

ARX モデルによる強震時の重力式コンクリートダム振動特性推定法の適用条件に関する一考察

国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 ○傅 斌, 佐藤 弘行, 金銅 将史

1. はじめに

世界有数の地震国日本においてダムの耐震安全性は極めて重要であり、それを確かなものとする耐震設計や耐震性能照査の信頼性を高めていく上では、強震時を含めダムの地震時挙動をより詳細に把握し、地震時挙動の推定に活かしていく必要がある。ダムの地震時挙動を数値解析により推定する上で特に重要となる振動特性に関するパラメータとして、ダムの振動特性に関わる固有振動数や減衰定数があるが、これまでの研究から、これらのパラメータを比較的精度よく推定できる手法として ARX モデルによるシステム同定の手法¹⁾が有用なこと²⁾、そして、地震動がダムの堤体に作用した際の入力に相当するダム基礎部及び出力に相当する上部の加速度波形の観測データをもとに、忘却係数を考慮した逐次最小二乗法を用いることで、固有振動数や減衰定数の経時変化を精度よく推定できる可能性が高いことが分かっている³⁾。

しかし、これまでの検討は、限られたダムでの観測データを対象としたものであった。そこで、本研究では、重力式コンクリートダムを対象に、ARX モデルによるダムの振動特性の推定手法の汎用性を確認するため、既往研究とは異なるダムでの観測データを対象として同様の分析を行うとともに、基礎部と上部の地震計が同一の堤体ブロック上にないケースなど、これまでの検討対象とは異なる条件での本手法の適用性についても調べた。

2. ARX モデルによるダム堤体の振動特性の推定方法

ダム基礎部および堤体上部で得られた観測波形をそれぞれ入力 $u(\cdot)$ 、出力 $y(\cdot)$ とするとき、数学的なモデルである ARX モデルでは、入出力の関係が白色ノイズ $e(t)$ を仮定して式(1)の多項式で表現される。

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (1)$$

$$A(z) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i}, \quad B(z) = \sum_{j=1}^{n_b} b_j z^{-n_k-j+1}, \quad \theta = [a_1 \cdots a_{n_a} \quad b_1 \cdots b_{n_b}]^T \quad (2)$$

ここで、 n_a 、 n_b はモデル次数、 n_k は入出力遅延、 z^{-n} は時間遅れ演算子 ($z^{-n}y(t) = y(t-n)$) であり、現時刻 t での出力 $y(t)$ を過去 n_a 個分の出力 $y(\cdot)$ と n_b 個分の入力 $u(\cdot)$ の線形結合によって表現するモデルである。式(2)の係数ベクトル θ の推定値は、一般的に観測データの全記録時間から一括推定する一括最小二乗法 (BLS (Batch Least Squares 法)) より決定される¹⁾。また、忘却係数付き逐次最小二乗法⁴⁾ は、観測データの各時間ステップの係数ベクトル $\theta(t)$ の推定値からモデルの伝達関数 $H(t, z) = B(t, z)/A(t, z)$ の極 $z p_j(t)$ を求め、式(3)により時刻 t における j 次の固有振動数 $f_j(t)$ と減衰定数 $h_j(t)$ を算出する方法である。忘却係数付き逐次最小二乗法による ARX モデルにおいては、忘却係数 λ ($0 < \lambda < 1$) を用いることにより時刻 t より $\Delta t \cdot \tau$ 時間前 (Δt : データのサンプリング時間間隔) の観測値に λ^{τ} の重みをかけながら $\theta(t)$ を更新していくため、振動特性が時間的に変化する非線形システムの同定に適用性がある。なお、上記重みが 0.5 となる期間 (次式の $T_{1/2}$) を半減期と呼ぶ。

$$f_j(t) = |\log z p_j(t)| / 2\pi \Delta t, \quad h_j(t) = -\log |z p_j(t)| / 2\pi f_j \Delta t, \quad T_{1/2} = \Delta t \cdot \log_{\lambda} 0.5 \quad (3)$$

3. 本研究での検討対象

本検討では、上記手法の適用条件を把握するため、既往検討とは異なる比較的大きな地震が観測された重力式コンクリートダムの中で、既往検討³⁾ で対象とされた KS ダム (H=46.4m) より高い MH ダム (H=65.0m) と比較的堤高が低い SS ダム (H=23.5m) に加え、天端と基礎部の地震計が異なるブロックに設置されている TS ダム (H=81.5m) を対象とし、その上下流方向の加速度時刻歴波形⁵⁾ を用いてダム堤体の振動特性 (固有振動数、減衰定数) の経時変化を推定した。MH ダム、TS ダムおよび SS ダムの地震計設置位置と観測波形を図-1 に示す。なお、TS ダムについては、サンプリング周波数 100Hz の加速度データをそのまま用いると、高周波数のノイズの影響により固有振動数および減衰定数の推定結果が不安定となったため、100Hz から 50Hz へダウンサンプリングしたデータを用いた。

4. 検討結果

3. に示した方法により推定された 3 ダムの堤体の固有振動数と減衰定数の経時変化を図-2 に示す。なお、図-2 では、観測波形から求めたフーリエ振幅スペクトル比 (天端/基礎) の経時変化 (ランニングスペクトル) を背景として示している。また、振動特性の経時変化をより明確に捉えるため、半減期 $T_{1/2} = 1$ 秒に加えて、経時変化の追従性を重視するために $T_{1/2} = 0.25$ 秒とした結果と、経時変化の安定性を重視した $T_{1/2} = 4$ 秒の推定結果も合わせて図示した。なお、図には比較のため一括最小二乗法 (図中の BLS) による推定結果もあわせて示している。

キーワード：重力式コンクリートダム、減衰定数、固有振動数、伝達関数、ランニングスペクトル比、ARX モデル

連絡先：〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番 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 TEL：029-864-2587

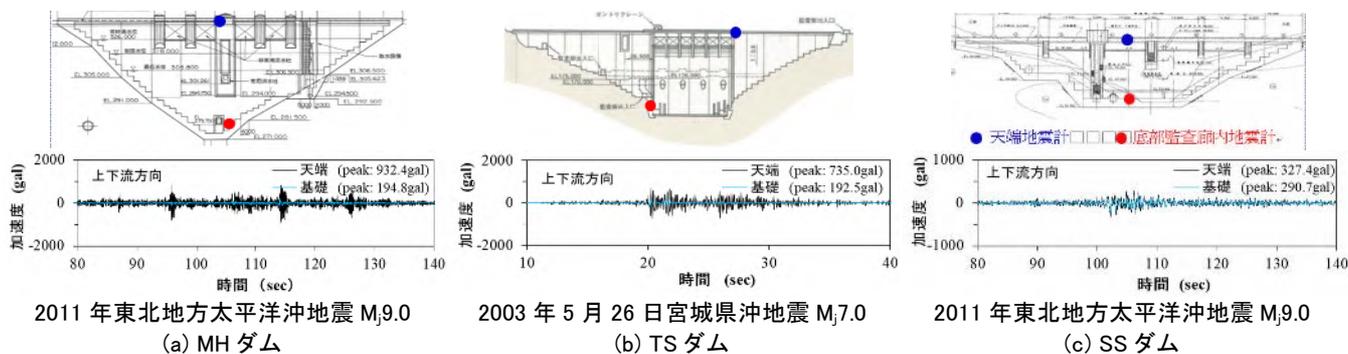


図-1 各ダムの地震計設置位置及び観測波形（上下流方向）

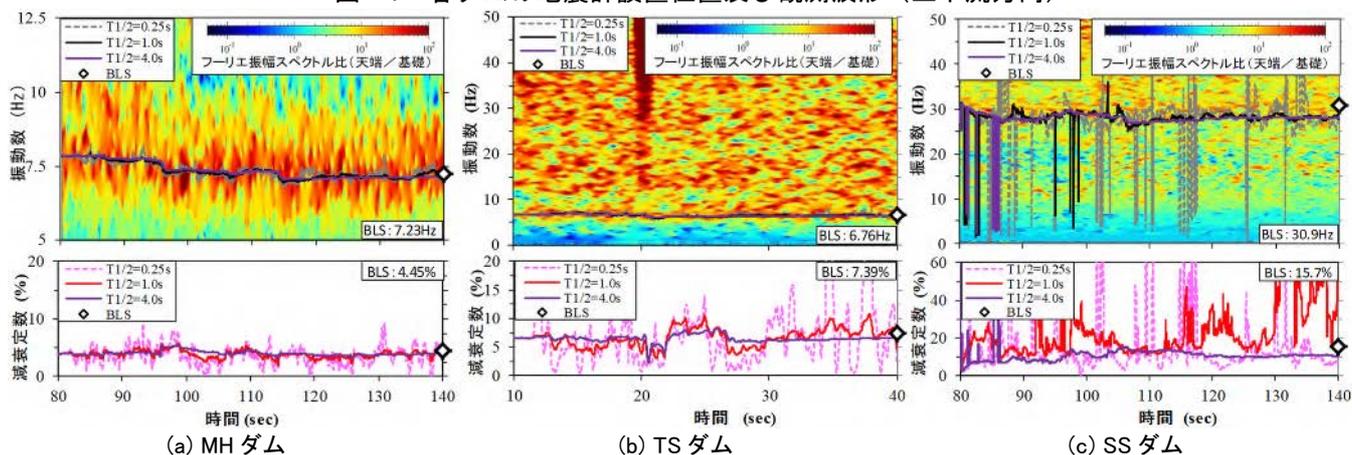


図-2 ARX モデル（忘却係数付き逐次最小二乗法）により推定した固有振動数と減衰定数（上下流方向）

図-2 (a) より、逐次最小二乗法により推定された固有振動数の経時変化は、観測波形から算出したフーリエ振幅スペクトル比のランニングスペクトルのピーク振動数と良く一致している。また、推定された固有振動数の経時変化は、90~110 秒の間で僅かに減少している。このような上下流方向の固有振動数の減少の要因としては、比較的大きな地震動により地震計が設置されているブロック両端の横継目部の拘束効果の低減が一因として考えられる⁶⁾。図-2 (a) の減衰定数については、明らかな経時変化は確認されない。図-2 (b) の TS ダムでの推定結果より、図の背景としているフーリエ振幅スペクトル比のランニングスペクトルからは固有振動数の推定が難しいが、ARX モデルを用いた推定では比較的安定した推定結果が得られている。一方、減衰定数については、 $T_{1/2}=4$ 秒の推定結果は他のケースに比べると安定しているものの、同じ地震を対象とした MH ダムの推定結果 (a) に比べるとやや安定しない推定結果となった。これは、入力（基礎部）と出力（天端）に相当する2つの地震計が横継目で区切られる異なるブロックに設置されているため、推定結果がブロック間の相対挙動の影響を受けることが一因と考えられる。また、SS ダムについての検討結果（図-2 (c)）からは、ダム堤体の固有振動数がナイキスト振動数の半分（25Hz）程度まで大きくなると、ARX モデルによる固有振動数と減衰定数を推定するのが困難となることがわかる。これは、観測データに含まれる推定固有振動数に近い振動数成分に起因するノイズによる影響を受けるためと考えられる。

5. まとめ

本論文において新たに検討対象としたダムの観測波形を用いた場合においても、逐次最小二乗法を用いた ARX モデルにより推定された堤体の固有振動数は、観測波形から求めた天端/基礎のフーリエ振幅スペクトル比のランニングスペクトルのピーク振動数と良く一致した。同手法は、重力式コンクリートダム（地震計が同一ブロックに設置し、堤高が比較的高い）の振動特性を表すパラメータをその経時変化も含めて推定する上で有効な手法と考えられるが、堤高が比較的低くダム堤体の固有振動数が比較的大きい場合にはノイズにより推定精度が低下する可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 足立修一：システム同定の基礎，東京電機大学出版局，2009。2) 尾茂淳平，佐藤弘行，金銅将史：システム同定を用いたダム堤体の振動特性の推定，土木学会第74回年次学術講演会，2019。3) 尾茂淳平，佐藤弘行，金銅将史：ARX モデルによるシステム同定を用いたダム堤体の振動パラメータの高精度推定，ダム工学研究発表会，2019。4) 斉藤知生：モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定，日本建築学会構造系論文集，第508号，pp.47-54，1998。5) 日本ダム会議：Acceleration Records on Dams and Foundations No.3，2014。6) 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，27(4)，pp.265-278，2017。