

ダムの新しいモニタリング技術の開発

金銅将史・佐藤弘行・小堀俊秀

1. はじめに

治水・利水を担う重要な社会資本であるダム施設では、従来から日常点検、地震時などの臨時点検や原則3年毎の定期検査等とその結果に基づく対応等を組み合わせた入念な維持管理が行われてきている。しかし、高度経済成長期を中心に建設された多くのダムを含め、供用開始後50年以上を経過するダムが約半数に達している¹⁾。このような中、供用開始後30年以上経過するダムなどを対象に、詳細な点検による健全度評価や今後の維持管理方針の作成を行う「ダム総合点検」²⁾が国土交通省により制度化されるなど、更なる長期供用のため予防保全を基調とした計画的維持管理を一層実効性あるものとしていくための取り組みが進んでいる。

一方で、このような取り組みをより着実かつ効果的なものとするには、ダム施設の維持管理においてその中核をなす安全管理の基本となってきた巡視と各種計測によるモニタリング（状態監視）技術についても、より一層の高度化・効率化を目指していく必要がある。この点は、300以上のダムが臨時点検対象となった³⁾2011年の東北地方太平洋沖地震のような広域災害への対応面でも同様である。

そこで本稿では、筆者らが最近取り組んでいるダム堤体の挙動を捉える新たなモニタリング技術について、その研究動向を紹介する。

2. ダムの変位モニタリング技術の研究

2.1 変位計測の現状と課題

ダムの安全管理における計測項目は、河川管理施設等構造令に定められている。コンクリートダムでは漏水量、揚圧力及び変形（変位）、フィルダムでは漏水量と変形（フィルダムのうち均一型ダムではこれに浸潤線が加わる）の計測が基本となる。両型式ダムに共通する項目について述べる

と、漏水量は貯水構造物としてのダム堤体の各所の状態変化を早期に捉えるために計測するものといえる。これに対し、変形（変位）の計測はダム堤体やその基礎地盤の状態変化をマクロに捉えようとするもので、コンクリートダムでは堤体内に設置されるプラムライン（下げ振り）、フィルダムでは視準測量により行われるのが一般的である。しかし、地震時など迅速な安全確認が要求される場合、特にフィルダムで行われている一般的な測量による変位計測では、短時間に計測結果を得るのは難しい。また、コンクリートダム堤体内に専用空間を設けて設置されるプラムラインでの変位計測は少数の特定箇所のみでの計測となる。

2.2 GPSを用いたダムの変位モニタリング

ダムの安全管理における新たな堤体変位のモニタリング技術として期待される技術の1つにGPSを用いた変位計測がある。この方法は計測箇所の3次元変位を自動的かつ連続的に計測できる利点があり、安全管理の合理化や地震時など緊急時の変位把握を迅速化する技術として期待される。特に従来の測量による計測に比べ変位データ取得が格段に迅速化されるため、フィルダムの変位計測ではメリットが大きい。このため、フィルダムでのGPSを用いた変位計測の具体的手法について筆者の一部も関わって作成したマニュアル⁴⁾が既に刊行され、ロックフィルダムを中心に試行的なものを含め導入事例が増えている。国土交通省及び水資源機構が管理するダムでは、ロックフィルダム8、重力式コンクリートダム2、その他（台形CSGダム）1ダムの例がある。

導入事例の幾つかを写真-1に示す。同写真に示すようにGPS衛星の電波を捉える受信器はダム堤体上の様々な箇所に設置することが可能であるため、面的な変位モニタリングによる計測精度の向上に有効である。また、大規模地震後の継続的な安全確認⁵⁾を目的として機動的に導入することも可能である。地震時の堤体変位計測結果の例として、東北地方太平洋沖地震（2011年3月）時にロックフィルダム（コンクリート表面遮水壁型、



写真-1 ダム堤体変位計測用GPS受信器の設置例

堤高53m)の最大断面付近のダム天端観測点で得られた上下流方向計測結果⁵⁾(前1時間の平均値)を図-1に示す。地震後の計測結果(図-1の赤色丸印)では、下流側に約10mmの明確な変位をとらえている。また、本震発生前後のダム堤体の計測点の平面変位ベクトルを図-2に示す。本震前後は、堤体すべての計測点において右岸および下流方向に変位が発生し、その変位量は大きい箇所では下流側に約13.5mm(図中G-8)との結果が得られている。

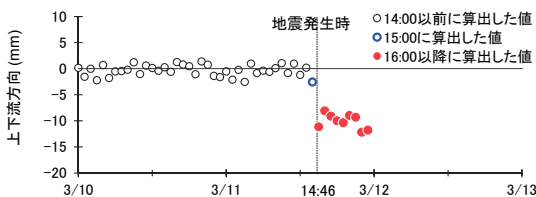


図-1 GPSによるロックフィルダムの地震時変位計測例(ダム天端上下流方向変位)⁴⁾

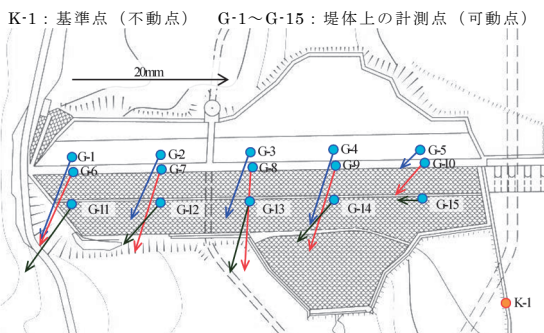


図-2 GPSによるロックフィルダムの地震時変位計測例(平面変位ベクトル)⁴⁾

2.3 衛星SARを用いたダムの変位モニタリング

衛星データを活用した変位モニタリングでは、衛星SAR(合成開口レーダー)画像の利用(図-3)も今後の発展が期待される技術の1つである。この技術は既に地震時の地殻変動や土砂災害、火山活動の監視などの目的で近年急速に利用が広がっているが、ダム堤体など比較的規模の大きい構造物の変位モニタリングにも活用できる可能性がある。このため、政府が進めるSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)の一環として、筆者らも主にダムを対象として衛星SARデータを用いて平常時や地震時の変位モニタリングを行う技術の研究開発に取り組んでいるところである。

SARの主な長所は、地上の観測設備が不要なことと地表面(構造物表面)の面的な変位情報が得られることである。また、衛星SARでは1データで約50km四方の広範囲な地表面のデータを観測することが可能であり、広域的に複数のダムを対象とした変位モニタリングへの活用も考えられる。

衛星SARを用いたダムの変位モニタリングの事例として、熊本地震(2016年4月)の前後に得られた衛星SAR画像から、ロックフィルダム(土質遮水壁型、堤高約35m)の堤体変位(沈下量)分布を解析した例を図-4に示す。当該ダムは地震によりその安全性に影響が生じていないことが確認されている⁶⁾が、同図からは堤体中央部(最大断面付近)天端では地震の揺れにより約3cmの沈下が生じたことがわかる⁶⁾。

このように、防災分野で利用が広がっている衛星SARデータは、ダム等構造物の災害時における早期被害把握にも有効なモニタリング技術として、今後一層の活用が期待される。

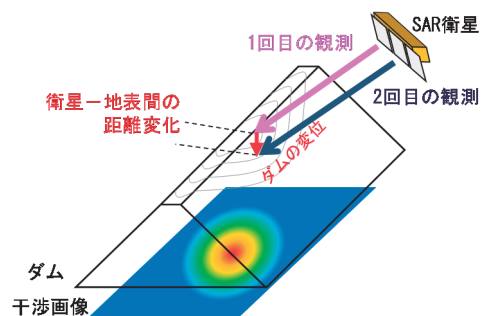


図-3 衛星SARによるダムの変位計測の概念図⁷⁾

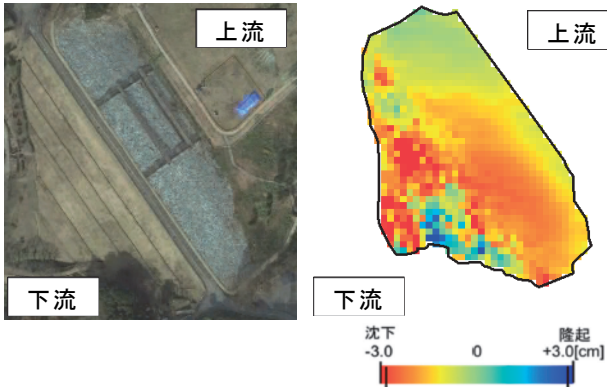


図-4 衛星SARデータを用いたロックフィルダム
地震前後の変位計測例⁷⁾

3. ダムの振動モニタリング技術の研究

ダム堤体など構造物の構造体としての健全性は、その固有振動数等の振動特性にも反映される⁸⁾。このため、筆者らは、ダム堤体の振動特性の変化を捉えることで、長期的な状態変化や大規模地震等による影響を定量的に分析・評価する手法についても検討を進めている。

ダム堤体の振動特性は、国内の多くのダムで設置されている地震計の観測データの分析によるほか、堤体上や内部の監査廊内など任意の位置で任意の時間に実施可能な常時微動計測によっても把握することができる。すなわち、鉛直アレイを形成するよう堤体上部と下部（基礎部）で同時に得た振動データ（加速度時刻歴）をもとに、両者間の伝達関数（フーリエスペクトル比）を求めることでそのピーク周波数から固有振動数を推定することが可能である。ただし、コンクリートダムを対象としたこれまでの検討からは、固有振動数を診断指標としてダム堤体の健全性を評価するには、付加質量効果に影響する貯水位変動や外気温等の変動に伴う堤体コンクリート継目の状態変化（開閉）による影響を適切に把握することが重要となることがわかってきている⁸⁾。また、精度良く固有振動数を同定するには、伝達関数の時系列変化をランニングスペクトルとして可視化することが有効なこともわかってきている。

一例として、重力式コンクリートダム（堤高119m）の振動特性を貯水位や外気温の変動による影響を含め詳細に把握するために実施した常時微動の連続計測の例を図-5（計測位置）、図-6（計測状況）及び図-7（計測結果）にそれぞれ示す。なお、本計測では可搬タイプのサーボ型加速

度センサーを用いており、同様のセンサーを利用すれば、堤体内各所での計測や複数ダムでの巡回計測も可能である。

図-7（d）は伝達関数のランニングスペクトルを示している。図より、堤体の複数の固有振動数とその変化がわかる。図中には1次固有振動数の変化を実線で示している。また、固有振動数は貯水位や外気温の変化のほか、震動源となる放流設備からの放流水の有無にも影響を受けていることがわかる。構造体としての状態変化の有無を的確に評価するには、これらの影響を適切に分離できるようにする必要がある。

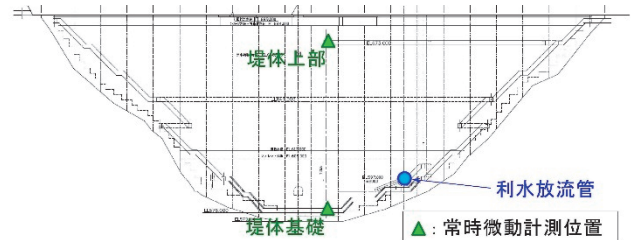


図-5 常時微動計測位置（重力式コンクリートダム）



図-6 ダム堤体内での常時微動計測状況

4. 終わりに

本稿では、ダム施設のモニタリング技術として今後導入・普及が期待されるもののうち、筆者らが開発・普及に関わる技術について、その特徴とこれまでの研究で得られた知見の一端を紹介したが、これらは一例に過ぎない。各種構造物の中でもとりわけ大規模で、近接目視が困難な高所も含め広範囲を対象とした状態把握が必要なダム施設では、その外観調査においてUAVの活用も進みつつある。また、貯水構造物として水面下（貯水池内）からダム堤体の状態を調査するための水中

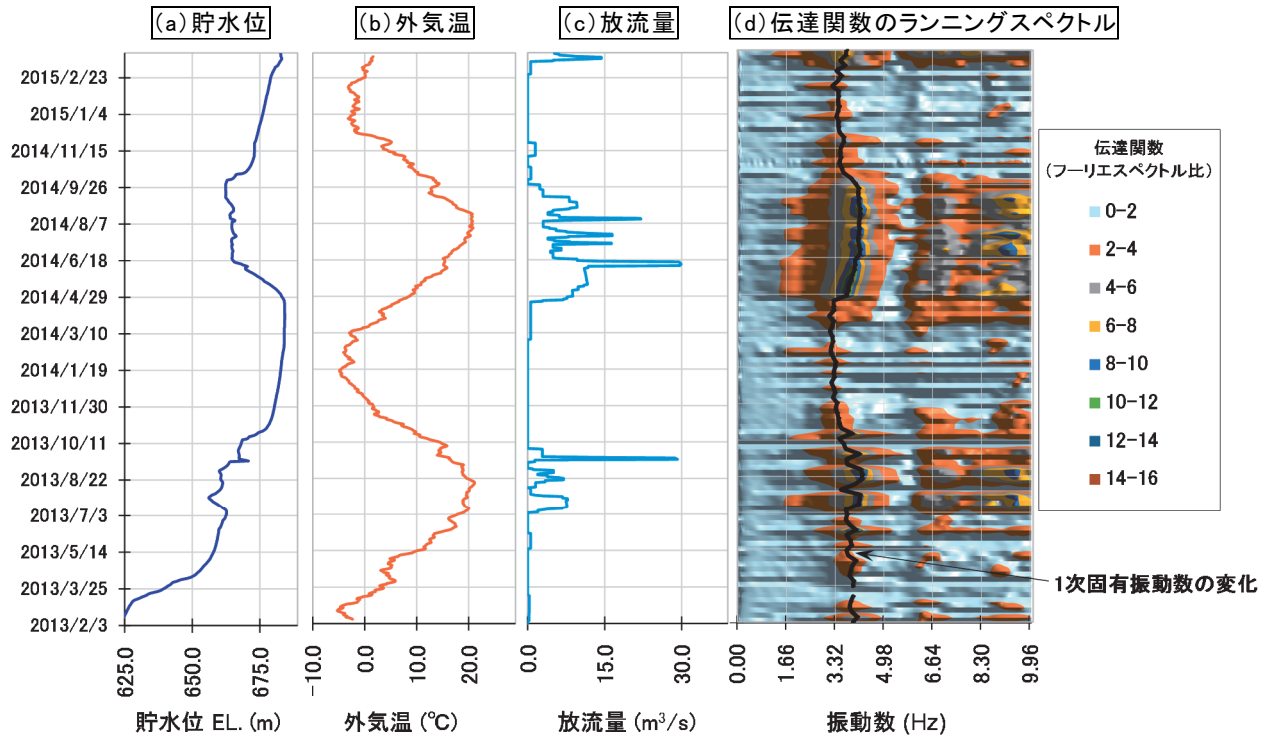


図-7 重力式コンクリートダムでの常時微動計測から得られた伝達関数のランニングスペクトルの例

点検ロボットの開発も進んでいる。一方、表面で確認された変状の堤体内部への影響範囲を把握する技術など、開発の余地を多く残している技術も多い。ダム施設の一層の長寿命化実現に向けた基礎となる様々な健全度診断・モニタリング技術について、関係機関の連携により幅広く技術開発を進めるとともに、その目的・用途・場面に応じた現場での活用が可能となるよう、技術の体系化を進めていくことが必要と考えている。

参考文献

- 1) (一財) 日本ダム協会：ダム便覧2017
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領、2013
- 3) 山口嘉一、金銅将史、小堀俊秀、三石真也、鳥居謙一、山本陽子：東北地方太平洋沖地震東北地方太平洋沖地震におけるダムの挙動と観測された地震動、ダム技術 (303)、pp.23~36、2011
- 4) (一社) ダム工学会計測管理研究部会：フィルダムの変位計測に関するGPS利用マニュアル、2014
- 5) 小堀俊秀、山口嘉一、中島伸一郎、清水則一：GPSを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測、ダム工学、Vol.25、No.1、pp.6~15、2015
- 6) 国土技術政策総合研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、国総研資料第967号、6.ダム、2017
- 7) 佐藤弘行、金銅将史、小堀俊秀、小野寺葵：衛星SAR データを用いた19基のロックフィルダムの外部変形計測、ダム技術(371)、pp.3~14、2017.8
- 8) 金銅将史、加嶋武志、小堀俊秀、山口嘉一：地震動が重力式コンクリートダム横継目の止水機能に及ぼす影響、ダム工学、Vol.24、No.3、pp.165~176、2014

金銅将史



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
Masafumi KONDO

佐藤弘行



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 主任研究官
Hiroyuki SATO

小堀俊秀



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 研究官、博士(工学)
Dr. Toshihide KOBORI