

ダム門柱における3次元ソリッドモデルによる非線形解析手法の適用性の検討(その1)

水資源機構 正会員 佐藤 信光 富田 尚樹
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幅の広い大きな構造であるが、それと比較して鉄筋が少ない特徴となっている。このため、RC構造であるがひび割れ耐力よりも曲げ降伏耐力が小さくなる低鉄筋構造となることが多い。ダム門柱の耐震照査は一般に梁モデルで行われているが、最近は詳細な3次元ソリッドモデルによる耐震照査も求められている。本稿は低鉄筋なダム門柱を3次元ソリッドモデルで耐震照査するために、その損傷形態を考慮した非線形解析手法を既往の実験¹⁾とも比較し、その適用性の検討を報告するものである。

2. 低鉄筋コンクリート構造への適用性

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後に耐力が低下し、直ちに鉄筋の降伏に至ることである。このため、低鉄筋RC構造の破壊形態の評価では、コンクリートのひび割れ後の特徴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特性と、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、ダム門柱の鉄筋比が0.03~0.1%程度と小さいことから、前者には出雲らのモデル²⁾のC=1.0(図-1)を用い、後者にはコンクリート標準示方書に記載されている破壊エネルギー(図-2)と引張強度に基づき2直線モデル³⁾で推定する方法(図-3)を用いた。また、これらの特性を耐力の算定において考慮するため、解析には3次元ソリッドモデルによる非線形解析⁴⁾を用いることとした。上記の特性を用いた解析手法を既往の低鉄筋RC梁供試体の荷重試験¹⁾(表-1, 図-4)に適用し(図-5)、変位荷重によるプッシュオーバー解析を実施した。この結果、3次元非線形解析は、低鉄筋RC構造の曲げ破壊形態を忠実に再現できることが確認できた(図-6)。

ここで、ダムコンクリートの破壊エネルギーについては実験式⁵⁾(図-2)があり、コンクリート標準示方書の式に比べ高い値が報告されている。また、この原因としては、骨材の最大寸法や、粗骨材量の影響が推測される。そこで、破壊エネルギーにダムコンクリートの特性を用いたところ、コンクリート標準示方書に比べ最大荷重が大きくなることが確認された(図-6)。またこれは、コンクリートのひび割れ後の引張抵抗が大きいこと、ひび割れが内部に及ぶまで耐力が増加する(図-7)ことが原因であった。したがって、ダムコンクリートでは普通コンクリートに比べひび割れ発生時に大きな耐力の発現が期待できる。

3. ダム門柱の耐震性能

ダム門柱に前述の3次元非線形解析を適用しその耐荷性能を推定した。ダム門柱は、曲線形状の洪水吐きの上に設置された構造で、上下流方向が非対称な上に、天端の上流側に橋梁が設置される複雑な形状

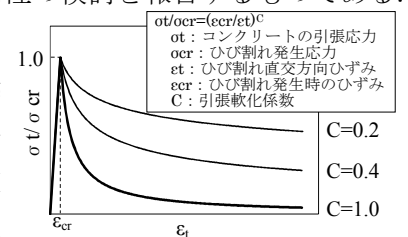


図-1 テンションスティフニング特性

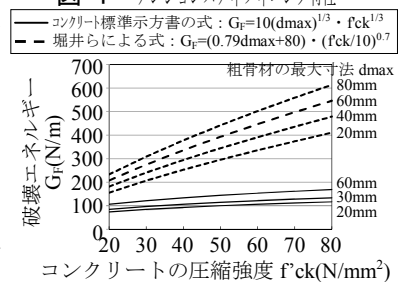


図-2 破壊エネルギー

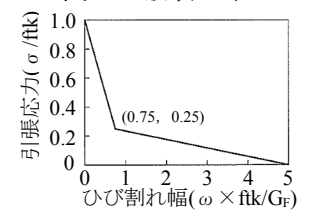


図-3 2直線モデル³⁾

表-1 再現解析の条件

コンクリートの圧縮強度	31.4N/mm ²
コンクリートの引張強度	2.3N/mm ²
鉄筋の降伏強度	358N/mm ²
鉄筋比	0.10%

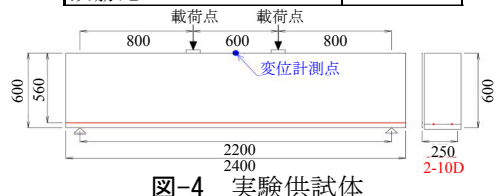


図-4 実験供試体



図-5 解析モデル

キーワード ダム門柱, 耐震, RC 構造, 材料非線形, FEM 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 TEL 03-6311-7860

である。このため、地震時挙動はねじりを伴う複雑ものとなるが、本検討では低鉄筋の影響のみを明確にするため単純な壁モデル（表-2、図-8）を用いた。コンクリートの軟化特性は、ダムコンクリートの破壊エネルギー（図-2）を考慮した（図-10の①）。また、ひび割れ後のコンクリートの引張抵抗を無視する通常の骨組みモデル（図-9）で算定される耐力との比較を行った（図-10の骨組みモデル）。この結果、3次元非線形解析による耐力は、骨組みモデルに比べ5割程度以上高いものとなった。そこで、その要因確認のため、3次元非線形解析のコンクリートの引張側の特性を無視した解析として図-10の解析を実施した。この結果、コンクリートのひび割れ後の引張抵抗を無視する（図-10の④）とひび割れ時の最大耐力が一致し、ひび割れ前も含めたコンクリート引張抵抗を無視する（図-10の⑤）と鉄筋降伏時の耐力が一致することが確認できた。

4. ダム門柱の耐震性能照査手法

前掲の図-10より、ダム門柱の耐力は、ひび割れが内部に進展し最大荷重後を迎えた後、さらにひび割れが進展すると低下する。また、変形が進み鉄筋の降伏に至っても骨組み解析に比べ高い耐力を示す。これは、図-7、図-10より、コンクリートのひび割れ後の引張抵抗とひび割れ前のコンクリートの抵抗によると考えられる。以上より、低鉄筋 RC 構造物であるダム門柱では、コンクリートの引張抵抗が耐力に大きな影響を及ぼすことがわかった。

なお、最大荷重後の耐力の低下特性は、変位制御解析では表現できるが、荷重制御解析では考慮できない。このため、動的解析により照査を行う際には、応答変位が耐力低下の生じる変位を超過した際に耐力を過大評価するため、必要に応じ、ひび割れ領域のコンクリートの引張強度を低下させる等の配慮（図-10の⑥）を行う必要がある。

5. おわりに

ダム門柱に適用する3次元ソリッドモデルによる非線形解析の適用性を、既往の低鉄筋 RC 梁実験の再現により確認した。ダムコンクリートはひび割れ後の抵抗が大きいいため、ひび割れ時の最大耐力が大きくなることがわかった。ダム門柱は曲線形状の洪水吐きの上に設置された上下流方向に非対称な構造であり、引き続き、ダム門柱の実形状に対する3次元ソリッドモデルによる非線形解析を適用することとした。

参考文献 1) 島弘, 二羽淳一郎, 岡村甫: 曲げを受ける低鉄筋比はりにおける脆性破壊の防止に関する検討, 土木学会論文集, 第378号, V-6, pp.231-237, 1987.2. 2) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9. 3) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 設計編, pp.37-38, 2012.7. 4) 佐藤裕一, 長沼一洋: 分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測 (その3: 3次元解析), 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), pp.667-668, 2006.9. 5) 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, 電力土木, NO.286, pp.113-119, 2003.3.

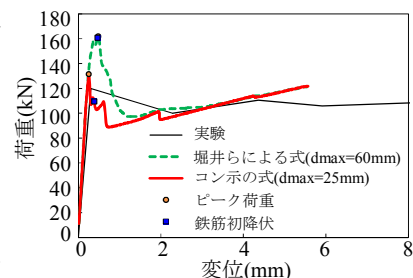


図-6 P-δ 曲線

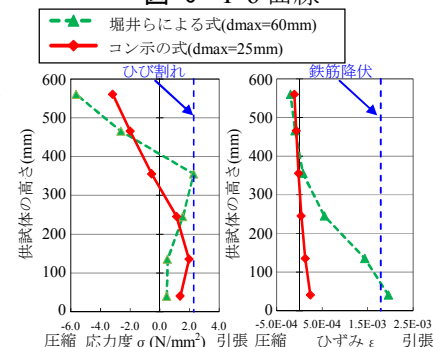


図-7 ピーク荷重時の応答分布

表-2 単純な壁モデルの条件

コンクリートの圧縮強度	32.3N/mm ²
コンクリートの引張強度	2.3N/mm ²
粗骨材の最大寸法	60mm
鉄筋の降伏強度	295N/mm ²
鉄筋比	0.13%

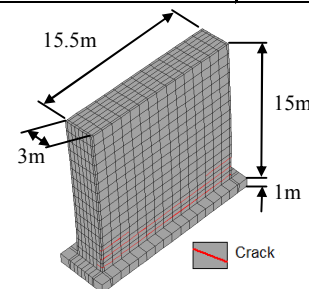


図-8 FEM モデル／

基本ケース：最大荷重時

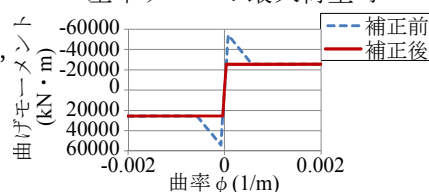


図-9 骨組みモデルの M-φ

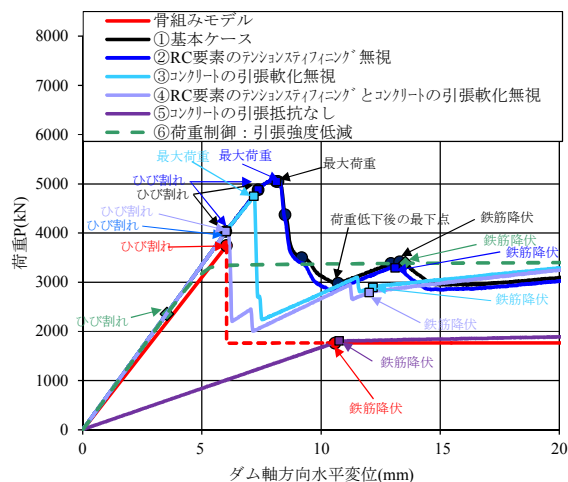


図-10 P-δ 曲線