

特集：将来の安全・安心な国土の礎となる土木技術

# ダムの耐震技術の向上に向けて

## —終局限界状態を考慮したコンクリートダムの耐震性能照査手法の開発—

金銅将史\* 切無沢 徹\*\* 小島裕之\*\*\* 山口嘉一\*\*\*\* 岩下友也\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

地震国であるわが国のダムは、河川管理施設等構造令に基づき、地震力を考慮した安定計算に一定の余裕（安全率）を考慮し設計されている。加えて、2005年に国土交通省より『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）<sup>1)</sup>』が公表されている。この指針（案）は、構造令で設計されたダムの耐震性能を照査するため、個々のダムサイトで想定される最大級の強さの地震動を設定し、当該地震動に対するダムの耐震性能をその損傷過程まで立ち入って照査する考え方を示している。また、最大級の地震動がダムに作用した場合でも確保されるべき耐震性能を定義している。このうち最も重要な耐震性能は、ダムに損傷が生じても下流域に被害が生じる制御できない貯水の流出を生じないことである。指針（案）はこれを「ダムの貯水機能が維持されること」と表現している。

現在、指針（案）は試行の段階にあるが、コンクリートダムの主要な型式の1つである重力式コンクリートダムの耐震性能照査は、具体的には主に次のような手法によって試みられている。すなわち、地震動による主要な損傷形態としてコンクリートの引張破壊に伴う亀裂の発生・進展を考慮し、有限要素モデルを用いた地震応答解析（非線形動的解析）を実施する。その結果、推定される亀裂がダム上下流面間に貫通して堤体を分断するものとならなければ、指針（案）が求めるダムの貯水機能は維持されると判定する方法である。

しかし、厳密には堤体が分断されないことと貯水機能が維持されることは同義ではない。ダム上下流面間に堤体を分断する亀裂が生じれば、漏水が増加したり復旧の困難性が高まることが予想されるが、最終的に分断面上のブロックが地震動や貯水から受ける力により不安定化し、転倒したり大きく滑動したりせず、かつ緊急的な水位低下措

置が行われれば、下流域に重大な被害をもたらす事態には至らないと考えられる。現状の照査解析は、貯水機能の維持という耐震性能が満足されるか否かの判断を貯水機能の喪失という真の終局的限界状態でなく、その一歩手前の状態である亀裂による堤体の分断で行われていると言える。このような方法は、照査条件の設定上、種々の不確実性が伴う点から安全側という意味で合理的とすることができるが、一方で、仮に亀裂による堤体分断が生じた後、ダムがどのような挙動をし、最終的に貯水機能の喪失が起こるまでにどの程度の余裕があるかを知っておくことは重要である。先の東北地方太平洋沖地震（2011年3月）では、ダムの安全性に影響が生じるようなコンクリートダムの顕著な被害は報告されなかったが、わが国では観測例がなかった極めて継続時間の長い地震動が観測された<sup>2)</sup>。このような事実も上記のような検討の必要性を示唆する。

以上のことを踏まえ、本稿では、図-1に示すように既往の照査解析では取り扱ってこなかった重力式コンクリートダムの堤体が亀裂により分断された後の挙動の解明を目的に、独立行政法人土木研究所水工構造物チームが実施してきた振動模型実験や数値解析による亀裂分断後のダムの挙動予測の試みについて、研究成果の一端を紹介する。

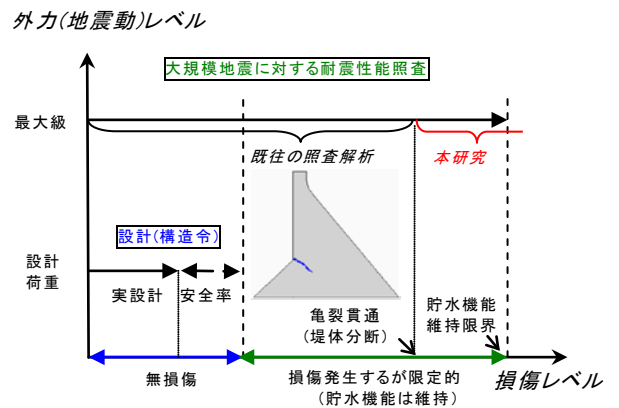


図-1 ダムの耐震設計・耐震性能照査と本研究の位置づけ

Towards the Establishment of Seismic Performance Evaluation Method for Concrete Dams considering the Ultimate Stability against Extremely Large Earthquake Motions

## 2. 振動模型実験と数値解析による亀裂分断後のダム堤体上部ブロックの挙動の解明

重力式コンクリートダムにおいて、上下流面間に連続する引張亀裂により堤体が分断された後も地震動が作用した場合、分断された堤体上部ブロックがどのように挙動するかを明らかにするため、写真-1の装置により振動模型実験を実施した。実験では、予め水平打継面を割裂分断させたダム模型（相似則を考慮し、低強度モルタルで作製）の下部ブロックを振動台上の水槽内に固定した上で上部ブロックを載せ、ダム模型の上流面側に湛水の上、水平方向に加振（正弦波）することで上部ブロックの挙動を観察した。

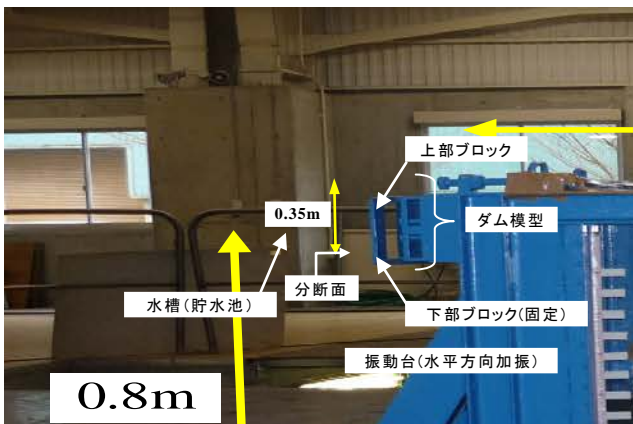


写真-1 振動模型実験装置

高速度ビデオカメラ画像より解析した上部ブロック分断面付近の2測点（上流寄り・下流寄り）の変位（水平・鉛直）の時刻歴の一例を図-2に示す。同図に示すとおり、作用させる加速度振幅を大きくすると上部ブロックがその上流端（貯水側）及び下流端を支点とするロッキングを生じるとともに、下部ブロックに対し、徐々に下流側に水平相対変位を生じる挙動（滑動）が捉えられた。

実験では、地震動の強さや分断面への貯水の浸入による揚圧力の有無が上部ブロックの挙動に及ぼす影響についても検討した。作用させた加速度の振幅と上部ブロックの下流方向への水平相対変位（滑動量）の関係を図-3に示す。なお、同図には再現解析（個別要素モデルを用いた動的（時刻歴応答）解析）の結果の一例も併記している。再現解析においては、分断面における上・下部ブ

ロックの衝突に伴う減衰力やせん断摩擦に関する抵抗力を考慮しているが、分断面への貯水の浸入による揚圧力の影響については、その適切な考慮方法が現時点で未確立のため考慮していない（実験及び再現解析の詳細は文献3）参照）。

図-3より、加速度振幅がある程度以上になると上部ブロックの下流方向への滑動が生じ、さらに加速度振幅が増加すると滑動量も増加することがわかる。また、分断面内への貯水の浸入によっても滑動量が増加することがわかる。以上の現象は、上部ブロックに作用する慣性力や動水圧の増加とともに、上部ブロックのロッキング発生による浮き上がりによって分断面内に貯水が浸入し、揚圧力が発生することで分断面の滑動抵抗が減少することが関係しているものと考えられる。

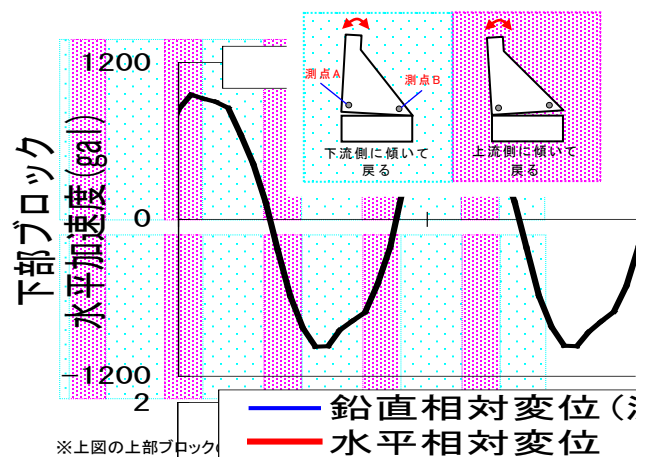


図-2 加振中の上部ブロックの挙動の一例（下部ブロックに対する相対変位の時刻歴）

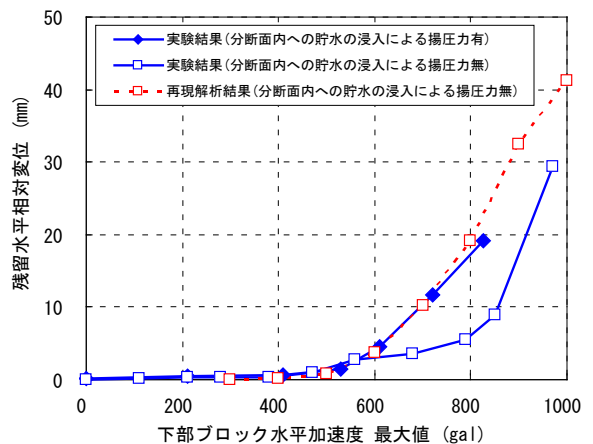


図-3 加速度振幅と上部ブロック滑動量の関係

### 3. 実際のダムを想定した挙動推定の試み

振動模型実験やその再現解析の結果を踏まえると、仮に極めて強い地震動により堤体の分断が生じ、かつその後も強い地震動が作用した場合、実際のダムにおいても上部ブロックのロッキングや下流方向への滑動が生じる可能性がある。このような事象が実際の重力式コンクリートダムで確認された事例はなく、既往の照査解析でも想定される地震動以上の極端に強い地震動を考慮しないと引張亀裂による堤体の分断は生じにくい。しかし、ここでは仮に実際のスケールのダムでこのような事象が生じた場合のダムの挙動を振動模型実験の再現解析と同様の数値解析手法により推定することを試みた。

本解析で使用した解析モデルを図-4に示す。ダム堤敷への入力地震動（加速度波形）は、図-5に示すわが国のコンクリートダムの基礎部で観測された既往最大級の地震動の加速度波形（水平最大加速度約500gal）及びその加速度振幅を2倍に引き伸ばした波形（水平最大加速度約1000gal）とした。

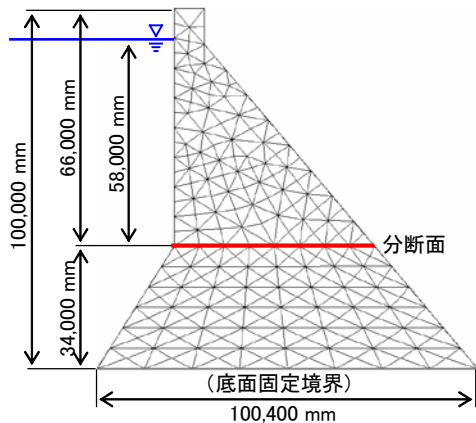


図-4 解析モデル（実ダム規模）

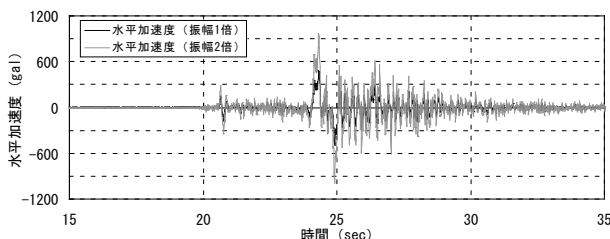
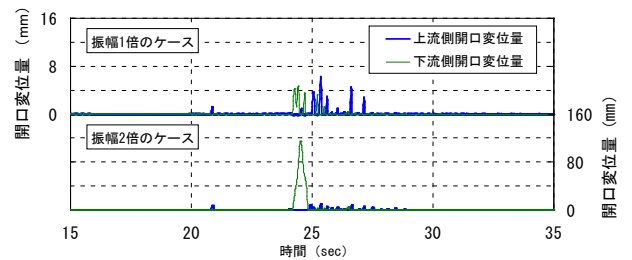


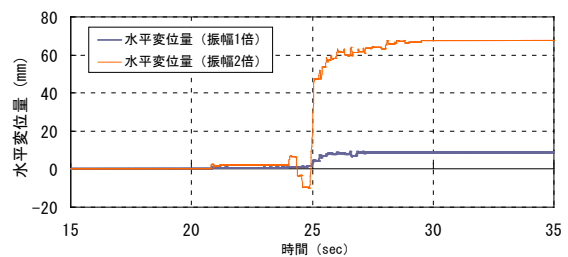
図-5 入力地震動

以上の条件での解析結果（地震動による分断面の開口変位量及び上部ブロックの水平変位量（滑動量））を図-6に示す。振幅1倍（最大加速度約500gal）のケースでは分断面の鉛直変位及び下流側への残留変位は殆ど生じないが、振幅2倍（最大加速度約1000gal）のケースでは、振幅1倍のケースに比べ、やや大きな開口変位及び水平変位が生じる結果となり、振動模型実験と同様のロッキングや滑動が生じるものと推定される。しかし、後者のケースにおいてもロッキングによる上部ブロックの転倒は生じない。また、滑動量も小さく、ダムの構造上、制御できない貯水の放流が生じるとは考えにくい。よって、貯水機能の喪失という終局状態には至らないものと考えられる。

なお、図-3に示した振動模型実験の再現解析と同様、本解析では、分断面内への貯水の浸入による揚圧力を考慮していない。しかし、図-3に示した振動模型実験の結果を考慮すると、解析上この影響を考慮した場合、より滑動量が大きく算定される可能性がある。この点については、今後、振動模型実験結果の詳細な分析や分断面内への浸入水の挙動とその影響に関する理論的考察等により、適切かつ実用的な考慮方法を確立する必要がある。



(a) 開口変位量



(b) 水平変位量（滑動量）

図-6 モデル解析結果（実ダム規模）

#### 4. まとめ

本研究により、重力式コンクリートダムが極めて強い地震動を受けることにより堤体分断が生じ、その後も地震動が作用し続けるという極限的な状況において、指針（案）が求める「貯水機能」が維持されなくなる真の終局的状態（上部ブロックの不安定化により制御できない貯水の流出が生じる状態）に至るまでに生じるであろうダムの挙動（上部ブロックのロッキングと滑動）が概ね明らかとなった。また、このような状態において発生するロッキングや滑動は地震動が強いほど生じやすく、分断面内への貯水浸入にも影響されることがわかってきた。これらの知見を踏まえれば、本研究で試みた手法により、仮に堤体の上下流面間を貫通する亀裂の発生が予想される場合でも、さらに堤体ブロックの分断が生じたものとして上部ブロックの終局的な安定性を評価し、最終的に貯水機能の喪失が生じるか否かの観点からダムの耐震性能を照査することが可能になると考えられる。

ただし、実際の耐震性能照査への適用には、いくつかの課題も残されている。例えば、既に触れたように、現在の解析手法では、分断面への貯水の浸入による揚圧力の影響が考慮できていない。この点については、平板間の流れに関する抵抗則の適用によってロッキング中に上部ブロックに作用する動的な揚圧力を考慮する方法などについて、

現在検討を進めているところである。また、実際のダムでは、上部ブロックが最終的に安定した状態で貯水位を低下できれば、堤体の分断が生じても下流への被害は生じないが、残留変位が大きければ、止水機能上の問題や復旧が極めて困難となる点も問題となりうる。このような点も考慮し、予想される残留変位量に応じた照査結果のより詳細な判断指標を整備することも実務面で必要と考えられる。今後は、これらの点などについて、貯水機能の喪失という終局的状態まで考慮できるダムの耐震性能照査法の確立を目指し、引き続き研究を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国土技術政策総合研究所資料第646号、  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0646.htm>  
土木研究所資料第4202号、2011.7
- 3) Iwashita, T., Kirinashizawa, T., Yamaguchi, Y., Kojima, H. and Fujitsuka, Y.: Table Test of Concrete Dams with Penetrated Cracks and DEM Analysis Simulation, International Symposium, The 79th Annual meeting of ICOLD, 2011

金銅将史\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ水工構造物チーム 総括主任  
研究員  
Masafumi KONDO

切無沢 徹\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ水工構造物チーム 研究員  
Toru KIRINASHIZAWA

小島裕之\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ水工構造物チーム 交流研究員  
Hiroyuki KOJIMA

山口嘉一\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループ水工構造物チーム 上席研究員、博（工）  
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

岩下友也\*\*\*\*\*



国土交通省近畿地方整備局福井河川国道事務所 所長（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所水工研究グループダム構造物チーム総括主任研究員）  
Tomoya IWASHITA