



地震観測記録に基づく既設ダムの地震時挙動の三次元再現解析

有賀義明

正会員 電源開発株式会社 技術開発センター茅ヶ崎研究所上席研究員(副部長), 博(工)
e-mail : yoshiaki_ariga@jpower.co.jp

要約

動的解析の結果は、ダム、基礎地盤、貯水池等のモデル化の方法、設定する動的変形特性の値、使用する解析プログラム等によって変化する。そのため、信頼性の高い耐震性評価を実現するためには、地震時の実際の現象に基づいて、動的解析法の妥当性を検証することが必要不可欠である。既設ダムにおける地震観測によって加速度レベルが大きな地震動データを得ることができれば、観測された地震動データを活用して実ダムの実地震時挙動の再現解析を行うことが可能になり、動的解析法の妥当性を実証することができる。著者は、これまでに、ダムの耐震性評価法の精度・信頼性の向上を図るために、ダム-ジョイント-基礎地盤-貯水池連成系の三次元動的解析法を開発し、そして、開発した三次元動的解析法の妥当性を検証するために既設ダムの実地震時挙動の再現解析を実施して来た。本論文では、2004年新潟県中越地震における田子倉ダムと1995年兵庫県南部地震における池原ダムの実地震時挙動の三次元再現解析の事例を示すとともに、地震観測記録の有効活用の視点から三次元再現解析の有用性について記述する。

キーワード：既設ダム、三次元動的解析、地震観測、性能照査、減衰定数、検証、再現

1. まえがき

水力エネルギーは、貴重な自然エネルギーであり、天然資源の有効活用、地球環境の保全等の観点から重要なエネルギー源である。ダムは、水力発電を支える基盤施設であり、社会的重要性が高い施設である。ダムの地震時安全性に対する社会的要求度は、自然条件や社会条件等、それぞれの国情等に応じて変化するが、4つのプレートが複雑にぶつかり合う地震帯に位置し、国土が狭小なうえに可住地面積が少なく、河川流域の土地利用が高密度に進んだ我が国では、ダムの地震時安全性に対する社会的要求度は大変高いと考えられる。我が国には、高さ15m以上の大ダムが約2800あり、その約半数は、ダム設計基準が明文化された、1957年以前に建設されている。近代的な耐震設計によって建設されたダムは、十分な耐震余裕度を有していると考えられるが、これまでの世界の地震被害事例¹⁾を見ると、大地震の際に重大な被害を受けた事例が報告されている。そのため、将来に向けては地震防災に関する十分な配慮と備えが肝要である。既設ダムでは、建設後の時代が経過すればするほど耐震診断の必要性が増加し、耐震対策の必要性も増大する。

このような必要性を踏まえ、著者は、これまでに、既設ダムの耐震性能照査法の精度・信頼性の向上を図るために、ダム-ジョイント-基礎地盤-貯水池連成系の三次元非線形動的解析法²⁾を開発し、地震観測によって加速度レベルが比較的大きな地震動データが得られた既設ダムを対象に、実地震時挙動の三次元再現解析を実施している。地震観測によって得られた地震動データを活用して、精緻な三次元動的解析によって

既設ダムの実地震時挙動を再現する解析を、ここでは「三次元再現解析」として定義している。三次元再現解析の主眼は、可能な限り現状に忠実な解析条件を設定して三次元動的解析を行うことによって既設ダムの実地震時挙動を再現することである。既設ダムや基礎地盤、貯水池を有限要素法や有限差分法で離散化して三次元再現解析を行う場合、いつも良好な再現性が容易に得られるとは限らず、良好な再現性を得ることができない場合も少なくない。再現性に優れた三次元再現解析が実行できた場合には、地震観測データの妥当性と三次元動的解析の妥当性を同時に実証することができ、その結果として、ダム・基礎地盤の動的変形特性の定量的評価、ダム－基礎地盤－貯水池連成系の三次元動的モデルの同定を行うことができる。筆者は、これまで、地震観測記録の有効活用、実現象に忠実に即した動的解析法の開発の視点から、1993年釧路沖地震における糠平ダム、1994年北海道東方沖地震における屈足ダム、1997年豊橋近傍の地震における新豊根ダム、佐久間ダム等の三次元再現解析を実施して来ているが、ここでは、2004年新潟県中越地震における田子倉ダムと1995年兵庫県南部地震における池原ダムの三次元再現解析の事例し、実地震時挙動の三次元再現解析の必要性と意義について記す。

2. ダムにおける地震観測の目的

地震観測の目的は、対象とする施設や想定する事象に応じて適宜設定されるべきであるが、既設ダムの地震観測の目的を集約した結果を表1に示す。項目1から項目6は、これまでに既に様々な取り組みを実施して来ている事項であるが、今後は、項目7～項目10を重要視している。地震動データには、振幅、周波数特性、位相特性のみならず、地盤や構造物の動的応答特性や地震時の破壊挙動特性に関する情報も含まれているので、地震動データの有効活用には、これらの潜在的情報を如何に抽出して行くかが重要である。通常の波形処理や周波数解析の範疇では、地震動データに含まれる、地盤・構造物の動的応答特性や地震時の破壊挙動特性を抽出することはできない。地震動データから地盤・構造物の動的応答特性や地震時の破壊挙動特性等の情報を抽出するためには、本論文で指摘するように、実地震動データと三次元動的解析法を活用した、実地震時挙動の三次元再現解析が必要不可欠である。なお、ダム地点の地震防災の視点からは、地震直後の迅速な安全確認、地震被害が生じなかった際の安全・安心情報の発信、二次災害が予測される際の警報の発信等が重要になる。既設ダムの地震時安全性に関する説明責任に関しては、大地震時の強震動データを得ることにより、実証データとしての有効活用が可能になる。

表1 地震観測の目的と地震動データの有効活用

地震観測の目的		有効活用の目的
1	既設施設の安全管理	・臨時点検の迅速化、・安全確認の合理化
2	耐震設計の合理化に必要な基礎データの蓄積	・地震波形(微小～大)、・地震活動性
3	地盤－構造物の実地震時挙動の解明	・複数点の同時観測波形
4	地盤－構造物の動的変形～強度特性の定量的評価	・実地震時挙動の三次元再現解析 ・三次元地盤－構造物モデルの同定
5	地震動評価/入力地震動の策定	・距離減衰、・スペクトル特性、・半経験的手法
6	大地震時の耐震性の実証データの収集	・損傷メカニズム、破壊様式と強震動との関連性
7	耐震性能照査技術の実証	・地震動データと三次元解析の連携 ・損傷メカニズム/破壊様式の解明
8	地震防災への有効活用	・緊急地震速報の活用(リアルタイム, ナウキャスト) ・地震動到達前の避難行動、・施設の自動制御
9	説明責任の履行, PA対応	・客観的情報に基づく合理的説明 ・無災害時の安全/安心情報の発信 ・発災時の災害情報/警報の発信
10	地震情報と利活用技術の共有化	・世界への地震動データの提供 ・地震動カタログ等の整備

3. ダム－ジョイント－基礎地盤－貯水池連成系の三次元動的解析法の開発

3.1 精緻な性能照査に求められる要件

我が国では、ダムは震度法に基づいて設計され建設されている³⁾ので、既設ダムの耐震性能の照査に関しては、震度法によって“形状設計”がなされた既設ダムに対して、動的解析によって“耐震性能の照査⁴⁾”を行うことになる。非常に強い地震動に対するダムの耐震性能を精度良く照査するためには、表2にまとめたように、ダムと基礎地盤と貯水池の動的相互作用、解析モデルの境界での波動エネルギーの逸散、引張領域での動的変形特性の非線形特性、ジョイントやクラックでの非連続的挙動等を実現現象に即して正確に解析することが必要である。耐震性能照査では、何ら損傷が生じない段階の照査と地震時損傷が生じた後の段階の照査が必要になる。前者は、構造的な安定性評価の領域であり、基本的に応力評価の範囲で対応可能である。この段階の性能照査の精度を向上させるためには、動的せん断剛性、減衰定数、動的引張強度、動的破壊ひずみ等の定量評価が必要である。後者は、構造的な地震時損傷が発生した後の照査であり、堤体材料の非線形特性、ジョイント面等の非連続的挙動、損傷・破壊後の変位挙動や残留変形量の評価が必要になる。

表2 精緻な耐震性評価に求められる要件

項目	主な内容
解析次数	・三次元動的解析
解析モデル	・ダム～基礎岩盤～貯水池の連成モデル
基礎地盤	・側方境界からの波動エネルギーの逸散
貯水池	・貯水池境界からの波動エネルギーの逸散 ・ダムの地震時応答に対する貯水の制振効果
動的変形特性	・コンクリートダムの引張領域での非線形特性 ・フィルダムの大ひずみ領域での非線形特性
動的強度特性	・地震動に対する地震時引張強度、引張破壊ひずみの定量的評価
非連続的挙動	・コンクリートダムのジョイントでの非連続的挙動 ・地震時に新たに発生したクラックの非連続的挙動 ・フィルダムにおける粒子間の非連続的挙動
塑性変形・残留変形 変位挙動	・塑性変形の定量的評価 ・非連続的挙動により派生する残留変形の定量的評価 ・破壊した後の変位挙動の予測評価
解析法の検証	・実地震動データに基づく再現解析

3.2 開発した三次元非線形動的解析法

(1) ダム－基礎地盤－貯水池連成系の基本解法

ダムの耐震性能を精度良く評価するためには、ダムと基礎地盤との動的相互作用、ダムに対する貯水の振動抑制効果、基礎地盤および貯水池の境界面からの波動エネルギーの逸散、ダムおよび基礎地盤の動的変形特性のひずみ依存性、非常に強い地震動を受けた際のジョイントの非連続的挙動と応力開放効果等を正確に解析することが必要不可欠である。このような必要性から、これらの要件を満足する、ダム－ジョイント－基礎地盤－貯水池連成系の三次元非線形動的解析法（プログラム名 UNIVERSE）を開発した²⁾。

ダム－基礎地盤－貯水池連成系の三次元動的解析の基本解法は、式(1)に示すとおりである。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} M_d & M_{df} \\ M_{fd} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_d \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_d & C_{df} \\ C_{fd} & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_d \\ \dot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_d & K_{df} \\ K_{fd} & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_d \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_w \\ T_e + T_f \end{Bmatrix} & (1.1) \\ \frac{\partial^2 \Phi}{C_0^2 \partial t^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} & (1.2) \\ [M_g] \{\ddot{u}_g\} + [C_g] \{\dot{u}_g\} + [K_g] \{u_g\} = \{T_b\} & (1.3) \end{cases}$$

式 (1.1) は、ダムと基礎地盤の運動方程式、式 (1.2) は、貯水池の波動方程式、式 (1.3) は、自由地盤の運動方程式である。 M 、 C 、 K は、それぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。添字 d 、 df (fd)、 f 、 g は、それぞれダム、ダムと基礎地盤との連結部、基礎地盤、自由地盤を意味する。 u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} は、変位ベクトル、速度ベクトル、加速度ベクトルを表す。 F_w は、貯水の動水圧荷重であり、 T_e と T_f は、それぞれ基礎地盤の底面に作用する地震荷重と自由地盤の運動により基礎地盤の側面に与えられる力である。 T_b は、自由地盤底面に作用する地震荷重である。 Φ は、貯水粒子の運動速度ポテンシャル関数である。 x 、 y 、 z は、デカルト座標であり、 t は時間である。 C_0 は、水中音速 (≈ 1440 m/s) である。 C_f^* は、粘性境界の成分を含み、基礎地盤の減衰マトリックス C_f と粘性境界マトリックス C_b との和 ($C_f^* = C_f + C_b$) である。ここで導入している粘性境界マトリックス C_b は、仮想仕事の原理に基づいて導かれたもの⁵⁾で、従来の粘性境界マトリックス⁶⁾よりエネルギー吸収能が大変向上している。ダムと基礎地盤は有限要素で離散化し、貯水池は差分メッシュで離散化している。基礎地盤については、半無限地盤モデルを用いて基礎地盤の境界面からの波動エネルギーの逸散を考慮している。ジョイントやクラックの非連続的挙動については、三次元接触面要素を用いて、開口（剥離）や滑動を考慮することができる。

ダムと貯水池との動的相互作用については、まず、下方基盤から地震動が入力され、基礎地盤を伝播した地震動によってダムが振動し、次に、ダムの振動に連動してダムに接している貯水に波動が発生し、そして、貯水に発生した波動は上流方向へ伝播するとともに、ダム堤体には波動による動水圧が作用するという手法によって考慮している。ダムと貯水池の連成条件は、式 (2) に示すとおりである。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_d \\ F_w = P_w \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 n は、貯水と堤体の接触面および貯水と基礎地盤の接触面の法線方向を意味し、ダムと貯水池の連続面で水粒子の運動速度 $\partial\Phi/\partial n$ は、ダムの運動速度と等値であり、この連続面での動水圧 P_w は、ダムの外荷重と見なされる。ダムと基礎地盤との連成については、式 (1) によって動的相互作用が考慮され、ダムと貯水池との連成に関しては、ダムに作用する貯水池の動水圧は式 (3) で与えられる。
 ρ_w は、水の密度である。

$$P_w = \rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

基礎地盤に対する自由地盤の影響 T_f は、式 (4) により与えられる。

$$\{T_f\} = [K_b]\{u_g\} + [C_b]\{\dot{u}_g\} \quad (4)$$

ここに、 $[K_b]$ は、基礎地盤の側方境界の剛性マトリックスであり、基礎地盤に対する自由地盤の相対変位の影響を評価するものである。

(2) 波動エネルギーの逸散

基礎地盤の下方境界は、剛基盤、粘性境界の設定が可能である。基礎地盤の側方境界は、粘性境界であり、粘性境界の外側周辺には半無限自由地盤を設定している。貯水池の底面（兩岸の斜面を含む）における波動エネルギーの逸散は、式 (5) で表される。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - C_0 \beta \frac{\partial \Phi}{\partial n_r} = 0 \quad (5)$$

ここに、 β は、境界内外の媒体の波動インピーダンス比であり、 n_r は、境界面法線方向を意味する。

貯水池の長さを水深の3倍として、貯水池の上流端では、境界の内側と外側がともに水であることから $\beta=1$ であり、式 (5) を貯水池の上流端に適用すると、式 (6) に示す粘性境界条件が得られる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -C_0 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (6)$$

ここに、軸 x は、貯水池の上流方向が正であると仮定している。式 (5) および式 (6) に示したように、水の波動エネルギーに関しては、貯水池の底面では波動インピーダンス比の大きさに応じて吸収され、上流端では、完全に吸収される。また、貯水池の水面に関しては、表面波条件を適用している。

(3) ジョイントの非連続的挙動

ジョイントをモデル化するための方法として、図1に示した、三次元接触面要素を適用している。

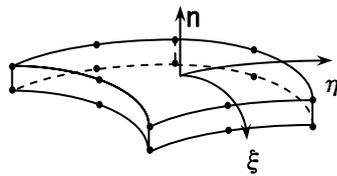
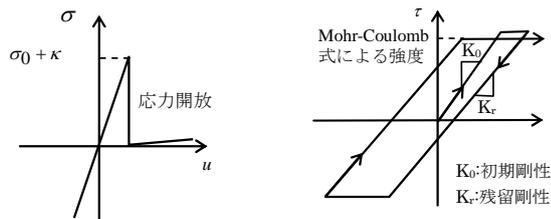


図1 三次元接触面要素



(a) 開口 (剥離) 特性 (b) 滑動特性

図2 三次元接触面要素の力学的特性

三次元接触面要素を用いることにより、任意形状の不連続面に対応することが可能であり、強震時の接触面の開口 (剥離) や滑動の考慮、接触面と貯水池との連成の考慮が可能である。接触面の力学的特性は図2に示すとおりである。いったん非連続的挙動が生じた後の開口 (剥離) 特性と滑動特性については、残留強度特性を考慮している。

(4) 非常に強い地震動に対する耐震性評価を行う際の堤体材料の非線形性

非常に強い地震動が作用した場合、堤体の応力～ひずみ関係には非線形性が現れる。堤体材料の動的せん断剛性および減衰定数の非線形性を考慮する方法として、ここでは、図3に示したようなひずみ依存性を考慮している。ダムコンクリートでは、圧縮側と引張側の強度特性および破壊ひずみレベルは明確に異なるが、弾性係数および粘性係数 (減衰係数) は、圧縮側でも引張側でもほとんど同じであることが室内実験により示されている^{7), 8)}。図4は、载荷速度を速くした一軸引張試験⁷⁾ によって得られた、ダムコンクリートの引張応力～引張軸ひずみ曲線である。これを踏まえ、非常に強い地震動に対する耐震性能を評価する場合には、図3に示したような、引張過程での非線形性を考慮することになっている。

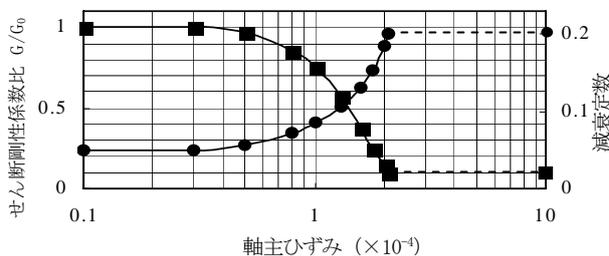


図3 引張過程におけるダムコンクリートの動的せん断剛性および減衰定数の非線形性 (横軸は引張軸ひずみ)

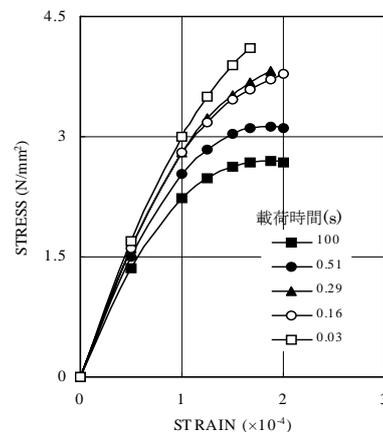


図4 载荷速度を速くした一軸引張試験によって得られたダムコンクリートの引張応力～引張ひずみ関係⁷⁾

なお、ひずみレベルが微小な、初期の動的せん断剛性や減衰定数の値は、個々のダムによって異なるので、ダム毎に評価し設定すべきものである。

4. 実地震時挙動の三次元再現解析の目的と方法

4.1 動的解析法の妥当性の検証の必要性

ダムや基礎地盤の動的変形特性の評価方法には、室内試験、模型実験、現地観測等があるが、室内試験では寸法効果や形状効果の問題が伴い、模型振動実験では相似側の問題が付随する。そして、室内試験や模型実験により評価された動的物性値が、実際の大規模な既設ダム等の動的物性値を正確に反映しているかどうかについての不確実性が伴う。地震観測に関しては、大きな地震動は稀にしか観測されないので、長期間にわたる継続観測が要求される。しかし、地震観測で加速度レベルの大きな地震動データが得られた際には、実地震時挙動の三次元再現解析を行うことが可能になり、その成果として、動的変形特性を定量的に評価することが可能になる。

数値解析法に関しては、解析法の検証を目的として、複数の解析プログラムを用いた比較解析が実施されることが少なからずある。こうした比較解析では、同じ解析モデルと同じ物性値を用いたとしても、使用する解析プログラムによって解析結果が異なることが多く、解析結果が異なった場合には、どれが正解でどれが不正解であるかの判定が困難であることが多い。地震観測によって得られた地震動データをひとつの正解ととらえて実地震時挙動の三次元再現解析を行うことは、動的解析法の妥当性を検証するための必須の方法であると考えられる。特に、世界有数の地震多発国である我が国では、諸外国に比べて地震動データの取得が容易であり、こうした地理的条件を活かして、動的解析法の検証を行うことが必要である。

4.2 三次元再現解析の意義と方法

実地震動データを活用した三次元再現解析と耐震性評価技術の精度・信頼性の向上との関連を図5に示す。実地震時挙動の三次元再現解析の意義・有用性は、その成果として、ダムと基礎岩盤の動的変形特性を定量的に評価することができること、ダム－基礎岩盤－貯水池連成系の三次元動的解析モデルを同定することができること、実現象に基づいて動的解析法の妥当性を検証することができること、地震観測データの妥当性を検証することができること等である。三次元再現解析は、適正な地震観測と精緻な三次元動的解析を連携させることによって可能になるものである。三次元再現解析を行うためには、最低限2箇所の地震動データが必要になる。多点で地震観測を行っている場合は、それらをすべて活用することができる。一般的には、ダム底部とダム天端が代表的な観測点となる場合が多いので、この場合は、ダム底部で観測された地震動

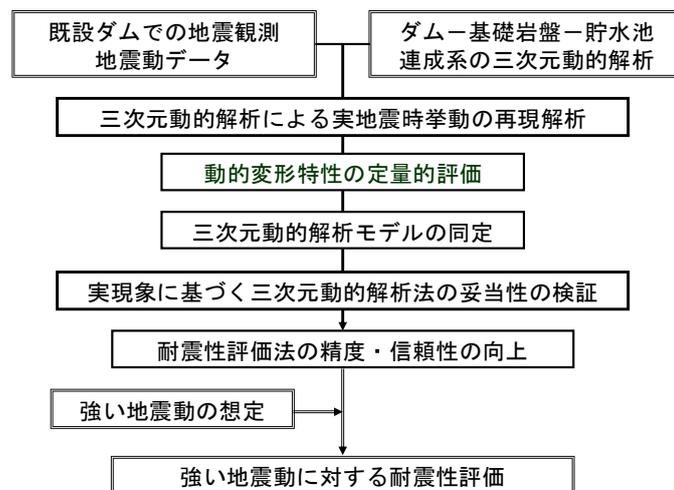


図5 三次元再現解析の効用と耐震性評価の精度・信頼性の向上

を入力地震動として用いてダム天端の地震時挙動が再現されるように三次元再現解析を行う。再現解析では、ダム天端等の地震観測点の加速度時刻歴、およびダム底部に対するダム天端等の伝達関数が観測結果と一致するように、動的せん断剛性や減衰定数を同定する。ダムの一次固有周波数に当たる伝達関数のピーク周波数に着目することにより動的せん断剛性を、加速度時刻歴の最大振幅に着目することにより減衰定数を効率的に同定することが可能である。なお、ダム底部で地震観測を実施していない場合は、次善の方法として、ダム左右岸のアバットメント部等での観測地震動を入力地震動として活用することになる。

4.3 観測された地震動を下方基盤での入力地震動に変換する方法

既設ダムで観測された地震動を三次元再現解析の入力地震動として用いる場合の地震動の引き戻し方法の概念を図6に示す。

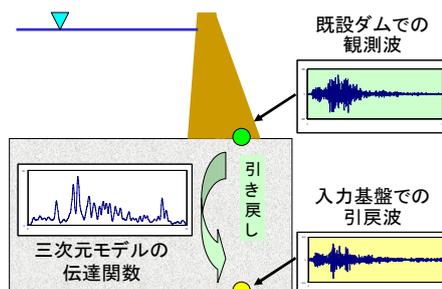


図6 ダムで観測された地震動を下方入力基盤の地震動に変換する方法

例えば、ダム底部で観測された地震動を用いる場合、再現解析の前提条件として、ダム底部で観測された地震動が三次元解析の中で再現されていることが必要である。この前提が満たされた条件下で、ダム天端等の地震動を再現するのが三次元再現解析である。ダム底部で観測された地震動には、既に、ダムと基礎岩盤と貯水池の動的相互作用の影響が含まれていると考えられる。したがって、ダム底部で観測された地震動をそのまま三次元解析モデルの下方基盤の入力地震動として用いた場合は、ダムや基礎岩盤等の動的相互作用の影響が二重に作用することが懸念される。また、一般に多用されている重複反射理論に基づく一次元引き戻し計算では、ダムや基礎岩盤等の動的相互作用の影響を分離することは不可能である。このような理由から、事前検討として、三次元解析モデルのダム底部位置と下方基盤位置との伝達関数を求め、この伝達関数を用いてダム底部で観測された地震動を振動成分ごとに下方基盤まで引き戻す方法を考案し適用している。なお、三次元再現解析では、引き戻した地震動を3成分同時入力として入力している。

三次元再現解析で解析対象とする周波数域は、通常は0~30Hzとしているが、地震観測点の局所的な地震時応答の影響があると考えられる場合は、0~10Hz等に変更することが必要である。堅硬な岩盤の表面や地下の監査廊に地震計が設置されている場合は、地震計設置場所の周辺の局所的な地震時応答が影響を及ぼすことは少ないと考えられるが、ダム天端等において、例えば、付帯施設のスラブの上やピアの横に地震計が設置されているような場合には、観測された地震動にスラブやピアや鋼製構造物等の地震時応答が含まれることがある。コンクリートダムの固有振動数は、一般に2Hzから6Hz程度であるが、付帯施設等の影響によって生じる周波数は大雑把に15Hzから90Hzの周波数域に分布する場合が多い。付帯施設等の地震時応答の影響を多く含んでいる、観測地震動をそのまま用いてダム天端の揺れを再現した場合には、ダム堤体の応答を真の現象よりも過大評価することになり、結果的には、減衰定数の値を真の値よりも小さく評価してしまう結果となる。このような不正確さを回避するためには、ダム底部、ダム天端等の、全ての地震観測点に関して解析対象とする周波数域を事前に統一しておくことが必要である。

5. 既設コンクリートダムの実地震時挙動の三次元再現解析事例

実地震時挙動の三次元再現解析として、これまでに、1987 紀伊半島南東沖の地震時の池原ダム⁹⁾、1993 年 釧路沖地震時の糠平ダム¹⁰⁾、1997 年豊橋近傍地震時の新豊根ダム¹¹⁾、1995 年兵庫県南部地震時の池原ダム¹²⁾、

2004年新潟県中越地震時の田子倉ダム¹³⁾等の解析を実施している。本論文では、田子倉ダム(1997年豊橋近傍地震時)と池原ダム(1995年兵庫県南部地震時)の検討事例を記載する。

5.1 2004年新潟県中越地震時の田子倉ダムの三次元再現解析

(1) 田子倉ダムにおける地震観測

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 m^3 のコンクリート重力式ダムである。基礎岩盤は、主として石英粗面岩により構成され部分的に凝灰岩、火山礫凝灰岩が分布している。田子倉ダムでは、**図7**に示したように、堤体4箇所、右岸岩盤1箇所の計5箇所合計15台の地震計を設置して地震観測を実施している。

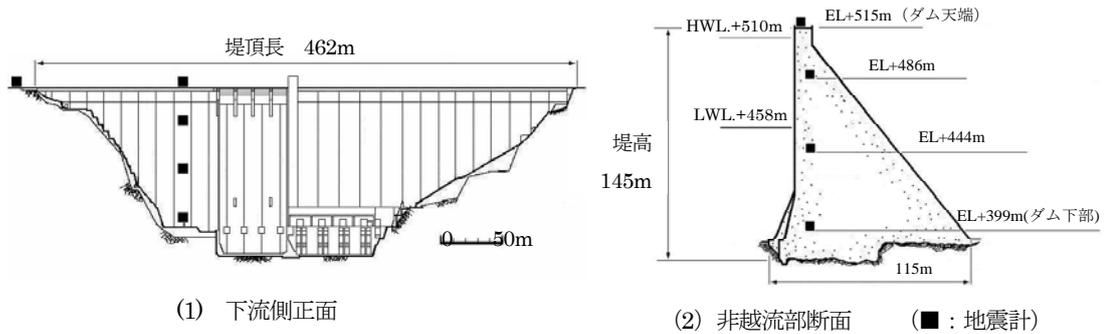


図7 田子倉ダムの形状と地震計の配置

新潟県中越地震(2004.10/23, M6.8, 震央距離37km)では、右岸岩盤で水平上下流方向80.9gal, 水平ダム軸方向126.6gal, 鉛直方向の62.8gal, ダム天端で水平上下流方向454.9gal, 水平ダム軸方向183.8gal, 鉛直方向219.6gal, ダム下部(EL+399m)で水平上下流方向89.7gal, 水平ダム軸方向102.5gal, 鉛直方向79.1galの加速度波が記録された。伝達関数(ダム天端/ダム下部)から評価した, ダムの1次固有振動数は3.9Hzであった。なお, 堤体の変状は, 何ら生じなかった。

(2) 三次元解析モデル

田子倉ダムの三次元解析モデルを**図8**に示す。解析モデルの側方境界は粘性境界, 下方基盤は剛基盤としている。貯水池の水位は, 地震発生時のEL+507m(水深114m)とした。

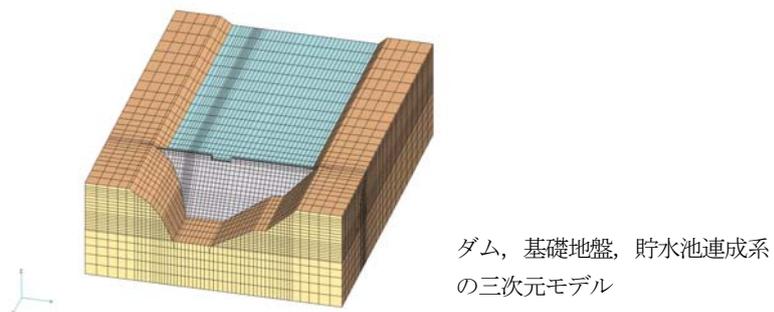
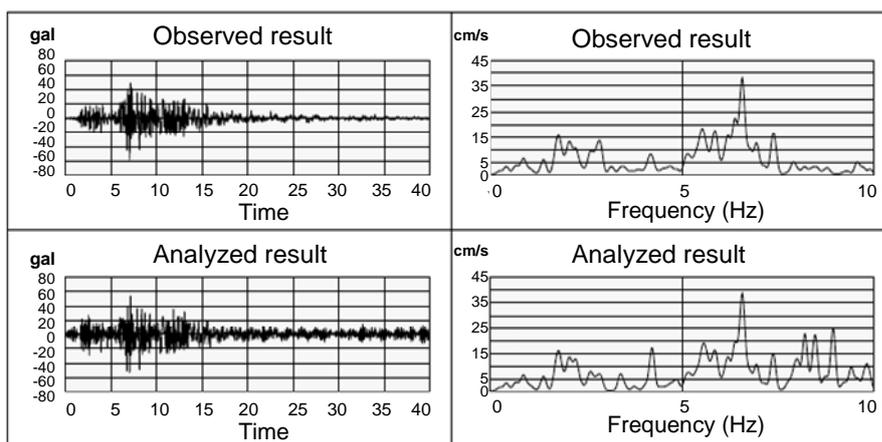


図8 田子倉ダムの三次元動的解析モデル

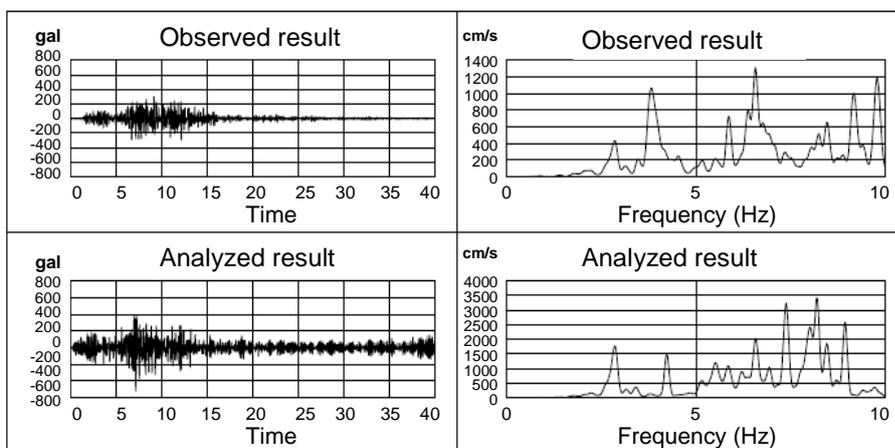
(3) 再現解析結果

三次元再現解析により同定した, 田子倉ダムの動的せん断剛性および減衰定数を**表3**に示す。ダム下部(EL.+399m)とダム天端について, 加速度波形及びフーリエスペクトルに関する地震観測結果と再現解析結果の比較をそれぞれ**図9**と**図10**に示す。ダム下部(EL.+399m)に関しては, 波形, スペクトルともに良好な再現性を得ることができた。ダム天端に関しては, 観測結果に比して解析結果では, 加速度振幅が小さい結果となった。この再現解析では, 解析対象周波数は0~10Hzとした。



(1)ダム下部(EL.+399m)の加速度波形 (2)ダム下部(EL.+399m)のフーリエスペクトル

図9 ダム下部(EL.+399m)の加速度波形とスペクトルに関する観測結果と解析結果の比較



(1)ダム天端の加速度波形 (2)ダム天端のフーリエスペクトル

図10 ダム天端の加速度波形とスペクトルに関する観測結果と解析結果の比較

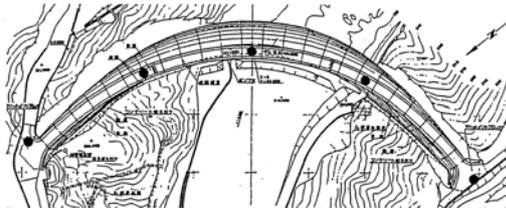
表3 再現解析により同定した田子倉ダムの動的物性値

対象	密度	ポアソン比	動的せん断剛性	S波速度	減衰定数
ダム	2.4 g/cm ³	0.20	9600 N/mm ²	1980 m/s	5.0%
基礎地盤	2.6 g/cm ³	0.25	8000 N/mm ²	1740 m/s	5.0%

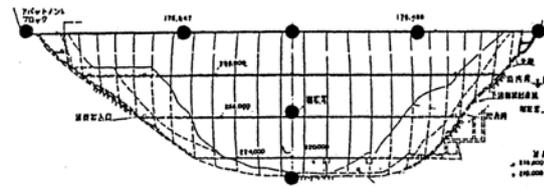
5.2 1995年兵庫県南部地震における池原ダムの三次元再現解析事例

(1) 池原ダムにおける地震観測

池原ダムは、高さ111m、堤頂長460m、堤体積64万m³のアーチダムである。基礎岩盤は、中世層と砂岩粘板岩の互層で構成され、貫入岩による珪化作用を受けて硬質の岩盤となっている。池原ダムでは、1964年の竣工以来、図11に示したように7箇所、計13成分(左岸、右岸、ダム底部:3成分。他の4ヶ所:放射方向1成分)の地震観測を実施している。1995年の兵庫県南部地震では、震源から106km離れた池原ダムで最大加速度82.3galの地震動が観測された。兵庫県南部地震(1995.1/17, M7.2)では、ダム底部監査廊で最大加速度11.6gal、ダム天端中央で82.3galの地震動が観測された。ダムの1次固有振動数は2.8Hzである。



(1) 平面



(2) 下流側正面 (●:地震計)

図11 池原ダムの形状と地震計の配置

(2) 三次元解析モデル

池原ダムと基礎岩盤—貯水池の連成モデルを図12に示す。側方境界は粘性境界，下方基盤は剛基盤としており，貯水池の水深は，地震発生時と同じ93.77mとした。

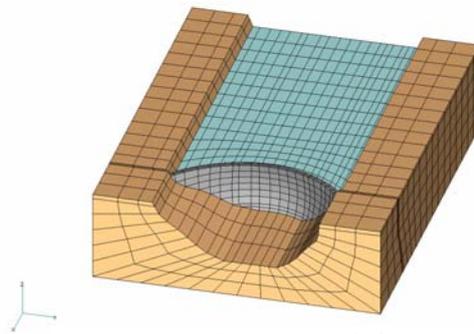
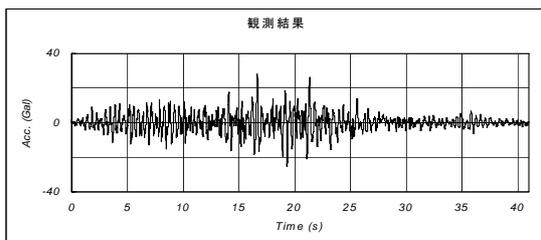


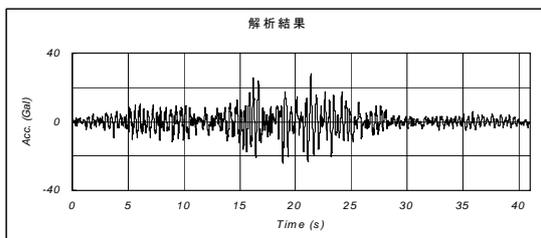
図12 池原ダムの三次元解析モデル

(3) 再現解析結果

兵庫県南部地震時の三次元再現解析により評価した，池原ダムの動的せん断剛性および減衰定数を表4に示す。また，ダム天端中央の加速度時刻歴に関する観測結果と解析結果の比較を図13に示す。最大加速度振幅に関しては，観測結果が82.3galであるのに対して，解析結果は77.2galであり，やや小さい結果となったが，伝達関数に関しては，2.8Hzのピークを再現することができた。



(1) 地震観測結果 (放射方向)



(2) 再現解析結果 (放射方向)

図13 ダム天端中央の加速度波形の比較

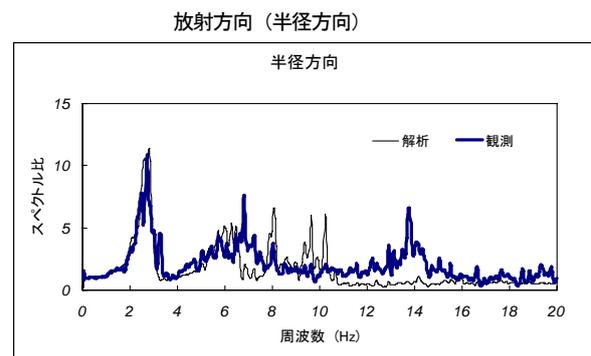


図14 ダム底部に対するダム天端中央の伝達関数に関する地震観測結果と再現解析結果の比較

表4 再現解析により評価した池原ダムの動的物性値

対象	密度	ポアソン比	動的せん断剛性	S波速度	減衰定数
ダム	2.30 g/cm ³	0.20	13500 N/mm ²	2400 m/s	2.9%
基礎地盤	2.55 g/cm ³	0.25	11700 N/mm ²	2120 m/s	4.0%

5.3 三次元再現解析の結果

実地震時挙動の三次元再現解析によって同定された、田子倉ダムと池原ダムの動的変形特性の値を表5に示す。同定したダム堤体の動的せん断剛性は、田子倉ダム9600N/mm²、池原ダム13500N/mm²、減衰定数は、田子倉ダム5%、池原ダム2.9%(主要動についての値)であった。基礎岩盤および貯水池の境界からの波動エネルギーの逸散は、三次元動的解析の中で自然に考慮されている⁴⁾ので、ここで言う減衰定数は、材料減衰(履歴減衰)を意味する。田子倉ダムでは、地震動の全時間を通じて一定の減衰定数を設定した。池原ダムでは、地震動の区間毎に減衰定数の値を変化させる方法を取り、0-13秒間は2.6%、13-20秒間は2.9%、20-41秒間か3.1%とした。この方法は、再現解析の再現性を向上させるためのひとつの方法として考えたものであるが、今後、減衰定数と周波数との関連性について検討する予定である。再現解析の解析対象とする周波数領域は、通常0~30Hzとしているが、田子倉ダムと池原ダムの事例では周波数領域を0~10Hzとした。こうすることによって、ダムの固有振動特性をより限定的に解析することが可能になり、その結果として、再現性を向上させることができた。田子倉ダムと池原ダムの一次の固有周波数は、それぞれ3.9Hzと2.8Hzであるが、解析対象とするダムの固有振動数を考慮して、着目すべき周波数帯域を絞り込むことが、良い再現性を得るために効果的である。これまでに実施した、田子倉ダム、池原ダム等の三次元再現解析結果によって、著者が開発した、ダム-基礎地盤-貯水池連成系の三次元動的解析法が、実ダムの実地震時挙動を良好に解析することを確認した。すなわち、実地震動挙動を良好に再現することができたことにより、ダム-基礎地盤-貯水池連成系の三次元動的解析法の実用性と妥当性を検証することができた。

表5 三次元再現解析による既設コンクリートダムの動的変形特性の評価結果

ダム形式		重力式ダム	アーチダム
ダム名		田子倉	池原
再現解析の対象地震		2004. 10. 23	1995. 1. 17
		新潟県中越地震 M6. 8, △37km	兵庫県南部地震 M7. 2, △106km
ダム堤体	密度 (g/cm ³)	2.4	2.3
	動的せん断剛性 (N/mm ²)	9600	13500
	S波速度 (m/s)	1980	2400
	減衰定数 (%)	5.0	2.9
	ダム天端の最大加速度 (gal)	454.9	82.3
	ダム底部の最大加速度 (gal)	102.5	11.6
	固有振動数 (Hz)	3.9	2.8
	諸元	堤高 (m)	145
堤頂長 (m)		462	460
堤体積 (10 ⁴ m ³)		195	64
基礎岩盤	密度 (g/cm ³)	2.6	2.55
	動的せん断剛性 (N/mm ²)	8000	11700
	S波速度 (m/s)	1740	2120
	減衰定数 (%)	5.0	4.0

6. 結論

精度・信頼性の高い耐震性評価法を確立するためには、実際の現象に即して、動的解析法の妥当性を検証することが必要不可欠である。実地震時挙動の再現解析は、地震観測記録と動的解析法の双方を有効活用することによって可能になるものであり、動的解析法の実証方法として大変有効である。

地震観測によって加速度レベルが比較的大きな地震動が得られた場合には、実地震時挙動の三次元再現解析を行うことが有意義である。実地震時挙動の三次元再現解析は、動的変形特性の定量的評価、ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元解析モデルの同定、三次元動的解析法の妥当性の検証、地震観測データの妥当性の検証に必要かつ有効である。なお、地震時の損傷や破壊が発生した際の地震動が得られた場合には、地震時損傷・破壊の再現解析によって動的強度特性の定量的評価が可能になる。

再現解析を行うためには、少なくとも2箇所での地震動データ（1箇所は観測地震動の入力のため、1箇所は再現性の同定のため）が必要である。多数の観測点で地震観測を行っている場合は、全観測点を対象に再現解析を実施したが、ダム天端では、ダム固有の振動特性が最も反映されることが多いため、結果的には、ダム底部とダム天端の伝達関数に着目することによってダムの動的せん断剛性を、ダム天端の加速度時刻歴に着目することによってダムの減衰定数を簡便に効率的に同定することが可能である。

ダム底部で観測された地震動を入力地震動として用い、堤体の各観測点での地震動を再現する場合、再現解析の前提条件として、三次元再現解析の際にダム底部で観測された地震動が再現されていることが必要になる。ダム底部で観測された地震動には、ダムと基礎岩盤と貯水池の動的相互作用の影響が既に含まれていると考えられるため、観測された地震動をそのまま三次元解析モデルの下方基盤から入力したのでは、適正な再現解析を行うことができない。この理由から、三次元解析モデルにおけるダム底部位置と下方基盤位置の伝達関数を用いて、ダム底部で観測された地震動を下方基盤の入力地震動に変換する方法を考案し適用した。この方法は、実地震挙動の再現解析を実施する際に必要であり大変有効である。

本論文で示した再現解析事例は、それぞれのダム地点で約45年間に及ぶこれまでの地震観測の中で最も加速度レベルが大きい地震動を選択して実施したものであるが、いずれも動的変形特性の非線形効果が生じるレベルではなく、線形解析の範囲であった。非線形効果が現れるような非常に大きな加速度時刻歴が観測された場合には、動的変形特性の非線形特性の定量的評価も可能である。

地震時の実現象を忠実に再現しようとした場合、二次元解析では、基本的に、面外方向（奥行方向）の波動エネルギーの逸散、ダムや基礎岩盤の三次元性等を考慮することができないため、二次元解析で妥当な再現解析を実行することは不可能である⁹⁾。実現象に即した再現解析を実行するためには、三次元動的解析による再現解析が必要である。

著者らが開発した、ダム-ジョイント-基礎地盤-貯水池連成系の三次元動的解析法は、実ダムの実地震時挙動の三次元再現解析に大変有効である。

ダムの減衰定数について、地震動の区間に応じてその値が変化する可能性があることを指摘したが、既設ダムの減衰定数と初期微動、主要動、コーダ波等との関連、すなわち減衰定数の周波数依存性については、今後の課題として研究する予定である。

7. あとがき

実ダムの実地震時挙動の再現解析は、三次元動的解析法の妥当性を実証するために必要なプロセスである。ダムは、地点依存性が強い構造物であるため、既設ダムの動的変形特性の定量的評価に関しては、再現解析事例の蓄積が必要であり、今後も、比較的大きな地震動データが得られた際には、再現解析の積み重ねを行う予定である。地震動データは、精度・信頼性の高い性能照査技術を確立して行くために必須の情報であり、潜在的価値が高い。その潜在的価値を顕在化させるためには、実地震動データを用いた地盤-構造物系の三次元再現解析が有効である。地震動データは、地震防災に役立ってこそはじめて、その真価が活かされるものなので、地震動データの工学的活用、地震防災への実践的活用の推進が大切である。なお、大地震は100年や200年といった長期スパンで発生するので、地震観測も100年、200年といった歴史的視点からの継続性の確保が必要である。

謝辞

ダム-ジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元動的解析法の開発においては、故渡邊啓行教授(埼玉大学)に多大なるご指導をいただきました。記して深謝の意を表します。また、解析ラン作業に際しては、(株)JPビジネスサービス浅賀裕之氏、依田昌宏氏のご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) International Congress on Large Dams: Historic performance of dams during earthquakes, Design features of dams to resist seismic ground motion (Guidelines and case studies), Bulletin 120, 2001
- 2) 有賀義明：三次元再現解析によるダムの動的変形特性の定量的評価に関する研究，埼玉大学学位論文，2001. 3
- 3) 河川管理施設等構造令（政令 1976. 7. 20）及び同施行規則（省令 1976. 10. 1）
- 4) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)，2005. 3
- 5) 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. 395-404，1989
- 6) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L.: Finite dynamic model for infinite media, Proc. of ASCE, EM4, pp. 859-877, 1969
- 7) 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，No. 153，pp. 31-39，1968
- 8) 畑野正，中川友康：アーチダムの震動解析，土木学会論文報告集，No. 207，pp. 37-46，1972
- 9) Ariga Y.: Three-dimensional dynamic simulation analysis of existing arch dam, 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 4617-4622, 1992
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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 回年次学術講演会講演概要集 I -194，pp. 387-388，2003. 9
- 13) 有賀義明：新潟県中越地震における既設コンクリート重力式ダムの三次元動的解析，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集 I -621，2005. 9

(受理：2006年4月5日)

(掲載決定：2007年2月19日)

3-D Reproduction Analyses for Actual Earthquake Behaviors of Existing Dams based on Earthquake Observation Records

Yoshiaki ARIGA

Member, Principal Senior Researcher, Electric Power Development Co. Ltd., Dr. Eng.

yoshiaki_ariga@jpower.co.jp

ABSTRACT

Results evaluated by dynamic analysis method will be changed according to the analytical models for coupled dam-foundation-reservoir system, the values of dynamic deformation properties of dam and foundation, the dynamic analysis program used, and so forth. Therefore, in order to realize a reliable evaluation for earthquake safety of existing dams, it is necessary to verify a validity of dynamic analysis procedure. If the actual earthquake motions are obtained by the seismological observations at existing dams, it becomes possible to make the reproduction analyses for actual earthquake behaviors of existing dams, and to prove an efficiency of dynamic analysis procedure based on the real

earthquake phenomena. In order to establish an accurate and reliable evaluation for seismic safety of dams, I have developed a 3-D dynamic analysis method for coupled dam-joint-foundation-reservoir system, thus far. And I have been making the 3-D reproduction analyses for the actual earthquake behaviors of several existing dams. In this paper, the 3-D reproduction analyses in regard to the Tagokura Dam during the 2004 Niigataken-chuetsu Earthquake and the Ikehara Dam during the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake were described. And an efficiency and a meaning of the 3-D reproduction analyses was considered from the viewpoint of an effective utilization of earthquake observation data.

Key Words: Existing Dams, 3D Dynamic Analysis, Earthquake Observation, Seismic Safety, Damping Factor, Verification, Reproduction