

耐荷力と変形性能に着目したダム門柱の耐震性能照査

藤本 哲生¹・平松 大周²・傅 斌²・藤田 亮一²・福島 康宏³・野谷 正明²

¹正会員 工博 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科（〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1）

²正会員 工修 株式会社エイト日本技術開発 関西支社（〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39）

³正会員 工修 株式会社エイト日本技術開発 中国支社（〒700-8617 岡山市北区津島京町3-1-21）

1. はじめに

我が国では、1995年兵庫県南部地震を契機として土木構造物の大規模地震（レベル2地震動）に対する耐震設計に関する議論が盛んに行われている。ダムの分野においては、国土交通省所管のダムを対象とした「大規模地震に対する耐震性能照査指針（案）・同解説¹⁾」（以下、指針（案）と称す）が2005年3月に試行、さらに経済産業省や農林水産省所管のダムにおいても指針（案）を基にした耐震性能照査マニュアル^{2),3)}が策定され、それらに基づきダム本体やゲート等の関連構造物を対象とした耐震性能照査が行われている。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震による藤沼ダムの決壊や2016年熊本地震による大切畑ダムの取水施設の損壊のように大規模地震によりダムの貯水機能が失われ、下流域に甚大な被害が生じた事例^{4),5)}も報告されている。したがって、新設・既設を問わず、大規模地震に対するダムおよび関連構造物の安全性を確保することが求められている。

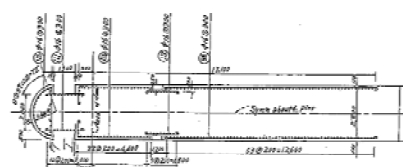
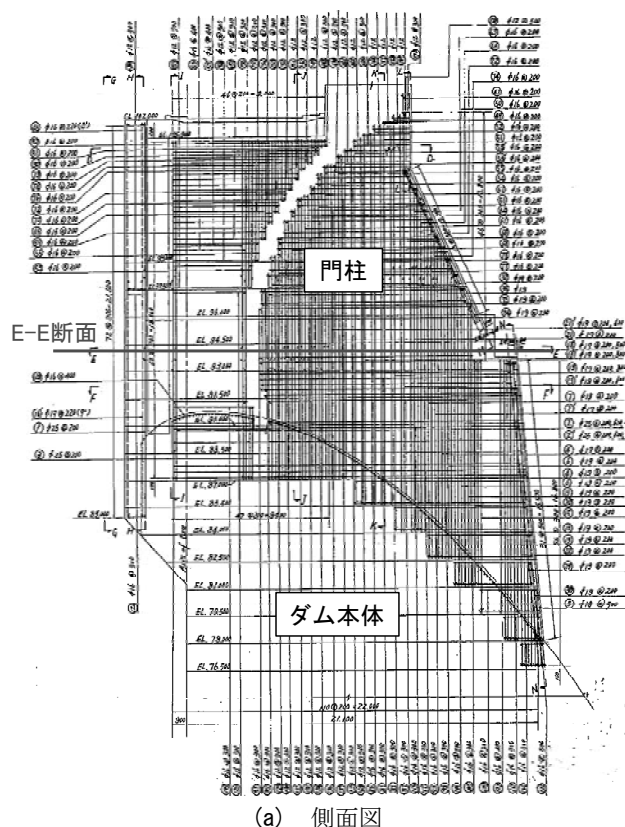
本文では、重力式コンクリートダムの洪水吐に設置された門柱を対象とし、耐荷力と変形性能に着目して大規模地震に対する耐震性能照査を行った事例について報告する。

2. 対象施設の概要

本文で対象としたダムは、1964年に完成した堤高40m、堤頂長453m、発電を目的とした重力式コンクリートダムである。写真-1に、下流面の全景を示す。また、門柱はクレストラジアルゲートの両脇に設置（計13基）されており、高さ16.7m、配筋図は図-1に示すとおりである。なお、ダムの門柱は、天端通路橋



写真-1 対象施設の下流面（全景）



(b) E-E断面図
図-1 門柱の配筋図

の上部構造とゲートの両方を支持していること、断面に対する鉄筋比が少ないこと、基部標高が上下流方向に変化することが特徴として挙げられ、これらが一般的な橋脚とは異なっている。

3. ダム門柱の耐震性能照査

(1) 検討概要

図-2に、本検討のフロー図を示す。まず、大規模地震時に求められる門柱の性能とそれに対する限界状態を設定した。次に、設計・施工等の資料を基に構造諸元を整理し、3次元FEMモデル(ダム本体+基礎岩盤)を用いて線形動的解析により門柱の応答を確認した。その際、解析の精度を高めるために常時微動観測により求めた門柱の固有周期を基にコンクリートの弾性係数を同定した。線形動的解析の結果、門柱基部の引張応力が許容値を超過したため、2次元FEMモデル(ダム本体の1ブロック分)を用いて材料の非線形性を考慮した動的解析により門柱の損傷の程度等を確認した。

なお、本検討に用いた入力地震動は、指針(案)に示される照査用下限加速度応答スペクトルに適合する模擬地震波(継続時間24秒)である。図-3に、入力地震動の加速度応答スペクトルおよび時刻歴波形を示す。以下に、各検討の内容について詳述する。

(2) 目標耐震性能、限界状態の設定

大規模地震時に門柱に求められる性能は、文献6)よりダムの貯水を下流に流出させないこと(貯水機能の維持)、地震後に水位を低下、あるいは低下させた水位の上昇を規制するためにゲートを開くことができること(ゲートの開閉機能の維持)とした。また、限界状態は表-1に示す通りとし、門柱本体および門柱の変形量がゲートに与える影響の観点から同表に示す照査項目を設定した。

(3) 常時微動観測

門柱の耐震性能照査に先立ち、門柱の固有周期を

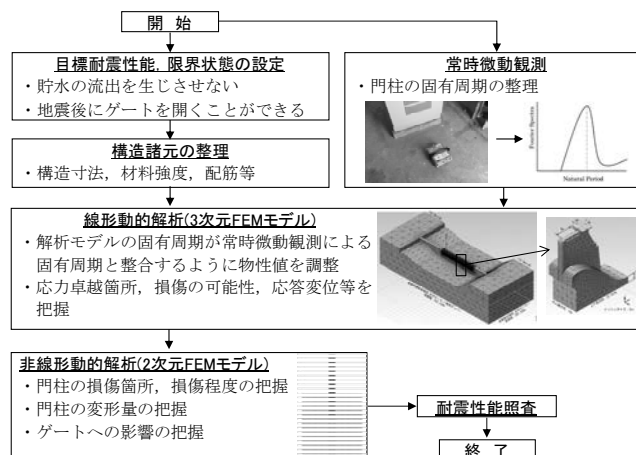
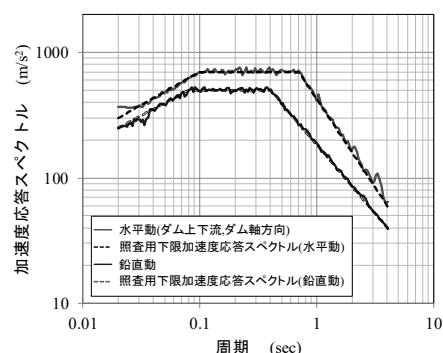
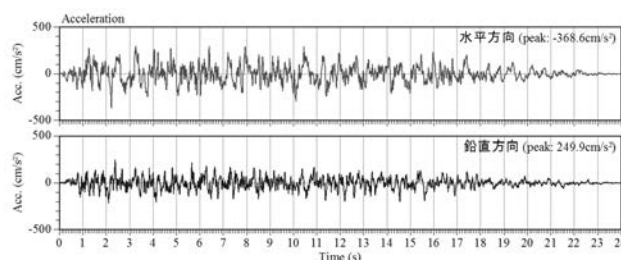


図-2 検討フロー



(a) 加速度応答スペクトル



(b) 加速度時刻歴波形

図-3 入力地震動

把握するために加速度計(白山工業社製、JU410)を用いて常時微動観測を実施した。観測位置は門柱天端およびダム下流の硬質岩盤上とし、100Hzサンプリングで15分間の同時観測とした。観測結果より、比

表-1 要求性能と限界状態、照査項目

要求性能		限界状態	照査対象	照査項目
貯水機能の維持	耐荷力を保持する。	鉄筋の降伏やコンクリートのひび割れが生じて、耐荷力を保持できる応答範囲に留まる状態。	門柱本体	【曲げ・圧縮・せん断破壊に対する照査】 発生ひずみ(変位) < 耐荷力を保持できる限界のひずみ(変位)
		門柱の移動量がゲートと干渉しない範囲に留まる状態。もしくは、門柱とゲートとが干渉する場合においても、ゲートの安定性が保たれる状態。	門柱の変形がゲートに与える影響	【門柱とゲートとの干渉の照査】 門柱の応答変位 ≤ 門柱とラジアルゲートとの遊間長(10mm) 【落橋の照査】 門柱の応答変位×2 ≤ 桁かかり長(500mm)
ゲートの開閉機能の維持	門柱の損傷は許容するが、地震後にゲートを開くことができる。	門柱が損傷しても、その変形がゲートとの遊間長に収まり、ゲート開けることができる状態。		【ゲート操作性の照査】 門柱の残留変位 ≤ 門柱とラジアルゲートとの遊間長(10mm) 【門柱の使用性の照査】※h: 門柱の高さ(16.7m) 門柱の残留変位 ≤ 許容残留変位(h/100=167mm)

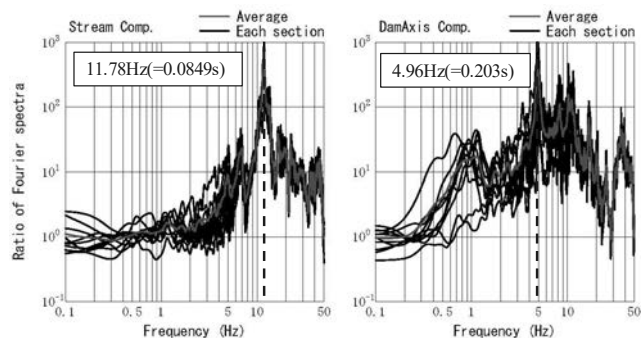
較的擾乱の少ない約40秒の区間を10個選定し、それを基にフーリエスペクトル、H/Vスペクトル比、さらに、図-4に示す下流岩盤に対する門柱天端のフーリエスペクトルの比を求めた。その結果、上下流方向成分では11.78Hz (=0.0849s)，ダム軸方向成分では4.92Hz (=0.203s)が卓越していたことから、これらを後続の固有値解析における目標値とした。

(4) 3次元FEMモデルによる線形動的解析

線形動的解析の解析モデルは、ダム本体(全体)と基礎岩盤を対象とした3次元FEMモデルとした。表-2に、ダムコンクリートの材料物性値を示す。ここで、同表中の弾性係数(同定後)は固有値解析によるダム軸方向の固有周期が常時微動観測による固有周期と整合するように初期値(26,260N/mm²)から低減したものである。また、線形動的解析の前には自重、静水圧、堆砂圧、氷圧を考慮した線形静的解析を行い、結果の重ね合わせを行った。なお、線形動的解析では図-3に示した地震動を入力し、地震時動水圧はWestergaard⁷⁾の式を基に付加質量として考慮した。図-5に、線形動的解析による最大主応力分布図を示す。堤体の最大主応力は門柱のダム軸方向への応答の影響により門柱基部で大きくなる傾向がみられ、その最大値(8.05N/mm²)は引張強度を大きく超過することがわかった。したがって、門柱基部において引張応力に起因する損傷が生じる可能性があることから材料の非線形性を考慮した動的解析により損傷の程度を確認することとした。

(5) 2次元FEMモデルによる非線形動的解析

非線形動的解析の解析モデルは、解析の精度とコストの観点から図-6に示すように堤体の1ブロック分を対象とした2次元FEMモデルとした。なお、このモデルはRC要素と無筋要素を重ね合わせて用い



(a) 上下流方向成分 (b) ダム軸方向成分

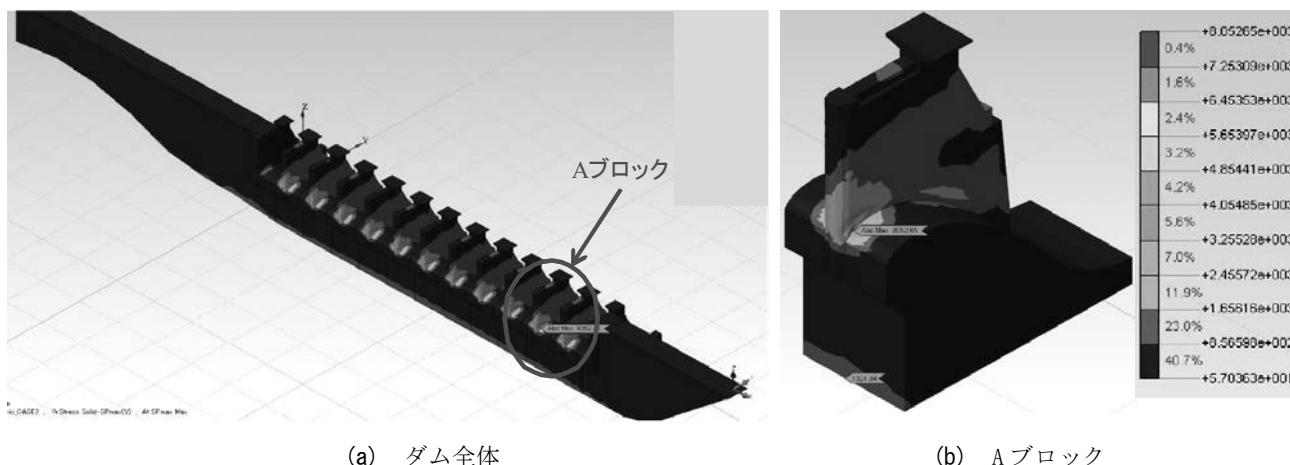
図-4 常時微動観測によるフーリエスペクトル比 (門柱天端/下流岩盤)

表-2 ダムコンクリートの材料物性値

単位体積重量	γ (kN/m ³)	22.9
圧縮強度	σ_c (N/mm ²)	19.4
引張強度	σ_t (N/mm ²)	2.33
弾性係数(初期値)	E_0 (N/mm ²)	26,260
弾性係数(同定後)	E (N/mm ²)	23,000
ポアソン比	ν (-)	0.126
減衰定数	h (%)	10

ることで部材の奥行きや鉄筋の偏りを考慮している。また、材料物性値は表-2に示した値を基本とし、コンクリートの非線形特性は文献8)のモデル、減衰定数は文献9)を基に無筋要素を5%、RC要素を2%とした。なお、門柱の耐荷力の照査は各要素に発生するひずみに着目し、引張ひずみは3%、圧縮ひずみは1%、せん断ひずみは2%をそれぞれ終局状態を表すひずみとした。

図-7に、プッシュオーバー解析(変位制御)によって得られる門柱基部(図-1, E-E断面)の荷重と変位の関係を示す。なお、解析では門柱頂部にダム軸方向の強制変位(0.1cm/STEP)を与えている。水平力は水



(a) ダム全体

(b) Aブロック

図-5 線形動的解析による最大主応力分布

平変位が1.8cm程度のときに最大値7270kNを示し、その後は最大値の78%程度(5700kN)まで低下している。このような荷重と変位の関係は低鉄筋RC構造にみられる挙動であり、ひび割れ荷重よりも降伏荷重の方が小さいときに生じるものである。このような構造に対して地震動などの荷重を作用させると、解析的に耐力低下後の軟化挙動を表現することが難しい場合や計算が不安定になることがある。そこで、図-7に示すように、荷重制御による荷重と変位の関係が変位制御による耐力低下後の荷重と変位の関係と同じになるように、門柱基部のコンクリートの引張強度を1/2に低減した。

図-8に、非線形動的解析により得られるひび割れ分布図、鉄筋降伏分布図、引張ひずみ分布図を示す。門柱は段落し部で引張による軽微なひび割れや鉄筋降伏が生じるものの、引張ひずみは最大でも0.63%であり終局状態には至らないことから大規模地震に対して耐荷力は保持されると判定した。また、ゲート上端における最大応答変位は19.6mmであり、門柱とゲートとの遊間長(10mm)を超過するため地震時に接触する可能性があるが、残留変位は0.6mmであることから地震後のゲートの開閉操作は可能であると判定した。一方、天端の最大応答変位は28.1mmであり、その2倍の値(56.2mm)は桁かかり長よりも小さいことから天端橋梁は落橋しないと判定した。

4. おわりに

本文では、重力式コンクリートダム洪水吐に設置された門柱を対象とし、耐荷力と変形性能に着目して大規模地震に対する耐震性能照査を行った事例を報告した。今後も照査事例を蓄積し、ダムの維持管理や補強方法の開発に役立てたい。

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, 2005.3.
- 2) 経済産業省原子力安全・保安院: 水力発電設備の耐震性能照査マニュアル, 2012.2.
- 3) 農林水産省農村振興局: 国営造成農業用ダム耐震性能照査マニュアル, 2012.8.
- 4) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会: 藤沼湖の決壊原因調査報告書, 2014.1.
- 5) 藤本ら: 平成28年(2016年)熊本地震による農業用ダムの被害調査報告, 平成28年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.6-1, 2016.8.
- 6) 三石ら: 大規模地震に対するダム耐震性能照査について, ダム技術, No.274, pp.6-35, 2009.7.

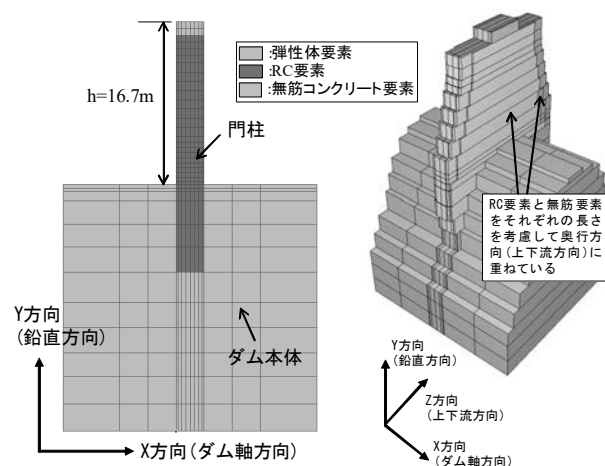


図-6 非線形動的解析モデル(2次元 FEM モデル)

※右図: モデル奥行方向の設定

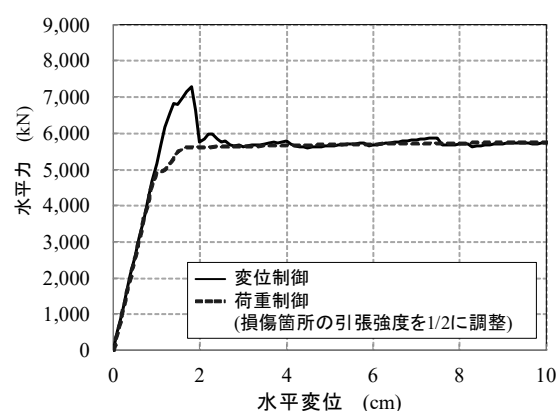
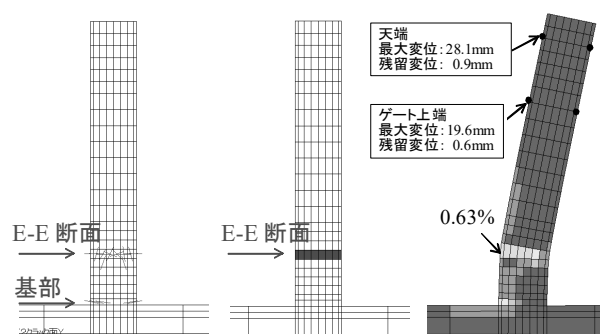


図-7 プッシュオーバー解析による E-E 断面の荷重と変位の関係



(a) ひび割れ分布 (b) 鉄筋降伏分布 (c) 引張ひずみ分布
図-8 非線形動的解析結果

- 7) Westergaard, H.M.: Water Pressure on Dams during Earthquakes, Transactions, ASCE, Vol.98, 418-433. 1933.
- 8) Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H., Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press. 2003.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2017.11.