

実挙動観測およびFEM解析を用いた 洪水吐ゲートの動的挙動の把握に関する検討

土居裕幸¹・田中良英²・大坪祐介³・中野歩⁴・中西泰之⁵・有賀義明⁶

¹ 関西電力株式会社 (〒553-0003 大阪市福島区福島 5 丁目 1 番 7 号)

E-mail: doi.hiroyuki@a3.kepco.co.jp

² 関西電力株式会社 (〒553-0003 大阪市福島区福島 5 丁目 1 番 7 号)

E-mail: tanaka.yoshihide@c2.kepco.co.jp

³ 関西電力株式会社 (〒553-0003 大阪市福島区福島 5 丁目 1 番 7 号)

E-mail: otsubo.yuusuke@c2.kepco.co.jp

⁴ 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail: nakanoym@newjec.co.jp

⁵ 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

E-mail: uchidast@newjec.co.jp

⁶ 弘前大学大学院理工学研究科教授 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

E-mail: y-a-arig@cc.hirosaki-u.ac.jp

大規模地震時にダムに要求される耐震性能は貯水機能を維持することであり、洪水吐ゲートはその耐震性能を満足するために重要な関連構造物である。しかしながら、これまでゲートの地震時の動的挙動に関する実測事例はダムと比べて殆どなく、ゲートの耐震性能照査を行う上で、その挙動には不明な点が多い。

そこで本研究では、地震時のゲートの動的挙動に関する基礎データを得ることを目的として、重力式コンクリートダムの洪水吐ゲートにおいて起振実験および地震観測を行った。次に、3次元FEMモデルを用いた固有値解析、地震観測記録の再現解析を行い、再現性の検討を踏まえてゲートの耐震性能照査に適用可能な解析モデルの構築を行った。

Key Words : concrete gravity dam, spillway, seismic safety, earthquake observation, 3D dynamic analysis

1. はじめに

大規模地震時にダムに要求される耐震性能¹⁾は貯水機能を維持することであり、耐震性能照査に当たっては、ダムの貯水機能に係わるダムの関連構造物についても、重大な損傷が生じないことを確認する必要がある。

ダムの主たる関連構造物である洪水吐ゲートには、貯水による静水圧に加えて、大規模地震時には地震荷重としてゲート扉体の慣性力や動水圧が作用する。万一、ゲートがこれらの荷重に耐えられずに損壊するような事態が生じれば、制御できない貯水の流出により、ダム下流への甚大な被害を発生させるおそれがある。そのため、洪水吐ゲートはダムに要求される「貯水機能の維持」という耐震性能を満足するための重要な関連構造物である。

しかしながら、洪水吐ゲートにおいて地震観測を行った事例はダムと比べて殆どなく、洪水吐ゲート

の耐震性能照査を行う上で、地震時の挙動や、地震時に作用する荷重には明らかとなっていない点が多い。特に、鋼材を用いることで高強度の構造物が軽量に作成されているラジアルゲートでは、大規模地震時には慣性力に比べて動水圧による荷重が著しく増加する可能性も考えられるため、地震時に作用する動水圧を明らかにすることが重要である。

本研究は、この動水圧を解析的に明らかにするための基礎的検討として、動水圧を算出する際に用いる解析モデルの確立を目的とした。そのアプローチとして、重力式コンクリートダムの天端に設置されたラジアルゲートにおいて起振実験と地震観測を行い、得られた記録の分析から貯水時のゲートの固有値や地震動の応答特性を把握した。次に、実測値として得られたゲートの固有値や応答加速度の再現性を、固有値解析や地震応答解析により検証することで、ゲートに作用する動水圧を算定する際に用いる解析モデルを確立した。

2. 対象構造物の概要

対象地点は、図-1 および図-2 に示す堤高 35.200m、堤頂長 132.500m の重力式コンクリートダムであり、洪水吐ゲートとして、径間 9.000m、扉高 13.200m のラジアルゲート 3 門を有する。

3. 起振実験および地震観測によるゲートの動的挙動の確認

(1) 起振実験

a) 起振実験の概要

起振実験は、上下流方向およびダム軸方向に対しては起振機を用いた共振加振法を、鉛直方向に対してはゲートを拘束した治具に対するゲート開操作時の破断エネルギーを用いた破断法を行った。起振実験の実施ケースを表-1 に示す。

共振加振法は、図-3 に示すように横主桁および脚柱に 98Kg の起振機を設置し、それぞれの位置で起振周波数を 0.1~0.2Hz 程度の間隔で変化させなが

ら上下流方向、ダム軸方向に加振した。なお、事前実施した数値解析で想定したゲートの固有振動数近傍では、共振周波数を確認するために起振周波数間隔をさらに小さくした。

横主桁位置の起振周波数は、上下流方向で想定される共振周波数を考慮して 7Hz から開始し、0.2Hz 間隔で大きくした。一方、脚柱位置はダム軸方向に対して、8Hz から 0.1Hz 間隔で増加させた。なお、共振周波数付近での起振周波数間隔は、横主桁、脚柱ともに 0.01Hz とした。

破断法は、スキンプレート縦桁に設置した治具と越流部堤体コンクリートに設置した治具との間を図-4 に示す破断ロッドで連結することにより、ゲート開操作時の開度拘束による破断エネルギーを開放して扉体全体を振動させる手法である。

破断ロッドは径の異なる 2 種類 (4mm, 6mm) を用意し、各径 3 本ずつ計 6 回の試験を実施した。

計測機器の配置は図-5 に示すとおりであり、後述する地震観測と同じ配置である。実験期間中の貯水位には大きな変動はなく平均で EL.738.2m であり、常時満水位に対して -1.3m とほぼ満水に近い条件であった。



図-1 対象ダム全景



図-3 起振機の設置状況 図-4 破断ロッドの設置状況

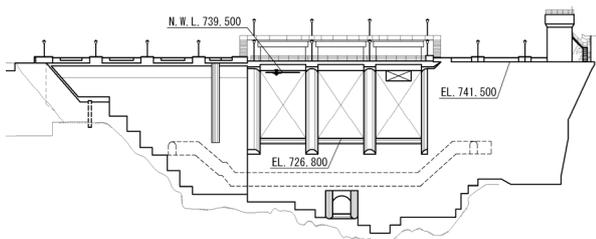


図-2 対象ダム上流面一般図

表-1 起振実験実施ケース

(a)共振加振法

起振位置	起振方向	起振周波数	回数
横主桁	上下流	7.0~23.08Hz	112回
右岸側脚柱	ダム軸	8.0~17.06Hz	128回

(b)破断法

破断ロッド径	回数
4mm	3回
6mm	3回

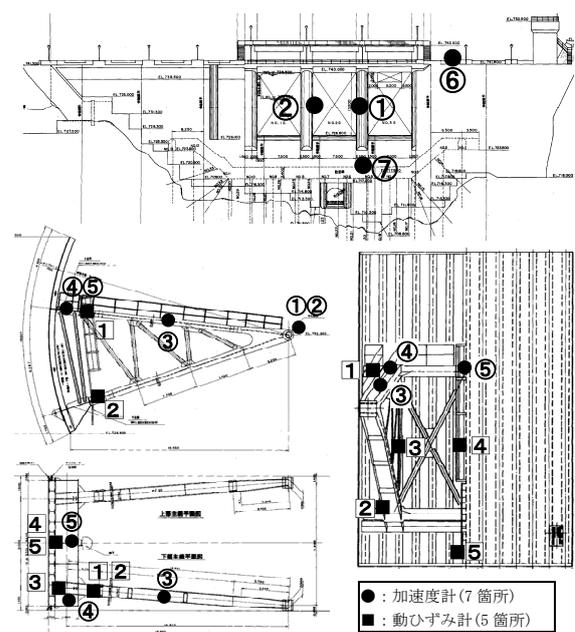


図-5 計測機器配置図

● : 加速度計 (7 箇所)
■ : 動ひずみ計 (5 箇所)

b) 起振実験結果

共振加振法および破断法で得られた加速度時刻歴波形の例を図-6 および図-7 に示す。図-6 は、共振加振法で横主桁に起振機を設置した際の右岸側脚柱中央でのダム軸方向の計測データであり、図-7 は、破断法で 4mm の破断ロッドを用いた実験で得られた横主桁中央での鉛直方向の計測記録である。

以降の分析では、共振加振法に対しては波形が安定している 10 秒間の記録を、破断法に対しては破断前のノイズを除いた区間の記録を用いる。

c) 起振実験結果の分析

共振加振法に対しては、各加振周波数の変位振幅 (cm) を加振力 (N) で除した応答倍率 (cm/N) と加振周波数の関係を共振曲線として整理し、共振周波数を求めた。図-8、図-9 に、ダム軸方向加振時の横主桁中央での計測記録から共振曲線を整理し、共振周波数を算出した結果を示す。図示のとおり、共振周波数は上下流、ダム軸方向でほぼ一致しており、約 7Hz、10Hz、12Hz、14Hz、17Hz であった。この傾向は、上下流方向加振時も同様であった。

破断法に対しては、計測記録のスペクトル解析から卓越振動数を整理した。図-10 に全 6 ケースで得られた計測記録のパワースペクトルを最大値で除して正規化し、平均を整理した結果を示す。図より、鉛直方向には 5Hz 付近に卓越振動数を有することが確認できた。

次に、共振加振法で得られた、それぞれの共振周波数の振動モードを確認するために、各地震計の同時刻の変位振幅および位相差から、変形モードを推定した。推定した変形モード図を図-11 に示す。

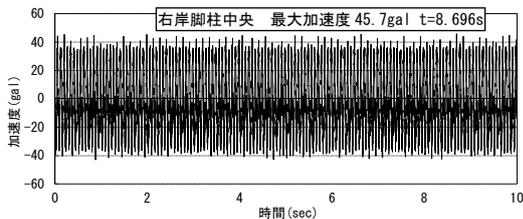


図-6 右岸脚柱中央 ダム軸方向の加速度波形 (ダム軸方向 14Hz 加振時)

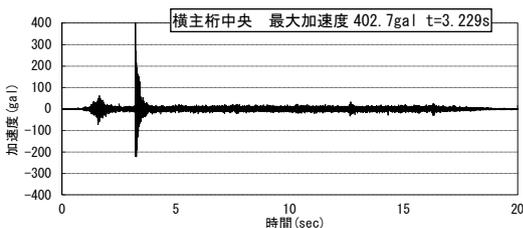


図-7 横主桁中央 上下流方向の加速度波形 (4mm 破断ロッド、1 回目)

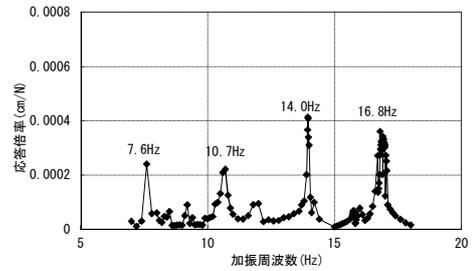


図-8 横主桁中央 上下流方向の共振曲線 (ダム軸方向加振時)

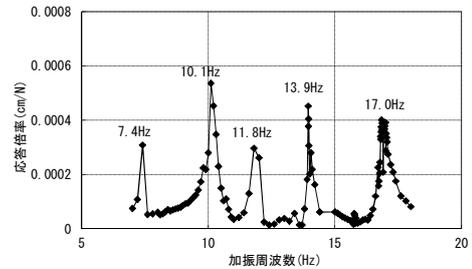


図-9 横主桁中央 ダム軸方向の共振曲線 (ダム軸方向加振時)

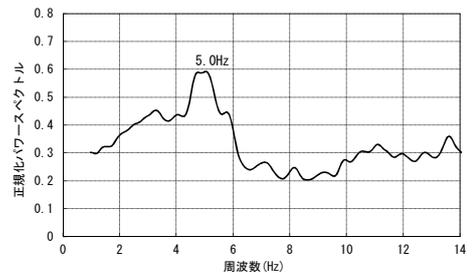


図-10 横主桁中央 鉛直方向の共振曲線

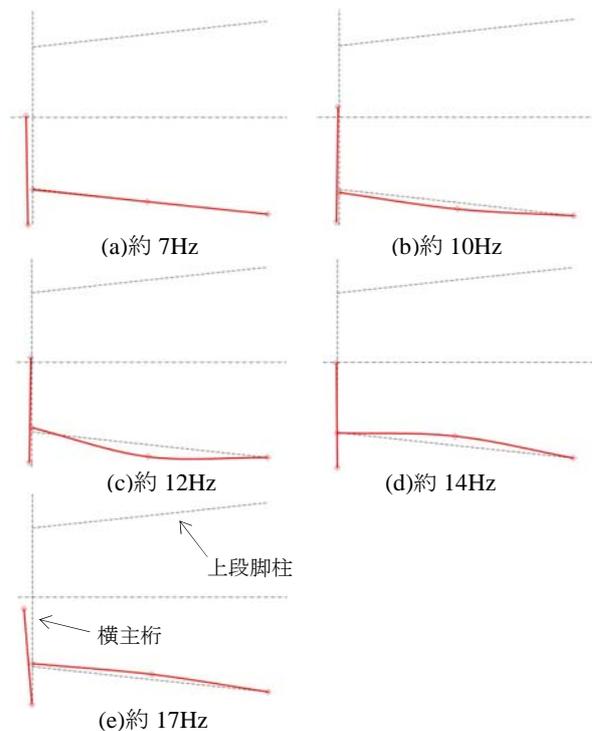


図-11 起振実験から想定した上段脚柱および横主桁の変形モード

図中の波線は、上段脚柱および横主桁の変形前の形状を表しており、実線の変形モードは地震計を設置した右岸側のみを推定している。各々の変形モードの推定時には、他の変形モードによる影響を除去するために、共振周波数周辺の 0.4Hz 区間のみを抽出するバンドパス処理を行った。推定された変形モードは、約 7Hz では横主桁が全体的に変形するモードであり、その他の共振周波数では脚柱に曲げが生じる傾向が確認された。

次に、共振加振法、破断法の計測記録から、ゲートの減衰定数を推定した。上下流方向、ダム軸方向は、共振曲線を用いたハーフパワー法により、鉛直方向は、破断法で得られた加速度時刻歴波形から対数減衰率を読み取り推定した。

推定された減衰定数は、上下流方向 2.2%、ダム軸方向 1.2%、鉛直方向 10~16%であり、上下流、ダム軸方向に比べ、鉛直方向の減衰定数が大きく算出された。この要因として、共振加振法によりゲートに生じる変形が非常に小さいのに対し、破断法ではゲートの動きにより、水密ゴムとコンクリートとの摩擦抵抗などによる減衰が生じたと考えられる。

(2) 地震観測

a) 地震観測の概要

地震観測は、図-5 に配置図を示した観測機器を用いて、2010年10月に開始した。

加速度計は、ゲートに3箇所(③、④、⑤)設置するとともに、ゲートへの入力となる加速度を把握するためのゲートピン位置付近2箇所を含め、ダム本体にも4箇所(①、②、⑥、⑦)設置した。動ひずみ計は、地震時にゲートに作用する主たる荷重である動水圧の影響を把握することを目的として、ゲートの各部材に5箇所設置した。加速度計は上下流、ダム軸、鉛直の3成分を、動ひずみ計は脚柱、縦桁では部材軸方向を、スキンプレートは鉛直方向のひずみを観測した。

b) 地震観測結果

地震観測により、これまでに4回の地震が観測さ

れた。観測された地震の諸元と各観測位置での最大加速度を表-2に示す。各地震時の貯水位は、常時満水位に対して-1~-2mとほぼ満水位である。なお、No.1地震の堤体天端、No.4地震の右岸側ピアの上下流方向は観測機器の異常により欠測している。

表より、ピアに比べてゲート内部の加速度は増幅しており、地震にばらつきはあるものの、4地震での平均の増幅率は、上下流、ダム軸方向で約2倍、鉛直方向で約5.5倍である。

c) 地震観測記録の分析

図-12に、監査廊での加速度が最大となったNo.2地震で観測された、上下流成分の加速度時刻歴波形を示す。図より、左右岸のピアや、ゲート内部の加速度波形に若干の位相差が生じていることが確認できた。

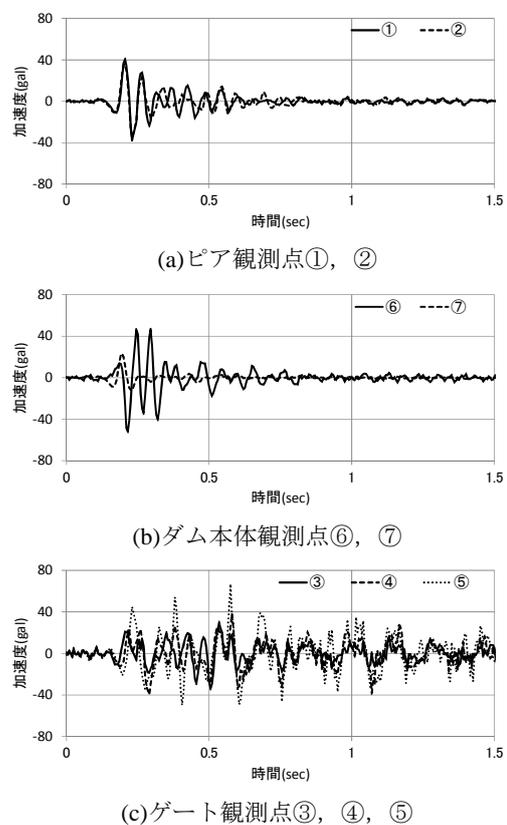


図-12 No.2地震での加速度時刻歴波形

表-2 記録が得られた地震の諸元と最大加速度

地震 No.	No.1			No.2			No.3			No.4		
マグニチュード	3.7			3.1			3.2			5.1		
震央距離	14.7km			12.8km			4.4km			64.9km		
観測位置	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直	上下流	ダム軸	鉛直
①右岸側ピア	22.6	56.0	26.5	43.5	33.1	7.4	20.1	30.8	18.2	10.3	17.4	14.3
②左岸側ピア	17.1	35.7	14.1	35.7	42.3	14.6	21.9	40.6	23.3	欠測	17.1	4.2
③脚柱中央	41.5	99.1	94.8	33.8	170.3	138.6	32.2	160.9	79.6	22.7	50.9	36.7
④横主桁端部	56.6	67.6	102.4	39.6	44.7	47.0	27.2	32.8	41.1	26.4	22.9	25.0
⑤横主桁中央	50.4	82.4	72.3	66.6	59.9	53.9	30.9	37.2	27.0	44.5	49.2	70.2
⑥堤体天端	欠測			51.7	14.3	16.8	25.6	13.9	11.7	11.4	10.8	14.9
⑦監査廊	8.3	10.2	8.3	23.2	9.4	9.9	8.6	7.8	9.0	3.6	3.7	2.7

図-13には、No.2地震の観測記録のフーリエスペクトルを、図-14にはNo.1~No.4地震のゲート/ピア(⑤/①, ⑤/②), ピア/監査廊(①/⑦, ②/⑦)の上下流成分のフーリエスペクトル比を示す。

図-13より、ピアで14Hz, 17Hz, 天端で10Hz、ゲートで7Hz, 9Hz, 14Hz付近に卓越周波数が確認でき、No.2地震のゲートでの卓越振動数は、前述した起振実験で確認された振動数と概ね一致していた。

図-14のフーリエスペクトル比は、地震毎で卓越振動数に差異が見られた。これは、ダムサイトの近傍の小規模の地震の記録であるため、地震動固有の特性が影響している可能性が考えられた。そこで、全記録で平均化した結果を併せて整理した。ゲートとピアの平均スペクトル比からは、起振実験と同様にゲートの1次の固有周波数が7Hz付近にあると考えられた。また、左右岸のピアを比較すると、その卓越周波数に若干の差が認められ、加速度波形に生じた位相差も、この差に起因すると考えられる。

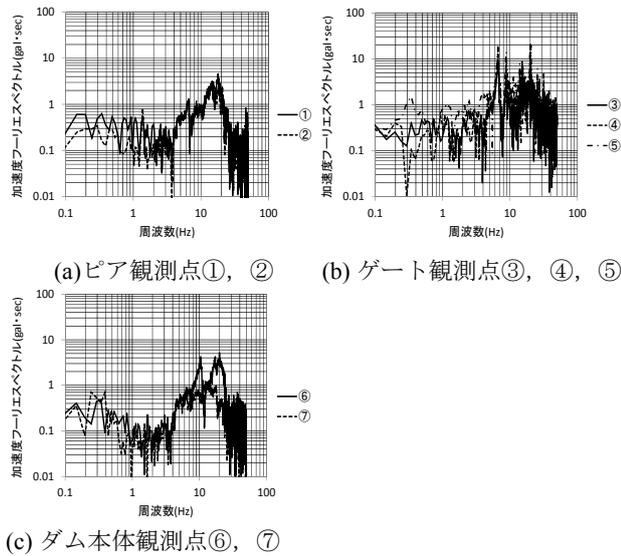


図-13 No.2地震の加速度フーリエスペクトル

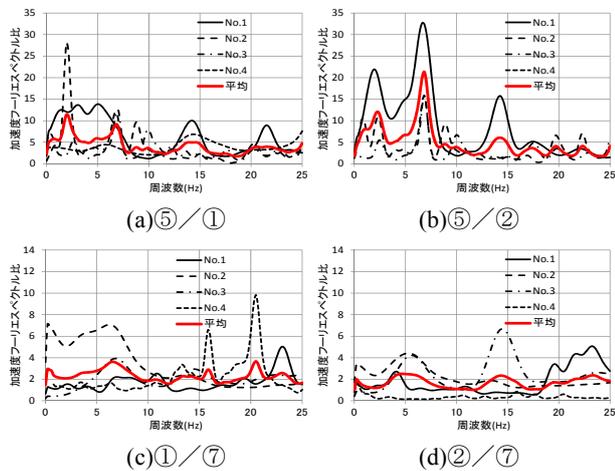


図-14 各地震での加速度フーリエスペクトル比

4. ゲートの動的挙動に対する解析的検討

(1) 固有値解析

a) 解析モデル

固有値解析は、起振実験で確認したゲートの共振周波数を解析的に再現することを目的として行った。本研究で実施した起振実験は貯水条件下での実験であるため、固有値解析においても貯水の影響を考慮する必要がある。そこで、シェル要素を用いて詳細に作成したゲートの3次元FEM解析モデル(図-15)をダム本体の上流面形状を考慮した貯水モデル(図-16(a))と連成させた解析モデル(図-16(b))を作成して固有値解析を行った。

なお、ゲートのモデル化は、全3門のゲートのうち起振実験を行った中央のゲートのみを対象とした。貯水は非圧縮流体要素でモデル化し、貯水位は起振実験時の平均貯水位とした。境界条件は、トラニオンピン位置を並進拘束、ワイヤーロープの上端を完全固定とし、これ以外は自由境界とした。解析には、汎用FEM解析プログラムであるISCEFを用いた。

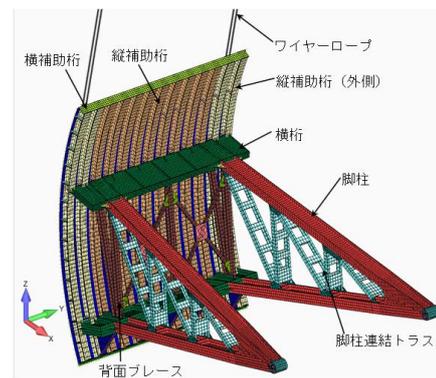
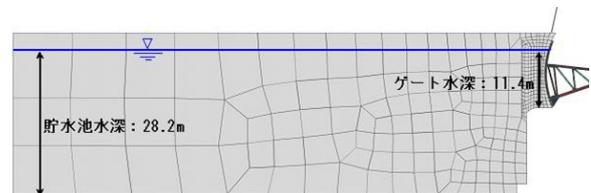
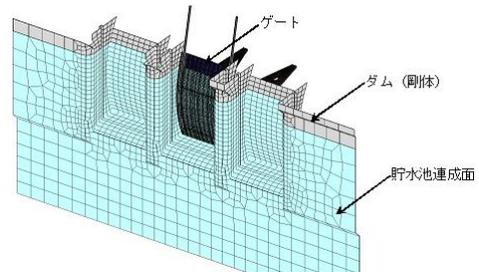


図-15 ゲートの3次元FEM解析モデル (詳細シェルモデル)



(a) 全体図



(b) ゲート付近拡大

図-16 ゲートの固有値解析モデル

b) 固有値解析結果

固有値解析で得られた主要な次数の有効質量比を表-3に、モード図の代表例を図-17に示す。右側の図は、図-11に示した起振実験から想定した変形モード図に併せて、上段脚柱および横主桁のみを図化したものである。表および図に示すとおり、実験での起振周波数以上では、上下流方向では7.3Hz、9.8Hz、10.3Hz、15.0Hz、16.8Hzが、ダム軸、鉛直方向では、12.5Hz、4.9Hz等が主要な次数として算出された。

c) 起振実験結果との比較検討

固有値解析で得られたゲートの固有振動数を、起振実験での共振周波数と比較すると表-4のとおりであり、両者の振動数はほぼ一致した。また、図-17と図-11のモード図にも良好な相関が見られた。

これより、本研究で作成した解析モデルを用いた、貯水の影響を考慮した固有値解析により、起振実験結果を良好に再現できることを確認した。

表-3 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		
		上下流	ダム軸	鉛直
3	4.89	0.8%	0.0%	30.8%
4	7.29	61.9%	0.0%	13.1%
6	9.80	18.0%	0.0%	1.6%
9	12.54	0.0%	0.5%	0.0%
12	14.95	2.0%	0.0%	7.3%
13	16.83	0.3%	0.0%	0.0%

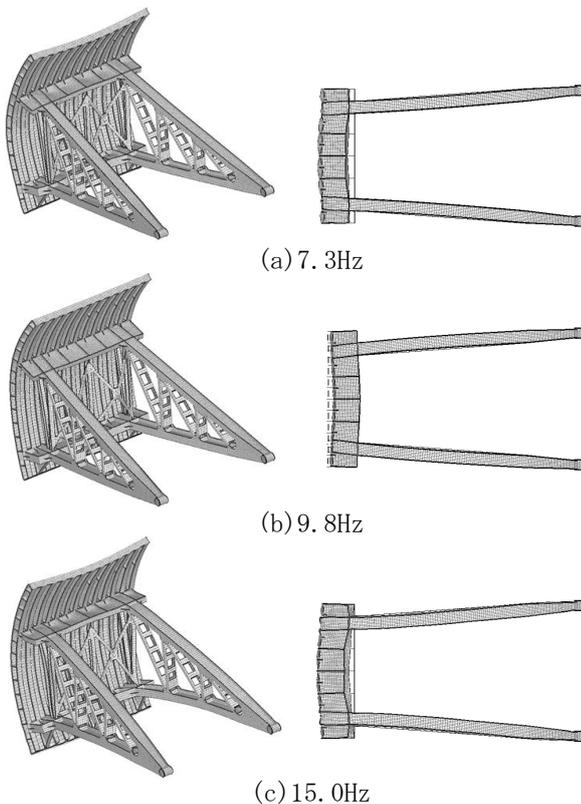


図-17 固有値解析で得られた主要モード図

表-4 起振実験の卓越振動数と固有値解析結果の比較

	卓越振動数(Hz)		
	上下流方向	ダム軸方向	鉛直方向
起振実験	7, 10, 14, 17Hz	7, 10, 12, 14, 17Hz	5Hz
固有値解析	4.9, 7.3, 9.8, 15.0, 16.8Hz	12.5Hz	4.9, 7.3, 9.8, 15.0Hz

注：太字は起振実験と固有値解析で対応する振動数

(2) 再現解析

a) 解析モデル

前節では、貯水との連成を考慮したゲートの固有値解析により、起振実験での挙動が再現できることを確認した。そこで本節では、前項のモデル化の考え方を、ダム本体、基礎岩盤および貯水と連成させたゲートの解析モデルに反映し、地震観測記録の再現解析に用いる解析モデルを作成した。図-18に、再現解析に用いる連成モデルの全体図を示す。

再現解析に用いる連成モデルは、ダム本体や基礎岩盤もモデル化するために複雑となり、固有値解析で用いたゲートの詳細なシェルモデルを組み込むことは現実的ではない。そこで、連成モデルに組み込むための、ゲートモデルの簡略化を検討した。検討したモデルは表-5に示す4モデルで、各モデルに対して空水時および貯水を考慮した固有値解析を行い、詳細シェルモデルの解析結果との比較を行った。その結果、モデル3が詳細シェルモデルの固有値やモードを最も良好に再現したことから、モデル3を再現解析に用いる連成モデルに組み込むこととした。

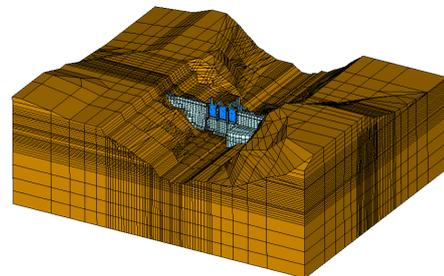


図-18 再現解析に用いる連成解析モデル(貯水非表示)

表-5 再現解析に用いるゲートモデルの検討

	モデル1	モデル2
モデル		
概要	・スキンプレート以外をばり要素でモデル化 ・複数の縦補助桁の集約などの一部簡略化 ・ワイヤーロープ、補脚材、添接板等を省略	・モデル1に対して、ワイヤーロープをモデル化 ・縦補助桁を中立軸位置で全てモデル化
評価	固有値がやや小さく、モードが異なる。	モードは一致するが、固有値がやや小さい。
	モデル3	モデル4
モデル		
概要	・モデル2に対して、横主桁、垂直補脚板等をシェル要素でモデル化	・モデル3に対して、縦補助桁を上下流の2本のばり要素でモデル化
評価	【採用】固有値、モードともに良好に一致。	モードは一致するが、固有値がやや大きい。

注：評価には、詳細シェルモデルとの固有値の比較結果を示す。

b) 再現解析結果

表-2 に示した No. 1~No. 4 地震に対して再現解析を実施した。解析条件を表-6 に示す。ダム本体およびゲートの減衰定数は、監査廊で最大の加速度を観測した No. 2 地震に対して、減衰定数を 2%, 5%, 10% に変化させた検討を行った結果、ダム本体、ゲートともに 10% とした場合に良好な再現性が得られたため 10% を使用した。基礎岩盤は既往の事例を参考に 5% とした²⁾。

表-7 および図-19 に、No. 2 地震の再現解析で得られた上下流方向の最大加速度と時刻歴波形を、観測記録と比較して示す。解析結果がやや小さな値を示しているが、ダム本体に加えて、ゲート内部の加速度応答も概ね観測記録を再現することができた。

図-20 には再現解析で得られたフーリエスペクトル比と観測記録の比較例を示す。図-14 で示したように、各地震の応答特性にはばらつきがあるため、全地震記録のフーリエスペクトル比の平均を用いて再現解析結果と比較した。その結果、実施した再現解析の周波数応答特性は、観測記録の全地震の平均での傾向を良好に再現しており、作成した再現解析モデルの妥当性を確認することができた。

表-6 再現解析に用いた動的物性値

(a) ダム本体	
項目	設定値
密度 $\rho(t/m^3)$	23.05
動弾性係数 $E_d(N/mm^2)$	21,182
動ポアソン比 ν_d	0.2
減衰定数 $h(\%)$	10

(b) ゲート	
項目	設定値
密度 $\rho(t/m^3)$	解析モデルと実ゲートの総重量が等しくなるように設定
動弾性係数 $E_d(N/mm^2)$	206,000
動ポアソン比 ν_d	0.3
減衰定数 $h(\%)$	10

(c) 基礎岩盤	
項目	設定値
密度 $\rho(t/m^3)$	25.79
動弾性係数 $E_d(N/mm^2)$	38,344
動ポアソン比 ν_d	0.292
減衰定数 $h(\%)$	5

表-7 No. 2 地震の上下流方向最大加速度

観測位置	上下流方向最大加速度(gal)	
	観測記録	解析結果
①右岸側ピア	43.5	28.7
②左岸側ピア	35.7	28.0
③脚柱中央	33.8	24.0
④横主桁端部	39.6	28.8
⑤横主桁中央	66.6	65.5
⑥堤体天端	51.7	66.1
⑦監査廊	23.2	22.6

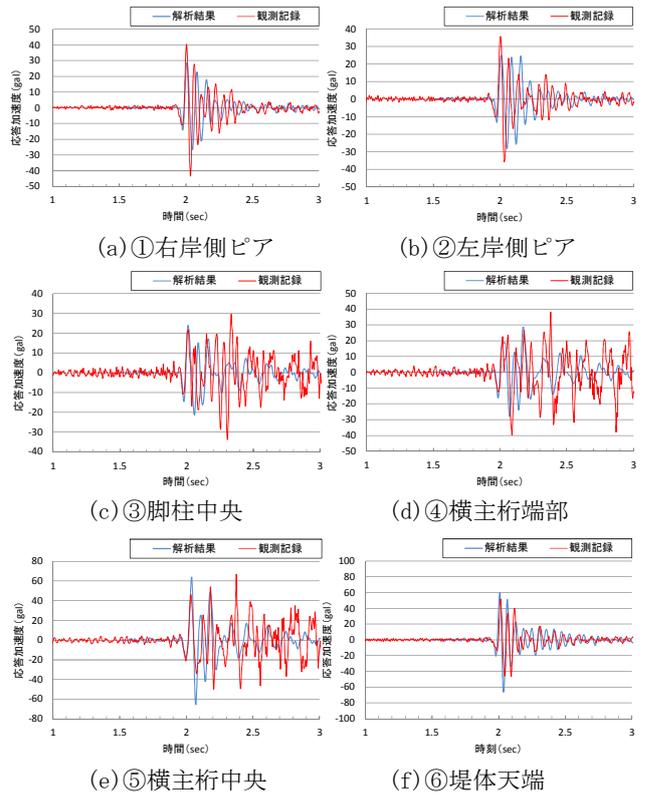


図-19 No. 2 地震の上下流方向加速度時刻歴波形

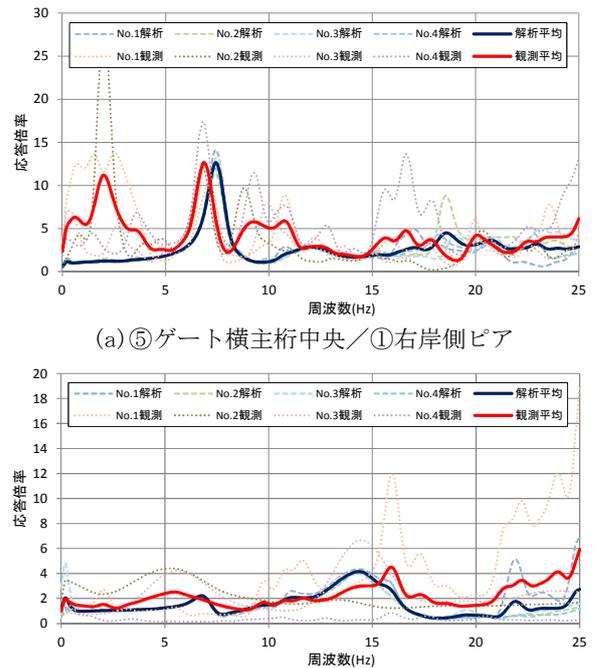


図-20 フーリエスペクトル比の比較

5. 結論

(1) まとめ

本研究では、洪水吐ゲートにおいて起振実験を行うとともに、ダム本体および洪水吐ゲートにおける地震観測を行い、これらの記録の分析から、貯水時

の洪水吐ゲートの動的特性を把握した。

更に、ゲートの耐震性能照査を行う際に必要となる解析モデルの構築を目的として、固有値解析および地震応答解析によりそれらの再現性を検討した。その結果、本研究で提案した解析モデルを用いることにより、ゲートの動的挙動が再現できることを確認した。

(2) 今後の課題

現時点で観測されている地震記録は、地震毎に周波数応答特性にばらつきが見られることから、フリースペクトル比による応答倍率に関しては、全地震記録の平均を用いて評価を行った。今後は、地震観測を継続的に行うことにより観測記録を蓄積し、再現解析のより一層の精度向上を図る必要がある。

洪水吐ゲートには、作用する動水圧の大きさの検

証を目的として動ひずみ計を設置している。しかしながら、得られている記録はひずみ量が小さく、動水圧の大きさを検証するまでには至っていない。この点についても、継続的な地震観測を行い、より大きな観測記録が得られた場合には、地震時にゲートに作用する動水圧の検証を行う必要がある。

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, 2005.3
- 2) 有賀義明: 地震観測記録に基づく既設ダムの地震時挙動の三次元再現解析, 日本地震工学会 第7巻, 第2号(特集号), 2007.

(2012.9.21受付)

STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF SPILLWAY GATES BASD ON OBSERVATION AND FEM ANALYSIS

Hiroyuki DOI, Yoshihide TANAKA, Yuusuke Otsubo,
Ayumu NAKANO, Yasuyuki NAKANISHI and Yoshiaki ARIGA

Since earthquake resistance performance required for a dam during large-scale earthquakes is to ensure reservoir functions, a spillway gate is important associated facility to satisfy the earthquake resistance performance. However less actual observation records on dynamic behavior of the gates during earthquakes than those of dams has been collected before, therefore the behavior enough for evaluation of the earthquake resistance performance of the gates are not identified.

Based on such background, in this research, the vibration tests and the earthquake observations for gates of a concrete gravity dam, which aim to obtain basic information on the dynamic behavior of the gates during earthquakes, were implemented. And then, the eigenvalue analysis by using the three-dimensional FEM Model and the reproduction analysis of the earthquake observation records were implemented, and the analysis model to be applicable for the evaluation of the earthquake resistance performance of the gates was developed based on the results of the reproduction analysis.