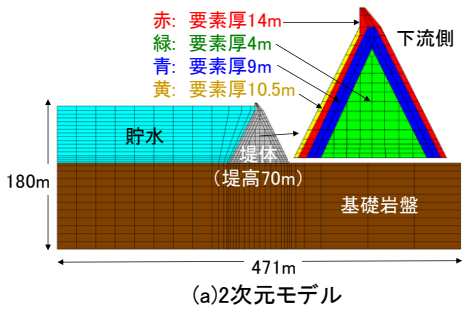
# 中空重力式コンクリートダムの2次元･3次元地震応答解析に基づく挙動

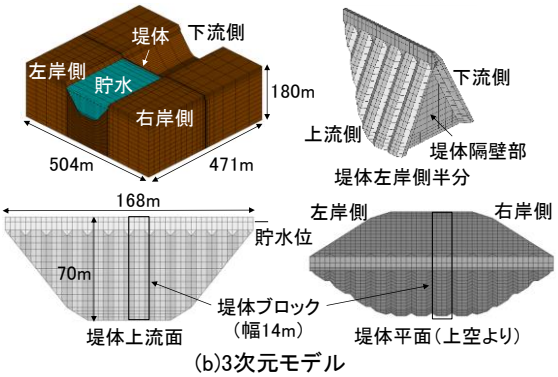
電力中央研究所　正会員　西内　達雄

## 1．はじめに

電力会社は、国土交通省や経済産業省から通知された指針案やマニュアル類を参考にしながら水力発電土木設備の耐震性能照査を進めており、ダム本体については概ね安全性の確認を終えている。この一連の照査において、電力共通のマニュアルや照査例等として蓄積、継承すべき技術を整備する目的で体系化が行われている。本報告では、中空重力式コンクリートダムの耐震性能照査に関連して、有限要素解析によるダム本体の地震時挙動において、2次元モデルと3次元モデルの解析結果を比較した。中空重力式コンクリートダムは国内に13基存在し、電力会社は7基所有している。ダム本体の解析では、設計に準じて代表2次元断面に対しての上下流方向の応答評価が主眼となっている。



(a)2次元モデル



(b)3次元モデル

図-1　解析に用いた要素分割図

## 2．解析概要

### 2.1　解析モデルと境界条件

解析は汎用解析コードAbaqusを用いた堤体-基礎岩盤-貯水連成モデルでの線形時刻歴地震応答解析である。モデルダムは堤高70mである。解析に用いた要素分割を図-1に示す。2次元モデルは3次元モデルでの堤体中央ブロック断面と同じであり、ブロックの左右岸方向は要素の厚さで考慮している。地震動の入力方向は2次元モデルでは上下流方向と鉛直方向、3次元モデルでは上下流方向と左右岸方向、鉛直方向である。地震動の各方向成分は2次元モデルと3次元モデルは同じである。貯水部は水要素（流体要素）で扱った。解析モデルの境界条件として、上下流方向と左右岸方向入力時は基礎岩盤の側面は水平ローラー支承、底面は鉛直拘束で水平ローラー支承とした。鉛直方向入力時は基礎岩盤の側面は鉛直ローラー支承、底面は水平拘束で鉛直ローラー支承とした。

### 2.2　地震動と荷重条件、物性値

地震動は国交省指針案の方法に準拠して、兵庫県南部地震一庫ダム観測波の位相を用いて作成した波形を振幅調整して用いた（水平1方向の最大加速度約300gal、ベクトル合成した水平動の最大加速度約420gal、鉛直方向の最大加速度約180gal）。入力地震動は、この地震動に対して重複反射理論（SHAKE）を用いて有限要素解析モデルの底面へ引き戻した波形とした。荷重条件として、常時荷重は貯水の静水圧、揚圧力、堆泥圧、自重とし、地震時荷重は貯水の動水圧と地震動とした。荷重条件の算定に用いる係数、定数はダム設計基準および河川管理施設等構造に準拠した。解析に用いた物性値はダムコンクリートや $C_M$ 級基礎岩盤の一般値を想定して、単位体積質量は堤体2.3t/m$^3$、基礎岩盤2.6t/m$^3$、動弾性係数は堤体3.0×10$^4$N/mm$^2$、基礎岩盤2.0×10$^4$N/mm$^2$とした。減衰の設定は、堤体の1次と2次の固有振動数を把握した後に、所定の減衰（堤体、基礎岩盤とも5%）となるようにレイリー減衰定数を定めた。

## 3．地震時挙動の解析結果

### 3.1　堤体変位

地震時の上下流各方向の最大変位分布を図-2に示す。常時荷重の影響により、上流側変位よりも下流側変

キーワード　中空重力式ダム、コンクリートダム、耐震性能、地震応答解析、有限要素法
連絡先　〒270-1194　千葉県我孫子市我孫子1646　電話 04-7182-1181、FAX 04-7183-2962

© Japan Society of Civil Engineers

位の方が大きい。2 次元モデルの変位は 3 次元モデルよりも大きく、3 次元モデルでは堤体中央部の変位が卓越している。3 次元モデルでは堤体中央部の断面は大きく、堤体側方が岩盤で拘束されることにより、堤体中央部が変形の腹となる水平面対称モードの影響が励起したことによると考えられる。次に、3 次元モデルで地震時の各方向の最大変位分布を図-3 に示す。前述と同様、常時荷重の影響で相対的に下流側へ変位している。上下流方向と左右岸方向の変位と比較して鉛直方向の変位は小さい。左右岸方向については中段標高部までの変位が大きい。これは、堤体の中空部を仕切る隔壁部は左右岸方向の厚さが相対的に薄く、隔壁部の高標高部と低標高部は堤体の左右岸方向に連続していることから、連続していない壁状の部分が左右岸方向に振動したことの影響と考えられる。

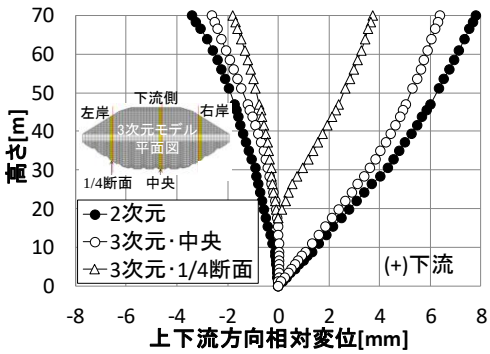


図-2 上下流方向の最大変位分布

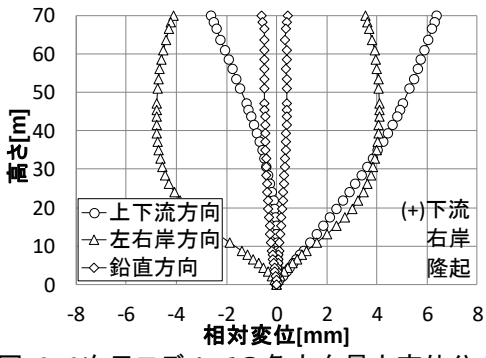


図-3 3次元モデルでの各方向最大変位分布

3.2 堤体のひび割れ性状

ひび割れの発生状況の推定図を図-4 および図-5 に示す。ひび割れの発生は、コンクリートの動的引張強度を 3.0N/mm$^2$ と仮定して、要素の引張応力がこの値を超過した場合に発生すると判定した。図-4 は全時刻を通じた堤体中央断面のひび割れ推定図の比較である。2 次元モデルは堤体上流側岩着部に局所的にひび割れが発生する。発生した時刻は堤体が下流側へ最大変形した時である。堤体の下流方向への曲げ変形で発生した鉛直方向の引張応力に起因したひび割れと考えられる。3 次元モデルでも 2 次元モデルと同様に堤体上流側岩着部にひび割れが発生する。3 次元モデルでは、この箇所に加えて下流側の低標高部でもやや広範囲にひび割れが発生している。このひび割れは堤体の左右岸方向の変形に起因したものと考えられ、これについては後述する。図-5 は 3 次元モデルで堤体の最大変形の方向に応じたひび割れ推定図である。比較のため全時刻を通したひび割れ推定図も示した。堤体が下流側へ最大変形した際は、堤体上流面の中央岩着部近傍でひび割れが発生し、堤体が上流側へ最大変形した際は、堤体右岸側の天端付近で局所的なひび割れが発生する。一方、堤体が右岸側へ最大変形した際には、左岸側の堤体ブロックの底面や岩着部近傍、表面でひび割れが発生する。堤体岩着部近傍は傾斜した箇所であり、堤体隔壁部の右岸方向への曲げ変形で発生した引張応力に起因すると考えられ、堤体表面は壁状部材の面内せん断変形によると考えられる。

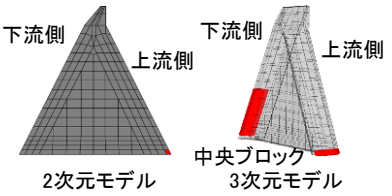


図-4 堤体中央断面で全時刻を通じたひび割れ推定図

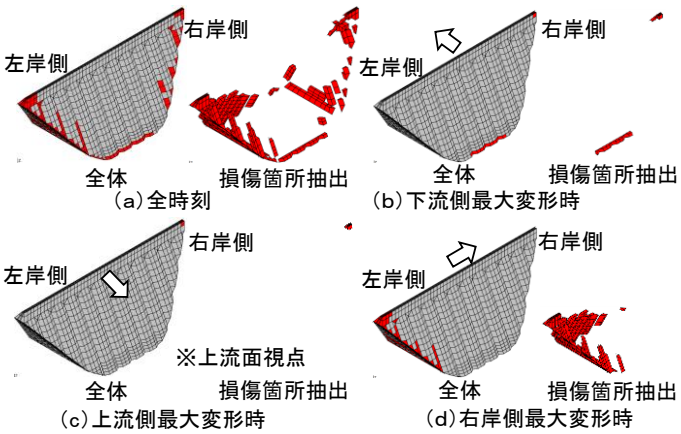


図-5 3次元モデルでのひび割れ推定図

## 4．まとめ

堤高 70m の仮想中空重力式コンクリートダムを対象に、2 次元モデルと 3 次元モデルによる線形時刻歴地震応答解析を実施して、地震時の堤体挙動を比較した。堤体変位やひび割れ性状について、上下流方向の応答においては 2 次元モデルと 3 次元モデルでは大差ない。しかし、左右岸方向の応答は上下流方向の応答よりも卓越し、この応答に起因したひび割れも予想される。左右岸方向の応答とそれに伴うひび割れは 2 次元モデルの評価対象外であることから、それを比較的簡便に評価する手法や考え方の開発が今後必要と考えられる。

© Japan Society of Civil Engineers