

(146) アーチダムの起振実験シミュレーションと岩盤、貯水との連成解析モデルの構築

中部電力 電力技術研究所 正会員 上田 稔・奥田 宏明
 中電工事 技術コンサルタント部 正会員 ○恒川 和久
 日本大学 理工学部 土木工学科 正会員 塩尻 弘雄

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、計算機の性能が顕著的に向上し、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、幾つかの解析例も報告されている(例えば、1)~3))。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る。また、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¹⁾のシミュレーションを試みたものである。

2. 起振実験の概要¹⁾ 対象とするアーチダムはダム高130m、堤頂長275mである(図-1)。ダム天端で、二輪偏心回転式起振器により起振している(図-1)。起振力を2~6Hzの範囲で0.1Hzの刻みで変え、各周波数ごとの応答変位が計測されている。なお、貯水位は満水である。

3. 解析手法 解析コードは、ダム-岩盤-貯水の連成系モデルに対して直接周波数応答を求めるものである。既所有の解析コードTEADHI¹⁾が、モーダルアナリシスを基本として、ダム-岩盤部のモード毎に周波数応答を求める方法であった点を改め、粘性境界を導入したものである。貯水池の側面、上流面の境界条件はインピーダンス比で与える。減衰はレーリー減衰とされている。

4. 解析の概要と物性値 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。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。モデルの妥当性は、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。なお、計算した周波数の刻みは0.05Hzである。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-1に示す。岩盤の V_s については、ダムサイトでの標高差のある2ヶ所で観測した地震波のS波の立ち上がりのゼロクロス部分の時間差 ΔT と、観測点間の距離 ΔH より、 $V_s = \Delta H / \Delta T$ で算出した値とした(図-2)。用いた地震波は、そのときのダム天端での応答加速度が10gal程度で、起振実験のときと同程度のものである。ダムコンクリ

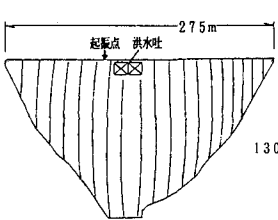


図-1 ダム下流面展開図

表-1 物性値

	ダム	岩盤
動弾性係数 E_a (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

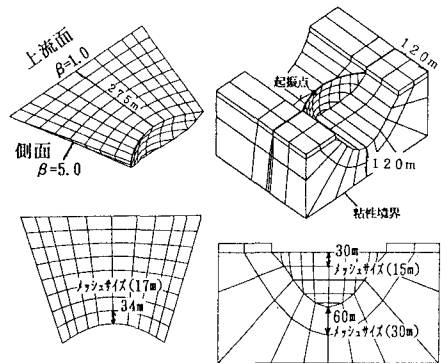


図-3 解析モデル

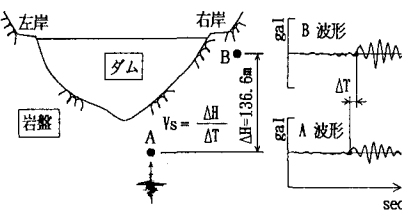


図-2 観測地震波からの V_s の算定法

表-2 $1/\sqrt{2}$ 法より求めた減衰定数

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

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

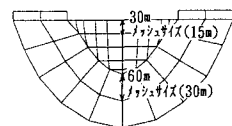


図-4 解析モデル (岩盤を着岩部沿いに丸くとした場合)

表一 4 上限周波数 6Hz 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	82	53	47
10	41	27	23
15	27	18	16
20	21	13	12
25	16	11	9

6Hz の波の波長
 { ダム: 410(m)
 岩盤: 267(m)
 貯水池: 233(m) }

ートのVs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⁵⁾。ここでは、材令360日で実施された静的圧縮試験より求められた値を用いた。なお、この値は上記の岩盤と同じ方法で観測地震波より求めたダムコンクリートのVsとはほぼ一致していた。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-2の値を満足するように与えた。岩盤の減衰はダムと同じ値を与えた。岩盤の減衰を変えたときに解析結果が変わらないことを確認してある。紙面の都合で省略するが、ダムコンクリート、岩盤のVsについては、最終的に妥当と判断されたモデルに対して、表-1の値の他にも数ケース解析したが、固有周波数を正確にとらえられたのは表-1の値であった⁶⁾。

5. モデルに関する検討 図-3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-3に示す。メッシュサイズの検討は、図-3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20節点、15節点のアイソパラメトリック要素を使用しているので、メッシュサイズは↓印部分の半分の大きさとしている。図-3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-4のように岩盤をダムの着岩部沿いに丸くしたモデルとはほぼ一致する共振曲線が得られることを確認しており、この隅角部の影響はほとんどない。なお、対象とする上限の周波数(6Hz)に対する1波長の分割数と必要とされるメッシュサイズの関係を表-4にまとめた。以下に検討項目ごとに述べる。

(1) ダム メッシュ分割の目安を、対象とする上限周波数(6Hz)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

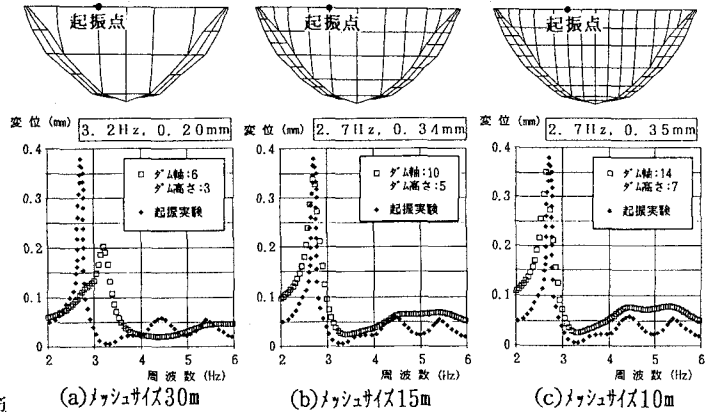


図-5 ダムのメッシュサイズの検討

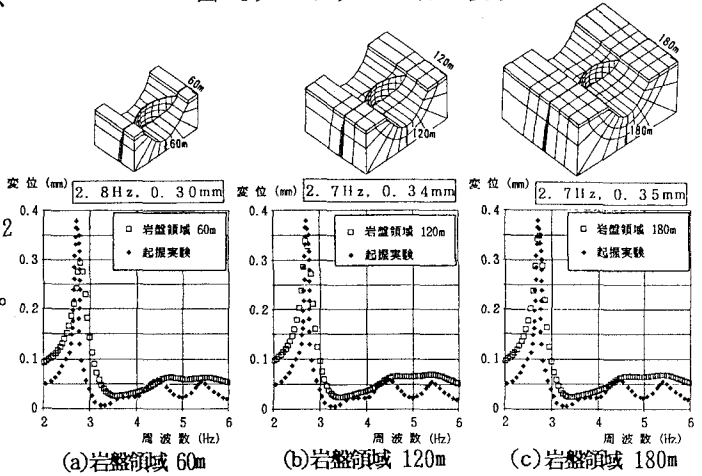


図-6 岩盤領域の広さの検討

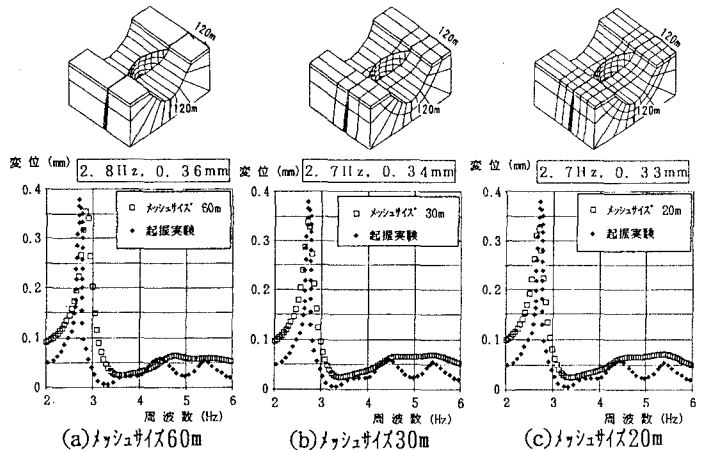


図-7 岩盤のメッシュサイズの検討

ズは41mとなる(表-4)。このときダム高は130mなので、ダムの分割はかなり粗くなり、ダムの挙動をとらえるには適切でない。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の応答変位の共振曲線を図-5(a)~(c)に示す。各図の上にはピークの周波数とその応答変位を記す。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15m)ではほぼ収束している。さらに、7分割したケースでは高周波側でのフィッティングが悪いので5分割したモデルとする。このときのメッシュサイズは、6Hzの波の波長の25分割程度である(表-4)。

(2) 岩盤 メッシュサイズを30mとし、領域を60m, 120m, 180mと変えたときのメッシュ図と共振曲線を図-6(a)~(c)に示す。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120mと180mのケースはほぼ同じ共振曲線が得られており、120mで収束している。この120m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120mとしたままで、岩盤のメッシュサイズを60m, 30m, 20mと変えた場合の解析結果を図-7(a)~(c)に示す。大きな差異は認められないが、岩盤のメッシュが粗いとピークの応答変位が大きくなる傾向が認められる。メッシュサイズ30mで、20m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30mは、6Hzの波の波長の10分割程度である(表-4)。

(3) 貯水池 メッシュサイズを34mとし、貯水池長さを138m, 275m, 550mとしたときの解析結果を図-8(a)~(c)に示す。固有周波数2.7Hz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0.34mmで落ち着いている275m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275mとしたままで、メッシュサイズを69m, 34m, 17mと変えたときの解析結果を図-9(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、4~6Hz付近でのフィッティング状況は、メッシュサイズ17mの場合が最も良い。そこで、メッシュサイズは17mとする。この大きさは6Hzの波の波長の15分割程度である(表-4)。

(4) 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⁷⁾。このことからダムへの β の影響は大きいと予想される。いま β を水と岩盤の伝播速度と密度より求めると、ほぼ5.0になる。そこで β の影響を調べるため、上限値を5.0

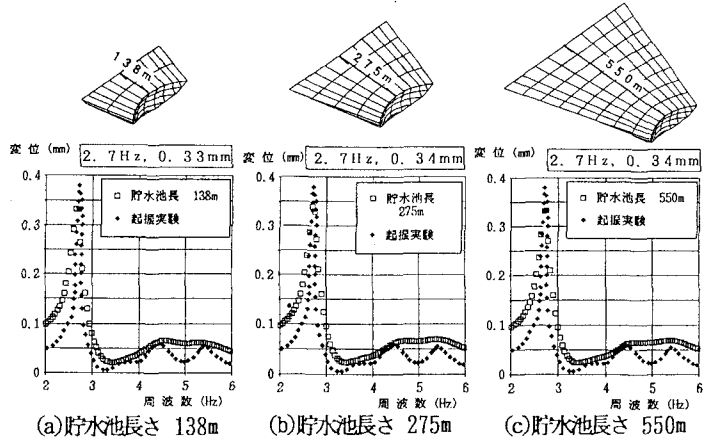


図-8 貯水池長さの検討

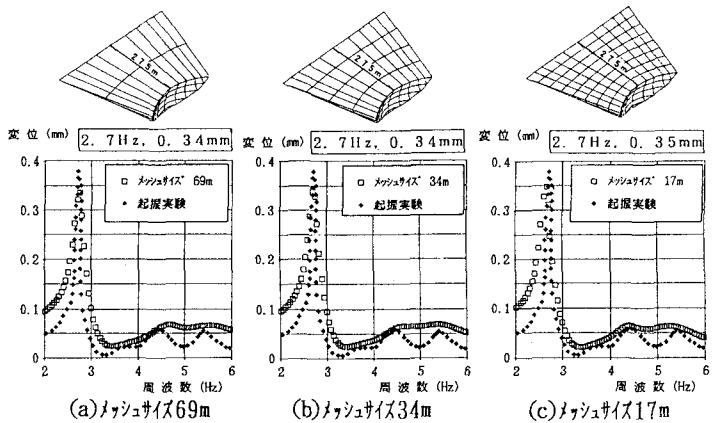


図-9 貯水池のメッシュサイズの検討

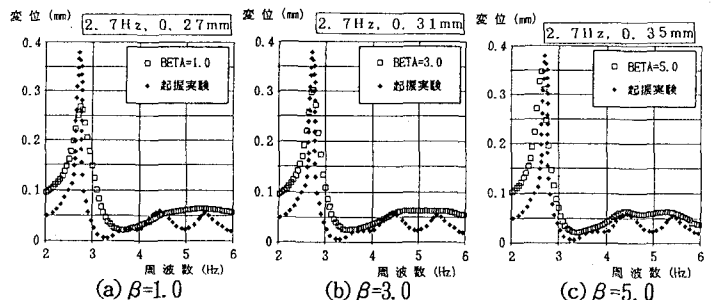


図-10 貯水池側面のインピーダンス比 β の検討

として、1.0, 3.0, 5.0と変えて解析した。結果を図-10(a)~(c)に示す。 β によって一次の固有周波数に変化はないが、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ている。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、貯水をと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くこと、かつ、堆泥や表土層の厚さがその波長に比べて小さく、そこで波の減衰は小さいためであると考えられる。

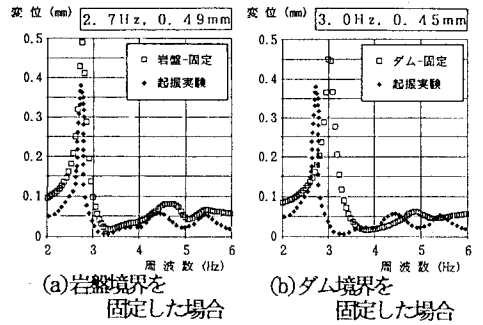
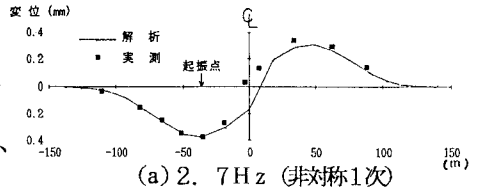
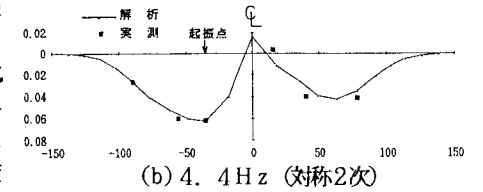


図-11 固定境界の影響

(5) 境界条件 以上は岩盤境界を粘性境界とした場合であるが、岩盤境界を固定とした場合と、ダムのみをモデル化し境界条件を固定とした場合の解析結果を図-11(a)~(b)に示す。岩盤境界を固定としたモデルでは1次の固有周波数2.7 Hzに変化はないが、応答変位は0.49 mmと実測に比べてかなり大きくなることわかる。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。よって、ダムの地震応答解析においては、岩盤との連成解析が必要である。



6. 振動形状シミュレーション結果 図-12(a)~(c)にダム天端の振動形状のシミュレーション結果を示す。なお、このときの減衰は、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%減じた値となるように設定している。岩盤境界に粘性境界を用いることから、ダムの減衰定数を共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法より求めた値より小さな値とすることは妥当なことと思われる。実測と解析は比較的良好な一致を示している。ダムの中央付近で幾分あいがよくないのは、洪水吐(図-1)の影響のためと考えられる。なお、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かった。



7. あとがき (1) 起振実験の比較的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Vsは観測地震波に基づいて得られた値である。(2) 今回の解析モデルの構築で得られた知見をまとめる。ダムのメッシュサイズは対象周波数の上限の波の波長を20分割程度以上する必要がある。岩盤、貯水池のメッシュサイズは10分割程度以上を目安とすればよい。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) 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。(4) 岩盤境界を固定とすると、ダムの応答はかなり過大となる。(5) 共振曲線のシミュレーションから得られたダムコンクリートの減衰定数は1.5%であった。(6) ダムの起振実験のシミュレーションにあたっては、次のような手順で解析を進めるのがよいと考えられる。解析モデルを上記(2)程度を目安とすれば、解析モデルによって固有周波数は変わらないので、まず岩盤のVsを決定するのが良い。次にモデルに起因して固有周波数や応答値が変わらない解析モデルを検討する。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 は共振曲線の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。最後に、ダム及び岩盤の減衰定数について検討する。天端で起振する起振実験の場合は、岩盤の減衰定数の影響は小さく(今回は省略)、ダムの減衰定数の評価が可能である。

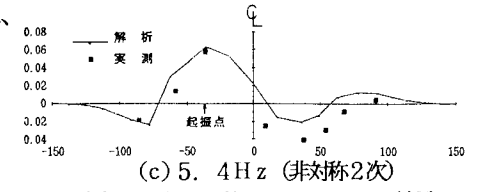


図-12 振動形状シミュレーション結果

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) 有賀義明: アーチダムの三次元的シミュレーション解析, 第21回地震工学研究会発表会講演概要, pp. 593-596, 1991.
 3) Fujii, T., Egawa, K. and Katayama, I.: Dynamic Behavior of Nagawado Arch Dam in the Event of 1984 Nagaken Seibu Earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 3, No. 2, pp. 347-364, 1987.
 4) 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.
 5) 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, 本年度土木学会年次学術講演会, 1993. (発表予定)
 6) 恒川和久・上田稔・奥田宏明・塩尻弘雄: アーチダムの三次元起振実験シミュレーション, 本年度土木学会年次学術講演会, 1993. (発表予定)
 7) 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.