

ダム門柱における3次元ソリッド非線形解析手法の適用性の検討(その3)

水資源機構 正会員 藤田 将司 正会員 富田 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 ○福岡 雅俊 正会員 久木留 貴裕 正会員 大竹 省吾

1. はじめに

ダム門柱は、一般の橋脚とは異なり、水圧が作用するゲートを支持するため断面が大きくなる傾向があり、相対的に鉄筋比が少なくなる構造的な特徴がある。また、門柱の基面は流水を安全に流下させるため、下流側へ下がる(越流形状)形状的な特徴を有している。このため、強い地震動に対しては一般的な骨組みモデルによる耐震性能照査では適切な評価が難しい課題がある。そこで、筆者らは、ダム門柱に3次元ソリッド非線形モデルを適用する検討を進めている<sup>1)</sup>。本検討は、規模の大きいダム門柱に対して、形状的な特性や荷重増大の特性に着目して3次元ソリッド非線形モデルを用いた漸増荷重解析によりその適用性を検討したものである。

2. 3次元ソリッド非線形モデルによるモデル化

低鉄筋 RC 構造の破壊形態の特徴はコンクリートのひび割れ強度よりも鉄筋の降伏強度が低いことであり、耐力評価ではコンクリートの引張強度特性を適切に評価することが重要である。RC 構造のひび割れ後の特性には、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性がある。本検討では、これらを表-1に示す特性により考慮するものとし<sup>1)</sup>、破壊エネルギーにダムコンクリートに対する実験式<sup>2)</sup>を用いた。また、ダム門柱の形状的な特徴として基面の越流形状がある。そこで、これらの特徴を把握するために、鉄筋コンクリートの損傷を考慮できる3次元ソリッド非線形モデルを用いた。

3. 解析対象と検討ケース

解析対象は、図-1に示す門柱高18.4mの規模の大きいダム門柱とした。材料諸元は表-2のとおりである。実際のダム門柱は3次元ソリッドモデル(図-1のS2,S3)の越流形状であるが、形状効果を把握するために矩形形状の門柱(図-1のS1)をモデル化した。荷重の荷重は橋脚と同様の集中荷重荷重と、自重の大きいダム門柱の特徴を表現した分布荷重荷重とした。荷重方法は変位制御の漸増荷重とし、分布荷重時の変位は事前にS3モデルを線形動的解析してその応答変位から設定した。また、一般的な骨組みモデル(図-1のB1)とも比較するためにモデル化し、解析は4ケースとした(図-1)。

表-1 3次元ソリッド非線形モデルの解析条件

鉄筋	非線形特性	パイリニアモデル(移動硬化則)
コンクリート	テンションスティフニング特性	出雲らによるモデル(c=0.4)(無筋部分はCut Offモデル)
	ひび割れ後の軟化特性	土木学会式(2直線モデル)破壊エネルギー(堀井らによる式)
	圧縮強度点までの特性	修正Ahmadモデル
	圧縮強度到達後のひずみ軟化域	修正Ahmadモデル
	ひび割れ後のせん断伝達特性	無筋:せん断伝達なし 鉄筋:Al-Mahaidiモデル

ケース	モデル	形状	荷重	解析モデル・荷重方法
S1	3次元ソリッドモデル	矩形形状	集中荷重	
S2		越流形状	集中荷重	
S3		越流形状	分布荷重	
B1		骨組みモデル	分布荷重	

図-1 解析モデルと荷重方法

表-2 対象構造物の諸元

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>
鉄筋降伏強度	295N/mm <sup>2</sup>
鉄筋比	0.03%

キーワード ダム門柱, 低鉄筋 RC 構造, 材料非線形, FEM 解析, プッシュオーバー解析

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

4. 越流形状の効果

越流形状の効果把握するために、矩形形状と越流形状の3次元ソリッド非線形モデル(図-1のS1、S2)に集中荷重による漸増荷重解析を行った。門柱天端の変位 $\delta$ と荷重P(基部反力)の関係を図-2(S1、S2)に示す。矩形形状(S1)では鉄筋降伏後に急激に荷重が低下した。越流形状(S2)ではS1より最大荷重が高くならなかったが、急激な荷重低下は生じなかった。図-3に示すように、矩形形状(S1)ではひび割れが基部付近に集中して一様に発生するのに対して、越流形状(S2)では上流側にひび割れが集中し、下流側ではひび割れが分散していることを確認した。また、図-4に示すように基部の応力度状態は、矩形形状と越流形状の上流側では同等であるが、下流側では越流形状の方が小さいことを確認した(図-4のS1、S2b)。これより、越流形状のP~ $\delta$ 特性は、下流側のひび割れが上流側より分散して発生し、最大荷重は低下するが、急激な荷重低下は生じなかったと考えられる。

5. 分布荷重の効果

分布荷重の効果把握するために、越流形状について分布荷重と集中荷重による漸増荷重解析を行った(図-1のS2、S3)。図-2にP~ $\delta$ 曲線を示すが、分布荷重(S3)ではひび割れ後も荷重が増加し続けることを確認した(図-2のS3)。また、図-3にひび割れ分布を示すが、分布荷重(S3)は集中荷重(S2)に比べて下流側のひび割れの方向が下方に分布し、ひび割れの発生がさらに少ないことを確認した(図-3のS3)。これより、越流形状に分布荷重が作用する場合のP~ $\delta$ 特性は、門柱に作用する慣性力分布が分散し、下流側の応力分布位置が下方に移動し、下流側の発生応力度が少なくなることに因ると考えられる。

6. 骨組みモデルとの比較

一般的な設計で用いる骨組みモデル(B1)と3次元ソリッドモデルの比較を図-2に示す。骨組みモデルでは低鉄筋RC構造特有のP~ $\delta$ の急激な荷重低下を示し、矩形形状(S1)と同様の結果となった。ダム門柱の特徴である越流形状、且つ分布荷重の条件に対しては、骨組みモデルでは適切な表現が難しいことを確認した。

7. 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の漸増荷重解析により耐力低下等のP~ $\delta$ 特性を検討した。その結果、骨組みモデルと比較して、実門柱の実耐力に近い3次元ソリッド非線形モデル(図-1のS3)では、コンクリートの引張強度特性や越流形状効果、分布荷重効果によって、コンクリートのひび割れ後も耐力低下せず、高い耐力を有していることを確認した。

参考文献 1) 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.  
2) 堀井秀之, 内田善久, 柏柳正之, 木全宏之, 岡田武二: コンクリートダム耐力評価のための引張軟化特性の検討, 電機土木, NO.286, pp.113-119, 2003.3.

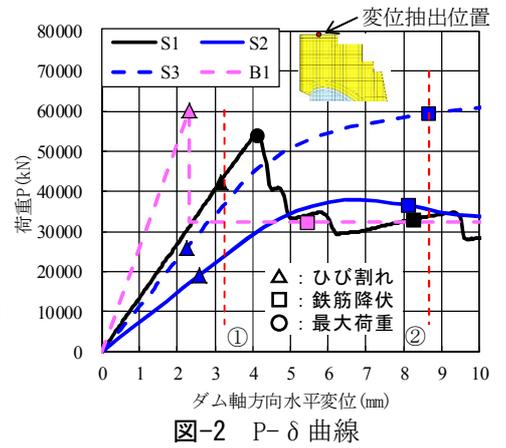


図-2 P- $\delta$ 曲線

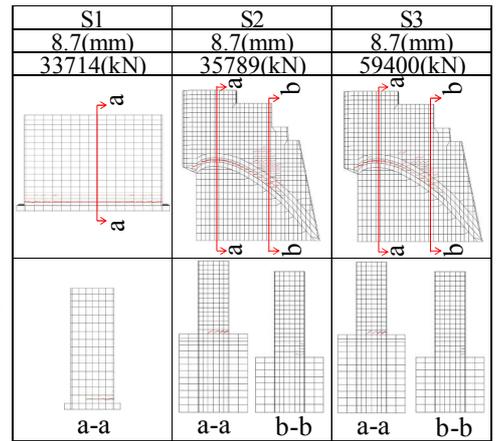
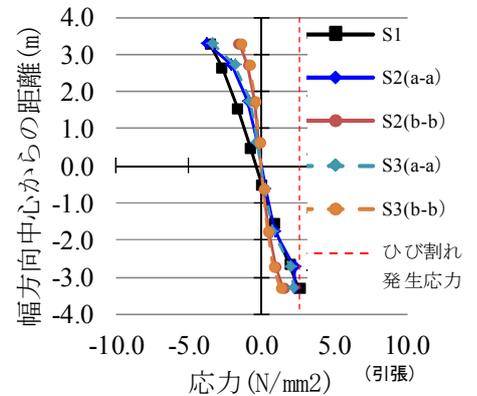
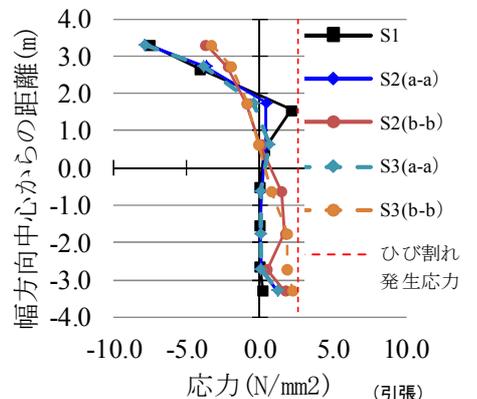


図-3 ひび割れ分布



① 応答変位 3.2mm



② 応答変位 8.7mm

図-4 基部の応力度分布