

重力式コンクリートダムを観測加速度波形を用いた ARX モデルによるダムの振動特性の推定

国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 ○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固有振動数や減衰定数がある。これまでの研究から、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、ダムの振動特性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手法¹⁾が有用なこと、そして、忘却係数を考慮した逐次最小二乗法を用いることで、振動特性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^{2), 3)}。

これまでの検討では、上記 ARX モデルによるシステム同定手法の有効性を検証するため、基礎部で比較的大きな加速度の地震動記録が観測されダム堤体の固有振動数が変化した⁴⁾と考えられる限られたダムを対象としていた。本研究では、減衰定数の経時変化にも着目し、基礎の最大加速度が 100gal 程度以上の加速度を観測した重力式コンクリートダムを対象に、ARX モデルによりダムの振動特性（1 次固有振動数及び 1 次減衰定数）を推定した。その上で、基礎の最大加速度や堤高がダム堤体の振動特性に与える影響を分析した。

2. ARX モデルによるダム堤体の振動特性の推定方法

システム同定においては、対象とするシステムの入力データと出力データの測定値から推定されるシステムの特徴は数学的なモデルで表現される。システム同定の基本的なモデルの 1 つとして、入力 $u(t)$ 、出力 $y(t)$ および白色ノイズ $e(t)$ の関係を式 (1) で表わす ARX モデル¹⁾ がある。

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t), \quad A(z) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i}, \quad B(z) = \sum_{i=1}^{n_b} b_i z^{-n_k - i + 1} \quad (1)$$

$$\theta = [a_1 \cdots a_{n_a} \quad b_1 \cdots b_{n_b}]^T \quad (2)$$

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 ($z^{-n}y(t) = y(t-n)$) である。式 (2) の係数ベクトル θ の推定について、本研究では、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¹⁾と、振動特性の経時変化を考慮できる忘却係数付きの逐次最小二乗法²⁾の 2 つの方法を用いた。逐次最小二乗法は振動特性の経時変化を推定することが可能であるため、加速度が比較的大きくダム堤体が非線形の挙動を示している時の振動特性の経時変化を評価することが可能である。逐次最小二乗法では、各時刻の $\theta(t)$ 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)⁵⁾ により時刻 t における j 次の固有振動数 $f_j(t)$ および減衰定数 $h_j(t)$ を算出する。

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

ここに、 λ は忘却係数 ($0 < \lambda < 1$) で、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 $\theta(t)$ を更新することを意味する。 $T_{1/2}$ はこの重み λ^{τ} が 0.5 となる期間 (半減期と呼ぶ) で、本研究では、既往研究³⁾ を踏まえて 4 秒とした。

上記の方法で 1 次固有振動数および 1 次減衰定数を推定し、ダム堤体の振動特性の経時変化の分析を行った。なお、逐次最小二乗法による振動特性の分析においては、主要動区間で 1 次固有振動数は減少し、1 次減衰定数は増加する傾向が確認された。このことを踏まえ、逐次最小二乗法の推定結果において、1 次固有振動数については主要動中の最小値、1 次減衰定数については主要動中の最大値をそれぞれ抽出して用いた。

3. 本研究での検討対象

本研究では、日本大ダム会議から公表されている国内のダムで得られた地震動観測波形⁶⁾のうち、上下流方向の基礎の最大加速度が 100gal 程度以上の重力式コンクリートダムで観測された波形を対象とした。

4. 検討結果

観測波形から推定した振動特性を表 1 及び図 1 に示す。堤高 H と 1 次固有振動数の関係を示す図 1(a) には両者の関係に関する経験式⁷⁾ ($f = 1/T$, $T = 0.191H/100$ (± 0.029), T は 1 次固有周期) をあわせてプロットした。また、図 1(b) は堤高と 1 次減衰定数、(c) は基礎の最大加速度と 1 次減衰定数の関係についてそれぞれ示している。

まず、図 1(a) から、ARX モデルにより推定された 1 次固有振動数は経験式の上限と下限の範囲内にあることが分かる。次に図 1(b) から、バラツキは大きいものの、堤高と 1 次減衰定数には正の相関が確認される。また、図 1(c) 左図から、基礎の最大加速度と 1 次減衰定数には、図 1(b) と同様バラツキは大きいものの正の相関が確認される。

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、観測波形、最大加速度、ARX モデル

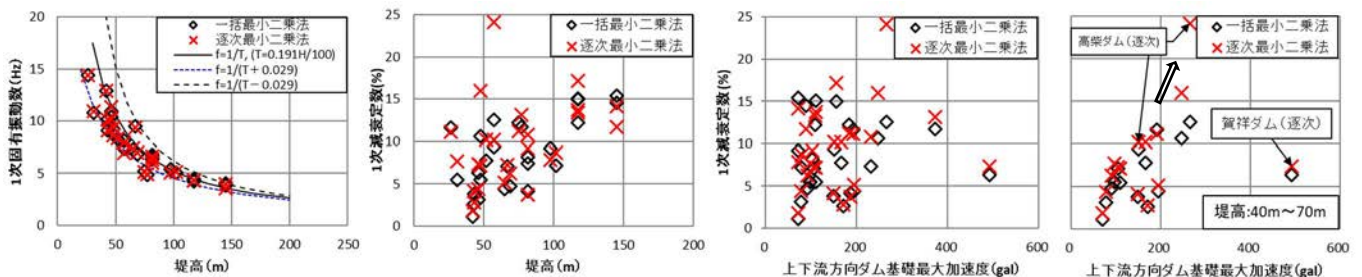
連絡先：〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 TEL：029-864-2587

表-1 ARX モデルによる同定結果一覧表 (ダム高と減衰定数&固有振動数)

ダム名	堤高 (m)	ダム基礎(上下流方向)の最大加速度 (gal)	地震発生時刻 (日本標準時間)	1次固有振動数		1次減衰定数	
				一括最小二乗法	逐次最小二乗法	一括最小二乗法	逐次最小二乗法
賀祥 (KASHO) #地震計設置角度を修正	46.4	493	2000/10/06 13:30:17	10.37	10.14	6.33	7.37
		78	2000/10/07 04:59:30	10.92	11.34	3.13	4.4
※鷹生 (TAKOU)	77.0	373	2011/04/07 23:32:43	4.85	4.91	11.7	13.16
高柴 (TAKASHIBA)	57.5	151	2011/03/11 14:46:18	8.14	7.9	9.39	10.17
		265	2011/04/11 17:16:12	7.36	6.98	12.52	24.11
花山 (HANAYAMA)	47.8	247	2008/06/14 08:43:45	9.22	9.38	10.64	15.96
		111	2011/03/11 14:46:18	8.72	8.6	5.47	7.15
※田瀬 (TASE)	81.5	103	1987/01/09 15:14:46	6.55	6.63	8.2	9.16
		232	2003/05/26 18:24:33	6.76	6.34	7.39	10.81
		186	2011/04/07 23:32:43	6.35	6.02	4.13	3.71
三春 (MIHARU)	65.0	195	2011/03/11 14:46:18	7.23	7.36	4.45	5.13
遠野 (TOONO)	26.5	193	2003/05/26 18:24:33	14.37	14.4	11.59	11.09
※一庫 (HITOKURA)	75.0	183	1995/01/24 05:46:51	5.21	5.16	12.22	11.2
綾里川 (RYORIGAWA)	43.0	171	2003/05/26 18:24:33	10.17	10.09	2.65	2.78
		150	2011/04/07 23:32:43	9.11	9.1	3.79	4.13
ハヶ川 (HAKKAGAWA)	52.0	167	2007/03/25 09:41:57	8.27	8.3	7.79	10.2
※鶴田 (TSURUDA)	117.5	155	1997/03/26 17:31:47	4.28	4.29	15	17.14
		111	1997/04/03 04:33:23	4.25	4.3	15.03	13.74
		109	1997/05/13 14:38:27	4.47	4.31	12.23	13.35
高瀬川 (TAKASEGAWA)	67.0	106	2000/10/06 13:30:17	9.46	9.34	7.1	7.24
佐古 (SAKO)	31.0	98	2001/03/24 15:27:54	10.76	10.92	5.51	7.66
真野 (MANO)	69.0	92	2011/03/11 14:46:18	6.83	7	4.74	6.29
※田子倉 (TAGOKURA)	145.0	90	2004/10/23 17:56:00	4.04	3.95	14.52	11.74
		72	2004/10/27 10:40:50	3.83	3.58	15.38	14.15
※小玉 (KODAMA)	102.0	79	2011/03/11 14:46:18	5.08	5.16	7.17	8.72
※千屋 (CHIYA)	97.5	72	2000/10/06 13:30:17	5.39	5.06	9.16	7.84
新宮 (SHINGU)	42.0	72	2007/04/26 09:02:57	12.91	12.92	1.15	1.84

*表中の黒色は上下流方向の基礎の最大加速度が 200gal 以上, 灰色は同 100gal 以上, 無色はダム軸方向の最大加速度が 100gal 以上のデータを表す.

*ダム名の前に※を記載している7ダムについては, 高周波数ノイズの影響を低減するため観測波形のダウンサンプリングを行った.



(a) ダム高と1次固有振動数 (b) ダム高と1次減衰定数 (c) ダム基礎最大加速度と1次減衰定数(左:全ダム, 右:堤高40~70m)

図1 ARX モデルによる同定結果 (基礎の最大加速度|Amx|>100gal) の重力式コンクリートダム

図1(c)右図はこのうち堤高 40m~70m の観測波形からの同定結果のみを抽出してプロットしたものである. 国内のコンクリートダムとしては最大級の最大加速度が基礎部で観測されている賀祥ダムの推定結果が他のプロットからやや離れているものの, 基礎の最大加速度と1次減衰定数には正の相関が確認される. なお, 賀祥ダムのデータのみに着目した場合には, 基礎の最大加速度と1次減衰定数には正の相関があることを別途確認している⁸⁾.

5. まとめ

基礎の最大加速度 100gal 程度以上の重力式コンクリートダムの観測波形を対象として, ARX モデルによりダム堤体の振動特性 (1次固有振動数, 1次減衰定数) を推定した. 堤高と1次固有振動数の関係については既往の経験式の範囲内にあるとともに, バラツキは大きいものの, 堤高および基礎の最大加速度と1次減衰定数には正の相関があることが確認された. 強震時も含めた観測波形の分析からダムの1次減衰定数への影響を明らかにし, 地震応答解析において考慮することで, 強震時における実挙動に近い解析結果が得られ, 強震動に対するダムの耐震性能をより合理的に評価できるようになると考えられる. なお, 現状ではダムでの強震動の観測波形は限られるため, 今後も強震時を含む観測波形の収集とダム堤体の振動特性への影響の分析・評価を継続的に行っていく必要がある.

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: 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.
- 3) 傅斌, 佐藤弘行, 金銅将史: ARX モデルによる強震時の重力式コンクリートダムの振動特性推定法の適用条件に関する一考察, 土木学会第76回年次学術講演会, 2021.
- 4) 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.
- 5) 斎藤知生: 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.
- 6) 日本大ダム会議: Acceleration Records on Dams and Foundations No.3, 2014.
- 7) 日本大ダム会議: ダム地震記録データベース更新分科会報告書, 大ダム No.231, 2015.
- 8) 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.