

2004年新潟県中越地震における既設ダムの三次元再現解析と課題

有賀 義明¹Yoshiaki ARIGA¹¹電源開発株式会社 茅ヶ崎研究所

2004年新潟県中越地震では、田子倉ダムで最大454.9galの地震動が記録された。既設ダムの耐震性能照査法の実証の必要性から、この実地震時挙動の三次元再現解析を行った。当ダムについては、これまでに実施した他地点の再現解析に比して再現性を得ることが比較的難しかったが、その原因としては、当ダムでは、ダム底部監査廊に地震計が設置されていないこと、地震計の配置がダム堤体の中央部ではなく右岸側に大きく偏在していること、そのためにダム固有の地震時応答特性が観測波に十分反映されていない可能性があること等が考察された。既設構造物の地震時特性を定量的に評価するためには、構造物の固有の特性が観測波に最も反映されるような位置に地震計を配置することが大切である。

1. はじめに

動的解析では、地盤や構造物の動的変形特性の設定如何によって、算出される地震時応力や変形量は著しく変動する。したがって、精度・信頼性の高い耐震性能照査法を確立するためには、地盤-構造物系の動的変形特性を実際の現象に即して定量的に評価するとともに、解析法の妥当性を実証することが必要不可欠である。このような必要性から、これまで、1993年釧路沖地震(M7.8)での糠平ダム(コンクリート重力式ダム、堤高76m)¹⁾、1997年豊橋近傍の直下地震(M5.8)での新豊根ダム(アーチダム、堤高116.5m)²⁾、1995年兵庫県南部地震(M7.2)での池原ダム(アーチダム、堤高111m)³⁾等の実地震時挙動の三次元再現解析を行って来た。

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震(M6.8)では、震央から37km離れた田子倉ダム(コンクリート重力式ダム、堤高145m)で最大454.9galの加速度波が観測された。そこで、地震観測記録の有効活用、既設ダムの動的変形特性の定量的評価、三次元動的解析法の妥当性の実証を目的に、田子倉ダムの実地震時挙動の三次元再現解析を行った。

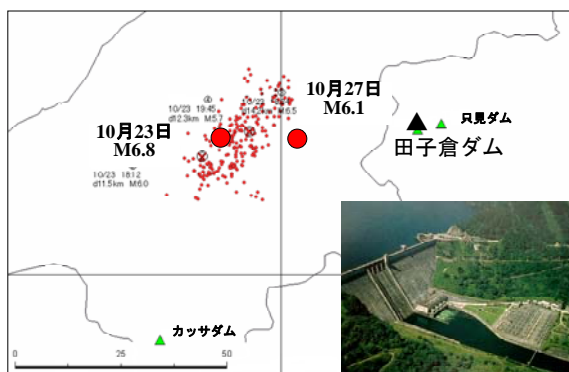


図-1 新潟県中越地震と田子倉ダムの位置関係

近隣のカッサダム(ロックフィルダム、堤高90m、震央距離50km)では最大127gal、只見ダム(ロックフィルダム、堤高30m、震央距離39km)では最大236galの加速度波が記録された。なお、田子倉ダムでは、2004年10月27日の新潟県中越地震の余震(M6.1、震央距離23km)の際にダム天端で最大600.2galの加速度波が観測された。

2. 地震観測

田子倉ダムは、1959年に建設された、高さ145m、堤頂長462m、堤体積195万m³のコンクリート重力式ダムである。ダム天端は、満水位より5m上の標高515.00mにあり、貯水池の総貯水量は3.7億m³である。ダム基礎面の大部分は石英粗面岩によって構成されており、部分的に凝灰岩、火山礫凝灰岩が分布している。石英粗面岩は、流理構造が発達しているが、緻密で堅硬な岩盤である。田子倉ダムでは、図-2に示したように、堤体に4箇所、右岸岩盤に1箇所の計5箇所に地震計を設置して、各3成分、合計15成分の地震観測を実施している。2004年新潟県中越地震の際に観測された地震記録の概要を表-1に示す。新潟県中越地震では、ダム天端(EL+515.00m)で454.9gal、ダム下部(EL+399.00m)で102.5gal、右岸岩盤で126.6galの最大加速度が観測された。10月27日の余震では、ダム天端(EL+515.00m)で600.2gal、ダム下部(EL+399.00m)で116.1gal、右岸岩盤で89.0galの最大加速度が観測された。本震よりも余震の方が最大加速度の値は大きかったが、周波数特性は、余震の方が若干短期成分の多い観測結果であった。

再現解析では、地震波の最大加速度に着目して動的変形特性のフィッティングを行うため、各地震観測点で記録された観測波の周波数範囲を揃えておく必要がある。そのため、再現解析に際しては、観測波の10Hz以上の高周波数成分をカットした地震波を使用した。10Hz以上の高周波数成分をカットした地震波の最大加速度は、表-1の右欄に併記したとおりであり、ダム天端では

300.4gal(原記録:454.9gal), ダム下部では 94.7gal(原記録:02.5gal), 右岸岩盤では 119.9gal(原記録:126.6gal)となった。

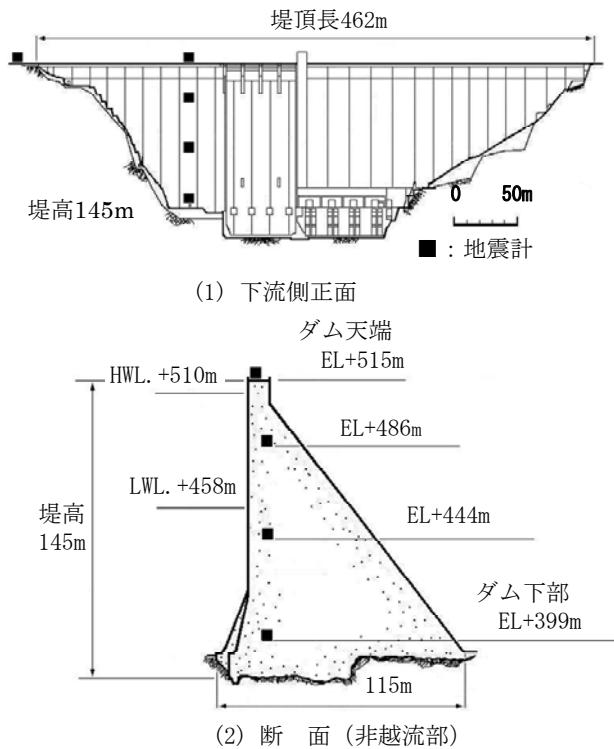


図-2 田子倉ダムの形状と地震計の配置

表-1 新潟県中越地震での田子倉ダムの地震記録概要

地震計位置・振動方向		オリジナル観測波 (gal)	10Hz以上ハイカット波 (gal)
右岸岩盤	上下流方向	80.9	59.0
	ダム軸方向	126.6	119.9
	鉛直方向	62.8	56.1
ダム天端 EL. 515m	上下流方向	454.9	300.4
	ダム軸方向	183.8	95.6
	鉛直方向	219.6	139.7
ダム上部 EL. 486m	上下流方向	143.7	127.7
	ダム軸方向	146.7	81.1
	鉛直方向	122.1	89.3
ダム下部 EL. 399m	上下流方向	89.7	57.8
	ダム軸方向	102.5	94.7
	鉛直方向	79.1	55.4

観測波の代表例として、ダム天端(EL. 515.00m)およびダム下部(EL. 399.00m)で観測されたオリジナルの加速度波をそれぞれ図-3および図-4に示す。右岸岩盤の加速度値がダム下部(EL. 399.00m)の加速度レベルと同等であることが興味深い。ダム底面の堅硬な岩盤では、加速度増幅がほとんど見られない結果になっている。10Hz以上の周波数をハイカットした観測波に関しては、ダム下部に対するダム天端の加速度増幅は、上下流方向成分で約6倍、ダム軸方向成分では約1倍、鉛直方向成分では2~2.5倍程度となった。

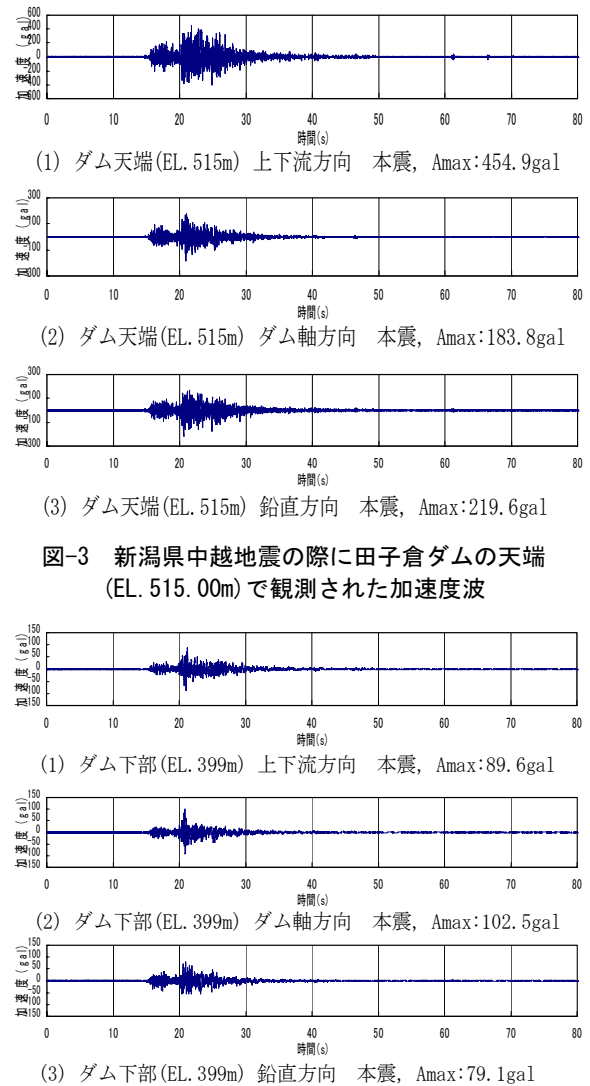


図-3 新潟県中越地震の際に田子倉ダムの天端(EL. 515.00m)で観測された加速度波

図-4 新潟県中越地震の際に田子倉ダムの下部(EL. 399.00m)で観測された加速度波

3. 三次元再現解析

(1) 概要

ダム底部(監査廊等)で観測波が記録されている場合は、ダム底部で観測された地震波を基に再現解析を行うが、田子倉ダムでは、ダム底部に地震計が設置されていない。そのため、ここでは、新しい試みとして、右岸岩盤で記録された観測波を三次元解析モデルの下方基盤での入力波に変換した後に、入力波として使用した。そして、右岸岩盤での応答波が再現されることを前提として、ダム天端(EL. 515.00m)等の地震観測位置の応答波が再現されるように再現解析を行った。動的せん断剛性については、応答波の波形およびスペクトルに着目して、減衰定数については、応答波の波形および最大振幅値に着目して調整・評価した。

(2) 解析モデル

田子倉ダムの再現解析に用いた、ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元動的解析モデルを図-5に示す。ダムと基礎岩盤はソリッド要素でモデル化しており、解析モデルの側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤としている。貯水池は、差分グリッドでモデル化しており、貯水

位は、地震発生時の水位 EL. +507.00m (水深 114m) としている。解析法は、これまでの研究で開発している、「ダム-基礎岩盤-ジョイント-貯水池連成系の三次元的解析法」^{1),2)}を用いた。

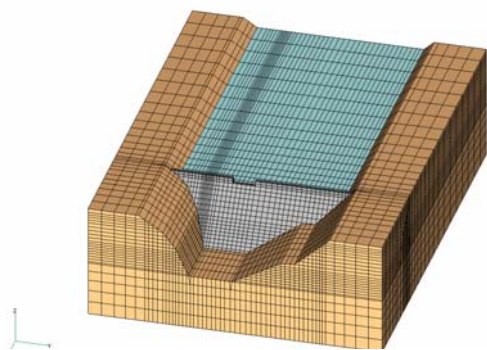


図-5 ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元モデル

(3) 入力波への変換

各観測波の周波数領域を統一した後に、三次元解析モデルの伝達関数を用いて振動成分毎に下方基盤まで引き戻しを行い、再現解析では3成分を同時入力することにより解析を行った。観測波を入力基盤での入力波に変換する基本フローは図-6 に示すとおりである。ここで記載した解析事例では、右岸岩盤の観測波を基に入力波への変換を行っている。

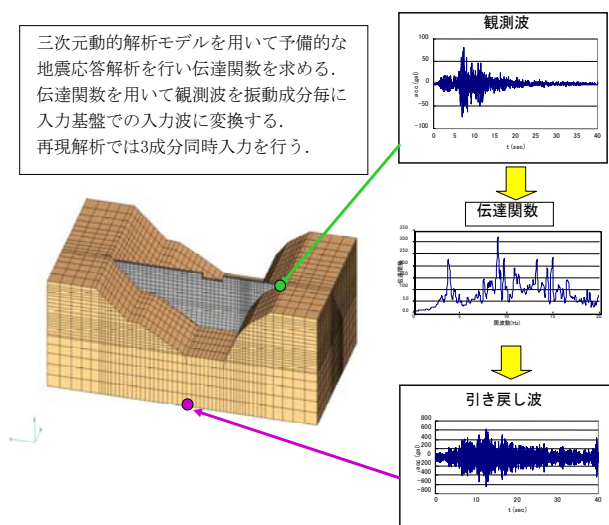


図-6 入力波への変換法

(4) 解析用物性値

田子倉ダムの再現解析で最終的に使用した、動的物性値を表-2 に示す。ダム堤体に関しては、密度 2.4g/cm^3 、ポアソン比 0.2、動的せん断剛性 $9,600\text{N/mm}^2$ (S波速度 1980m/s)、減衰定数 5%とした。密度は、建設当時の試験結果に基づくものであり、ポアソン比は、一般的な数値を設定したものである。基礎岩盤の動的せん断剛性は $8,000\text{N/mm}^2$ (S波速度 1740m/s)、減衰定数 5%とした。動的せん断剛性と減衰定数は、再現解析で調整・評価した結果である。

(5) 解析結果

右岸岩盤の地震観測位置での加速度時刻歴とスペクトルについて、地震観測結果と再現解析結果の比較をそれぞれ図-7 と図-8 に示す。図-7 より、右岸岩盤位置の加

速度時刻歴は良く再現されていることが分かる。図-8 より、スペクトルに関してのも的確に再現されていることが分かる。すなわち、右岸岩盤で観測された地震波を下方基盤に引き戻した後に、入力波として用いた動的解析が意図したとおりに実行できたことが確認できる。

表-2 設定した解析用物性値

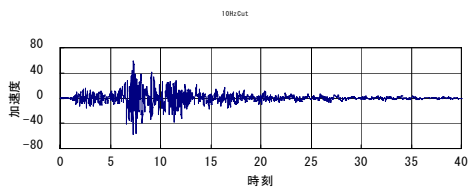
項目	物性値	
	ダム	基礎岩盤
密度 (g/cm^3)	2.4	2.6
動ポアソン比	0.2	0.25
動的せん断剛性 (N/mm^2)	9,600	8,000
S波速度 (m/s)	1980	1740
減衰定数 (%)	5	5

次に、再現解析の主題である、ダム天端の地震観測位置の加速度時刻歴とスペクトルについて、地震観測結果と再現解析結果をそれぞれ図-9 と図-10 に示す。ダム天端に関しては、波形そのものは特異な成分が乗ることもなく良好な結果が得られたが、振幅については、観測結果よりも解析結果が小さい結果となった。図-9 の結果は、ダム堤体の減衰定数を 5%とした場合であるが、再現性の面からは 4%程度の値がダムの減衰定数として適当であると考えられる。本研究で行っている三次元的解析では、基礎岩盤から半無限地盤への波動エネルギーの逸散は粘性境界によって考慮されるので、ここで言う減衰定数は材料減衰(履歴減衰)として解釈される。ダム天端のスペクトルに関しては、図-10 に示したように、観測結果と解析結果に少し相違が生じた。図-10 は、右岸岩盤の観測波を入力基盤の入力波に変換した場合の結果であるが、ダム下部(EL. 399.00m)の観測波を入力波に変換した場合は、観測結果と解析結果の相違が少し改善される結果となった。田子倉ダムの堤体内の地震計配置は、ダム天端(EL. 515.00m)、EL. 486.00m、EL. 444.00m、ダム下部(EL. 399m)の4箇所であるが、ダム中央から右岸側に大きく偏在しているため、ダム固有の振動特性を捕らえにくい位置にあるものと思われる。ダム下部(EL. 399.00m)は、ダム底面(EL. 370.00m)より 29m も標高が高いため、入力波への変換の視点からは、ダム底部以深での地震観測が望ましいと考えられる。

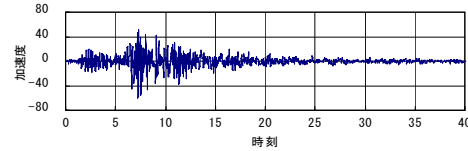
4. 地震記録等に関する課題と考察

(1) 地震観測位置の最適化

これまでに実施してきた既設ダムの三次元再現解析において、糠平ダム¹⁾、新豊根ダム²⁾、池原ダム³⁾では、比較的容易に良い再現性を得ることができたが、田子倉ダムでは、再現性を得ることが比較的難しい結果となった。これについては、田子倉ダムの地震計の配置がダム中央部ではなく右岸側に大きく偏在しているため、ダム固有の地震時挙動特性が観測波に必ずしも十分に反映されていない可能性があるのではないかと考察される。構造物の動的変形特性を的確に評価するためには、構造物の動的応答特性が観測波に最も反映され易い位置で地震観測することが重要である。再現解析のスタートポイントになる地震観測波に関連して、ダム天端での地震観測は天端中央部であること、ダム底部での地震観測はダム底面以深であることが望ましいと考察される。

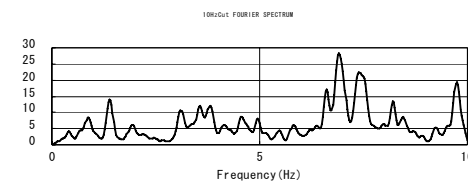


(1) 観測結果 (本震, 右岸岩盤, 上下流方向)

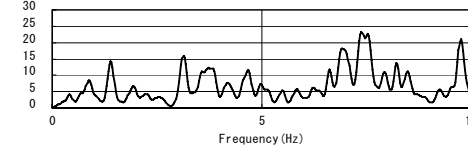


(2) 解析結果 (本震, 右岸岩盤, 上下流方向)

図-7 右岸岩盤の加速度波形の比較

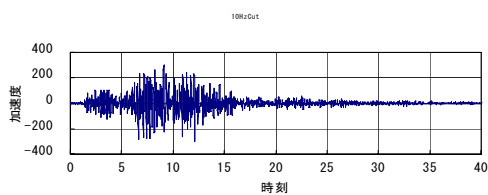


(1) 観測結果 (本震, 右岸岩盤, 上下流方向)

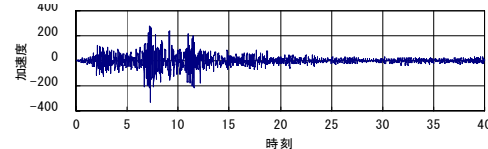


(2) 解析結果 (本震, 右岸岩盤, 上下流方向)

図-8 右岸岩盤のスペクトルの比較

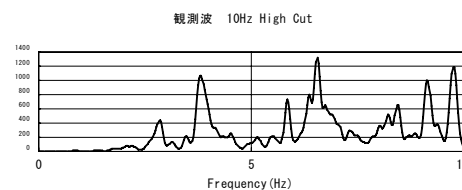


(1) 観測結果 (本震, ダム天端, 上下流方向)

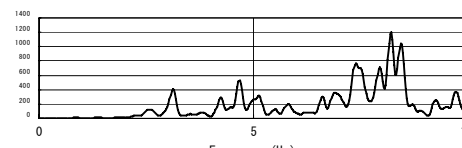


(2) 解析結果 (本震, ダム天端, 上下流方向)

図-9 ダム天端の加速度波の比較



(1) 観測結果 (本震, ダム天端, 上下流方向)



(2) 解析結果 (本震, ダム天端, 上下流方向)

図-10 ダム天端のスペクトルの比較

(2) 構造物の耐震性能を支える基礎地盤

ダム天端で454.9galが観測された2004年新潟県中越地震(M6.8), 600.2galが観測された2004年10月27日余震(M6.1)ともに, 田子倉ダムでは, 地震による損傷や変状は全く発生せず, 地震時の安全性には何の問題も発生しなかった. 新潟県中越地震の被害に関しては, 斜面, 表層地盤, 土構造物等の被害がひとつの特徴として挙げることができるが, 田子倉ダムの再現解析を通じて, 「堅硬な基礎岩盤の上に建設されていること」が構造物の耐震性能の有利性の大きな背景になっていることが認識される. 一般的に, 地震被害は, 力学的要因としては, 地震動と地盤と構造物の相互の係わりによって顕在化すると考えられ, また, 社会的要因としては, 都市施設等の稠密性や複合性, 人的要因(人口や人口密度), 時間的要因(発生季節や発生時刻)等の相互の係わりによって大きく支配されるものと考えられる. 新潟県中越地震では, 不安定なあるいは脆弱な地盤に起因す被害が目立ったように思われるが, 堅硬で良好な基礎地盤の上に構造物を設置することの有利性を活かしていくことが, 将来に向けた地震防災に重要であると思われる. 不安定な斜面の周辺や脆弱な地盤の上には, 人の居住空間や社会的な重要構造物を構えないようにするという, シンプルな基本原則の実践が大切であると考察される.

(3) 歴史的視点からの地震観測の継続性

精度・信頼性の高い性能照査を行うためには, 実地震動データに基づく性能照査技術の実証が必要不可欠である. 大地震は, 100年, 200年といった長期スパンで発生するので, 地震観測についても, 例えば30年実施したから十分というようなことではなく, 100年, 200年といった長期的視点からの継続性の確保が必要である. 地震動データには, 地盤, 構造物の地震時挙動や破壊挙動に関する情報が含まれており, そうした潜在的情報を如何に抽出するか, そして, 地震防災に如何に有効に役立てて行くかが今後の重要な課題である.

5. あとがき

従来, ダムの耐震性に対する配慮は, 建設前の設計段階で考慮されているが, 明治, 大正, 昭和, 平成と, 時代の変遷に伴い, 準拠した耐震設計基準類の内容も変化して来ている. 様々な時代に建設された, 既設ダムに関しては, 地震工学等の進歩に合わせて, 最新の技術レベルで性能照査を行い, 忘れた頃に必ずやって来る大地震がいつ起きてても良いように備えておくことが大切である.

参考文献

- 1) 渡邊啓行, 有賀義明, 曹増延: 三次元動的解析による非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性評価について, 土木学会論文集 No. 696/I-58, pp. 99~110, 2002. 1.
- 2) 有賀義明, 曹増延, 渡邊啓行: 強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究, 土木学会論文集 No. 759/I-67, pp. 53~67, 2004. 4.
- 3) 有賀義明: 既設アーチダムの実地震時挙動に関する再現解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集 I-194, pp. 387~388, 2003. 9