

アーチダムの起振実験シミュレーション

上田 稔*・奥田宏明**・塩尻弘雄***・
田村重四郎****

アーチダムの地震時の安全性をより合理的に評価するには、ダムの動的挙動を解析により正確に把握する必要がある。しかし、解析はダム-岩盤-貯水の大規模な三次元連成問題であり、解析条件はかなり複雑である。十分な信頼度を有する解析を行うためには、解析モデル、解析条件についての検討が必要であり、実測値に基づく実証的な研究が望まれる。本研究は、このような考えに基づき、起振実験のシミュレーションを試みたもので良好なシミュレーションを行うことができた。シミュレーション結果を示すとともに、用いるべき解析モデル、物性値の評価、解析の手順等について明らかにする。

Key Words : arch dam, forced vibration test, simulation, three dimensional finite element analysis, dam-foundation rock-reservoir water system

1. ま え が き

アーチダムの地震時の安全性をより合理的に評価するには、ダムの動的挙動を正確に把握する必要がある。それには有限要素法による動的解析が有効である。近年、計算機の性能が飛躍的に向上し、複雑で大きな解析モデルの計算が可能になってきており、幾つかの計算例も報告されている^{1)~4)}。しかし、解析はダム-岩盤-貯水の三次元連成問題であり、メッシュサイズ、解析領域の広さ、境界条件、ダム及び岩盤の動的物性など、解析条件はかなり複雑である。十分な信頼度を有する解析を行うためには、これら解析条件についての検討が必要であり、できるだけ実測値に基づく実証的な研究が望まれる。本研究は、このような考えに基づき、アーチダムの地震応答シミュレーションを目指す前段階の研究として、起振実験⁵⁾のシミュレーションを行ったものである。

起振実験のシミュレーションは、いくつかのアーチダムについて試みられている。これに関しては、文献6)の中でまとめられているが、問題点もいくつか指摘されている^{6)~9)}。まず、解析については岩盤部の質量を小さくしている⁶⁾。これは、岩盤境界を固定としている影響を軽減するためと考えられる。岩盤部に質量を与えると、シミュレーションがうまくいかないという報告もある⁶⁾。また貯水は非圧縮性としているのがほとんどで、圧縮性を考慮した解析はごくわずかである⁶⁾が、貯水の圧縮性を考慮して解析を行う必要があることが指摘されている^{7)~9)}。次に解析において最も重要な物性値であるダムコンクリートや岩盤の波動伝播速度(以下 V_s と略

す)についても明確になっていない。このためシミュレーション解析では実測の固有周波数をとらえられるように、ダムコンクリートと岩盤の V_s の組み合わせを解析的に見出ししているのが現状であり⁶⁾、観測や試験結果による十分な裏付けがなされていない。さらに、解析モデルのメッシュサイズや解析領域の広さについて検討している例も少ない。しかし岩盤境界を固定とした場合、その影響をなくすためには、岩盤領域をかなり広くとる必要があると考えられる。減衰定数については、ピークの応答値が実測と解析で一致するように決められている⁶⁾。しかし、応答値には上述の解析上の条件、ダムコンクリートや岩盤の V_s 、解析モデルが影響し、得られた減衰定数が十分妥当なものとは言い難い。

以上、起振実験シミュレーション解析における問題点に対して、本研究では岩盤境界に粘性境界を用い、貯水の圧縮性を考慮した解析を行う。メッシュサイズや解析領域の広さについての検討を詳細に行い、ダムコンクリートや岩盤の V_s について観測値や試験結果に基づく検討を加える。本研究は、以上の検討によりダムの起振実験のシミュレーション解析において用いるべき解析モデル、物性値の評価、解析の手順等について示すとともに、ダムの地震応答解析における有益な知見を見出すことを目的とするものである。

2. 起振実験の概要⁵⁾

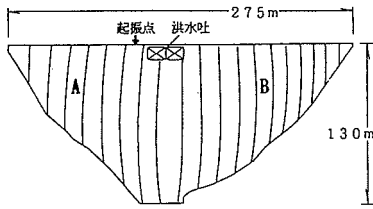
対象とするアーチダムは中部電力(株)所有の高根第一ダムで、ダム高 130 m、堤頂長 275 m である(図-1)。ダムは 1969 年竣工で、ダムサイトの地質は古成層のチャートからなり、所々にひん岩の貫入が認められる。起振実験は湛水後の 1971 年に満水位で実施されている。ダム天端で、二輪偏心重錘式起振器によりアーチ半径方向に起振している。起振位置を図-1 に示す。起振力を 2~6 Hz の範囲で 0.1 Hz の刻み(ただしピーク周波数の両側

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

** 正会員 中部電力(株) 奥美濃水力建設所 副所長

*** 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科

**** 正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科



図一 ダム下流面展開図

表一 物性値

	ダム	岩盤
動弾性係数 E_d (t/m ²)	3.7×10^6	1.6×10^6
せん断波伝播速度 V_s (m/sec)	2460	1600
単位体積重量 γ (t/m ³)	2.50	2.50
動ポアソン比 ν_d	0.20	0.25
貯水部	水中音速 (m/sec)	1400
	インピーダンス比 β	側面 5.0 上流面 1.0

表二 $1/\sqrt{2}$ 法より求めた減衰定数

振動型	固有周波数 (Hz)	減衰定数 (%)
逆対称 1 次	2.7	2.0
対称 2 次	4.4	3.0

は 0.05 Hz の刻み) で変え、起振位置とブロック A, B (図一) の天端での各周波数ごとのアーチ半径方向の応答変位 (共振曲線) と、1 次、2 次の固有周波数に対するダム天端及び 1 次の固有周波数に対する起振位置ブロックと A, B ブロックのアーチ半径方向の振動形状が計測されている。

3. 解析手法

既開発の解析コード TEADHI¹⁾ は、基本的に有限要素法に基づく構造物 (ダム) と水や構造物周辺岩盤との三次元連成線形動的解析コードで、地震波の各周波数成分に対する周波数応答を求め、フーリエ逆変換により時間応答を求めるものである。用いる要素は 8~21 節点アイソパラメトリック立体要素である¹⁾。今回用いた解析コードは、TEADHI が、岩盤境界を固定とし、ダム-岩盤部の振動モードの周波数応答を貯水との相互作用を考慮して求め、重ね合わせる方法であった点を改め、粘性境界¹⁰⁾を導入し、ダム-岩盤-貯水連成系モデルの周波数応答を直接求めるものである。この粘性境界は、仮想仕事の原理に基づくものであり、通常用いられている粘性境界¹¹⁾よりもエネルギー吸収能力が格段に向上するものである¹⁰⁾。貯水池の境界条件は、貯水と貯水を取り囲む材料とのインピーダンス比¹⁾で与える。減衰はレーリー減衰としている。

4. 解析の概要と物性値

解析は、解析モデル (メッシュサイズ、解析領域の広さ)、岩盤及びコンクリートの V_s 、貯水池境界のインピーダンス比、そしてコンクリート及び岩盤の減衰定数の順に検討する。モデルや解析条件の妥当性は、起振点の応答変位の共振曲線の 1 次の固有周波数とその応答変位の収束状況、及び全体的な形状で判断する。起振実験は、すべての周波数に対し起振器の重りの重量と回転半径を一定にして実施されている。よって各周波数ごとの起振力は周波数の 2 乗に比例する。ここでは、すべての周波数に対して、起振力を 1 次の固有周波数 (2.7 Hz) のときの起振力で基準化した共振曲線を用いる。計算した周波数の刻みは 0.05 Hz である。貯水は圧縮性を考慮するが、圧縮性を考慮しない場合の結果も示す。岩盤境界は粘性境界とするが、固定境界との比較も行う。最後に得

られたモデルに対し振動形状のシミュレーション結果を示す。

物性値を表一に示す。岩盤の V_s については、ダムサイトで実施した観測や試験結果をもとに設定したいいくつかの値のうち、ダムの固有周波数がとらえられた値である (詳細は 6. に記す)。ダムコンクリートの V_s は、地震時のダムのひずみ速度の範囲ではひずみ速度依存性はそれ程大きくなく、静的圧縮試験の弾性係数より算出すればほぼ妥当な値が得られる¹²⁾。表一の値は材令 360 日で実施された静的圧縮試験より求められた値である。貯水部のインピーダンス比で側面とあるのは、ダム上流面、水面、及び貯水部の上流面境界を除いた貯水部を取り囲む境界全体である。この側面の値は、インピーダンス比を変えた解析を行い良好な結果が得られた値である (詳細は 7. に記す)。実際の貯水池は、本解析でモデル化する貯水部の範囲のさらに上流部にも存在するので、上流面のインピーダンス比は 1.0 とし、上流方向への波を透過させることとした。ダムのレーリー減衰の比例定数は、起振実験の共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法により求めた表二の値を満足するように与えた。なおこの場合の減衰には材料減衰の他に逸散減衰も含まれるので、最終的には 8. で検討を加える。岩盤の減衰はその変化がダムの応答に大きな影響を与えないことを確認し、ダムと同じ値を与えた。岩盤及びコンクリートの V_s 、貯水池境界のインピーダンス比、コンクリート及び岩盤の減衰定数の検討においては、検討項目の物性値が表一の値以外の場合についても解析を行っている。以下に検討項目ごとに述べる。

5. モデルに関する検討

解析モデルに関して、ダムのメッシュサイズ、岩盤、貯水池のメッシュサイズと領域の広さについて検討する。図二に最終的に設定した解析モデルを示す。その要素数、節点数を表三に示す。メッシュサイズの検討は、図二の ↓印部分のメッシュの大きさに着目して行う。同図中にこのメッシュサイズの数値を示す。本解析では中間節点を有する 20 節点六面体要素、15 節点三角柱要素を使用しており、↓印部分の半分の大きさをメッシュサイズと呼ぶことにする。対象とする上限の周波数 (6 Hz) に対する 1 波長の分割数と必要とされるメッ

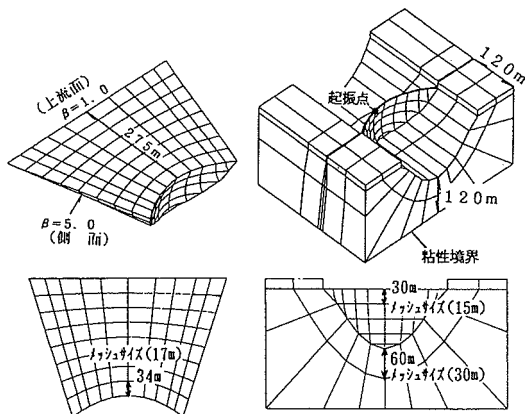


図-2 解析モデル (最終的に設定したモデル)

表-3 モデルの要素数, 節点数

	ダム	岩盤	貯水池
要素数	60	144	240
節点数	375	941	1179

表-4 上限周波数 6 Hz の波に対する 1 波長の分割数とメッシュサイズの関係

1波長の分割数	メッシュサイズ (m)		
	ダム	岩盤	貯水池
5	28	53	47
10	14	27	23
15	9	18	16
20	7	13	12

ダム: 138(m)
6Hzの波の波長 岩盤: 267(m)
貯水池: 233(m)

メッシュサイズとの関係を表-4にまとめた。ここで 6 Hz の波の波長は、岩盤と貯水池については波動伝播速度を周波数 6 Hz で除すことにより求めた。ダムについては三次元のシェル構造なので次のように実測の振動形状をもとに波長の大きさの目安を求めた。ダムを天端水平アーチでみた場合、上限の周波数 6 Hz に近い 5.4 Hz で逆対称 2 次振動が得られている (図-17 参照)。逆対称 2 次では堤頂の長さ (275 m) が概ね 2 波長分に相当するので、堤頂長の 1/2 (138 m) が波長の目安となる。一方、鉛直方向のクラウンカンチレバーでみた場合、逆対称 2 次の振動形状は実測されていないが、最終的に設定したモデルに対して解析により求めた振動形状は、天端が腹で節が 1 ケ所あった。即ち概ねダムの高さ (130 m) が 3/4 波長に相当するもので、ダムの高さの 4/3 (173 m) が波長の目安となる。以上より、波長が短く必要とされるメッシュサイズが小さくなる、天端水平アーチの振動形状より得られた 138 m を波長の目安とする。

実際の解析では多くの試行錯誤をくり返しているが、ここでは最終的に妥当と判断されたモデルに対して、メッシュサイズや領域の広さを変えた場合の結果を示しながら考察を行う。なお、図-2 の解析モデルでは岩盤の隅角部のメッシュが粗くなる。しかし、図-3 (a) のように岩盤をダムの着岩部沿いに丸くしたモデルとほぼ一致する共振曲線が得られることを確認しており、

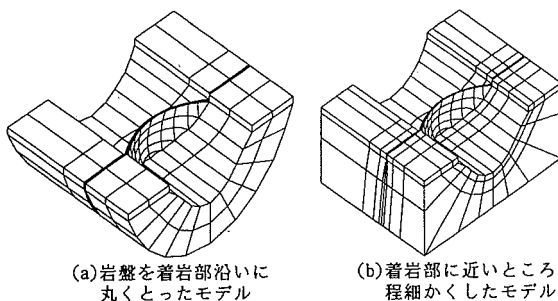


図-3 解析モデル

この隅角部の影響はほとんどない。さらに、図-2 ではダムが着岩する部分の岩盤部メッシュの上下流方向の長さが、その他の岩盤部に比べて小さい。そこで図-3 (b) に示すとおり、岩盤部のメッシュをダム着岩部に近いところ程細かくしたモデルでも解析を行ったが、図-2 の解析モデルの場合とほぼ一致する共振曲線が得られることを確認した。

(1) ダム

メッシュ分割の目安を対象とする上限周波数 (6 Hz) の波の波長の 10 分割程度とすると、ダムのメッシュサイズは 15 m 程度となる (表-4)。このときダム高方向の分割はアイソパラメトリック要素で 5 分割である。そこで、ダム高方向に、アイソパラメトリック要素で 3, 5, 7 分割 (ダム上下流方向は 2 分割) した。そのときのメッシュ図と、起振点での応答変位の共振曲線を実測と解析を比較して図-4 (a)~(c) に示す。横軸は周波数である。各図の上にはピークの周波数とその応答変位を記す。以下、図-5~8 と図-10~14 も同様である。メッシュが粗いと固有周波数は高くなり、応答変位は小さくなる。メッシュを細かくすると、応答変位のピーク値に収束傾向が認められ、ダム高方向に 5 分割したケース (メッシュサイズ 15 m) ではほぼ収束している。従って 5 分割したモデルとする。このときのメッシュサイズは、6 Hz の波の波長の 10 分割程度であり (表-4)、ピークの周波数 (2.7 Hz) の波の波長に対しては倍程度 (以下岩盤、貯水池の場合も同様) の分割である。

(2) 岩盤

領域を 60 m, 120 m, 180 m と変えたときのメッシュ図と共振曲線を図-5 (a)~(c) に示す。メッシュサイズは 30 m である。固有周波数はほぼ同じだが、領域が狭いとピークの応答変位は小さくなる。領域 120 m と 180 m のケースは、対象周波数全体にわたりほぼ同じ共振曲線が得られており、120 m で収束している。この 120 m はほぼダム高に相当する大きさである。次に、岩盤の領域は 120 m としたままで、岩盤のメッシュサイズを 60 m, 30 m, 20 m と変えた場合の解析結果を図-6 (a)~(c) に示す。固有周波数はほぼ同じだが、メッ

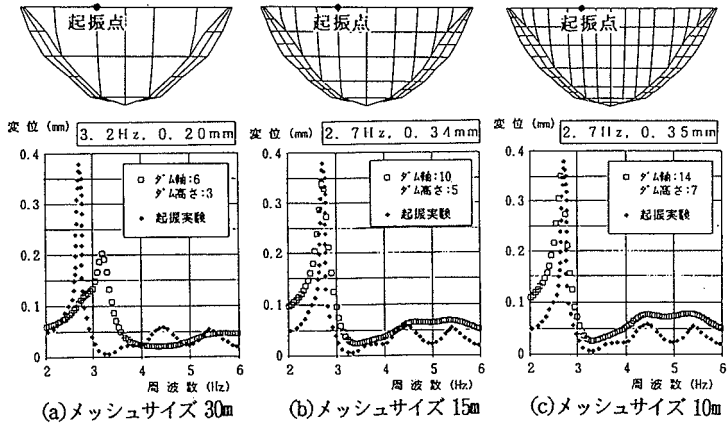


図-4 ダムのメッシュサイズの検討

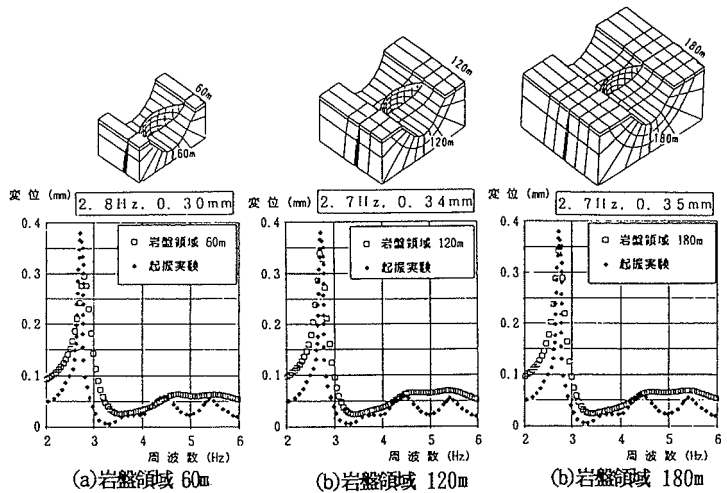


図-5 岩盤領域の広さの検討

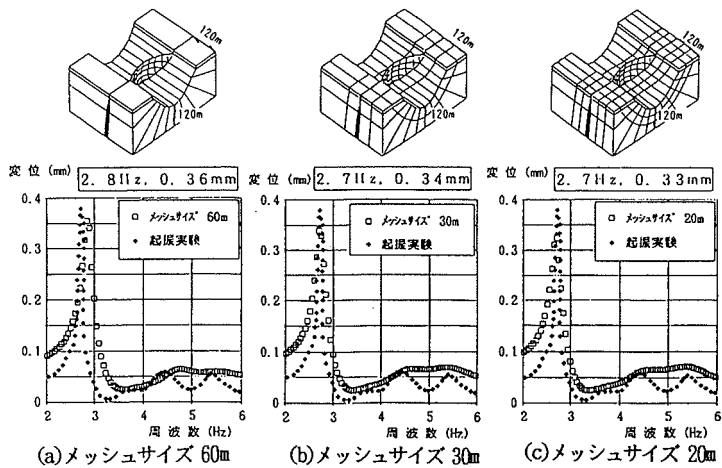


図-6 岩盤のメッシュサイズの検討

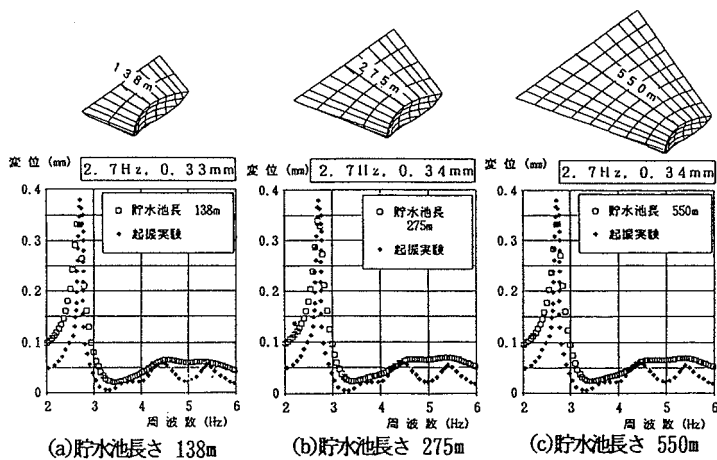


図-7 貯水池長さの検討

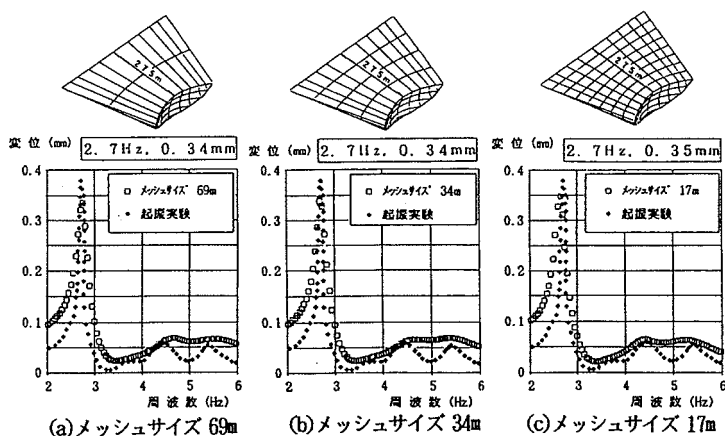


図-8 貯水池のメッシュサイズの検討

メッシュサイズ 60 m のケースはピークの応答変位が大きく、メッシュサイズ 30 m で、20 m のケースとほとんど同じ結果が得られている。メッシュサイズ 30 m は、6 Hz の波の波長の 10 分割程度である (表-4)。

(3) 貯水池

貯水池長さを 138 m, 275 m, 550 m としたときの解析結果を図-7 (a)~(c) に示す: メッシュサイズは 34 m である。固有周波数 2.7 Hz に変化はなく、応答変位もほとんど変わらない。貯水池長さが解析結果に及ぼす影響は小さいが、ここでは変位が 0.34 mm で落ち着いた 275 m とする。この値はダム高のほぼ 2 倍に相当する。次に、貯水池長さを 275 m としたままで、メッシュサイズを 69 m, 34 m, 17 m と変えたときの解析結果を図-8 (a)~(c) に示す。共振曲線のピーク値に差はほとんどない。しかし、貯水池のメッシュサイズは、高周波側でダムの応答に影響し、4~6 Hz 付近でのフィッティング状況は、今回解析した範囲では、メッシュサイズ 17 m の場合が最も良く、良好な結果が得られた

ので、メッシュサイズは 17 m とする。この大きさは 6 Hz の波の波長の 15 分割程度である (表-4)。

6. 岩盤及びダムコンクリートの Vs に関する検討

岩盤の Vs について検討するため、ダムサイト岩盤内の標高差のある 2ヶ所 (図-9 の A と B) で地震観測を行うこととした。A 点の地震計は、約 50 m の鉛直ボーリングを行い、その孔底に設置したが、その際に S 波検層 (サスペンション方式) も実施した。2 点で記録した地震波の S 波の立ち上がりのゼロクロス部分の時間差 ΔT と観測点間の鉛直距離 ΔH より、S 波の伝播速度 Vs を $V_s = \Delta H / \Delta T$ で算出した (図-9)。用いた地震波は、そのときのダム天端での応答加速度が 10 gal 程度で、起振実験のときと同程度のものである。得られた岩盤の Vs は 1600 m/sec で、表-1 の値と同じである。この値は、上記 S 波検層による値とほぼ一致した。このことは対象とした地震波が鉛直上方に伝播していることを示

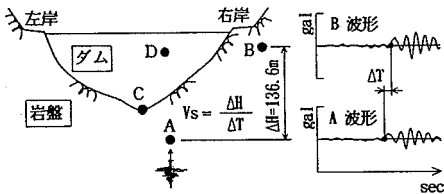


図-9 観測地震波からの V_s の算定法

表-5 解析ケースとダム及び岩盤の V_s

CASE	V_s (m/sec)		備 考
	ダム	岩盤	
I-1		1100	静的原位置平板荷重試験の弾性係数より求めた値
I-2	2460	1300	上記の弾性係数を 1.5 倍に割り増した値
I-3		1600	観測地震波より求めた値
I-4		2000	発破による弾性波探査結果より求めた値
II	3000	1600	観測地震波より求めた値

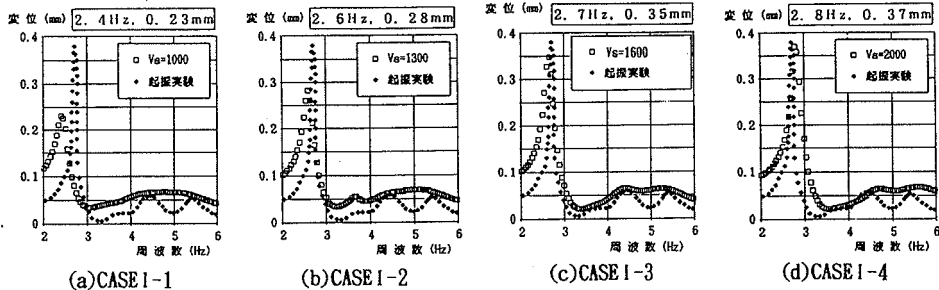


図-10 岩盤の V_s の検討

している。これと同様の例が文献13)にも示されている。さらに、図-9のA、B2点の水平動の記録をフーリエ変換し、パワーの卓越する周波数に対して、2点間の位相差から求めた V_s もほぼこの値と一致した。

上記の岩盤と同じ方法で、標高差のある2ヶ所(図-9のCとD)の観測地震波より、ダムコンクリートの V_s を求めたが、その値はダムコンクリートの静的圧縮試験の弾性係数から求めた値とほぼ一致していた。このコンクリートの V_s に対し、岩盤の V_s が解析結果に及ぼす影響を評価する目的も含めて、上述の観測地震波より求めた値の他に、ダム建設に先立ちダムサイトで実施された試験結果をもとに値を設定して、解析を行った。解析ケースのダムコンクリートと岩盤の V_s の組み合わせを、表-5に示す。このように、観測や試験方法により岩盤の V_s は大きく異なる。動的繰返し弾性係数は静的繰返し弾性係数の概ね1.1~1.6倍程度と報告¹⁴⁾があることを考慮し、CASE I-2は、弾性係数をCASE I-1の静弾性係数の1.5倍に相当する値とした場合である。CASE I-4は、ダム建設時にダムサイト調査横坑間で実施した発破による弾性波探査結果より求めた値とした場合である。CASE IIは、コンクリートの V_s が解析結果に及ぼす影響を知るため、岩盤の V_s をCASE I-3と同じとし、コンクリートの V_s を超音波測定より得られる値程度¹⁵⁾にした場合である。

CASE I-1~4の解析結果を図-10(a)~(d)に示す。 V_s が大きくなる程、1次の固有周波数は高周波側に移り、その応答変位は大きくなることわかる。CASE I-3が、実測値と最もよい一致を示している。1次の固有周波数は実測値と一致し、その応答変位も実測値に近い値である。起振実験における1次の固有周波数

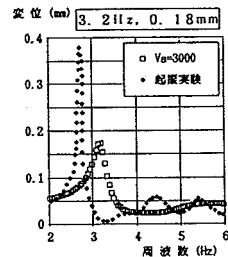


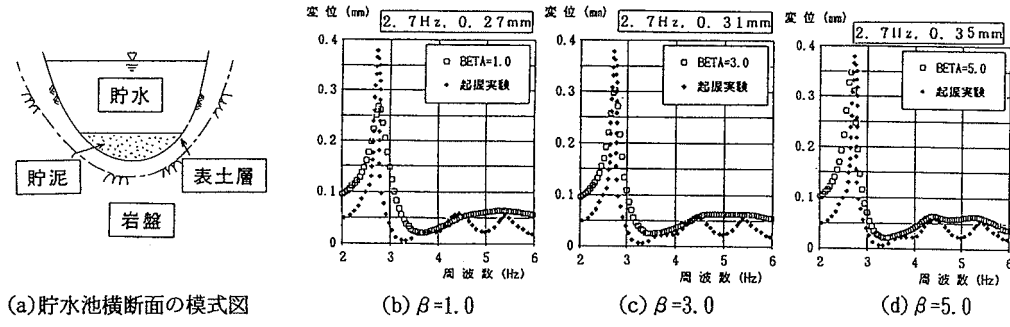
図-11 コンクリートの V_s の検討 (CASE II)

のときの、ダム天端の加速度は約10 galである。これは、CASE I-3の岩盤の V_s を求めた地震時のダム天端の加速度とほぼ同じである。このことから上記両者の固有周波数に対する岩盤の応答はほぼ同程度であり、このためCASE I-3が実測値とよい一致を示していると考えられる。なお、図-11に超音波法に基づくコンクリートの V_s を用いたCASE IIの結果を示すが、解析結果と実測値にかなり差異がある。実測に比べ1次の固有周波数は0.5 Hz高周波側であり、応答値は半分程度である。これよりダムコンクリートの V_s として、超音波法から求められる値を地震応答解析に用いるべきでないことがわかる。

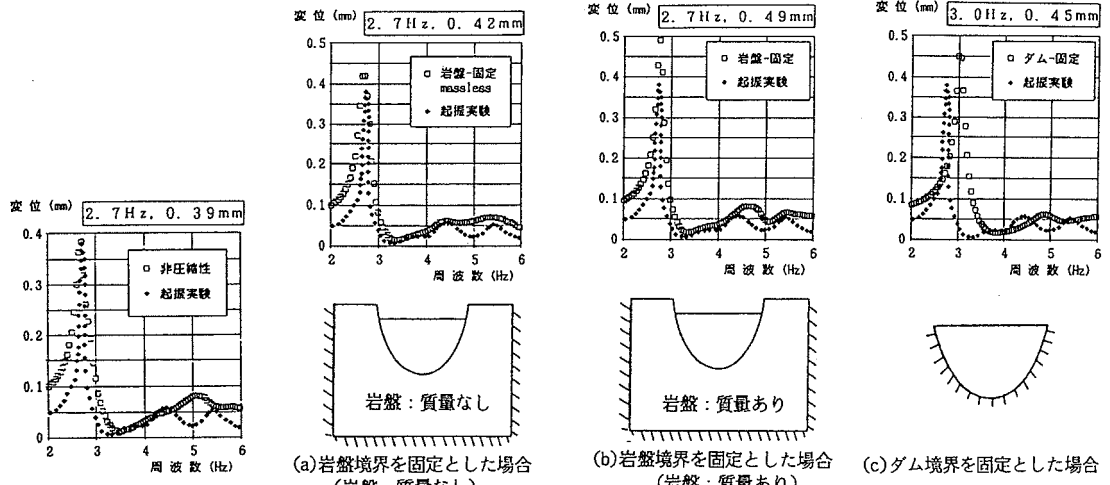
7. インピーダンス比、貯水の圧縮性及び境界条件に関する検討

(1) 貯水池側面のインピーダンス比

貯水池側面のインピーダンス比 β が、動水圧に大きく影響することが報告されている¹⁵⁾。このことからダムの応答への β の影響は大きいと予想される。貯水池の横断面を模式的に示したのが、図-12(a)である。



図—12 貯水池側面のインピーダンス比 β の検討



図—13 貯水を非圧縮性とした場合

図—14 固定境界の影響

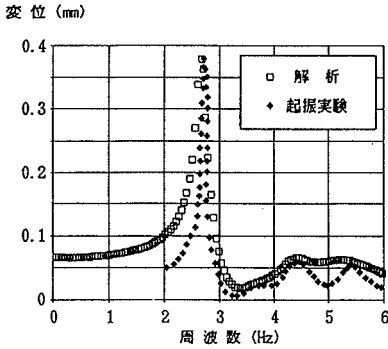
貯水の周辺には堆泥と表土層が、その外側には岩盤が存在する。起振実験が実施されたのは湛水直後であり、貯泥の堆積は少ない。いま β を水と岩盤の波動伝播速度と密度より求めると、ほぼ 5.0 になる。一方堆泥や表土層を対象とすると β は 1.0 程度の値である。そこで β の影響を調べるため、 β を 1.0, 3.0, 5.0 と変えて解析した。貯水池上流面のインピーダンス比はいずれの場合も 1.0 である。解析結果を図—12 (b)~(d) に示す。 β によって 1 次の固有周波数に変化はない。しかし、その応答変位は β の変化率に対してほぼ比例的に変化し、 β が大きい程大きい。さらに、 β が小さいと高周波側でのフィッティングが悪くなる。 $\beta=5.0$ の場合が最も良い結果を与えている。このことから、貯水池底の堆泥や貯水池周辺の表土層の影響は小さく、貯水を取り囲む領域を岩盤で代表させて、 β を設定すればよさそうである。これは貯水と堆泥や表土層とのインピーダンスの差が小さく、これらと岩盤とのインピーダンスの差が大きいこと、かつ、堆泥や表土層の厚さがその波長に比べて小さく、そこでの波の減衰は小さいためであると考えられる。

(2) 貯水の圧縮性

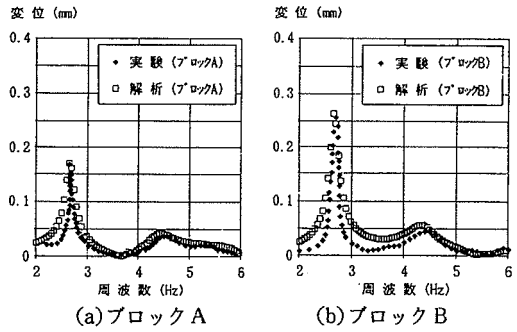
貯水の圧縮性がダムの応答に及ぼす影響を調べるため、貯水を非圧縮性とした場合と比較する。本解析コードは、貯水を圧縮性として扱うものである。貯水を非圧縮性とした場合は、水中音速が無限大に相当する。そこで非圧縮性の場合として水中音速を 100 000 m/sec と大きくして解析した。なお水中音速をこの程度に大きくすれば、水中音速の大きさにより解析結果に差異がないことを確認している。結果を図—13 に示す。非圧縮性とした場合、1 次の固有周波数 2.7 Hz はとらえているが、その応答変位は 0.39 mm で、圧縮性を考慮した場合の 0.35 mm に比べて 1 割程大きい。また、4 Hz 以上の高周波側では固有周波数をとらえることができず、実測と解析はかなり異なっている。

(3) 岩盤の境界条件

本解析は岩盤境界を粘性境界とし岩盤の質量を考慮しているが、ここでは岩盤またはダム境界を固定とした場合との比較を行う。岩盤境界を固定とする場合、その影響をなくするため岩盤の質量を無視した解析が行われている⁶⁾。そこで岩盤境界を固定とし、岩盤の質量を考慮し



図一15 最終的に得られた起振点の共振曲線



図一16 各ブロック天端の共振曲線

ない場合と考慮した場合、さらに、ダムのみをモデル化し境界を固定とした場合の解析結果を図一14(a), (b), (c)に示す。岩盤境界を固定で岩盤の質量を考慮しない場合には、1次、2次ともに固有周波数はとらえているが、応答変位は0.42 mmで岩盤境界を粘性境界とした場合の0.35 mmに対して2割程大きい。また、岩盤の質量を考慮した場合には、1次の固有周波数2.7 Hzはとらえられるが、応答は0.49 mmとかなり大きく、2次の固有周波数はとらえられていない。また、ダムのみをモデル化した場合には、固有周波数が実測値に比べて高周波側に移行する。

8. ダムコンクリート及び岩盤の減衰定数に関する検討

共振曲線の1次の固有周波数(2.7 Hz)の応答変位の実測値は0.38 mmである。実測ではピーク周波数(2.7 Hz)の両側は0.05 Hz刻みで測定されていることから、厳密なピーク周波数は2.7 Hz前後の0.05 Hzの範囲に存在する。いま、ピーク周波数付近を0.01 Hz刻みと細かくして解析を行い、そのときの最大の応答変位と、任意の0.05 Hz刻みの周波数に対する応答値との差を調べたところ、最大で0.007 mmであった。以上のことから、実測の最大応答変位0.38 mmは、実際の最大応答変位と高々0.007 mm程度の差であると考えられる。この0.38 mmに対し、解析結果は0.35 mmと約1割程小さい。そこでこのピークのときの応答変位の実測値と解析値が一致するダムコンクリートの減衰定数を、岩盤の減衰定数はそのまま解析により求めた。その結果は、1次、2次とも表一2の値より0.5%減じた値であった。この場合の解析結果を図一15に示す。減衰を0.5%減じる前の結果である図一12(d)と比較するとわかるが、減衰を小さくしても高周波側での応答変位はほとんど変わらない。岩盤境界に粘性境界を用い、貯水は圧縮性を考慮して貯水池境界にはインピーダンス比を設定していることから、ダムの減衰定数を共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法により求めた値より小さな値とすることは妥当なものと考

えられる。次に、岩盤の減衰定数の影響を調べるために、岩盤の減衰定数を対象周波数全体にわたり5%程度と大きくした場合の解析を行ったが、解析結果は変わらなかった。

以上、最終的に得られた起振点の共振曲線が図一15である。実測と解析は全体的には良好な一致を示している。解析結果は2次の固有周波数(対称2次4.4 Hz、逆対称2次5.4 Hz)付近の山谷が、実測程顕著でないが、1次、2次とも固有周波数をとらえている。ピーク周波数より低周波側で幾分大きめの差を生じている。この点に関する検討を行うため、図一15には起振実験が行われていない2 Hzより低周波側に対しても解析結果を示している。低周波側になるにつれて、ある一定値に収束している。この収束値は、正弦波で与えられている起振力の振幅の大きさを有する静的な集中荷重を与えたときの変位と一致することを解析により確認している。ただしこの解析では、岩盤の境界条件を固定としている。また、ダムの減衰を5%程度と大きくした場合の解析も行ったが、2.5 Hz以下の応答値にはほとんど差がなかった。即ち、2.5 Hz以下の応答値に減衰定数の影響はほとんどない。実測の2 Hzの応答値は上記収束値よりも小さくなっている。起振実験の起振力は周波数の2乗に比例しており、2 Hzで起振力は最も小さい。以上より明確なことは言えないが、実験における誤差が2 Hz付近の低周波域で大きいことが考えられ、このことが低周波域で実測と解析の差異を大きくしている理由の1つと思われる。

次に逸散減衰について若干の考察をする。いま解析結果から $1/\sqrt{2}$ 法により減衰定数を求めると、ピーク周波数で3.3%である。このときの解析で与えているダムコンクリートの内部減衰は1.5%であり、岩盤境界や貯水池境界からの逸散によるものが、この差の1.8%ということになる。

起振点以外のダムの天端の共振曲線のシミュレーション結果を図一16(a), (b)に示す。その位置は図一1に示すブロックA, Bの天端である。実測と解析は全

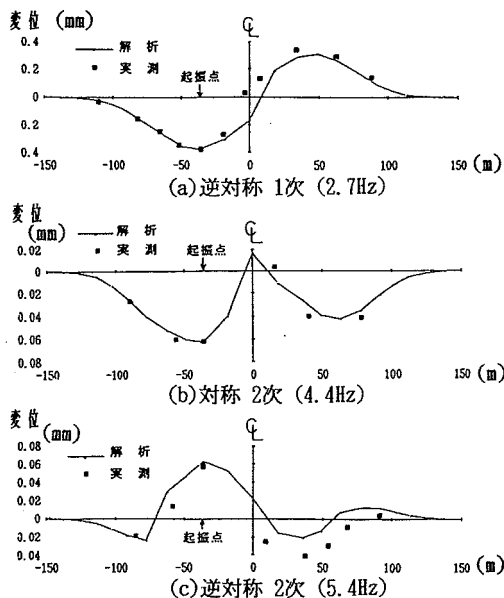


図-17 天端の振動形状シミュレーション結果

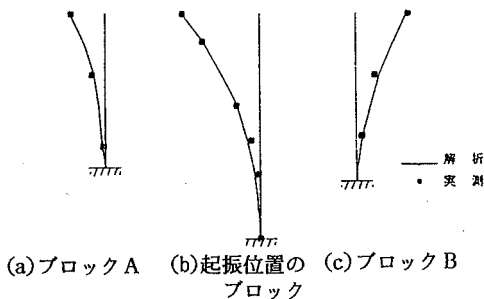


図-18 各ブロックの振動形状シミュレーション結果 (逆対称1次)

体的に良好な一致を示している。

9. 振動形状シミュレーション結果

ダム天端の振動形状を逆対称1次 (2.7 Hz), 対称2次 (4.4 Hz), 逆対称2次 (5.4 Hz) の順に図-17 (a) ~ (c) に, 逆対称1次の起振位置ブロックと A, B ブロック (図-1) の振動形状を図-18 に, 実測と解析を対比して示す。なお, このときの減衰は, 図-15, 16 と同じで, 2.7 Hz のときの応答変位が実測値と一致する値として表-2 の値より, 1次, 2次とも0.5% 減じた値とした場合である。実測と解析はダムの全体にわたり良好な一致を示している。図-17 (a) のダムの中央付近で実測と解析の合いが幾分良くないのは, 洪水吐 (図-1) の影響のためと考えられる。

10. 結 語

アーチダムの起振実験シミュレーション解析について述べた。解析条件を解析結果が実測値と合うように設定

している例は見受けられるが, 本研究のように解析モデルについて詳細な検討を行った上で, 実測による裏付けのある物性値を用いてのシミュレーションの成功例は, 著者らの知る限り見当たらない。本研究の主要成果をまとめると次のとおりである。

(1) 起振実験の共振曲線や振動形状の良好なシミュレーションを行うことができた。なお, このときの岩盤の V_s は観測地震波に基づいて得られた値である。また, ダムコンクリートの V_s については, 地震時のダムのひずみ速度の範囲では, V_s のひずみ速度依存性はそれ程大きくなく, 長期材令の静的圧縮試験の弾性係数より算出した値を用いればよい³²⁾, このことが今回のシミュレーション結果からも裏付けられた。

(2) 解析モデルに関して得られた知見をまとめる。メッシュサイズは, ダム, 岩盤, 貯水池いずれも対象周波数の上限の波の波長の10分割程度以上を目安とすればよい。ただし岩盤は V_s , 貯水は水中音速を基準に波長を設定し, ダムの波長については, 実測の振動形状をもとにその値を設定する。また, 岩盤領域はダム高相当の広さを, 貯水池長さはダム高のおよそ1~2倍とればよい。

(3) 岩盤の V_s はダムの応答に大きな影響を及ぼす。このため, アーチダムの地震応答解析には, 適切な V_s の設定を行った岩盤との連成解析が必要である。今回は観測地震波に基づいて V_s を評価した場合に良好な結果を得た。

(4) 本研究では貯水の圧縮性を考慮した解析を行ったが, 貯水池側面のインピーダンス比は, ダムの応答に大きく影響するので, その値を適切に設定することが重要である。今回の解析では, 貯水をとり囲む領域を岩盤で代表させて設定した値に対して, 良い解析結果が得られた。

(5) 貯水を非圧縮性とした場合には, 1次の固有周波数はとらえられるが, その応答は貯水の圧縮性を考慮した場合に比べ1割程大きくなる。また, 高周波側では実測の固有周波数をとらえることができない。

(6) 岩盤境界を固定とすると, 粘性境界の場合に比べダムの1次の固有周波数の応答は1~2割過大となる。

(7) 共振曲線のシミュレーションから得られた1次の固有周波数に対するダムコンクリートの内部減衰定数は1.5%程度であった。

(8) 岩盤の V_s や, 貯水池のインピーダンス比, 内部減衰定数等については, 今後さらにデータの蓄積が望まれる。起振実験のシミュレーションをもとにそれらを求める手順は以下のようにするのがよい。コンクリートの V_s は, 長期材令の静的圧縮試験から求められる値を用いればよく, 解析モデルのメッシュサイズや解析領域の広さを上記(2)を目安とすれば, 解析モデルによ

て固有周波数は変わらないので、まず、固有周波数をとらえる岩盤の V_s を見出す。次に、メッシュサイズや解析領域の広さを変えた解析を行い、モデルに起因してその応答値が変わらない解析モデルを確認しておく。そして次に、貯水池のインピーダンス比 β について検討する。 β は共振線のピークの応答変位のみならず、全体形状にも大きな影響を与え、この点から β の決定が可能であると考えられる。この段階で、応答値に影響を与えるダム及び岩盤の V_s 、解析モデル、貯水のインピーダンス比 β は決定されている。最後にダム及び岩盤の減衰定数について、解析による応答値と実測値を比較することにより検討する。ダムの天端で起振する起振実験の場合には、岩盤の減衰定数がダムの応答に及ぼす影響は小さい。よって、解析によるダムの減衰定数の評価が可能である。なお、この減衰定数の評価の前までの検討に用いる減衰定数は、共振線より $1/\sqrt{2}$ 法により求められる値が目安となる。そして、この値に比べ最終的に決定される減衰定数は、岩盤境界や貯水池境界からの逸散があるので小さくなる。

(9) 一般の地震応答解析においても、解析モデル、物性値の評価、解析の手順等、今回得られた知見が役立つと考えられる。なお、本研究はダムの天端で起振する起振実験のシミュレーションであり、地震応答解析に当っては、岩盤領域の広さや地震レベルに応じた岩盤の V_s の設定、地震波の到来方向等について、新たな検討が必要であると考えられる。今後は本研究成果を踏まえ、実際の地震応答シミュレーションを試みていきたい。

謝 辞

本研究に際し議論して頂きました中電工事(株)技術コンサルタント部の恒川和久氏、(株)ユニック数値解析研究室の相川幸雄氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 塩尻弘雄：水と岩盤との相互作用を考慮した構造物の地震応答解析法の研究，電力中央研究所報告，1987。
- 2) International Engineering Company : Pacoima Arch Dam Investigation and Evaluation of Effects of San Fernando

- Earthquake, Los Angeles Country Flood District, 1972.
- 3) Fujii, T., Egawa, K. and Katayama, I. : Dynamic Behavior of Nagawado Arch Dam in the Event of 1984 Naganoken Seibu Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.3, No.2, pp.347~364, 1987.
 - 4) 有賀義明：アーチダムの三次元動的シミュレーション解析，第21回地震工学研究発表会講演概要，pp.593~596, 1991.
 - 5) 増子芳夫・高橋忠・国生剛治：高根第1アーチダムの動特性，電力中央研究所報告，1972.
 - 6) Hall, F.J. : The Dynamic and Earthquake Behaviour of Concrete Dams-Review of Experimental Behaviour and Observational Evidence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.7, No.2, pp.58~121, 1988.
 - 7) Fox, K. and Chopra, K.A. : Water Compressibility in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.5, May, 1987.
 - 8) Duron, H.Z. and Hall, F.J. : Experimental and Finite Element Studies of the Forced Vibration Response of Morrow Point Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp.1021~1039, 1988.
 - 9) Chopra, K.A. : Hydrodynamic Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Earthquake Behavior of Arch Dams, pp.110~129, 1989.
 - 10) 三浦房紀・沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法，土木学会論文集，No.404/I-11, pp.395~403, 1989.
 - 11) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, L.R. : Finite Dynamic Model for Infinite Media, Proc. of ASCE, pp.859~877, 1969.
 - 12) 佐藤正俊・上田 稔・奥田宏明・近藤久雄：コンクリートダムの地震時波動伝播速度について，第48回土木学会年次学術講演会，p.318~319, 1993.
 - 13) 武村雅之・池浦友則・高橋克也・石田 寛・大島 豊：堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価，日本建築学会構造系論文報告集，No.446, pp.1~11, 1993.
 - 14) 土木学会：土木技術者のための岩盤力学，昭和54年版，pp.165~169, 1987.
 - 15) Nakagawa, T. and Hatano, T. : Analytical Solution of Hydrodynamic Pressure with Reflective Condition at Reservoir Bottom during Earthquakes, Proc. of JSCE., No.229, pp.119~125, 1974.

(1994. 3. 28 受付)

SIMULATION ANALYSIS OF FORCED VIBRATION RESPONSE OF ARCH DAM

Minoru UEDA, Hiroaki OKUDA, Hiroo SHIOJIRI and Choshiro TAMURA

Accurate prediction of earthquake response of arch dams is necessary for reliable evaluation of safety of the dams. The finite element method is now commonly used for the dynamic response analysis of dams. In that case, appropriate modelling should be done to get trustworthy results, and it is important to validate the modelling of dams by comparing computed results with observed ones. In this paper, responses of an arch dam to vibration tests are simulated using a newly developed computer code for three dimensional dam-foundation rock-reservoir water system. Extensive parametric computations are conducted, and the results are correlated with test results. Appropriate modellings for vibration tests are discussed, and a recommended procedure to determine modelling parameter is described.