

ダム－岩盤－貯水の連成を考慮した 重力式ダムの三次元地震応答シミュレーション

塩尻弘雄¹・上田 稔²

¹正会員 工博 日本大学教授 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)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科 塩尻研究室研究生 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

ダムの耐震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解析を行って確認する必要がある。本研究はダム－岩盤－貯水の連成モデルにより、1995 年兵庫県南部地震における一庫重力式コンクリートダムの地震観測記録のシミュレーション解析を行ったもので、良好な結果を得ることができた。実測値との対照により、二次元、三次元解析の適用性、良好なシミュレーション解析を行うために必要なダム堤体、岩盤の物性値等のモデリング法について考察を行う。

Key Words : concrete gravity dam, three dimensional seismic response analysis, dam-foundation rock-reservoir water system, Young's modulus, damping constant

1. まえがき

ダムの耐震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ためには、適切な物性値等を用いる必要があり、その妥当性を実地震に対する応答シミュレーション解析を行って確認する必要がある。

ダムの振動特性は、振動の大きさにより影響を受ける可能性がある。強震時の挙動予測のためには、できるだけ大振幅の記録を用いて検討しておく必要がある。1995 年兵庫県南部地震（マグニチュード 7.2）において、震央から北東 47km に位置する一庫重力式コンクリートダムでは、上下流方向水平成分の最大加速度がダム底部で 183Gal (183cm/s²、以下本論文では Gal を用いる)、ダム上部で 483 Gal である貴重な加速度記録が観測された¹⁾。

地震後まもなく、田口ら¹⁾は、この観測記録等を用いて一庫ダムの二次元地震応答解析を行い、重力式コンクリートダムの耐震性評価に関するいくつかの重要な成果を示している。即ち、兵庫県南部地震時の一庫ダムの十分な耐震性を確認するとともに、入力地震波の鉛直成分がダムの地震時に発生する応

力に与える影響は小さいことや、ダムの減衰定数は基礎岩盤をモデル化せずダム底部を固定境界とする場合には 10% 程度であったことなどを明らかにした¹⁾。

ところで一般に、コンクリートダムの減衰は、ダムや岩盤の内部減衰、貯水や岩盤への波動伝播によるエネルギー逸散を総合したものと考えられる。また、ダムの剛性は基礎岩盤をモデル化しない解析では、基礎岩盤の影響を含んだ値として設定される。それら個々の寄与分を明らかにすることも意義あることと考えられるが、そのためには、岩盤や水との相互作用を考慮しうるダム－岩盤－貯水の連成解析コードを用いる必要がある。著者ら²⁾は先に、二次元のダム－岩盤－貯水の連成解析コードを用いて兵庫県南部地震時の一庫ダムのシミュレーション解析を行った。それによれば、実測値を良好に再現するためには、岩盤の弾性係数と減衰定数を過大と思われる値に設定する必要があった。そこで本研究は、兵庫県南部地震時の一庫ダムの観測記録について、ダム－岩盤－貯水の三次元連成モデルによるシミュレーション解析を行い、二次元解析との比較、三次元解析の適用性とその合理的なモデリング法について検討を行うものである。

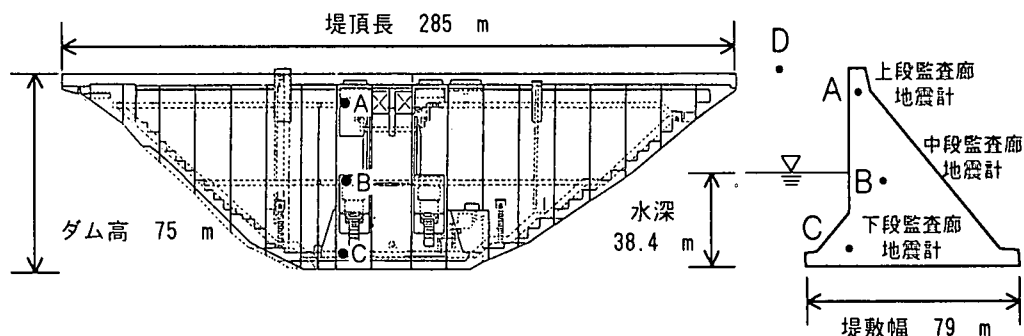


図-1 ダムの地震計設置位置と地震時の貯水位

2. 解析の概要

(1) 解析手法

今回用いた解析コードは、岩盤境界を固定とし、モード解析に基づく三次元ダム-岩盤-貯水連成解析コード TEADHI³⁾を改良したもので、粘性境界⁴⁾を導入し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⁵⁾よりもエネルギー吸収能力が格段に向上している⁴⁾。貯水には圧縮性を考慮し、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³⁾で与えている。ダムは等方弾性体としている。岩盤は本研究では等方弾性体としているが、直交及び軸対称異方性体としての解析も可能である。

(2) 解析対象

対象とする一庫重力式コンクリートダムは、水資源開発公団の所有で、1982年の竣工である。ダム高 75m、堤頂長 285m、堤体積 44 万 m³で、ダムサイトの地質は砂岩粘板岩の互層である。

図-1 に、ダムの地震計の設置位置を示す。地震計は上段監査廊 (A 点)、中段監査廊 (B 点)、下段監査廊 (C 点) の 3 カ所に設置されている。解析では、C 点の加速度記録 (上下流方向水平成分、ダム軸方向水平成分と鉛直成分) をもとに A, B 点の加速度記録 (上下流方向水平成分、ダム軸方向水平成分と鉛直成分) のシミュレーションを試みる。図-2(a) に A 点の、図-2(b) に C 点の加速度記録を示す。シミュレーション解析の対象とするのは、主要動部の

5 秒間である。C 点の加速度記録には、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 点の加速度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 (A, B 点) の加速度応答を求め、観測記録との比較を行う。

(3) 岩盤境界入力地震波の算出方法

任意のある振動数について考える。いま C 点の加速度記録をフーリエ変換して得られる x, y, z 方向 (順にダム軸水平方向, 上下流水平方向, 鉛直方向) の応答振幅をそれぞれ X_c, Y_c, Z_c とする。さらに岩盤境界 x 方向入力に対する C 点の応答倍率の伝達関数が x, y, z 方向それぞれ x_1, y_1, z_1 、同様に岩盤境界 y 方向並びに z 方向入力に対するものをそれぞれ x_2, y_2, z_2 と x_3, y_3, z_3 とする。そして C 点の加速度記録を再現するために、岩盤境界に入力すべき x, y, z 方向成分の振幅をそれぞれ X_r, Y_r, Z_r とすると、

$$\begin{Bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{Bmatrix}$$

が成り立つ。これより X_r, Y_r, Z_r を算出することができる。各振動数に対して X_r, Y_r, Z_r を求め、フーリエ逆変換することにより岩盤境界の入力地震波が算出できる。

C 点のシミュレーションの対象とする主要動部 5 秒間とその前の 2 秒間の記録に、零詰め区間を加えた 10.24 秒間の加速度時刻歴波形を再現する岩盤境界の時刻歴波形を、実際の入力波とした。データ数は 1024 個で、周波数の刻みは約 0.1Hz である。

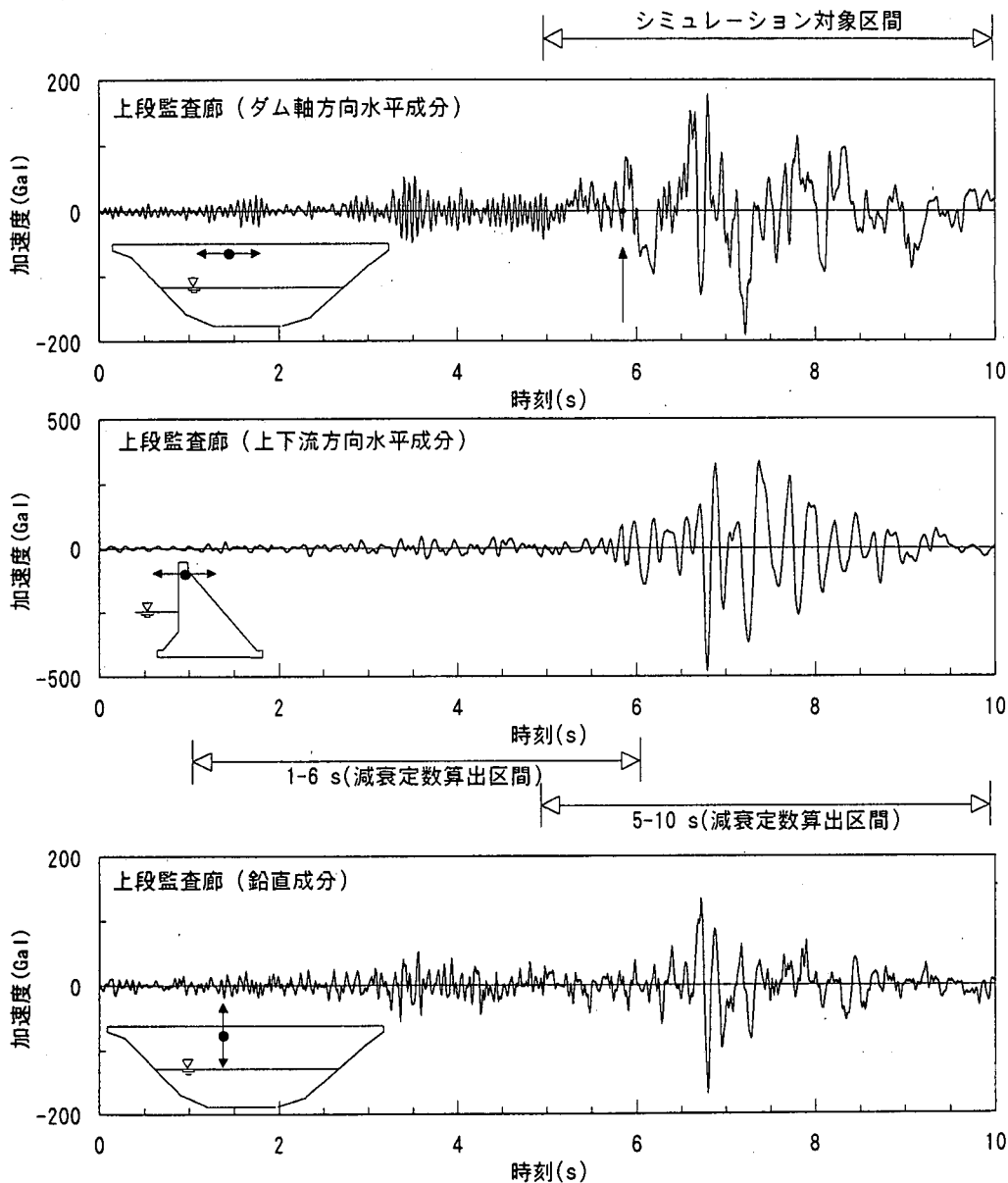


図-2(a) 上段監査廊（ダム軸方向，上下流方向水平成分と鉛直成分）での実測加速度時刻歴波形

3. 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。地震計の設置位置が、有限要素の節点となり、かつ地震時の貯水位の設定が可能となるように要素分割を行った。地震時の貯水位を図-1に示すが、ダム高さの中間程度の水位である。解析モデルの要素数、節点数を表-1に示す。

岩盤領域の広さは、A点のC点に対する上下流方向水平成分の伝達関数をもとに検討をした。図-4(b)の説明図に示すとおり、鉛直方向にはダムの最低部からダムの高さを、ダム軸方向にはダム上部の着岩部からダム堤頂長の1/2の長さを、上下流方向には上流端、下流端から堤敷幅をそれぞれ基準にし、その1倍、2倍、3倍、4倍の広さを岩盤領域とした場合の伝達係数を図-4(a)に示す。これより岩盤領

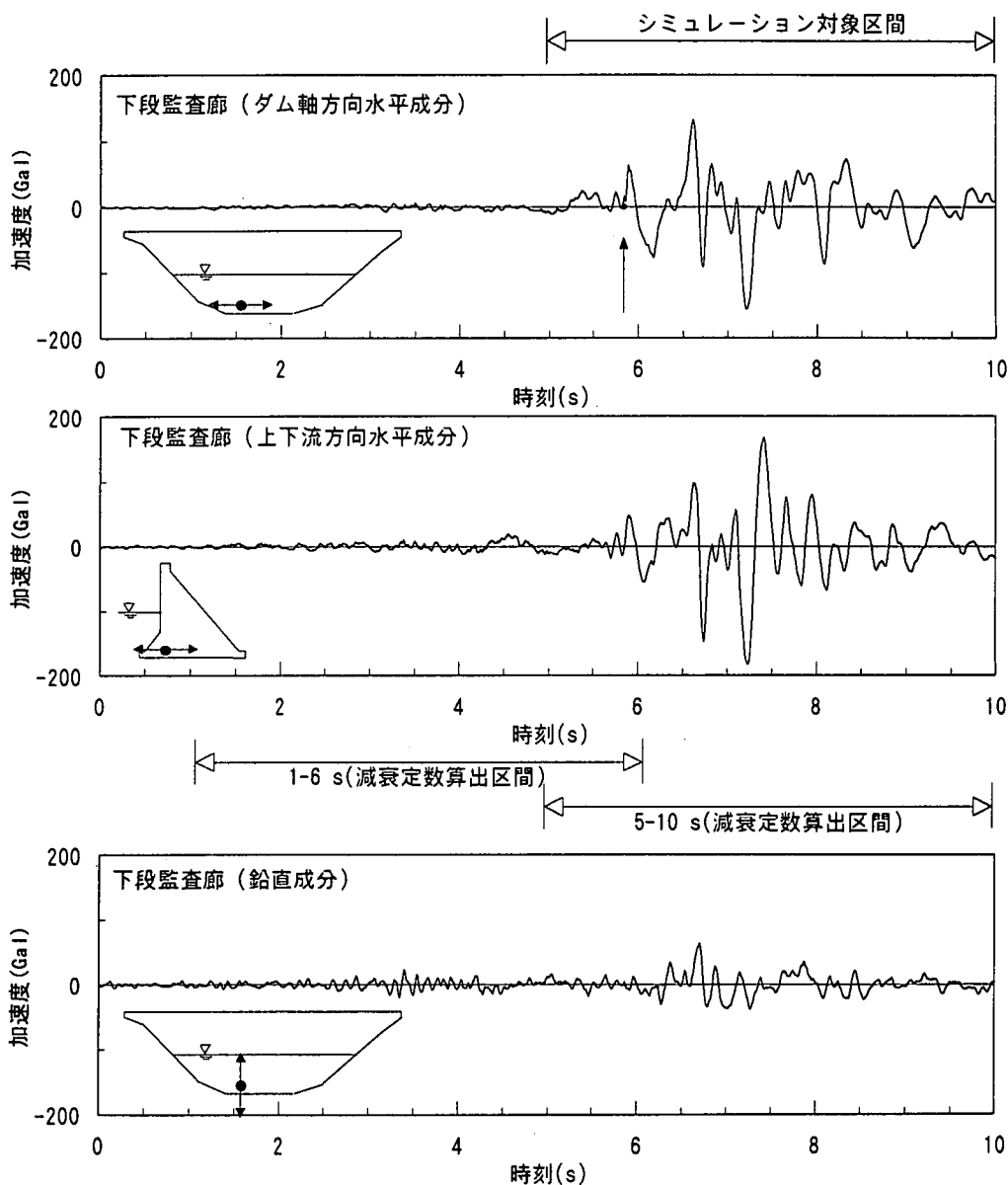


図-2(b) 下段監査廊（ダム軸方向，上下流方向水平成分と鉛直成分）での実測加速度時刻歴波形

域が狭いほど伝達関数は大きく、3倍と4倍はほぼ同一の結果が得られ、3倍で伝達関数が収束していることがわかる。そこで岩盤領域は、鉛直方向にダムの高さ、ダム軸方向に堤頂長の1/2の長さ、上下流方向に堤敷幅のそれぞれ3倍の広さとした。なお岩盤領域の広さがかわっても伝達関数のピーク値を与える振動数はほとんどかわらない。貯水池のモデル化の範囲は、ダム上流の岩盤領域と同じダム上流

面から上流285mまでの範囲とした。

メッシュサイズは以下のように、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の波動の波長は、岩盤と貯水池については波動伝播速度を周波数10Hzで除することにより求めた。ダムについては、次のように振動形状をもとに波長の目安を求めた。上下流方向の正弦波入力に対する振動形状を調べたところ、天端でみた場合、上限の

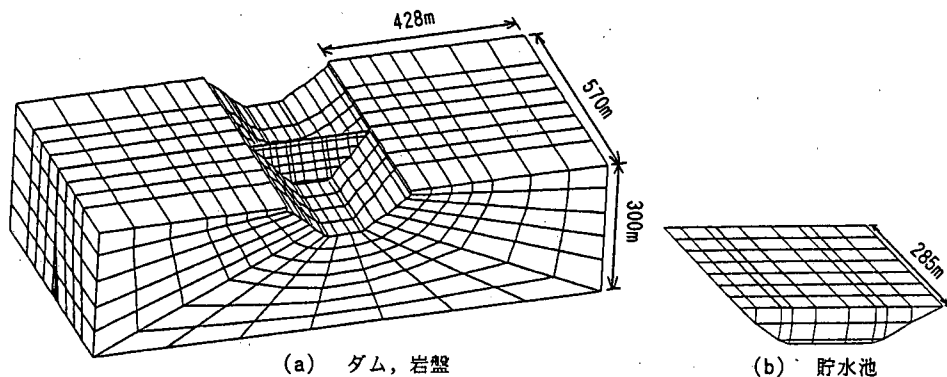


図-3 解析モデル

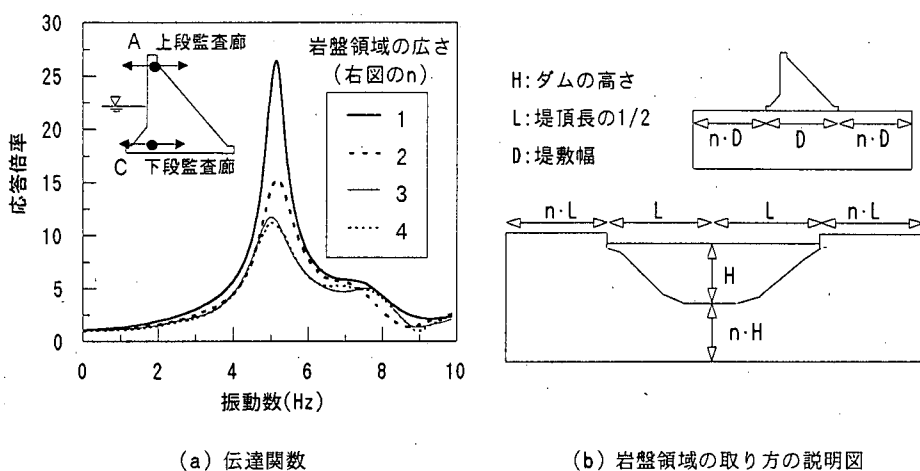


図-4 岩盤領域の広さと上段監査廊の下段監査廊に対する上下流方向水平成分応答の伝達関数

表-1 解析モデルの節点数、要素数

	節点数	要素数
ダ ム	1200	240
岩盤部	6862	1428
貯水部	1220	231
合 計	9282	1899

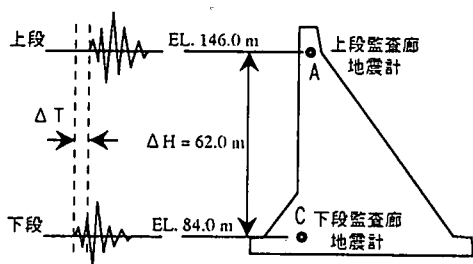
周波数 10Hz に近い 9Hz 程度で対称二次の振動形状がえられた。この形状は堤頂長 (285m) が 1.5 波長に相当するので、堤頂長の $1/1.5(190\text{m})$ が波長の目安となる。一方、鉛直方向でみた場合、天端が腹で節が 1 ヶ所ある振動形状で、ダムの高さ (75m) が概ね $3/4$ 波長に相当する。即ちダムの高さの $4/3(100\text{m})$ が波長の目安となる。以上より、解析で

対象とすべきダムの波長はダム軸方向に 190m、鉛直方向に 100m とした。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。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、中間節点を考慮した分割数で 8 分割程度以上の分割とした。ただし岩盤領域は、ダムから最も離れた岩盤の側面境界で 5 分割程度以上を確保し、ダム周辺のダム着岩部からダム軸方向にダム堤頂長の $1/2$ 程度の範囲は、8 分割以上とした。

なお本解析モデルでは岩盤の地表面形状を平坦とし、実際の複雑な地山地形をモデル化していない。ただし地表面形状を平坦としたままで、その地表面標高をダム周辺地山の平均標高程度となるように、図-3 のモデルより 30m 高くなった場合の解析も実施したが、ダムの A, B 点の加速度応答にはほとんど差

表-2 物性値

	ダ ム	岩 盤	貯 水
弾性係数 E (MPa)	23500	11000	1,400 m/s (水中音速)
ポアソン比 ν	0.20	0.25	
単位体積質量 γ (t/m ³)	2.45	2.50	1.00
減衰定数 h (%)	7	1	—



$$V_s = \Delta H / \Delta T$$

(地震波動伝播速度)

図-5 地震波伝播速度の算出

異が認められなかった。このことより、実際の複雑な地山地形をモデル化しないことがダムの応答に及ぼす影響は小さいと判断した。

4. 物性値

(1)ダムの弾性係数

解析に用いた物性値を表-2 に示す。ダムコンクリートの地震波の S 波伝播速度 V_s を、上段監査廊と下段監査廊 (図-1 の A, C 点) で観測したダム軸方向水平成分加速度記録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-5)。図-2(a)(b)それぞれの最上段に示すダム軸方向水平成分加速度記録に、ゼロクロス位置を・印で示す。A, C 点での主要動の立ち上がりのゼロクロス後の最初の 1 山のピークの加速度は、それぞれ 80Gal と 70Gal 程度である。なお上下流方向でなくダム軸方向水平成分の記録を用いたのは、ダム軸方向の方がダムの面外振動の影響が小さいと考えられるからである。算出した V_s より、ポアソン比を 0.2 として、等方弾性体の波動論の関係式を用いて弾性係数を算出した。A, C 点の記録から算出したのと同様に、B, C 点

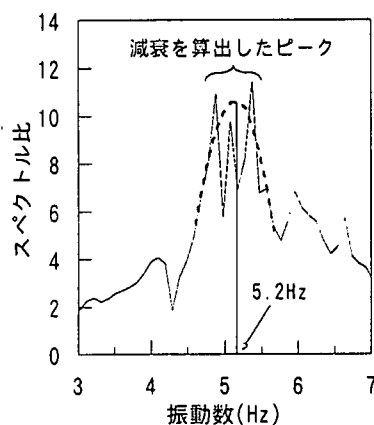


図-6 上段監査廊の下段監査廊に対する上下流方向水平成分加速度記録のフーリエスペクトル比 (5-10 s 間)

の記録からもダムコンクリートの地震波の S 波伝播速度を算出したが、その値は A, C 点の記録から算出した値とほぼ一致していた。このことは地震波がほぼ鉛直上方に伝播していることを示している。

このように地震観測記録から求めた値は、振動の大きさが数 Gal 程度の場合は、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ほぼ一致する⁶⁾。ダムコンクリートの弾性係数は、地震時における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、ひずみ速度が $10^3 \mu/s$ のオーダーの強振時でそのひずみ速度依存性は高々 1 割程度である⁶⁾。これからも上記のように求めた弾性係数を用いることは、妥当と考えられる。

なお著者らは、先に高根アーチ式コンクリートダムや川浦アーチ式コンクリートダムの起振実験^{7), 8)}や実地震⁹⁾に対する応答のシミュレーション解析を行っているが、その際もダムの弾性係数を上記のとおりに設定した場合に、良好なシミュレーション結果を得ている。

(2)岩盤の弾性係数

岩盤の弾性係数は、A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比のピークを与える固有振動数が、実測値と解析値で一致するように決定した。

実測値からは、以下のようにして固有振動数を算出した。図-6 は、シミュレーション解析の対象とする区間の上下流方向水平成分加速度記録 (図-2

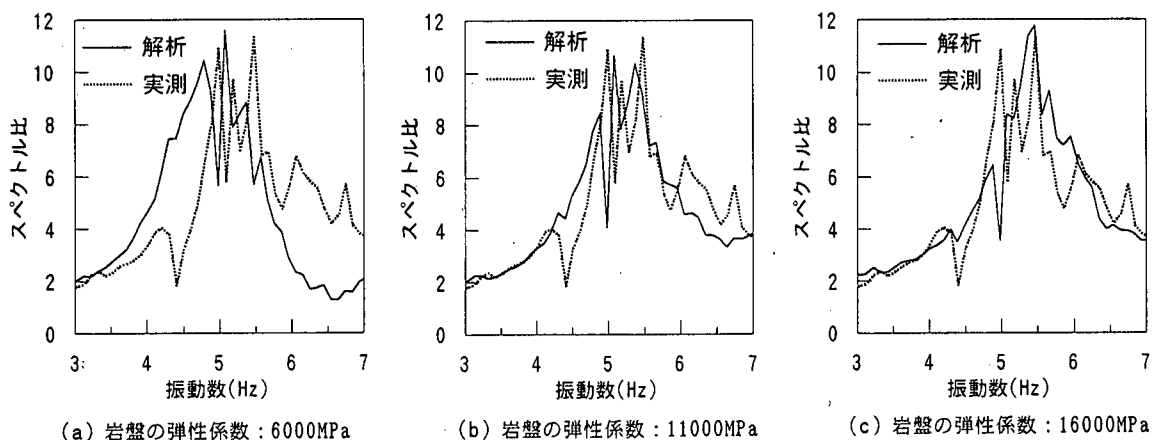


図-8 岩盤の弾性係数と上段監査廊の下段監査廊に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比

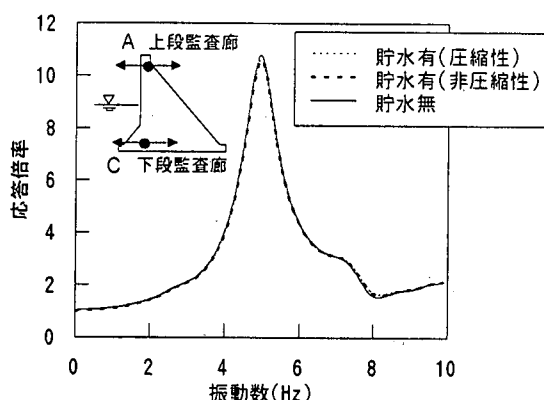


図-7 上段監査廊の下段監査廊に対する上下流方向水成分応答の伝達関数とそれに及ぼす貯水の影響

に示す) から求めた、A 点の C 点に対する加速度フーリエスペクトル比である。このスペクトルはウィンドウを掛けていない。一方、図-7 は A 点の C 点に対する上下流方向応答の伝達関数を解析により求めたもので、物性値は表-2 に示す値である。図-7 を参考にひとつの滑らかなピークを想定して、図-6 のスペクトルを最小二乗近似する曲線(図中の点線)を求め、この曲線のピーク値を与える振動数として固有振動数を算出した。その大きさは 5.2Hz 程度である。

A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度

フーリエスペクトル比を、岩盤の弾性係数を変えて示したのが、図-8(a)(b)(c)である。岩盤の弾性係数が高い程加速度フーリエスペクトル比のピークを与える振動数は大きく、その値が 5.2Hz 程度となる岩盤の弾性係数は 11000MPa であった。

なおダムコンクリートの弾性係数も固有振動数に影響を及ぼすので、念のためにダムコンクリートの弾性係数が固有振動数に及ぼす影響を調べた。前節で述べたとおり、ダムコンクリートの弾性係数は、ひずみ速度が $10^3 \mu/s$ のオーダーの強振時でそのひずみ速度依存性は高々 1 割程度である⁶⁾。そこで、ダムコンクリートの弾性係数を 1 割大きくして、A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比のピークを与える固有振動数の変化を調べたが、0.1Hz 以下程度で小さかった。

(3)ダムの減衰定数

ダムの減衰定数は、その値をいくつか変えて解析を行い、A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比のピークでみて、解析値が実測値を最も良好に再現する値を見い出すこととした。A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比を、ダムの減衰定数を変えて算出し、実測値と比較したのが、図-9(a)(b)(c)である。物性値は表-2 に示す値である。ダムの減衰定数が小さい程、加速度フーリエスペクトル比のピーク値は大きく、実測値を最も良好に再現するダムの減衰定数は 7% であった。本解析では、将来時刻歴応答解析による解析結果との比較も予定

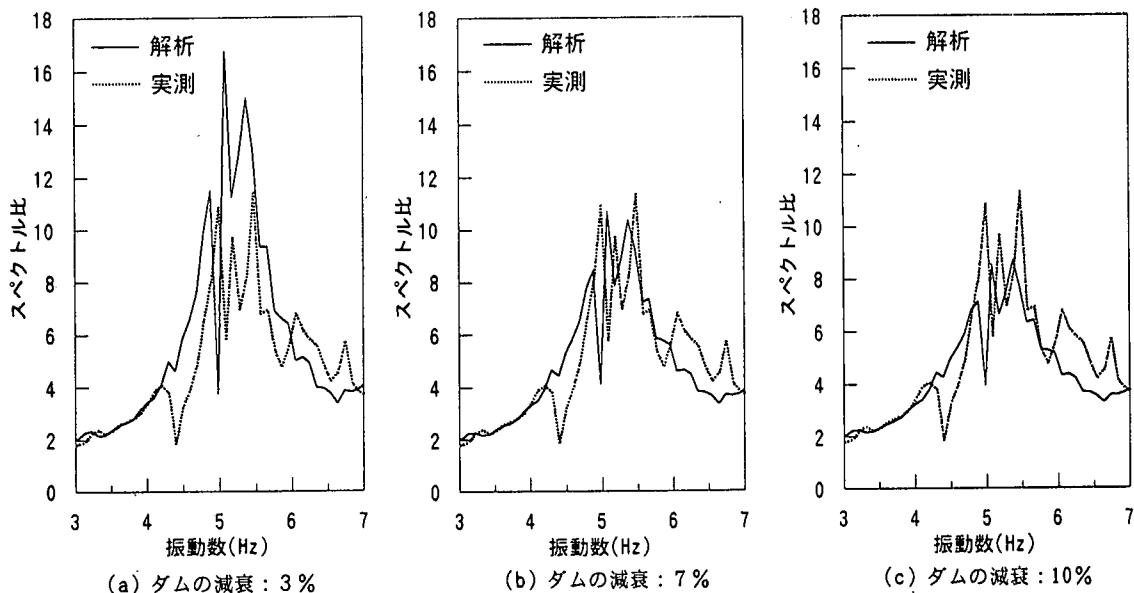


図-9 ダムの減衰定数と上段監査廊の下段監査廊に対する
上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比

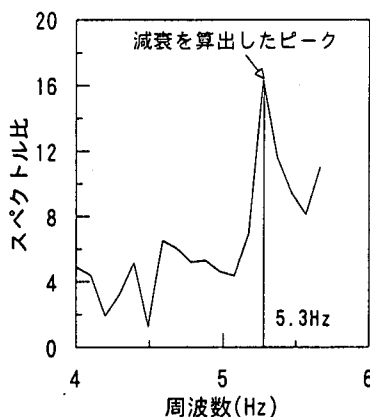


図-10 上段監査廊の下段監査廊に対する上下流方向
水平成分加速度記録のフーリエスペクトル比
(1-6 s 間)

している点を考慮して、減衰定数はレーリー型の減衰として与えられる大きさとした。レーリー型減衰の2つのパラメーターは、ダム堤体のコンクリートに対しては、3Hz と 6Hz で減衰定数が7%となるように設定した。

(4) 岩盤の減衰定数

岩盤の減衰定数は、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考えられる。図-10 は、主要動部と同様

に、A 点の最大加速度が 40Gal 程度である弱振動部の 5 秒間の記録 (図-2 にその範囲を示す) を用いて求めた A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比である。これよりピーク値を与える振動数として固有振動数を求めると、5.3Hz で、主要動部に対して求めた値とほぼ同じである。このことから弱振動部と主要動部で、岩盤の弾性係数はほぼ同じであるといえる。ダムの基礎岩盤となる硬質岩盤にも、一般の土質地盤と同様に弾性係数と減衰定数のひずみレベル依存性があり、弾性係数に変化がないひずみの範囲では減衰定数も一定である¹⁰⁾。よって減衰定数も弱振動部と主要動部は同程度で、小さな値と考えられる。

そこで岩盤の減衰定数を 1, 3, 7%と変えて、A 点の C 点に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比を求めた。その結果を図-11 に示す。5 章(3)節でも後述するが、地震時に一庫ダム基礎岩盤に発生した応力は小さく、最大値でも圧縮、引張側にそれぞれ 0.6MPa 程度、この最大応力発生時のダム着岸部岩盤での応力の平均は、圧縮、引張側にそれぞれ 0.2MPa 程度である。著者の一人らは、原位置平板荷重試験の応力-変位曲線より、硬質岩盤の最大減衰定数を算出している。その大きさは、一庫ダムの基礎岩盤相当である CH 級、CM 級岩盤では、それぞれ 4~10%と 6~13%であった¹¹⁾。このように硬質岩盤の減衰定数は、最大値でも 10%程

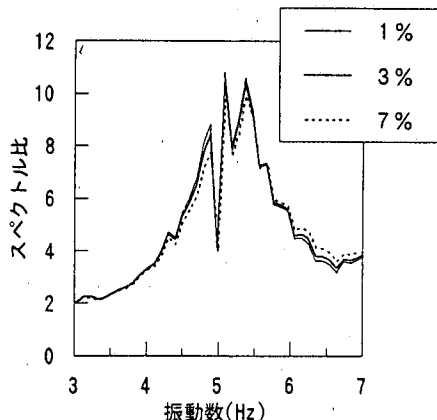


図-11 岩盤の減衰定数と上段監査廊の下段監査廊に対する上下流方向水平成分の加速度フーリエスペクトル比

度である上に、地震時に発生した応力が小さいことから、上記の7%の減衰定数はかなり大きめの値として設定したものである。図-11より、加速度フーリエスペクトル比に及ぼす岩盤の減衰定数の影響は小さく、減衰定数が7%の場合にピーク値が幾分小さくなっていることがわかる。以上より、岩盤の減衰定数は小さな値と考えられる上にその影響は小さいので、その値を1%として解析することとした。ダムと減衰定数と同様に、レーリー減衰の2つのパラメーターが、3Hzと6Hzで減衰定数が1%となるように設定した。

(5) 貯水池境界面のインピーダンス比

貯水池境界面のインピーダンス比は、解析上の貯水池上流面は、実際にはさらに上流部に貯水池が存在するので1.0とし、貯水池の側面境界と底面境界は、岩盤と水のインピーダンス比である5.3を用いた、これは高根アーチダム¹⁾川浦アーチダム²⁾の起振実験や川浦アーチダムの実地震応答³⁾のシミュレーション解析において、貯水が直接に接するのは地山表面の表土層であるが、表土層下の岩盤と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。

5. 解析結果と考察

(1) 岩盤境界入力地震波形

図-12に、C点の加速度記録を再現するように求めた、岩盤境界の加速度時刻歴波形（上下流方向水平成分、ダム軸方向水平成分と鉛直成分）を示す。またそれを求める際に用いた岩盤境界入力に対する

C点の伝達関数の例として、岩盤境界の上下流方向水平成分に対するC点の各方向成分の伝達関数を図-13に示す。上段が位相差、下段が応答倍率である。

(2) 実測値と解析値の比較

図-14に、A点の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルの実測値と解析値を、それぞれ点線と実線で対比して示す。図-14(a)が上下流方向水平成分、図-14(b)がダム軸方向水平成分、図-14(c)が鉛直成分である。同様にB点の実測値と解析値を対比して示したのが、図-15(a)(b)(c)である。A点、B点ともに加速度時刻歴波形、フーリエスペクトルいずれも実測値と解析値は良好な一致を示している。

一庫ダムの横継ぎ目部はジョイントキーが設けられ、ジョイントグラウトが実施されている¹²⁾。本解析では、ダムのジョイントはモデル化せずダムを線形弾性体としているが、良好なシミュレーション結果が得られたことから、観測された応答振幅程度では、ダムの応答に及ぼすジョイントの影響は小さいと考えられる。

(3) ダムの減衰定数に関する考察

図-6のフーリエスペクトル比を最小二乗近似する曲線から、 $1/\sqrt{2}$ 法により減衰定数を算出すると7%程度で、実測値のフーリエスペクトル比を良好に再現する値として求めた減衰定数とほぼ同じであった。

$1/\sqrt{2}$ 法により算出した減衰定数には、ダムの振動の貯水への逸散の影響と、貯水の付加質量によりダムの有効質量が増加することに伴う減衰定数への影響が含まれていることが考えられる。そこで、この点に関して以下に述べるように解析的に検討した。先の図-7には、地震到来時の貯水位で貯水の圧縮性を考慮した場合と、考慮しないで貯水を付加質量とした場合並びに貯水池が空虚の場合に対して伝達関数を示している。図-7より、貯水の圧縮性を考慮した場合と考慮しない場合や、これらと貯水池を空虚にした場合との伝達関数の差異は小さい。よって、A点のC点に対する加速度フーリエスペクトル比から $1/\sqrt{2}$ 法で算出した減衰定数に及ぼす貯水の影響は小さい。これは兵庫県南部地震時の一庫ダムの貯水位が、ダム高さの中間程度の低い水位なので貯水の影響が小さいためと考えられる。

主要動部と同様に、A点の最大加速度が40Gal程度である弱振動部の5秒間の記録（その範囲を、図-2(a)(b)それぞれの中段に示す上下流方向水平成分の加速度記録に示す）を用いて求めた減衰定数は1.4%であった。この値を算出した際のフーリエ

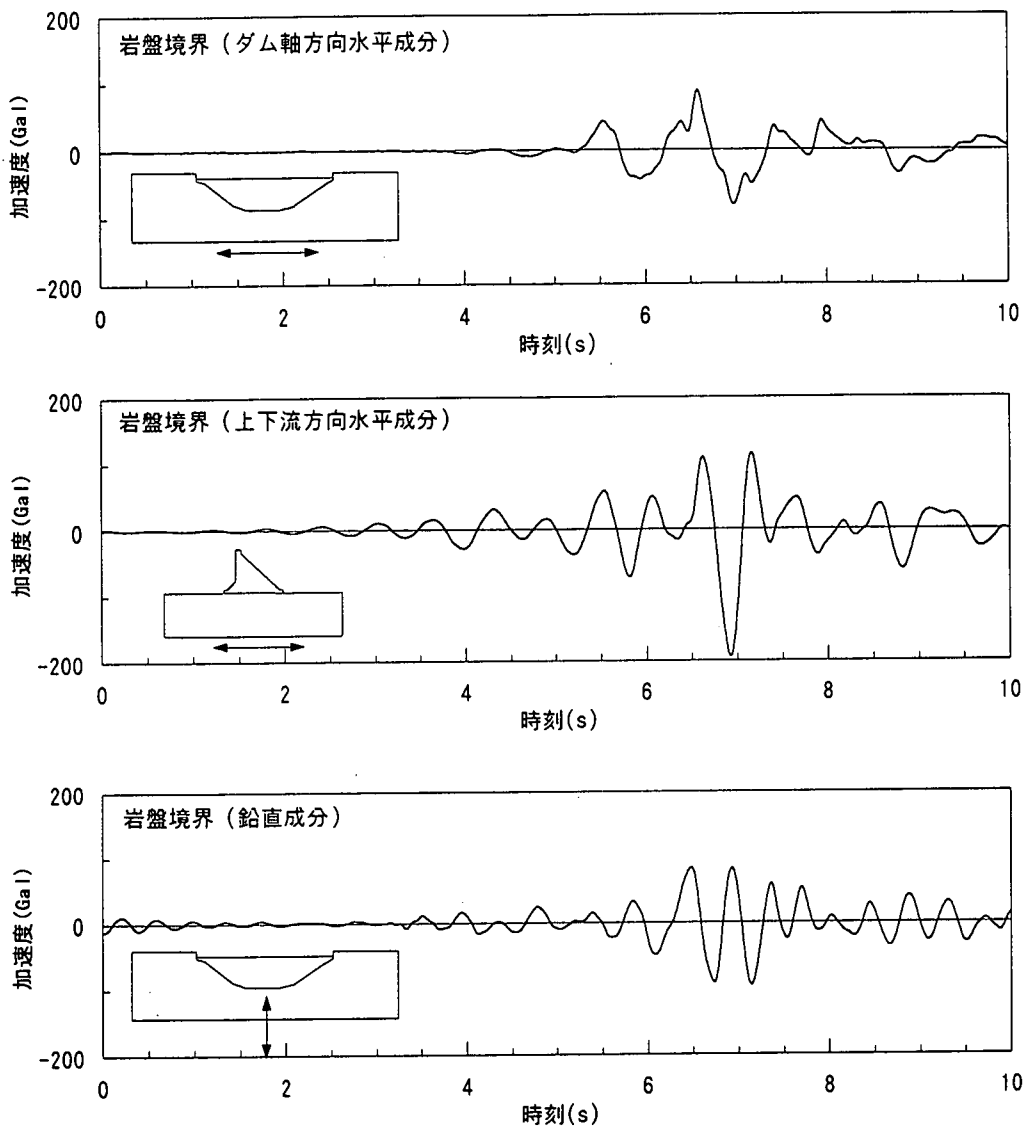


図-12 岩盤境界（ダム軸方向，上下流方向水平成分と鉛直成分）の加速度時刻歴波形

ベクトル比は，図-10 である．この値は，アーチ式コンクリートダムの地震観測記録や起振実験シミュレーション解析により求めた，弱振動時のダムの減衰定数 $1.0 \sim 1.5\%$ ¹³⁾ と同程度である．このことや，主要動部に対して $1/\sqrt{2}$ 法により算出した減衰定数と，実測値を良好に再現するように見だした減衰定数が，ほぼ同じであったことは，A 点の C 点に対する加速度フーリエスペクトル比から $1/\sqrt{2}$ 法で算出した減衰定数が，大体，ダムの内部減衰定数を与えることを示している．

ただし，A 点の記録は上下流方向だけでなく，上下流方向と直交する方向や鉛直動による振動も含ま

れ，算出した減衰定数には上下流方向以外の振動成分の影響がある．また，ダム基部の回転成分が明らかでなく，C 点の記録として並進成分のみ用いているので，岩盤への振動エネルギー逸散の影響が含まれていることも考えられる．これら地震波や岩盤への振動エネルギー逸散の影響については，今後より多くのデータを用いて検討される必要がある．

アーチ式コンクリートダムの減衰定数は 5Gal 程度以下の弱振動レベルで $1.0 \sim 1.5\%$ 程度，10Gal 程度の振動レベルから振動レベルが大きい程大きくなり，200Gal 程度の振動で 7% 程度であった¹³⁾．これに比べると今回算出された値は，振動レベルの割

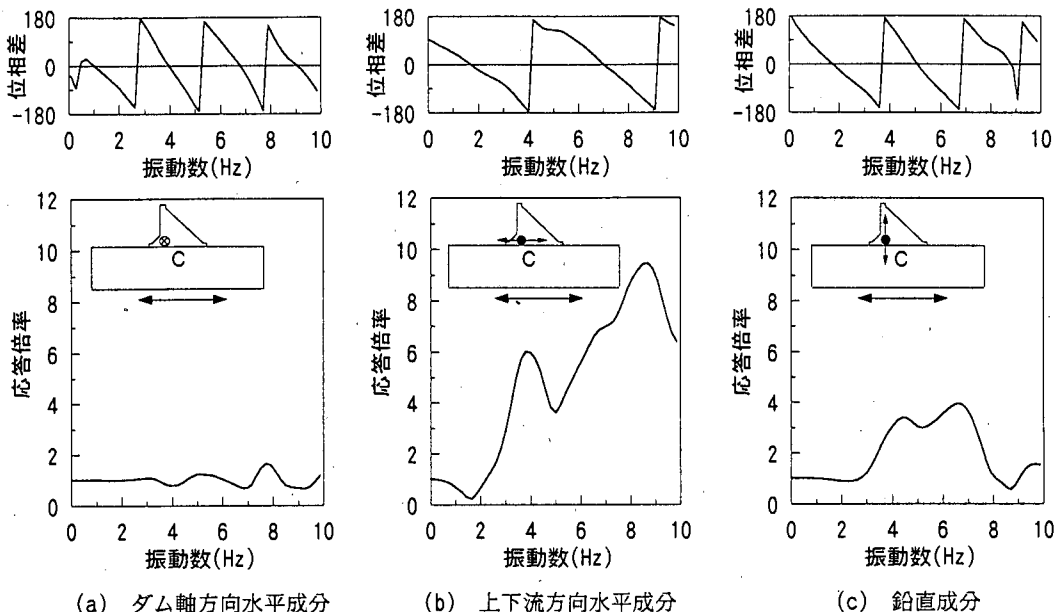


図-13 下段監査廊 (C点) 各方向の岩盤境界
上下流方向水平成分に対する伝達関数

に小さい。この点に関しては、今後より多くの重力式コンクリートダムやアーチ式コンクリートダムの減衰定数を算出して検討されることが望まれる。

(4) 岩盤物性に関する考察

実測されたダムの固有振動数を再現する岩盤の弾性係数は 11000MPa である。一庫ダムではダム天端と同標高のグラウトトンネル内の岩盤 D 点 (図-1) でも地震観測記録が得られている。ダムコンクリートの地震波の S 波伝播速度 V_s を求めたのと同様に、ダムの下段監査廊 (図-1 の C 点) と D 点で観測したダム軸方向水平成分加速度記録で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 を $\Delta H / \Delta T$ で算出し、ポアソン比を 0.25 として、等方弾性体の波動論の関係式を用いて弾性係数を算出してみた。

その値は 9000MPa で、ダムの固有振動数を再現する岩盤の弾性係数 11000MPa に近いが、幾分小さい値であった。この理由として、ダム着岩部の岩盤はコンソリデーショングラウトによる改良がなされ、地震波伝播速度から求められる弾性係数より大きくなっていることが考えられる。

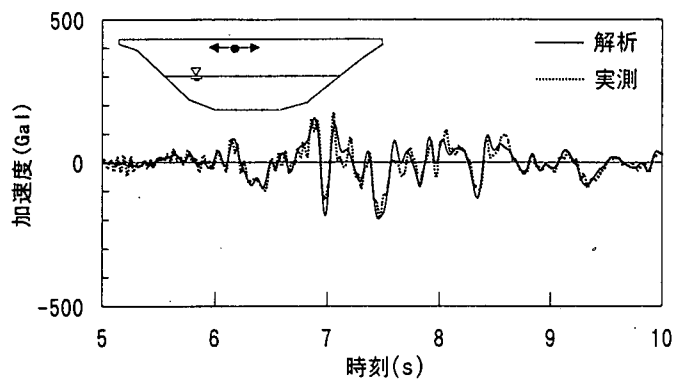
ダム基礎岩盤の地震時の応力を算出すると、最大値でも圧縮、引張側にそれぞれ 0.6MPa 程度で、ダム高さが最も大きいダム中央着岸部の上下流端で発生する。最大応力発生時のダム着岸部岩盤での応力

の平均は、圧縮、引張側それぞれ 0.2MPa 程度と小さい。既に述べたとおり、弱振動部と主要動部でダムの固有振動数がほぼ同じで、主要動部においても岩盤の弾性係数と減衰定数が弱振動部での値と同程度である。これは、岩盤がコンソリデーショングラウトによる改良の影響を受けている上に、上記のとおりダム着岸部岩盤に生じる地震時応力が小さいためと考えられる。

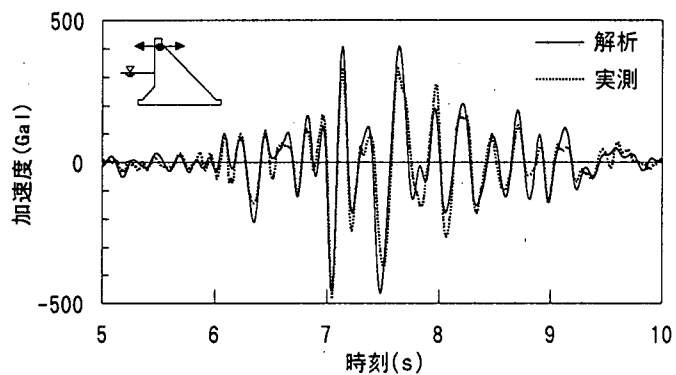
(5) ダムの三次元挙動と二次元解析

先に実施した、二次元の一庫ダムの兵庫県南部地震シミュレーション解析では、実測を良好に再現する岩盤の弾性係数と減衰定数はそれぞれ 29000MPa と 20% で、ともにダムサイト岩盤としては過大と思われる値であった²⁾。これに対し今回の三次元解析では、岩盤の弾性係数と減衰定数はそれぞれ 11000MPa と 1% で、上記のコンソリデーショングラウトによる改良を受けた岩盤の物性値として、妥当と考えられる値になっている。

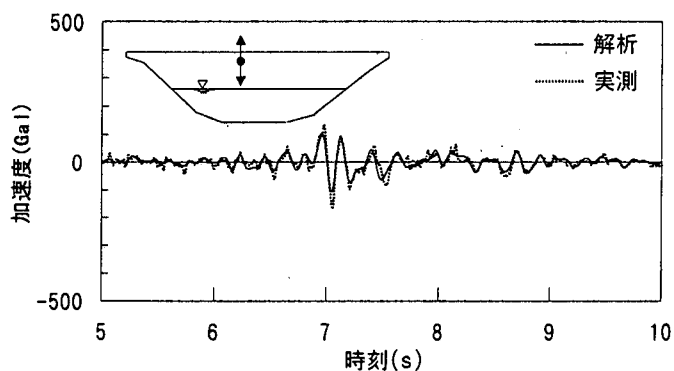
また文献 (14) には、Pine Flat 重力式コンクリートダム (ダム高 122m, 堤頂長 562m) の固有振動数が、二次元解析モデルでは 3.14Hz であるのに対し、三次元解析モデルでは 3.70Hz と 20% 程度高振動数側にあることが述べられている。いま一庫重力式コンクリートダムの二次元解析モデル²⁾において、岩盤の弾性係数を今回の三次元解析でダムの固有振



(a) ダム軸方向水平成分

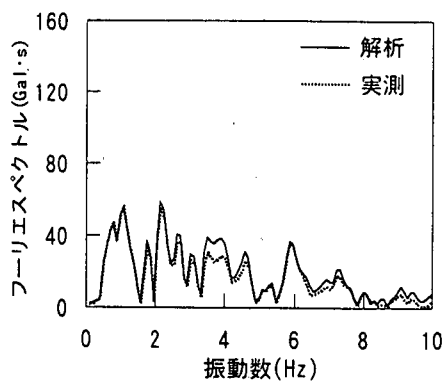
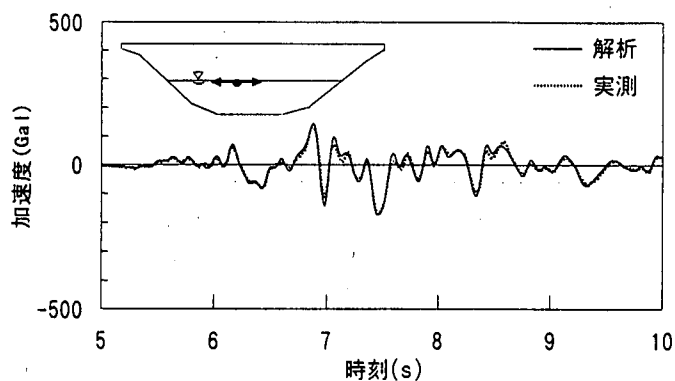


(b) 上下流方向水平成分

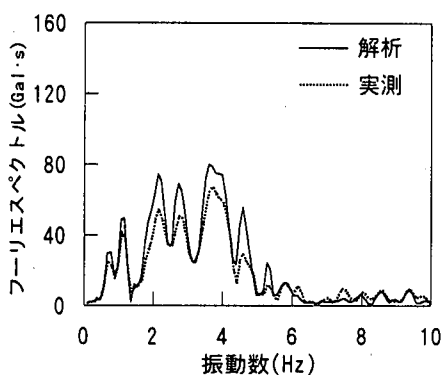
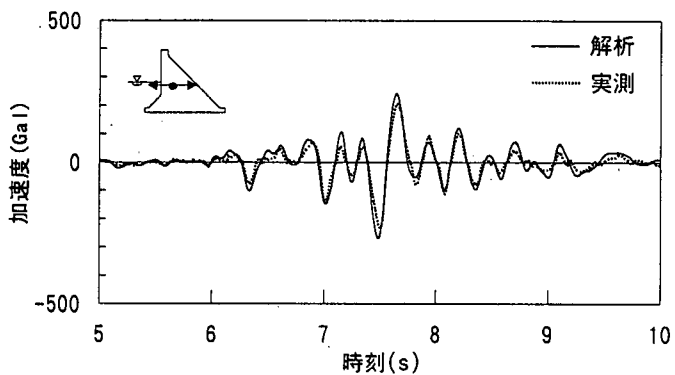


(c) 鉛直成分

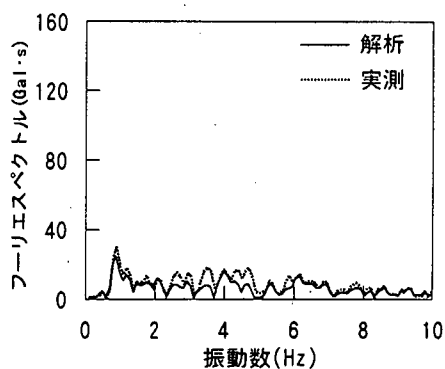
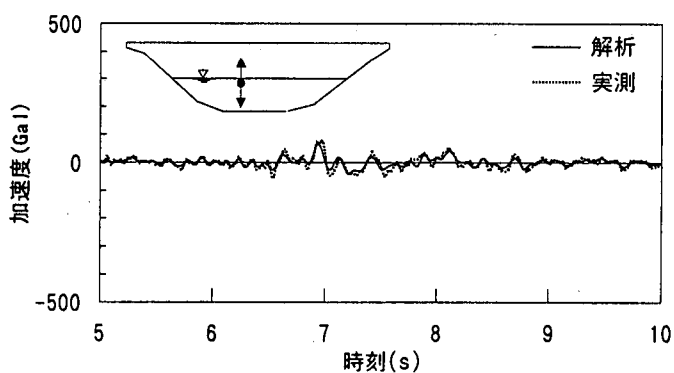
図-14 上段監査廊の加速度時刻歴とフーリエスペクトルの
実測値と解析値の比較



(a) ダム軸方向水平成分



(b) 上下流方向水平成分



(c) 鉛直成分

図-15 中段監査廊の加速度時刻歴とフーリエスペクトルの
実測値と解析値の比較

動数が捉えられた 11000MPa として固有振動数を求めると 4.4Hz である。この値に対し三次元解析モデルで得られた 5.2Hz は 20% 程度高振動数側にあり、Pine Flat 重力式コンクリートダムと同様の結果である。これは、谷地形を呈する基礎岩盤上の三次元形状を有するダム堤体と岩盤、貯水との三次元連成挙動によるものと考えられる。

6. ダムの実地震応答シミュレーション解析におけるモデリングについて

ダムの減衰定数ならびに岩盤の弾性係数と減衰定数は、ダムの地震応答解析結果に影響を与える重要な値であるにもかかわらず、十分明確になっていない点が多い。今後本研究で行ったような、実地震応答のシミュレーション解析が、多くのダムを対象に試みられ、ダムの実地震応答シミュレーション解析における物性値設定の妥当性が確認されたとともに、信頼性のある物性値データが蓄積されることが望まれる。そのために行うダムの実地震応答のシミュレーション解析に当たって、以下のようにモデル化することが適当と考えられる。

ダムの弾性係数は、本研究で行ったように、ダムの上部と最低部の地震観測記録から求められる値か、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い⁶⁾。ダムの減衰定数は、ダムの上部と最低部の地震観測記録を用いて $1/\sqrt{2}$ 法により算出する。この値には、貯水や地震波、岩盤への逸散の影響が含まれ、これらの影響の程度については今後の課題であるが、大体ダムの内部減衰定数に近い値が得られると考えられる。なお、本研究とこれまでの 2 つのアーチダムにおける検討結果では、ダムの減衰定数は弱振動レベルでは 1.0~1.5% 程度で、振動レベルが大きくなる程大きい¹³⁾。

岩盤の弾性係数は、岩盤領域の広さをある程度とればダムの固有振動数はかわらないので、まず岩盤の弾性係数をいくつか変えて解析を行い、地震時の固有振動数をとらえる岩盤の弾性係数を見いだす。次に岩盤の弾性係数をこの値として、岩盤領域の広さを変えた解析を行い、伝達関数のピーク値でみて応答が変わらなくなる岩盤領域を確認しておく。この段階で、ダムの応答値に影響を与える値として、岩盤の減衰定数のみが決定されていないことになる。そこで最後に応答スペクトルの解析値と観測値を比較して、観測値を良好に再現するように岩盤の減衰定数を決定する。本研究では、岩盤の減衰定数が応答に及ぼす影響は小さかった。このような場合は、

本研究で行ったように実測値を良好に再現する値として、ダムの減衰定数を求めることもできる。なお、川浦アーチダムの実地震応答シミュレーション解析⁹⁾では、岩盤の減衰定数がダムの応答に及ぼす影響が認められた。岩盤の減衰定数がダムの応答に及ぼす影響については、他のダムに対しても検討される必要がある。またダムの減衰定数ならびに岩盤の弾性係数や減衰定数は、地震時の振動レベルに依存すると考えられるので、同一ダムで振動レベルの異なるいくつかの実地震を対象にシミュレーション解析が試みられることも必要である。

本研究でも示されたとおり、重力式ダムといえどその動的応答は、谷地形を呈する基礎岩盤上の三次元形状を有するダム堤体と岩盤、貯水との三次元連成挙動である。このため実地震のシミュレーション解析により物性値を明らかにするためには、三次元解析が必要である。二次元の実地震のシミュレーション解析では、物性値は現実とかけ離れた値に設定されうことは既に述べたとおりである。さらに上記の検討においては、ダムの減衰定数を適切に設定することが不可欠である。このためには、ダムの堤体の上部のみならず、その最低部における地震観測記録が必要である。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。今後多くのダムを対象にダムの最低部でも地震観測がなされとともに、本研究で示した方法により実地震応答のシミュレーション解析がなされ、地震時の物性値について明らかにされることが期待される。

7. 結論

1995 年兵庫県南部地震において、一庫重力式コンクリートダムにおいて観測された加速度記録のシミュレーション解析を行った。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) ダム-岩盤-貯水の連成を考慮した三次元連成解析により、兵庫県南部地震における一庫重力式コンクリートダムの加速度時刻歴波形、フーリエスペクトルの良好なシミュレーションを行うことができた。ダムの弾性係数は、ダムの上部と底部の地震観測記録から求めた値を、岩盤の弾性係数はダムの固有振動数がとらえられように求めた値を用い良好な結果を得た。

(2) 本研究でシミュレーション解析の対象としたダムの地震観測記録は、その最大加速度が 483 Gal という大きなものであったが、ダムを線形弾性体とし

た三次元連成解析により良好なシミュレーション結果が得られたことから、一庫ダムは兵庫県南部地震時にジョイントの影響のない三次元挙動を示していたものと判断される。

(3)ダムの減衰定数は、最大加速度 40 Gal 程度の振動に対しては 1%程度、最大加速度 480 Gal 程度の振動で 7%程度であった。

(4)岩盤領域は、鉛直方向にダムの高さ、ダム軸方向に堤頂長の 1/2 の長さ、上下流方向に堤敷幅を基準にそれぞれその 3 倍程度の広さをとる必要がある。

(5)本研究においては、ダムの応答にダムの減衰定数が及ぼす影響は大きい、岩盤の減衰定数が及ぼす影響は小さかった。

(6)ダムの地震応答解析に用いるダムの減衰定数ならびに岩盤の弾性係数や減衰定数については、十分明確になっていない点が多く、これらについては今後さらにデータの蓄積が必要である。そのためのダムの実地震応答シミュレーション解析におけるモデリングについて示した。

(7)ダムの動的応答は、谷地形を呈する基礎岩盤上の三次元形状を有するダム堤体と岩盤、貯水との三次元連成挙動を示すので、三次元解析が必要である。

謝辞：本研究で用いた地震観測記録は、水資源開発公団が収録されたものを、使用させて頂いたものである。関係者の皆様の観測に対するご努力に敬意を表するとともに、深く感謝の意を表します。また本研究の実施にあたり、水資源開発公団試験研究所の皆様には、貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに記し御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田口勝也, 杉村淑人, 木戸研太郎: 兵庫県南部地震における一庫ダム動的解析, ダム工学 No.23, pp.29-39, 1996.
- 2) 塩尻弘雄, 上田稔: ダム-岩盤-貯水の連成を考慮した一庫重力式コンクリートダムの兵庫県南部地震応答シミュレーション解析, ダム工学 Vol.8, No.2, pp.85-92, 1998.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, L.R.: Finite Dynamic Model for Infinite Media, Proc. of ASCE, pp.859-877, 1969.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 上田稔, 佐藤正俊, 石垣順, 長谷部宣男: 硬質岩盤の減衰定数のひずみ振幅レベル依存性について, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集第 3 部(A), pp.808-809, 1998.
- 11) 上田稔, 佐藤正俊, 名和朋功, 長谷部宣男: ダムサイト硬質岩盤の原位置平板載荷試験の応力-変位曲線より求めた最大減衰定数について, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集第 1 部(B), pp.706-707, 1998.
- 12) 水資源開発公団: 一庫ダム図面集, 1984.
- 13) 上田稔, 塩尻弘雄, 横井幹仁, 恒川和久: 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, pp.825-828, 1997.
- 14) Hall, F.J.: The Dynamic and Earthquake Behavior of Concrete Dams -Review of Experimental Behavior and Observational Evidence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.7, No.2, pp.67, 1988.

(1999.4.26 受付)

THREE-DIMENSIONAL RESPONSE ANALYSIS OF HITOKURA CONCRETE GRAVITY DAM TO THE 1995 HYOUGOKEN-NANBU EARTHQUAKE

Hiroo SHIOJIRI and Minoru UEDA

Accurate prediction of earthquake response of a dam is necessary for reliable evaluation of safety of the dam. In the computation, appropriate numerical modeling should be done to get trustworthy results, and it is important to validate the modeling of dams by comparing computed results with observed ones. In this paper, the recorded response of Hitokura concrete gravity dam to the 1995 Hyougoken-Nanbu Earthquake is simulated by using a computer code developed for the three dimensional analyses of dam-foundation rock-reservoir water interaction. Extensive finite element studies are conducted, the good agreements between computed and recorded responses are obtained. Appropriate material properties of dam and foundation rock to be used in the analysis and a rational procedure to determine them are discussed.