

5.2 リスク評価に基づくダムアセットマネジメント計画手法に関する研究

研究年度：平成30年度

研究分野：ダムのリスクマネジメントに関する研究

調査研究名：リスク評価に基づくダムアセットマネジメント計画手法に関する研究

研究者：川崎秀明*、高須修二

【要約】

ダムは最重要級の社会資産であるが、地震や洪水など低頻度の確率時に起こりうる様々な安全上のリスクが存在するのも事実である。当研究は、これらのリスクに対して定量的に評価を行うための合理的な手法を研究するものであり、平成24年（2012年）度に自主研究を開始し、「ダムリスク管理手法研究会」を通じて、イベントツリーによるPFM（潜在的損壊モード）分析の現地適用について研究活動を行ってきた。平成30年度は、研究の枠を拡げて、リスク評価を複数のモデルダムのアセットマネジメントに用いた場合の研究を行った。欧米豪では、実際のダム事故を起因にリスク評価をベースとしたダムのアセットマネジメント（Risk Based Asset Management）が普及し、既設ダムの安全確保に活用されているが、国内における適用に役立てば幸甚である。

【キーワード】

リスク、アセットマネジメント、計画手法、ダム、堤体、洪水吐き、イベントツリー

【背景・目的】

欧米豪のダム管理においては、ダムの安全性に関するリスク分析に基づいてリスク要因を抽出し、リスク（被害×確率）のより大きな対策（補修、補強、更新等）を優先させることで、予算平滑化による長期的なアセットマネジメントを実施している。このアセットマネジメントには、現基準への適合、計測データや図面類の整理、定期点検、施設管理体制等の全てが組み込まれる。

国内でも平成23年東北地方太平洋沖地震を機にリスク管理に関する研究の気運が高まったが、欧米の事例は、国内ダムの安全管理の推進においても大いに役立つと考えられる。

当センターでは、平成24年度から「ダムのリスクマネジメントに関する研究」を開始し、リスク評価の試行の場として、5年間にわたって某自治体の管理数ダムにおいて、健全性評価や安全管理に関する受託業務を活用してきた。30年度業務においては既往の業務成果と研究成果をもとに、ダムのアセットマネジメント計画（年次展開長期計画）を作成した。

具体的には、自治体管理の数ダムにおける技術課題を明確化した上で、必要な対策項目を検討し、これらを年次展開させることで、長期的な年次計画（長期ロードマップ）にまとめた。これが管理数ダムのアセットマネジメント計画のスタート案となるが、様々な想定に基づくことから、計画進展とともに適宜修正することが肝要である。

当論文においては、自治体管理の数ダムを3モデルダムに仮想化して、リスク評価をベースとしたダムアセットマネジメント（Risk Based Asset Management）計画を作成し、手法として整理した。

【研究経緯】

当センターの自主研究である「ダムのリスクマネジメントに関する研究」の経緯を下記に要約する。

平成24年度は、基礎的研究として海外文献を収集し、リスク分析の主な手法であるPFM（潜在的損壊モード）分析の国内適用における課題を整理した。

平成25年度は、全国のダム地点の既往地震計測データをもとに地震リスクの確率統計処理を行い、ダムにおける地震確率評価マップの作成を行った。

平成26年度は、地震確率評価のごく低頻度確率の修正を行うとともに、外力（洪水と地震）の確率評価手法について文献の整理・分析を行い、国内適用のためのPFM分析の手法検討を行った。

平成27年度は、経年劣化の進んだ2ダムを対象として、専門家チームによる試行的なダム機能に対するリスク分析を現地調査に基づいて行った。

平成28年度は、静的荷重による事象展開の国内ダムへの適用を考慮したPFM分析の手法を検討し、専門家チームによる模擬的なリスク分析を行った。

平成29年度は、引き続き海外文献の整理・分析を行うとともに、文献をもとに過去に事故を起こした数ダムにおけるPFM分析適用の検討を行った。

以上のように、昨年度までの自主研究によってリスク分析の方法をかなり明確化することができた。

一方、2015年に米国FEMAからダムリスク管理に関する最終指針が刊行され、国際ダム会議でも各国の成果が取りまとめられつつある。

そうした中、国内既設ダム管理の支援となるようなより実践的な試みとして、平成30年度からは、リスク研究のアセットマネジメント適用に軸足を移して、新たな技術展開を進めていくことにした。

【平成30年度の研究成果】

(1) ダムアセットマネジメント計画作成の流れ

「Model A、Model B、Model C」の3ダムにおいて堤体、洪水吐き及び取水施設に関するアセットマネジメント計画作成を行った。

モデル化自体は、健全性、安定性、流下能力等に関する平成26～30年度に実施した自治体管理数ダムの各種調査をもとに行ったが、計画手法の提案が論文目的であるので、仮定や複数ダム組合せを入れて条件をわかり易くした。

手順的には、過年度の施設の健全性評価（堤体・洪水吐き、および取水設備）を整理し、これに今年度調査・検討結果を反映させて、最新の健全性評価とした。堤体、洪水吐き及び取水放流設備の健全性評価を行い、堤体および洪水吐きに関する年次展開案の項目立てを行った。

これに、維持管理計画、堆砂対策、その他事項を追加して個別ダム毎に長寿命化計画を作成した。また、合理的なアセットマネジメントに資するために、個別ダムの補修・補強対策、堆砂対策等の優先度を考慮したアセットマネジメント計画を作成して年次展開の提案を行った。

図-1にアセットマネジメント計画作成のフロ

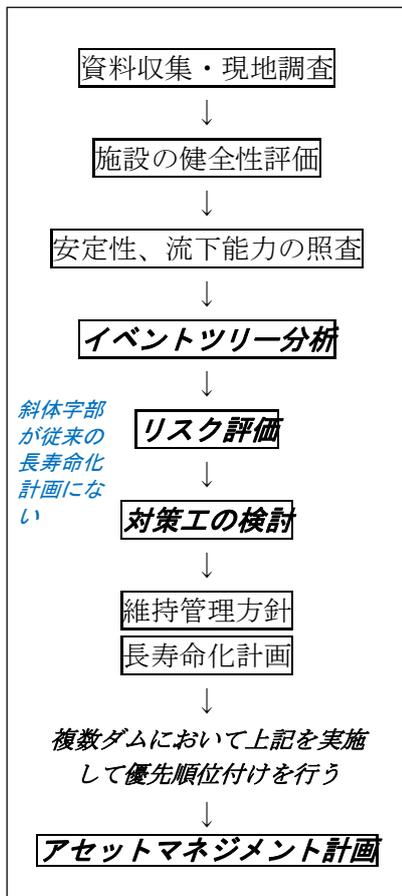


図-1 リスク評価に基づくアセットマネジメント計画作成のフロー

一図を示す。一方、国土交通省管轄のダムにおいて近年作成されている長寿命化計画は、「施設の健全性評価（堤体・洪水吐き評価＋ゲート等機械類・電気通信設備）、維持管理計画、技術課題と今後の方向」等から成る。アセットマネジメント計画が長寿命化計画と違うのは、斜体文字の「イベントツリー分析、リスク評価、対策工事検討、複数ダムにおける優先順位付け」等のリスク関連事項を含むことである。

即ち、現在の長寿命化計画の多くが、点検や計測管理主体の計画となっているが、アセットマネジメント計画は、リスク評価に基づく積極的な補強や再開発によって、既設ダムの機能を保持するまたは高めることを目標としている。

リスク評価については、図-2, 3にイベントツリー（事象展開図）によるリスク分析例を示すが、地震、洪水、湛水等の外力によって、各ダムにある弱部がどのように危険側に事象展開しうるかを定量的に評価する。リスク管理上は、End Nodeに至る非常に低い発生確率を想定被害に乗じて、リスクとして評価する。よりリスクの高いダムは、予算配置上の優先順位が高くなる。

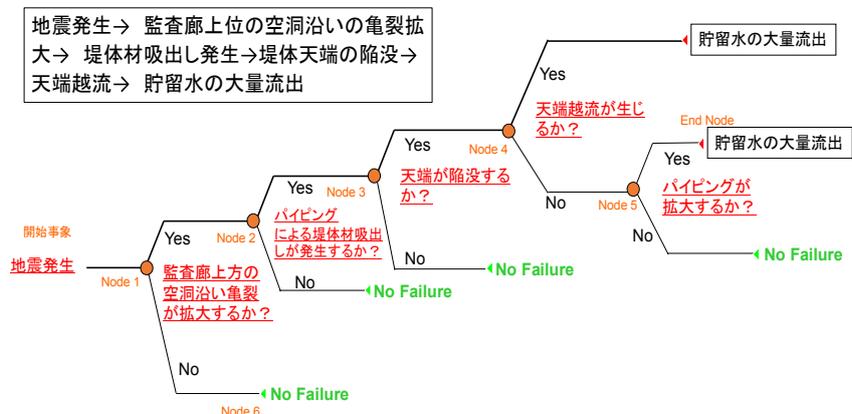


図-2 フィルダムの地震リスク分析例

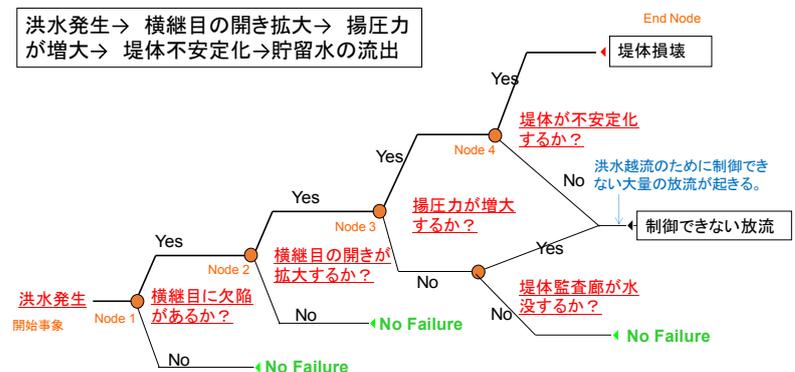


図-3 重力式コンクリートダムの洪水リスク分析例

(2) ダム別の技術課題の整理

点検等の現地調査に基づき土木施設に関する現況の技術課題の整理を行った。下表はそれを整理したものである。各ダムの特徴はあるが、全般的に以下のことが言える。

- ① 運用：水源としては Model A ダムが最重要だが、Model C ダムは治水上の重要性が高い。
- ② 計測：2年前の計測機器設置によって計測管理が可能となった。今後は、データを蓄積した時点で漏水量や揚圧力に対する貯水位や降雨量との関係性を分析する必要がある。
- ③ 堤体：Model A ダムは現状で洪水吐き側の安全性に問題がある。Model B ダムは転倒条件で河川管理施設等構造令を満足しない。

Model C ダムは揚圧力が高い可能性があるが、その場合、常時満水位ケースで構造令を満足しない。

- ④ 洪水吐き：Model A ダムと Model B ダムは流下能力に問題があり、構造令のダム設計洪水流量を満足しない。
- ⑤ 取水設備：3ダムとも铸铁製取水管であり、規定の厚みは確保しているが、ボルトや継ぎ手部は腐食が進み更新時期にある。
- ⑥ 貯水池：3ダムとも、貯水池内に不安定土塊は無い。Model C ダムは富栄養化の水質問題を抱えている。
- ⑦ 河川河道：Model A ダムの下流河道は未改修で、人家が密集している。

表-1 ダムの主要施設に関する現況および課題の整理

施設	チェック項目	Model A: 築 120 年、アースダム、堤高 25m、横越流型洪水吐き	Model B: 築 100 年、重力式コンクリートダム、堤高 20m、横越流型洪水吐き	Model C: 築 70 年、重力式コンクリートダム、堤高 50m、正面越流型洪水吐き
運用	利水、治水、使用頻度	貯水容量は中程度だが、自治体の基幹浄水場に隣接する最重要水源である。	貯水容量は小さいため、容量先使いの水運用を行っている。	最大の容量を持ち、半分は洪水調節容量（クレストゲートあり）である。
計測	漏水量、揚圧力、変位、浸潤線	H28 以降、漏水量、間隙水圧（浸潤線）、堤体変位を自動計測している。浸潤線は通廊周辺で低い。	H29 以降、漏水量、揚圧力を自動計測している。貯水位が高くなった時に漏水量が急増する。	H29 以降、漏水量、揚圧力を自動計測している。右岸側の揚圧力が高い。
堤体及び基礎	ひび割れ、漏水、変位・変形、変状、強度、表面劣化等	堤体下流面の堤趾付近に漏水跡が多く見られる。洪水吐き隣接部はパイピングが多く見られ、浸潤線上昇時は漏水量が急増する。連絡通廊内には泥分漏出等が見られ、遮水材料の流出が懸念される。	貯水位上昇時に左岸側地山基礎に漏水が見られる。堤体の鉛直排水孔の目詰まりと下流面植生繁茂から揚圧力は高いと推定される。内部の粗石の下に空隙が見られ、水みちとなっていると推定される。	下流面の横継目・水平打継目からの漏水、監査廊における遊離石灰多量析出、下流面表面侵食等のコンクリート劣化現象がある。監査廊内の多くの基礎排水孔が詰まっており揚圧力低減の機能が十分でない。
	堤体の安定性	最大断面においては各水位ケースとも必要なすべり安全率を満たす。洪水吐き接続部は必要なすべり安全率を満たさない。	常時満水位ケースの転倒条件を満たさない。常時満水位ケースの滑動条件は安全率の余裕がない。	各水位ケースとも転倒条件と滑動条件を満たす。ただし揚圧力が高い設定では常時満水位でNGとなる。
洪水吐き	越流部導流部減勢工	流入部から減勢工にかけて洗掘され、床版と側壁が損傷している。基礎構造の形状は不明。	カスケード式のシュート部は歴史的価値がある。床版、側壁等の健全性については今後調査を行う。	正面越流型の洪水吐き。堤趾部に三角状に開いたクラックがあるが、クラック深さと範囲は不明。
	洪水吐き流下能力	ダム設計洪水流量の流下能力は無いが、1/50 年洪水の流下能力はある	ダム設計洪水流量の流下能力は無いが、1/200 年洪水の流下能力はある。	ダム設計洪水流量の流下に対応できる。
取水設備	取水塔取水管	円形の堤体独立型タイプ。安定性に劣る面が元々あるが、漏水跡は少ない。取水管一部は 120 年経ち更新時期にある。	半円形の堤体付属タイプ。漏水跡は少なく壁面の健全性は保たれている。取水管一部は 100 年以上経ち更新時期にある。	半円形の堤体付属タイプ。内壁の水平打継目には遊離石灰析出が多く見られる。取水管一部は 80 年経ち更新時期にある。
貯水池	周辺斜面、堆砂、水質	総貯水容量に対する堆砂率は 20% と大きい。	堆砂量は総貯水量の約 4% と低い。	富栄養化が毎年生じる。総貯水量に対する堆砂率は約 6% と低い。
下流河道の状況		下流河道は未改修で、人家が密集している。	下流河道は未改修。	下流河道は 1/100 年の洪水に対して改修済み。

(3) 補修・補強・改良の必要性の整理

1) 構造の安定性（現行法令への適合）

3ダムは、現在の設計法となる昭和40年代以前の完成のため、河川管理施設等構造令（以下、構造令）の安定性検討において転倒、滑動等の安全性が不足することは否めない。

なお、構造令の施行以前に完成したダムには適用されない（既存不適合）とは言え、基幹施設の長期使用という点からは構造令など現基準に準じた構造安全性を有することが望まれる。この点、欧米豪では、主に1990年代以降にダムの安全管理が法令化されており、安全に関わる法令や基準の順守は義務となっており、堤体の補強工事が多く実施されている。

大規模地震に対する耐震性能照査については、厚労省の通達においても「国土交通省と同様の方法によって行う」ことが明示されており、水道ダムの場合も堤体及び関連施設の耐震性能照査を行い、耐震性を確認することになっている。

以上から、耐震に関する現安全基準を満足させるための既設ダムの補強は、必要であると位置づけた。

2) 洪水の流下能力（現行法令への適合）

国内法令上は、構造令で、「1/200年確率洪水流量、既往最大洪水流量、クリーガー流量」の最大値をダム設計洪水流量として満たす必要があるが、前項の構造安定性と同様に構造令の施行以前に完成したダムには適用されない。

一方、国内ダムにおいては近年、記録的な豪雨による計画外の超過洪水が多く発生しており、既設ダムの洪水流下能力の増強は急務である。また世界的にも、超過洪水が多く発生しており、洪水吐きの洪水流下能力を増大させる工事は多い。

このため、洪水流下能力に関する現安全基準を満足させるための既設ダムの改良は必要であると位置づけた。

ただし、構造令にあるダム設計洪水流量に対して、Model AダムとBダムの洪水吐き流下能力と下流河道の流下能力は、ともに大きく不足しており、構造令を満たすのは非常に難しい状況にある。そこで、当面の目標として「下流河道の流下能力以上かつ200年確率流量以上を満足する流下能力を確保する」ことで、洪水に対応することとした。

3) 堆砂と地球温暖化による水道供給能力の低下

堆砂の進行によって貯水容量が減ることで、水道供給能力などダム機能が低下するが、Model Aダムは総貯水容量に対する堆砂率が2割となるので、他のダムよりも堆砂対策を行う必要性が高いと言える。

(4) 年次展開案検討の前提条件

アセットマネジメントの年次展開を検討するにあたって、以下の前提条件を想定した。

- ① 対策工はダム別に検討する。対策工については、ダム毎に考えられる安全管理上のリスク（参照：後述参考1）を抽出し、必要な補修・補強・改良を採用する。
- ② 工期と工事費は、実施計画や施工方法によって大きく異なるが、概略設計前の基本検討段階であるので、標準的なものとする。工期、工事費ともに、十分に余裕のあるものとし、必要性の未検討の対策工についても、可能性が高ければ予定に入れる。
- ③ 対策工を行うダムの順序は、切迫度（現状の危険度合い、下流資産）、水道の安定供給、予算の平滑化等を勘案して決定する。
- ④ 現状の安全性に問題のあるダムの応急対策は最優先して出来るだけ早急に行う。
- ⑤ 貯水池低下の伴わない洪水吐き改良、漏水対策、揚圧力対策、堤体補強等の工事は、安全性確保にもつながるのでできるだけ早急に行う。
- ⑥ 水道の安定供給のために、貯水池低下の必要な改修は、現在進行中の代替水源の完成以降とする。今回は、代替水源の完成を10年後と仮定して、それ以降に貯水池低下が可能とした。代替水源の完成が遅れた場合は、その分、貯水池低下の必要な本格改修が遅れることになる。
- ⑦ 水道の安定供給のために、貯水池低下の伴う工事は同時期に2ダム以上にしない。
- ⑧ 予算の平滑化のために、同年度に大きな工事費が重ならないようにする。
- ⑨ 貯水池低下の要らない対策工を貯水池低下の伴う対策工の合間いかに入れるかが、予算平滑化のカギとなる。これらを分けると以下となる。
 - a. 貯水池低下の伴わない対策工： 止水工事、洪水吐き改良、揚圧力対策等の工事は貯水池低下は必要ない。越流部以外の洪水吐き改良や、上流面施工の無い耐震補強も貯水池低下は必須でない。
 - b. 貯水池低下の伴う対策工： 洪水吐き流入部改良、取水施設補強・更新（取水塔、取水管）、堤体補強（堤頂部切削、堤体

上流面腹付け等)、貯水池掘削等の工事は貯水位低下が必要である。

<参考1：安全管理上のリスクの抽出方法>

安全管理上のリスクは、連鎖事象の分析（イベントツリー分析）によって抽出されるが、詳細な現地調査、観測記録分析、応力・変形解析に基づいて緻密な損壊過程が描写（Description）され、連鎖の分枝点ごとに、最も可能性のある浸透の経路と、そこからダム機能阻害に至る進行が確率評価される。今回作業は基本計画段階であるので描写は省略し、経験的な考察に拠った。欧米豪のリスク分析においては、この損壊過程の描写が重要視され、リスク評価作業の多くを占める。

<参考2：水道におけるアセットマネジメント>

水道事業者におけるアセットマネジメントの基本は「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」（厚労省健康局水道課、2009年7月）に拠っている。これによると、水道におけるアセットマネジメントは、①必要情報の整備、②ミクロマネジメント（個別の水道施設ごとの維持管理）、③マクロマネジメントの実施（水道施設全体の視点からの中長期的計画）及び、④更新需要・財政収支見通しの活用（地域水道ビジョン等の計画作成）、の4つの要素で構成されるとしている。また、アセットマネジメントの検討期間を少なくとも30～40年程度の中長期とし、当該期間中の更新需要見通しに基づき財政収支見通しを検討することとしている。

現在は、「インフラ長寿命化計画（行動計画）平成27年度～32年度」（厚労省健康局水道課、2015年3月）において、必要な施策として「点検・診断／修繕・更新等、基準類の整備、情報基盤の整備と活用、個別施設計画の策定・推進、新技術の開発・導入、予算管理、体制の構築、法令等の整備」が示され、これに沿って各自治体でアセットマネジメントに基づく施設の維持管理や更新が行なわれている。当自治体においても10年間のアセットマネジメント計画が作成され、実践されている。

ただし、上記は配管や浄水場の資産管理を対象としたものであり、ダムを想定したものではない。このため、ダムについては、別途にアセットマネジメント計画が必要であり、当論文によるダムアセットマネジメントを提案した。

アセットマネジメント計画について検討フローを中心に以下述べる。ただし、本来の検討過程と比べて大幅に簡略化している。

(5) ダム別のリスク評価と年次展開検討

ダム別のリスク評価に基づいて対策工を採用し、より合理的な年次展開案を取りまとめた。

1) Model A ダムにおける年次展開案

① 安全上の想定リスク

安全リスクの高いと想定される連鎖事象を以下に記す。アースダムであるので、貯水位上昇によって既にある水みちや空洞の拡大につながる事象が進めば、堤体の大量流出やすべり等の重大な事象に至る可能性がある。リスクとしては、発生確率が高く展開も速い連鎖事象 B、C、D が大きく、応急対策が必要と考えられる。

- A. 連鎖事象 A： 大地震発生→独立型取水塔の倒壊→連絡通廊への貯流水流出→連絡通廊の破壊→堤体流失
- B. 連鎖事象 B： 洪水発生→シュート部～減勢工の床版破壊と側壁倒壊→流下洪水の阻害→洪水の堤防越流→堤体流失
- C. 連鎖事象 C： 貯水位上昇→洪水吐き隣接部のパイピングの拡大→堤体浸潤線の上昇→深い地すべりの発生→堤体流失
- D. 連鎖事象 D： 貯水位上昇→連絡通廊周辺の水みち拡大→堤体の陥没→浸入水による堤体吸出し→堤体流失

② 考えられる対策工

考えられる対策工を下記に示す。

- a. 応急対策（隅角部周辺のパイピング補修、止水工、盛土腹付け）
- b. 連絡通廊補修（周辺のグラウト充填）
- c. 洪水吐き改良（シュート部～減勢工の補修、流下能力の拡大）

貯水位低下後

- d. 洪水吐き流入部の改良（流下能力拡大）
- e. 洪水吐き隣接部堤体補修（堤体掘削、隅角部の盛土腹付け・・・止水性と耐震性を考慮）
- f. 取水塔の補修・補強、取水管の更新、水位低下設備の設置
- g. 堤体の耐震補強（上流面腹付け、断面不足箇所への盛土）
- h. 堆砂対策（貯水池掘削）
- i. その他（断面不足ヶ所の盛土等）

③ 年次展開案

左岸側堤体及び洪水吐きの諸調査を継続し、対策の必要な箇所について対策工の設計を行う。初期の近代アースダムとして文化財的価値が高いので、保全も考慮した改修計画とする。

対策工は、貯水位低下の不必要な応急対策、連絡通廊補修、洪水吐き改良を先に進めた上で、

代替水源完成後の貯水位低下が可能となった後に、洪水吐き隣接部堤体の補修、耐震補強（堤体、取水塔）、取水設備更新、水位低下設備設置、堆砂対策等を行うこととする。

現状の洪水と地震に対する安全性の問題と下流に人家が連坦することから対策工の順位は最優先となる。ただし主要工事に入るためには貯水位を低下させる必要があり、代替水源の確保が前提となる。

2) Model B ダムにおける年次展開案

① 安全上の想定リスク

安全リスクの高いと想定される連鎖事象を以下に記す。貯水位上昇によって、左岸にある水みちの拡大につながる事象が進めば左岸地山のすべり等の重大な事象に至る可能性がある。リスクとしては、発生確率が高く展開も速い連鎖事象 C が大きく、応急対策が必要と考えられる。

- A. 連鎖事象 A： 地震発生→堤体上流端着岩部のクラック発生→クラックの下流進展→クラック貫通による堤体分離→堤体の滑動
- B. 連鎖事象 B： 洪水発生→洪水吐きの流下能力不足→堤体越流→堤体一部の流失
- C. 連鎖事象 C： 貯水位上昇→左岸の地山パイピングの発生→パイピングの拡大→堤体の一部滑動

② 考えられる対策工

考えられる対策工を下記に示す。

- a. 応急対策（左岸の漏水箇所の止水）
- b. 洪水吐き改良（シュート部～減勢工）
- c. 堤体の耐震補強（堤体PSアンカー）

貯水位低下後

- d. 取水塔の補修・補強、取水管の更新、水位低下設備の設置
- e. その他

③ 年次展開案

堤体及び洪水吐きの諸調査を継続し、必要な対策について検討し、対策工の設計を行う。

対策工は、貯水位低下の不必要な応急対策を早急に行った上で、耐震補強（堤体）、洪水吐き改良（シュート部～減勢工）等を行い、貯水位低下後に、耐震補強（取水塔）、取水設備更新、水位低下設備設置等を行うこととする。

なお、「洪水吐き改良は貯水位低下の必要な流入部に及ばない、堤体補強は貯水位保持のまま工事可能な堤体PSアンカーを採用する」等の理由で貯水位低下は必須ではなく、代替水源の完成前に工事が可能である。

3) Model C における年次展開案

① 安全管理上の想定リスク

安全リスクの高いと想定される連鎖事象を以下に記す。堤内コンクリートからの遊離石灰の溶出が活発であり、堤体内の水みちの存在が懸念される。また、堤趾部のクラック進展による堤体分断が懸念される。貯水位上昇によって、これらの事象の拡大が進めば、堤体滑動等の重大な事象に至る可能性がある。リスクとしては、発生確率が高く展開も速い連鎖事象 B が大きく、応急対策が必要と考えられる。連鎖事象 C は進展が遅いが、いずれは対策が必要である。

- A. 連鎖事象 A： 大地震発生→堤体上流端着岩部のクラック発生→横継目開き拡大→堤体の変位・変形→クラック貫通による堤体分離→堤体の滑動
- B. 連鎖事象 B： 洪水発生→堤内水位の上昇→揚圧力の増大→堤趾部クラックの拡大による堤体分断→滑動抵抗長の減→堤体ブロックの滑動
- C. 連鎖事象 C： 堤内水位の上昇→水平打継目からの遊離石灰析出の増大→コンクリート溶脱による水みち拡大→堤体重量減少→堤体ブロックの滑動

② 考えられる対策工

考えられる対策工を下記に示す。

- a. 水質対策（曝気循環）
- b. 堤体の揚圧力対策（排水孔、堤内グラウチング等）
- c. 堤体の堤趾部クラック対策（堤趾部グラウチング、補修等）

貯水位低下後

- d. 堤体の耐震補強（上流面腹付け）
- e. 取水設備（取水塔、取水管）の補修、塔の補強、管の更新
- f. 水位低下設備の設置
- g. 堆砂対策（貯水池掘削）
- h. その他

③ 年次展開案

堤体及び洪水吐きの諸調査を継続し、必要な対策について検討し、対策工の設計を行う。

対策工は、貯水位低下の不必要な水質対策、揚圧力対策、洪水吐き改良を早急に行った上で、貯水位低下後に、耐震補強（上流面腹付け）、取水設備更新、水位低下設備設置等を行うこととする。

堤体の揚圧力対策、堤体・耐震補強については、調査と検討が進んでいないため実施の可否及び最適の工法は未確定である。このため、工期と工事費を適宜想定して年度展開案とした。

(6) ダムアセットマネジメント計画の年次展開

前節の年次展開を全体のダムアセットマネジメント計画とした年次計画モデルを表-2に示す。主要事項として以下が挙げられる。

① アセットマネジメント計画の準備期間として、計測設置、健全性調査、台帳整備などで5年かかっているが、定期的なダム管理が行われている場合は短縮できる。

② リスク評価上の優先度は「Model Aダム→ Bダム→ Cダム」であるが、各対策工の効率を考慮した結果、工事の完成順は「Model Bダム→ Aダム→ Cダム」となった。

③ 採用した対策工の工事を全て完了するまでに約20年かかる結果となった。各年度予算が絞られればこの期間はさらに延びるが、実施順位など基本的な枠組は変わらない。

表-2 ダムアセットマネジメントの年次計画モデル

分類	Model A: 築 120 年、アースダム、堤高 25m、横越流型洪水吐き	Model B: 築 100 年、重力式コンクリートダム、堤高 20m、横越流型洪水吐き	Model C: 築 70 年、重力式コンクリートダム、堤高 50m、正面越流型洪水吐き	全体
既往の補修・設置	H12: 天端から止水グラウト H17: 下流盛土を実施 H28: 計測設備設置	S61: 貯水池地すべり後に貯水池を下げて土砂搬出 H28: 計測設備設置	H28: クレストゲート補修 H28: 計測設備設置	H28~29 に各周辺環境整備を実施
定期的な調査	外観調査: H18, H26 堆砂測量: H4, H20, H26	外観調査: H18, H26 堆砂測量: S63, H27	外観調査: H18, H26 堆砂測量: H20, H25, H26	
1 年目 H26 年度	調査孔、3 軸試験、漏水追跡、計測設備概略設計	漏水、排水系統調査、計測設備概略設計	計測設備概略設計	計測方法検討
2 年目	調査孔、3 軸試験、計測設備設置、安定検討	調査孔、計測設備設置	調査孔、計測設備設置	ダム台帳整備、計測設備整備
3 年目	空撮・地上測量・図化、地質調査、流下能力評価、計測開始	空撮・地上測量、排水系統調査、計測開始	空撮・地上測量、計測開始	ダム台帳整備
4 年目	堤体安定解析 (2 次元)・洪水吐き境界部安定解析 (3 次元)	図化・図面修正、漏水調査、流下能力評価	図化・図面修正、流下能力評価	アセットマネジメント基本案
5 年目: H30 年度	洪水吐き調査、取水管健全性調査、応急対策検討	漏水調査・評価、取水管健全性調査	取水管健全性調査	アセットマネジメント計画作成
6 年目: R1 年度	応急対策設計: 左岸隅角部周辺、連絡通廊補修	応急対策検討		アセットマネジメント開始
7 年目	応急対策: 左岸隅角部周辺、連絡通廊補修	漏水対策設計: 漏水対策、排水処理	水質対策	
8 年目	〃			
9 年目	洪水吐き補修 (シュート部、減勢工)	応急対策: 漏水対策、排水処理	揚圧力対策	
10 年目	〃	〃	堤趾部クラック対策	
11 年目	〃	洪水吐き改良	〃	
12 年目	連絡通廊周辺グラウト工	〃		
13 年目	〃	耐震補強 (堤体)		
14 年目		〃		
15 年目		貯水位低下、準備工事		代替水源完成
16 年目	貯水位低下、準備工事	取水塔補強・取水管更新		
17 年目	接合壁構築、左岸隅角部補強	改修終了		
18 年目	〃、堆砂対策 (貯水池掘削)			
19 年目	〃、耐震補強 (上流面腹付け)			
20 年目	取水塔補強・取水管更新			
21 年目	〃、水位低下設備設置		貯水位低下、準備工事	
22 年目	改修終了		耐震補強 (上流面腹付け)	
23 年目			洪水吐き改良	
24 年目			取水塔補強、取水管更新	
25 年目			〃、水位低下設備	
26 年目			堆砂対策 (貯水池掘削)	
27 年目 R21 年度			改修終了	

(7) ダムの維持管理方針

アセットマネジメントにおいて定常的な維持管理をいかに行うかは非常に重要である。以下に維持管理方針の共通課題について概要を記す。

1) 計測データの蓄積

計測設備はダムの安全性を監視する上で不可欠である。3ダムとも、漏水量や揚圧力の計測を H28 年度末から開始したが、今後も継続し、計測データを蓄積した時点で貯水位、降雨量等との関係を分析して、経年的な傾向を把握することとしている。現在の計測設備は最低限のものであるが、必要に応じて拡充する計画である。

堆砂については、数年前から各ダム数年おきに水中ビーム測量を行っているが、ダムの実運用上の寿命に関わるので、今後も定期的な測量を継続することとしている。

2) 図面類の整備

設計の基となる 1/500 縮尺平面図の作成は、H30 年度に終了したが、今後も定期的に航空写真を撮影する計画である。特に、上流側の断面データが不足しているため、貯水位の低い時の航空写真を撮る必要がある。

3) 定期点検及び補修工事

定期点検を 3 年毎に実施し、その度に計測データを整理・分析すべきである。点検や補修については、記録や写真を出来るだけ電子化して保管し、今後の安全管理に活かす計画である。

4) ダム施設の維持管理体制の確立

ダム施設の機能と安全性の恒常的な確保のためには、予算と人員を適切に配分・配置することによる長期的な維持管理体制の確立が重要である。このことは、ダムを長期的に利用することの前提条件でもある。

(8) アセットマネジメント実施上の今後課題

1) 堤体安全性のリスク評価

構造令による安定性照査の結果、すべり、転倒、滑動等の安全性が不足することが判明した。ただし、設計条件によって安全性は左右されるため、計測の継続、削孔調査の追加、室内試験等で設計条件（揚圧力、浸潤線等）、物性値（単体重量、 c ϕ 等）の精度を高め、堤体安全性を再度照査すべきである。

2) 洪水流下能力のリスク評価

横越流型洪水吐きを持つ model A,B ダムは、測量の結果、設計洪水水位時の流下能力が構造令による規定と比べて著しく不足することが判明

した。ただし、構造令を満たす洪水流量を流下させるためには、洪水吐きの抜本改築が必要であり、下流河道の抜本改修を含めると、莫大な費用となる。実行可能な範囲で洪水流下能力を増大させるべきであるが、河川管理者との協議が必要である。

なお、横越流型洪水吐きを持つダムは、複雑な越流及び流下状況になることから、洪水吐き改良の設計にあたっては精査が必要である。

3) 対策工の精度

今回作業は基本計画段階であったので、対策工は経験的な考察に拠るところが大であった。各対策工の設計までに、各種調査を行い設計条件と物性値の精度を高め、対策工の設計において工費、工期の精度を高める必要がある。

4) リスク分析の精度

リスク分析の主要な手法である PFM 分析 (PFM: Potential Failure Mode, 潜在的損壊モード) は、潜在的な損壊過程を詳細に挙げてリスクの描写化を行うものである。

PFM 分析の主要ツールとしてイベントツリーがあるが、当論文で示したものは、ごく簡略化したものである。当自治体のアセットマネジメント計画においては、各種の計測・調査・解析を継続することで、描写の精密化を進め、リスク評価の精度を高めることを目指している。

欧米豪のリスク分析においては、この損壊過程の描写が重要視され、リスク評価作業の多くを占めるが、国内では取り組みが遅れている。

5) 堆砂と気象変動の渇水リスクへの影響

堆砂の進行によって貯水容量が減れば利水補給への悪影響が生じる。また、長期的な気候変動においては、流況が変わる（年総流量の変化、渇水の極端化）ことでも利水補給は影響を受ける。これらは、数十年を対象とするアセットマネジメント上は重要な影響要因となるため、今後検討を行う予定である。

6) 歴史建造物の保全

水道関係のダムは、古さゆえに歴史建造物としての文化財的価値が高いものが多い。補修・補強の際には、現形状の保全も考慮した計画とすべきである。

【謝辞】

本研究に貴重なご協力を頂いた、自治体関係者に心からお礼を申し上げます。