

アーチダムのFEM動的解析モデルに適した動的物性のキャリブレーション

九州電力(株) 正会員 ○大熊信之 畑元浩樹
 熊本大学 正会員 松田 泰治
 (財)電力中央研究所 正会員 西内 達雄 金澤 健司

1. はじめに

既設アーチダムの耐震性能照査を実施するにあたり、三次元 FEM 動的解析モデルの再現性を高めることを目的として、動的物性のキャリブレーションを実施した。実施方法は、まず、実際のダムで常時微動を計測し、実ダムの振動モード、およびダム水位と固有振動数の関係を把握したうえで、これらを再現できるように三次元 FEM 解析モデルの動的物性値をパラメトリックに設定した。本稿では、今回行ったアーチダムの FEM 動的解析モデルに適した動的物性の設定方法について述べる。

2. 常時微動計測結果

対象としたアーチダム（堤高 130m, 堤頂長 418m）の常時微動測定を実施し、振動モード、およびダム水位と固有振動数の関係を把握した。また、小規模地震観測記録に基づき、固有振動数を推定し、常時微動に基づく推定値と概ね一致することを確認した。計測の詳細は、参考文献^{1),2)}を参考されたい。

3. 動的物性の検討方法

耐震性能照査に用いる解析モデルは、図-1に示すとおり、ダム-基礎岩盤-貯水連成系モデルであり、広領域の岩盤を模擬した。このような詳細モデルを用いて固有値解析を実施すると、堤体と岩盤の複雑な固有モードが多数混在して算出されるため、常時微動による評価結果に基づいた FEM モデルのキャリブレーションが困難となる。よって、岩盤との連成を考慮した固有値解析では、複雑なモードが算出されないよう岩盤部分の簡素化が必要となる。

図-2に動的物性の設定フローを示す。本研究では、まず、堤体だけの解析モデルを用いて、堤体コンクリートの大きな動弾性係数を推定した。次に、図-3に示す岩盤を簡素化した解析モデルにより、適切な支持岩盤領域の検討を行い、その後に堤体と岩盤の連成を考慮した固有値解析を実施することで、岩盤を含めた動弾性係数を設定した。

4. 固有値解析結果

(1) 堤体だけの固有値解析結果

堤体だけの固有値解析を実施し、測定分析値を参考にして大きな堤体コンクリートの動弾性係数を推定した。コンクリートの静弾性係数 ($E_s=30.6 \times 10^3 \text{N/mm}^2$) の 1.5 倍を基準にして、動弾性係数の範囲を $40 \sim 50 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ とし、 $1.0 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 刻みで 11 ケースの解析を実施した。ダム水位は低水位（水深 97m）とした。この結果、堤体の動弾性係数は $45 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ が妥当であると判断した。

(2) 岩盤幅をパラメータとした固有値解析結果

放射状に均一な幅の支持岩盤を取付けたモデル（図-3 参照）を作成し、岩盤幅をパラメータとした固有値解析を実施した。堤体コンクリートの動弾性係数は、(1) で求めた $45 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ とし、支持岩盤物性は、当該ダムを支持する岩盤の等級である CM~CH 級の岩盤範囲値 $20 \sim 30 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ とした。岩盤幅は、0~10 要素を 1 要素ずつ増やしながらか解析を実施した。岩盤幅で言うと、岩盤幅 0~95m の範囲での 11 ケースによるパラメータ解析である。図-4に解析結果を示す。支持岩盤を取付けることで固有振動数は低下し、1~4 次については、岩盤幅 40~60m 間でほぼ収束している。この結果から、有効岩盤幅 45m と決定した。

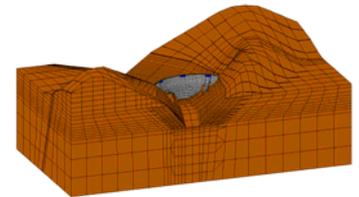


図-1 耐震照査用解析モデル

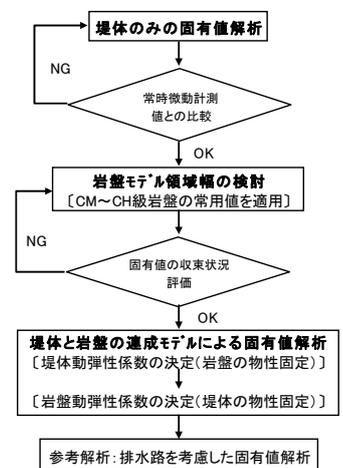


図-2 動的物性の設定フロー

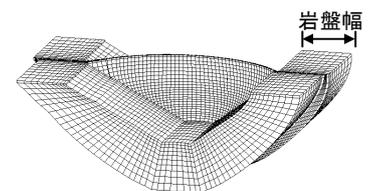


図-3 等厚岩盤の解析モデル (岩盤厚さ95mの場合)

キーワード アーチダム, 常時微動, 固有振動数, 固有モード

連絡先 〒815-8520 福岡市南区塩原2-1-47 九州電力(株) 総合研究所 土木グループ

(3) 堤体・岩盤連成モデルによる物性検討

(2)の結果から、岩盤幅は45mとして、堤体と岩盤の動弾性係数をパラメータとした解析を実施した。まずは、岩盤の動弾性係数を $20 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ に固定して、堤体の動弾性係数をパラメータとした解析を実施した。堤体の動弾性係数は $40 \sim 50 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 間を $1.0 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 刻みで計11ケースの解析を行い、実測値と固有振動数の収束状況を考慮した結果、(1)で仮に設定した堤体の動弾性係数と同値である $45 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ に決定した。

次に、堤体の動弾性係数を $45 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ に固定し、岩盤の動弾性係数を CM~CH 級の岩盤範囲値を想定して、 $10 \sim 24 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 間を $1.0 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 刻みに計15ケースの解析を行い、岩盤の動弾性係数を設定した。図-5に解析結果を示す。図-5によれば、岩盤の動弾性係数を最大の $24 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ としても、常時微動測定値で得られた固有振動数よりやや低い結果となった。また、岩盤の動弾性係数は $20 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 以上に大きくしても、固有振動数の増加量は小さく、物性変更の有用性が低い。このため、岩盤物性の限界値を設定するよりは、経験的に妥当な範囲で設定することが望ましいと判断し、岩盤の動弾性係数は $20 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ に決定した。

5. 排水路を考慮した固有値解析

前章の解析結果から、堤体と岩盤の動弾性係数をチューニングしても、固有振動数が常時微動計測を過小評価する結果となった。その原因のひとつに、堤体と基礎岩盤以外の付帯構造物の存在が考えられる。例えば、排水路は剛結ではないものの、堤体に接続されている。図-6に排水路を考慮した場合としない場合における、各水位毎（最高水位：水深127m、中間水位：水深112m、最低水位：水深97m）の固有値解析結果を示す。このグラフから、各水位とも、排水路がダム-基礎岩盤-貯水連成体の剛性に寄与し、剛性が高まったことで、固有振動数が若干増加し、常時微動に基づく実測結果に近接していることが分かる。図-7に解析結果における1~4次の振動モードを示しているが、これらの振動モードは、常時微動計測で得られたモードと一致することも確認している。

6. まとめ

常時微動計測に基づく振動特性を参考にしながら、堤体と岩盤動弾性係数を設定することにより、既設ダムの実挙動を忠実に考慮した再現性の高い動的解析モデルの構築を試みた。この手法は、アーチダムの動的解析モデルのキャリブレーション手法として、有効である。

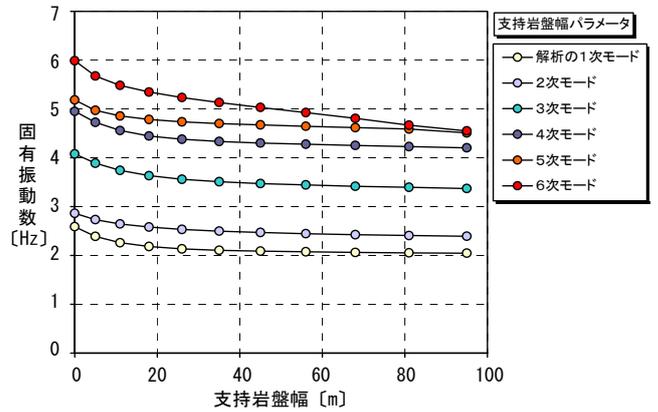


図-4 岩盤幅と固有値の関係図 (最低水位時)

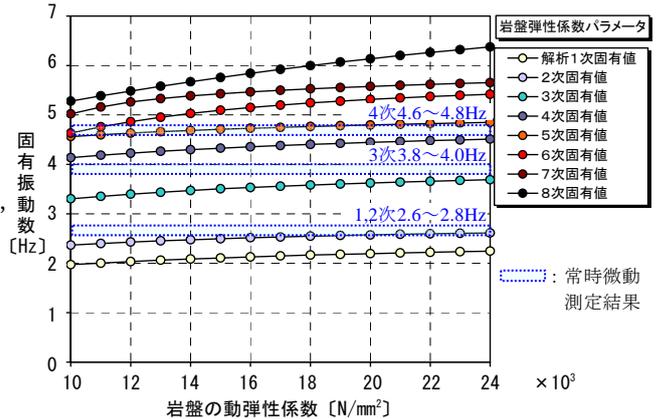


図-5 岩盤の動弾性係数幅と固有値の関係図 (最低水位時)

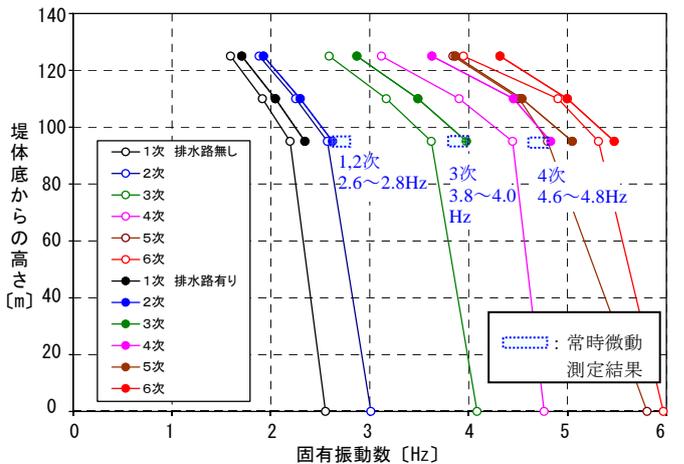


図-6 排水路を考慮した固有値解析結果

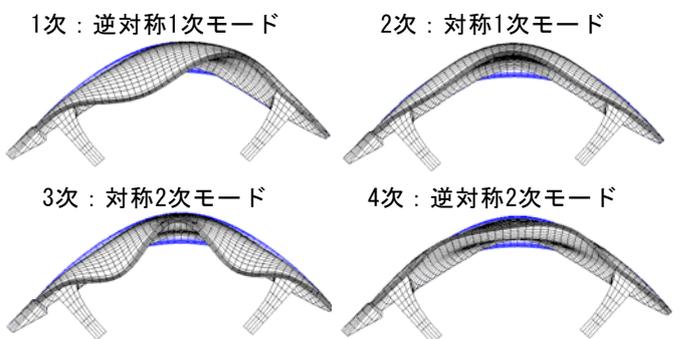


図-7 解析結果の堤体固有モード

【参考文献】

- 1) 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 (電力土木技術協会誌, No.341.2009.5)
- 2) 大熊信之, 畑元浩樹, 金澤健司. 常時微動計測データに基づく既設アーチダムの動的特性 (第64回土木学会年次学術講演会, 2009.9)
- 3) 豊田幸宏, 松尾豊史; 西内達雄ほか. 現場振動計測に基づく既設アーチダムの動的応答特性に関する検討 (電力中央研究所報告, No.U97031.1997.9)