

三次元動的解析と緊急地震速報を連携させた 既設構造物の即時的な地震時損傷評価法

Immediate evaluation method for earthquake damage of existing structures
by combining 3-D dynamic analysis and Earthquake Early Warning

有賀義明*, 藤縄幸雄**, 堀宗朗***

Yoshiaki Ariga, Yukio Fujinawa, Muneo Hori

*博(工), 電源開発(株)茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

** 理博, 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)

*** Ph.D, 東京大学教授, 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

With the rapid development of earthquake engineering, Earthquake Early Warning has come to be put to practical use. In this study, we have developed an immediate evaluation method for earthquake damage of existing structures by combining 3-D nonlinear dynamic analysis and Earthquake Early Warning. The procedure for immediate evaluation developed in this study is constituted by two stages, namely one is an advance evaluation at peace time and the other is an immediate evaluation at earthquake time. We made the case study in regard to the existing dams, and examined the applicability of the method proposed. The proposed method is useful to mitigate the human, physical damage by earthquakes, can be broadly applied to various kinds of structures.

Key Words: 3D dynamic analysis, Earthquake early Warning, damage evaluation, existing structure, disaster prevention

キーワード: 三次元動的解析, 緊急地震速報, 損傷評価, 既設構造物, 防災

1. まえがき

1995年兵庫県南部地震以降, 我が国では, (独) 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, 地震の発生直後にP波を検知してから短時間でマグニチュードと震源位置が決定されるようになった。そして, その成果が, 緊急地震速報として配信されるようになっており, 震源から少し離れた地域では, 地震動の到達前に地震動の襲来を知ることが可能になりつつある。緊急地震速報は, 2007年10月から一般への提供が開始され, 人的被害の未然防止, 施設被害の抑止軽減, 二次災害の防止, 余震による災害の防止等に有効に活用することが期待されている¹⁾, ダムや電力施設に関しては, 大地震の直後に施設の健全性を迅速に正確に発信するために活用することも期待される。緊急地震速報を人的被害の未然防止に役立てるためには, 構造物や施設の損傷・破壊を考慮した上での緊急避難行動が必要不可欠であるとともに, 構造物や施設の物的被害の抑止軽減に役立てる場合にも, 構造物や施設の損傷・破壊を念頭に置いた上で臨時点検や安全確認の迅速化等を図ることが必

要である。従来, 大地震時の電力施設やダム施設の保守管理においては, 大きな揺れを感じて初めて地震の発生を知り, 揺れが収まってから気象庁の震度階を確認し, 所定以上の震度階である場合に施設の臨時点検・安全確認に移行するという手順が多くの場合の通例である。地震工学, 防災工学の進歩に伴い, これからは, 緊急地震速報を活用することによって地震動の到達前に地震の発生を知り, 人的被害の未然抑止を図るとともに, 臨時点検の必要性や優先的に点検すべき箇所を地震動の到達前に認識することが可能であると考えられる。数値解析技術に関しては, コンピュータの飛躍的な性能向上, 動的解析技術の進歩発展により, 地盤, 構造物, 水の連成解析技術が実用化されており, 人的・物的な地震防災に地盤-構造物連成系の三次元動的解析法を有効に役立てることが可能になっている。

このような背景から, これまでに, 三次元動的解析法と緊急地震速報の活用法について基礎的な研究を行って来た²⁾。本研究では, これまでの研究を踏まえ³⁾, 大地震発生時に, 既設構造物の地震時損傷を即時的に予測し, その予測情報をダム, 電力施設等の地震防災に役立てる

ための手法を開発した。提案法を活用することにより、地震動の到達直前の避難行動、地震動の到達直後の初動体制の形成、臨時点検の効率化、説明責任の円滑化、事業継続性の向上を図ることが可能であると考えられる。

2. 緊急地震速報の利活用

2.1 緊急地震速報の活用目的

緊急地震速報の活用目的について、これまでの研究の知見を集約して簡潔にまとめた結果を表-1に示す。緊急地震速報の活用に関しては、地震被害に着目して考える場合と時間軸の視点から考える場合に大別することが有益であると考えられる。地震被害に着目した場合、緊急地震速報の活用は、人的被害の未然防止、物的被害の抑止軽減、経済的損失の抑止軽減、二次災害の未然防止に分類して考えることができる。人的被害の未然防止については、寝ている人を起こす、安全な場所に避難する、危険作業や高所作業を中断し揺れに備える等、その場その場に応じた活用が可能である。しかし、緊急時に短時間で適切な避難行動をとるためには、建築物や構造物が破壊するか否かの評価情報が必要であると考えられる。物的被害の抑止軽減については、施設の自動制御、臨時点検の迅速化、運転停止期間・修復期間の短縮等に対する活用が可能であり、これらに関しても、適切な緊急対応を実践するためには、構造物や施設の地震時損傷・破壊の事前評価情報が必要であると考えられる。

表-1 緊急地震速報の活用目的

分類	活用目的	概要
地震被害から見た活用目的	人的被害の未然防止	・寝ている人を起こす ・安全な場所に避難する ・危険作業、高所作業を中断する、等
	物的被害の抑止軽減	・施設の自動制御 ・臨時点検の効率化、等
	経済的損失の抑止軽減	・運用停止期間の短縮 ・修復期間の短縮、等
時間軸から見た活用目的	二次災害の未然防止	・地震火災・水害の防止 ・公衆被害の回避、等
	平時の備え	・防災意識の啓発 ・防災教育・訓練 ・耐震診断、耐震対策へのフィードバック ・事業継続計画への反映、等
	広義の活用	・地震動の到達直前の緊急対応 ・直前の心構え ・直前の身の安全確保 ・避難行動 ・施設の自動制御、等
	狭義の活用	・地震動の到達直後の緊急対応 ・大地震直後の臨時点検 ・施設的全確認 ・余震への備え ・説明責任、社会的責任の円滑化

2.2 狭義の活用と広義の活用の概念の提案

緊急地震速報は、地震動到達前の数秒～数十秒の活用が最大の特長であり、地震動到達直前の活用として、直前の心構え、避難・退避行動、施設の自動制御に有効である。図-1は、時間軸の上で緊急地震速報を活用した地震防災のあり方について模式的に表現した結果であり、地震動到達直前に緊急地震速報を有効に活用するためには、平時の活用が必須の要件になると考えられる。平時

の活用としては、人的被害の未然防止の観点からは、防災意識の啓発、防災教育、防災訓練等が必要であり、施設被害の抑止軽減の視点からは、地震被害想定や耐震診断の結果を踏まえた耐震対策、防災対策の推進等が重要であると考えられる。このような理由から、緊急地震速報の活用に関しては、地震動到達前の数秒～数十秒での活用を「狭義の活用」、地震発生前の数年～数十年の時間スケールでの活用を「広義の活用」とする概念が有意義であると考察される。地震動到達前の数秒～数十秒を活かすためには、地震防災に関する不断の啓発・教育・訓練が必須であり、特に、構造物や施設の物的被害を抑止軽減するためには、平素から、既設構造物の地震時損傷・破壊を評価し、既設構造物の耐震性能に改善課題がある場合は平時に地震対策を実施し、防災性能を高めておくことが必須であると考察される。

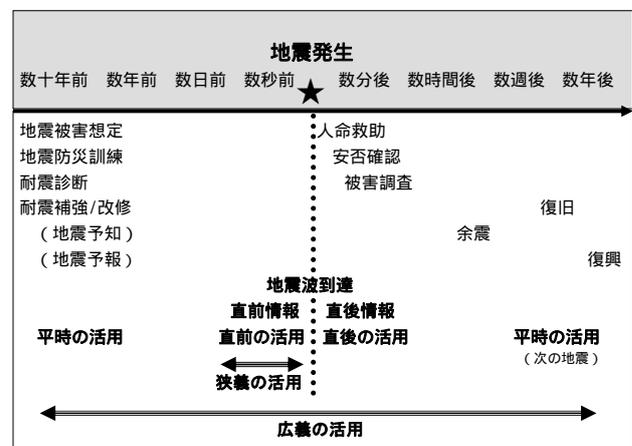


図-1 時間軸から見た緊急地震速報の利活用

2.3 電力施設における活用方法

人的被害の未然防止と施設被害の抑止軽減に分けて、電力施設における緊急地震速報の利活用についてまとめた結果を表-2に示す。

表-2 電力施設における緊急地震速報の活用法

項目	内容	利活用の対象
人向け	緊急避難安全確保	職員、従業員の注意喚起と緊急避難 事務所内の職員、従業員への情報伝達 構内、施設内への情報伝達 屋内の窓際からの退避 屋外の建物壁際からの退避 落下物、倒壊物の危険箇所からの退避
	作業中の従業員の緊急退避と安全確保	作業実施中の従業員：高所、不安定位置、危険位置、地震動増幅の大きい位置
施設向け	自動制御	自動的起動 情報伝達機器：テレビ、コンピュータ等 設備制御機器：ゲート操作、発電所操作 非常用機器：非常用電源
	自動的停止	施設内のエレベータ 発電機の自動停止：非常に強い地震動、例えば、震度6強以上が予測される場合
	事前警報	自動伝達 早期警報：館内、構内、周辺地域 警報ネットワーク：周辺地域との連携 避難誘導情報
防災性能の向上	緊急行動 二次災害防止	危険物拡散防止：化学薬品、環境汚染物質 建築物倒壊予測：地盤と構造物の連成効果 即時的被害予測：平時の被害予測との連動
	耐震診断と耐震対策の実践	精緻な地震被害予測 地震被害を受ける危険性のある全施設 貯水機能の保持 電力供給機能の保持 事業継続性の保持

電力施設の地震防災を考える際には、施設の複合性、末梢部の脆弱性、基礎地盤の不確実性を考慮することが必要であると考えられる。電力施設は、ダム、トンネル、発電所、タンク、水路、煙突、発電機、変圧器、機器配管系、地下構造物等の様々な構造物や設備によって構成されており、平面的にも立体的にも設備や構造物の複合性が特徴の一つであると考えられる。また、電力施設では、発電機が地震により損傷を受けて発電機能が停止することは稀であると想定されるが、碍子や電柱、配管系等の末梢部が被害を受けて電力供給機能が停止することが往々にして発生しており、こうした末梢部の脆弱性も特徴の一つであると考えられる。電力施設は、多種多様な構造物と設備によって複合的に構成されているため、地震被害を考える際には、構造物単体のみならず、設備や構造物の間の相互影響や被害連鎖を考慮することが必要になると考えられる。また、臨海域に立地された電力施設の場合は、地盤の不均質性、不確実性、軟弱性が伴うことが多く、地震時の加速度や変位が複雑に変化するため、地盤-構造物系の複雑な地震時応答を考慮した避難行動や安全管理が必要になると考えられる。

2007年新潟県中越沖地震における電力施設の地震被害事例を踏まえると、電力施設のトータルな防災性という観点から、地震直後の被害状況の迅速かつ正確な把握、安全・安心情報の適時的な発信等が非常に重要であり、構造工学・地震工学の技術をこうした分野に有用に役立てて行くことが必要であると考察される。

2.4 既設ダムにおける緊急地震速報の活用必要性

ダム施設における緊急地震速報の利活用については、図-2に示したように、地震時の避難行動、施設の自動制御、臨時点検・安全確認、安全・安心情報の的確な発信、防災教育・訓練等の必要性が高い。

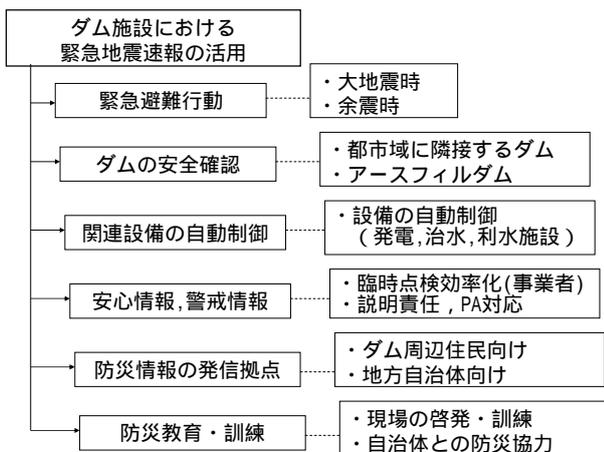


図-2 ダム施設における緊急地震速報の利活用

3. 三次元的解析と緊急地震速報を連携させた既設構造物の即時的な地震時損傷評価法

3.1 研究目的

本研究の目的は、図-3に示したように、大地震への備えとして、精緻な三次元的解析により構造物の地震時損傷を事前に予測評価しておき、大地震が発生した際に、緊急地震速報と連動させて構造物の損傷評価情報を自動的に発信することによって、地震動到達前の人的被害の未然防止（避難行動、安全確保）に役立てるとともに、地震動到達後の臨時点検・安全確認の精度向上・迅速化、説明責任の円滑化・適正化に役立てることである。中期的な視点からは、地震時損傷予測を踏まえた地震対策の推進、既設構造物の耐震性能の向上、事業継続性の保持等に役立てることを目的としている。そして、長期的には、地盤-構造物-水連成系の三次元的解析技術と緊急地震速報と情報通信技術を連携させることによって、地震防災の実現を図ることを目標としている。

3.2 提案法の基本フロー

地震時の即時的評価の基本手順を図-4に示す。提案法は、大きく、平時の事前評価と地震時の即時的評価の二つの段階で構成されている。

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損傷評価結果のDB化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、即時的評価用チャートに基づく即時的評価、保守現場への情報伝達によって構成されている。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、大地震時に最も近似した解析ケースを検索、抽出ことによって即時的評価を可能にしようとする方法である。即時的評価に関しては、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秒で実施することを目標としている。

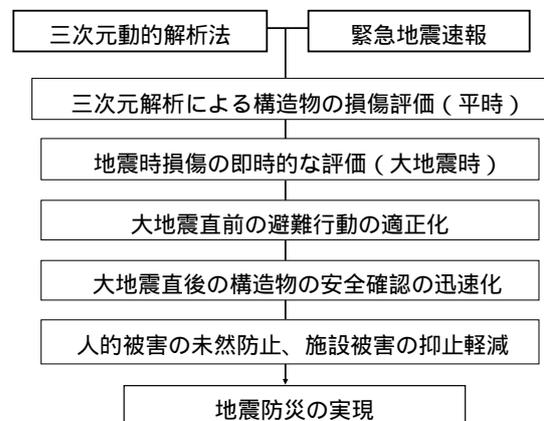


図-3 三次元的解析と緊急地震速報を連携させた地震防災技術の構築

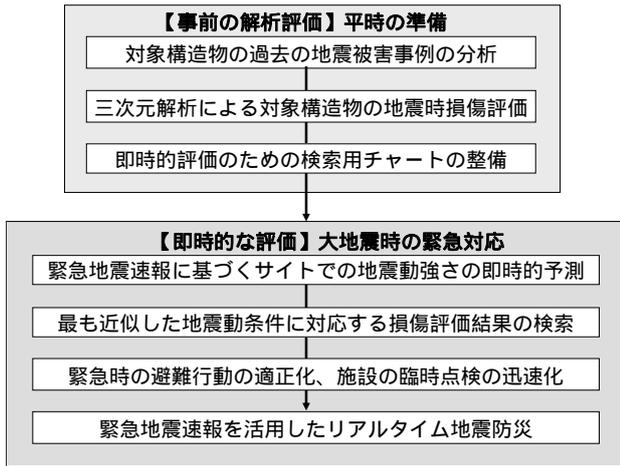


図 - 4 即時的な地震時損傷評価の流れ

地震時の即時的評価のフローは、気象庁から緊急地震速報を受信する、緊急地震速報のマグニチュードと震源位置からサイトでの地震動強さを予測する、発生した地震に解析条件が最も近似した評価結果を検索、抽出する、緊急地震速報と一緒に構造物の損傷予測結果を関係者に配信する、現場では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に活用する、地震動到達後は、損傷予測結果を臨時点検、説明責任の円滑化に役立てる等によって構成されている。余裕時間は、直下地震の場合は多くを期待できないが、海溝型の巨大地震の場合は、数秒から数十秒の余裕時間の期待することが可能であり、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可能になると思われる。

将来的には、超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、現地地震観測を実施している場合には、観測地震動を入力して三次元動的解析を行うことも想定しているが、現時点では、通常の一般的なコンピュータを利用した場合を前提として、時間的ゆとりがある平時に想定される様々な地震動条件等を設定した解析を実施しておき、それらの解析結果の中から地震時に最も近似した解析条件の評価結果を検索して提示する方法を考案した。

3.3 事前評価としての三次元動的解析

平時の事前評価としての三次元動的解析のフローを図-5に示す。図-5は、既設ダムを解析対象にした場合の事前評価の概念を模式的に示したものであるが、地震動の最大加速度、波形、貯水位等の解析条件を様々に想定して解析を行い、その結果をデータベース化し、即時的評価を行うための損傷予測チャートとして整備する。地震動の最大加速度の値は、緊急地震速報として配信されるマグニチュードと震源位置に基づいて距離減衰式を用いて予測する。地震観測を実施している地点では、地

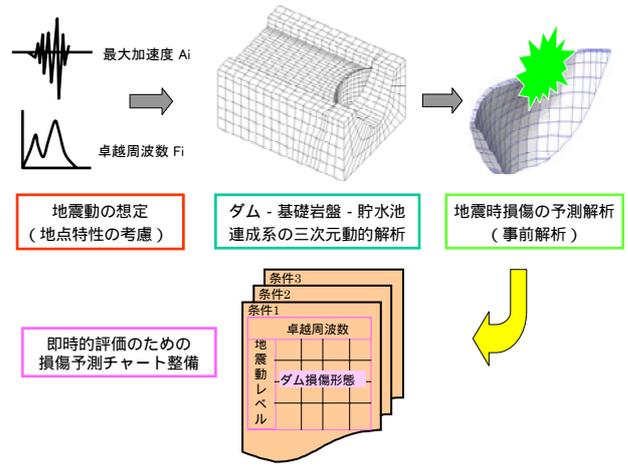


図 - 5 事前評価としての三次元損傷解析のフロー

Motion:T (Supposed TOKAI Earthquake), Reservoir water:C (Depth=104m)						
Motion:N (M8 Near-field Earthquake), Reservoir water:B (Depth=90m)						
Motion:H (Hyogoken-nanbu Earthquake), Reservoir water:A (Depth=75m)						
Magnitude	Hypocenter Distance (km)					
	10	15	20	25	30	...
8.6	H-A-8.6-10	H-A-8.6-15	H-A-8.6-20	H-A-8.6-25	H-A-8.6-30
8.4	H-A-8.4-10	H-A-8.4-15	H-A-8.4-20	H-A-8.4-25	H-A-8.4-30
8.2	H-A-8.2-10	H-A-8.2-15	H-A-8.2-20	H-A-8.2-25	H-A-8.2-30
8.0	H-A-8.0-10	H-A-8.0-15	H-A-8.0-20	H-A-8.0-25	H-A-8.0-30
7.8	H-A-7.8-10	H-A-7.8-15	H-A-7.8-20	H-A-7.8-25	H-A-7.8-30
7.6	H-A-7.6-10	H-A-7.6-15	H-A-7.6-20	H-A-7.6-25	H-A-7.6-30
7.4	H-A-7.4-10	H-A-7.4-15	H-A-7.4-20	H-A-7.4-25	H-A-7.4-30
7.2	H-A-7.2-10	H-A-7.2-15	H-A-7.2-20	H-A-7.2-25	H-A-7.2-30
...

(備考) ・表中の「H-A-7.2-10」の記号と数値は順番に次の条件を示す
 ・[地震動] - [貯水位] - [マグニチュード] - [震源距離]

図 - 6 即時的評価のためのチャート

震観測データに基づいて地点依存性を考慮した距離減衰式、地表地盤の増幅率等を補正して解析評価の精度向上を図っている。波形については、ダム地点での代表的な観測地震動や模擬地震動をデータベース化しておき、マグニチュードと震源距離に着目して波形を選択するようにしている。緊急地震速報を受信した際の即時的評価に用いる予測チャートの概念を図-6に示す。予測チャートは、地震が発生した際に、平時の事前評価として実施した解析結果の中から、緊急地震速報に基づいて予測された地震動条件に最も類似した条件の結果を即時的に検索するためのものである。図中の解析ケース名ごと(例:「H-A-8.6-10」)に出力結果がDB化されており、自動的に発信される仕組みになっている。

4. 新豊根ダムを対象とした事例研究

4.1 新豊根ダムの概要

提案法の適用性を検証するために、図-7に示した新豊根ダムを対象に事例研究を行った。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。

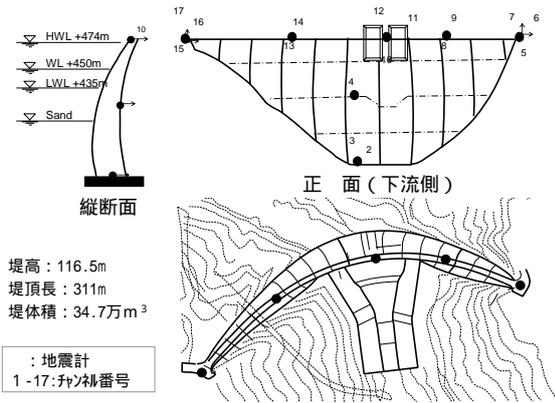


図 - 7 新豊根ダムの形状

4.2 三次元動的解析法

三次元動的解析法は、これまでに実用化した、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(プログラム名 UNIVERSE⁴⁾)を用いた。本解析法は、ダムと基礎岩盤の地震時相互作用、ダムに対する貯水池の振動抑制効果、基礎岩盤の境界面から半無限自由地盤への波動エネルギーの逸散、貯水池の底面および貯水池の上流端での波動エネルギーの逸散、強震時の堤体材料および地盤の非線形性、ジョイント面やクラック面での非連続的挙動と応力解放効果等を適切に解析することができるように開発したものである⁵⁾。ダム - ジョイント - 基礎岩盤 - 貯水池連成系の典型的な三次元動的解析モデルを図 - 8 に示す。

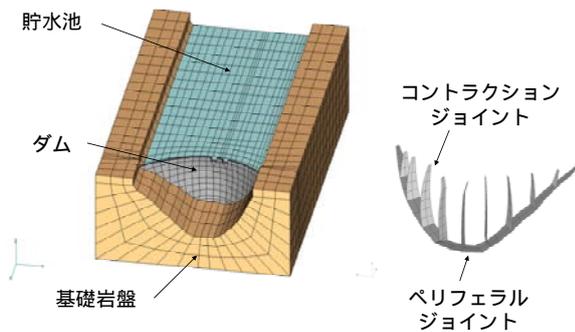


図 - 8 ダム - ジョイント - 基礎岩盤 - 貯水池連成系の三次元動的解析モデルの代表例

ダムと貯水池との動的相互作用については、連成理論に基づく貯水池モデルによって考慮しており、ダムと基礎地盤の動的相互作用については、半無限自由地盤モデルを導入し、半無限自由地盤へのエネルギーの逸散ならびに自由地盤の影響を考慮している。ジョイントは、三次元接触面要素を用いて剥離(開口)現象と滑動現象を考慮しており、接触面要素の構成と力学的特性は、図 - 9 に示すおりでである。

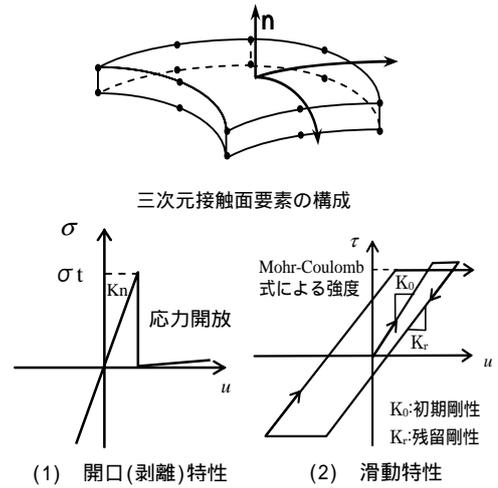
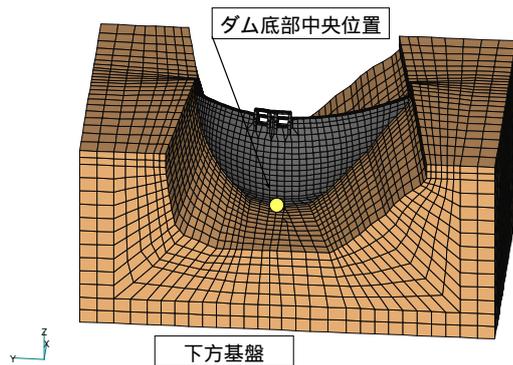


図 - 9 三次元接触面要素の構成

4.3 新豊根ダムの三次元解析モデル

図 - 10 は、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。この三次元解析モデルの妥当性は、実地震時挙動の三次元再現解析によって実証した⁶⁾。本ダムでは、1973年12月から地震観測を継続実施しているが、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。この地震時挙動の再現解析を行い、ダムおよび基礎岩盤の動的変形特性を定量的に評価し、三次元解析モデルの同定を行った⁷⁾。解析モデルの界条件は、側方境界は粘性境界、下方境界は固定境界を設定した。解析に用いたダムと基礎岩盤の動的変形特性と減衰定数は再現解析で同定⁸⁾した結果として、表 - 3 の値を設定した。減衰定数の値は、三次元動的解析で算出される地震動の最大振幅に直接的な影響を及ぼすが、これまでに実施した再現解析では、ダム、基礎岩盤、自由地盤ともに5%の減衰定数を設定した場合に良い再現性が得られた。貯水池条件については、貯水深75m、90m、104mの3つの貯水条件を設定した。貯水深90mは1997年3月16日の地震発生時の貯水深であり、貯水深75mと104mは、それぞれ低水位と満水位である。本ダムでは、建設当時、堤体を複数のブロックに分けてコンクリート打設が行われ、コンクリートの乾燥収縮や温度変化によるクラックの発生等を防止するためにブロックとブロックの間、ダム底面と基礎岩盤の間にジョイントが設けられているので、これらについては図 - 9 に示した接触面要素を用いてモデル化した。ジョイントをモデル化した際のジョイントの物性値は表 - 4 の値を仮定した。接触時の法線方向剛性は、数値解析上、接触面と接触面との間の圧縮変形が生じないようにするために $2 \times 10^9 \text{N/mm}^2$ という大きな値を仮定した。剥離後の法線方向剛性は0を近似した値として 10^{-3}N/mm^2 という値を仮定した。引張強度と内部摩擦角は0と仮定した。鉛直ジョイントの減衰定数はコンクリートの値を想定して1%とし、周辺ジョイントの減衰定数は岩盤の特性と基礎

岩盤から堤体への構造形式の急変を念頭に置き大きき目の値を仮定した。



ダム底部で観測された地震動を用いる場合は、三次元解析モデルのダム底部中央位置と下方基盤の間の伝達関数を用いて、地震動を下方基盤まで引き戻した後に下方基盤から入力する。

図 - 10 新豊根ダムの三次元解析モデル

表 - 3 実地震時挙動の再現解析から
同定した動的解析物性値⁶⁾

項目	せん断剛性 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	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 - 4 仮定したジョイントの物性値

項目		鉛直ジョイント	周辺ジョイント
法線方向剛性 (N/mm ³)	剥離時	10 ⁻³	10 ⁻³
	接触時	2 × 10 ⁹	2 × 10 ⁹
せん断剛性 (N/mm ³)		1 × 10 ⁹	1 × 10 ⁹
粘着力 (N/mm ²)		0.0	0.0
内部摩擦角 (度)		50.0	50.0
引張強度 (N/mm ²)		0.0	0.0
減衰定数 (%)		1	10

(備考) 鉛直ジョイント：ダム堤体のブロックとブロック間に分布するコントラクション・ジョイント

周辺ジョイント：ダム堤体底面と基礎岩盤の間に分布するペリフェラル・ジョイント

4.4 入力地震動

三次元動的解析に用いる地震動は、既設ダムで観測された実地震動としては、一庫ダム⁹⁾、箕面川ダム⁹⁾(兵庫県南部地震)、賀祥ダム¹⁰⁾(鳥取県西部地震)等の観測波をDB化し選択的に活用できるようにしている。東海地震、東南海・南海地震等に関しては、中央防災会議が公開している想定地震動¹¹⁾、土木学会が作成した地震動¹²⁾、経験的手法により作成した模擬地震動⁴⁾等を利用できるようにしている。

サイトで予測される最大加速度は、マグニチュードと震央距離から距離減衰式を用いて推定し、その結果を入

力地震動の最大振幅に反映するようにしている。距離減衰式については、公表されている多数の式を選択的に利用できるようにしているが、通常は、マグニチュード6未満の地震に対しては岡本の式(1971)¹³⁾、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)¹⁴⁾を適用するように設定している。岡本の式は、堅硬な岩盤での地震観測記録に基づいて作成されているがマグニチュード6未満の地震が主体となっているため、このような使い分けを設定している。なお、ダムで地震観測を実施している地点では、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。図 - 11 に示した地震動は、1995年兵庫県南部地震の際に一庫ダムの底部通廊で観測された地震動であり、三次元動的解析では、ダム底部中央位置から図 - 10の解析モデルの下方基盤に地震動を引き戻した後に入力した。ここに示す解析事例では、想定地震のマグニチュード3.0から8.6までを24パターン、震央距離10kmから300kmまで49パターン設定し、それらの組合せから、100gal ~ 1000galの最大加速度を設定した。

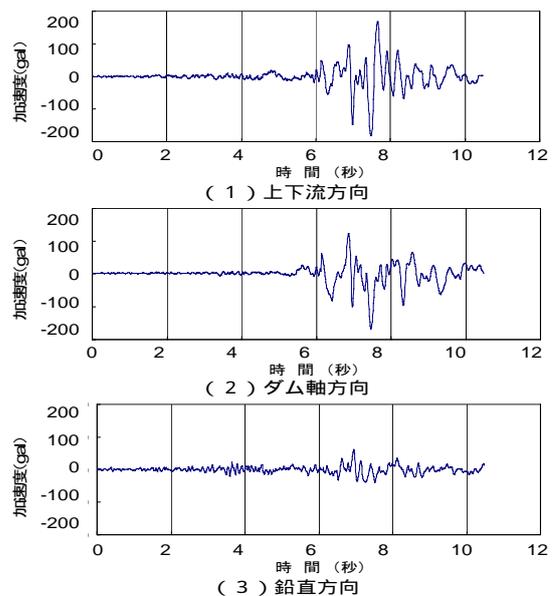


図 - 11 一庫波(兵庫県南部地震、一庫ダム底部通廊)

4.5 解析結果の表示例

緊急地震速報を受信した際に、現場や関係者に配信する予測評価結果の画面の表示例を図 - 12と図 - 13に示す。図 - 12は、ダム底部で459galの一庫波を入力した場合の最大加速度分布の例である。図 - 13は、同様に、ダム底部で459galの一庫波の入力した場合のダム堤体の最大引張応力分布の例である。非常に強い地震動がダムに作用した場合、図 - 12、図 - 13から理解できるように、堤体の加速度分布、引張応力分布は共に、ダム天端中央部で大きくなる。この画面表示例では、加速度応答は、ダム天端に設置された洪水吐で最も大きいので、このような評価結果が出た場合には、洪水吐のピア

やスラブでの地震時損傷の可能性を念頭に置いて臨時点検に望むことが合理的になると考えられる。引張応力については、ここに示した例は画面表示を例示するためのものであるが、もし、大地震の際のこのような評価結果が出た場合には、ダムコンクリートの動的引張強度は、一般的に $3\text{N}/\text{mm}^2$ から $5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度と想定されているので、ダム天端のコンクリートで若干の亀裂が発生する可能性を想定しておくことが必要になると考えられる。地震時には、これらの図面が自動的に配信されるようにしておくことにより、現場ではこれらの図面を参照しながら優先的に目視観察すべき箇所を選定し臨時点検の迅速化を図ることが可能である。なお、ここに例示した解析結果は、大地震時の人的被害の未然防止と臨時点検・安全確認の円滑化、現地の社員・従業員の防災教育・訓練等に役立てることに主眼を置いているため、構造的なダムの耐震性能評価の視点からは非常に安全側の解析条件（加速度や応力が大きく評価される解析条件）を設定した場合の解析結果である。構造工学、地震工学の視点からは、非常に強い地震動が作用した場合には、動的せん断剛性と減衰定数の非線形効果⁵⁾、コントラクション・ジョイントやペリフェラル・ジョイントの非連続的挙動の効果⁶⁾等を考慮することが必要であり、提案法では、これらを考慮した三次元動的解析結果の配信も可能にしている。

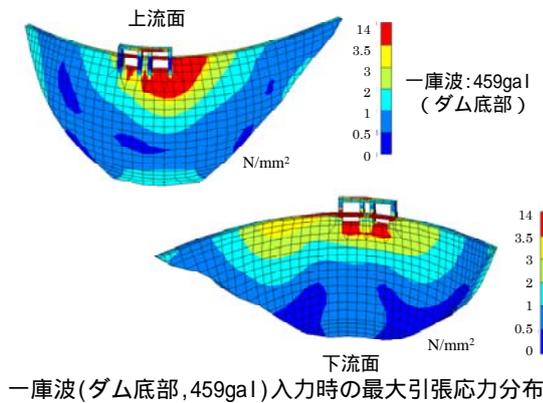
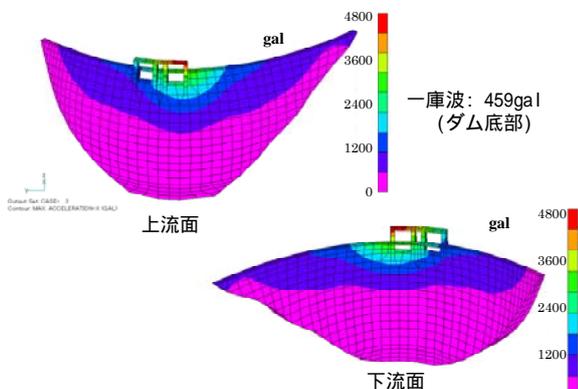


図 - 12 強震時の最大加速度分布の表示例



一庫波(ダム底部, 459gal)に対する最大加速度分布
図 - 13 強震時の最大引張応力分布の表示例

提案法の第一の主眼は、震度6や震度7の大地震時の対応である。震度6や震度7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。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、臨時点検の初動対応の円滑化が可能になり、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である。また、震度6や震度7の場合は、地盤・構造物系の損傷・破壊が発生すると想定される場合が多いので、地震による損傷や被害が予測されるような場合等には、地震動到達前に警戒情報を発信し地震防災に役立てることが可能であると考えられる。

震度4や震度5の地震の場合は、構造的な面では、地盤・構造物の損傷・破壊の可能性は低いですが、地元市民が受ける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4や震度5の場合は、地震動到達直前の避難行動や警報の発信よりも、より迅速で効率的な安全確認と安心情報の発信が重要になる。

4.6 情報伝達に関する実証試験結果

緊急地震速報の受信から現場での情報の受信までのフローを図 - 14 に示す。情報伝達は、緊急地震速報の受信、緊急地震速報に基づいたサイトでの地震動強さの予測、サイトで予測される地震動強さに応じた地震時損傷評価結果の検索と抽出、現場への情報発信、現場での受信により構成されている。情報伝達に関する実証試験は、こうした一連の流れが意図したように自動的に作動し、目標とした時間で情報伝達が行えるかどうかを確認するために行った。

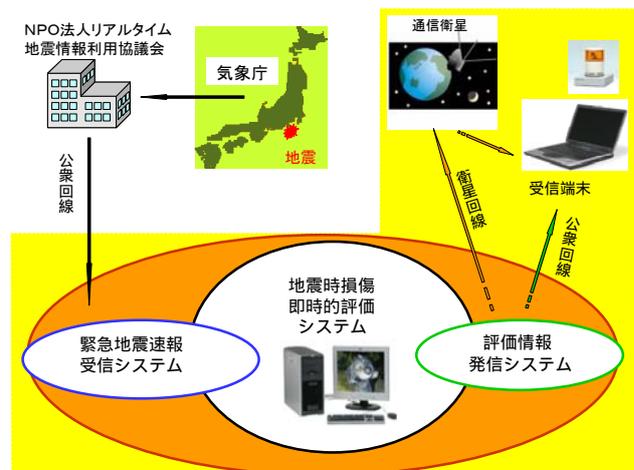


図 - 14 即時的评价法における情報伝達の流れ

実証試験には、試験用の緊急地震速報テスト報を用い、東京門前仲町にある受信端末で受信してから、地震動強

さの予測、即時的損傷評価結果の検索・抽出を行い、衛星回線で佐久間電力所（静岡県）に送信し、現場の電力所の受信端末で自動的に受信するまでのプロセスについて実施した。その結果、東京門前仲町の受信サーバで緊急地震速報テスト報を受信から佐久間電力所（静岡県）の受信端末で受信し表示するまでのプロセスを1秒から1.2秒で実行することができた。なお、これまでに実施した実証実験では、受信端末のパソコンに、当初、ラップトップ型のパソコンを使用した。ラップトップ型のパソコンは24時間稼働を前提としていないため短時間で故障が発生しやすかった。また、衛星回線に関しては、通信費が高くなる結果となったので、今後の実用化においては、情報伝達の二重化と通信費の低減を両立させるための工夫が必要であると考えられる。

5. 即時的評価のネットワーク化

大地震時のダム施設や電力施設の安全確認・安全管理は、施設を所有・管理する者にとって重要な課題である。本州の太平洋側では、東海地震、東南海・南海地震の発生が想定されており、もし、東海・東南海・南海地震が同時に発生した場合には、広域かつ同時多発的な地震被害が顕在化する危険性があると想定されている。大地震が発生した場合には停電の発生が想定されるので、緊急地震速報を活用して停電発生前に地震時の予測情報を確実に伝達することによって、重要施設の安全確認の迅速化と社会に対する情報発信の効率化が実現可能であると考えられる。また、緊急地震速報を活用して停電前に非常用電源のスイッチをオンにすることによって、重要施設の制御系システムや情報伝達系システムの円滑な機能維持が可能になるものと思われる。

巨大地震が発生した場合には、地震情報の収集や安否確認等に関連して様々な混乱が発生することが想定されるので、地震動が到達する前に、換言すれば、現場で地震による混乱が生じる前に、どのような地震が発生して現場ではどの程度の揺れになるのか、そして、重要施設に関してはどの程度の損傷や被害が予測されるのか等についての情報を的確に把握・認識することは大変有益なことであると考えられる。

地震防災では、平素からの防災情報や技術の共有化が大切であり、大地震が発生した時には、構造物や施設の損傷・破壊に関する情報、人的被害・救援救助に関する情報をはじめ、災害情報の共有化と技術的・社会的連携が大切であると考えられる。防災情報、被害情報、災害情報の共有化については、様々なレベルでの共有化をすることができるが、基礎的な情報の共有化のイメージとしては、個々に実施した解析評価事例を蓄積・集約することが考えられる。

図-15は、これまでに耐震性能照査を実施した既設ダムの中から、本州太平洋側に位置する地点を選んで図

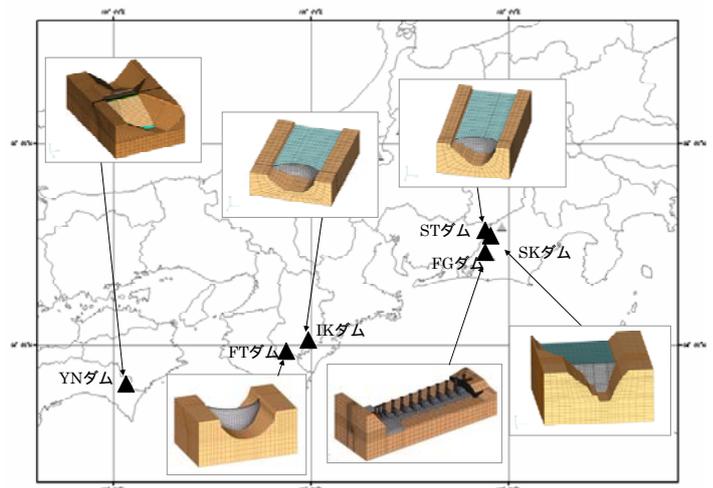


図-15 即時的評価ネットワークの既設ダム

示したものである。図-16と図-17は、図-15に示した既設ダムの事例の内、SKダムとIKダム評価結果の表示例である。図-16は、土木学会が作成した地震動（最大加速度106.9gal）を入力地震動に用いた場合のSKダム（コンクリート重力式ダム、堤高155m、堤頂頂293m）の地震時引張応力の評価例である。この事例のように地震動の加速度レベルがあまり大きくない場合は、線形領域の解析で済むことになる。

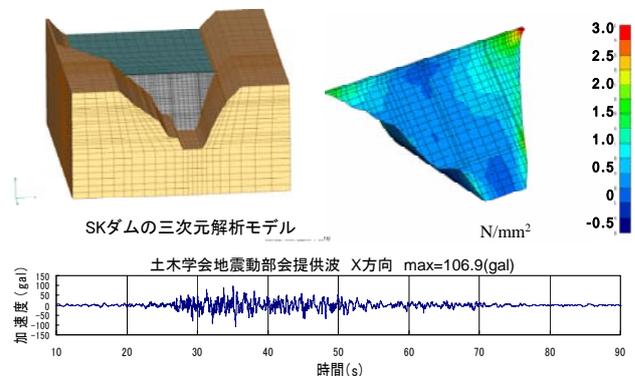


図-16 線形解析による三次元的動的解析事例

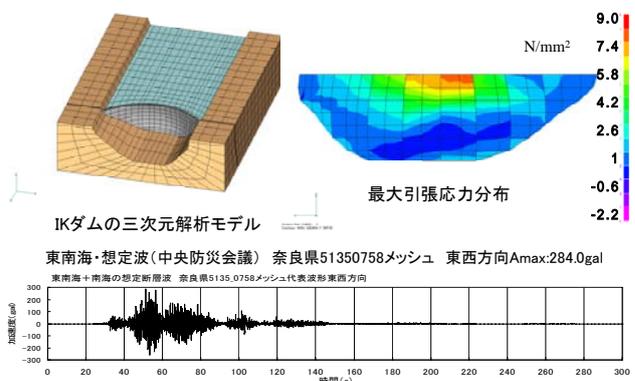


図-17 強震時の非連続的挙動を考慮した三次元的動的解析事例

図 - 17 は、中央防災会議が公開している地震動（最大加速度 284.0gal）を入力地震動に用いた場合の I K ダム（コンクリートアーチダム、堤高 111m、堤頂長 460m）の地震時引張応力分布の例である。この事例のように加速度レベルが大きい場合は、ダムに配置されているコントラクション・ジョイントとペリフェラル・ジョイントをモデル化し、強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮した解析を行うことが必要になる。この解析事例では、地震時引張応力がジョイント面の開口・滑動によって開放されたことにより、最大引張応力の分布が不連続になっていることが理解できる。

以上のような既設ダムの三次元解析事例については、ダムの位置、解析モデル、地震動、解析結果等をデータベース化して共有化することが可能であり、こうした情報の共有化は、技術者、組織の部門、組織、業界、地域、自治体、国などの様々な場面での地震防災の推進に有用であると考えられる。

将来に向けて、より応用性の高いネットワーク化の考え方としては、解析結果の共有化にとどまらず、三次元的解析の基礎になる、地盤情報、地形情報、地震動情報、動的解析モデル、入力地震動データ、考察・知見等を集約してデータベース化することによって地震時損傷予測技術を共有化することが可能であり、更には、過去の地震被災情報、補修・改修情報、緊急地震速報の活用方法、類似構造物の耐震診断および地震対策情報等の共有化が可能であり、最終目標として、地震防災の実現の共有化が可能になるのではないと思われる。

6. まとめ

本研究では、三次元的解析法と緊急地震速報を連携させることにより、大地震発生時に既設構造物の地震時損傷を即時的に予測し、緊急地震速報と一緒に予測情報を即時的かつ自動的に関係者に配信する方法を開発した。

提案法を活用することにより、地震動の到達直前の避難行動、地震動の到達直後の初動体制への移行の円滑化、臨時点検の効率化、説明責任の円滑化、事業継続性の向上等を図ることが可能であると考察される。

提案法の適用性を実証するために新豊根ダムを対象に事例研究を行った。緊急地震速報の受信から、対象地点の地震動強さの評価、地震時損傷評価結果の検索と抽出、対象地点への情報発信、そして現場での受信が実行できるかどうかについて実証実験を行った結果、一連のプロセスを自動的に 1 秒～1.2 秒で実行することができた。

提案法は、ダム施設、電力施設をはじめ、重要な社会基盤施設の地震時損傷・破壊の定量的評価の精緻化のための活用が可能であり、大地震時の避難行動支援、意思決定支援に役立つ情報を提供することが可能であり、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へと役立てることが可能であると考えられる。

地盤 - 構造物系の三次元的解析技術、緊急地震速報の利活用技術、情報通信技術を連携して活用することにより、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。

ダムに関しては、近年、都市化の進展、都市域の拡大に伴い、ダム地点が都市域に隣接するようになったケースが多く見られ、都市域に隣接するダム地点に関しては、万が一、地震によってダムが構造的損傷を受けた場合でも、人的被害や公衆被害が派生しないように、平素から防災性の向上に取り組むことが大切であると考えられる。

7. あとがき

緊急地震速報を活用して地震動の到達直前に緊急避難や安全確保を図り人的被害の未然防止を実現するためには、構造物や施設の地震時損傷・破壊を考慮した上で、安全な位置や場所に臨機応変に退避することが必要である。構造物が破壊するか否かによって、どこに避難すべきかは変化し、建物や構造物が損傷・破壊するか否かは人間の生死を分ける重要な情報になり得ると思われる。

緊急地震速報を施設の臨時点検や安全確認に役立てる場合にも、施設の地震時損傷・破壊を可能な限り現実的に想定しておくことが必要である。このような必要性に対して、地盤 - 構造物系の三次元的解析技術は、大きな貢献を果たすことが可能であると考えられる。

21 世紀に入り、被害地震が頻繁に発生しつつあり、近い将来には、東海・東南海・南海地震、首都圏直下地震等の地震の発生が想定されている。このような折、地盤 - 構造物系の精緻な三次元的解析法、緊急地震速報、情報通信技術、合理的な耐震診断技術と地震対策技術動等を連携して有効活用することが、地震防災の実現に向けて有用であると考えられる。

ダム施設や電力施設での施設被害を抑止軽減するためには、想定される震度や加速度に応じて、換言すれば、想定される施設の損傷や破壊に応じて、行動プロセスや意思決定プロセスをシステム化しておくことにより、施設の自動制御の実用化、行動支援・意思決定支援システムの開発が可能になると考えられる。

大地震がいつ発生しても大丈夫なような環境を整備しておくためには、平素から、構造物、施設等の耐震診断と耐震対策を行いながら耐震性能を向上させておくこと、そして、大地震の際に的確な避難行動をとれるようになに教育と訓練が大切であると考えられる。

大地震がいつ発生しても良いような、防災性能の高い心理環境と施設環境を創り出しておくことが将来に向けて必要であり、緊急地震速報は、それを進めるための有用な情報の一つであると考えられる。

謝辞

即時的評価システムの整備、三次元動的解析のラン作業、佐久間電力所における実証試験等に際して、(株)J P ビジネスサービスの浅賀裕之氏、依田昌宏、上野好一氏にご協力をいただきました。記して、感謝の意を表します。

for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground in Japan, Shimizu Teck. Res. Bull., 10, 1-11, 1991

(2007年9月18日受付)

参考文献

- 1) 藤縄幸雄: 緊急地震速報の一般利用についての一考察, 第6回国土セイフティネットシンポジウム - 緊急地震速報の一般利用開始を迎えて - 梗概集, pp.45-51, 2007.2
- 2) 有賀義明, 藤縄幸雄, 大角恒雄, 西野哉誉: ダムの地震時損傷の即時的評価に関する基礎的検討, 土木学会リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集, No.21, pp.125~130, 2004.6
- 3) 有賀義明, 藤縄幸雄, 川上則明, 大角恒雄, 西野哉誉: 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, 土木学会地震工学論文集 Vol.28, 第28回地震工学研究発表会, 45, pp1-6, 2005.8
- 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/ -58, pp.99~110, 2002.1
- 5) 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/ -67, pp.53~67, 2004.4
- 6) Ariga, Y., Cao, Z. and Watanabe, H.: Seismic stability assessment of an existing arch dam considering the effects of joints, Proceedings of the 21st International Congress on Large Dams, Q.83-R.33, pp.553-576, 2003.6
- 7) 有賀義明: 既設ダムの防災性能の設定と三次元再現解析による性能照査法の妥当性の検証, 日本学術会議第6回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム JCOSSAR2007 論文集, FM4-7A, A論文, pp.805~812, 2007.6
- 8) 有賀義明: 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, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号(特集号), pp.130-143, 2007.3.
- 9) ダムの耐震性に関する評価検討委員会: ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書(概要版) 1995.11
- 10) 末次弘道, 木村光良, 市原昭司: 鳥取県西部地震に伴う黒坂発電所水圧管路の復旧対策, 電力土木, No.295, pp.57-61, 2001.9
- 11) 中央防災会議: 東海地震に関する専門調査会, 東南海・南海地震等に関する専門調査会
- 12) 野津厚: ダム地点における強震動評価, 土木学会巨大地震災害への対応検討特別委員会地震動部会報告書案, 2005.8
- 13) 岡本舜三: 耐震工学, pp.110, 1971
- 14) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation