

奥新冠ダムの固有振動特性に関する3次元有限要素解析

3D-FEM analysis on natural vibration characteristics of Oku-Niikappu dam

室蘭工業大学
室蘭工業大学
室蘭工業大学大学院
北海道電力株式会社

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
○学生員 米坂 俊介 (Syunsuke Yonesaka)
正 員 世戸 洋行 (Hiroyuki Seto)

1. はじめに

我が国には、社会的・経済的活動を支える重要な社会基盤施設の一つとして数多くのダムが建設されている。2006年3月時点で建設中のものも含めると約2,866のダムが存在する¹⁾。ダムはその性質上、欠壊などの災害は、下流側に多大の被害を与えることより、絶対に許されるものではなく、ダムの安定的な利用も含めてその維持管理は非常に重要である。また、ダムの中でアーチ式ダムの総数は、54と全体の1.9%程度と非常に少なく、その地震時挙動特性なども含めて不明な点も多い。一方、近年のコンピュータ性能の飛躍的な向上によって、これらのダムの3次元的な効果を含めたダム堤体内の応力分布状態や地震時挙動特性は比較的容易に検討可能となってきた。従って、現状における堤体内の応力分布状態や耐震安全性の確認は、今後の維持管理に向けて極めて重要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では北海道内に二つしかないアーチダムの一つである奥新冠ダムを対象に、1)現時点におけるダム堤体内の応力状態の確認、および2)地震時挙動特性の基礎資料となる固有振動特性の把握を目的に、3次元有限要素法を用いた静的解析および固有振動解析を実施した。なお、解析には汎用構造解析プログラムABAQUS²⁾を使用した。

2. 奥新冠ダムの概要

奥新冠ダムは、北海道新冠郡新冠町字岩清水に位置する堤高61.2m、堤頂長110m、堤体積30,000m³のアーチダムであり、昭和38年に竣工した。なお、本ダムは、計画洪水量が比較的小さいこと、ダム用骨材の採取を予定していた湛水区域内の河川堆積砂礫量による制約、およびアーチダムの建設に最適な地形地質を有することなどから、堤体積の少ない経済的なコンクリートアーチ式が採用された。本ダムの特徴を列挙すると、1)北海道に設けられた最初のアーチダムであること、2)道内最大の水力発電エリアとして豊富な水資源を擁する静内川、新冠川水系の中でも、一番落差の大きなダム水路式発電所であること、などである。写真-1には、奥新冠ダムの全景(下流側俯瞰)を示している。

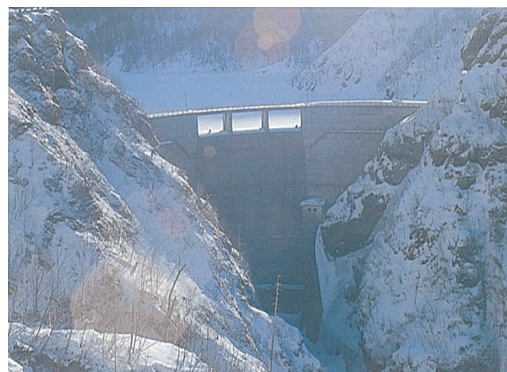


写真-1 奥新冠ダム全景（下流側俯瞰）

総要素数：60,291
総節点数：65,796

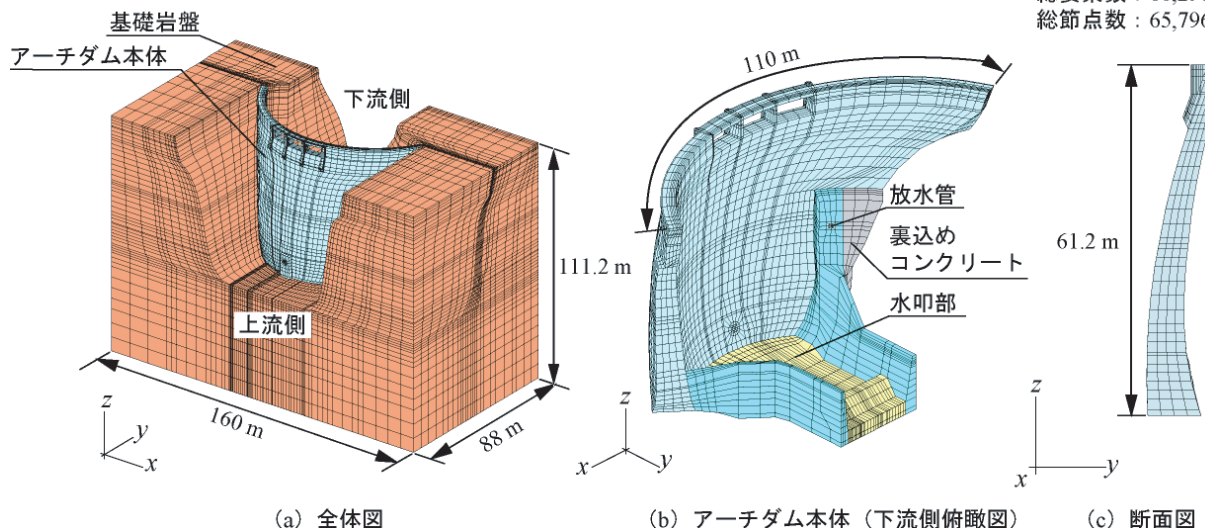


図-1 要素分割状況

表－１ 使用物性値一覧

使用材料	弾性係数 E (GPa)	密度 ρ (g/cm ³)	ポアソン比 ν
堤体コンクリート	19.6	2.50	0.20
基礎地盤	21.6	2.65	0.20

3. 数値解析概要

本数値解析では、奥新冠ダムの3次元的な挙動を適切に評価するために、堤体および周辺地盤を含めた3次元有限要素モデルを作成した。図－1には、本解析に用いた有限要素モデルを示している。解析対象範囲は、奥新冠ダムを中心に基礎地盤を含め上下流方向に88m、ダム軸方向に160m、高さ方向に111.2mとした。また、より詳細なモデル化を行うために、ダム本体のほか、水叩部、放水管、裏込めコンクリートも考慮している。境界条件は周辺地盤の底面および側面を完全固定とした。なお、総要素数および総節点数は、それぞれ60,291、65,796である。また、表－1には、ダム工事記録³⁾に基づいた材料物性値を示している。本研究では、1)ダム堤体に作用する常時応力の確認を目的とした静的解析、および2)ダム堤体の地震時挙動特性の基礎的評価を目的とした固有振動解析の二つを実施している。以下、それぞれの解析概要および解析結果について述べる。

4. 常時応力に関する静的解析

4.1 静水圧、泥圧および許容応力度の設定

本解析ではダムに作用する常時応力を確認するため、静水圧および泥圧を考慮した静的解析を実施した。貯水位はダム堤体に最も不利と考えられる常時満水位（水深56m）に設定した。堆砂高は設計堆砂面に設定し、底面から30mの位置まで考慮し、水中単位体積質量を1.0g/cm³とした。また、静水圧および泥圧は図－2に示すように設定した。ダム堤体の許容応力度に関しては、ダム工事記録を参考に材令91日における目標強度34.3MPaをもとに、強度変動係数割合1.13および安全率5を考慮して、許容圧縮応力度 σ_{ca} を5.88MPaと設定した。なお、許容引張応力度 σ_{ta} は許容圧縮応力度の1/15の値とし0.39MPaとした。

4.2 数値解析結果および考察

図－3には、数値解析結果より得られたダム堤体部における最大および最小主応力分布図を示している。また、図には内部の応力状態が確認できるようにダム軸方向および深さ方向に断面毎（図－2参照）の応力分布も併せて示している。なお、応力の正負はそれぞれ引張および圧縮応力である。

まず、図－3(a)図に示す最小主応力分布に着目すると、ダム堤体下流側（上段中央図参照）において、右岸側から底面および左岸側において比較的大きな圧縮応力が作用していることが分かる。これは、ダム堤体に作用する水圧の大部分を兩岸の岩盤で支持するアーチダムの特徴が反映されたものとなっている。なお、左岸側に関しては、端部より若干中央よりに圧縮応力が作用している。これは図－1(b)からも分かるように、放水管および裏込めコンクリート部の影響によるものと推察される。また、上流側の応力分布（上段左図参照）に着目すると、ダム中央部より若干右

表－２ 固有振動数の比較

振動モード	固有振動数 (Hz)	
	動水圧なし	動水圧付加
1次	5.22	3.42
2次	6.93	4.40
3次	8.94	6.34
4次	10.60	6.88
5次	11.20	7.08
6次	11.66	7.96
7次	13.31	8.45
8次	14.26	9.09
9次	14.81	9.82
10次	15.09	10.22

岸側に2.5MPa程度の圧縮応力が作用していることが分かる。なお、最大圧縮応力は4.0MPaであり、その位置は下流側右岸中央部となっている。

次に図－3(b)に示す最大主応力分布について着目すると、上流側底面に局所的に最大1.2MPa程度の引張応力が発生していることが分かる。発生応力は許容応力度を超えているが、要素分割等の影響による局所的なものであると推察される。鉛直および水平方向断面図からも確認されるように、堤体コンクリート内部には大きな引張応力が発生していないことが分かる。これらは全て許容応力度内であることが確認できた。

これより、常時満水位において、局所的に発生する応力を除き、ダム本体に発生する応力は全て許容応力度内に納まっていることが分かる。

5. 動水圧を考慮した固有振動解析

5.1 地震時動水圧の設定

本解析ではダム堤体の地震時挙動特性を検討する前段階として、基本的な特性である固有振動特性の把握を試みた。なお、地震時の固有振動特性を適切に評価するためにはダム堤体に作用する動水圧の考慮が不可欠である。本研究では、仮想質量を式(1)のWestergaard式⁴⁾を用いて評価することにした。

$$p = \frac{7}{8} p_w \sqrt{H \cdot h} \quad (1)$$

ここに、

p : 単位長さ当たりの付加質量 (kg/m²)

p_w : 水の単位体積質量 (kg/m³)

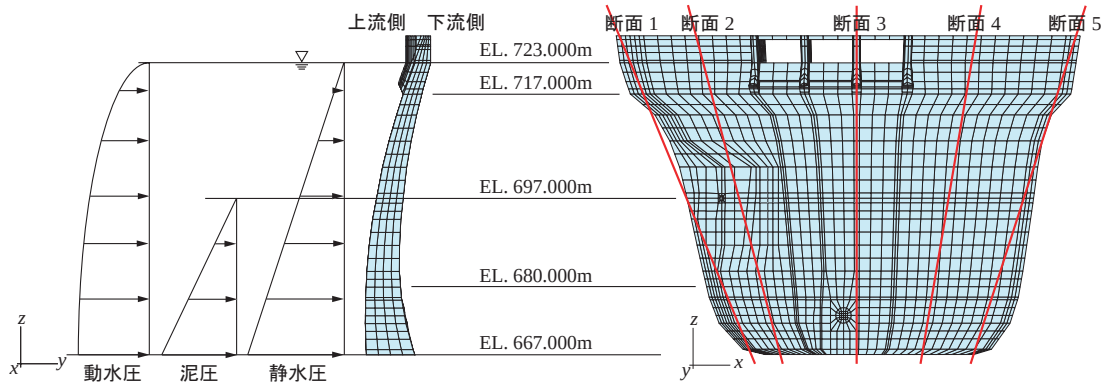
H : 水深 (m)

h : 水面から地震時動水圧が作用する点までの水深 (m)

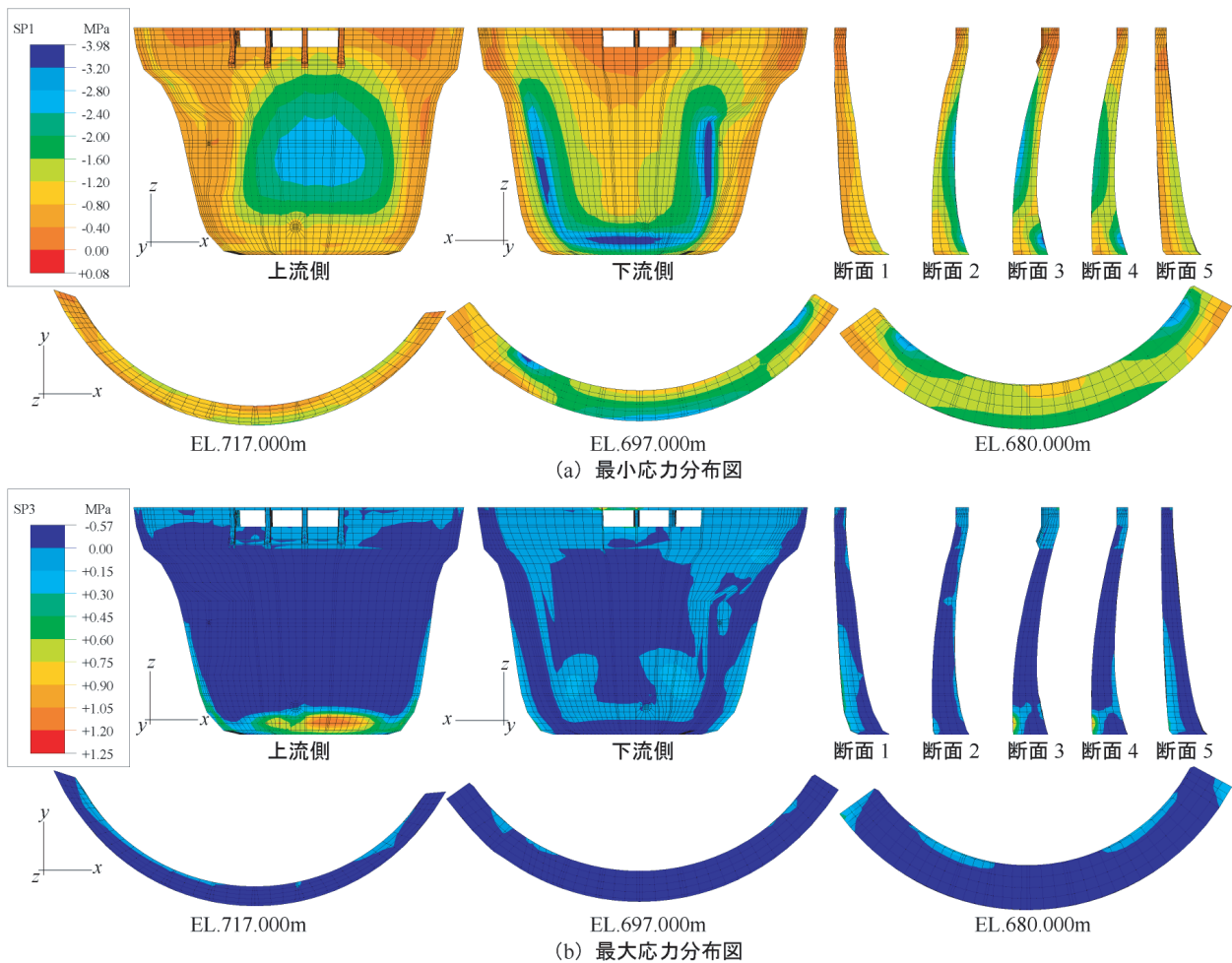
図－2には堤体コンクリート表面に付加する質量強度分布を示している。解析ではこれらを節点間で線形変化に仮定し、仮想質量として各節点に付加することとした。

5.2 数値解析結果および考察

表－2には、ダム堤体のみの場合（空虚時）と動水圧考慮のための付加質量を考慮する場合（満水時）における固有振動数を比較して示している。表より、満水時の固有振動数は空虚時と比較して、60～70%程度減少することが分かる。図－4には、満水時における1次から4次までの振動モードを全体図および高さ方向の断面ごとに分けて示して



図－2 水圧、泥圧条件および断面出力箇所



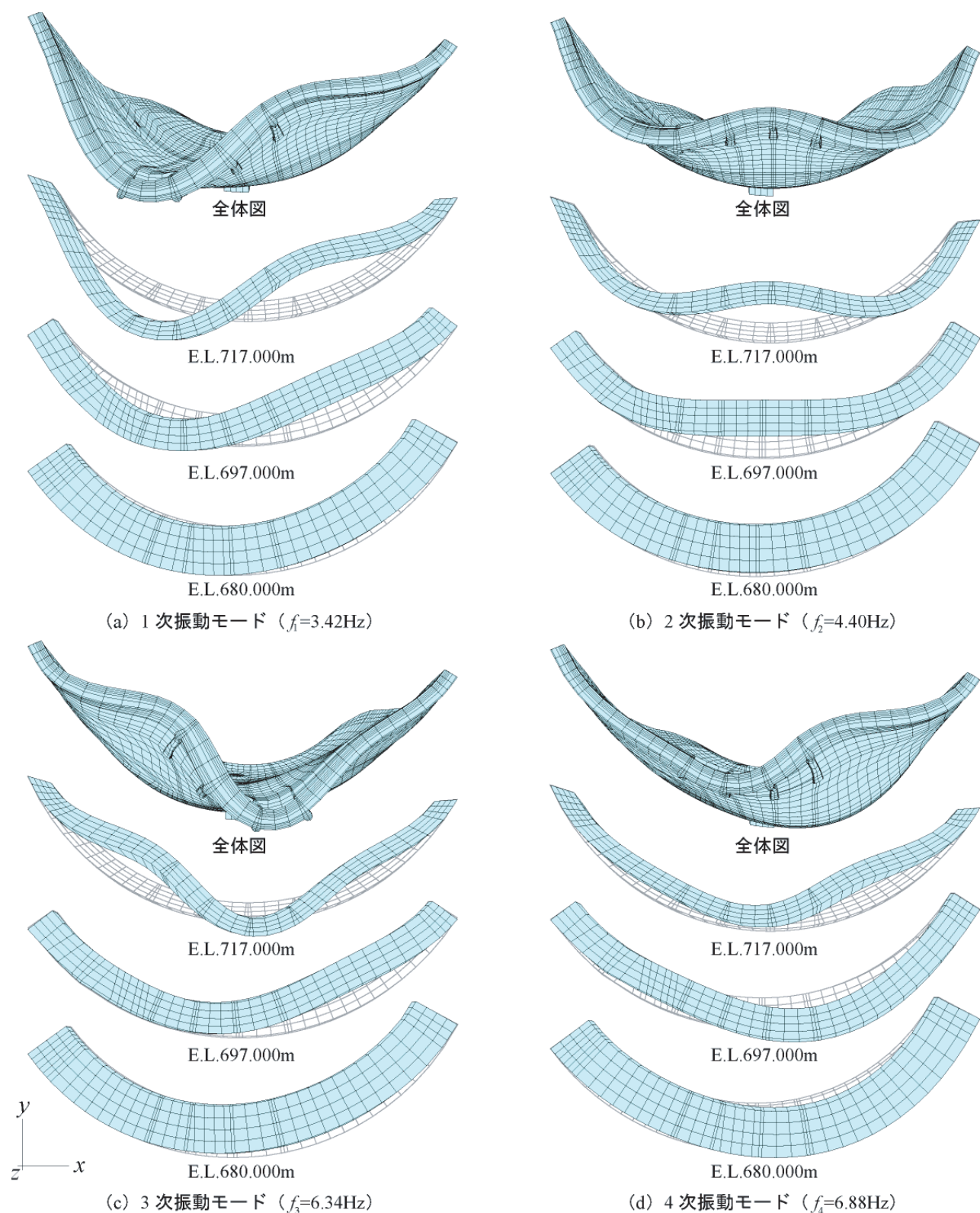
図－3 応力分布図

いる(図－2参照)。なお、変形倍率は10,000倍にし、原形図と併せて示している。図より、各振動モードに着目すると、1, 3次モードは逆対称モード、2, 4次モードは対称モードである。それぞれの断面図より、振動モードはいずれの場合も上部において大きな変形を示すものの、谷底部に近づくにつれ、変形は制御されていることが分かる。通常地震発生時には、対称振動が卓越するものと考えられるが、対称1次振動の固有振動数が4.4Hzと比較的大きいことより、動的応答性も小さくなるものと推察される。

6. まとめ

- 1) 常時満水位において、要素分割等の影響と推察されるダム底部の局所的な引張応力を除き、ダム本体に発生する応力は全て許容応力度以下であることを確認した。
- 2) 動水圧を考慮した固有振動解析より、ダム堤体の固有振動特性を明らかにすることができた。

今後は、これらの結果を踏まえ、要素分割等の影響について更に検討を行うとともに、実地震動入力による動的応答特性に関する検討を進める予定である。



参考文献

- 1) 財団法人日本ダム協会, ダム便覧 2007,
<http://www.soc.nii.ac.jp/jdf/Dambinran/binran/TopIndex.html>
- 2) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.8, Hibbitt Kalsson & Sorensen Inc., 1998.
- 3) 北海道電力株式会社, 奥新冠発電所建設工事記録ダム工事

記録, 1964.3

- 4) Westergaard, H. M. (1933): Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418-432