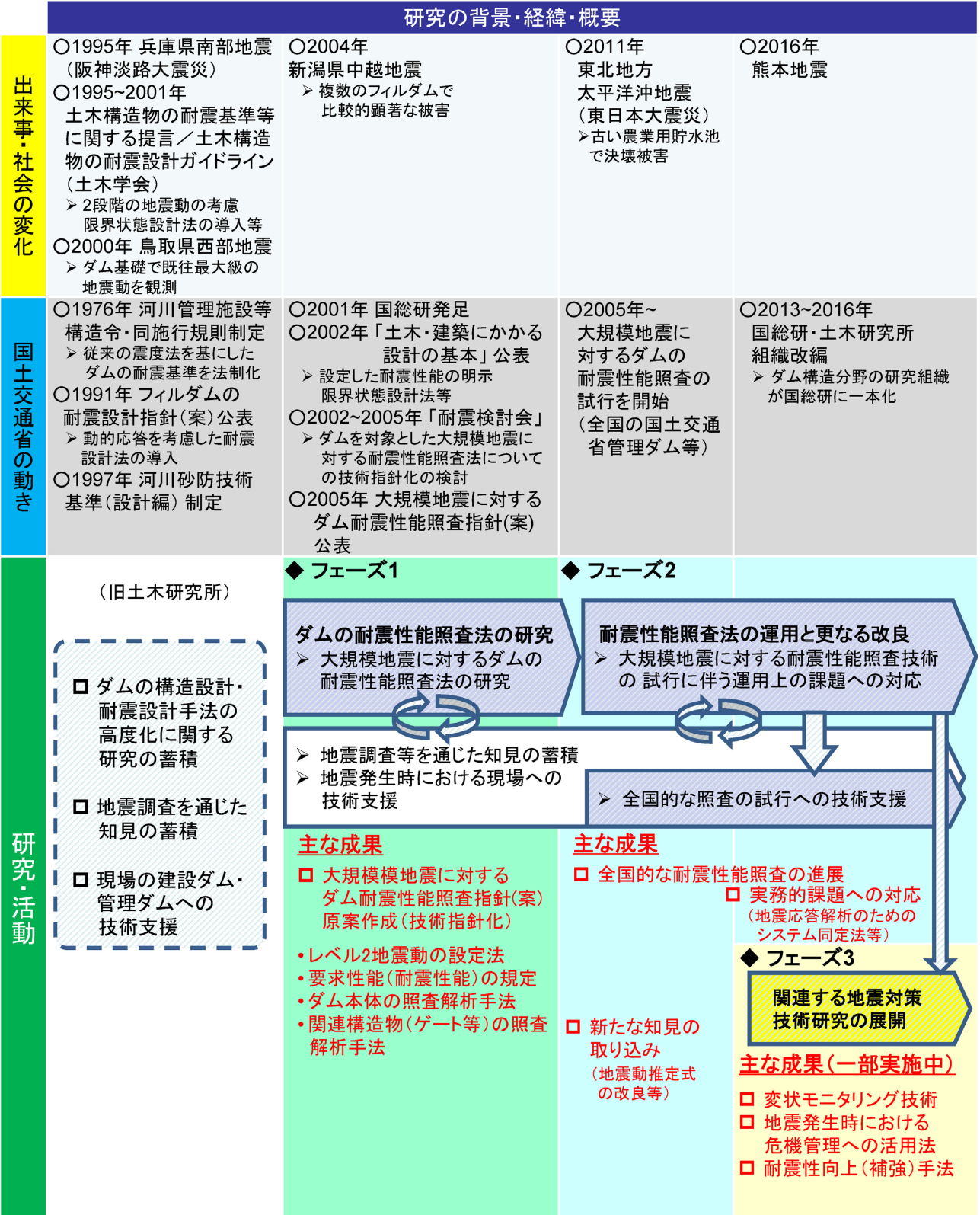


ダムの耐震及び関連技術

1. 研究・活動のアウトライン

1. 強

国土技術政策を支える研究開発



◆ダムの耐震性能照査法の研究（フェーズ1）

【背景と課題】 平成7年（1995年）の兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）において、ダム施設の被害は軽微であったが各種構造物に甚大な被害が生じた。これを契機に構造物の耐震性に対する社会的関心が高まり、各種土木構造物では、従来の設計地震動に加えてこれを上回るレベルの地震動も考慮する2段階設計法の導入、各地震動レベルに応じた耐震性能の明示、限界状態設計法の導入など耐震基準の抜本的な見直しの動きが加速することとなった。このような中、ダムにおいても全国的な地震観測態勢の充実に伴い、震度法に基づく国内の構造基準（河川管理施設等構造令・同施行規則）に規定される設計震度（設計上考慮する地震力の大きさ（重力に対する比率））を超える地震動の観測例が増えてきたことなどから、大規模地震に対して個々のダムの耐震性を合理的に説明可能な手法の整備が強く求められるようになった。そこで、既に普及しつつあった動的解析法を用いた地震時応答の推定など、数値解析技術も積極的に採り入れた大規模地震に対する耐震性能の照査法を整備することとなった。

【研究概要と主な成果】 国総研では、所が発足した2001年頃より上記課題を解決する上での現行構造基準の課題の洗い出しを始め、技術・制度の両面から対応策の検討を開始した。そして、現行構造基準での経験的な設計震度と安全率の組み合わせによる耐震設計に加え、当該基準により設計されたダムの耐震性能を個々のダム地点で考えられる最大級の地震動（レベル2地震動）に対しても照査する枠組みを新たに構築することとし、その具体的内容について、土木研究所等と共同で検討を進めた。主な検討項目は、①レベル2地震動の具体的な設定方法、②レベル2地震動に対してダムに要求される耐震性能の規定内容、そしてこれらに基づいて③ダム本体及び関連構造物（ゲート設備等）の耐震性能の具体的な照査方法であった。これらの内容は、2002～2005年にかけての有識者や行政関係者を含む検討会での審議を経てとりまとめられ、2005年3月に国土交通省より公表された「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」（以下「指針案」）の原案となった。

◆耐震性能照査法の運用と更なる改良（フェーズ2）

【背景と課題】 前述の指針案に基づき、2005年度より全国の国土交通省管理ダム等で耐震性能照査の試行が開始されることとなった。しかし、地形・地質条件や構造特性が様々に異なる個々のダムにおいて適切に照査が試行されるためには、各管理者等に対し、継続的にきめ細かな技術支援を行う必要があった。また、試行の過程で新たに得られた知見や、実務的取扱いに関して課題となる事項へも対応していくことが求められた。

【研究概要と主な成果】 国総研では、ダムの耐震性能照査を行う上で実務者の参考となる技術資料¹⁾を土木研究所と共同でとりまとめ、刊行した。また、従来から地震発生時に行ってきた現地調査等で得られた知見も活用し、個々のダムへの技術支援を継続的に行っている。なお、2011年には、東日本大震災（平成23年東北地方太平洋沖地震）の際に得られた多数の地震動観測記録を利用し、レベル2地震動の設定に用いる地震動推定式の改良を行った。また、地震応答解析に必要な解析パラメータを実測応答記録をもとにより精度良く設定できるシステム同定法の開発など、耐震性能照査を含むダムの地震時応答推定技術の更なる向上を目指す研究も行っている。

◆関連する地震対策技術研究の展開（フェーズ3）

【背景と課題】 地震に対するダムの安全をより確実なものとしていく上では、地震発生時の迅速な影響予測などの危機管理面、耐震性向上手法等の対策技術など様々な面で関連技術の開発・普及を進めていく必要がある。

【研究概要と主な成果】 最近では、地震時の異常検知に活用可能な新たなダムのモニタリング手法として、衛星データや振動データを利用する技術を開発し、その有効性を確認してきている。また、地震発生時の震源情報から個々のダムへの影響を即時に推定する技術等についても開発を進めている。対策技術の面では、国内では事例が少ないダムの耐震性向上（補強）手法についても検討を行っている。

2. 主な研究成果

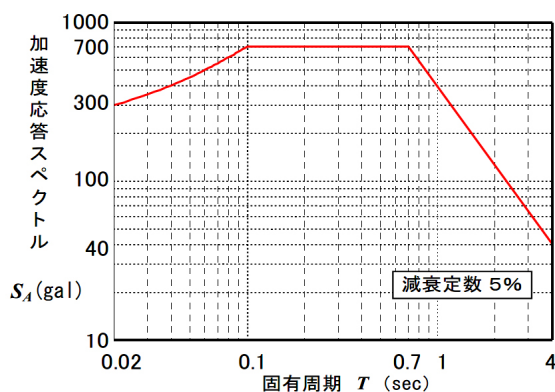
◆ ダムの耐震性能照査法の研究（フェーズ1）

大規模地震に対するダムの耐震性能照査を行うには、まず照査において考慮するレベル2地震動を設定する必要がある。このため、周辺の活断層や海洋のプレート境界などで発生が想定される地震の情報をもとに、レベル2地震動をダム地点ごとに設定する方法と手順を明確にした。なお、内陸地殻内の地震としては、サイト周辺に知られていない活断層が存在する可能性も考えて最低限考慮すべき地震動の強さを設定する必要があることから、その対応として、レベル2地震動の下限を規定する応答スペクトル（図—1）も設定した。

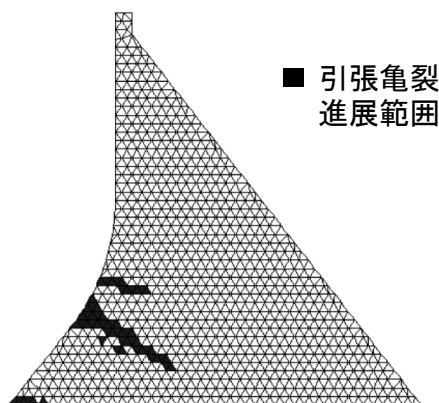
また、レベル2地震動に対して確保すべきダムの耐震性能を「ダムに損傷を生じてもその貯水機能が維持されるとともに、生じた損傷が修復可能な範囲に留まること」と定めて明確にした。これは、ダム自体の損傷については、下流域に被害を生じさせない限定的なものであれば、許容することを意味するものである。

ダム本体及び関連構造物の具体的な照査手法としては、その損傷過程を考慮する地震応答解析の手法を導入することとした（図—2）。すなわち、コンクリートダムでは堤体コンクリートのひび割れや継目の開口を考慮可能な非線形動的解析（図—3）、フィルダムでは堤体沈下量の推定を可能とする塑性変形解析等、ゲート設備では部材の塑性化も考慮する地震応答解析等によることとした。そして、コンクリートダムでは堤体上下流面を分断するようなひび割れ等による不安定化の有無、フィルダムでは貯水の越流を生じるような大きな沈下や浸透破壊の有無、ゲート設備では過大な貯水流出を生じるような損傷の有無を確認することなど、地震解析結果の結果に基づき、所要の耐震性能を有するかどうかを確認する上での判断の基本的考え方を明らかにした。

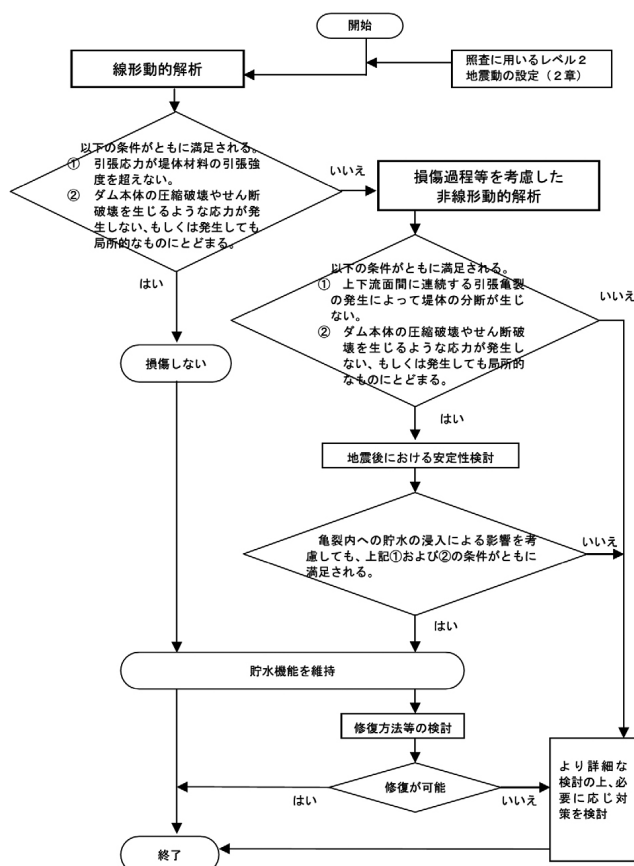
以上の内容は、いずれも「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」に位置づけられ、全国のダムでの耐震性能照査の試行に活用されている。



図—1 照査用下限加速度応答スペクトル¹⁾
（水平動に対するもの）※その後一部改定している



図—3 損傷過程を考慮したダム本体の非線形動的解析の例（重力式コンクリートダム）¹⁾



図—2 ダム本体の耐震性能照査の手順¹⁾
（重力式コンクリートダムの場合）

◆ 耐震性能照査法の運用と更なる改良（フェーズ2）

国総研では、指針（案）に基づくダムの耐震性能照査の試行開始にあわせ、より実務的な取扱いや事例を示した技術資料¹⁾を作成・刊行しつつ、現場からの技術相談に継続的に対応してきた。これにより、全国的な耐震性能照査の試行が進んだ。

なお、2011年の東日本大震災（平成23年東北地方太平洋沖地震）ではダム地点で多数の地震動記録が得られ、これをもとに地震動推定式（ダムの距離減衰式）の改良²⁾を行っている。

また、耐震性能照査の試行を通じ判明してきた実務上の課題への対応として、地震応答解析結果に影響を与える減衰定数等の解析パラメータを精度良く設定するための自己回帰モデルを用いたシステム同定法の利用など、強震時のダムの動的挙動をより精度良く推定できるようにするための研究も進めている。

一方、地震発生時の現地での安全確認（図-4）や復旧方法の助言など、ダム管理者への技術支援も積極的に行い、研究活動を進める上での現場ニーズ把握とノウハウ還元にも努めている。

◆ 関連する地震対策技術研究の展開（フェーズ3）

地震時を含むダムの安全管理の合理化・高度化を目的として、衛星SAR（合成開口レーダ）のデータを活用した変位モニタリング技術を開発⁴⁾し、ロックフィルダムでは数mm程度の変位も面的に把握可能なことを確認している（図-5）。また、地震動や常時微動データにより強震時のダムの振動特性の変化を捉える振動モニタリングを活用した構造的損傷の検知についての研究⁵⁾も進めてきている。耐震性向上技術の面では、今後の地震調査の進展等に伴い検討が必要となることも想定し、コンクリートダムでの堤体アンカー工や腹付工など耐震補強工事の効果について、解析的検討⁶⁾を通じて明らかにしてきている。



図-4 強い揺れを受けたダムでの安全確認（平成28（2016）年熊本地震³⁾）

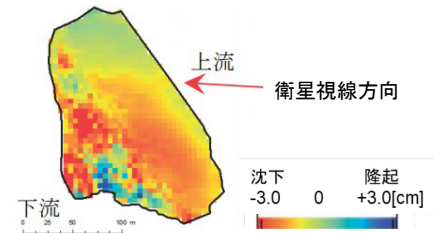


図-5 大規模地震前後の衛星SARデータから得られたフィルダムの変位（沈下量）分布⁴⁾

3. 関係する報告書・技術資料一覧

- 1) 国総研資料 244号「大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料」, 2005
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn000.htm>
- 2) 佐々木隆, 伊藤壮志: 東北地方太平洋沖地震を踏まえたダム基礎岩盤における地震動距離減衰式, 日本地震工学会論文集, 16(4), pp.80-92, 2016
- 3) 平成28年(2016年)熊本地震における国総研の活動(河川・ダム分野)
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0967.htm>
- 4) 佐藤弘行, 金銅将史, 小堀俊秀, 小野寺葵: 衛星SARによる19基のロックフィルダムの外部変形計測, 土木技術資料, 59(9), pp.36-41, 2017
- 5) 金銅将史, 小堀俊秀, 佐々木隆: 地震動がコンクリートダムの振動特性に及ぼす影響, ダム工学, 27(4), pp.265-278, 2017
- 6) 国総研年報(平成28(2016)年度調査・試験・研究の成果の概要)「ダムの補強手法に関する研究」
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/nenpou/kn28/kn28web004.pdf>

4. 今後の展望

今後、ダムの耐震性能照査技術については地震動観測データの蓄積や応答解析技術の改良を通じその更なる信頼性向上に努めつつ、リアルタイム地震情報やモニタリングデータとあわせ、地震時の危機管理に活用できるようにしていきたい。また、国内では例が少ないダムの耐震補強のための設計手法の確立、さらには地震を含む各種の不確実要因とその影響をより合理的に考慮できる構造設計や維持管理の手法の構築も今後の課題である。