

ダムピアの耐震性評価に用いる 3 次元非線形有限要素解析モデルの検証

関西電力株式会社 正会員 ○松岡 賢樹
関西電力株式会社 非会員 川嶋 建吾
関西電力株式会社 正会員 有光 剛

1. はじめに

近年頻発する大規模地震に伴い水力発電設備の安全性に対する社会的関心が高まっている。中でもダムは、設備損壊時の第三者影響が大きいため、ダム堤体に加え洪水時などに貯留水を制御するための洪水吐ゲートおよびゲートを支持するダムピアを含めた耐震性の確保が必要である¹⁾。

ダムピアには、建設時の時代背景から丸鋼が使用されていることが多い。また、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特徴がある。さらに、堤体との接合部である基部は、流水を安全に流下させるため、上流側から下流側へ垂れ下がる特徴的な形状（以下、越流形状という）を有している。このような特殊な構造であるために、一般的な梁モデルではダムピアの破壊形態などの実挙動を把握することが困難であり、合理的な耐震性評価・耐震補強設計ができないという課題を抱えている。これに対して、より実挙動に近い評価が可能となる 3 次元ソリッド要素を用いた解析モデル（以下、ソリッドモデルという）をダムピアの耐震性評価に適用する取り組みが進められている²⁾。

本研究では、ダムピアの実構造物を対象として、ソリッドモデルを用いたモデル化を行い、漸増载荷解析により越流形状やダム堤体側の挙動が耐荷力などに与える影響を検討した。

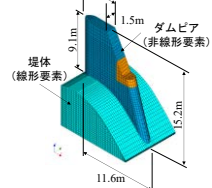
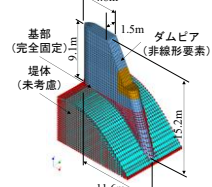
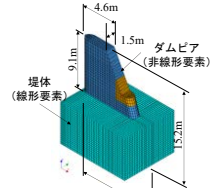
2. 解析条件
2.1 解析モデル

本検討では、実物のダムピアを 3 次元ソリッド要素でモデル化した。対象としたダムピアの越流部天端位置でのダムピア高は 9.1m、ダムピア幅は 1.5m、鉄筋比は 0.04%である。解析には、汎用解析プログラム DIANA10.2 を用いた。

表－1 に解析条件を示す。越流形状とダム堤体側の挙動などの条件が解析結果におよぼす影響を把握するため、それぞれの条件の組合せによる 3 ケースの解析モデルを用いた。なお、ダム堤体側の挙動は、堤体を線形要素によりモデル化することで、ダム堤体の剛性を考慮したモデルとした。また、使用要素はコンクリートをソリッド要素（1 次要素）、鉄筋を BAR 型埋込鉄筋要素とし、鉄筋とコンクリート間は完全付着とした。

2.2 材料特性

表－2 に、解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料物性値を示す。特に記載のない項目においては、過去に実施した調査に基づく実測値を用いた。また、コンクリートの非線形特性は、ひび割れモデルには分散ひび割れモデルである Mackawa-Fukuura Concrete Model を用いた。さらに、コンクリート標準示方書に準拠し、圧縮特性、引張特性ひび割れ面でのせん断伝達特性モデルなどを設定した。

表－1 解析ケースおよび解析モデル			
Case	形状	基部の条件	解析モデル
1	越流形状あり	堤体を線形要素でモデル化	
2	越流形状なし	完全固定	
3		堤体を線形要素でモデル化	

キーワード ダムピア，耐震性評価，3 次元非線形有限要素解析，漸増载荷，耐荷力，
連絡先 〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島 3-6-16 関西電力株式会社 再生可能エネルギー事業本部 T E L 070-2452-3859

表－2 材料物性値

物性値	単位	コンクリート	鉄筋
圧縮強度	N/mm ²	37.167	—
降伏強度	N/mm ²	—	235
引張強度	N/mm ²	3.727※2	380※1

※1：参考文献3）に示される提案式に準拠し設定
※2：JIS G 3112 に規定される値に準拠し設定

2.3 荷重載荷方法

本検討では、ダム軸方向のダムピアの挙動を確認するため、荷重を漸増載荷させた解析を行い、水平震度－変位関係や応力分布を確認した。載荷方法は2段階載荷とし、死荷重および静水压を載荷させた後、ダムピア天端に集中荷重を漸増させた。

3. 解析結果

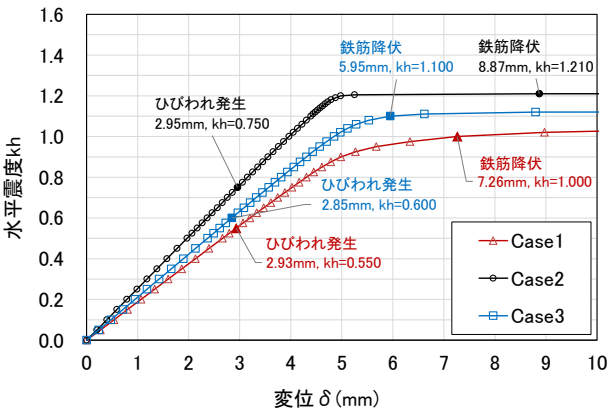
3.1 水平震度－変位関係

図－1 にダムピア天端における水平震度－変位関係を示す。変位 $\delta=5\text{mm}$ 程度までの線形領域における剛性は、Case1 に比べて Case2 の方が大きい。また、Case3 は Case1 に近づく傾向を示した。これは、Case2 ではダムピア基部の下流側へ垂れ下がる形状がないため有効ピア高が短くなっていること、また、基部を完全に固定しておりダム堤体側の挙動の影響を受けておらず剛性が上昇したことが理由であると考えられる。また、耐荷力を線形領域内の最大水平震度と定義した場合、Case1 は $kh=0.9$ 程度、Case3 は $kh=1.0$ 程度であり、耐荷力に到達以降、徐々に非線形挙動を示した。一方、Case2 は $kh=1.2$ 程度であり、耐荷力に到達後、急激に変形が増加する非線形挙動を示した。これは、越流形状がない場合はダム軸方向の曲げによるひび割れが断面全域において急激に広がることで、ひび割れ発生と同時に非線形挙動へ移行したためだと考えられ、越流形状の影響を受けているといえる。

3.2 ダムピア基部における応力分布

表－3 に線形領域（ひび割れ発生前 $kh=0.4$ ）においてダムピア基部（越流部天端高さ）に生じる応力分布および最大応力値を示す。応力分布図より、いずれの解析ケースにおいてもダムピア基部の全断面に応力が生じている。また、ダム軸方向の圧縮と引張の中立軸はほぼ一定であるため、越流形状やダム堤体側の挙動の有無によらず荷重に抵抗する断面は一樣であるといえる。

一方、圧縮と引張の最大応力値を比較すると、Case1, 3, 2 の順で大きい。このことから、越流形状とダム堤



図－1 荷重－変位関係

表－3 ダムピア基部の応力分布および最大応力値

Case	応力分布 (圧縮を赤、引張を青で表示)	最大応力値 (N/mm ²)	
		圧縮	引張
1		2.40	3.09
2		1.62	2.03
3		2.23	2.82

体側の挙動の影響により、基部に生じる鉛直応力が異なっているといえる。

4. まとめ

ダムピアの実構造物を対象にソリッドモデルを用いた漸増載荷解析により越流形状やダム堤体側の挙動が耐荷力などに与える影響を評価した。

- ① ダムピアの剛性や耐荷力には越流形状および堤体剛性が影響していると考えられる。
- ② ダムピアの耐震性評価においてソリッドモデルを用いる場合、越流形状や堤体側の剛性を適切に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説，2005。
- 2) 高木雄介，田中裕，内田諭：ダムピア耐震性評価における3次元非線形解析モデルの比較検討，電力土木，No.406，pp.19-23，2020。
- 3) 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.113-119，2000。