

アーチダムの実地震応答シミュレーション解析

上田 稔¹・恒川和久²・横井幹仁²・塩尻弘雄³

¹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)

²正会員 工修 中電工事(株)技術コンサルタント部(〒455 名古屋市港区遠若町 3-7-1)

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

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。ダムの動的挙動が解析により十分な信頼度をもって把握できるかは、実ダムに対して実地震に対する応答シミュレーションを行って確認することが必要である。そこで本研究はダム天端での最大加速度が 120gal 程度の地震応答のシミュレーションを試みたもので、概ね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、アーチダムの地震応答シミュレーション解析に用いる解析モデルや物性値の設定方法の妥当性を明らかにする。

Key Words : arch dam, seismic response analysis, simulation analysis, damping ratio
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。ダムの動的挙動が、解析により十分な信頼度をもって把握できるかは、実地震に対する応答シミュレーションを行って確認する必要がある。しかし、ダムの実地震に対する応答シミュレーションの試みについては、奈川渡ダム¹⁾の例が見当たる程度でほとんどなく、その現状は極めて困難で、弱震レベルでも成功例はほとんどないと思われる。これは、解析がダム-岩盤-貯水の三次元連成問題で大規模であり、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、解析条件がかなり複雑であるためと考えられる。著者らは先に高根ダム²⁾や川浦ダム³⁾の起振実験での応答や高根ダムの弱地震に対する応答⁴⁾のシミュレーションを実測により得た物性値を用いて行い、良好な成果を得ている。更に解析モデルの諸元や物性値の設定の検討を行っている。

本研究はこれに引き続き、川浦ダムの地震応答シミュレーションを試みたものである。先にシミュレーション解析を行った起振実験や弱地震時の加速度の最大値は、ダム天端で 10gal 以下であった。これに対し今回対象とするダムの応答は、ダム天端での最大加速度が 120gal 程度である。本研究の目的は上述の研究成果を検証するとともに、より強震時のアーチダムの地震応答シミュレーション解析に役立つ知見を見い出すことである。

2. 解析の概要

(1) 解析手法

今回用いた解析コードは、既開発の解析コード TEADHI⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾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⁶⁾。貯水は圧縮性を考慮し、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⁵⁾で与える。減衰はレーリー減衰としている。ダムは等方弾性体としている。岩盤は等方弾性体あるいは直交及び軸対称異方性体としての解析が可能である。

(2) 対象ダムと解析ケース

川浦アーチダムは、ダム高 117.5m、堤頂長 341.2m である。ダムサイトの地質は、中生代白亜紀の流紋岩を主とし一部ひん岩の貫入が認められる。対象とする地震動は 1997 年 3 月 16 日発生したもので、マグニチュード 5.6、震源距離が 125km、ダム基部岩盤の最大加速度は 10gal 程度である。

図-1 に、ダムの地震計の設置位置を示す。監査廊最低部(C 点)に水平 2 成分(ダム軸方向、上下流方向)と鉛直 1 成分の、ダム天端(D 点)に上下流方向 1 成分の地震計を設置している。シミュレーション解析の対象とするのは、同一地震に対するダムの応答でダムの天端(D 点)での最大加速度が 120gal 程度の主要動部

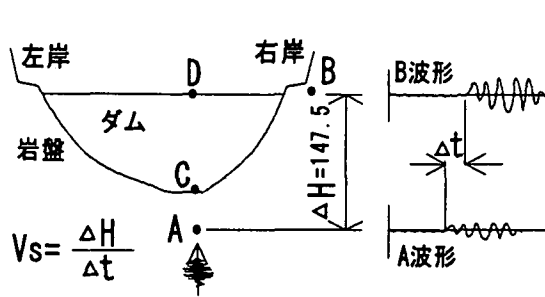


図-1 ダムの地震計設置位置とVsの算定法

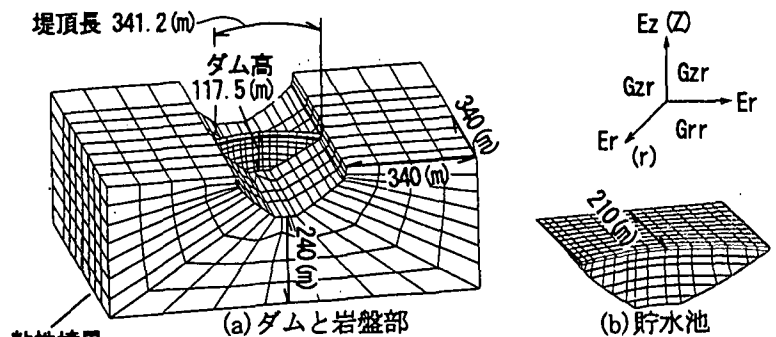


図-2 解析モデル

(CASE-II)と主要動後の最大加速度が、先にシミュレーション解析を行った起振実験^{2), 3)}や弱地震に対する応答⁴⁾と同じ10gal程度の弱振動部(CASE-I)である。

(3)解析の手順

解析では、C点の観測記録をもとにダム天端の記録(D点)のシミュレーションを試みる。C点の観測記録には、ダムの影響があると考えられる。そこでまず岩盤境界入力に対するC点の伝達関数をもとに、C点の観測記録を再現できる岩盤境界への入力地震波を求める。次にダム天端(D点)の加速度応答を求め、観測記録との比較を行う。

データ数を1024個としてC点の10.24秒間の加速度時刻歴波形を対象にした。よって周波数の刻みは約0.1Hzである。C点の記録を再現する岩盤境界の時刻歴波形に対し、最後部の30%の区間を零詰めした波形を、実際の入力波とした。

3.解析モデル

解析モデルを図-2(a), (b)に示す。モデルの要素数、節点数を表-1に示す。観測記録は10Hz以上をカットしたものを対象とする。メッシュサイズは対象とする上限の周波数(10Hz)に対する波長をもとに決定した。10Hzの波長の波長は、岩盤と貯水池については波動伝播速度を周波数10Hz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、次のように解析による振動形状をもとに、波長の大きさの目安を求めた。岩盤境界入力地震波のうちダムの応答に大きな影響を及ぼす、上下流方向入力に対する振動形状を調べた。その結果、天端水平アーチで見た場合、上限の周波数10Hzに近い9Hz程度で逆対称3次振動が得られた。逆対称3次では堤頂の長さ(341.2m)が概ね3波長分に相当するので、堤頂長の1/3(114m)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、振動形状は、天端が腹で節がないか、または節が1ヶ所あるものであった。波長としては後者の場合が短くなり、概ねダムの高さ(107.5m)が3/4波長に相当する。即ちダムの高さの4/3(143m)が波長の目安とな

表-1 モデルの要素数、節点数

	ダム・岩盤	貯水部
要素数	1032	616
節点数	5425	2972

る。以上より、必要とされる短いメッシュサイズに対する波長は、天端水平アーチの振動形状より得られた114mの波長を目安とする。本解析では中間節点を有する21節点六面体要素、15節点三角柱要素を使用している。よってメッシュサイズとして、上述のようにして求めた10Hzの波の波長を、5分割程度以上するように要素分割を行った。

岩盤領域の広さは鉛直方向にはダムの高さの、水平方向には堤頂長の1/2の1.5倍程度とした。これは高根ダムを対象にダムの応答に最も大きな影響を与える上下流方向岩盤境界入力に対する、ダム天端中央の上下流方向の伝達関数を、岩盤領域の広さを変えて調べ、ピークの応答値が収束した岩盤領域の広さである。ダム天端での点加振である起振実験シミュレーション解析の場合は、ダムの高さやダムの堤頂長程度の岩盤領域が必要であったが^{2), 3)}、岩盤境界での地震波入力の場合は、それらの1.5倍程度の領域が必要である。

4.物性値

(1)ダムの波動伝播速度と減衰

物性値を表-2に示す。ダムコンクリートの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ほど大きくなく、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⁸⁾。表-2の値は、材令360日で実施した静的圧縮試験より求められた値である。一方ダムコンクリートのVsを、標高差のある2ヶ所(図-1のC, D点)で観測した水平動の主要動の立ち上がりのゼロクロスする時刻の時間差ΔTと観測点間の鉛直距離ΔHより、 $V_s = \Delta H / \Delta T$ で算出した(図-1)。得られた値は上記のダムコンクリートの静的圧縮試験の弾性係数より求めた値とほぼ一致していた。同様にいくつかの地震観測記録からVsの算出を行っているが、同程度の値が得られている⁸⁾。

表-2 物 性 値

	波動伝播速度 (m/sec)	剛 性 (kgf/cm ²)	動ポアソン比	単位体積重量 (tf/m ³)	減衰 (%)
ダム	$V_p = 2,460$	$E = 370,000$	0.20	2.5	1.5 (CASE-I) 5.8 (CASE-II)
岩盤	$V_s = 1,700$ $V_p = 2,300$	$E_r = E_z = 90,000$ $G_{rz} = 73,700$ $G_{rr} = 35,000$	$\nu_{rz} = \nu_{rz} = 0.34$ $\nu_{rr} = 0.29$	2.5	1.0 (CASE-I) 3.0 (CASE-II)
貯水池	インピーダンス比 : 5.3(上流面と底面境界), 1.0(側面境界)			水中音速(m/sec) : 1,400	

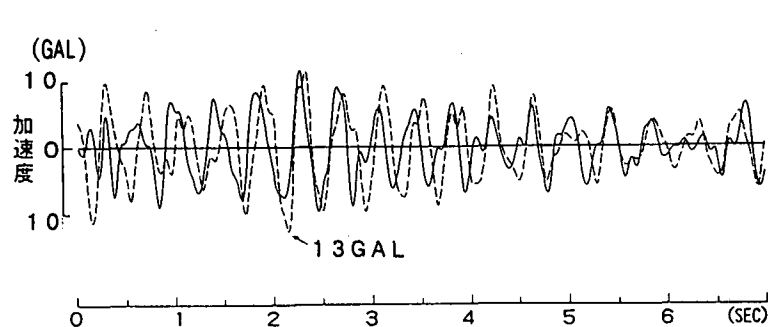


図-3 ダムの加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルの実測と解析の比較 (CASE-I)

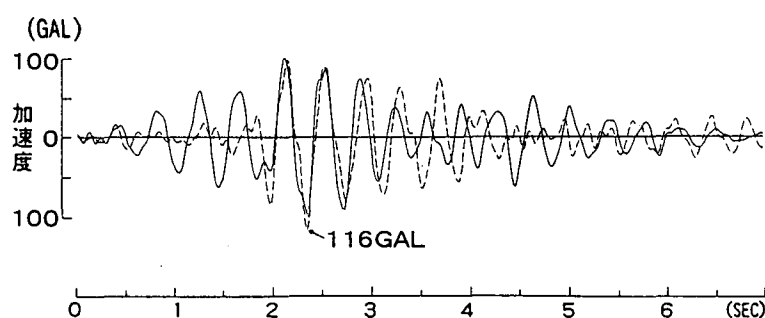


図-4 ダムの加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルの実測と解析の比較 (CASE-II)

ダムの減衰は、ダムの振動レベルが大きくなる程大きい⁹⁾。シミュレーション解析の対象とする範囲の加速度記録を用いて、ダム最低部(C点)に対するダム天端(D点)のフーリエスペクトル比から、1次の固有振動数を与える山に対して、 $1/\sqrt{2}$ 法で算出した。得られた値は、CASE-Iが1.5%、CASE-IIが5.8%である。

(2) 岩盤の波動伝播速度と減衰

地震波の伝播速度や到来方向について検討を行うため、ダムサイト岩盤内の標高差のある2ヶ所(図-1のA, B点)でも地震観測を行っている。A点の地震計は、約50mの鉛直ボーリング孔を掘削し、その孔底に設置した。岩盤の V_s を、ダムコンクリートの V_s と同様の方法で算出した。得られた岩盤の V_s は1700m/sである。A, B点の他にA, C点(図-1参照)の観測記録からもS波伝播速度の算出を行ったがほぼ同じ値が得られた。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している。一方、水平動と同様に鉛直動を用いて求めた V_p は2300m/sであった。同様にいくつか

の地震観測記録から V_s, V_p の算出を行っているが、同程度の値が得られている¹⁰⁾。本解析では岩盤の波動伝播速度が上記算出値となるように、岩盤を軸対称異方性体として(図-2参照)剛性や動ポアソン比を設定した。そして岩盤境界における水平動2成分をS波、鉛直動はP波とみなし、鉛直方向にそれぞれ上記の波動伝播速度による空間的位相差をもって岩盤境界に入力するものとした。

岩盤の減衰は、その振動レベルが小さい場合は十分小さく、振動レベルが大きくなるにつれて大きくなると思われる。弱振動部に対する解析(CASE-I)では、これまでの起振実験^{2), 3)}や弱地震⁴⁾に対する解析と同じ1%を与え、最大加速度120gal程度の主要動部に対する解析(CASE-II)では、実測値を良好に再現する値を見出すこととした。

(3) 貯水部のインピーダンス比と貯水位

本ダムの場合、貯水池は左右岸方向に広がっていて奥行きは狭く、ダム上流約200mの位置に地山があり貯

水池の端面が存在する。貯水池のインピーダンス比は、モデル化された貯水池の側面境界(左右岸端面)が1.0、貯水池上流面と底面境界は、岩盤とのインピーダンス比である5.3を用いた。これは高根ダムのシミュレーション解析²⁾において、貯水が直接に接するのは地山表面の表土層であるが、表土層の下岩盤のインピーダンス比を使用した場合に、良好なシミュレーション結果が得られたことに基づいている。貯水位は地震到来時のダムの水位として、満水位から3m下がりとした。

5. 解析結果と考察

図-3にCASE-Iのダム天端(D点)の上下流方向の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトル(バンド幅0.5Hz)の実測と解析を、それぞれ点線と実線で対比して示す。実測と解析は概ね良好な一致を示している。次にCASE-IIに対してCASE-Iと同じ条件(岩盤の減衰は1%)で解析を行ったところ、ダム天端の最大加速度は実測に比べ解析の方が20%程度も小さめであった。

図は略すがA点に対するD点の加速度フーリエスペクトル比を求め、ダムの一次の固有振動数を求めると、CASE-IとIIでほとんど差がない。即ち、CASE-IとIIで岩盤の波動伝播速度にはほとんど差異がないものと判断される。そこで岩盤の波動伝播速度はCASE-Iと同じままで、ダム天端の最大加速度の実測と解析が概ね一致する岩盤の減衰を見出したところ、3%であった。なおこのように解析上は岩盤の減衰が大きい方が、ダム天端の応答が大きい。これは本解析では、C点の観測記録を再現する岩盤境界入力地震波に対してダム天端の応答を求めており、岩盤の減衰が大きい方が入力地震波のレベルが大きくなるためである。図-4は岩盤の減衰を3%とした場合のダム天端(D点)の上下流方向の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルの実測と解析の比較である。いずれにおいても実測と解析は概ね良好な一致を示している。また岩盤の減衰を1%とした場合との比較から、岩盤の減衰がダムの応答に及ぼす影響が大きいといえる。ダム最低部(C点)の最大加速度がCASE-Iの1gal程度に対してCASE-IIは10gal程度と大きく、CASE-IIの方が岩盤の振動レベルが大きいので、岩盤の減衰が大きいものと考えられる。なお厳密には岩盤の振動は、位置ごとにその振動レベルにより異なると考えられるが、本解析では一定値としている。上記シミュレーション解析が良好となった減衰は、ダムの応答に大きく影響するダム着岸部付近岩盤の平均的な値に相当していると考えられる。

6. まとめ

実測による裏付けのある物性値を用いて、実地震に対する加速度時刻歴波形、応答スペクトルの概ね良好

なシミュレーションを行うことができた。ここで用いた解析モデルや物性値の設定方法は、先に行った高根、川浦両ダムの起振実験シミュレーション解析や、高根ダムの弱地震に対する応答のシミュレーション解析により詳細な検討を行って得られた成果を踏まえたものである。同一の方法で2つの異なるアーチダムに対して良好なシミュレーション結果が得られたことにより、解析モデルや物性値の設定方法の有効性が明らかになった。解析モデルや物性値の具体的な設定方法は、本文中で述べたとおりである。

本研究では最大加速度がダム天端で120gal、岩盤で10gal程度の場合のシミュレーション解析を行った。岩盤の減衰がダムの応答に及ぼす影響は大きく、その大きさは岩盤の最大加速度が1gal程度の弱振動の場合に1%であるのに対し、3%程度とする必要があった。

今後は、本研究成果に基づき、より強震レベルの実地震や別ダムの実地震に対するシミュレーション解析を行う予定である。

参考文献

- 1) Fujii, T., Egawa, K. and Katayama, I. : Dynamic Behavior of Nagawado Arch Dam in the Event of 1984 Naganoken Seibu Earthquake Spectra, Vol.3, No.2, pp.347-364, 1987.
- 2) 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.
- 3) 恒川和久・上田稔・近藤寛通・田村重四郎・塩尻弘雄：アーチダムの起振実験で実測した動水圧のシミュレーション, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.513-516, 1995.
- 4) 上田稔・奥田宏明・塩尻弘雄・恒川和久：アーチダムの弱地震応答シミュレーション, 第49回土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, pp.872-873, 1994.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, L.R. : Finite Dynamic Model for Infinite Media, Proc. of ASCE, pp.859-877, 1969.
- 8) 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, 1997.
- 9) 上田稔・塩尻弘雄・横井幹仁：アーチダムの地震観測記録などから求めた減衰定数, 第24回地震工学研究発表会講演概要, 1997.
- 10) 佐藤正俊・上田稔・長谷部宣男・近藤寛通：硬質岩盤サイトの地震波伝播速度と原位置試験による波動伝播速度の比較, 土木学会論文集, 1997.