

(154) アーチダムの三次元動的シミュレーション解析

電源開発株式会社 有賀 義明

【1】 まえがき

コンピューターの演算能力・記憶容量の性能向上、解析プログラムの高度化開発等を背景として、近年では、アーチダムの安定性を確認するために、三次元有限要素解析が実施される例が多くなっている。アーチダムの最適形状設計・最適断面設計は、基本的には、試算荷重法により実施されるのが通例であるが、将来的には、三次元有限要素解析に基づく設計の実用化も図られてゆくものと予想される。そのためには、三次元有限要素解析の精度・信頼性の検証が大変重要であると考えられる。ここでは、既設のアーチダムについて、地震観測により得られたアーチダムの地震時応答の再現を目的として実施した、三次元有限要素法に基づく動的シミュレーション解析の結果の一例を紹介する。

【2】 解析対象ダムの概要

解析対象とした池原ダムは、紀伊半島尾鷲市西方約20kmの奈良県吉野郡下北山村、熊野川水系北山川に建設された、高さ111m、堤頂長460m、ダム堤体積64万m³の非対称ドーム型アーチダムである。池原地点の地質は、時代未詳中生層と砂岩粘板岩の互層のより構成されている。周辺には熊野酸性岩（石英斑岩等）が貫入しており、ダム地点の岩盤は貫入岩により非常にケイ化され、きわめて硬質な岩盤となっている。

【3】 池原ダムにおける地震観測概要

池原ダムでは、図-1に示したようにダム基礎・ダム天端中央・左岸岩盤・右岸岩盤等の7カ所に地震計を設置して地震観測を実施している。地震観測は昭和39年より実施しているが、昭和61年には観測システムを更新している。現在の地震観測は、換振器（サーボ型加速度計）→増幅器→A/D変換器→遅延装置→デジタルデータレコーダーのフローで実施しており、観測システムの総合性能は、測定範囲0.1～1000gal、測定周波数0.01～30Hz、遅延時間10.24秒である。

【4】 解析対象とした地震事象

動的シミュレーション解析は、1987年4月12日3時47分33秒に、紀伊半島南東沖において発生した地震事象（震央：東経136.38°、北緯33.83°、マグニチュード4.0、震源深さ39km）を対象に行った。この地震の際に、ダム天端中央およびダム基礎で観測された上下流方向水平成分の加速度時刻歴を図-2に示す。

【5】 三次元有限要素法による動的シミュレーション解析

(1) 解析方法

池原ダムの周辺地山を含めた三次元有限要素モデルを作成し、ダム基礎で観測された実地震波を入力して動的応答解析を実施した。そして、アーチダムの動的応答に関して、地震観測値と数値解析値を比較検討することにより、三次元有限要素解析法についての考察を行った。観測された地震動の加速度レベルが小さかったことから、動的変形特性のひずみ依存性は考慮せずに線形解析とした。解析コードには“SAP-6”を使用し、モード合成法により三次元動的解析を実施した。モード解析の解析次数は30次とした。

(2) 三次元有限要素モデル

ダム堤体のみならず、周辺地山を含めた地盤-構造物系として解析するために、解析領域はアーチダムを中心に幅1135m、奥行855mの範囲を設定した。有限要素モデルは8節点ソリッド要素を用いて作成した。解析に用いた三次元有限要素モデルを図-3に示す。解析モデルの要素数は393、節点数は719（その内、ダム堤体の要素数は129、節点数は274）である。解析時の加振方向はダム上下流方向とした。境界条件の設定は、ダムの上流側と下流側の側方境界については、加振方向（上下流方向）のみ水平ローラー支持とした。下方境界、および、ダムの右岸側と左岸側の側方境界は固定境界とした。

(3) 解析用物性値

ダムおよび基礎岩盤の解析用物性値を表-1に示す。解析ケース [I] の物性値は、コンクリートおよび中生代の砂岩粘板岩に関して、一般的に想定される値を設定したものである。また、解析ケース [II] と解析ケース [III] の物性値は、幾つかのケーススタディーを実施した中で、地震観測値と数値解析値が比較的良好な対応を示した時のものである。

(4) 貯水の影響について

貯水については、ウェスターガードの式に基づいて評価した付加質量により考慮した。貯水池の水位は、ダム基礎より108 mとした。

(5) 入力地震動

解析用の入力地震動としては、ダム基礎において観測された地震動(図-2参照)の0~20秒間を使用した。ダム基礎位置から下方基盤位置に引き戻した後に、下方基盤より入力した。

(6) 地震観測値と数値解析値の比較項目

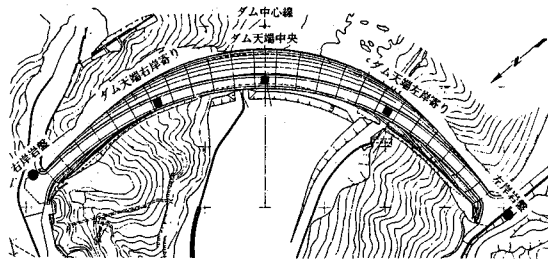
地震観測値と数値解析値との比較は、①ダム基礎に対するダム天端中央のパワースペクトル比の形状、②ダム天端中央の最大加速度、および、③ダム天端中央の地震動の波形に着目して行った。

なお、ダムの固有振動数は、ダム基礎とダム天端中央のパワースペクトル比 [(ダム天端中央の加速度時刻歴のパワースペクトル) / (ダム基礎の加速度時刻歴のパワースペクトル)] を算出し、パワースペクトル比のピークから評価した。

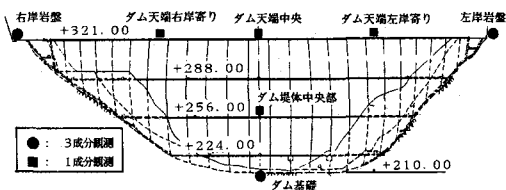
(7) 解析結果

固有値解析により求められた固有周波数の概要を表-2に示す。解析ケース [I]、[II]、[III] の解析結果を、それぞれ図-4、図-5、図-6に示す。また、ダム天端中央の観測地震動について、8 Hz以上の周波数成分をカットした場合の結果を図-7に示す。これは、30次までのモード合成法により評価し得た周波数が7.99Hzであったことから、地震観測値と数値解析値の比較を同じ周波数範囲で行うために算出したものである。

解析ケース [I] は、ダムおよび基礎岩盤の物性値として、一般的な数値を想定した時の結果であるが、ダムの固有振動数は、観測値の3.10Hzに対して解析値では1.81Hzであった。ダム天端中央の最大加速度は、観測値の10.8 galに対して解析値では3.8

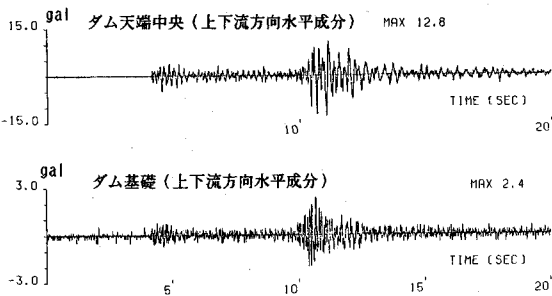


(1) 平面配置



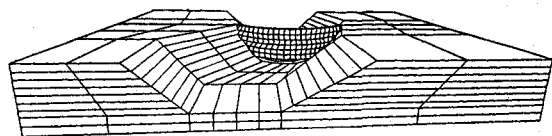
(2) 鉛直配置

図-1 池原ダム地震計設置位置

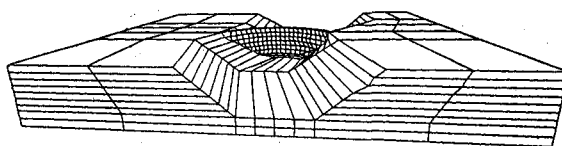


(1987年 4月12日 3時47分33秒、M4.0 震央距離 42km)

図-2 池原ダムで観測された加速度時刻歴



(1) 上流側より



(2) 下流側より

図-3 解析に用いた三次元有限要素モデル

gal とかなり小さい結果となった。

こうした数値解析結果を踏まえて、解析値を観測値に近似させるために、物性値を変更して解析した結果が、解析ケース [II] と解析ケース [III] である。解析ケース [II] は、ダムの固有振動数を近似させるために弾性係数を8,500,000 (tf/m²) に、地震動の最大加速度を近似させるために減衰定数を各次モード一律3%に設定した時の解析結果である。解析ケース [III] は、減衰定数を、低次モードと高次モードとに別けて、3次以下2%、4次以上5%と設定してみた時の解析結果である。

解析ケース [II] と解析ケース [III] では、ダムの固有振動数は、観測値の3.10Hzに対して、解析値は3.06Hzであった。ダムの固有振動数およびダム天端中央の最大加速度について、観測値と解析値をまとめた結果を表-3に示す。

定性的な知見としては、つぎのような結果を得た。ダムの固有振動数は、ダムの動弾性係数の値に大きく依存した。ダムの地震動の最大加速度は、減衰定数に大きく依存した。減衰定数の値を大きく設定すると、ダム天端の地震動の最大加速度は小さくなり、減衰定数の値を小さく設定すると、ダム天端の地震動の最大加速度は大きくなったが、減衰定数の値を非常に小さく設定した場合、特定の周波数の振動が顕著になり、ダム天端の地震動は調和波的な波形を示した。

【6】 今後の課題

池原ダムを例にとり、アーチダムの地震時応答について三次元有限要素解析を行ったところ、ダムの動弾性係数を8,500,000 (tf/m²)、減衰定数を3次モード以下2%、4次モード以上5%に仮定した場合に、観測値と解析値は比較的良好な対応を示した。

コンクリートの動弾性係数は、一般に3,000,000~4,000,000 (tf/m²) 程度の値と想定されるが、これに比して、8,500,000 (tf/m²) という値はかなり大きな数値であった。また、減衰定数については、材料減衰と逸散減衰を考えると一般には5~20%程度の値が想定されるが、これに比して2~5%という値はかなり小さな数値であった。

ここで紹介した解析例は、ひとつの特殊解であり、ある特定の有限要素モデル、境界条件を設定した際に、ひとつの可能性として得られた解にすぎない。

表-1 解析用物性値

解析ケース	単位体積重量 γ (tf/m ³)		動弾性係数 $E_d(10^6 \text{tf/m}^2)$		動ポアソン比 ν_d		減衰定数
	ダム	岩盤	ダム	岩盤	ダム	岩盤	
I	2.3	2.6	3.0	4.0	0.2	0.3	一律10%
II	2.3	2.6	8.5	8.5	0.2	0.3	一律3%
III	2.3	2.6	8.5	8.5	0.2	0.3	3次まで2% 4次以上5%

表-2 固有値解析結果

ケース	固有振動数 (Hz)					
	1次	2次	3次	4次	5次	30次
解析ケースI	1.72	1.79	2.47	3.19	3.65	5.37
解析ケースII	2.88	3.00	4.13	5.28	5.36	7.99
解析ケースIII	2.88	3.00	4.13	5.28	5.36	7.99

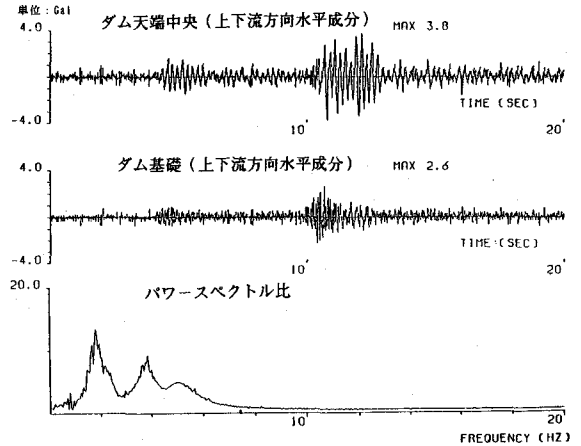


図-4 解析ケース [I] の結果 (Ed=3,000,000 tf/m², h=10%)

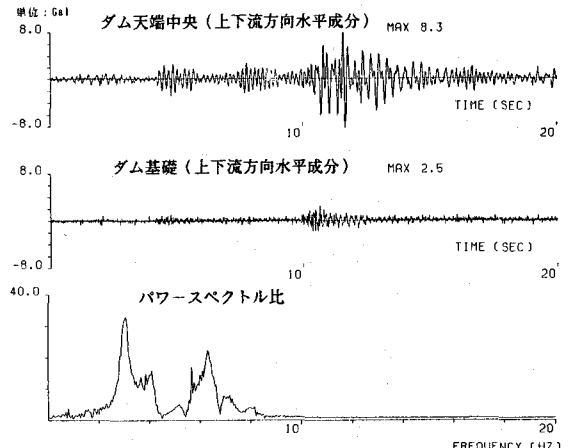


図-5 解析ケース [II] の結果 (Ed=8,500,000 tf/m², h=3%)

このような結果の妥当性を検討するためのアプローチとしては、大別して、二つの面からアプローチが考えられるように思われる。ひとつは、動的変形特性の評価の面からのアプローチである。もうひとつは、三次元有限要素解析（特に解析条件の設定）の精度・信頼性の面からのアプローチである。

一般に、地盤・構造物の三次元有限要素解析の結果に大きく影響を与える要因としては、有限要素モデルのメッシュ分割、境界条件、動弾性係数（または弾性波速度）、減衰定数、波動インピーダンス比、解析法（直接積分法、複素応答法、モード合成法）、解析周波数あるいは解析次数等を挙示することができる。ここで紹介した解析例については、今後、特に、境界条件の妥当性、それに伴う減衰定数のとり方、三次元有限要素モデルの妥当性等について、詳細な検討を行う必要があると考えている。三次元有限要素モデルに関しては、今回のモデルではアーチダム堤体について奥行方向のメッシュ分割を行っていないが、8 節点ソリッド要素を用いてアーチダム堤体奥行方向にメッシュ分割をした場合、20 節点アイソパラメトリック要素を用いてアーチダム堤体のメッシュ分割をした場合、基礎岩盤のメッシュ分割をもっと細かくした場合等についての比較検討を実施したいと考えている。

解析プログラムに関しては、これまでに、“SAP-6”のほかに“ADAP”および“EACD-3D”による比較解析も行ったが、基礎岩盤まで解析モデルに含めたダム・地盤系の解析に対しては、“SAP-6”の結果が、実地震観測結果との比較において妥当な結果を示した。今後は、より豊富な解析機能を有する解析プログラムの適用例として、“ABAQUS”による比較解析を行い、アーチダムの地震時挙動の再現、アーチダムの三次元有限要素解析の精度・信頼性等について、さらに検討を重ねる予定である。

【参考文献】

- (1) Clough et. al. : ADAP - A Computer Program for Static and Dynamic Analysis of Arch Dams, Report NO. EERC7314, California Univ. 1973
- (2) Fok, Hall, Chopra : EACD-3D A Computer Program for 3-D Earthquake Analysis of Concrete Dam, PB Report NO. PB-87-124228, 1986

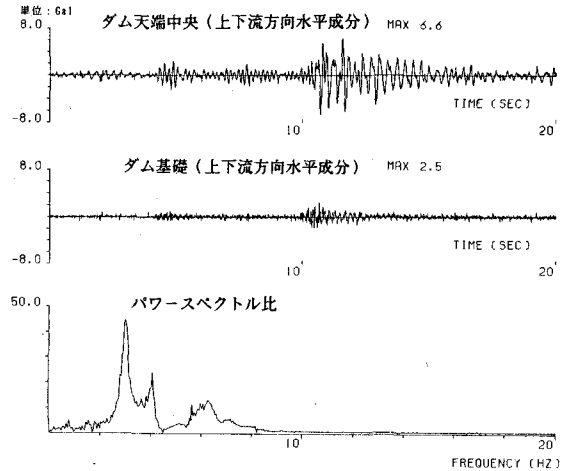


図-6 解析ケース [III] の結果
($E_d=8,500,000$ tf/m², $h=2\sim5\%$)

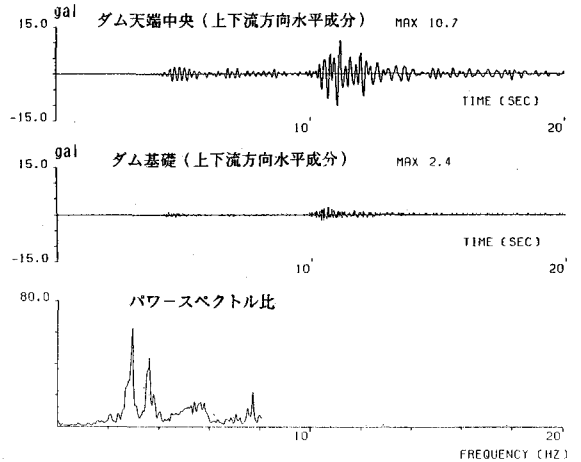


図-7 8 Hz以上の周波数成分をカットした地震観測結果

表-3 地震観測結果と数値解析結果の比較

ケース	ダム固有振動数 (Hz) *3	ダム天端最大加速度 (gal) *4	最大加速度の増幅率 (ダム天端/ダム基礎)
観測値 *1	3.10	12.8	5.33
観測値 *2	3.10	10.8	4.32
解析ケースI	1.81	3.8	1.46
解析ケースII	3.06	8.3	3.32
解析ケースIII	3.06	6.6	2.64

【備考】 *1: 地震観測結果
*2: 周波数範囲を解析結果と合わせるために8Hz以上をカットした結果
*3: ダム天端中央とダム基礎におけるパワースペクトル比より評価
*4: ダム天端中央における上下流方向水平成分