

既設アーチダムの強震時応答に関する 三次元再現解析

有賀 義明¹ ・ 曹 増延² ・ 渡邊 啓行³

¹フェロー会員 博(工) 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究センター (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

²Ph.D. 株式会社開発計算センター 科学システム部 技術室 (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

³フェロー会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

動的解析による耐震性評価の信頼性を向上させるためには、地盤および構造物系の地震時変形特性を実現現象に即して定量的に評価することが必要である。1997年3月にマグニチュード5.8の地震が発生した際、震央から35km離れた既設アーチダムの天端中央で、オリジナルの観測値としては1000.2gal、ダム天端中央の実質的な揺れとしては621galの地震動が記録された。そこで、ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元解析モデルを作成して、既設アーチダムの強震時応答の三次元再現解析を行い、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性を逆解析的に評価した。その結果、ダムの動的せん断剛性は10,680N/mm²、減衰定数は5%、基礎岩盤の動的せん断剛性は19,600N/mm²、減衰定数は5%であった。

Key Words : Near Field Earthquake, Concrete Arch Dam, Earthquake Observation, 3-D Dynamic Analysis, Dynamic Shear Modulus, Damping Factor,

1. はじめに

コンクリートダムを対象に動的解析を実施すると、堤体に発生する地震時応力および地震時ひずみの算出結果は、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性の設定によって大きく変化する。その変化の度合は、コンクリート重力式ダムの場合よりも、アーチダムの方が大きく、アーチダムに関しては、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性の定量的評価がより重要になる。

ダム堤体材料の強度変形特性は、一般に室内試験によって評価されるが¹⁾、ダムコンクリートの地震時変形特性に関しては、基本的に室内試験による評価事例が少なく^{2),3)}、また、室内の載荷試験によって評価された動的物性値が実際の地震動を受けた実ダムの地震時変形特性を適確に反映したものであるかどうかについての実証は、まだ十分にはなされていない⁴⁾。実地震動に基づいてアーチダムの地震時変形特性を評価した事例としては、池原ダム⁵⁾や川浦ダム⁶⁾の事例が報告されているが、研究事例は少なく、実ダムの地震時変形特性は、まだ十分には解明されていない。

1997年3月16日に愛知県豊橋市近傍でマグニチュード5.8(震源深さ38km)の地震が発生した。震央から35km離れた新豊根アーチダムでは、オリジナルの観測値として、ダム底部監査廊で最大70.1gal、ダム天

端中央で最大1000.2galの地震動が記録され、既設ダムにおける地震観測としては、ダムの地震時変形特性を定量的に評価するために、貴重な地震動データが得られた。そこで、この地震動データに基づいて、新豊根ダムの実地震時挙動を三次元動的解析解析によって再現し、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性を定量的に評価した。

2. 既設アーチダムでの地震観測

(1) 新豊根ダムでの地震観測の概要

解析対象とした新豊根ダムは、1972年に建設された高さ116.5m、堤頂長311m、堤体積34.8万m³のドーム型非対称放物線アーチダムである。堤高と堤体底部の最大幅の比は0.186であり、堤体は薄型である。また、堤頂長と堤高の比は2.67であり、比較的狭い谷に建設されている。ダムの平面形状と下流側正面図を、図-1と図-2に示す。ダムの基礎岩盤は、主として黒雲母花崗岩によって構成されており、堅硬な岩盤である。花崗岩には、輝緑岩が貫入しており、左岸ダム下流部および右岸ダム基礎上流部に貫入岩体が分布している。地震計は、図-2に示したように、左岸岩盤、ダム天端中央、右岸岩盤、ダム底部監査廊に3成分づつ、ダム天端(1/4左岸寄り)とダム天端(1/4右岸寄り)

に2成分づつ、ダム中央中腹部に1成分、計7ヶ所に合計17成分設置している。

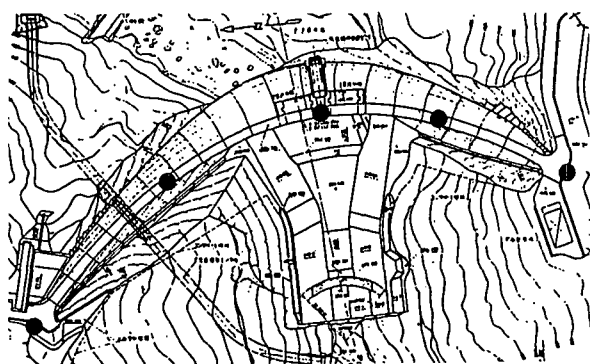


図-1 ダムの平面と地震計の配置

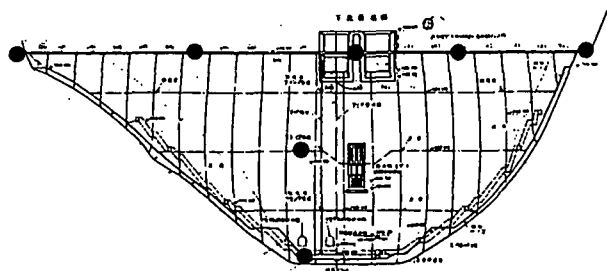


図-2 ダムの下流側正面と地震計の配置

(2) 解析対象とした地震観測記録の概要

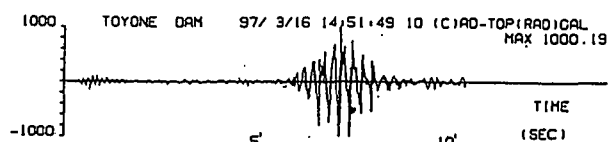
1997年3月16日に観測された地震動データの概要を表-1に示す。表-1には、オリジナルの観測値と10Hz以上の周波数成分をカットした最大加速度値を併記した。オリジナルの観測値に特徴的なことは、ダム天端(1/4左岸寄り)及びダム天端(1/4右岸寄り)に関しては半径方向の加速度に比して鉛直方向の加速度が約1/5~1/6であるのに対して、ダム天端中央に関しては半径方向、接線方向、鉛直方向のいずれの加速度も大きいことである。図-3に示したのは、ダム天端中央で観測されたオリジナルの加速度時刻歴とフーリエスペクトルであるが、この図から、ダム天端中央では85~90Hzの高周波成分が多く含まれていることが分る。この高周波成分は、ダム底部監査廊で観測された地震同には見られない。つぎに、ダム天端中央で観測された加速度時刻歴の時間軸を拡大して表示した結果を図-4に示すが、この図からも、ダム天端中央の地震動が、3~4Hzの低周波成分と85~90Hzの高周波成分によって複合的に構成されていることが理解できる。この理由については、図-2に示したように、ダム天端中央の地震計設置位置が、洪水吐設備の中央部に位置しているためではないと考察される。すなわち、3~4Hzの振動成分は、ダム堤体の揺れであり、85~90Hzの振動成分は、洪水吐設備の振動の影響ではないかと考えられる。このような分析から、ダム天端

中央での実質的な最大加速度は621gal、ダム底部監査廊での最大加速度は64gal程度と考えられる。

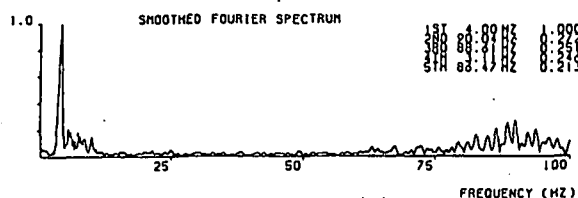
表-1 地震観測記録の概要

地震の概要			
発生年月日		1997. 3.16.	
震央	北緯	34度56分	
	東経	137度32分	
マグニチュード		5.8	
震源深さ		38 km	
震央距離		35 km	
震源距離		52 km	
地震動の最大加速度		オリジナル値	実質的な値*
ダム天端	半径方向	1000.2gal	621gal
	接線方向	790.2gal	80gal
	鉛直方向	548.4gal	144gal
天端1/4左岸寄り	半径方向	513.8gal	441gal
	鉛直方向	110.6gal	87gal
天端1/4右岸寄り	半径方向	564.4gal	520gal
	鉛直方向	85.8gal	59gal
ダム底部監査廊	半径方向	70.1gal	64gal
	接線方向	46.2gal	29gal
	鉛直方向	46.8gal	40gal
左岸岩盤	半径方向	44.1gal	35gal
	接線方向	56.8gal	62gal
	鉛直方向	53.4gal	39gal
右岸岩盤	半径方向	68.1gal	74gal
	接線方向	44.9gal	43gal
	鉛直方向	69.9gal	67gal

(備考) *:10Hz以上の高周波成分を除いた地震動の最大加速度

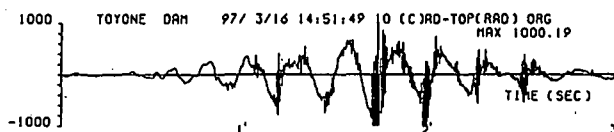


(1) オリジナルの加速度時刻歴

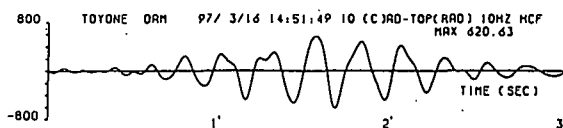


(2) 伝達関数(ダム天端中央/ダム底部監査廊)

図-3 ダム天端中央で観測された加速度時刻歴(10秒間)



(1) 時間軸を引伸ばしたオリジナルの加速度時刻歴



(2) 10Hz以上の周波数成分をカットした加速度時刻歴

図-4 ダム天端中央で観測された加速度時刻歴(3秒間)

3. 三次元動的解析による強震時応答の再現

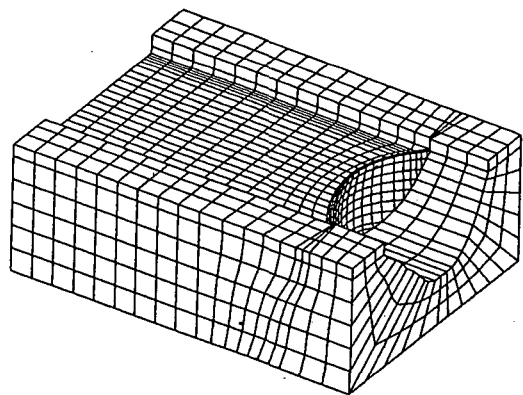
(1) 解析方法

ダム の耐震性を精度良く評価するためには、貯水池とダム の動的相互作用、基礎岩盤および貯水池での波動エネルギーの逸散等を適確に再現することが必要であるため、本研究では、厳密な理論に基づき、ダムー基礎ー貯水池連成系の三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”を実用化開発した⁷⁾。貯水池とダム の連成に関しては、貯水を可圧縮性弾性媒体と見なし、水の粘性を無視し、Reynolds 数が小さいとの仮定で、貯水の地震応答を波動方程式により定式化し、貯水池の底面堆積物によるエネルギーの透過、上流端でのエネルギーの逸散を考慮している。波動方程式は、差分法により離散化している。基礎岩盤の境界条件に関しては、仮想仕事の原理に基づく粘性境界(三浦の方法)⁸⁾を用いており、基礎岩盤から自由地盤へのエネルギーの逸散、自由地盤から基礎岩盤へのエネルギーの流入を考慮している。なお、三次元ジョイント要素の適用により、ダム の構造継目やクラックをモデル化した解析、三次元シェル要素の適用により表面遮水壁の解析等が可能である。

新豊根ダムの再現解析は、加速度時刻歴と伝達関数(ダム天端/ダム底部監査廊)に着目して、観測値と解析値が一致するように動的せん断剛性と減衰定数を調整して実施した。三次元動的解析は、上記の三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”を用いて行った。

(2) 三次元解析モデル

新豊根ダムの再現解析に用いた三次元ダムー基礎岩盤ー貯水池連成解析モデルを図-5に示す。基礎岩盤の側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。ダムおよび基礎岩盤は、8 節点ソリッド要素でモデル化し、貯水池は、差分グリッドでモデル化した。



(無反射境界：側方粘性境界、下方剛基盤)

図-5 三次元ダムー基礎岩盤ー貯水池連成解析モデル

(3) 再現解析での入力地震動

再現解析では、ダム堤体と基礎岩盤との地震時相互

作用を考慮して、ダム底部監査廊で観測された実地震動を三次元解析モデルの伝達関数を用いて下方入力基盤での入力地震動に変換した後に、動的解析に使用した。三次元再現解析では、ダム底部監査廊で観測された地震動の 20.24 秒間を使い、半径方向(水平上下流方向)、接線方向(水平ダム軸方向)、鉛直方向の 3 方向同時入力とした。

(4) 再現解析結果

再現解析によって逆解析的に評価した、ダムおよび基礎岩盤の動的物性値を表-2に示す。密度は、建設当時の調査試験結果を参考に設定した。

表-2 再現解析によって評価した動的物性値

項 目	物 性 値
ダム堤体の物性値	
密 度 (t/m ³)	2.35
動的せん断剛性 (N/mm ²)	10,684
動ポアソン比	0.17
減衰定数 (%)	5
せん断波速度 (m/s)	2,131
基礎岩盤の物性値	
密 度 (t/m ³)	2.6
動的せん断剛性 (N/mm ²)	19,600
動ポアソン比	0.25
減衰定数 (%)	5
せん断波速度 (m/s)	2,745

つぎに、実地震観測と三次元再現解析の主な比較結果を表-3に示す。また、ダム天端中央の加速度時刻歴に関する比較結果を図-6に、伝達関数(ダム天端/ダム底部監査廊)に関する比較結果を図-7に示す。図-6に示したように、ダムー基礎岩盤ー貯水池連成モデルを用いた三次元動的解析によって、既設アーチダムの強震時応答を概ね再現することができた。この三次元再現解析によって同定した新豊根ダムの地震時変形特性は、動的せん断剛性 10,680N/mm²(せん断波速度 2131m/s)、減衰定数 5%であった。減衰定数は、ダム天端中央の最大加速度値を合わせるように評価した際の数値であるが、波形全体の振幅に着目した場合には、3~4%の数値になる。なお、図-7に示したように、ダム底部監査廊における地震動は、非常に良く再現することができた。

表-3 地震観測結果と三次元再現解析結果の比較

項 目	地震観測結果	三次元解析結果
最大加速度	ダム天端	621gal
	ダム底部	64gal
伝達関数のピーク周波数(半径方向)	3.9Hz	3.6Hz

4. まとめ

・新豊根ダムの天端中央において、オリジナルの観測

値として 1000.2gal の地震動が観測された。ダム天端中央の地震計設置場所は、洪水吐設備の中間部に位置しており、洪水吐設備の地震時挙動の影響と考えられ

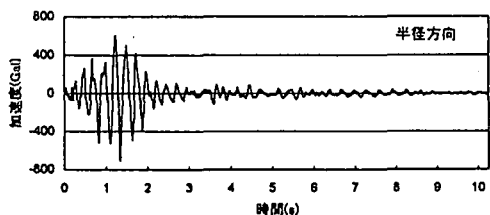
る 85~90Hz の高周波成分が多く含まれていた。10Hz 以上の周波数成分をカットした。ダム堤体の揺れと考えられる最大加速度は実質的には 621gal 程度である。

・地震観測によって記録された地震動には、さまざまな地震時応答が複合的に含まれることがあるため、実地震動に基づいて再現解析を行う際は、観測された地震動の周波数成分の妥当性の確認が必要である。

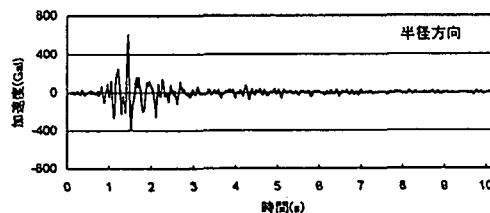
・1997 年 3 月 16 日に観測された新豊根ダムの強震時応答について、三次元動的解析により再現解析を行ない、ダムの地震時変形特性を定量的に評価した。その結果、ダム堤体の動的せん断剛性は $11,680\text{N/mm}^2$ (S 波速度 2131m/s)、減衰定数は 5% と評価された。減衰定数のこの数値は、ダム天端中央の最大加速度値を合わせた際の結果であり、地震動全体の振幅を合わせるように評価した場合は、3~4% になる。

・新豊根ダムの実地震時挙動は、解析によってほぼ再現でき、三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”の実用性・有効性を確かめることができた。なお、ダム底部監査廊の地震動に関しては、三次元動的解析モデルの伝達関数を用いた入力地震動作成法によって、非常に良く再現することができた。

・高レベル地震動に対する耐震性能を照査する場合、アーチダムに関しては、構造継目の挙動やクラックの影響をどのように考慮するかが課題になる。こうした現象を定量的に評価するためには、ダムおよび基礎岩盤の動的非線形特性、地震時の引張強度、破壊ひずみ等について、実証的な研究の積み重ねが必要である。

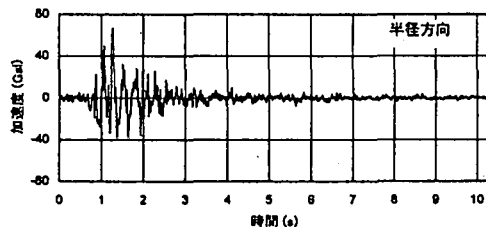


(1) 地震観測結果

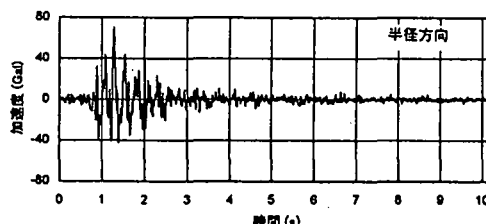


(2) 三次元再現解析結果

図-6 ダム天端の加速度時刻歴に関する比較

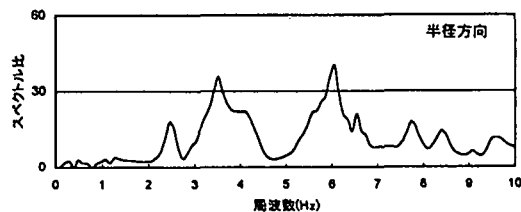


(1) 地震観測結果

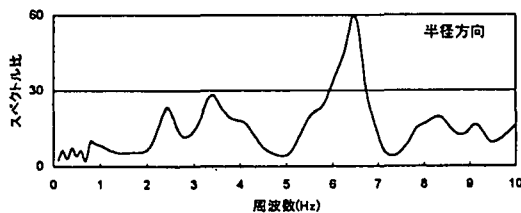


(2) 三次元再現解析結果

図-7 ダム底部監査廊の加速度時刻歴に関する比較



(1) 地震観測結果



(2) 三次元再現解析結果

図-8 伝達関数(天端/底部監査廊)に関する比較

参考文献

- 1) 畑野正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文集 第153号 p31~39, 1968. 5.
- 2) 永山功，佐々木隆，波多野政博：コンクリートの動的引張強度についての検討，土木技術資料 41-1, p26~31, 1999
- 3) 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 p43~55, 1997
- 4) 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, p85~92, 1998
- 5) Y. Ariga: Three-dimensional Dynamic Simulation Analysis of Existing Arch Dam, 10th WCEE, p4617~4622, 1992
- 6) 上田稔，恒川和久，横井幹仁，塩尻弘雄：アーチダムの実地震時応答シミュレーション解析，土木学会第24回地震工学研究発表会，p513~516, 1997
- 7) 有賀義明，渡辺啓行，吉田昌稔，曹増延：三次元ダム-基礎-貯水池連成系における逸散減衰に関する一考察，土木学会第10回日本地震工学シンポジウム E4-18, p2021~2026, 1998.11
- 8) 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，土木学会論文集第404号，I-11, pp395-404, 1989