

# 緊急地震速報を活用した既設ダムの 地震時安全性の即時的評価に関する研究

有賀義明<sup>1</sup>・藤縄幸雄<sup>2</sup>・川上則明<sup>3</sup>・大角恒雄<sup>4</sup>・西野哉誉<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 博(工) 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)  
(〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

E-mail:yoshiaki\_ariga@jpower.co.jp

<sup>2</sup> 理博 NPO 法人リアルタイム地震情報利用協議会専務理事 (〒160-0004 東京都新宿区四谷 2-14-4)  
E-mail:fujinawa@real-time.jp

<sup>3</sup> NPO 法人リアルタイム地震情報利用協議会研究部 (〒160-0004 東京都新宿区四谷 2-14-4)  
E-mail:kawakami@real-time.jp

<sup>4</sup> 博(工) 日本工営株式会社中央研究所開発研究部 (〒300-1259 茨城県稲敷郡茎崎町稲荷原 2304)  
E-mail:a3850@n-koei.co.jp

<sup>5</sup> NPO 法人リアルタイム地震情報利用協議会研究部 (〒160-0004 東京都新宿区四谷 2-14-4)  
E-mail:nishino@real-time.jp

大地震時のダムの安全管理は、大変重要な技術事項である。我が国では、兵庫県南部地震以降、文部科学省、防災科学技術研究所、気象庁等の地震観測網が高密度に整備され、地震発生時に震源から少し離れた地点では、地震動が到達する前に緊急地震速報を受信することが可能になりつつある。また、数値解析技術の進歩に伴い、地盤・構造物系の三次元動的解析を高精度で行えるようになってきている。こうした背景から、本研究では、既設ダム等の安全管理の効率化、地震防災性能の向上等に役立てるために、三次元動的解析技術と緊急地震速報を有機的に連携させることによって大地震時の既設ダムの安全性を即時的に評価する手法を開発した。

**Key Word :** existing dam, real-time, earthquake safety, 3D dynamic analysis, early earthquake warning

## 1. まえがき

現在、我が国では、防災科学技術研究所の K-NET、Hi-net/KiK-net、気象庁の強震観測網等、地震観測網が高密度に整備され、地震情報が速やかに収集・分析・活用されるようになりつつある。高密度に配置された地震観測網で地震の P 波を感知してから 3～4 秒程度の時間で地震のマグニチュードと震源位置を決定する技術が開発され、震源から離れた地域に対しては、地震動の到達前に緊急地震速報が配信されることが可能になりつつある。我が国では、リアルタイム地震情報システムが既に実用に供されるようになりつつあるが、既設ダムの保守管理に関しては、これまで、地震が発生した際に、揺れて初めて地震の発生を知り、揺れが収まってからどの程度の震度であったのかを確認し、所定以上の震度であることが判明した場合にはダムの臨時点検を実施して地震時安全性の確認をしているのが通例である。地震防災技術の進歩発展に伴い、これからは、地震動の到達前に地震の発生を知り、人的被害の抑止・

低減を図るとともに、臨時点検の必要性や優先的に点検すべき部位を地震動の到達前に把握すること等ができるものと期待される。既設ダムでは、地震時の安全管理や耐震性能照査技術の高度化に活用するために、主要な地点で地震観測が実施されており、既設ダムで得られた地震観測データの有効活用も図られつつある。

一方、数値解析技術の進歩に伴い、現在では、ダム・基礎岩盤・貯水池連成系の三次元動的解析技術が実用化されており、非常に強い地震動に対するダムの耐震性能の照査が可能になりつつある。津波の分野では、既にリアルタイムで津波の数値予測<sup>1)</sup>が行われるようになりつつあり、巨大地震発生時の津波防災に活用されるようになりつつある。

このような背景から、本研究では、緊急地震速報と三次元動的解析技術を有機的に連携させることにより、既設ダムの地震時安全性を即時的に評価判定する手法を開発した。将来的には、高性能のスーパーコンピュータを利用して、緊急地震速報を受信してからリアルタイムで地盤・構造物系の三次元動的

解析を実施することも想定しているが、現状で一般的なコンピュータを利用する場合は、三次元動的解析には長時間を要するので、緊急地震速報を受信してリアルタイムで三次元動的解析を実行する手法は、未だ時期尚早と思われる。そこで、平時の備えとして、想定地震動等に関する解析条件をさまざまに設定した三次元動的解析を実施しておき、三次元動的解析結果や過去の地震被害事例等を集約してシステム化しておくことにより、大地震発生時にダムの安全性を即時的に評価し緊急時のリアルタイム対応を可能にするための方法を開発した。

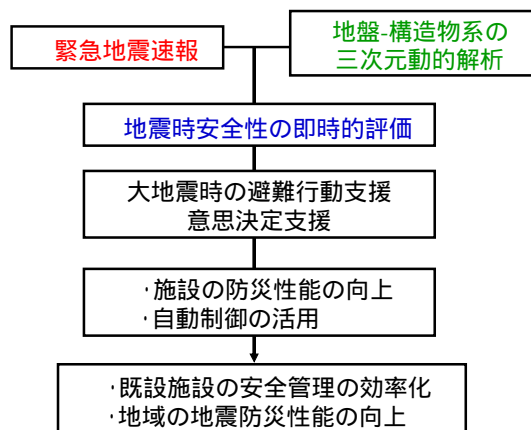


図-1 緊急地震速報と三次元動的解析を複合的に活用した地震時安全性の即時的評価の目的

## 2. 研究目的

非常に大きな地震が発生した際の既設ダムの安全管理の合理化、ダム・電力設備等の地震防災性能の向上、安全・安心情報の発信等に役立てることを目的に、緊急地震速報を活用して、地震動の到達前に既設ダムの地震時安全性を即時的に評価する方法について研究した。本研究の最大の主眼は、震度や震度といった大地震時の人的被害の抑止・低減、重要構造物の安全管理と防災性能の向上にある。ダムに関しては、震度以上の揺れがあった場合に臨時点検を実施するように定められているので<sup>2)</sup>、日常的には、こうした臨時点検の効率化、平時の防災訓練・教育に役立てることも至近の目的としている。

## 3. 既設ダムの地震時損傷

過去に大地震を経験した既設ダムの事例としては、国内では1891年の濃尾地震以降、米国では1906年のSan Francisco地震以降に報告事例がある<sup>3)</sup>。

コンクリートダムに関しては、地震時に決壊した事例としては、ダム底部の断層変位によって決壊した石岡ダム(台湾、コンクリート重力式ダム:堤高25m,台湾集集地震:1999,M7.7)が有名であるが、地

震動によって決壊した事例は報告されていない。決壊には至らなかったが、貯水機能に損傷が生じた事例としては、Koyna ダム(インド、コンクリート重力式ダム:堤高103m,Koyna 地震:1967,M6.5)、豊稔池ダム(日本、マルチプルアーチダム:堤高32.3m,南海地震:1946,M8.0)、Pacoima ダム(米国、アーチダム:堤高113m,San Fernando 地震:1971,M6.6)がある。

フィルダムに関しては、貯水機能が損なわれた被害事例としては、Sheffield ダム(米国、アースフィルダム:堤高8m,Santa Barbara 地震:1925,M6.2)、Lower San Fernando ダム(米国、アースフィルダム:堤高12m,San Fernando 地震:1971,M6.5)、Van Norman ダム(米国、アースフィルダム:堤高43m,Santa Barbara 地震:1925,M6.2)、大野ダム(日本、アースフィルダム:堤高37.3m,関東地震:1923,M7.9)、丹羽生嶺ダム(日本、アースフィルダム:堤高15m,1927年竣工,北海道南西沖地震:1993,M7.8)等の事例がある。古い小規模なアースフィルダムに地震被害が報告されている。

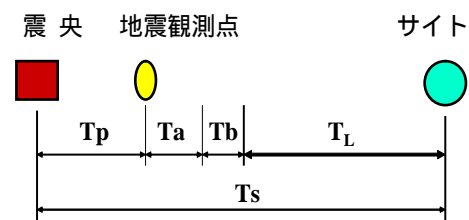
これらの既設ダムの地震被害事例を集約してみると、コンクリートダムではクラックが発生する損傷、フィルダムでは沈下や残留変形が発生する損傷が、主要な地震時損傷形態であることが分かる。これらの過去の地震被害事例は、非常に強い地震動を受けた場合には、ダムが地震被害を受ける可能性があることを示すものであり、堤体に地震損傷が発生することが想定される場合には、二次災害の派生が無いことを照査・確認することが必要であることを示すものと考えられる。

## 4. 緊急地震速報

現在、防災科学技術研究所では、K-NETとして約1030地点、Hi-net/KiK-netとして約670地点で地震観測を行っている。気象庁では、約600地点で強震観測を行っており、計約3600地点で震度観測を行っている。こうした高密度な地震観測網を活用して、防災科学技術研究所、気象庁では、それぞれ、地震発生直後に、地震のP波の観測データから緊急に震源情報(マグニチュード、東経・北緯、震源深さ)を決定する技術を実用化している。

地震発生直後の緊急に評価された地震情報は、従来、防災科学技術研究所ではリアルタイム地震情報と呼ばれており、気象庁ではナウキャスト地震情報と呼ばれていたが、2004年2月に用語が統一され“緊急地震速報”と呼ばれている。緊急地震速報を活用することにより、震源から少し離れた地域に対しては、地震動が到達する前に地震動の到達時刻と地震動強さ(震度あるいは最大加速度等)を配信することが可能であり、地震動到達までの余裕時間を地震防災に有効に役立てることが期待できる。地震動の伝播時間と地震動到達前の余裕時間に関する基本概念は図-1に示すとおりである。大きな流れとしては、まず、震源に近い地震観測網でP波が検

$$T_L = T_s - (T_a + T_b) - T_p \quad (1)$$



ここに、

$T_L$ : S波(主要動)到達前の余裕時間.  
 $T_p$ : 震央から地震観測点までのP波の伝播時間  
 $T_s$ : 震央からサイトまでのS波(主要動)の伝播時間  
 $T_a$ : 緊急地震速報の評価に必要な時間 (3~4sec.)  
 $T_b$ : 情報伝達に必要な時間 (1~2sec.)

図-2 地震動到達前の余裕時間の概念

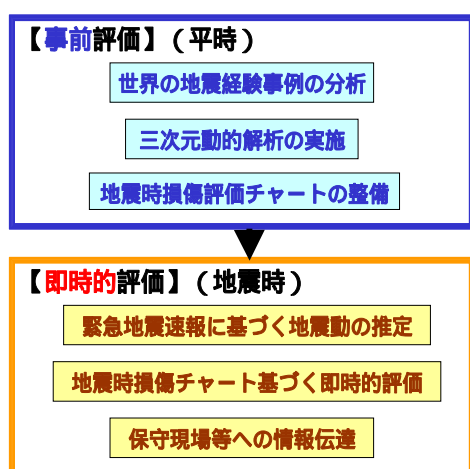


図-3 平時の事前評価と地震時の即時的评价

知されてから概ね 3~4 秒以内に緊急に震源情報(マグニチュード, 震源位置)が評価される。緊急地震速報の評価は, 防災科学技術研究所および気象庁の方法によって行われる。気象庁から緊急地震速報が配信される。緊急地震速報を活用して, これから地震動が伝播して行く地点の地震動到達時刻と地震動強さを予測する。地震動の到達前に地震動到達時刻と予測地震動強さを配信・受信する。地震動到達までの余裕時間を緊急避難や設備の自動制御等に活用する。

直下地震の場合は, 余裕時間はほとんど期待できないが, 海溝型の巨大地震の場合は, 余裕時間は数秒から数十秒を期待することができる。巨大地震の際の長周期地震動に対しては, 更に長い余裕時間を期待することができる。

## 5. 地震時安全性の即時的评价の方法

### (1) 基本的フロー

地震時安全性の即時的评价の基本的手順を図-3 と図-4 に示す。図-3 に示したように, 本研究で開発し

た方法は, 大きく, 平時の事前評価と地震時の即時的评价の 2 つのステップによって構成されている。前者は, 過去の世界の地震被害事例の集約, 様々な条件下で実施した三次元的解析の実施, 想定地震動に対する即時的评价用チャートの整備によって構成されている。後者は, 緊急地震速報に基づく評価対象地点の地震動の推定, 即時的评价用チャートに基づく即時的评价, 保守現場への情報伝達によって構成されている。

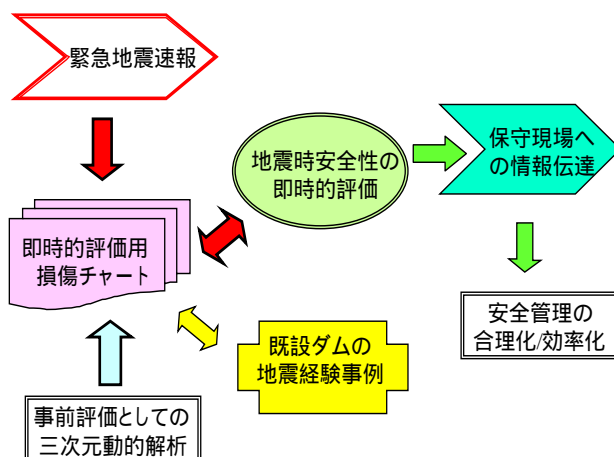


図-4 地震時安全性評価の基本フロー

平時の事前評価として, 入力地震動, 貯水池水位等の解析条件をさまざまに設定した三次元的解析を実施しておき, 大地震発生時に最も近似した解析ケースを検索抽出ことにより即時的评价を可能としている。即時的评价は, 緊急地震速報の受信から保守現場への情報伝達までのプロセスを概ね 1 秒以内で実施することを目標としている。

### (2) 緊急地震速報と三次元的解析の複合的活用

本研究の特徴のひとつは, 緊急地震速報と三次元的解析技術の有機的な連携である。緊急地震速報の基本情報は, マグニチュードと震源位置なので, この基本情報と距離減衰式, 地盤・構造物系の増幅特性等を用いてダムサイトで想定される地震動の最大加速度や卓越周波数を推定する。地震観測を実施しているダム地点に関しては, ダムで観測されている地震観測データを活用して, 対象ダム地点の地震動の増幅特性や周波数特性をより現実的に即して予測することが可能である。

### (3) 三次元的解析による事前評価

平時の事前評価は, 精度・信頼性の観点から, ダム・基礎岩盤・貯水池連成系の三次元的解析によって行う。三次元的解析を事前評価として平時に実施しておく理由は, 純粋なリアルタイムの解析作業は時間的な制約から難しいこと, 一般的には保守現場や設備の管理部門に地震工学や動的解析に通じた技術者がいないこと, 大地震発生時には停電が想定されること等である。



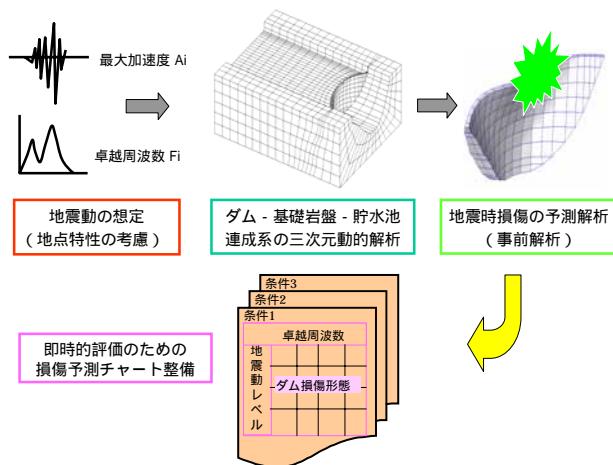


図-5 三次元的解析による地震時安全性の事前評価の流れ

三次元的解析の実施に関しては、図-5 のフローに示したように、地震動、貯水池水位について複数の条件を設定し、地震時損傷パターンの分類・設定を行う。

#### (4) 即時的評価用の方法

忘れた頃に必ずやって来る大地震が発生した場合には、緊急地震速報を受信すると同時に、自動的かつ即時的に地震時安全性の評価結果が抽出されるとともに、保守現場に送信され、現場の受信端末に地震動の到達時刻と予測される地震動強さおよびダムの地震時損傷の評価結果が表示されることが実用面で求められる。このような必要性から、本研究では、緊急対応のための判断支援システムとしての活用に主眼を置き、平時の事前評価として実施しておいた三次元的解析結果の中から最も地震動条件等が類似した解析ケースの結果を検索し、それに基づいて、行動支援・判断支援情報、安全・安心情報、危険・警戒情報を即時的かつ自動的に配信するようにしている。基本的には、地震動の最大加速度と卓越周波数の関数として、検索用のチャートを整理する。

### 6. 即時的評価結果の表示例

図-7 に示したのは、事例研究として実施した、新豊根ダムのダム・基礎岩盤・貯水池連成系の三次元解析モデルである。新豊根ダムは、静岡県佐久間町と愛知県の県境に位置する、ドーム型非対称放物線コンクリートアーチダムである。1972 年に建設され、堤高は 116.5m、堤頂長は 311m である。基礎岩盤の境界条件は、側方境界は粘性境界、下方境界は固定境界を設定した。解析プログラムは、UNIVERSE を用いた<sup>4) 5)</sup>。解析に用いた動的変形特性値は、新豊根ダムの実地震時挙動の再現解析から同定した結果として<sup>6)</sup>、表-1 の値を設定した。



図-6 新豊根ダム

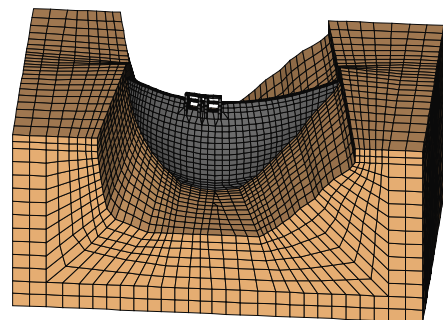


図-7 新豊根ダムの三次元解析モデル

新豊根ダムの三次元解析の妥当性の検証は、新豊根ダムで観測された実地震時挙動の三次元再現解析によって実施した。新豊根ダムでは、1973 年 12 月から地震観測を実施しているが、1997 年 3 月 16 日にダム基礎で 68gal、ダム天端中央で 709gal の加速度波が観測された。そこで、この地震時挙動の再現解析を行い、三次元解析の妥当性を検証するとともに、新豊根ダムのダム・基礎岩盤・貯水池連成系の三次元モデルの同定を行った。貯水池条件については、地震発生時の貯水位等を忠実に考慮した。

入力地震動に関しては、既設ダムで観測された波形として、一庫ダムおよび箕面川ダム（兵庫県南部地震）、賀祥ダム（鳥取県西部地震）等の観測波形を選択的に活用できるようにしている。東海地震、東南海・南海地震に対しては、中央防災会議から公表されているダム地点の地震動を、また、直下地震に対しては、マグニチュード 8 を想定して大崎スペクトルを用いて経験的手法により作成した模擬地震動を利用できるようにしている。マグニチュードと震央距離を変えた場合に関しては、距離減衰式を用いてダム地点での最大加速度を推定し、入力地震動の振幅を調整している。マグニチュード 6 未満の地震に対しては岡本の式(1971)<sup>7)</sup>を、マグニチュード 6 以上の地震に対しては福島・田中の式(1992)<sup>8)</sup>を適用するようにしている。地震観測を実施しているダムに関しては、サイトで観測された地震記録に基づいて距離減衰式の補正を行うようにしている。

表-1 実地震時挙動の再現解析から同定した  
既設アーチダムの動的解析用物性値の例

項目	せん断剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ポアソン 比	減衰定数 (%)
ダム	10500	2.4	0.20	5
基礎岩盤	9600	2.6	0.25	5
自由地盤	9600	2.6	0.25	5

表-2 地震荷重の設定の例

項目	設定範囲	刻み間隔(ピッチ)	パターン
M	3.0～8.6	M6以下:0.3 M6以上:0.2	24通り
震央 距離	10～300km	200km以下:5km 200km以上:10km	49通り

(備考) M: マグニチュード

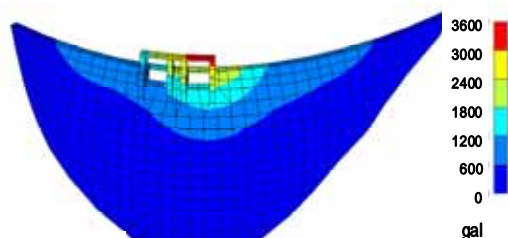


図-9 地震時の最大加速度分布の表示例

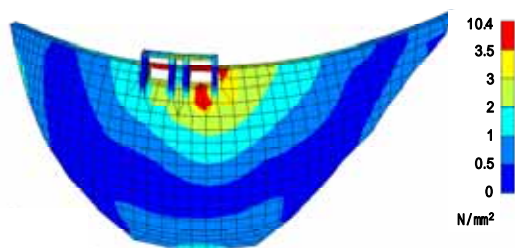


図-10 地震時の最大引張応力分布の表示例

ここで紹介している事例研究では、貯水池の水位条件は、水深 75m, 90m, 104m の 3 通りを設定した。入力地震動は、図-8 に示した、一庫ダム(兵庫県南部地震)で観測された波形を用い、最大加速度は、表-2 に示したように、マグニチュードを 24 パターン、震央距離を 49 パターン設定し、それらの組合せから、100gal～1000gal の範囲で設定した。

三次元動的解析結果の表示例として、ダム底部で 306gal の地震動を入力した場合の最大加速度分布の例を図-9 に、堤体接線方向の最大引張応力分布の例を図-10 に示す。静岡県に位置する佐久間電力所で実証試験を行った結果、緊急地震速報の受信から現場に設置した受信端末での表示までのプロセスを 1～1.2 秒で実施することができた。

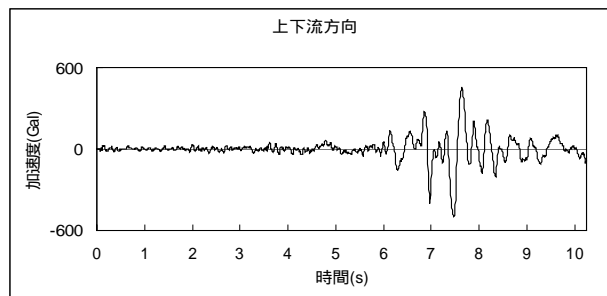


図-8 入力地震動の一例(兵庫県南部地震一庫波)

表-3 既設ダムにおける緊急地震速報の活用

項目	震 度			
			弱	強
保守管理部門の 防災訓練/教育				
緊急地震速報の伝 達(人的被害抑止)				
既設ダムの 臨時点検実施				
地震時損傷の 可能性評価			フィルダム コンクリートダム	
二次災害の 危険性予測			フィルダム コンクリートダム	

## 7. 既設ダムにおける緊急地震速報の活用

今後の発生が想定されている、東海地震、東南海・南海地震等の巨大地震に対しては、地震動到達前の地震防災情報を有効に活用することが期待できる。既設ダムに関しては、想定される震度に応じて表-3 に示したような活用を検討している。

本研究における地震防災の最大の主眼は、震度や震度の大地震時の対応である。震度や震度の場合は、人的被害発生危険性が高くなるので、主要動到達までの余裕時間を人向けの地震防災に有効に役立てて行くことが重要である。また、震度や震度の場合は、地盤や構造物の損傷・破壊が発生すると想定されるので、例えば、ダムに重大な損傷が発生し、下流域に二次的な地震災害が予測されるような場合には、主要動到達前に予測情報や警報を発信してゆくことが重要になる。

一方、震度や震度の地震の場合は、地盤や構造物の損傷・破壊の可能性は比較的低いが、地震時の揺れの心理的インパクトは高いため、地震被害が発生していない場合でも、地元の市民や自治体等からダムの安全性に関する問合せが多く寄せられることが多い。したがって、震度や震度の場合は、主要動到達の避難行動や警報の発信よりも、効率的な安全確認と円滑な安心情報の発信が要求される。地震時損傷の危険性が想定される場合には、臨時点検を優先的・重点的に実施すべき部位を端末画面に表示することにより、臨時点検への初動対応に円滑。

効率的に移行することが可能になる。保守現場にとっては、実務に大変役立つ地震防災情報を提供することが可能になる。

震度 および震度 が想定され、ダムの地震時損傷が予測される場合には、人的被害の未然防止を主眼にダム下流域の地震防災に万全を期すために、緊急地震速報とともに、地震時損傷に関する警報を関係者に配信することが必要になると考えられる。本研究で提案している手法は、重要な社会基盤施設に関する地震時安全性の定量的評価の精緻化への活用が可能であり、地震による社会基盤施設の直接被害、更には、二次被害の防止、地域の地震防災性能の向上等に役立てることが可能である。

従来、ダムの耐震的配慮は、基本的に設計段階において考慮されているが、明治、大正、昭和と、時代によって基準類の内容が変遷してきている。したがって、異なる時代に建設された既設ダムに関しては、地震工学の進歩に合わせて、最新の技術水準で耐震性能の照査を行うことが必要である。地盤・構造物系の三次元動的解析技術と緊急地震速報の利活用技術、更には防災情報伝達技術を有機的に連携させることにより、新しい付加価値を持った地震防災情報の提供が可能になると思われる。ダムに限らず、送変電施設、各種発電施設、多種多様の社会基盤施設、都市施設への適用が可能であると考えている。

## 8. おわりに

水力エネルギーは、純国産の無公害自然エネルギーであり、地球環境保全の観点からも、我が国のベース電源として貴重な存在である。ダムは、水力発電を支える基盤施設であり、社会性が非常に高い施設である。ダムは、優れた耐震性を有する構造物であるが、過去の地震経験事例を見ると、大地震時に被害を受けた事例が報告されているので、念には念を入れた、地震防災への備えが大切である。

今後、地震時損傷予測の精度向上、人的被害抑止

低減のための避難行動支援、物的被害低減のための意思決定支援、施設の自動制御等について研究を深める予定である。

謝辞：緊急地震速報の利活用技術の検討に際しては、東京大学地震研究所堀宗朗教授のご指導をいただきました。システム開発に際しては、(株)JPビジネスサービスの小林秀記氏、浅賀裕之氏、上野好一氏にご協力いただきました。記して、深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 安部郁夫、今村文彦：リアルタイム津波予測実現に向けた計算方式の評価と改良、土木学会地震工学論文集、No.27, pp319-325, 2003
- 2) 電気事業連合会ダム管理調査委員会：ダム管理調査要領、1982
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 有賀義明、曹増延、渡邊啓行：遠心載荷振動実験および三次元動的解析によるロックフィルダムの地震時安全性に関する研究、土木学会論文集 No.717/I-61, pp.77-89, 2002
- 6) 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
- 7) 岡本舜三：耐震工学, 1971
- 8) Fukushima, Y. and T. Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground in Japan, Shimizu Teck. Res. Bull., 10, 1-11, 1991

(2005. 2.25 受付)

## STUDY ON IMMEDIATE EVALUATION FOR EARTHQUAKE SAFETY OF DAMS BY UTILIZING THE EARLY EARTHQUAKE WARNING

Yoshiaki ARIGA, Yukio FUJINAWA, Noriaki KAWAKAMI,  
Tsuneo OHSUMI and Toshitaka NISHINO

Recently, magnitude of earthquake and location of epicenter have come to be estimated urgently in 3 ~ 4 seconds based on the observed data of P-wave. Earthquake information estimated urgently is termed the early earthquake warning. And, an arrival time and an intensity of S-wave can be estimated and informed before an attack of main shock. In this study, we have developed an immediate evaluation method for earthquake damage of dams by combining the early earthquake warning and a 3-D dynamic analysis. As a result, the earthquake damage of dams can be evaluated by the method proposed within one second. This method is useful to mitigate not only human disaster but also physical damage by earthquakes.