

伝達関数マトリックス法によるダムの振動特性評価とその利用

柏柳 正之^{1*}・曹 増延²

¹電源開発株式会社 技術開発部 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

²株式会社JPビジネスサービス 社会環境部 (〒135-8451 東京都江東区深川2-2-18)

*E-mail: masayuki_kashiwayanagi@jpower.co.jp

伝達関数は、新規構造物の耐震設計、既存構造物の耐震性能照査、劣化診断及び損傷診断などにおいて必要不可欠な指標の一つであるが、従来法で算出される伝達関数は、特に地震記録を用いる場合ではバラツキが大きく、振動特性の特定が困難となることがある。筆者らは、伝達関数の評価精度向上のために、振動の方向間の相互干渉を考慮した伝達関数マトリックス法を開発した。本論文は、ダム工学分野において、本手法の適用により、ダムの卓越振動数が高精度に評価できること、数値解析モデルに頼らず構造物の地震応答予測が低コストで実施できること、および高精度の伝達関数評価によるダムの劣化診断への適用可能性があることを示す。

Key Words : transfer function matrix, earthquake monitoring, earthquake response analysis

1. はじめに

伝達関数は、構造物の耐震設計、耐震性能評価、耐震診断などにおいて必要不可欠な指標の一つである。地震観測記録から伝達関数を求める従来の方法¹⁾は、振動の方向別の入力波及び応答波のフーリエスペクトル比として求めるものである。すなわち、伝達関数は、方向別に独立しているものとして地震応答の方向間の相互干渉は考慮されない。例えば、図-1 に示すアーチダムの基礎とクレストにおいて、地震動の方向毎の記録を用いて、式(1)により方向毎の伝達関数を算出することができる。

$$T_i = \frac{S_i^A}{S_i^B} \quad (i = X, Y, Z) \quad (1)$$

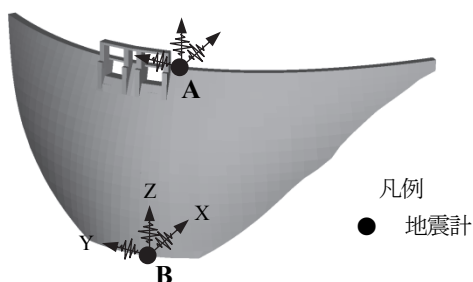


図-1 アーチダムにおける地震観測のイメージ

ここに、 S は地震加速度記録のフーリエスペクトルであり、 T は伝達関数である。 A 及び B はそれぞれクレストと基礎を示す添え字であり、 X, Y, Z は振動成分の方向を指す。

クレストでの特定方向の地震応答には、基礎における異なる方向の振動成分の影響も含まれている。このため、異なる特性を有する地震動ではその方向間の相互干渉の度合いが変わっているものと考えられる。式(1)を用いる方法（以下、従来法という）では、これらの方向間の相互干渉は無視され、三方向の地震動及びクレストの地震応答がそれぞれ方向毎に独立に発生していると見做されている。結果として、式(1)により算出された伝達関数は、地震毎のバラツキが大きくなり、伝達関数の卓越振動数として評価される構造物の固有振動数の読取さえも困難となることがある。

著者らは、伝達関数の評価にかかわる課題のうち構造物への入力と応答における方向間の相互干渉に着目し、伝達関数の新たな算出法として振動方向に対応する伝達関数と他の 2 方向の入力に対する応答による寄与伝達関数を分解して求める伝達関数マトリックス法（以降、本手法という）を提案した²⁾。本手法の詳細については文献 2)（以下前報という）に譲るが、入力と応答の方向間の相互干渉を考慮するために 3 組の地震観測データを用いて式(2)に示す伝達関数マトリックスを求めることに

より、構造物の振動特性をより明瞭に定量化することができる。

$$\begin{Bmatrix} S_X^A \\ S_Y^A \\ S_Z^A \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{XX} & T_{XY} & T_{XZ} \\ T_{YX} & T_{YY} & T_{YZ} \\ T_{ZX} & T_{ZY} & T_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_X^B \\ S_Y^B \\ S_Z^B \end{Bmatrix} \quad (2)$$

上式の T_{ij} ($i = X, Y, Z$) は図-1 の B 点での i 方向の振動に対する A 点での i 方向の応答特性を示す伝達関数であり、従来法 (式(1)) による伝達関数に相当する。各成分 T_{ij} ($i, j = X, Y, Z$, 但し, $i \neq j$) は方向間の相互干渉を考慮するために新たに導入する寄与伝達関数である。例えば, T_{XY} は B 点での Y 方向の振動に対する A 点での X 方向の応答特性を示す。式(2)の各変数は振動数の関数である。

本論文では、ダム工学分野において、本手法の適用により、ダムの卓越振動数が高精度に評価できること、および数値解析モデルに頼らず構造物の地震応答予測が低コストで実施できることを示すとともに、高精度の伝達関数評価によるダムの劣化・損傷検出についての試みについても述べる。

2. ダムの振動特性評価への利用

本章では、本手法による振動特性の高精度評価の事例として、地震応答記録によるダムの卓越振動数検討例を示す。対象ダムは、堤高145m、堤頂長462mのコンクリート重力ダムである。下流面及び地震計の設置位置を図-2に示す。地震計は、上下流方向、ダム軸方向及び鉛直方向の三方向成分を有し、1994年から現在まで約480個の地震観測記録が得られている。後述するように本ダムにおける地震応答は、従来法により評価される卓越振動数はやや大きなばらつきを示すが、経年的な変化傾向は認められず、基礎と天端の応答加速度は全ての地震応答においてほぼ線形関係³⁾を示す。従って、堤体の動的特性は地震観測期間を通じて一定であり、地震応答は線形挙動の範囲にあったものと考えている。

振動特性評価に用いる地震動は、満水位、中間水位及び低水位に近い状態からそれぞれ選定して検討する。高水位条件 (0.89H, Hは満水位) では新潟県中越地震 (2004年, M6.8) 時に、多くの地震観測記録が得られており、このうち天端 (地震計T) における上下流方向の応答加速度の大きさによって、各セット3地震、8セットを、中間水位条件 (0.38H) 及び低水位条件 (0.07H) では各1セットを選定した (表-1参照)。本検討において用いるデータ数は30個であり、当ダムで得られた総地震データ数の約6%である。

凡例：■ 地震計，
T: 天端, F: 基礎 G: 右岸地山

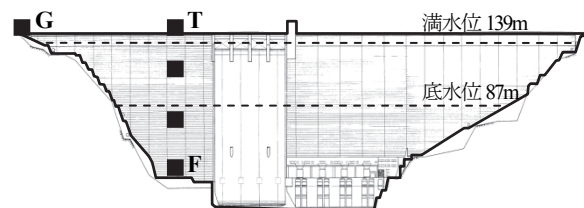


図-2 ダムの下流側正面図，地震計の位置

表-1 使用する地震観測記録一覧

No.	地震発生時刻	天端の最大 加速度(gal)	水深
1	2004/10/27 10:40:56	600	136.2m 高水位
	2004/10/23 18:34:12	498	
	2004/10/23 17:56:08	455	
2	2004/10/23 18:03:11	336	
	2004/10/25 06:05:04	277	
3	2004/11/08 11:16:04	140	
	2004/10/23 18:11:30	169	
	2004/11/04 08:57:37	153	
4	2004/11/08 11:16:04	140	
	2004/10/23 19:46:05	117	
	2004/10/25 00:28:17	94	
5	2004/10/23 21:44:34	73	
	2004/10/23 18:07:39	66	
	2004/11/08 11:32:22	65	
6	2004/11/10 03:43:14	62	
	2004/11/08 11:32:22	65	
	2004/11/10 03:43:14	62	
7	2004/10/24 09:28:12	50	
	2004/10/23 19:36:54	48	
	2004/11/08 11:27:16	42	
8	2004/11/09 04:16:06	41	
	2004/11/08 11:27:16	42	
	2004/11/09 04:16:06	41	
9	2004/11/06 02:53:27	40	118.4m 中間水位
	2005/01/18 21:50:33	37	
	2010/05/01 18:20:37	67	
10	1998/02/21 09:55:42	44	88.7m 低水位
	2011/03/11 14:54:42	17	
	2011/03/11 15:15:34	18	
	2011/03/19 18:56:48	17	

表-1に示す10組の地震データセットを用い、本手法により得られたダム底部 (地震計F) と天端 (地震計T) の間の伝達関数をデータセット毎に図-3に示す。また、図-3から推定されるダムの上下流方向の低次の卓越振動数 (図-3で↓で示す) を表-2にまとめる。さらにこ

れらを従来法による伝達関数から推定した卓越振動数とともに図-4に示す（伝達関数マトリックス法は◇印、従来法は○印³⁾）。図-4の回帰式（実線）は、文献⁴⁾を参照したものであり、無次元化した水位（ h （水深）/ H （満水位に対する水深））および気温をパラメータとする回帰であり、従来法による卓越振動数の平均的な値を示す。

以下、本手法による伝達関数及びこれから推定されるダムの固有振動数の評価精度に着目する。本手法により評価される伝達関数は、堤体の加速度応答の大きさ（17gal～600gal）に関わらず、低次ピークも比較的明瞭に判読することができ、またその変化傾向はほぼ同様である（図-3参照）。高水位条件（8セットの地震観測記録）では、低次ピークは3.1 Hzあるいは3.2 Hz付近ではほぼ一定の範囲にあり、中間水位条件及び低水位条件では、低次ピークは水位に応じてやや高振動数側に移行する。本手法による伝達関数は、高次の卓越振動数の読取精度の向上にも寄与し、上下流方向の2次卓越振動数として約4.1Hzが読取れ（図-3参照）、これは別途実施している固有値解析の結果とほぼ一致することを確認している。

図-4に示すダムの卓越振動数は、従来法では同じ水位条件においても0.5 Hz程度のバラツキがあるのに対して、本手法による評価点はそれほど多くないものの、バラツキは小さく同水位条件では同一の値として評価され、回帰線の傾向ともほぼ整合しており、従来法に比べて評価精度が高いものと考えられる。これは、本手法では振動方向（上記の検討ではダムの上下流方向）以外の地震動成分による応答を分離していることの効果と考えられる。

コンクリート重力ダムの固有振動数は、地震時における堤体と貯水の相互作用により貯水位の低下に対して高振動数側に移行することが知られており^{3, 4)}、本手法による卓越振動数の評価結果にも明瞭にこの傾向が認められる。

表-2 伝達関数マトリックス法による卓越振動数の評価

データセット No. (表-1 参照)	卓越振動数 (Hz)	水深(m)
1	3.247	136.2
2	3.174	
3	3.174	
4	3.198	
5	3.223	
6	3.198	
7	3.247	
8	3.174	
9	3.516	118.4
10	3.674	88.7

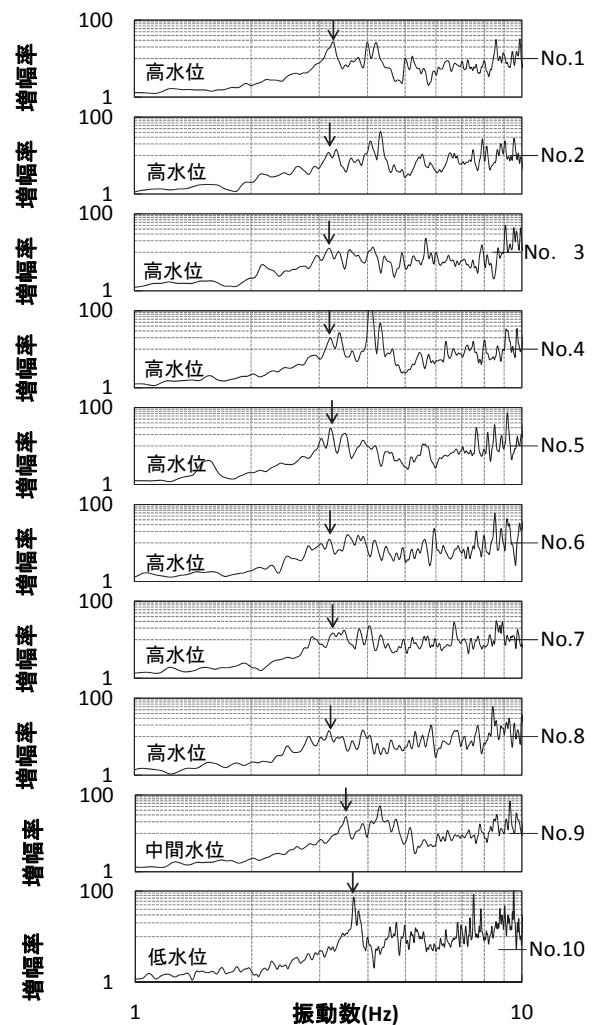


図-3 ダムの上下流方向の伝達関数と低次ピーク

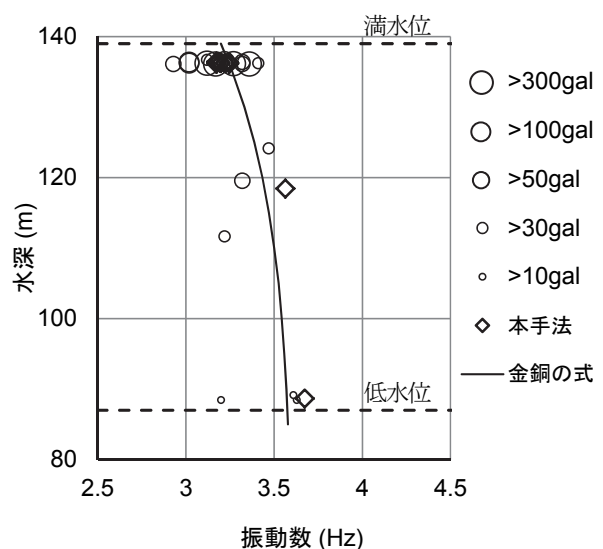


図-4 卓越振動数評価に関する手法の比較

以上のように、本手法による伝達関数評価は、従来法に比較して、評価結果は妥当なものであり、かつ高精度で、高次の卓越振動数の読取精度の向上にも寄与して

おり、ダム等の構造物の動的特性評価に有効であると考えられる。

3. ダムの地震応答予測への利用

ダムの地震応答を求める方法としては、数値モデルを用いる応答解析による方法及び地震波の応答スペクトルを用いて統計的手法によってダムの最大応答を求める応答スペクトル法⁹⁾がある。応答スペクトル法と同様に応答解析によらない方法として、伝達関数を用いて構造物の地震応答を予測する方法¹⁾があるが、ダムの場合では、規模が大きく、かつ三次元性が卓越する構造物であるため適用しにくく、実務への適用実例は見当たらない。これはダムの伝達関数を精度よく評価することが難しいためと考えられる。ここでは、本手法を適用するダムの地震応答予測について検討する。

本手法を適用するダムの地震応答予測は、以下の3ステップで実施する。まず①過去の地震観測記録を基に本手法により伝達関数マトリックスを求め、次に②地震応答予測を行う対象地震動のフーリエスペクトルと伝達関数マトリックスの積としてダム応答のフーリエスペクトルを求め、最後に③これを時間領域に変換することによりダムの地震応答を求める。この手順をフローとして図-5に示す。以下、これを具体的に例示し、予測結果と観測結果の比較を行う。

(1) 予測条件

対象ダムとして図-2に示す既設コンクリート重力ダムを選定する。応答予測は当ダムに最大級の応答を発生させた中越地震の余震（2004年10月27日、M6.1、震央距離23km）とする。底部監査廊（図-3のF位置）で記録した加速度時刻歴を図-6に示す。堤体の伝達関数マトリックスは、貯水の影響を同じく考慮できるように、ほぼ同一水深で発生した3回の小地震の記録（表-1に示すデータセット番号7）を用いて算定する。

(2) 予測結果

図-5に示すフローに従い、得られたダム天端の3方向の加速度応答を、実際の応答記録と併記して図-7に示す。両者は、主要動の波形の変動状況、最大加速度値及びその最大値の発生時刻が概ね一致しており、数値モデルを用いる解析結果と比べてそん色ないものと判断され、本手法を利用するダムの応答予測が可能であることを示している。また、ここに示す方法は、伝達関数算定のために用いる地震時点におけるダムの力学特性が反映され、数値モデルを用いる応答解析における解析パラメータの設定に関わる不確実性がないことが特徴である。

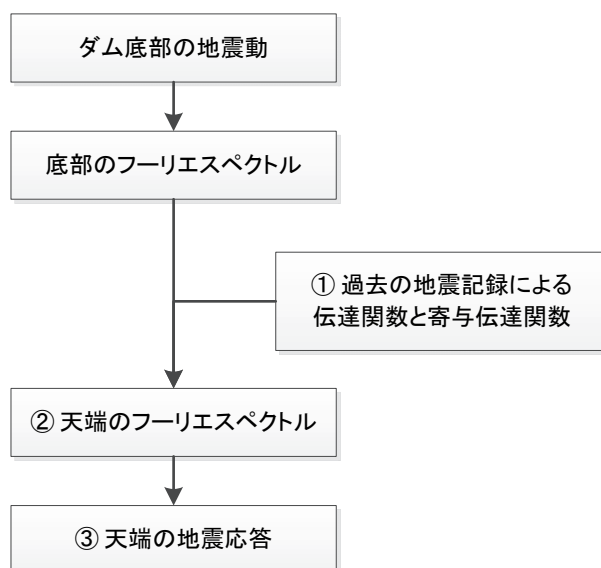


図-5 伝達関数マトリックス法を用いる地震応答予測フロー

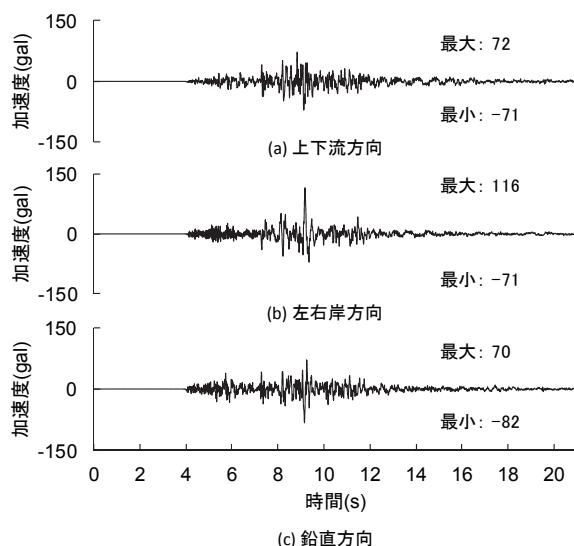


図-6 ダム底部における地震加速度

4. ダムの劣化診断への利用

コンクリートダムは、長年の自然環境下での暴露に対して、気温変化、化学的反応・腐食の進展及び繰返し地震荷重を受けることなどにより、表層にある程度の劣化が発生することがある。江川ら⁹⁾、成岡ら⁹⁾は、40年自然環境に暴露したコンクリート表層の弾性係数が約1割程度低下することを指摘している。このような劣化状況を把握し、対策を講じることがダムの維持管理・防災及び有効利用の観点から重要である。

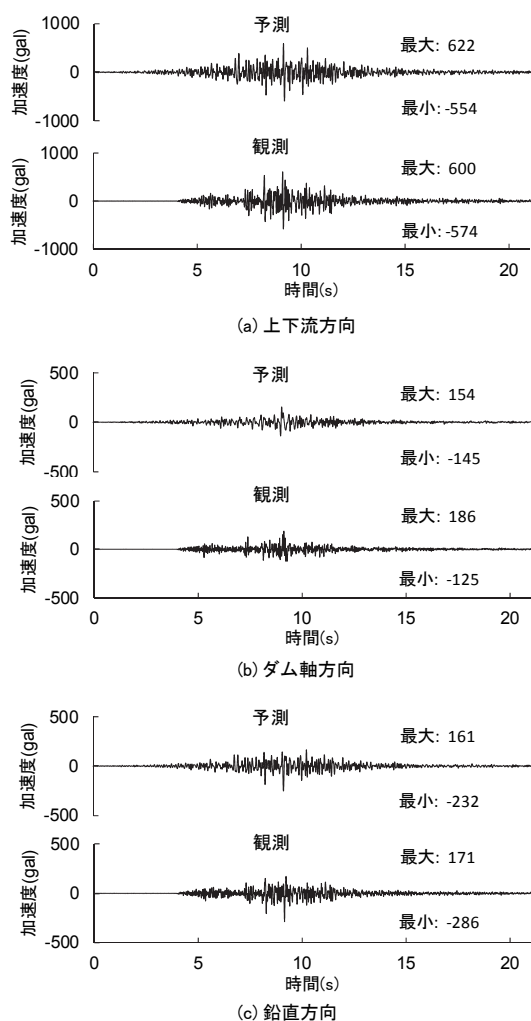


図-7 地震予測結果と実地震観測結果の比較

ダムの劣化状況の検出方法として、地震記録の分析から振動特性の変化を検知する方法が考えられる。対応する方法として、佐々木ら⁹⁾は、ダムの固有振動数を指標として、地震等によるダムの損傷度を推定する手法を検討しており、また、ダムの伝達関数の経時的な変化から健全度を評価しようとする試みがある³⁾。しかしながら、これらの検討では伝達関数の推定精度に課題があるものと考えられる。ここでは、ダムの劣化診断における本手法の適用可能性を検討する。

検討は、仮想的にダム表面付近のコンクリートが劣化した状態を想定し、そのときの伝達関数マトリックスの変化を算定し、これを従来法と比較する。対象モデルとして、コンクリート重力ダムの表層 1.0m の範囲でコンクリートが劣化し、弾性係数が 10%低下した状態を想定する。これを図-8 に示す。伝達関数は、実ダムにおける 3 組の地震観測記録を用いる動的解析に基づく天端応答により求めることとして、劣化の有無による影響を検討する。解析プログラムには UNIVERS⁷⁾を用いた。劣化による伝達関数の変化を、上下流方向成分に着目し、従来法および本手法と比較して、図-9 に示す。

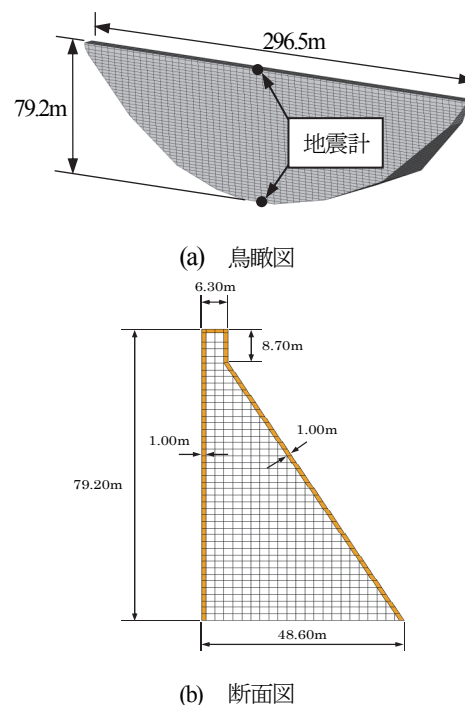
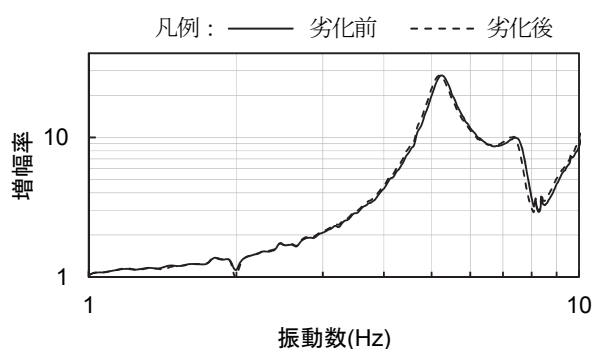
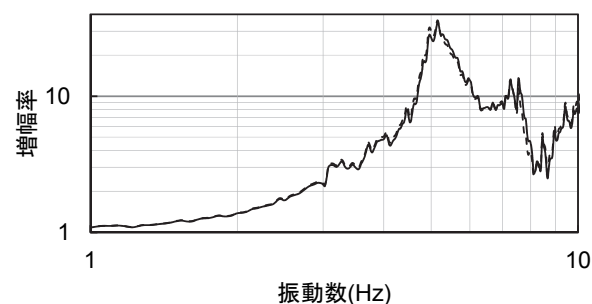


図-8 劣化診断のための解析モデル



(a) 伝達関数マトリックス法



(b) 従来法

図-9 劣化の有無による伝達関数の変化 (T_{xx})

伝達関数マトリックスは全体的に滑らかな変動を示し、劣化を考慮した場合には卓越振動数はわずかに (0.05Hz 程

度)に減少し、想定した劣化の影響が認められる。一方、従来法による伝達関数では、ピーク値が読みづらく、劣化の有無による卓越振動数の差は明瞭でない。しかしながら、ここで想定した程度の劣化では、どちらの手法によっても実用上その検出は難しいと考えられる。一方、大規模な地震により堤体自体に広範囲に亀裂が発生するような場合では、振動特性も比較的大きく変動するものと推定されることから、本手法による高精度の伝達関数評価は損傷や劣化検出の有効な手法となりうるものと期待され、今後の課題としたい。

5. まとめ

本論文では、構造物の伝達関数の高精度算出法としての伝達関数マトリックス法のダム工学における適用性について検討した。以下に結論を列記する。

- (1) 伝達関数マトリックス法では、入力と応答の方向間の相互干渉を考慮していることから、得られる伝達関数マトリックスはダムの振動特性を従来法に比べてより明瞭に定量化することができる。
- (2) 伝達関数マトリックス法を用いるダムの地震応答予測は、ダムの実応答と良い精度で一致することを確認した。伝達関数マトリックス法に基づくダムの地震応答予測では、予測時点でのダムの動的特性を反映する伝達関数マトリックスを扱うことから、数値モデル及び動的特性パラメータの設定に起因する不確実性を排除できることが特徴となる。
- (3) ダムの劣化検知法として伝達関数マトリックス法を

適用し、従来法に比べて比較的明瞭に卓越振動数の変化をとらえられる可能性があることを確認した。ただし、堤体表層のみなどの軽微な劣化検知は実用上難しいと考えられる。

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
- 2) 曹増延・柏柳正之・吉田昌稔・浅賀裕之：振動の方向間相互干渉を考慮する伝達関数の高精度算出法とダム工学での利用，電力土木，No.390，pp.13-21，2017
- 3) 柏柳正之，大西豪昭，永田直之，早川誠一：地震時応答記録に基づくコンクリートダムの動的応答特性の評価，第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.166-171，2016
- 4) 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，25(1)，pp.16-28，2015
- 5) 永山功，佐々木隆：応答スペクトル法によるアーチダムの地震応答解析，土木技術資料，35-5，pp.22-29，1993
- 6) 佐々木隆，金縄健一，山口嘉一：重力式コンクリートダムの地震時損傷度推定方法に関する一検討，土木学会第58回年次学術講演会，I-195，2003
- 7) 有賀義明，曹増延，渡辺啓行：強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.53-67，2004.04
- 8) 江川顕一郎，千代田将明，野本高憲，野口博章：長期現地暴露試験に基づくダムコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.472/V-20，pp.39-48，1993
- 9) 成岡正祥，原孝志，武石昭一郎：ダムコンクリートの凍結溶解抵抗性評価と表面劣化の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，2007

APPLICATION OF THE TRANSFER FUNCTION MATRIX METHOD IN DAM ENGINEERING

Masayuki KASHIWAYANAGI and Zengyan CAO

Transfer function is essential for the seismic design and safety evaluation, etc. of structures. In order to improve the evaluation accuracy of the transfer function, the authors proposed the transfer function matrix method considering mutual interference between vibration directions. In this study, the applicability of the proposed method in the field of dam engineering is investigated. It has been concluded that the proposed method can give out more recognizable dynamic characteristics than the conventional method. It is applicable to the earthquake response prediction of dams at low cost without relying on a numerical model. Furthermore, it shows the possibility for utilizing in the deterioration diagnosis of dams.