常時微動観測と三次元有限要素解析に基づく 実在アーチダムの振動特性把握

仲村 成貴¹・塩尻 弘雄²・上島 照幸³・有賀 義明⁴・大湊 周作⁵

¹正会員 日本大学専任講師 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)
E-mail:nakamura.masataka@nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学特任教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)
E-mail:shiojiri@civil.cst.nihon-u.ac.jp

³正会員 宮城大学教授 食産業学部環境システム学科 (〒982-0215 宮城県仙台市太白区旗立2-2-1)
E-mail:ueshima@myu.ac.jp

⁴フェロー会員 弘前大学教授 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)
E-mail:y-a-arig@cc.hirosaki-u.ac.jp

⁵学生会員 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)
E-mail:nakamura.masataka@nihon-u.ac.jp

高経年化した実在アーチダムにて常時微動および地震動の長期間にわたる連続観測が実施されている。この長期継続観測では天端上の2箇所に加速度計を設置し、ダム固有振動数とダム貯水位やダム堤体温度との関連性を調査することを目的としている。一方、アーチダム全体系の振動特性を把握して連続観測のベンチマーク資料とすることを目的に、連続観測とは別途にセンサーを高密度に配置して常時微動観測を短期間で実施した。本論文では、高密度なセンサー配置による常時微動観測結果から得られたアーチダム全体系の振動特性の把握と、それらを表現できる三次元有限要素モデルの作成により、微小振幅時におけるダム堤体コンクリートと基礎岩盤の物性値を同定した結果について述べる。

Key Words : *natural frequencies, mode shapes, arch dam, ambient vibration, three dimensional finite element model*

1. はじめに

土木構造物に対する維持管理の重要性がますます高まり、高経年化が進む土木構造物の健全性を的確かつできるだけ簡易に評価できる手法が望まれている¹⁾。国内のダムも例外ではなく、建設後50年を経過したダムが増加している。そのため、目視点検や堤体漏水量・堤体変位などのモニタリングによる日常管理に加えて、ダムの性能をよりの確に把握する必要性が高まっている。

振動計測に基づく手法は、構造物に損傷が生じる前後における振動特性の変化に着目し、構造物の性能や健全性を評価し得る有用な手法の一つとされ、各種構造物を対象とした研究例が多く報告されている。

振動モニタリングに基づいてアーチダムの振動特性を検討した研究は、これまでに様々な結果が報告されている。例えば、大熊らは大規模アーチダム2基での長期間

にわたる常時微動観測結果より、ダムの低次固有振動数がダム貯水位およびダム表面温度の影響を受けて周期的に変化していることを報告している^{2,3)}。上島らが実施しているアーチダムでの長期間の常時微動観測でも、季節変化によるダム堤体表面温度の低下に伴い、固有振動数が低下する傾向が報告されている⁴⁾。さらには、天端ダム軸直交方向で、2011年東北地方太平洋沖地震時に最大加速度626.2gal、同年4月23日23時32分頃に発生した余震時に最大加速度約430galが観測され、いずれも地震発生前後に比べて卓越振動数が低下したことが報告されている⁴⁾。これらの報告より、振動計測を利用してアーチダムの性能や健全性を検討するためには、ダム水位やダム堤体温度などに伴う振動特性の変動が考慮された精緻なモデルが必要と考えられる。

著者らは、構造健全性の評価手法を検討することを念頭に、ダムの性能をよりの確に表現し得る精緻なモデル

の作成を目指している。その第一段階として、本論文では高密度なセンサー配置による常時微動観測と三次元有限要素モデルによって微小振幅時におけるアーチダム全体系の振動特性を把握するとともに、微小振幅時におけるダム堤体のコンクリートと基礎岩盤の物性値を推定した結果について述べる。

2. 対象ダムの概要

本研究で対象とするダムは、宮城県仙台市に位置する大倉ダムである。大倉ダムは洪水調節、上水道、灌漑用水、工業用水、発電を目的とした多目的ダムであり、1961(昭和36)年に竣工した。表-1にダムの主な緒元、写真-1に左岸アーチ、図-1にダム平面図、図-2にダム下流面展開図と断面図を示す。大倉ダムは、中央のスラストブロックを介して2つのアーチが連なる日本で唯一のダブルアーチ式コンクリート構造であり、右岸側アーチの堤高が42.0m、左岸側アーチの堤高が82.0m、ダブルアーチの堤頂長が323.0m、総貯水容量が28,000,000m³、堤体積が226,000m³の規模を持つ。左岸アーチのほぼ中央には、放水設備と4門の鋼製クレストゲート(高さ7.55m、幅8.86m)が設置されている。スラストブロック上は駐車場、天端は幅員4.4mの一般道となっており、一般車両の通行に供されている。ダムサイトの岩質は堅固な石英質安山岩、凝灰岩である⁵⁾⁶⁾。

3. 常時微動観測の概要と結果

(1) 観測概要

ダブルアーチダム全体系の振動特性を把握するために、天端の下流側に13箇所の測点を配置した。測点は、図-1のダム平面図に矢印で示した位置に設置した。三次元挙動の把握には、ダム高さ方向にも測点を配置することが望ましいが、ダム壁面への測点設置が容易ではないため天端のみに測点を設けた。センサーには固有振動数1Hzのムービングコイル型速度計を用いた。計測方向はダム軸直交方向を主とし、左右岸近傍(測点①、⑬)およびスラストブロック上(測点⑦)のみ水平2成分とした。

サンプリング間隔を5ms、ローパスフィルタの遮断振動数を40Hzとして約2時間連続して全成分同時に常時微動を観測した。天端では観測中に平均して約1分に1台、一般車両の通行があった。なお、観測時の水位はEL256.50mで、総貯水容量に占める貯水量の割合は29%であった。水深(右岸アーチ80.6m、左岸アーチ40.6m)に対する貯水位の割合は、左右岸アーチ平均で約74%(右岸アーチ約65%、左岸アーチ約83%)であった。

表-1 ダム緒元

形式	ダブルアーチ式 コンクリートダム
竣工年	1961(昭和36)年
堤高	左岸アーチ82.0m 右岸アーチ42.0m
堤頂長	323.0m (右岸アーチ約150m 左岸アーチ約150m)
堤体積	226,000m ³
総貯水容量	28,000,000m ³
常時満水位	EL270.60m
最低水位	EL240.65m

写真-1 大倉ダム（左岸アーチ）

図-1 ダム平面図

図-2 ダム下流面展開図と断面図

(2) パワースペクトル

連続記録を40.96sの小サンプルに分割して、それぞれパワースペクトルに変換し、それらを重ね合わせた後、バンド幅0.3HzのParzenウィンドウを施した結果を図-3に示す。パワースペクトルのピーク振動数は、8, 10, 14Hz付近に確認できる。左右岸近傍(測点①, ⑬)とスラストブロック上(測点⑦)のスペクトル振幅は振動数に依存せずほぼ平坦であり、他の測点よりも著しく小さいため、相対的に固定とみなせる。測点⑧, ⑨のスペクトル振幅も振動数によらずほぼ平坦であるが、他の測点より著しく大きい。測点⑩についても他の測点よりスペクトル振幅が大きい振動数帯域がある。この理由として、測点⑧と⑩では洪水用ゲート上部のスラブの影響を受けている可能性が挙げられる。また、放水用ゲート付近には高圧線が敷かれており、その影響により測点⑧, ⑨の速度計が正常に動作しなかったと考えられる。一方、測点⑧, ⑨と異なり、測点⑩では他の測点とほぼ同じピーク振動数を確認できる。以上より、ピーク振動数を観測できなかった測点⑧, ⑨については、以降の検討では除外した。

図-3 パワースペクトル

(3) 実稼動モード解析

起振実験と異なり、常時微動観測では対象構造物への入力を特定することは困難であるため、伝達関数や単位衝撃応答を参照する実験モード解析を適用することができない。本研究では実稼動モード解析によりダム振動特性(固有振動数, モード減衰定数, モード形)を同定した。まず、特異なスペクトル形状を呈した測点⑧, ⑨を除いた全測点を入出力点と仮定してODS FRF (Operating Deflection Shape Frequency Response Function: 実稼動振動形状周波数応答関数)⁷⁾を推定した。次に、ODS FRFにデコンボリューションウィンドウ⁸⁾を施し、多点参照型の直交多項式法⁹⁾を適用して振動特性を同定した。しかし、直交多項式法を適用した結果にはノイズによる偽モードが多数含まれてしまう。そのため、複素モードインジゲータ関数とモード形を参照して、真のモードとノイズによる疑モードを判別した。同定結果を図-4に示す。同図中の丸数字は測点番号、モード形状の名称はダブルアーチダム全体系としての挙動を表す。なお、ダブルアーチ全体のモード形状を推定するため、平面図上ではスラストブロックに対して左右岸アーチがほぼ対称であることを利用して、データ処理の対象から除外した測点のモード振幅を参考値として点線で示した。測点⑧については測点⑥, 測点⑨については測点⑤のモード振幅をそれぞれ反転させた。

モード形パワースペクトルのピーク振動数に対応した3つの振動特性として、逆対称2次モード, 逆対称3次モード, 逆対称4次モードを推定した。いずれのモード形

固有振動数7.90Hz, モード減衰定数2.26%

(1) 逆対称2次モード

固有振動数10.9Hz, モード減衰定数0.62%

(2) 逆対称3次モード

固有振動数14.1Hz, モード減衰定数1.35%

(3) 逆対称4次モード

図-4 常時微動観測から得られた振動特性

図-5 解析モデル

においても、ダブルアーチ両端部とスラストブロックのモード振幅は、アーチ上と比べて極端に小さく、ダブルアーチ両端部とスラストブロックが固定とみなせると判断できる。

4. 解析モデル

(1) モデルの概要

常時微動観測結果として得られた固有振動数とモード形を表現する数値モデルを作成する。解析モデル構造図を図-5に示す。ダブルアーチダム堤体とスラストブロック、基礎岩盤をモデル化の対象とした。モデルに用いた要素は四面体、五面体、六面体の線形要素であり、総要素数は48,674、総節点数は40,622である。岩盤部分の大きさがダム堤体の挙動に影響を及ぼさないように、堤体を中心として左右岸ダム軸方向は堤頂長の約3倍、上下流方向は堤高の約3.7倍、高さ方向は堤高の約2.2倍をモデル化の範囲とした。境界条件として、岩盤境界を固定とした。初期値としてモデルに用いた各材料の特性値を表-2に記す。また、モデルの物性値分布を図-6に示す。コンクリートの弾性係数は採取資料による試験結果を参考とし、基礎岩盤の弾性係数は既往の研究^{10), 11)}を参照してコンクリートの弾性係数の約半分の値とした。2章に記したようにダムの両岸は石英質安山岩を中心とした堅固な岩盤である。

本研究では、スラストブロックを含むダム堤体の振動特性を把握することに注視している。岩盤境界を固定とした場合には岩盤の質量を考慮しない方が実測値と対応すること、岩盤をモデル化せずにダム堤体境界を固定とした場合には実測値よりも高い固有振動数が算出される

図-6 解析に用いた物性値分布

表-2 材料特性(初期値)

図-6中の色	材質	弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比	密度 (t/m ³)
黄色	コンクリート	2.41×10^7	0.19	2.47
青	コンクリート	2.41×10^7	0.19	2.36
赤	グラウト注入部	1.20×10^7	0.19	2.47
緑	基礎岩盤	1.20×10^7	0.20	-
	ゲート	2.06×10^9	0.19	7.80

ことが報告されている¹⁰⁾。そこで、岩盤については剛性のみを考慮することとした。また、水深に対する貯水位の比が70%程度以下の場合には貯水の影響はほとんど無く、空虚とほぼ同様の固有振動数が得られることが報告されている¹¹⁾。3. (1)節に記したように、常時微動観測時の水位は満水位に比して低く、水深に対する貯水位の割合が左右岸アーチ平均で約74%であったため、今回は貯水部をモデル化の対象としなかった。なお、解析にはFEMLEEG¹²⁾を使用した。

(2) モデルのアップデート

表-2に示した材料特性を初期値として、常時微動のような微小振幅時における振動特性を表現することを試みる。そこで、次の手順により材料の剛性を変化させて

常時微動観測記録から得られる固有振動数とモード形を表現できるように検討した。

質量マトリックス $\mathbf{M}$, 剛性マトリックス $\mathbf{K}$ を用いて, 固有方程式は以下のように表せる。

$$\lambda_i \mathbf{M} \mathbf{v}_i + \mathbf{K} \mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここに, λ_i は i 番目の固有値, $\mathbf{v}_i$ は i 番目の固有ベクトルである。剛性マトリックスのみが $\mathbf{K} + \Delta \mathbf{K}$ と変動した場合の固有値を $\Delta \lambda_i$, 固有ベクトルを $\Delta \mathbf{v}_i$ とすれば,

$$(\lambda_i + \Delta \lambda_i) \mathbf{M} (\mathbf{v}_i + \Delta \mathbf{v}_i) + (\mathbf{K} + \Delta \mathbf{K}) (\mathbf{v}_i + \Delta \mathbf{v}_i) = \mathbf{0} \quad (2)$$

式(2)において, 1次までの変動量のみを考慮すると,

$$(\lambda_i \mathbf{M} \mathbf{v}_i + \mathbf{K} \mathbf{v}_i) + (\Delta \lambda_i \mathbf{M} \mathbf{v}_i + \Delta \mathbf{K} \mathbf{v}_i) + (\lambda_i \mathbf{M} \Delta \mathbf{v}_i + \mathbf{K} \Delta \mathbf{v}_i) = \mathbf{0} \quad (3)$$

式(1)より式(3)の最初の括弧内は0となる。式(3)の左側から固有ベクトルを転置して乗じると, マトリックスの対称性から

$$\mathbf{v}_i^T (\lambda_i \mathbf{M} \Delta \mathbf{v}_i + \mathbf{K} \Delta \mathbf{v}_i) = \{(\lambda_i \mathbf{M} + \mathbf{K}) \mathbf{v}_i\}^T \Delta \mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (4)$$

であるので,

$$\Delta \lambda_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{M} \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_i^T \Delta \mathbf{K} \mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (5)$$

となる。ここで,

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{M} \mathbf{v}_i = m_i \quad (6)$$

とおき, 参照するモード数を n として, 構造全体を n 個のブロックに分け, 各ブロックの剛性変化が $\mathbf{K}_j k_j$ ($j=1 \sim n$) と表されるとする。ただし, k_j は剛性パラメータ, $\mathbf{K}_j$ は単位の剛性パラメータに対応したブロックの剛性マトリックスである。すなわち,

$$\Delta \mathbf{K} = \sum_{j=1}^n \mathbf{K}_j k_j \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_i^T \Delta \mathbf{K}_j \mathbf{v}_i = k_{ij} \quad (8)$$

と書けるものとする,

$$\Delta \lambda_i m_i = - \sum_{j=1}^n k_{ij} k_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

となり, k_j に関する n 元の連立1次方程式となる。すなわち, $\mathbf{K}$ を剛性マトリックスの推定値 (初期値), $\Delta \lambda_i$ を計算値と目標値との差とすれば, 目標の固有振動数を実現するための剛性の付加 $\Delta \mathbf{K}$ は, k_j が求まれば式(7)で与えられる。ただし, 上記の手順で考慮している変動量は1次までであり誤差が大きいことが予想されるので, 繰り返し計算により求める必要がある。

(3) ダム堤体コンクリートと岩盤の剛性の同定結果

常時微動観測によって得られた固有振動数を目標値,

表-3 弾性係数

図-6中の色	材質	弾性係数(kN/m ²)		
		初期値 (表-2)	推定値 (常時微動)	推定値 (強震動)
	コンクリート	2.41×10^7	3.71×10^7	2.10×10^7
	コンクリート			
	グラウト注入部	1.20×10^7	1.50×10^7	常時微動と同じ値を使用
	基礎岩盤			

表-4 固有振動数

解析モード 次数	固有振動数(Hz)		数値モデル 刺激係数 (ダム軸直交 (Y軸)方向)	モード 形状
	数値モデル	観測結果		
1次	6.87	6.6~7.0*	4.90×10^2	対称 1次
2次	7.19	-	-9.97×10^1	-
3次	7.91	7.90	1.05×10^2	逆対称 2次
4次	8.19	-	1.55×10^2	-
5次	9.57	-	8.38×10^1	-
6次	9.65	-	1.71×10^2	-
7次	10.88	10.9	-1.32×10^1	逆対称 3次

※長期継続観測結果として, 固有振動数が季節変動していることが確認されている⁴⁾。

表-2に示した材料特性から算定した剛性を初期値として, 4. (2)節で示した手順により試行錯誤してモデルをアップデートした。変化させたパラメータは, コンクリート (ダム堤体とスラストブロック) と, グラウト注入部を含む基礎岩盤の弾性係数である。

表-3に推定結果を示す。表-2に示した初期値に対して, コンクリート (ダム堤体およびスラストブロック) の弾性係数を54%増, グラウト注入部を含む基礎岩盤の弾性係数を25%増とすることで, 観測結果を表現することができた。岩質は異なるものの, これら弾性係数の推定値は, 既往の研究で用いられた値^{10), 11)}とほぼ対応している。固有値解析により得られた固有振動数を表-4に, モード形を図-7に示す。得られた固有振動数とモード形のうち3次モードと7次モードは, 図-4に観測結果として示した逆対称2次モードと逆対称3次モードにそれぞれ極めてよく一致した。この2つのモード形ではダブルアーチ両端部とスラストブロック上のモード振幅は非常に小さく,

図-7 モード形 (数値モデル)

観測結果と同様に、解析結果からもこれらの箇所が固定とみなせることを確認できる。一方、1次および2次モードについては、今回の常時微動観測からは得られていない。逆対称2次と逆対称3次モードについて、解析モデルは観測結果とよく一致する精度を有していることから、別途に実施している長期継続観測で得られた固有振動数 $6.6\sim 7.0\text{Hz}^{\text{4)}$ が、 6.87Hz の1次 (対称1次) モードに対応すると考えられる。また、観測で得られた逆対称4次モードについては、今回のモデルの固有値解析では確認できなかった。

表-4には、アーチ軸直交 (Y軸) 方向における数値モデルの刺激係数を参考値として示している。今回の常時微動観測で抽出できなかった1次および2次モードの刺激

係数は、他のモードに比べて著しく小さな値ではない。しかし、図-3に示したパワースペクトルでは 7Hz 付近にピーク振動数を確認できず、3. (3)節に記した実稼働モード解析結果からも 7Hz 前後のモードを抽出することができなかった。この理由として、刺激係数はモデル基部における地震動の一樣入力を想定しており、常時微動の入力機構が必ずしも当てはまるとは限らないため、今回の観測では1次および2次モードが得られなかったと推測される。また、長期継続観測結果は車両の通行が極端に少ない深夜の記録を用いて得られた結果である。それに対して、日中に実施せざるを得なかった今回の常時微動観測では、3. (1)節に記したように観測中は頻繁にダム天端上を車両が通行する状況であった。そのため、1次

および2次モードが相対的に他のモードやノイズに埋もれてしまい、抽出されなかったと推測される。

一方、基礎岩盤を除いたダム堤体のみのモデルについて別途に固有値解析を行った。その結果、1次固有振動数は9.10Hzで観測結果よりも高く、既往の研究結果¹⁰⁾と同様の傾向が得られたことを確認した。

(4) 強震時の物性値

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震時に、天端ダム軸直交方向で最大加速度626.2galの地震動が観測され、地震前後に6.86Hzであった卓越振動数は5.79Hzに低下した⁴⁾。長期継続観測結果と本稿での解析モデルの固有値解析結果より、この卓越振動数は1次固有振動数に相当すると考えられる。卓越振動数が低下した主な要因として、コンクリート（ダム堤体とスラストブロック）の弾性係数が変化したことによると仮定し、4.(2)節で示した手順により試行錯誤して検討した。なお、ダムの貯水位は、地震が発生した時期の2011年3月始めから3月末にかけて徐々に低下しており、常時微動観測を実施した時期と比べて総じて低かった。本震発生日の貯水位はEL253.11mであり、水深に対する貯水位の割合は左右岸アーチ平均で約68%であった。そのため貯水位の影響はほとんど無いものとし、前節までで検討したモデルをベースとして固有値解析を行った。結果を表-3の推定値（強震動）の欄に記す。コンクリートの弾性係数を初期値に比べて13%低下させて固有値解析を行うと、強震時の卓越振動数と一致する結果を得た。地震後に卓越振動数はもとの大きさに復帰している⁴⁾ことと、地震後の点検では損傷が確認されなかったことから、コンクリートの損傷によるものではなく、強震時における一時的なダムブロック間のジョイント部の影響によるものと思われる。

5. おわりに

アーチダムの性能をよりの確に表現し得るモデルの作成を目標として、本論文では、高密度なセンサー配置による常時微動の観測と三次元有限要素モデルを作成することで、微小振幅時におけるアーチダム全体系の振動特性を把握するとともに、微小振幅時におけるダム堤体コンクリートと基礎岩盤の弾性係数を同定した。本論で得られた知見を以下に記す。

- (1) アーチダム堤体の振動特性を捉えることに注視して、測点を高密度に配置した常時微動観測を実施した。観測結果に実稼働モード解析を適用して詳細にデータ処理した結果、ダム堤体の3つの振動特性（逆対称2次モード、逆対称3次モード、逆対称4次モー

ド）を抽出することができた。

- (2) アーチダムと基礎岩盤を対象として三次元有限要素モデルを作成し、微小振幅下におけるダム堤体コンクリートと基礎岩盤の弾性係数を推定した。モデル化に際して、各材料の物性値として、ダム堤体コンクリートについては採取資料の試験結果、岩盤についてはダム堤体コンクリートの約半分の値を初期値として用い、常時微動観測記録から得られた固有振動数とモード形を表現できるように物性値を変化させた。その結果、観測結果ときわめて良く一致するモデルを作成できた。得られたダム堤体コンクリートと基礎岩盤の弾性係数は、既往の研究結果^{10), 11)}と対応する値であった。
- (3) 強震時に低下した卓越振動数は、本論文で検討した三次元有限要素モデルにおいて、ダム堤体コンクリートの弾性係数を初期値に比べて13%低下させることで得られた。長期継続観測結果によれば、地震後に卓越振動数はもとの大きさに復帰している⁴⁾ので、この現象はコンクリートの損傷に起因するものではなく、強震時における一時的なダムブロック間のジョイント部の影響によるものと推測される。

既往の研究成果¹¹⁾を参照して、本稿では貯水空虚のモデルを作成して検討を行った。対象とするダムは珍しい構造形式のダブルアーチダムであり、今後、長期継続観測の結果も参照して、岩盤の境界条件、貯水、ジョイント部などの影響を検討し、さらに精緻なモデルを構築する予定である。

謝辞：本振動観測の実施にあたっては、（社）東北建設協会・技術開発支援制度より支援を受けていること、宮城県仙台地方ダム総合事務所からはフィールドの提供を受けていること、仙台市大倉川土地改良区管理下にある建物の一角を借用して観測機器を設置させて頂いていること、また研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究C（課題番号：23560576）によっていることを付記致します。また、数値モデルの作成にあたり、日本工営（株）から提供いただいたデータをベースとして検討を行いました。現地観測およびデータ処理は元日本大学学生・田代靖和氏と柳沢千晶氏、数値計算は同・李睿氏と飯塚正実氏にご協力いただきました。関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004。
- 2) 大熊信之，松田泰治，金沢健司，池田浩一：2基の大規模アーチダムでの常時微動計測に基づく動的特性の周期的変動評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68, No.4（地震工学論文集第 31-b 巻），pp.1_883-1_890，

- 2012.
- 3) 大熊信之, 金澤健司, 畑元浩樹: 常時微動計測データから明らかとなった高経年大規模アーチダムの動的特性, 電力土木, No.431, pp.9-17, 2009.
- 4) 上島照幸, 金沢健司, 村上弘太, 仲村成貴, 塩尻弘雄, 有賀義明: 常時微動・地震動の長期継続観測による高経年化したアーチダムの振動特性同定と 2011 年東北地方太平洋沖地震時のダムの振動挙動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4 (地震工学論文集第 31-b 巻), pp.186-194, 2012.
- 5) 富所強哉, 長井健: 大倉ダムの計画について, 土木学会誌, 45-1, pp.19-22, 1960.
- 6) 1:200,000 地質図 仙台, 地質調査所, 1987.
- 7) Schwarz, B. and Richardson, M.: Modal Parameter Estimation from Ambient Response Data, *Proceedings of 19th International Modal Analysis Conference*, pp.1017-1022, 2001.
- 8) Schwarz, B. and Richardson, M.: Using a De-Convolution Window for Operating Modal Analysis, *Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference*, pp.13-22, 2007.
- 9) モード解析ハンドブック編集委員会: モード解析ハンドブック, コロナ社, 2000.
- 10) 上田稔, 奥田宏明, 塩尻弘雄, 田村重四郎: アーチダムの起振実験シミュレーション, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.203-212, 1994.
- 11) 上田稔, 豊田幸宏, 塩尻弘雄, 佐藤正俊: アーチダムの観測記録から求めた固有振動数とブロックジョイントの影響, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.207-221, 2000.
- 12) FEMLEEG, URL <http://www.hoctsystem.co.jp/product/femleeg/index.html>. (2012 年 11 月 15 日閲覧)

(2012.11.16受付, 2013.1.28修正, 2013.2.23受理)

IDENTIFICATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN EXISTING ARCH DAM BASED ON AMBIENT VIBRATION OBSERVATION AND THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS

Masataka NAKAMURA, Hiroo SHIOJIRI, Teruyuki UESHIMA, Yoshiaki ARIGA
and Shusaku OMINATO

Earthquake and ambient vibration monitoring of the crest of an aged arch dam was carried out. Long-term continuous monitoring was conducted to determine the change in natural frequency over time by installing accelerometers at two locations on the crest. On the other hand, short-term ambient vibration monitoring was also conducted to evaluate the dynamic characteristics of the entire arch dam system, such as the natural frequencies, modal dampings and mode shapes, by installing an array of sensors. This paper presents the Young's modulus of the dam body concrete and foundational bedrock with a small amplitude, based on data from the short-term monitoring, as well as three-dimensional finite element analysis. The results would enable further investigation of the relationship among the natural frequency, reservoir level and body temperature of the dam based on data from the long-term monitoring as a benchmark.