

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

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

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として、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の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 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^{2b)}。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、固有振動数の低下に伴いダム堤体表面温度が低下する傾向が報告されている⁴⁾。さらには、2011年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626.6galが観測されており、本震時および大規模余震時には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を考慮した精緻なモデリングが必要と考えられる。

本論文では、アーチダムにおける長期間の振動モニタリングのベンチマーク資料を得ることを目的として、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同定した結果について述べる。

2. 対象ダムの概要

本研究の対象とするダムは、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。図-1にダム写真、表-1にダムの主な緒元を示す。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主に堅固な石英質安山岩、凝灰岩である⁹⁾。



図-1 大倉ダム（左岸アーチ）

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
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

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。図-2に測点位置を示す。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。計測方向は主にダム軸直交方向とし、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EL256.5mであった。

(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ほぼ平坦であるが、他の測点より著しく大きい。測点⑧、⑨の近くにある放水用ゲート付近には高

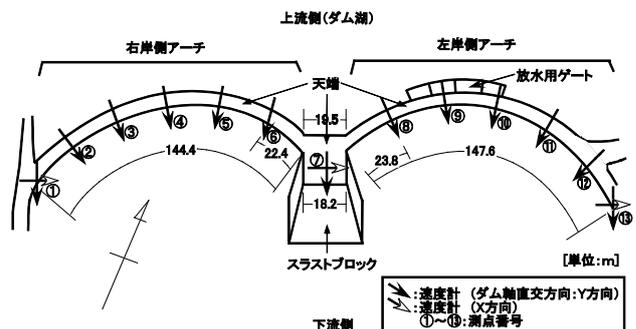


図-2 測点位置

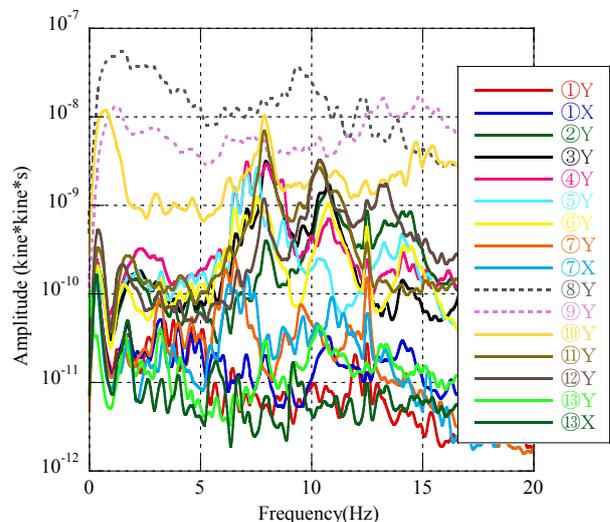


図-3 パワースペクトル

圧線が敷かれており、その影響で速度計が正常に動作しなかったと考えられる。次節に示す実稼働モード解析では測点⑧、⑨を除外した。

(3) 実稼働モード解析

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。本研究では実稼働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 FRF⁵⁾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を施し、多点参照型の直交多項式法⁶⁾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。モード特性の同定結果を図4に示す。同図中のモード形状はダム全体系を表す。パワースペクトルのピーク振動数に対応する振動特性として3つのモードを把握できた。

4. 解析モデル

(1) モデルの概要

前章で示した常時微動記録から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基礎岩盤をモデル化の対象とした。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2.5倍、高さ方向は堤高の約2.5倍の範囲をモデル化した。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。モデルの境界条件として、側方は粘性境界、下方は剛基盤とした。初期値としてモデルに用いた各材料の静的加力下における代表的な特性を表2に記す。また、モデルの物性値分布を図6に示す。ダムの両岸は安山岩やデイサイトを中心とした堅固な岩盤である。本研究ではダム堤体の振動特性を把握することに注視しているため、岩盤については剛性のみを考慮することとした。また、常時微動観測時の水位はEL256.5mで満水位に比して低い貯水の影響は小さいと考え、貯水部をモデル化の対象外とした。なお、解析にはFEMLEEG⁷⁾を使用した。

(2) モデルのアップデート

表-1に示した材料特性は静的な加力下の代表的な値で

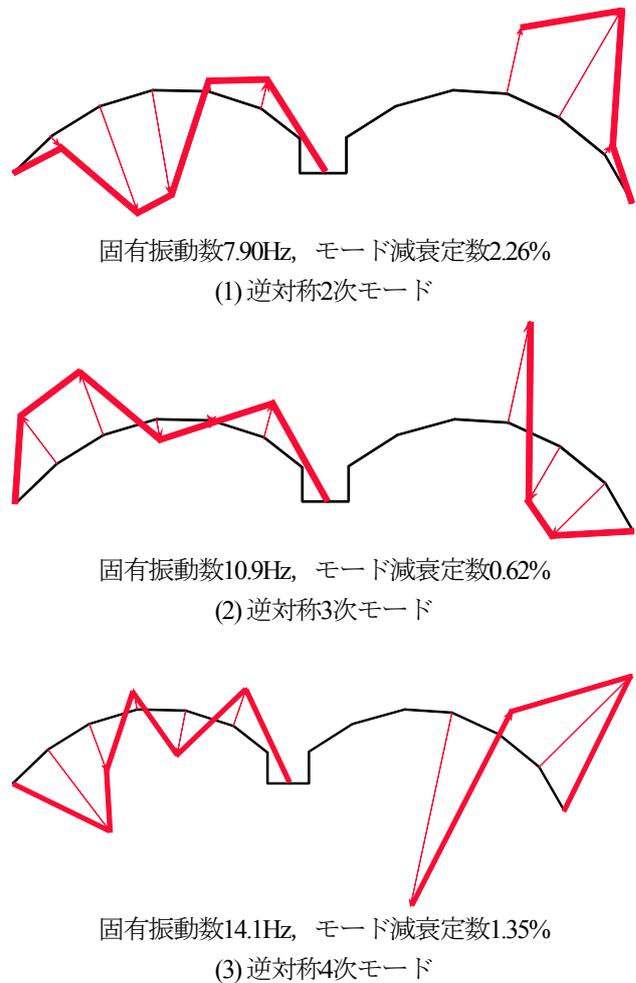


図4 常時微動観測から得られた振動特性

あるため、常時微動のような微小振幅時における振動特性を十分に表現できない。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

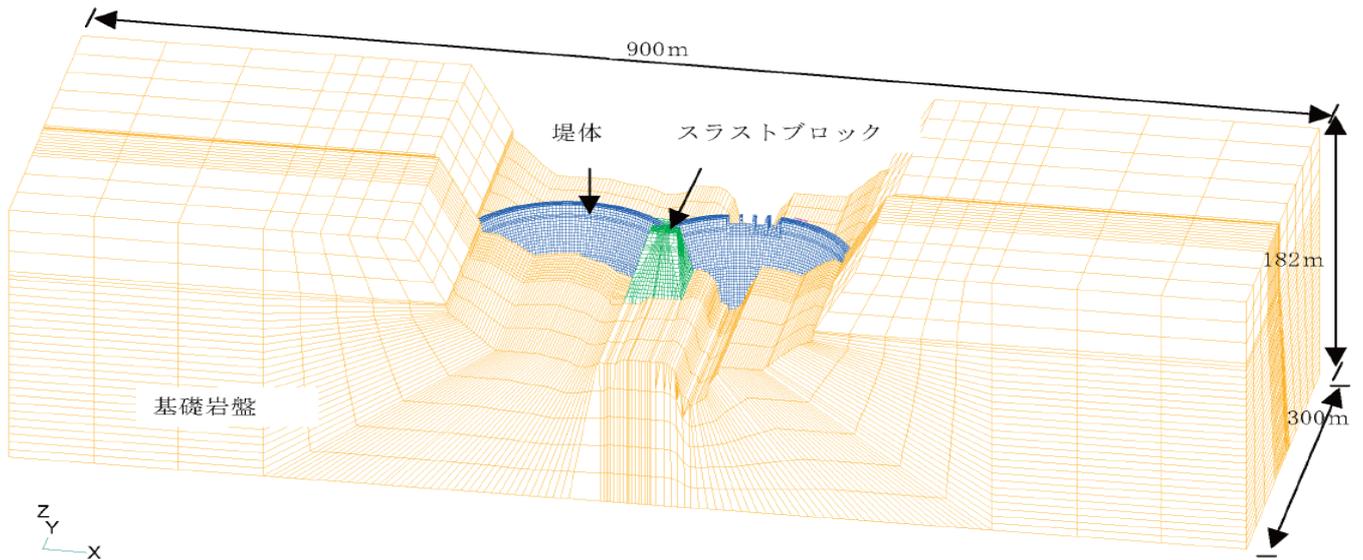


図-5 解析モデル

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、

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

と置き、マトリックスの元数（最大モード次数）を n とし、

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

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

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分 $\Delta \mathbf{K}$ は、 k_j が求まれば式(7)で与えられる。上記の手順では1次までの変動量のみを考慮しているため、誤差が大きいことが予想される。よって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-1に示した材料特性から算定した剛性を初期値として、前節で示した手順によりモデルをアップデートした。変化したパラメータはダム堤体コンクリートと基礎岩盤

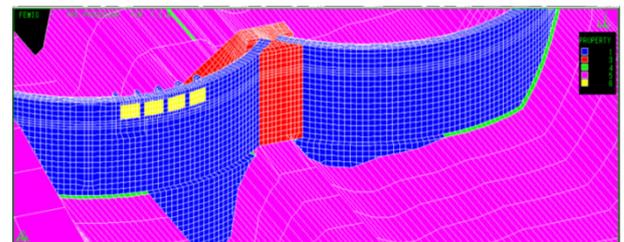


図-6 解析に用いた物性値分布

表-2 材料特性

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

表-3 固有振動数の比較

モード形状	観測結果	数値モデル
対称1次	6.6~7.0Hz [※]	6.91Hz
逆対称2次	7.90Hz	7.95Hz
逆対称3次	10.9Hz	10.98Hz

※長期継続観測結果⁴⁾による。

の弾性係数である。試行錯誤して物性値の同定を試みた結果、表-2に示した材料特性の初期値に対して、ダム堤体コンクリートの弾性係数を54%増、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。得られた固有振動数を観測結果と対応させて表-3に示す。モード形を図-7に示す。逆対称2、3次モードについては、観測結果と極めてよく一致した固有振動数とモード形が得られた。なお、対称1次モードの固有振動数については今回の常時微動観測では抽出されなかったため、別途に実施している長期継続観測結果の卓越振動数⁴⁾を参照した。

(4) 強震時の物性値

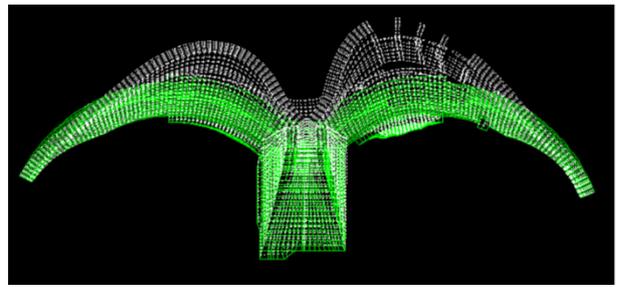
2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震時に、天端ダム軸直交方向で最大加速度626.6galの地震動が観測され、卓越振動数は5.77Hzに低下した⁴⁾。この卓越振動数を目標値として同定を行うと、コンクリートの弾性係数が7.7%低下したことに相当する。地震後に卓越振動数はもとの大きさに復帰している⁴⁾ので、これはコンクリートの損傷によるものではなく、強震時におけるダムブロック間のジョイント部の影響などによるものと思われる。

5. おわりに

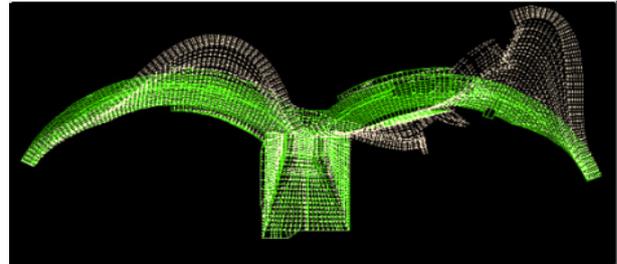
ダム全体の挙動を捉えることに注視して測点を高密度に配置して常時微動を計測した。詳細にデータ処理した結果、ダム全体系における3つの振動モードを抽出することができた。また、観測結果を表現できる三次元有限要素モデルを作成した。モデリングの過程で、ダム堤体コンクリートと基礎岩盤の物性値を同定した。さらに、強震時に低下した卓越振動数に着目し、ダムの等価剛性が7.7%低下したことを確認した。長期継続観測結果によれば、地震後に卓越振動数はもとの大きさに復帰している⁴⁾ので、この現象はコンクリートの損傷に起因するものではなく、強震時におけるダムブロック間のジョイント部の影響などによるものと推測される。

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が考慮された精緻なモデルを検討する予定である。

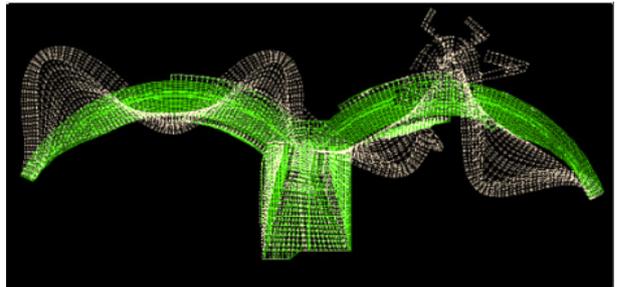
謝辞：本振動観測の実施にあたっては、(社)東北建設協会・技術開発支援制度より支援を受けていること、宮城県仙台地方ダム総合事務所からはフィールドの提供を受けていること、仙台市大倉川土地改良区管理下にある建物の一角を借用して観測機器を設置させて頂いていること、また研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究C(課題番号：23560576)によっていることを付記致します。また、数値モデルの作成にあたり、日本工営(株)から提供いただいたデータをベースとして検討を行いました。現地観測およびデータ処理は元日



(1) 対称1次モード



(2) 逆対称2次モード



(3) 逆対称3次モード

図-7 モード形(数値モデル)

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.I_883-I_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.I_186-I_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. ブック, コロナ社, 2000.
- 6) B.Schwarz and M.Richardson: Modal Parameter Estimation from Ambient Response Data, *Proceedings of 19th International Modal Analysis Conference*, pp.1017-1022, 2001. 8) FEMLEEG マニュアル
- 7) モード解析ハンドブック編集委員会: モード解析ハンド

(2012.9.21 受付)

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 and Yoshiaki ARIGA

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.