

ダムの振動特性の可視化による分析

金銅将史・小堀俊秀・平松大周

1. はじめに

長期供用ダムが増える中、その安全管理もより効率的に行っていくことが求められている。このため、従来の漏水や変位などの各種計測に加え、ダム堤体の健全性をより効率的かつ的確に把握する手法を開発・普及していく必要がある。また、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方を中心に300以上のダムで臨時点検が実施された¹⁾。このように強い揺れが広範囲に及ぶような大規模地震時には、多数のダムへの影響をできるだけ早期にかつ定量的に把握することも重要となる。

このような背景の下、筆者らは、ダム堤体の経年的な状態の変化を継続的に監視したり、大規模地震後において地震動によるダム堤体への影響を迅速に把握したりする上で、より詳細な調査の必要性を判断するための一次スクリーニング手法の開発に取り組んでいる。その1つが、ダム堤体の剛性を反映し、構造物としての健全性を測る指標になると考えられる固有振動数等の振動特性の変化に着目する方法^{2),3)}である。

本稿では、この方法によりダム堤体の固有振動数の変化を精度良く捉えるための工夫として、ダム堤体の振動特性の時系列変化を視覚化する手法とその有効性について、実際のダムでの観測データを用いて検討した結果を報告する。

2. ダム堤体の振動計測

本研究で用いるダム堤体の振動特性の把握方法を図-1に示す。ダム堤体の振動特性の把握には、地震計が設置されている多くのダムでは、基礎部とダム天端付近に設置された地震計で同時に得られた地震観測記録を利用することができる。両者で得られた加速度時刻歴（波形データ）から各々の周波数特性を表すフーリエスペクトルを求め、その比（天端／基礎）により堤体の周波数応答特

性を表す伝達関数²⁾を求めれば、そのピーク振動数からダム堤体の固有周波数を知ることができる。一般にダム管理現場では、堤体に設置されている地震計は地震後臨時点検の実施要否の判断に用いる最大加速度値を取得する用途に供されていることが多いと考えられるが、このようにダム堤体の健全性を把握する上で有効な振動特性に関するデータも得ることができる。

また、振動特性の把握は、様々な自然又は人工の振動源によって常に生じている地盤や構造物の微小な振動である常時微動の計測によっても可能である。近年は可搬型の高精度な計測機もあり、ダム堤体の任意の場所に持ち運んで比較的容易に常時微動計測が行えるようになってきている。地震観測記録と異なり、常時微動計測では基本的に任意の時期・場所で振動データを得ることができる点が大きな特長であり、地震計と同様に堤体内の基礎部と天端付近において同時に常時微動計測を行うことでダム堤体の固有振動数を知ることができる。

このような方法でダム堤体の振動特性を継続的に捉えていけば、ダム堤体の構造体としての長期的な健全性の変化や大規模地震による影響が把握できる可能性がある。ただし、コンクリートダムを対象とした筆者らのこれまでの研究²⁾から、ダム堤体の振動特性は、貯水位や外気温等の条件によっても影響を受けることがわかってきており、健全性の変化の有無を正しく評価するには、これらの影響を重回帰分析などによって適切に除去することが必要である。

また、実際のダムの観測データを用いて筆者らがこれまで行ってきた解析から、観測で得られる伝達関数は同じ箇所でも同一日内の観測でも変動があることがわかっている。加えて、大規模地震時には、損傷の発生や継目の状態の変化によって振動特性に変化が生じることも考えられる。このため、ダム堤体の振動特性からその健全性への影響を診断するには、固有振動数とその時系列変化を精度良く捉える工夫が重要と考えられる。そこで、

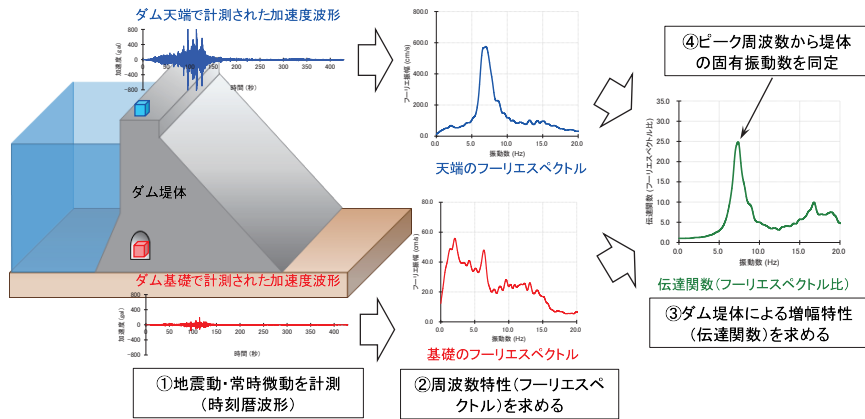


図-1 ダム堤体の振動特性の把握方法

分析手法の工夫として、ダム堤体での地震動観測や常時微動計測から得られる伝達関数をその時系列変化として表すランニングスペクトル（計測した加速度時刻暦を一定の時間幅で区切り、その時間をずらしながら次々にそれぞれの部分について求めた一連のスペクトル）の形で視覚化することを試みた。

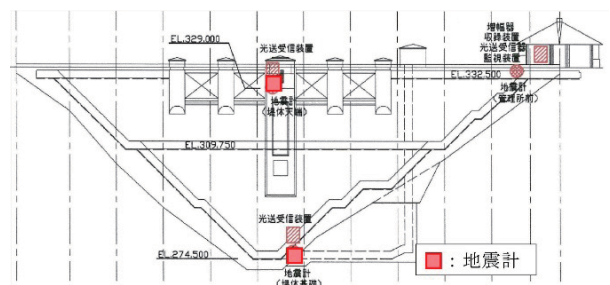


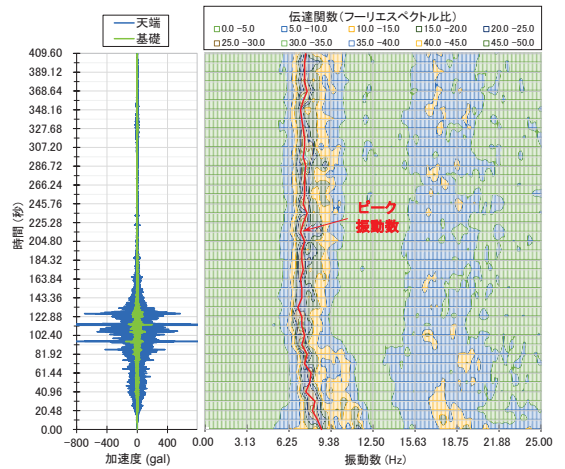
図-2 地震計の位置(Mダム)

3. ダム堤体の振動特性時系列変化の分析⁴⁾

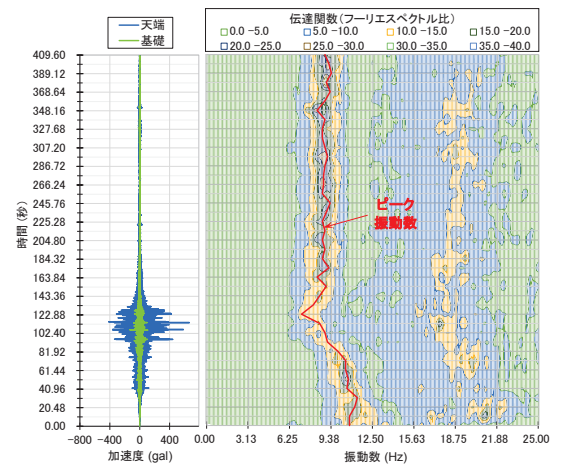
3.1 地震動データの時系列変化の分析

東北地方太平洋沖地震による加速度波形が得られたMダム(堤高：65m、型式：重力式コンクリートダム)の地震動データを対象に、ダム堤体の振動特性とその変化を把握するため、前述の方法でその可視化を試みた。ダム堤体における地震計の設置位置を図-2に示す。地震計はダム最大断面の天端ゲート室内（以下「天端」という。）および同ブロックの基礎監査廊内（以下「基礎」という。）に設置されている。

東北地方太平洋沖地震の本震時の天端と基礎の加速度観測記録から求めたダム堤体の振動特性（伝達関数）のランニングスペクトルを図-3に示す。図中の（a）は上下流方向成分、（b）はダム軸方向成分で、ともに天端と基礎で得られた加速度時刻歴(時間ステップ0.01s)を1024ステップ毎に分割し、高速フーリエ変換により算出した各区間(時間帯)の伝達関数を連続的に表示したものである。図-3において赤い実線で示されるピーク振動数が堤体の固有振動数に相当しているが、上下流方向、ダム軸方向とも主要動到達に伴いやや低下していることがわかる。また、ピーク振動数の低下量は上下流方向成分よりダム軸方向成分で顕



(a) 上下流方向成分



(b) ダム軸方向成分

図-3 地震動より算出した伝達関数のランニングスペクトルと固有振動数の変化 (Mダム)
4).6)

著なこともわかる。ただし、当該ダムでは地震後臨時点検において特段の変状等は報告されていない。また、固有振動数は数ヶ月後には以降の観測データから求めた固有振動数の重回帰分析から、地震発生前の状態と同程度に戻っていることがわかっている^{5),6)}。一方で、マスコンクリートであるダム堤体にひび割れ防止目的で設けられた横継目(上下流方向の鉛直継目)に設置された継目計のデータ(継目変位)は、本震時に僅かな変動が確認された^{5),6)}。これらのことから、当該ダムでは地震による構造的損傷はないが、横継目で区切られた堤体各ブロック間の相対変位により一時的に継目の密着性が僅かに低下し、これが固有振動数の一時的低下として観測されたものと考えられる。

なお、構造的損傷を受けた海外のダムで得られた地震動の観測記録をもとに同様の分析を行ったところ、地震以降も固有振動数の回復が認められない例があり⁶⁾、そのような場合にはダムの安定性への影響を評価するためより詳細な調査が必要になると考えられる。

3.2 常時微動データの時系列変化の分析

Yダム(堤高：119m、型式：重力式コンクリートダム)では、ダム堤体の固有振動数に与える各種要因(貯水位、外気温等)の影響を詳細に把握するため、2013年2月よりダム堤体内の最大断面ブ

ロックの基礎部と堤体上部において常時微動の24時間連続計測(以下「連続計測」という。)を実施している。計測位置を図-4に示す。常時微動の計測はサーボ型の加速度センサーを用い、サンプリング周波数は100Hzである。

常時微動の連続計測より得られたダム堤体(上下流方向)の伝達関数のランニングスペクトルを図-5に示す。なお、伝達関数はノイズ等が少ない静穏な時間帯と考えられる毎週日曜日の午前0時から午前1時の1時間分の計測データから算出したものを各週の代表値として用いている。同図中段には、貯水位、外気温のほか、後述する堤体内下位標高に設置された図-4に示す利水放流管からの放流量を示している。図-5より、3.5Hz付近に比較的明瞭なピーク周波数が認められる。これは堤体の1次固有振動数に対応するものと考えられるが、冬季に比べ夏季の方がやや高周波数側にあ

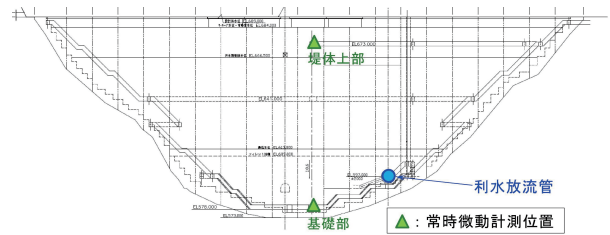


図-4 常時微動計測位置(Yダム)

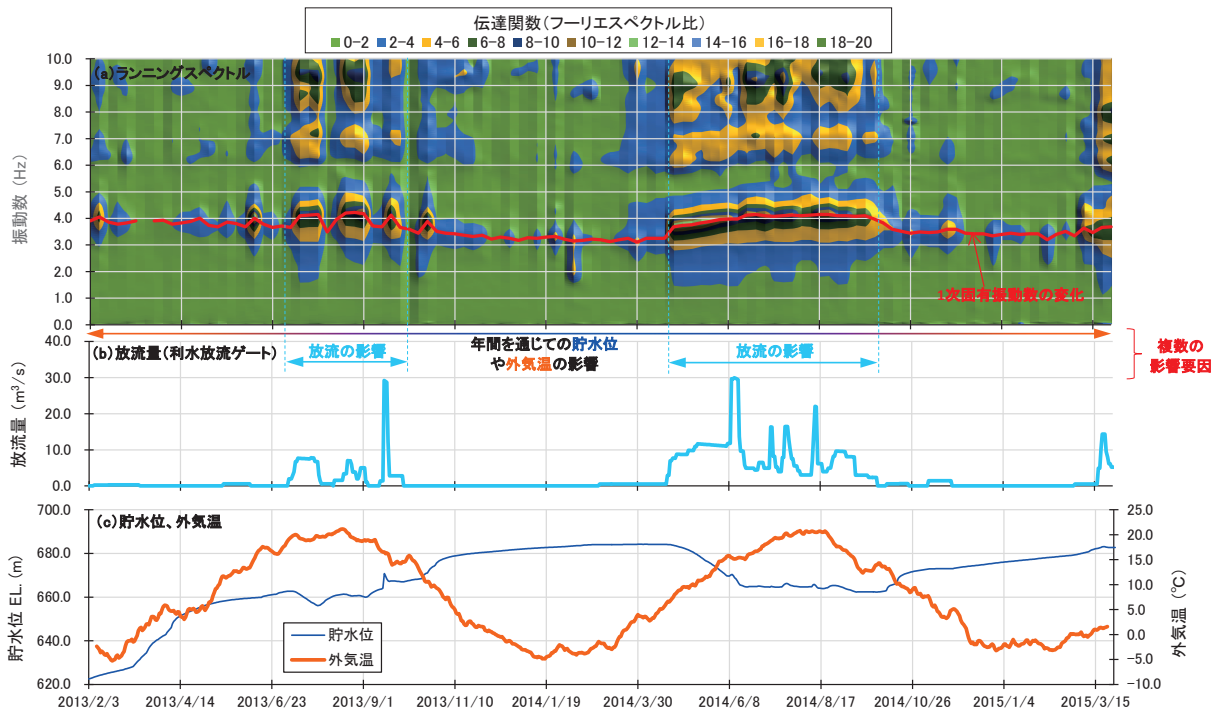


図-5 常時微動より算出した伝達関数のランニングスペクトルと固有振動数の変化(Yダム、上下流方向)⁴⁾

り、また伝達関数のピーク値が大きくなる傾向があることがわかる。このうち、夏季の固有振動数が冬季に比べやや高周波数側にある原因については、筆者らの既往の研究^{2),3)}から、同図中に示す貯水位や外気温の変化による影響(それぞれ、付加質量効果の変化及び堤体温度の変化によるコンクリートの体積変化に伴う堤体継目の密着度合いの変化)によるものと考えられる。

なお、Yダムで貯水位が高いのは主に外気温が低い冬季であることから、固有振動数の季節変化には堤体温度の変化に伴う影響も含まれていると考えられる。一方、夏季の方がピーク振動数における伝達関数の値が大きい傾向については別の要因による可能性があると考えられた。そこで、ダム堤体に振動を発生させる事象として考えられる放流設備からの放流による振動の影響について分析した。図-5には、当該ダム堤体内基礎部での常時微動計測位置に比較的近い低位標高部に設置されている利水放流設備からの放流量の時系列も示している。同図より、当該放流設備からの放流が行われている時期のみ伝達関数の値が大きくなり、同時にピーク振動数がその前後に比べやや高周波側に移動していることがわかった。放流がない状態では堤体は地盤や風など様々な振動源による影響を受けて微小振動しているが、放流設備からの放流振動のように一定箇所に継続して振動源が存在する状態では、振動源位置に応じた振動が励起されやすくなるためと考えられる。このため、常時微動計測から固有振動数を推定する際には、放流振動による影響も考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

ダム堤体の健全性の変化を定量的に把握するた

め、ダム堤体の振動特性とその変化に着目する方法に関する検討の一環として、地震動観測や常時微動計測データから得られる固有振動数の変動を精度良く捉えるために伝達関数の時系列変化を視覚化する手法を実際のダムの観測データに適用した例を紹介した。水温や外気温等ダム堤体の振動に及ぼす種々の要因を考慮するとともに本稿で示したような手法を用いることで、比較的簡便にかつ客観的なデータとして得ることができるダムの振動データをもとに、大規模地震時による健全性への影響や長期的な健全性の変化の有無を精度良くモニタリングすることが可能になると考えられる。今後、本手法がダム堤体のモニタリング手法の1つとして活用可能となるよう、引き続き振動特性の分析手法の一層の改良や事例分析を積み重ねていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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646号、土木研究所資料第4202号、pp.342～366、2011
- 2) 金銅将史、小堀俊秀、加嶋武志、佐々木隆：重力式コンクリートダムの固有振動数変化とその重回帰分析、ダム工学、Vol.25、No.1、pp.16～28、2015
- 3) 金銅将史、小堀俊秀、加嶋武志、佐々木隆、榎村康史：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、土木技術資料、第56巻、第2号、pp.14～17、2014
- 4) 小堀俊秀、金銅将史、佐藤弘行、佐々木隆：ダムの振動特性の可視化による時系列変化の分析の試み、平成28年度ダム工学会研究発表会・講習会 講演集、(一社)ダム工学会、pp.1～6、2016
- 5) 金銅将史、小堀俊秀、佐々木隆：地震動がコンクリートダムの振動特性に及ぼす影響、ダム工学、Vol.27、No.4、pp.265～278、2017
- 6) 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

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

平松大周



研究当時 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交流研究員、現 (株)エイト日本技術開発
Hironori HIRAMATSU