議論して頂いた、(株)シーテック技術コンサルタント部の恒川和久氏、横井幹仁氏に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Okamoto, S. : Introduction to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press, 1984.
- 2) Hall, F.J. : The Dynamic and Earthquake Behaviour of Concrete Dams-Review of Experimental Behaviour and Observation Evidence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.7, No.2, pp.58-121, 1988.
- 3) Fujii, T., Egawa, K. and Katayama, I. : Dynamic Behavior of Nagawado Arch Dam in the Event of 1984 Nagano Seibu Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.3, No.2, pp.347-364, 1987.
- 4) 柏柳正之：地震観測データに基づくアーチダムの動的特性と貯水との関連性について，大ダム，No.146，pp.26-35，1993.
- 5) 上田稔，田村重四郎，塩尻弘雄，近藤寛通：アーチダムの起振実験で実測した動水圧と変位のシミュレーション，土木学会論文集，No.605/I-45，pp.15-28，1998.
- 6) 増子芳夫，高橋忠，国生剛治：高根第 1 アーチダムの動的特性，電力中央研究所報告 72557，1972.
- 7) 豊田幸広，松尾豊史，西内達雄，上田稔，水野和彦：現場振動計測に基づく既設アーチダムの動的応答特性に関する検討，電力中央研究所報告 u97031，1997.
- 8) 上田稔，奥田宏明，塩尻弘雄，田村重四郎：アーチダムの起振実験シミュレーション，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.203-212，1994.
- 9) 佐藤正俊，上田稔，長谷部宣男，梅原秀哲：ダムコンクリートの地震時の動弾性係数に関する研究，土木学会論文集，No.564/V-35，pp.43-55，1997.
- 10) 西内達雄，豊田幸広，松尾豊史，上田稔，水野和彦：三次元非線形有限要素法を用いた既設アーチダムの常時挙動の検討，電力中央研究所報告 u97060，1998.
- 11) 上田稔，恒川和久，横井幹仁，塩尻弘雄，：アーチダムの実地震応答シミュレーション解析，第 24 回地震工学研究発表会講演概要，pp.513-516，1997.
- 12) 土木学会：動的解析と耐震設計 第 3 巻 エネルギー施設，技報堂出版，pp.86-70，1989.

(1999.7.5 受付)

RESONANT FREQUENCY OF CONCRETE ARCH DAM  
EVALUATED FROM OBSERVATIONAL IN-SITU RECORDS  
AND EFFECTS OF CONTRACTION JOINTS ON THESE FEATURES

Minoru UEDA, Yukihiro TOYODA, Hiroo SHIOJIRI and Masatoshi SATOU

Resonant frequencies of concrete dams are very important property because they influence earthquake responses of concrete dams. For two existing arch dams, resonant frequencies are evaluated from acceleration records during earthquakes at the upper and lower parts of dams. And those are also determined from the results of forced vibration tests and ambient measurements. The relations between resonant frequencies and water levels of the reservoir are presented and it is shown that resonant frequencies at low water range decrease with the reduction of water depth. It is also shown that resonant frequency corresponding to large peak acceleration of dam response is lower than that corresponding to small peak acceleration. It is discussed that these features are attributed to effects such as stress of dam which can affect the contact conditions in the contraction joints.