

特集：既設ダムの有効活用

長寿命化を目指したダム本体の合理的維持管理手法の開発

金銅将史・小堀俊秀・加嶋武志・佐々木 隆・榎村康史

1. はじめに

わが国では1900年以降およそ2500基のダムが建設されてきた。高度経済成長期に建設のピークを迎えたダムが供用開始後数十年を経過するなど長期供用ダムの数が増加している。このような中、長期的計画に基づき適時適切に所要の対策を講じていくことで安全性の確保と維持管理コストの低減を両立できる合理的な維持管理の実現がこれまで以上に求められている。以下では、そのために必要と考えられる ①長期供用ダムで生じる事象の把握、②ダム施設の健全度を点検等によりの確に評価するための診断技術、③長期供用に伴い健全度の低下が生じた場合にそれがダムの安全性や機能に与える影響の評価の方法、④長期供用ダムの特性を踏まえた合理的な維持管理の仕組みに関わるこれまでの調査・検討の一部を紹介する。

2. 長期供用ダムで生じる事象¹⁾

個々のダムの状態は、日々の点検、定期的な検査等によって把握され、その結果に応じ必要な対策が講じられている。しかし、ダムの長寿命化を考える上での基礎情報となる各種変状の発生状況について全国的な傾向は十分に把握されていない。このため、国内で供用中のコンクリートダム等の点検結果を調査し、報告された経年劣化の兆候と見られる事象の発生傾向などについて分析した。調査対象は1984年～2010年までの間に通常の日常点検や定期検査とは別にダム全体にわたるより詳細な点検が実施された国内の約120のダムである。その結果、対象ダムでは詳細な点検によってもただちにダム堤体の安全性に影響を及ぼす事象は見当たらなかったが、長期供用によるものと見られる堤体コンクリートの変状などいくつかの事象が報告されていることがわかった。代表的なものは、①コンクリートのクラック（ひび割れ）、継目の開き・ずれ、漏水、排水異常、エフロレッ

センス、鉄筋露出、摩耗、剥離・剥落などで、クラック（ひび割れ）や漏水の報告事例が多くなっている（図-1）。「その他の異常」は、安全管理を目的として計測・監視される漏水量、揚圧力、変位等の計測装置の不具合などである。なお、このうちダム特有の事象である漏水の発生が報告された比率を点検時における供用開始からの経過年数別に図-2に示す。図中の評価区分は対策の優先度で「評価A」が最も高く、以下「評価B」、評価C」、「評価-」である。これらをあわせ漏水が報告されたダムの比率は、供用期間が長いダムほど増加していることがわかる。

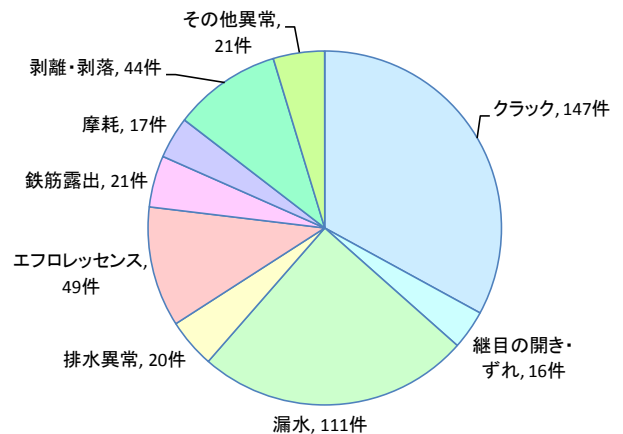


図-1 報告された事象の内訳¹⁾

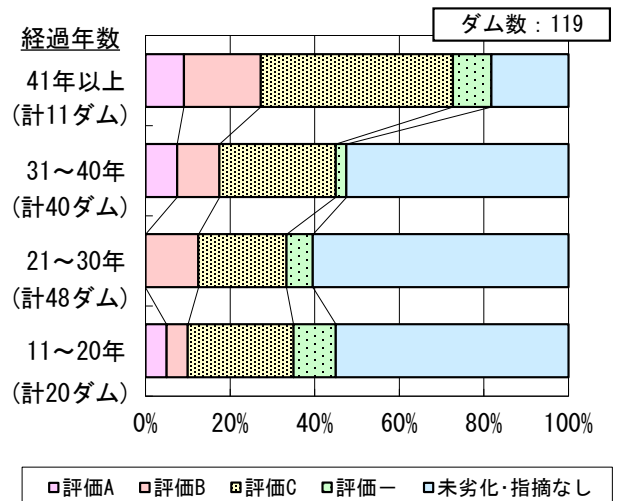


図-2 漏水の報告比率（経過年数別）¹⁾

Improvement of soundness and safety evaluation of dams for lifespan extension

3. ダム堤体の健全度診断^{2),3),4)}

ダム堤体の健全度を診断する技術として、例えば、コンクリートダムを赤外線カメラで撮影し、画像解析から剥離箇所などを把握する方法⁵⁾などがある。しかし、この手法は堤体表面のコンクリートの剥離を検知するには有効であるが、厚いコンクリートの内部の状態を知ることはできない。一方、堤体内部の調査には、堤体を削孔して得られたコアを観察する方法が用いられている。しかし、調査箇所が限定されるため、既に外観上何らかの変状が確認されている場合の詳細調査には適しているが、変状の有無も含め堤体全体の状態を広く調べたい場合には不向きである。

そこで、このような場合にダム堤体全体の健全度を簡易に診断する手法の1つとして、ダム堤体の振動特性の変化を検知する方法の適用性について検討しているところである。これは、ダム堤体の下部（基礎監査廊内）と上部で同時に常時微動を計測することで推定されるダム堤体の固有振動数に着目し、その変化（低下）の有無や程度によって、ひび割れなどによる構造体としての剛性低下を捉えようとするものである（図-3）。ダム堤体内のひび割れが固有振動数に及ぼす影響は、数値解析²⁾でも予測されており、固有振動数の変化を定期的にモニタリングすれば、健全性の変化を捉えられる可能性がある。これにより、相対的に変状が進行している疑いがあり、詳細調査を行うべき箇所の抽出につなげるなど、より効率的な調査・対策に役立つ可能性がある。

ただし、ダム堤体の固有振動数は、貯水による付加質量効果を考慮すると、貯水位により変化すると考えられる。また、温度変化によるコンクリートの体積変化によって収縮継目の状態が変化する影響も受ける可能性がある。よって、本手法をダム堤体の健全度診断に適用するには、貯水位や温度の影響をあらかじめ定量的に把握しておく必要がある。このため、現在、2つの重力式コンクリートダムを対象として、貯水位や温度の影響を確認するための試験計測を実施している。これまでの計測から、貯水位変化による固有振動数変化が数値解析と比較的よく対応すること（図-4）や、温度変化と固有振動数の変化が良く対応すること（図-5）が明らかになってきている。

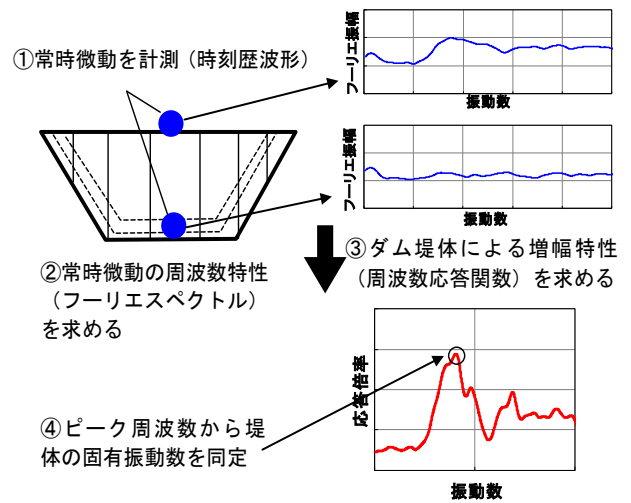


図-3 常時微動計測によるダム堤体の振動特性（固有振動数）の推定³⁾

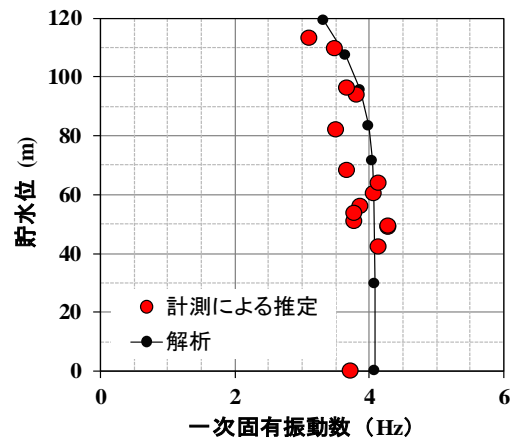


図-4 貯水位と1次固有振動数の関係（Aダム）³⁾

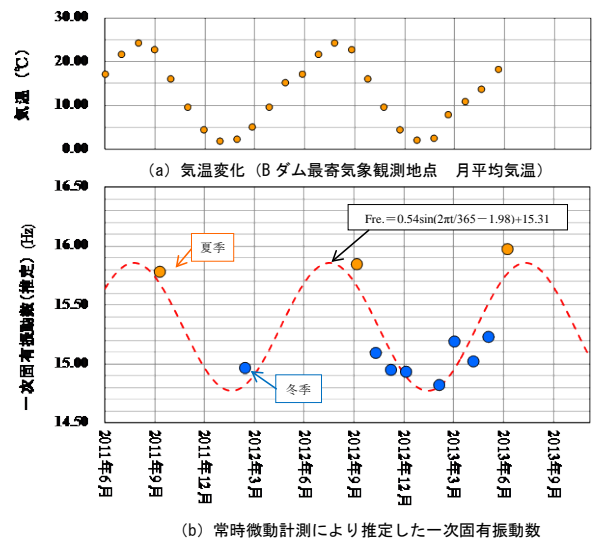


図-5 温度（気温）と固有振動数の変化（Bダム）³⁾

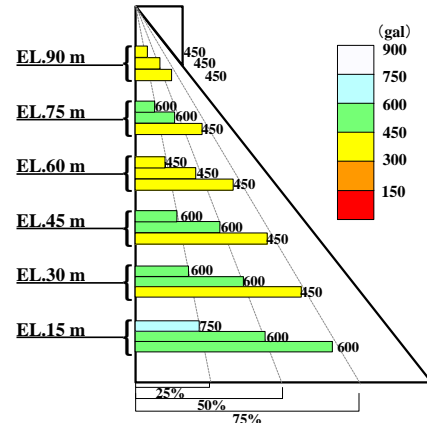
4. 健全度低下が安全性に及ぼす影響の評価⁴⁾

ダム堤体の健全度診断は、変状の箇所や程度を把握するだけでは十分ではない。対策の要否や優先度が合理的に判断できなければならない。このような判断には、点検で確認された変状などが、ダムの安全性や機能に及ぼす影響の程度を可能な限り定量的に評価できることが望まれる。

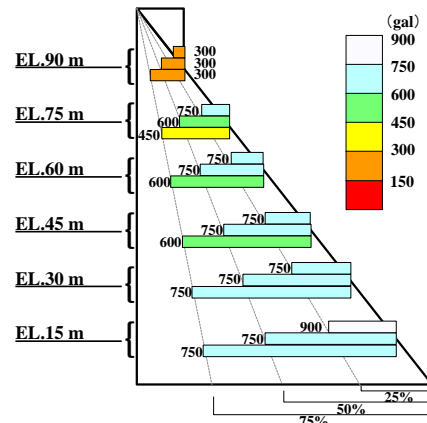
このような評価法を検討した例を図-6に示す。この例では、ダム堤体に安定性に大きな影響を及ぼす可能性のある事象（変状）として、堤体に種々の位置・規模（深さ）の水平クラックが既に生じているケースを想定した。その上で、長期供用の中でダムの安全性に影響を及ぼす可能性がある偶発事象として大規模地震による地震動が作用した場合に、クラックが進展して貫通に至るような地震動の強さ（最大加速度）を非線形動的解析により推定した。図の着色部は、想定した既存クラックの位置（標高）と範囲（深さ）、色は既存クラックが堤体上下流面間に貫通するものとなる地震動の強さ（最大加速度）を示す。なお、クラックが上下流面間に貫通するものとならなければ堤体が分断されることはなく、大規模地震に対する耐震性能⁶⁾としてダムに求められる貯水機能は維持されると考えられる。

図-6によれば、既存クラックの標高や範囲（堤体上下流面幅に対するクラック深さの比）が同程度であれば、低標高部より高標高部、下流面より上流面側の既存クラックの方がより小さな地震動で貫通に至る可能性がある、つまり、対策の優先度が高いものであることが示唆される。

この他にも、寒冷地での凍結融解作用によるダム堤体表面からの劣化進行に伴うコンクリートの力学性能の低下など、種々の変状による影響について同様の評価を予め行っておけば、点検等で明らかになった変状箇所・程度に応じ対策の優先度の判断に役立つものと考えられる。また、このような検討を個々の地点で想定される様々な強さの地震動の発生確率に関する情報と組合せれば、ダムの安全性・機能に対するリスクの定量化が可能となり、リスク管理行為の一環としての維持管理の合理化に繋げていくことができると考えている。



(a) 上流面側に既存クラックを想定した場合



(b) 下流面側に既存クラックを想定した場合

図-6 既存水平クラック有する重力式コンクリートダムにおけるクラック貫通地震動強さの推定例⁴⁾

5. 長期供用ダムの特性を踏まえた合理的な安全管理のための計測の有り方⁴⁾

ダムの長寿命化を実現していくには、先に述べた長期供用ダムの増加、また経過年数の増加に伴う種々の変状の発生を想定した合理的な安全管理のあり方も重要な課題である。長期供用ダムが増加する一方、近年の新規建設ダムの減少により、ダムの設計施工や構造に関する知識と経験の豊富なダム管理職員は少なくなっている。巡視とともに日常の主要なダム管理業務の1つである安全管理のための各種計測については、2.で述べたように計測装置の不具合が生じている事例も見られる。

ダムの安全管理のための計測は、試験湛水中（第1期）、供用開始後定常状態に達するまで（第2期）及び定常状態に達した後（第3期）の3つの管理期間に応じてその頻度等が定められている。第3期への移行は、計測値が正常で安定していることを確認して行われ、同時に計測箇所の重点化

表-1 長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方 (案)
(重力式コンクリートダムで基礎排水孔での漏水量・揚圧力計測の例)

分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方	計測を継続すべき箇所等の考え方のイメージ図
ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	全てのダム	②-1 最大断面ブロック付近の基礎排水孔	
基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所	規模の大きな弱層(断層など)を基礎岩盤に有するダム	②-2 規模の大きな弱層(断層など)付近の基礎排水孔を含むブロック 注) 試験湛水中に漏水(排水)に土粒子の混入がみられたため、基礎排水孔を閉塞したまま揚圧力の計測のみを実施している基礎排水孔はこの限りではない。	
	基礎岩盤の変形性の差が極端に大きい箇所を基礎岩盤に有するダム	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所の基礎排水孔を含むブロック	
既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	試験湛水時や地震時などに注意を要する計測結果が得られたブロックがあるダム	②-4 以下の基礎排水孔を含むブロック ・漏水(排水量)が多い ・揚圧力が高い ・排水量が多く揚圧力が高い ・濁水、土粒子の流出	
大規模地震後の迅速な安全性評価のために計測が必要と考えられる箇所	全てのダム	②-5 各ブロック1箇所の基礎排水孔 ※常時満水位以上に基礎を有するブロックを除く	

が検討されることも多いが、挙動が安定した長期供用ダムにおいても計測を継続すべき項目や計測箇所の存続・中止の考え方について明確な判断基準が整理されていない。このため、本研究では、挙動が安定した長期供用ダムにおいて、必要な管理水準を継続するための合理的な計測項目・箇所の存続・中止の判断方法について検討を進めている。これまでに、表-1に例示するような「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方(案)」を提案するとともに、実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、適用性の検証を行っており、その結果を踏まえ、上記考え方を取りまとめる予定である。

6. おわりに

ダム本体の長寿命化に向けた研究について、コンクリートダム堤体を対象とした調査・検討の現状を紹介した。取り上げたものは一面に過ぎず、課題も多いが、引き続き合理的なダムの維持管理

技術の体系の確立に向け研究を進めていきたい。

参考文献

- 山口嘉一、金銅将史、小堀俊秀、大館渉：コンクリートダムの劣化・損傷事象の調査・分析、ダム技術、No.304、pp.31～44、2012.1
- 佐々木 隆、金銅将史、小堀俊秀、加嶋武志、大館渉：重力式コンクリートダム堤体の健全度診断における常時微動計測の活用に関する検討、ダム技術、No.313、pp.18～30、2012.10
- 加嶋武志、榎村康史、金銅将史、小堀俊秀、佐々木隆：常時微動計測のダム健全性評価への活用に向けた検討、第34回西日本岩盤工学シンポジウム in 福岡、pp.11～14、2013.8
- 佐々木隆、金銅将史、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体の維持管理技術に関する研究、平成24年度土木研究所重点プロジェクト研究報告書13-4
- 小堀俊秀、富田尚樹、佐々木 隆、山口嘉一：赤外線カメラを用いたコンクリートダム堤体の健全度診断手法の提案、第59回土木学会年次学術講演会 6-195、pp.389～390、2004.9
- 大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説、国土交通省河川局、2005.3

金銅将史



(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

小堀俊秀



(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 研究員
Toshihide KOBORI

加嶋武志



(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
Takeshi KASHIMA

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
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