

システム同定を用いたダム堤体の振動特性の推定

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

1. はじめに

構造物の固有振動数や減衰定数といった振動特性は地震時の応答に密接に関わるパラメータであるため、ダム堤体の地震応答解析をより合理的に行うには、これらを的確に把握し、適切に解析モデルに反映することが重要と考えられる。ダムの場合、観測記録から堤体の固有振動数を把握する手法としては、基礎部と堤体上部で得られた観測記録から求めた周波数領域の伝達関数から推定する手法があり、減衰定数については、伝達関数の振幅が卓越振動数の $1/\sqrt{2}$ となる周波数に着目するハーフパワー法 ($1/\sqrt{2}$ 法) を用いた検討¹⁾が行われている。また、ダム以外の構造物を対象とした減衰定数の推定では、質点系の理論的な周波数応答関数を観測値にフィッティングさせるカーブフィット法²⁾等の手法も用いられている。しかし、このような周波数領域の伝達関数を用いた手法では、近接する他のモードや観測波形に含まれるノイズの影響を受けやすく、固有振動数や減衰定数を精度よく同定するには限界がある。建築物を対象とした振動特性の同定では、このような場合にも比較的精度の高い推定が可能な手法として、ARX (Auto-Regressive eXogenous) モデルによる時間領域のシステム同定手法³⁾⁴⁾を用いた報告もある。

そこで本検討では、ダムでの観測記録からできるだけ精度よく堤体の振動特性を同定する手法の有用性を把握することを目的に、ARX モデルを用いた評価法の適用性について検討を行った。

2. システム同定による振動特性の評価方法

(1) ARX モデル

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 $e(t)$ を仮定して次の多項式で表現される³⁾。

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

$$A(q) = 1 + \sum_{j=1}^{n_a} a_j q^{-j} \quad (2)$$

$$B(q) = \sum_{j=1}^{n_b} b_j q^{-j+1-n_k} \quad (3)$$

ここで、 n_a および n_b はモデル次数、 q^{-n} は時間遅れ演算

子 ($q^{-n}y(t) = y(t-n)$) 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 $u(\cdot)$ で漸的に線形予測する。モデル係数 $\theta = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_1 \cdots b_{n_b}]$ は、実測値 $y(t)$ と予測値 $\hat{y}(t, \theta)$ の誤差の分散が最小になるよう決定される。

(2) 固有振動数および減衰定数の同定

ARX モデルでの伝達関数は $H(z) = B(z)/A(z)$ (z 変換表現) と表される。 $H(z)$ の極 z_{pj} を決定したモデル係数 θ より求めれば、以下の式により j 次の固有振動数 f_j と減衰定数 h_j を算出することができる⁴⁾。

$$f_j = |\log z_{pj}| / 2\pi\Delta t \quad (4)$$

$$h_j = -\log|z_{pj}| / 2\pi f_j \Delta t \quad (5)$$

なお、本検討では、基礎部の入力波形として上下流方向 X だけでなく、ダム軸方向 Y や鉛直方向 Z も考慮することとし、(1) および (3) 式の $u(t)$ と $B(q)$ を以下の式に置き換えた 3 入力・1 出力 (堤体上部上下流方向) の ARX モデルを用いて同定を行った。

$$u(t) = [u_x(t) \ u_y(t) \ u_z(t)]^T \quad (6)$$

$$B(q) = [{}_xB(q) \ {}_yB(q) \ {}_zB(q)] \quad (7)$$

$${}_mB(q) = \sum_{j=1}^{n_b} {}_mb_j q^{-j+1-n_k} \quad (8)$$

3. 対象ダムと観測記録

本検討では、賀祥ダム (重力式コンクリート) および荒砥沢ダム (ロックフィル) の天端と底部監査廊内の地震計で得られた加速度記録⁵⁾ (賀祥ダム: 計 8 地震, 荒砥沢ダム: 計 19 地震) を用いた。なお、これらの記録は 100Hz のサンプリング周波数で得られているが、各観測波形から求めたフーリエ振動スペクトル比 (天端/監査廊内) の卓越振動数の 10 倍程度のサンプリング周波数となるよう、適宜ダウンサンプリングした。

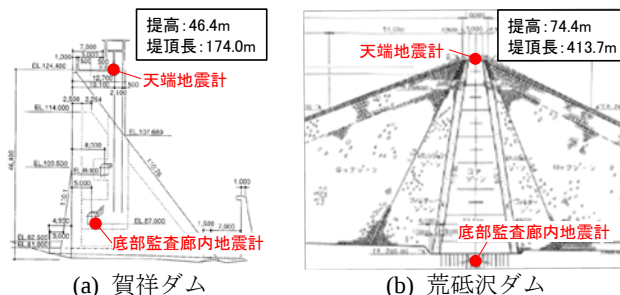


図-1 断面図および地震計設置位置

キーワード: ダム, 減衰定数, 固有振動数, 伝達関数, 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

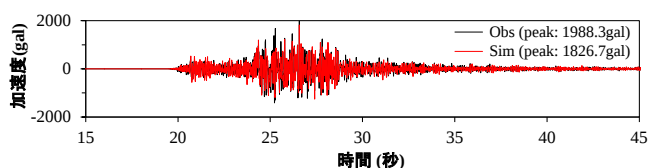
4. 検討結果

(1) ARX モデルによるシステム同定

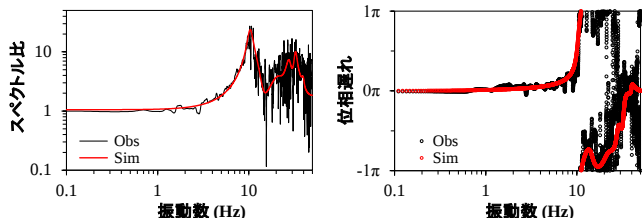
ARX モデルを用いたダム堤体の振動特性(伝達関数)の同定結果の例として、図-2に賀祥ダムの2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)の記録、図-3に荒砥沢ダムの2011年宮城県沖の地震(Mj7.2, 東北地方太平洋沖地震の余震)の記録を用いた場合の観測値(Obs)とARXモデルによる同定結果(Sim)の比較を示す。なお、本検討では、ARXモデルのモデル次数を、 $n_a = n_b$ の条件下で予測波形と観測波形の誤差が十分小さくなるよう決定した。ARXモデルでは複数のモードを考慮できるため、フーリエ振幅スペクトル比と位相差スペクトルの全体形状はよく一致している。また、フーリエ振幅スペクトル比のピーク付近に着目すると、予測値は観測値の細かな凹凸を包絡する形となっており、観測波形に含まれるノイズの影響を抑えた評価ができていると考えられる。

(2) 堤体の固有振動数および減衰定数

ARXモデルを用いて得られた1次の固有振動数と減

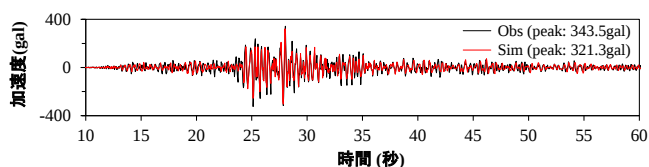


(a) 加速度時刻歴波形

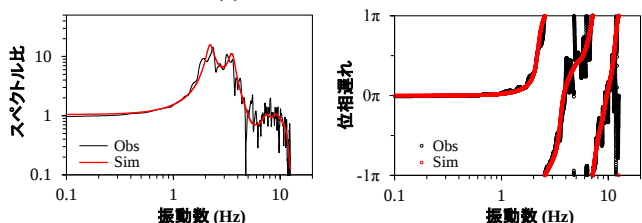


(b) フーリエ振幅スペクトル (c) 位相差スペクトル

図-2 賀祥ダムでの同定結果：上下流方向
(2000年鳥取県西部地震 (Mj7.3), $n_a=n_b=12$)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) フーリエ振幅スペクトル (c) 位相差スペクトル

図-3 荒砥沢ダムでの同定結果：上下流方向
(2011年宮城県沖の地震 (Mj7.2), $n_a=n_b=12$)

衰定数について、ダム基礎部(底部監査廊内)での上下流方向およびダム軸方向の地震動レベル(最大加速度)との関係を、図-4および図-5にそれぞれ示す。両ダムとも地震動レベルが大きくなるほど固有振動数は低振動数側に、減衰定数は大きく同定される傾向があることがわかる。この理由として、賀祥ダムのようなコンクリートダムでは、既往研究⁶⁾で指摘されている強震時の堤体ジョイントの非線形挙動が、堤体の振動特性に影響を与えていることなどが考えられる。また、荒砥沢ダムのようなフィルダムでは、強震時において堤体の剛性低下に伴って履歴減衰が増加すること⁷⁾が指摘されており、本検討の同定結果もこれに合致するものである。

5. まとめ

ダム堤体の地震応答時の振動特性を精度よく推定する上で、ARXモデルによるシステム同定が有効ことがわかった。本手法を用いてダム堤体の固有振動数や減衰定数を同定することで、地震応答解析の信頼性の向上が期待できる。

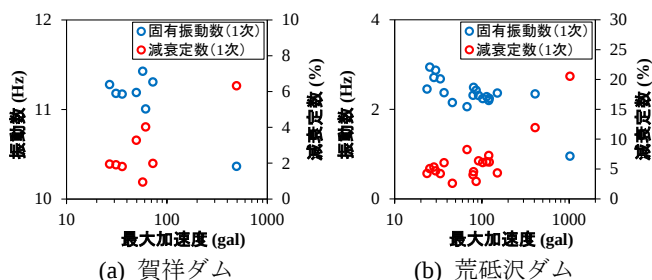


図-4 同定した固有振動数・減衰定数と底部監査廊内最大加速度(上下流方向)の関係

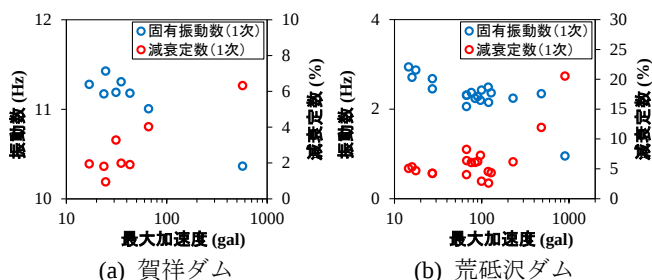


図-5 同定した固有振動数・減衰定数と底部監査廊内最大加速度(ダム軸方向)の関係

参考文献

- 1) ダム地震記録データベース更新分科会：ダム地震動記録データベース更新分科会報告書，大ダム，No.231，pp.6-54，2015。
- 2) 日本建築学会：建築物の減衰，pp.65-125，2000。
- 3) 足立修一：システム同定の基礎，東京電機大学出版局，2009。
- 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) 日本大ダム会議：Acceleration Records on Dams and Foundations No.3，2014。
- 6) 渡辺啓行，Soheil Razavi Darbar，高島賢二，谷山尚：コンクリートアーチダムの地震応答における材料非線形性とジョイント開口の相互作用，ダム工学，Vol.10，No.4，pp.276-288，2000。
- 7) 佐藤信光，富田尚樹，波多野圭亮：2008 年岩手・宮城内陸地震におけるロックフィルダムの地震応答挙動の検討，ダム工学研究発表会，2010。