

ダム堤体に対する岩盤部の影響を考慮したアーチダムの振動特性

日本大学大学院 学生会員 ○大湊 周作
 日本大学 正会員 塩尻 弘雄
 宮城大学 正会員 上島 照幸

日本大学 正会員 仲村 成貴
 日本大学 正会員 鈴木 順一
 弘前大学 フェロー会員 有賀 義明

1. はじめに

国内のダムは高経年化したものが増えてきており、従来の点検項目に加えて、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。

ダムの耐震性能を把握することを目的とした研究は既に多く報告されている。例えば上田らは実在アーチダムにて起振実験や地震観測を実施し、それらの実測結果に基づいて有限要素モデルの構築法を検討している¹⁾。また、振動計測結果からダムの固有振動数は貯水位や堤体温度に依存することが指摘されている¹⁾²⁾。

著者らは、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、既報では高密度なセンサー配置による常時微動観測を実施し、その観測結果を表現できる初期モデルを作成している³⁾。本稿では、ダム堤体周辺岩盤の影響がダムの振動特性に及ぼす影響について、3次元有限要素モデルを用いて検討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、洪水調節や工業用水の確保、発電などを目的として昭和 36 年 6 月に竣工した。提頂長は 323.0m、左岸アーチの堤高は 82.0m、右岸アーチの堤高は 42.0m であり、総貯水容量 28,000,000 m³、堤体積 226,000m³の規模を持つ。写真-1 にダム堤体左岸アーチ部を示す。図-1 にダム平面図、図-2 にダム下流面展開図、図-3 にダム断面図を示す。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唯一のダブルアーチダム式コンクリート構造である。左岸アーチの中央部には放水設備と鋼製クレストゲートが設置されている。



写真-1 左岸アーチ

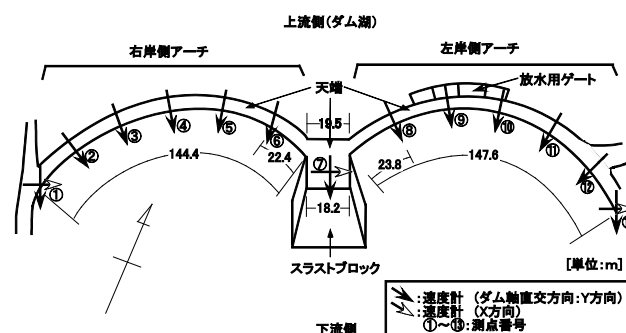


図-1 ダム平面図

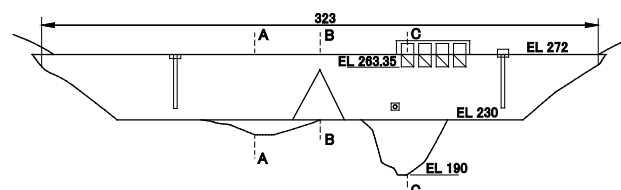


図-2 ダム下流面展開図

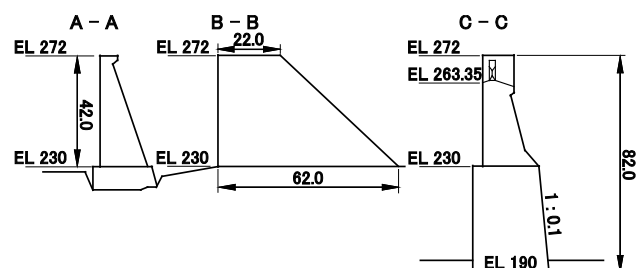


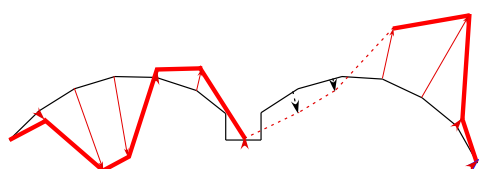
図-3 ダム断面図

3. 常時微動観測結果

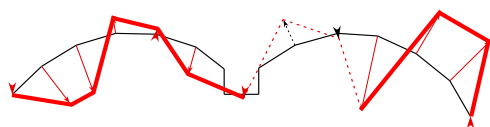
大倉ダムでは、固有振動数の変動を計測することを目的として天端上の 2 測点で長期間にわたって常時微動の連続観測(長期継続観測)を実施している²⁾。また、振動特性のうち特にモード形を把握することを目的として、図-1 に示した天端上の 13 測点で常時微動観測(高密度観測)を行った³⁾。これらの観測

表-1 固有振動数とモード減衰定数

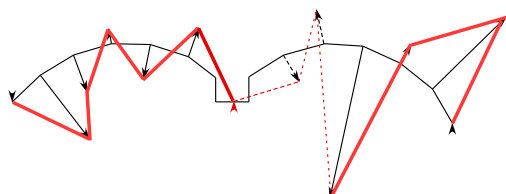
固有振動数(Hz)	モード減衰定数(%)	モード形状
6.90 ¹⁾	—	—
7.90	2.26	逆対称2次
10.90	0.62	逆対称3次
14.10	1.35	逆対称4次



(1) 逆対称 2 次モード



(2) 逆対称 3 次モード



(3) 逆対称 4 次モード

図-4 常時微動観測から得られたモード形

から得られた振動特性として、表-1 に固有振動数とモード減衰定数、図-4 にモード形を示す。

4. 解析モデル

常時微動観測結果から得られた固有振動数とモード形を表現する 3 次元有限要素モデルについて検討する。モデル化の対象はダブルアーチダム提体と基礎岩盤とし、それらを構成する要素として四面体、五面体、六面体の 3 つの線形要素を用いた。モデルの要素数は、提体で 17,296、岩盤で 30,562、合計 47,858 である。図-5 に解析モデル構造図を示す。岩盤境界までの範囲は、岩盤が提体挙動に影響を与えることがないように、左右岸ダム軸方向は提頂長の約 3 倍の 900m、上下流方向は提高の約 3.6 倍の 300m、高さ方向は提高の約 2.2 倍の 182m とし、岩盤の境界条件は、側方部と底面のいずれも固定境界とした。なお、解析には TDAP III⁴⁾を使用した。

5. 提体と岩盤の弾性係数の検討

文献 3) で検討したモデルをベースとして、提体と岩盤の弾性係数を再度検討した。具体的には、観測から得られた固有振動数とモード形を目標値とし、モデルの固有値解析結果が目標値に合うように、モデルの提体と岩盤の弾性係数を変化させた。固有値解析にはサブスペース法を用いた。得られた材料特性を表-2 に示す。

6. 岩盤質量がモデルの振動特性に及ぼす影響

ダム提体と岩盤を一体とした固有値解析では、岩盤の質量を無視した解析が行われることが多い。本稿では、固有値解析とインパルス応答解析により、

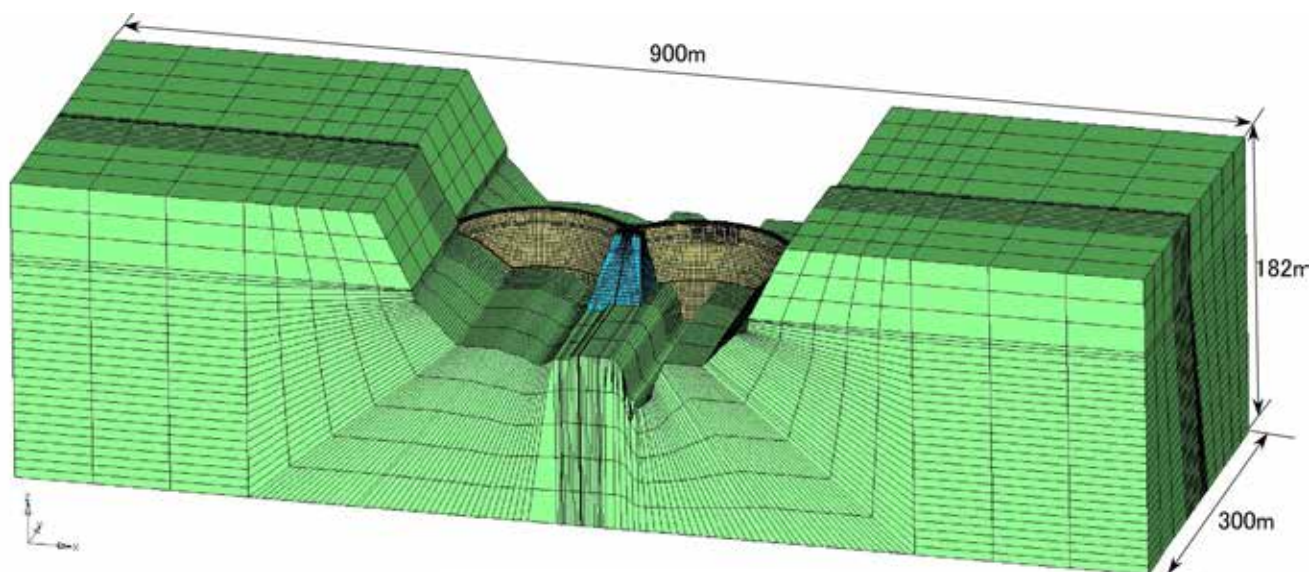


図-5 解析モデル構造図

表-2 材料特性

材料	弾性係数(kN/m ²)	ポアソン比	質量密度(t/m ³)
コンクリート	0.341×10^8	0.19	2.47
コンクリート	0.341×10^8	0.19	2.47
グラウト注入部	0.150×10^8	0.19	0.002
岩盤	0.150×10^8	0.20	0.002
ゲート	2.060×10^9	0.19	7.80

解析モデルにおける岩盤の質量の有無がダム振動特性に与える影響について検討する。

(1) 固有値解析による検討

岩盤質量を考慮しない場合と考慮した場合について、それぞれ固有値解析を行った結果として、表-3 に観測結果と併せて固有振動数を、図-6 にモード形を示す。なお、岩盤質量を考慮していないモデルは、前節でダム堤体コンクリートと岩盤の弾性係数を決定するために用いたモデルと同じである。岩盤質量を考慮しない場合、比較的低次で観測結果に対応したダムの振動モードを得ることができる。一方、岩盤質量を考慮した場合には岩盤の振動モードが低次から多数得られ、かなり高い次数にダムの振動モードが得られる。この結果より、岩盤の質量を考慮してもダムの振動モードを把握することは可能ではあるが、岩盤のモードが多く出現し、固有値解析結果には岩盤の振動モードが大きく影響すると考えられる。

(2) インパルス応答解析による検討

岩盤質量を考慮しない場合と考慮した場合のそれぞれについて、右岸アーチのほぼ中央（図-1 の④）に対応する位置に、図-7 に示すインパルス波を入力して、時刻歴加速度応答解析を行った。応答解析には、解析時間を $T = 40.96\text{s}$ 、時間間隔を $\Delta t = 0.01\text{s}$ として、ニューマークの b 法を適用した。

解析結果の一例として、右岸アーチの岩盤寄り（図-1 の②）に対応する位置での応答加速度時刻歴とそのフーリエ振幅スペクトルをそれぞれ図-8, 9 に示す。フーリエ振幅スペクトルから読み取ったピーク振動数を表-4 に示す。

岩盤質量なしのモデルの卓越振動数は、固有値解析から得られた1次固有振動数に対応して得られた。岩盤質量ありの場合の卓越振動数は、岩盤質量なしの場合のものと比較して、ピークが非常に多く現れており、岩盤の影響を受けていると考えられる。

表-3 固有振動数

岩盤質量なし		岩盤質量あり		観測値	
モード次数	固有振動数(Hz)	モード次数	固有振動数(Hz)	モード次数	固有振動数(Hz)
1次	6.87	19次	6.89	1次	6.60~7.00 ¹⁾
2次	7.24	22次	7.13	—	—
3次	7.97	33次	8.10	3次	7.90
4次	8.23	35次	8.17	—	—
5次	9.59	61次	9.69	—	—
6次	9.68	63次	9.76	—	—
7次	10.87	89次	11.06	7次	10.9

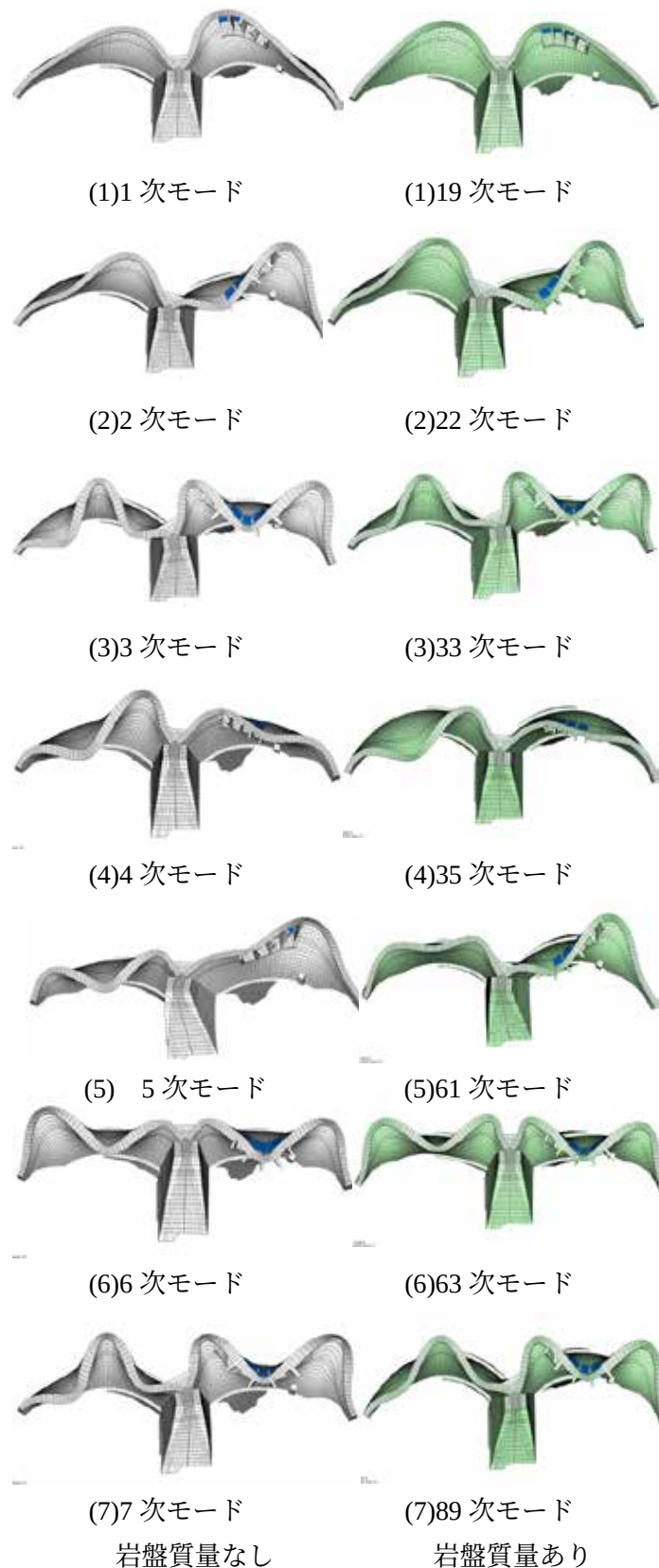


図-6 モード形

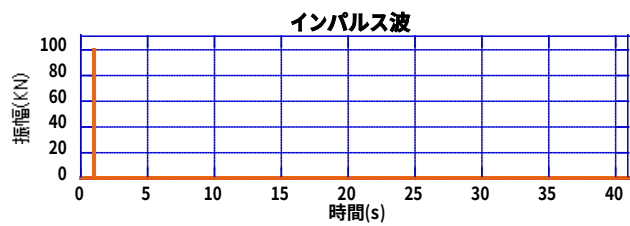


図-7 インパルス波

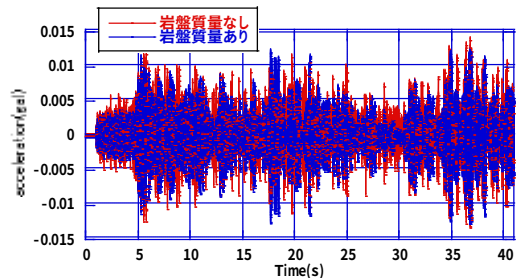


図-8 応答加速度時刻歴

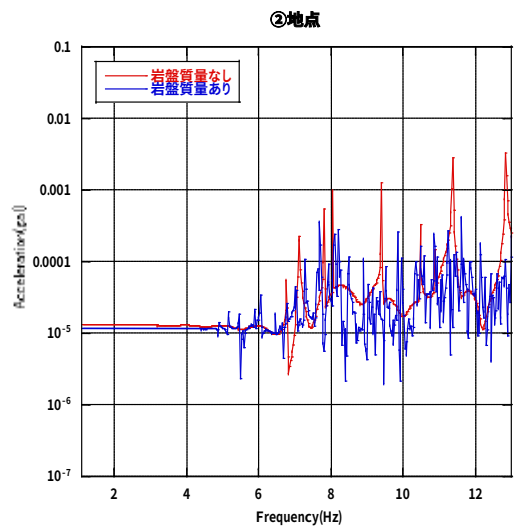


図-9 ②地点でのフーリエ振幅スペクトル

7. まとめ

実測記録に基づいた精緻なモデルの作成を目指し、3次元有限要素モデル化における岩盤の影響について検討した。岩盤質量を考慮しない場合、固有値解析では低次よりダム堤体の固有振動数と振動モードを得ることができた。インパルス応答解析結果においても低次の固有振動数に対応した卓越振動数を確認することができた。一方、岩盤質量を考慮した場合、固有値解析結果には岩盤のモードが多数表れ、岩盤質量を考慮しない場合に比べてダム堤体のモードは高次側で確認された。さらに、インパルス応答解析結果には、岩盤のモードの影響が大きく現れ、ダムのモードが埋没してしまうことを確認した。

本稿での検討により、ダム堤体の振動特性を把握するためには、岩盤の質量を無視して解析することが有効であることを確認した。今後は貯水部をモデルに組み込み、ダムの振動特性についてさらに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、

表-4 卓越振動数

岩盤質量なし		岩盤質量あり(岩盤質量なしと近いピーク)		観測値から得られた固有振動数(Hz)	
ピーク	振動数	ピーク	振動数	次数	振動数
1次	6.76Hz	7次	6.75Hz	1次	6.6～7.0Hz※
2次	7.11Hz	8次	7.05Hz	—	—
3次	7.81Hz	10次	7.68Hz	3次	7.90Hz
4次	8.06Hz	11次	7.95Hz	—	—
5次	9.30Hz	18次	9.14Hz	—	—
6次	9.42Hz	19次	9.35Hz	—	—
7次	10.48Hz	24次	10.46Hz	7次	10.9Hz

数値モデル作成にあたり、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。関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

1) 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，pp203-212，1994。

2) 上島照幸，金澤健司，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。

3) 仲村成貴，塩尻弘雄，上島照幸，有賀義明：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，土木学会第 32 回地震工学研究発表会論文集，ID 3-362，2012。

4) TDAPⅢマニュアル