

地震後のゲートの機能保持に着目した ダム門柱の耐震性能照査

藤本 哲生¹・平松 大周²・傅 斌³・藤田 亮一⁴・福島 康宏⁵・野谷 正明⁶

¹ 正会員 大阪工業大学特任准教授 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)
E-mail: tetsuo.fujimoto@oit.ac.jp

² 正会員 株式会社エイト日本技術開発 関西支社 防災保全部 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北 1-12-39)
E-mail: hiramatsu-hi@ej-hds.co.jp

³ 非会員 株式会社エイト日本技術開発 関西支社 防災保全部 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北 1-12-39)
E-mail: fu-bi@ej-hds.co.jp

⁴ 正会員 株式会社エイト日本技術開発 関西支社 防災保全部 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北 1-12-39)
E-mail: fujita-ryo@ej-hds.co.jp

⁵ 正会員 株式会社エイト日本技術開発 中国支社 防災保全部 (〒700-8617 岡山市北区津島京町 3-1-21)
E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

⁶ 非会員 株式会社エイト日本技術開発 関西支社 防災保全部 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北 1-12-39)
E-mail: notani-ma@ej-hds.co.jp

我が国のダムの分野では 1995 年兵庫県南部地震を契機としてダム本体や関連構造物の大規模地震に対する耐震性能照査が行われている。このうち、ゲートや門柱等の関連構造物については FEM モデルを用いた動的解析等により地震時応答を考慮して耐震性能照査を行う方法が試行されている。本文では、重力式コンクリートダムの門柱を 3 次元及び 2 次元 FEM によりモデル化して動的解析を行い、その結果をもとに大規模地震に対する耐震性能照査を行った結果を報告する。なお、門柱は堤頂橋梁のほかに洪水吐ゲートも支持していることから、RC 断面の耐力照査のほかに地震後のゲートの開閉機能が保持されるかという点に着目し、門柱の変形量も照査した。また、門柱の耐震余裕度を確認する試みとして、入力地震動の振幅を増大したときの損傷状態を確認した。

Key Words: dam gate pier, seismic performance evaluation, finite element method, dynamic analysis

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ついての議論が盛んに行われている。ダムの分野においても、「土木構造物の耐震基準等に関する提言(第三次)」¹⁾を踏まえ、大規模地震に対するダム本体や関連構造物の要求性能や照査の方法をまとめた「大規模地震に対する耐震性能照査指針(案)・同解説」²⁾(以下、指針(案)と称す)が 2005 年に策定され、国土交通省所管のダムで試行されている。さらに、経済産業省や農林水産省においても指針(案)を基にした耐震性能照査マニュアル³⁾⁴⁾が 2012年策定され、それらに基づき所管のダム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⁵⁾や 2016 年熊本地震による大切畑ダムの取水施設の損壊⁶⁾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も報告されている。したがって、新設・既設にかかわらず、大規模地震に対するダム及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。

このような背景のもと、本文では発電を目的とした重力式コンクリートダムの堤頂部に位置する門柱を対象とし、大規模地震に対する耐震性能照査を行った結果について報告する。その際、門柱は断面積に対して鉄筋量が少ない低鉄筋 RC 構造であることから、その耐荷力を詳細に検討した。また、門柱は堤頂橋梁を支持するとともに洪水吐のゲートを支持している。したがって、大規模地震後にはダム本体の安全性確保や点検のためにゲート

を開けて貯水位を低下させる必要があることから、地震後にゲートの開閉機能が保持されるかという点に着目し、門柱の変形量についても照査した。

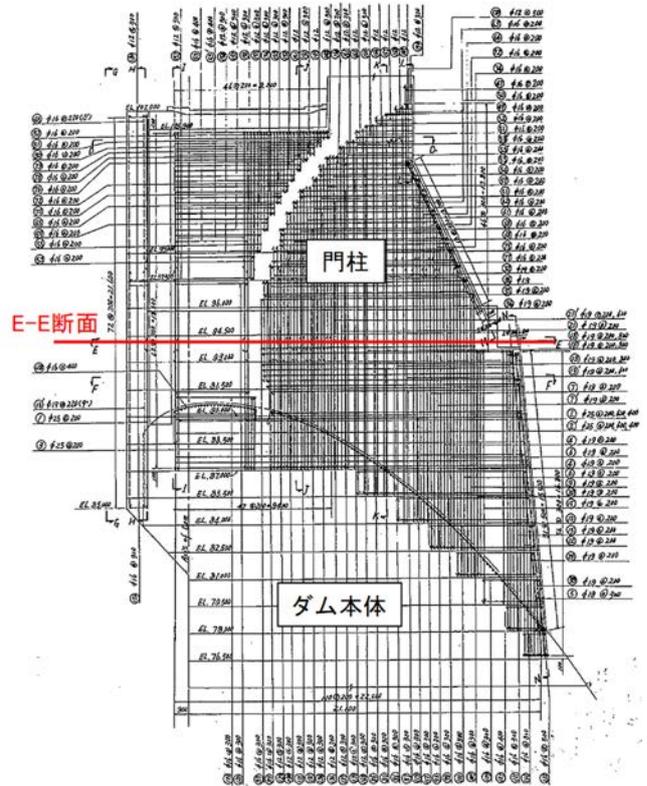
それを用いて材料の非線形性を考慮した動的解析により門柱の損傷の程度等を確認した。

2. 対象施設の概要

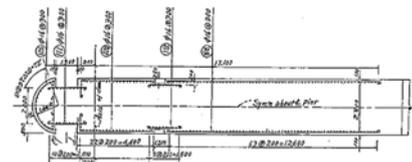
本文で照査の対象としたダムは、1964年に完成した堤高40m、堤頂長453mの重力式コンクリートダムであり、発電を目的としている。また、門柱は、クレストラジアルゲートの両脇に設置(計13基)されており、ダム軸における高さは16.7m、配筋図は図-1に示すとおりである。なお、当該門柱の特徴として、堤頂部の通路橋の上部構造と洪水吐のラジアルゲートの両方を支持していること、断面積に対して鉄筋量が少ないこと、門柱基部の標高が上下流方向に変化することが挙げられる。

3. 門柱の大規模地震に対する耐震性能照査

図-2に、本文で述べる門柱の耐震性能照査の流れを示す。まず、大規模地震時に門柱に求められる耐震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、それを踏まえて物性値を設定した。続いて、堤体と基礎地盤を3次元FEMでモデル化し、それを用いて線形動的解析により門柱の地震時応答を確認した。その際、解析の精度向上を図る高ために、常時微動観測により求めた門柱の固有周期を基に堤体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、堤体の1ブロック分を2次元FEMモデルでモデル化し、



(a) 側面図



(b) E-E断面図(段落し部)

図-1 門柱の配筋図

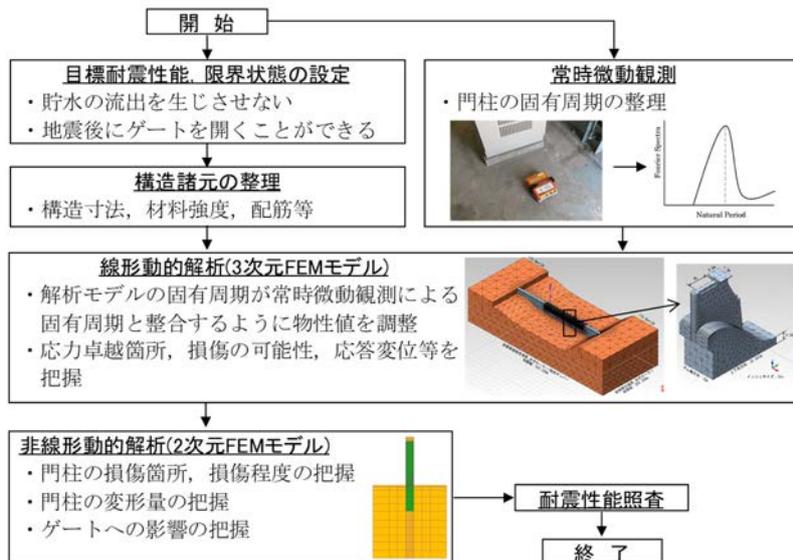


図-2 本文で述べる門柱の耐震性能照査の流れ

なお、本文で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²⁾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及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。

(1) 目標耐震性能、限界状態の設定

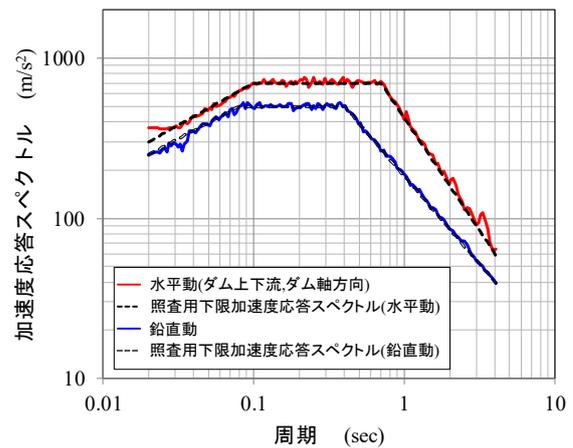
大規模地震時に門柱に求められる耐震性能は、文献7)より貯水機能の維持(ダムの貯水を下流に流出させないこと)、ゲートの開閉機能の維持(地震後に水位を低下あるいは低下させた水位の上昇を規制するためにゲートを開くことができること)とした。また、限界状態は表-1に示す通りとし、門柱本体及び門柱の変形量がゲートに与える影響の観点から同表に示す照査項目を設定した。

(2) 常時微動観測による門柱の固有周期の把握

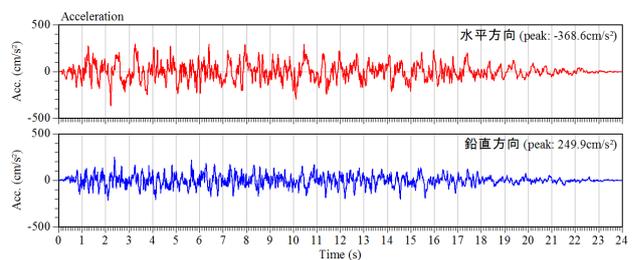
門柱の耐震性能照査に先立ち、門柱の固有周期を把握するために加速度計(白山工業社製、JU410)を用いて常時微動観測を実施した。観測位置は門柱天端及びダム下流の硬質岩盤上とし、100Hzサンプリングで15分間の同時観測を行った。観測結果より、比較的擾乱の少ない約40秒の区間を10個選定し、それを基にそれぞれのフーリエスペクトル、さらに図-4に示す下流岩盤に対する門柱天端のフーリエスペクトルの比を求めた。その結果、図中に赤線で示す10個の区間の平均では、上下流方向成分は11.78Hz(=0.0849s)、ダム軸方向成分は4.92Hz(=0.203s)が卓越していることが明らかになった。よって、このうちダム軸方向成分の値を後述する門柱の固有値解析における目標値とした。

(3) 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、堤体全体(ダム本体+門柱)と基礎岩盤をソリッド要素でモデル化した3次元FEMモデルとした。なお、線形動的解析では、堤体コンクリートは門柱を含めて無筋コンクリートとしてモデル化した。表-2に、堤体コンクリートの材料物性値を示

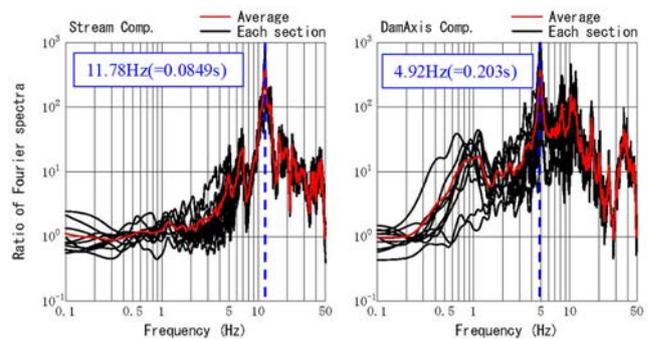


(a) 加速度応答スペクトル



(b) 加速度時刻歴波形

図-3 入力地震動



(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-1 要求性能と限界状態、照査項目(文献7)を参考として作成)

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、ゲートを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)

す。ここで、同表中の弾性係数(同定後)は、**図-5**に示す堤体の1ブロック分(最大断面、ダム軸方向に15m幅)の解析モデルを用いた固有値解析結果と前述した常時微動観測結果のダム軸方向の固有周期が概ね一致するように弾性係数(初期値)から低減して設定したものである。また、線形動的解析の前には自重、常時満水位における静水圧、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 Westergaard の式⁹⁾を基に付加質量として考慮した。

図-6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結果となった。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。

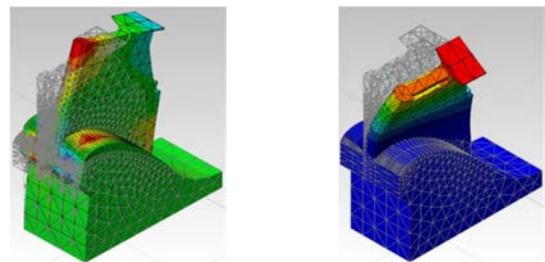
(4) 2次元 FEM モデルによる非線形動的解析

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-7**に示すように堤体の1ブロック分(最大断面)を対象とした2次元 FEM モデルとした。このモデルでは、ダム本体を弾性体要素、門柱を RC 要素(鉄筋:SR235)と無筋要素を重ね合わせたモデルとすることにより部材の奥行きや鉄筋の偏りを考慮している。また、堤体コンクリートの材料物性値は**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 Mackawa⁹⁾のモデル、減衰定数は道路橋示方書¹⁰⁾を基に無筋要素を5%、RC要素を2%とした。なお、門柱の損傷判定は各要素に発生するひずみに着目して行うこととし、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-8に、2次元 FEM モデルを用いたプッシュオーバー解析(変位制御)により得られる門柱基部(**図-1**, E-E断面)の

表-2 堤体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



(a) 上下流方向(0.091s) (b) ダム軸方向(0.201s)
図-5 固有値解析による門柱の主要モード図(同定後)

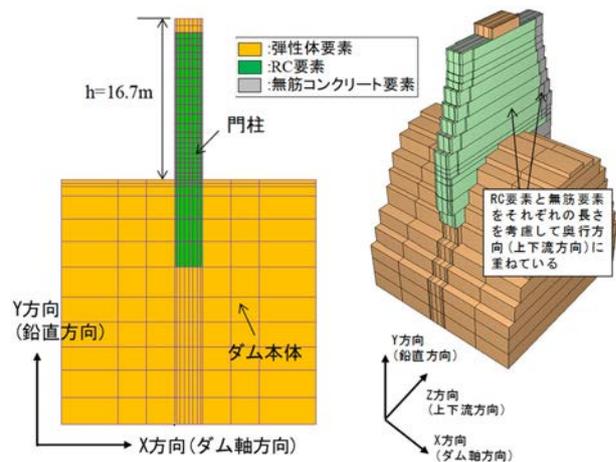
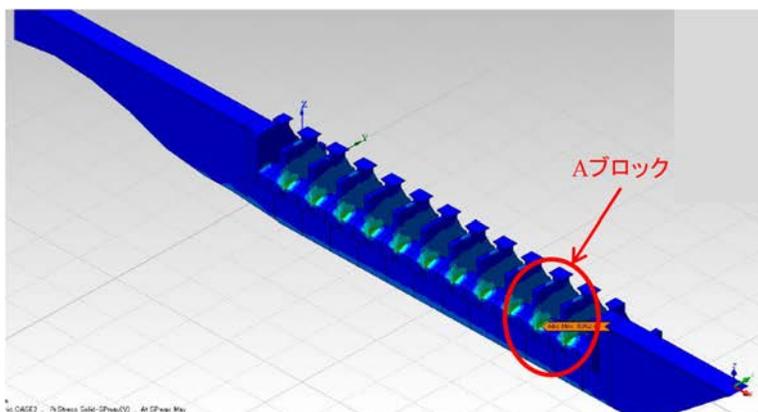
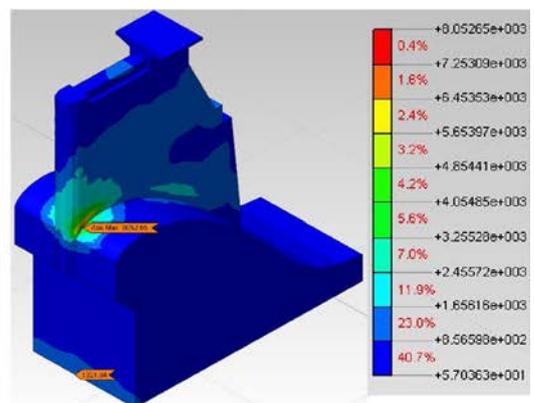


図-7 非線形動的解析モデル(2次元 FEM モデル)

※右図：モデル奥行き方向の設定



(a) 堤体全体



(b) Aブロック

図-6 線形動的解析による最大主応力分布

荷重と変位の関係を示す。なお、解析では門柱天端にダム軸方向の強制変位(0.1cm/STEP)を与えた。水平力は水平変位が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。このようなせん断破壊先行型の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-8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-9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(E-E断面)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。したがって、大規模地震時にも門柱の耐力は保持されると判断した。また、門柱の変形量に着目すると、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を超過することから地震時に門柱とゲートが接触する可能性がある。しかし、同位置における残留変位は0.6mmであることから地震後にもゲートの開閉機能は機能は保持され、ゲートの操作は可能であると判断した。なお、門柱天端(堤頂橋梁の支承部)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500mmよりも小さいことから堤頂橋梁は地震時にも落橋しないと判断した。

以上の結果より、本文で照査の対象とした門柱は、設定した入力地震動が作用した場合でも貯水機能及びゲートの開閉機能を維持できることから耐震性能を有していると判断した。

4. 門柱の耐震余裕度の確認

前述したように、本文で対象とした門柱は、設定した入力地震動が作用した場合でも所定の耐震性能を有していることが確認できた。本章では、門柱が保有している耐震安全性の余裕度を確認する試みとして、門柱が破壊するときの入力地震動の規模を推定(ストレステスト)した。具体的には、前述した2次元FEMモデルを用い、振幅を増大させた入力地震動を対象として非線形動的解析を行い、門柱が終局状態に至るかどうかを確認した。その際、門柱の変形量も併せて確認した。

表-3に、入力地震動(図-3)に対する振幅増大率と門柱の損傷程度との関係を示す。入力地震動の加速度振幅を2倍とした場合、門柱は終局状態には至らないものの段落

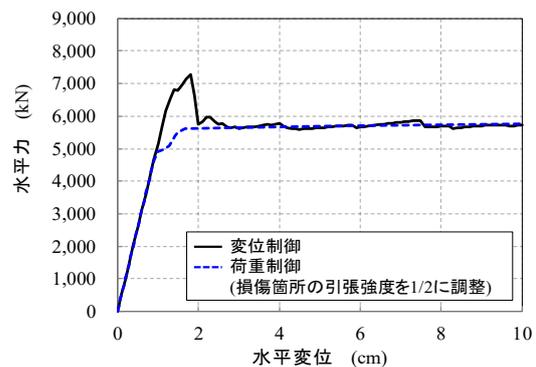


図-8 プッシュオーバー解析によるE-E断面の荷重と変位の関係

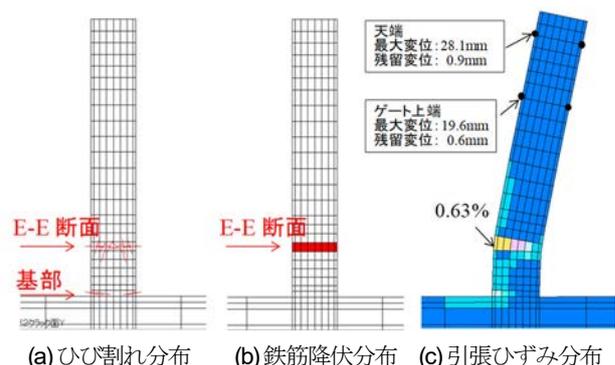


図-9 非線形動的解析結果

表-3 ストレステスト結果集計表

入力地震動*に対する 振幅増大率 (倍)	水平方向 最大加速度 (gal)	解析結果	
		最大引張ひずみ (%) ※照査基準値: 3.0%	最大応答変位 (mm) ※照査基準値: 10mm
1.0	368.6	0.63	19.6
2.0	737.2	1.98	68.7
3.0	1105.8	3.45(NG)	160.1

※入力地震動: 指針(案)に示される照査用下限加速度応答スペクトル適合波(図-3)

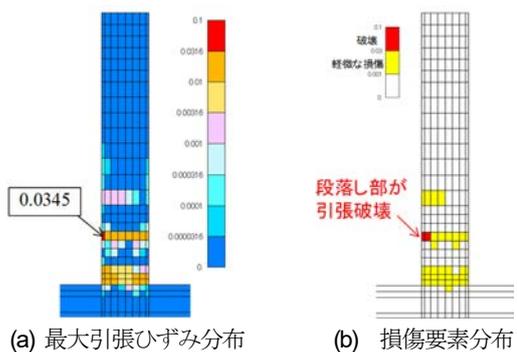


図-10 門柱破壊時の損傷状態(振幅増大率3.0倍)

し位置の端部要素の引張ひずみが2%程度まで増大する。また、加速度振幅を3倍とした場合、図-10に示すように段落し部の外縁部において最大引張ひずみが破壊ひずみである3%を超過し、終局状態に至る。したがって、門柱が破壊するときの入力地震動の規模は、図-3に示した照査用下限加速度応答スペクトル適合波のおよそ2.0倍(最大加速度737gal)であると推定した。

5. おわりに

本文では、重力式コンクリートダムの堤頂部に位置する門柱を3次元及び2次元FEMでモデル化し、大規模地震を対象として動的解析を行い、門柱の耐力照査や地震後のゲートの開閉機能の保持に着目して門柱の変形量を照査した結果を述べた。

今後もダムや関連構造物の照査事例を蓄積し、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) 土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する提言(第三次), 2000.6.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.

- 5) 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の書, 2014.1.
- 6) 原忠, ハザリカ ヘマンタ, 黒田 修一, 野谷 正明, 藤本 哲生, 栗林 健太郎, 仲村 賢人, 西村謙吾: 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.
- 7) 三石 真也, 島本 和仁: 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.
- 8) Westergaard, H.M.: Water Pressure on Dams during Earthquakes, Transactions, ASCE, Vol.98, 418-433. 1933.
- 9) Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H., Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press. 2003.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2017.11.

(Received ????, ????)

(Accepted ????, ????)

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF DAM GATE PIERS FOCUSED ON MAINTAINING THE FUNCTION OF THE GATE AFTER THE EARTHQUAKE

Tetsuo FUJIMOTO, Hironori HIRAMATSU, Bin FU, Ryoichi FUJITA,
Yasuhiro FUKUSHIMA and Masaaki NOTANI

In Japan, seismic performance the dam body and its related facilities are evaluated after the Hyogo-ken Nambu Earthquake which occurred on the 17th of January 1995. Among these, related structures such as gates and gate piers have been evaluated for seismic performance considering the seismic response by dynamic analysis using FEM model. This paper describes the results of dynamic analysis of 3D and 2D FEM models of the piers of gravity concrete dams, and the results of seismic evaluation for large-scale earthquakes based on the results. The characteristic of the dam gate pier is that it supports both superstructure of bridge and dam gate. Therefore, in this study, the bending and shear strengths of reinforced concrete section were appropriately evaluated, and the structural stability was examined. In addition, the deformation amount of the dam gate pier was also checked from the viewpoint of maintenance of the function to open and close the dam gate.