

嵩上げ重力式コンクリートダムの大規模地震時挙動の推定

金銅将史・志田孝之・佐々木 隆・榎村康史

1. はじめに

ダムは極めて長期にわたって治水・利水などの機能を発揮し続けることが求められる構造物であり、その供用期間中には流域の降雨・流出特性や水利用の変化など治水・利水需要の変化への適応が求められることがある。その際、新たなダム建設によらず、既設ダムを有効利用し、その改造などにより機能の増強や再編を図るダム再開発事業が現実的選択肢となることがあり、近年比較的規模の大きな実施・計画事例が増えつつある。

一方、地震国であるわが国では、大規模地震に対する土木構造物の安全性の確保が極めて重要である。このため、河川管理施設等構造令に基づき震度法により設計されたダムについても、個々のサイト周辺で考えられる具体的な地震による最大級の地震動を考慮した大規模地震に対する耐震性能を照査する試みが進められている。この照査方法を示した指針（案）¹⁾（以下「指針」という。）では、動的解析法を基本とする数値解析を用い、必要に応じその損傷過程まで立ち入って大規模地震時の挙動を推定し、制御されない貯水の流出が生じないことなどを確認することとされている。しかし、再開発ダムの耐震性能照査の考え方については明記されておらず、個々の事業において個別に検討されているのが実情である。

このため、本稿では、堤体改造を伴うダム再開発事業の中で最も代表的な方式の1つである重力式コンクリートダムの嵩上げを行う場合を取り上げ、その耐震性能照査方法の確立に向けて実施している大規模地震時における挙動推定のための数値解析による検討の結果を報告する。

2. 嵩上げダムと新設ダムの相違

既設重力式コンクリートダムの嵩上げを行う場合、その構造設計の基本となる断面設計法として、従来から広く適用されている垣谷の方法や、最近

適用例が増えつつあるより実際的な荷重増加条件を考慮した方法がある²⁾。いずれの方法も震度法と弾性論に基づく梁理論を組み合わせた許容応力度設計法であり、嵩上げ前の既設堤体への作用荷重に嵩上げに伴う荷重増加を考慮しても、新設ダムと同等の余裕（安全率）をもってダム堤体の安定性が確保されるよう堤体横断面形状を定めるのが基本的考え方である。

ここで注意しなければならないのは、嵩上げ後に生じる常時（非地震時）の応力は、嵩上げ前の既設ダムで既に生じている応力状態に嵩上げに伴う荷重増分が作用することによる応力再配分が生じた結果であり、嵩上げ後のダムと同一断面形状・水位条件の新設ダムの応力状態とは異なることである。このため、これに地震力の影響が加わる地震時の応力状態も新設ダムとは異なってくる。

3. 嵩上げダムの大規模地震時挙動の解析³⁾

3.1 解析の目的・条件

大規模地震時における嵩上げダムの挙動を推定し、耐震性能照査において着目すべき留意点を明らかにすることを目的として、図-1に示すような嵩上げダムの2次元有限要素モデルを用いた地震応答解析（線形及び非線形動的解析）を実施した。

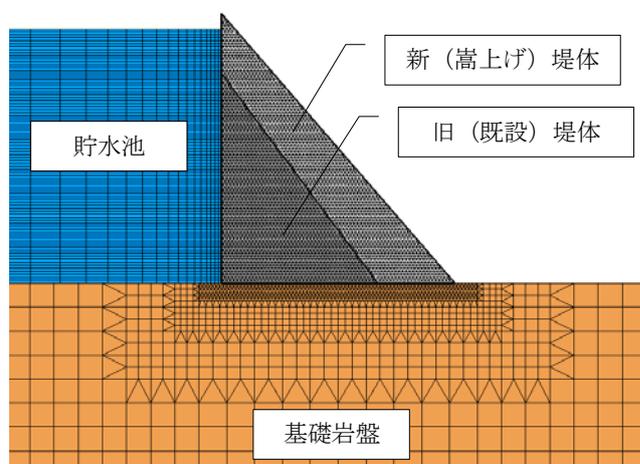


図-1 嵩上げダムの解析モデルの一例

表-1 解析ケース

ケース (モデル)	堤高(m)		水位(m)		下流面勾配	
	既設 堤体	嵩上 げ後	施工 時	嵩上 げ後	既設 堤体	嵩上 げ後
1 新設	90		85		0.86	
2 嵩上げ大	50	90	40	85	0.71	0.86
3 嵩上げ中	70	〃	56	〃	0.74	〃
4 嵩上げ小	80	〃	64	〃	0.75	〃

注) 上流面勾配は鉛直。施工時水位は(既設)堤高の80%。

解析モデルは、代表的な嵩上げ方式の1つである既設重力式コンクリートダムと同一ダム軸上で下流面側に嵩上げ・増厚する場合を対象とし、また嵩上げ後断面と同一断面の新設ダムも対象とした。嵩上げダムのケースについては、嵩上げ後の堤高が同一でも嵩上げ規模(既設堤高に対する嵩上げ後堤高の比)が相違することによる影響を確認するため、嵩上げ規模が異なる3ケースについて検討した。検討ケースを表-1に示す。なお、嵩上げダム各モデルの断面形状のうち、既設堤体の下流面勾配は、新設ダムとして最も合理的な断面(水平震度0.10、揚圧力係数0.33の場合に転倒に対する安定性を満足する最も急な勾配)、嵩上げ後の堤体及び新設ダムの下流面勾配は、表-1のケース3のモデルに垣谷の方法を適用し、重力式コンクリートダムの基本設計条件の1つである上流面に引張応力が生じない条件を満足する最も急な勾配(同一値)とした。なお、この断面形の場合、他の基本設計条件である着岩面付近のせん断に対する安全率が4以上となる条件は、着岩面付近の基礎岩盤の強度が重力式コンクリートダム基礎として一般的なもの(ここでは、内部摩擦角が45°のとき純せん断強度が1.6N/mm²程度以上)であれば満足する。

解析に用いた物性値は、堤体・基礎岩盤とも密度2300kg/m³、弾性係数25000N/mm²とし、ポアソン比は堤体0.2、基礎岩盤0.3とした。

3.2 解析結果

3.2.1 常時(非地震時)における応力状態

はじめに、常時(非地震時)におけるダム堤体内の初期応力状態を線形解析により求めた結果を図-2に示す。発生応力の最大値は、圧縮応力については同図のB点(既設堤体部下流端)またはC点(下流端)、引張応力についてはA点(上流

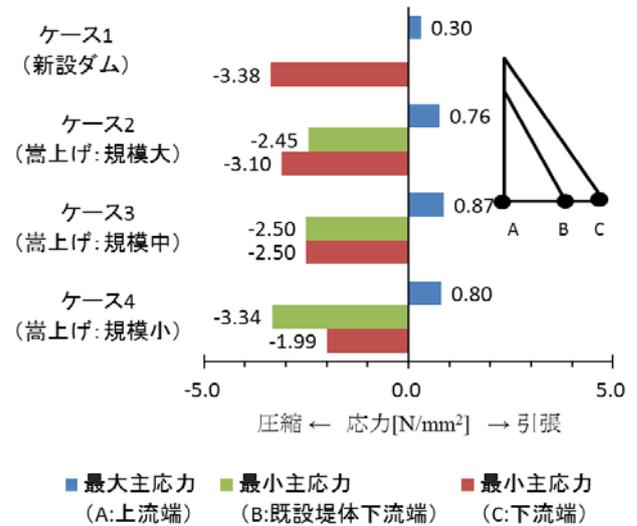


図-2 常時(非地震時)の堤体内発生応力(新設ダム及び嵩上げダム(規模別)比較)

端)で生じるが、いずれも新旧堤体コンクリートの弾性係数に対応する圧縮強度(24N/mm²程度)および引張強度(2N/mm²程度)に比べ十分小さいことが確認できる。なお、嵩上げダムにおいて、嵩上げ規模が大きければ新設ダムと同様に堤体下流端部(図-2のC点)で圧縮応力が最大となるが、嵩上げ規模が小さく(薄く)なると新旧堤体接合面の既設堤体側(図-2のB点)の圧縮応力の方が相対的に大きくなるのがわかる。

3.2.2 大規模地震時における挙動

次に、大規模地震時における嵩上げダムの挙動を推定するため、入力地震動として、平成7年兵庫県南部地震時に震源近傍ダムの基礎部で観測された加速度波形を指針に規定される照査用下限加速度応答スペクトル¹⁾に適合するよう振幅調整した波形(水平最大加速度341cm/s²、鉛直最大加速度213cm/s²)を用い、動的解析を実施した。

(1) 線形解析

解析は、まず堤体コンクリートの引張破壊を考慮しない線形動的解析を行った。その結果得られた地震動作用中における堤体内の主応力の最大値の分布を図-3に示す。同図より、大規模地震時に堤体内に生じる圧縮応力(最小主応力の負の最大値)はコンクリートの圧縮強度より小さいが、引張応力(最大主応力の正の最大値)は堤体上流端部(図-2のA点付近)において、局所的ではあるが引張強度を超え、その値は新設ダム(ケース1)より嵩上げダム(ケース2~4)の方が大きい。また、各ケースとも上流端部より小さいものの下

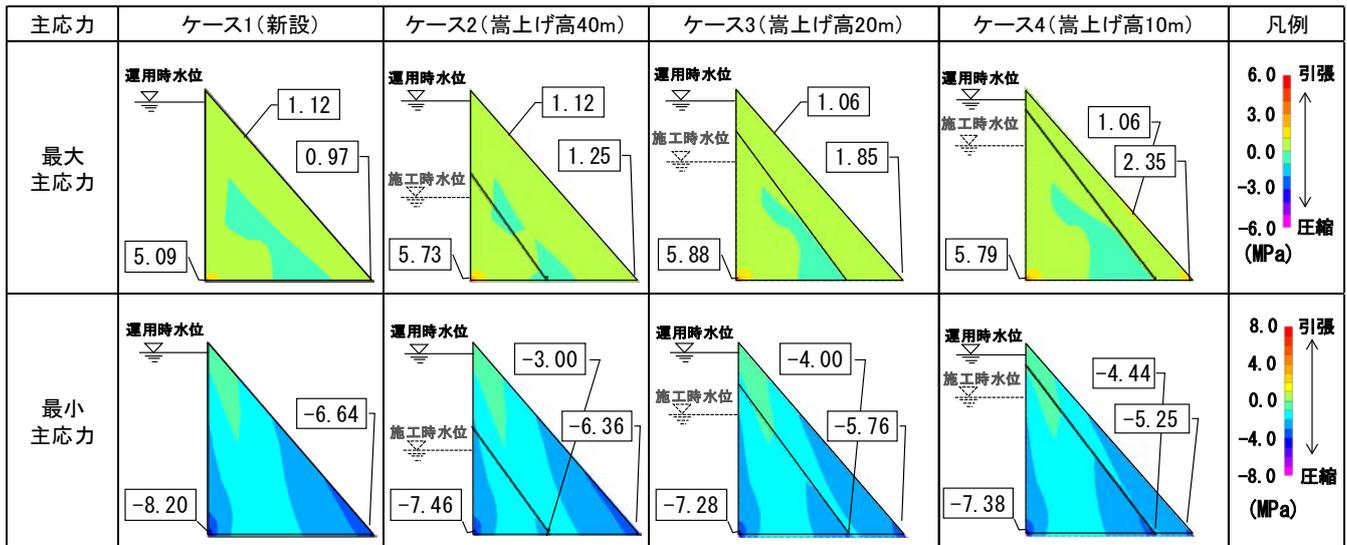


図-3 大規模地震時(最大水平加速度 341cm/s²)における堤体内最大発生応力の分布(引張:正)

流面側でも引張応力が計算された。その大きさは新設ダムより嵩上げダムで大きく、嵩上げ規模が小さいケース4では引張強度程度となっている。すなわち、嵩上げダムでは、新設ダム以上に上流端部の引張応力、また特に下流面を薄く嵩上げするケースでは下流面側の引張応力にも注意を要することがわかる。

(2) 堤体の損傷過程を考慮した非線形解析

線形解析の結果、局所的ではあるがコンクリートの引張強度を超える引張応力が計算されたことから、図-4 に示すコンクリートの引張軟化構成則を考慮した非線形動的解析を実施した。図中の引張軟化開始応力は、コンクリートの引張強度相当とし、破壊エネルギー G_f [N/m]の値は、堤体コンクリートの圧縮強度 f_{ck} [N/mm²]及びダムコンクリートの一般的な最大骨材寸法 G_{max} (=150mm) から式(1)をもとに設定した。

$$G_f = (0.79G_{max} + 80) \times (f_{ck} / 10)^{0.7} \quad \text{式(1)}$$

なお、非線形解析では、引張軟化による損傷

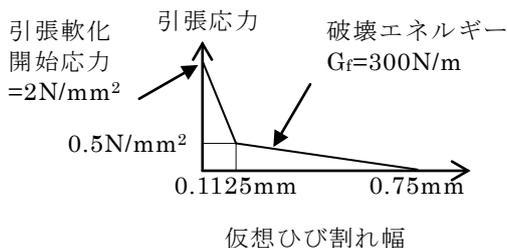


図-4 非線形解析における引張軟化構成則

(ひび割れ)形態を明確に把握するため、入力地震動は線形解析と同一の加速度波形(以下「1倍ケース」)のほか、その加速度振幅を2倍にした波形(以下「2倍ケース」)でも解析した。その結果得られた引張軟化による損傷範囲を図-5に示す。同図より、1倍ケースでは線形解析で最も大きな引張応力が計算された堤体上流端から損傷が発生し、2倍ケースでは同損傷範囲が広がるとともに、下流端部や下流面からも損傷が生じる可能性があることがわかる。なお、堤体上流端部からの損傷範囲は、新設ダム(ケース1)に比べ嵩上げダム(ケース2~4)の方がやや深くなった。また、2倍ケースで生じる下流面側の損傷範囲は、嵩上げ規模が小さい嵩上げダムでは、新旧堤体接合面に達するものとなった。

指針では、耐震性能を満足する要件として、引張破壊による損傷が生じても上下流面間に貫通して堤体を分断するものとならず、貯水機能が維持されると判断できることなどを挙げている。嵩上げに際しては、新旧堤体接合面が潜在的弱部とならないよう既設堤体表面のチッピングやモルタル敷が行われるほか、温度応力を考慮し、必要に応じ補強鉄筋を設置するなど入念な一体化処理が行われる。これにより新旧堤体が一体的に挙動するならば、本解析例の場合、コンクリートの引張軟化に伴う損傷の点からは所要の耐震性能が確保されると判断できるが、実際の照査では接合面の状態を適切に考慮する必要があると考えられる。

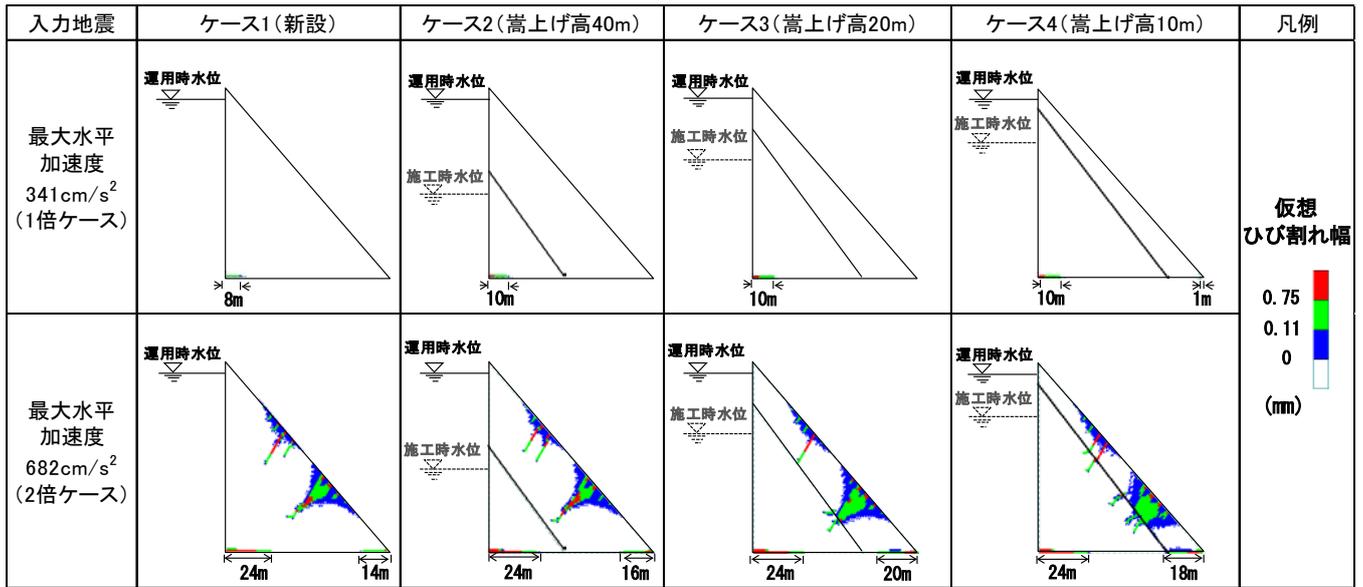


図-5 大規模地震時におけるコンクリートの引張軟化による損傷範囲

4. まとめ

嵩上げダムでは、新設ダムと同等の転倒や滑動に対する安全率を考慮した断面設計を行っても、嵩上げ後堤体内の常時（非地震時）及び地震時の応力状態は同一断面の新設ダムと異なるものとなること、また大規模地震時に生じる局所的な引張応力が新設ダムより大きくなり、堤体コンクリートの引張破壊による影響についても確認する必要があることがわかった。なお、本稿では、嵩上げダム堤体内の応力分布や引張破壊による損傷範囲に着目して考察したが、実際の耐震性能照査では、このほかにも新旧堤体やその基礎岩盤の物性の相違など諸条件を考慮する必要がある。これらの点

を含め、また、堤体削孔による放流管設置など他の方式も含め、再開発ダムの耐震性能照査法の確立に向け、引き続き研究を進める予定である。

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) 佐々木隆、山口嘉一、金剛健一、高藤啓：重力式コンクリートダムの合理的な嵩上げ設計手法、土木技術資料、第49巻、第1号、pp.24～29、2007.1
- 3) 切無沢徹、金剛将史、佐々木隆：嵩上げ重力式コンクリートダムの地震時挙動解析、ダム工学会研究発表会、2012.11
- 4) 堀井秀之、内田善久、柏柳正之、木全宏之、岡田武二：コンクリートダムの耐力評価のための引張軟化特性の検討、電力土木、No.286、pp113～119、2000.3

金剛将史



(独)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

志田孝之



(独)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
 Takayuki SHIDA

佐々木 隆



国土交通省国土技術政策
 総合研究所河川研究部大規模
 河川構造物研究室長 (前)
 (独)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 首席研究員
 Takashi SASAKI

榎村康史



(独)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 首席研究員
 Yasufumi ENOMURA