# ダム門柱に対する3次元ソリッド非線形解析手法の適用性の検討(その4)

水資源機構 正会員 藤田 将司 正会員 冨田 尚樹 正会員 佐藤 信光 オリエンタルコンサルタンツ 正会員 ○張 寧 正会員 福間 雅俊 正会員 梅林 福太郎

## 1. はじめに

ダムの耐震性能照査では、ダム本体だけでなくゲートやこれを支持する門柱も耐震性を確認する必要がある。ダム門柱は水圧が作用するゲートを支える関係で厚さの大きい構造であり、その結果、相対的に鉄筋比が少なくなる構造的特徴を有している。また、流水を安全に流下するために門柱の基面が下流側へ下がる形状をとなっている。このため、ダム門柱を橋梁と同じ骨組みモデルによる耐震性能照査で行うと、適切な評価が難しい課題がある。ダム門柱の地震時被害の実態<sup>1)</sup>を踏まえると、実形状で実耐力を評価できる 3 次元ソリッド非線形モデルによる耐震照査も求められている<sup>2)</sup>。本稿は規模の大きい門柱に対して 3 次元ソリッド非線形解析手法を適用した動的解析の検討を報告するものである。

#### 2. 照査対象と地震動

照査対象とするダム門柱は、図-1 に示すように高さ 18.4m、厚さ 6.8m の規模の大きい構造である。材料諸元を表-1 に示す。ダム基礎の地震動を図-2 に示す。この地震動を堤体モデルに入力して門柱基面標高の応答加速度時刻歴を抽出し、図-1 の門柱モデルに入力した。

#### 3. 3次元ソリッド非線形解析モデル

規模の大きいダム門柱は、地震時の曲げ損傷形態において、鉄筋の引張抵抗に比べコンクリート引張抵抗の効果が大きくなるため、内部コンクリートを含めたコンクリートのひび割れ後の挙動を適切に考慮することが重要である。このため、鉄筋とコンクリートの付着特性に基づくテンションスティフニングと、コンクリートのひび割れ後の軟化特特性を考慮できる3次元ソリッド非線形モデルを適用した。モデル化範囲は、隣接する門柱との中間位置までの堤体と門柱を考慮した(図-1)。付加質量として、ゲートや巻き上げ機、天端橋梁の質量や、動水圧の影響を考慮した。ダム門柱は一般にダム軸方向の振動に対して基部の応答とゲートの変位が課題となることから、門柱はすべて非線形要素とし、ひび割れ分布を踏まえたメッシュ分割とした(図-1)。

## 4. プッシュオーバー解析による破壊形態の推定

最大荷重後の耐力低下までの破壊過程を推定するため、変位制御のプッシュオーバー解析を行った。この変位分布は、予め線形動的解析により最大変位発生時の変位分布を把握して全点の値を設定した。比較のために通常の 1 本柱の骨組みモデルにより門柱基部までをモデル化したモデル (図-3) による解析も実施した。

この結果、3次元ソリッド非線形モデルによる最大荷重は、骨組み

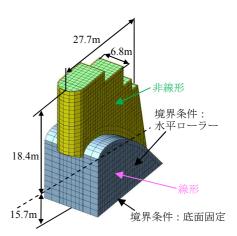


図-1 3次元ソリッド非線形モデル

表-1 材料条件

コンクリートの圧縮強度	38.8N/mm <sup>2</sup>
コンクリートの引張強度	2.6N/mm <sup>2</sup>
粗骨材の最大寸法	80mm
鉄筋降伏強度	295N/mm <sup>2</sup>
鉄筋比(門柱基部)	0.03%
鉄筋比(段落し部)	0.02%

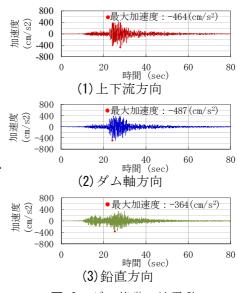


図-2 ダム基礎の地震動

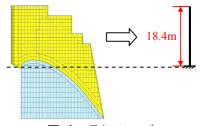


図-3 骨組みモデル

キーワード ダム門柱, 低鉄筋比, 非線形解析, 3次元ソリッド FEM, 動的解析

連絡先 〒151-0071 東京都渋谷区本町 3-12-1 (株) オリエンタルコンサルタンツ TEL03-6311-7860

モデルのコンクリートのひび割れ荷重と同程度となることと、3次元ソリッド非線形モデルはひび割れ後も荷重低下せず、曲げ変形性能が見られることを確認した(図-4)。この原因を確認するために、3次元ソリッド非線形モデルの変位と、ひび割れおよび鉄筋降伏の進展状況を図-5に示す。前述のとおり、コンクリートのひび割れ後の引張強度特性を考慮することで、最大耐力が増加することとなるが、これに加え、堤体の越流形状や分布荷重を考慮したことで、上流側のひび割れは骨組みモデルと同様の変位で発生するものの、下流側のひび割れ発生はその後の大きな変位で生じている。越流形状をモデル化したために下流側の門柱の基面が下がることにより、分布荷重が下流側下面を含めた全体に作用することとなった。その結果、下流側の下方にひび割れが分散し、門柱としての見かけの剛性が低下し、下流側のひび割れ発生変位が増加したものと考えられる。

### 5. 非線形動的解析

ダム門柱の3次元ソリッド非線形解析モデルに対して非線形動 的解析を行った。また、比較として、骨組みモデルでも動的解析 を行った。骨組みモデルは、線形モデルと、ひび割れ強度を降伏 強度に置き換えた非線形モデルである。この結果、線形の骨組み モデルでは、ひび割れ強度を超過し、非線形の骨組みモデルでは、 鉄筋の降伏を大きく越える変位(50mm)が発生した(図-6, 図-8)。 3次元ソリッド非線形解析モデルでは、門柱天端の変位は 5mm 程 度となり、鉄筋の降伏ひずみ以下に留まった(図-4、図-6)。また、 せん断については、3次元ソリッド非線形解析モデルでは、プッ シュオーバー解析において地震時の最大応答を超える変位が作用 してもせん断破壊の際の急激な耐力低下は生じないことを確認で きており(図-4)、骨組みモデルではコンクリートのせん断耐力以 下の応答であった(図-7)。また、ゲートへの影響に着目すると、 骨組みモデルでは制限値(10mm)を超過するものの、3次元ソリッ ド非線形解析モデルでは、制限値以内に留まった(図-8)。以上よ り、3次元ソリッド非線形動的解析によれば、対象のダム門柱は 所要の耐震性能を有している結果となった。

#### 6. おわりに

規模の大きいダム門柱に対して3次元ソリッド非線形モデルを 適用した動的解析を行った。実形状、実耐力を考慮できる3次元 ソリッド非線形動的解析ではダム門柱の損傷は軽微であり、所要 458 の耐震性能を有していることを確認した。本手法は規模の大きな 452 ダム門柱の実形状および実耐力を評価する上で有用である。 <sup>458</sup> 446

**参考文献** 1) 島本和仁, 佐藤信光, 大町達夫, 川崎秀明, 岩井真治: 2008 年岩手・宮城内陸地震によるダムの被害調査報告, ダム工学, Vol.18, No.2, 2008.3.

2)藤田将司,佐藤信光,富田尚樹,久木留貴裕:ダム門柱の耐震性能照査における3次元ソリッドモデルの非線形動的解析手法の適用,ダム工学 27(3),pp.185-194,2017.

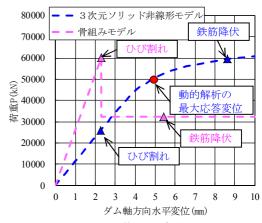


図-4 荷重-変位特性

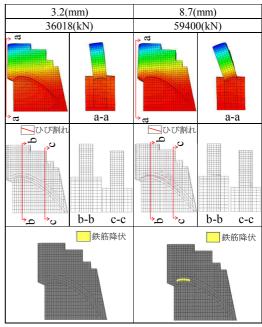
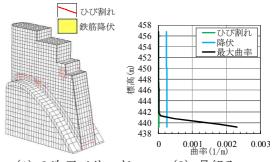
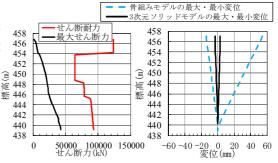


図-5 損傷の進展状況



(1) 3 次元ソリッド (2) 骨組み 図-6 曲げの照査



**図-7** せん断照査 **図-8** 変形量の照査 (骨組み)