

## 施工縦ジョイント部の非線形挙動を考慮したアーチダムの動的応答解析

電力中央研究所 正会員 豊田幸宏 中部電力 正会員 上田 稔  
中電工事 正会員 恒川和久 日本大学 正会員 塩尻弘雄

## 1. はじめに

強震時におけるアーチダムの動特性を正確に把握し、合理的な設計に資するためには、施工縦ジョイント部における離接、滑動等の非線形性を考慮した地震応答解析技術を確立することが重要である。これまでに著者らは、ジョイント部の非線形性を考慮できる新たな3次元岩盤-堤体-貯水連成解析プログラムの開発を行い、堤体を連続体とした線形解析モデルによる時刻歴応答解析を実施し、実測値との比較から線形範囲の解析精度について検証を行ってきた<sup>1,2)</sup>。また、実アーチダムの起振実験や地震観測等から得られたダムの固有振動数について検討を加え、貯水位が低い場合や強震時にアーチダム応答が縦ジョイント部の非線形挙動の影響を受けている可能性のあることを指摘した<sup>3)</sup>。本報告では、上記解析プログラムを用い、ダム堤体における施工縦ジョイント部の非線形性を考慮した時刻歴応答解析を実施し、貯水位が低い場合に実施された実ダムの起振実験との比較から、解析法の妥当性について検証し、アーチダム応答に及ぼす縦ジョイント部の影響を数値解析的に把握する。

## 2. 解析概要

## 2.1 解析対象

対象としたダムは、図-1に示すIアーチダム(ダム高107.5m、堤頂長341.2m、堤体積40万 $m^3$ )とし、同ダムにて実施された一連の起振実験の内、貯水位がHWLから70m低い場合に実施された実験について、起振点位置におけるダム上下流方向変位に着目したシミュレーション解析を実施した。

## 2.2 解析プログラムの概要

本解析プログラムは、有限要素法に基づく3次元岩盤-堤体-貯水連成地震応答解析プログラムである。本プログラムは、ダム堤体・岩盤や貯水のモデル化に使用する3次元ソリッド要素や流体要素、粘性境界要素等の他、施工縦ジョイント部の非線形性を考慮できる3次元ジョイント要素を備えている。また、岩盤部の材料異方性や地震入力におけるダムアバット沿いの位相差を考慮できる解析機能も有している。3次元ジョイント要素は、実ダムの施工ジョイントキー部の接触面を考慮し(図-2)、5方向の接触面に対して離接特性と摩擦滑り特性を非線形ばねで模擬するものである。離接ばねの非線形特性は、図-2に示すようにギャップ幅を考慮したテンションカットオフ型とし同一スケルトン上を動くものとする。また、摩擦滑りに関するばね特性はバイリニア型のスケルトンで表され、ヒステリシス特性を持つものとする。

## 2.3 解析モデル

解析モデルを図-3に、物性値を表-1に示す。これらは、既報<sup>4)</sup>により妥当性が明らかになったモデル化手法に基づいたものである。ジョイント要素は、図3に示す波線枠で囲った部分のダムブロック間に挿入された。ジョイント要素のばね剛性については、建設時にダムブロック間に充填されるグラウト材の弾性係数が、ダムコンクリートの1/5程度であることと、グラウト材充填部分のダム軸方向厚さが5mm程度であることを考慮して定めた。

## 2.4 解析方法

ダムの起振実験シミュレーションには、線形周波数応答解析法が従来からよく用いられているが、本解析モデルには、非線形ばね特性をもつジョイント要素が存在するため、この手法を用いることができない。このため、ここでは、周波数の異なる正弦波をいくつか用意し、それらを起振点位置に節点荷重入力として与え、起振点位置における応答値が定常になるまで時刻歴応答解析を実施することにより、定常振幅値と入力正弦波の周波数の関係を求め周波数応答曲線を得た。なお、これらの解析では、予め静的解析を実施し、ダム堤体自重ならびに貯水の静水圧により発生する初期変形を考慮したものとなっている。

## 3. 解析結果

図-4、図-5に、入力正弦波それぞれに対する起振点位置でのダム半径方向変位時刻歴応答の例と、それらから読みとった定常応答値を、起振点位置で実測された共振曲線図にプロットしたものを併せ示す。共振曲線図によれば、解析値は、共振点周波数ならびに共振振幅値ともに実測値とはほぼ同様であることがわかる。

図-6に今回の解析結果と既報<sup>3)</sup>に示されたIダムにて実施された一連の起振実験や最近までの地震観測記録等から得られた実験値ならびにダム堤体のジョイント部を無視した線形モデルによる解析値を固有振動数と貯水位の関係に着目してプロットしたものを示す。同図によれば、貯水位が高い場合(HWL付近)には、実測値と線形モデルによる解析値はほぼ一致しているが、貯水位がLWL(HWL-26.5m)以下になると、線形モデルによる解析値は、実測値より明らかに高い。今回対象とした貯水位の場合(HWL-70m)に着目すると、今回の解析より得られた固有振動数は、線形モデルの解析値に比べ、実測値に近いことがわかる。

キーワード：アーチダム、施工ジョイント、起振実験、有限要素法

〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646 電力中央研究所我孫子研究所 TEL 0471-82-1181 FAX 0471-83-2962  
〒495 名古屋市緑区大高町字北関山20-1 中部電力(株)電力技術研究所 TEL 052-624-9184 FAX 052-623-5117

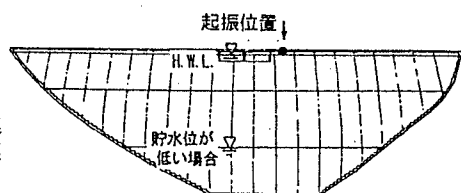


図-1 起振点位置と貯水位 (Iアーチダム)

#### 4. まとめ

アーチダム堤体の施工縦ジョイント部の非線形挙動を考慮した解析モデルにより、Iダムの貯水位が低い場合における周波数応答特性をよくシミュレートすることができ、本解析プログラムの妥当性が検証された。また、ダムの固有振動数に関して、ジョイント部を無視した線形モデルに比べ実測値に近づく傾向にあることがわかり、ダムの固有振動数がジョイント部挙動の影響により、低周波側にシフトすることを数値解析的に示した。

#### 「参考文献」

- 1) 豊田幸宏ら: 3次元有限要素解析コードによるアーチダムの起振実験過渡応答シミュレーション, 土木学会第51回年次大会講演概要集I-B, pp.176, 1996.
- 2) 恒川和久ら: アーチダム起振実験での変位と動水圧の時刻歴線形応答解析, 土木学会第51回年次大会講演概要集I-B, pp.180, 1996.
- 3) 上田稔ら: アーチダムの地震観測記録などから求めた固有振動数について, 土木学会第51回年次大会講演概要集I-B, pp.178, 1996.
- 4) 上田稔ら: 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.

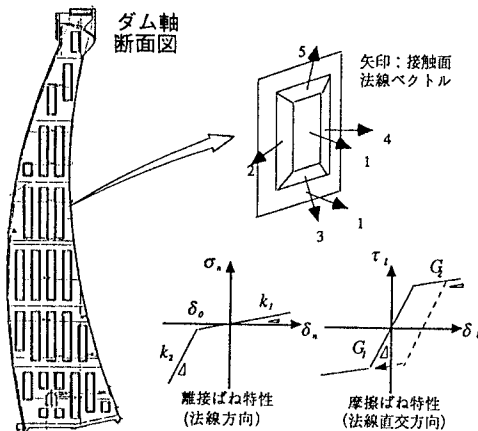


図-2 ジョイント要素非線形ばね特性

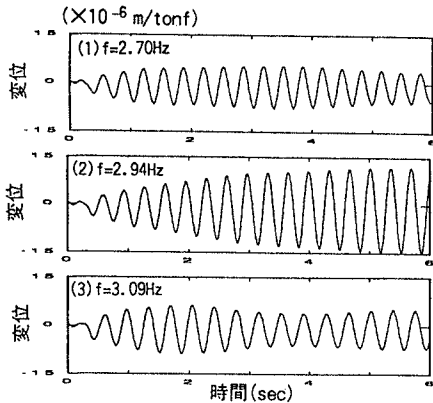


図-4 解析結果: 変位時刻歴の例

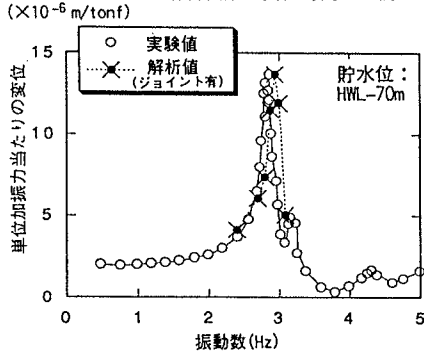


図-5 起振点位置上下流方向変位の共振曲線: 実験値と解析値と比較

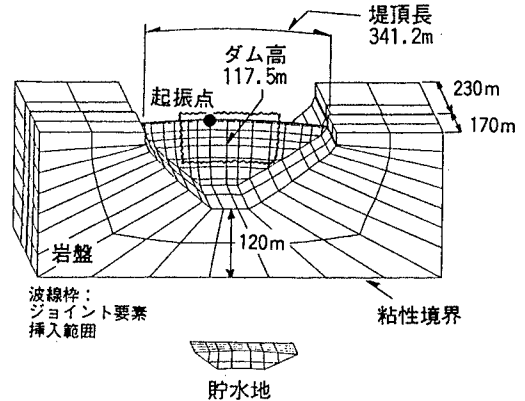


図-3 解析モデル

表-1 解析に使用した物性値

|     | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 | 単位体積重量<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 減衰定数<br>(%) |
|-----|---------------------------------|--------|-------------------------------|-------------|
| ダム  | 380,000                         | 0.20   | 2.5                           | 1.0         |
| 岩盤  | 184,000                         | 0.25   | 2.5                           | 1.0         |
| 貯水池 | 水中音速(m/sec) 1,400               |        |                               |             |
|     | インピーダンス比 5.3 (地山) 1.0 (貯水)      |        |                               |             |

- ◇ 地震観測
- 起振実験
- △ 常時微動
- 線形応答解析(ジョイント無)
- 非線形解析(ジョイント有)

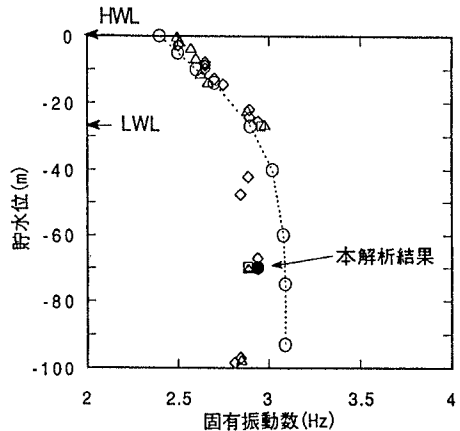


図-6 ダムの固有振動数と貯水位の関係