

地震による重力式ダムクレストゲートの振動および動水圧の発生要因の分析

藤田 将司¹・佐藤 信光²・田中 聖三³・京藤 敏達⁴

¹ 正会員 独立行政法人水資源機構 総合技術センター (〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田 936 番地)
E-mail: masashi_fujita@water.go.jp

² 正会員 独立行政法人水資源機構 総合技術センター (〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田 936 番地)
E-mail: nobuteru_sato@water.go.jp

³ 正会員 広島工業大学准教授 工学部環境土木工学科 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)
E-mail: s.tanaka.iz@cc.it-hiroshima.ac.jp

⁴ 正会員 筑波大学教授 システム情報系構造エネルギー工学域 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: kyotoh@kz.tsukuba.ac.jp

地震時の重力式コンクリートダムのクレストゲート振動は、ゲートに作用する動水圧の影響を大きく受けていると考えられているが、これまでゲートの動水圧の実測地震記録がなく、その実態が把握されていなかった。このため、本研究では、貯水時の地震によるゲート振動および動水圧の発生要因を分析するため、実ダムのクレストラジアルゲートに動水圧計と加速度計を設置し、実ダムゲートで地震時の動水圧を初めて記録した。それらの実測地震記録の分析と解析による検討を実施した結果、ゲート部の動水圧が主にゲート水深の貯水と連成したゲート振動により発生していること、ゲート水深によりゲートの固有振動数が変化すること、また、ゲートと貯水の連成によるゲート振動が門柱振動への相互作用を大きく及ぼしていることを明らかにした。

Key Words: spillway gate, concrete gravity dam, hydrodynamic pressure, earthquake record, dynamic analysis

1. はじめに

重力式コンクリートダムに設置されているゲートの地震時挙動は、基礎地盤およびダム堤体を通じた振動に加え、ゲート扉体に作用する動水圧の影響を受けている。特にクレストゲートでは、ダム堤体頂部の地震応答が大きくなるため、全体の荷重に占める動水圧の影響が大きい。しかし、これまでに地震時に実ダムゲートで測定された動水圧の実測記録がなく、ゲートの加速度を測定した実測記録も少ないため、地震時にゲート部に作用する動水圧や、その影響によるゲート振動の実態が把握できていない状況にあった。

このため、本研究では、貯水時の地震によるゲート振動および動水圧の発生要因を分析することを目的に、実ダムのクレストラジアルゲートに動水圧計と加速度計を設置し、実ダムゲートで地震時の動水圧を初めて記録した。それらの実測地震記録の分析と解析により、実ダムゲートに発生するゲート振動および動水圧の発生要因、

ゲート振動と門柱振動の相互作用を検討した。

2. ダムゲート動水圧に関する既往研究

地震時にコンクリートダム堤体やゲートが振動することにより生じる動水圧に関する既往研究、現状と課題を以下(1)および(2)に示す。

(1) ダムにおける動水圧

地震時にコンクリートダム堤体が振動することにより生じる動水圧は、これまでに多くの研究がなされており、実ダムの設計¹⁾や耐震性能照査²⁾に利用されている。

コンクリートダム設計における動水圧は、河川管理施設等構造令³⁾において、Westergaard の式⁴⁾を用いて計算するよう定められている。同式は、ダム堤体上流面が剛体振動した場合に発生する動水圧を、「水の粘性が無視できる」、「地震時による水粒子の変位は小さい」、「ダムは十分剛で、ダムの弾性たわみは無視できる」等

の仮定を解析に用いて算出されたものである。その際に考慮する動水圧は、コンクリートダム of 動的解析において、近似的に非圧縮性流体とみなして、付加質量マトリクスにより考慮する方法が一般的に用いられている。

(2) ダムゲートにおける動水圧

鋼構造物であるダムゲートは、マスコンクリートであるダム本体と比較して、重量が軽く、比較的剛性が低い構造をしている。そのため、ダムゲートは地震時にダム本体とは異なる振動をしていると考えられるが、そのことにより動水圧の発生にどのような影響が出ているかは、十分研究がなされていない現状がある。そのことに着目した研究論文の事例として、以下がある。

柏柳ら⁹⁾は、重力式コンクリートダムの天端付近に設置されたローラーゲートに生じる動水圧について、解析的検討を行っている。ダム、岩盤、貯水に加え、洪水吐ピアとローラーゲートを含めた3次元モデルで、構造物-貯水連成解析により検討された結果、ゲート部では堤体よりも応答加速度が大きく、動水圧も同じ標高のダム断面よりも大きい解析結果を示している。

土居ら⁷⁾は、重力式コンクリートダムの堤頂部に設置されているラジアルゲートに加速度計等を設置し、起震実験や地震観測により、ゲート部の動的加速度特性を把握している。また、ダム堤体、岩盤および貯水と連成させたゲートの3次元FEM解析モデルにより、加速度の再現解析をしている。貯水は、非圧縮性流体要素でモデル化されている。なお、ゲート部は横主桁、垂直補剛材等をシェル要素でモデル化されているが、脚柱部等ははり要素で簡易的にモデル化されている。

しかし、これまでに実測地震時のゲート部動水圧の記録はなく、加速度記録も限定した水位での記録が小数ある程度で、実測と解析により実態を解明できていない。そのため、本研究ではゲートに動水圧計と加速度計を設置し、地震記録を取得し、実測加速度および動水圧記録を分析することとした。さらに、ダム堤体、岩盤に加え、ラジアルゲートの詳細モデルを一体とした解析も実施した。なお、動水圧の影響をより明確にするため、ゲート上流部に貯水が無い状態、ゲート上流の常時に貯水位されている最高水位付近の状態、また、その中間時の水位においても実測地震記録を記録できたため、水位の違いによる影響を比較し、分析を行った。

3. 実測地震記録によるダムゲート振動および動水圧の分析

(1) 対象ダムゲートと観測の概要

計測対象としたダムは、図-1に示す堤高140mの重力式コンクリートダムである。同ダムでは、管理開始時か



図-1 計測対象ダムの上流面図と堤体計測箇所

表-1 計測対象ゲートの諸元

区分	非常用洪水吐き
型式	ラジアルゲート
基数	4門
扉高	14.5m
純経間	8.2m
扉体半径	15.0m

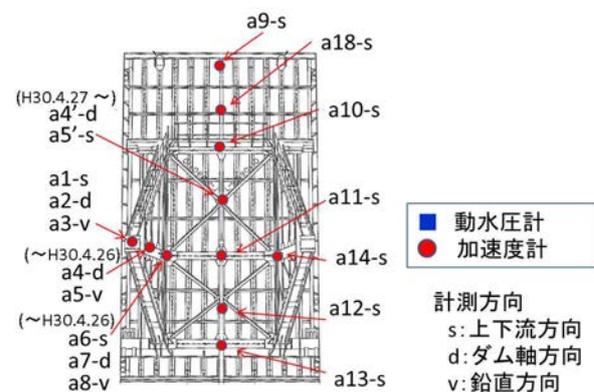
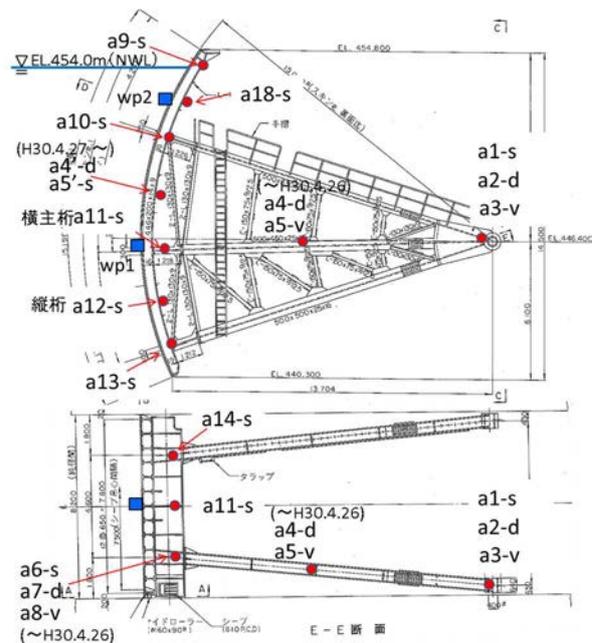


図-2 ゲートの計測箇所

ら堤体基礎 L1 と門柱（堤体天端）T1 の地震計で加速度計測（それぞれ、ダム軸方向、上下流方向、鉛直方向）が行われてきている。本研究にあたり、ゲートの計測対象としたのは、堤頂部の4門のラジアルゲートのうち、左岸側から2番目の2号ゲートとした。対象ゲートの諸元を表-1 に示す。同ゲートの図-2 に示す箇所にも動水圧計および加速度計を設置した。ゲートの振動は主にダム門柱を通じてゲートに伝わるため、図-1 および図-3 に示すとおり、ゲートの固定部である門柱のトラニオン付近や門柱（堤体天端）にも加速度計を設置した。動水圧計および加速度計の主要諸元を表-2 に示す。

計測期間は、a1-s から a17-v の 17 箇所の加速度計については 2015 年 6 月 22 日から計測しているが、そのうち a4-d, a5-v, a6-s, a7-d, a8-v の 5 箇所については 2018 年 4 月 27 日に移設した。また、動水圧計 wp1, wp2 および加速度計 a18-s については 2017 年 2 月 7 日から計測している。各計測については、2019 年 9 月現在も継続しているが、本稿では、2019 年 3 月末までの観測記録で整理した。

表-3 にゲートの実測期間での主な観測地震として、気象庁マグニチュードが3以上、且つ、ゲートを支えている門柱（堤体天端）T1 の上下流方向の最大加速度が

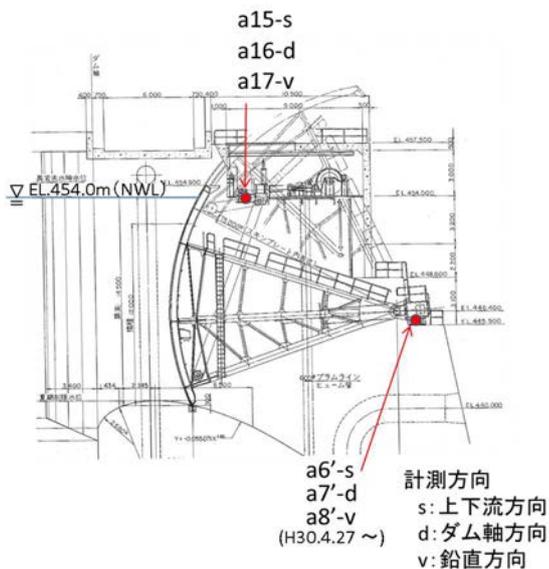


図-3 門柱（堤体天端，トラニオン付近）の計測箇所

表-2 動水圧計と加速度計の主要諸元

	容量	500kPa
動水圧計 (フラッシュ ダイヤフラム 型圧力計)	定格出力	約1.5mV/V 約 3000×10^{-6} (ひずみ出力 K=2.00)
	固有振動数	約4.5kHz (応答周波数 約400Hz)
	フルスケール	± 3000 gal
加速度計 (サーボ型)	応答周波数	DC~250Hz

10gal 以上の 59 地震の代表計測箇所の記録を示す。地震観測記録は、ゲート上流部の貯水がかかっている時（以下、「貯水時」という。）と、貯水がかかっている時（以下、「空水時」という。）の様々な貯水位で記録ができた。以下に、実測地震記録より解明されたゲート挙動について示す。

(2) 空水時のゲート振動

空水時の代表的な実測地震記録のゲートと門柱の加速度を図-4 に、また、フーリエスペクトルを図-5 に示す。図-4 より、門柱 a6'-s とゲート a11-s の加速度の位相がほぼ一致しており、また、加速度応答倍率 (a11-s/a6'-s) が最大加速度時で約 1.1 倍であり、門柱とゲートが概ね一体の振動をしている。図-5 のフーリエスペクトルに着目すると、卓越振動数 (約 4Hz) や 15Hz より低振動数域では、門柱 a6'-s とゲート a11-s のフーリエ

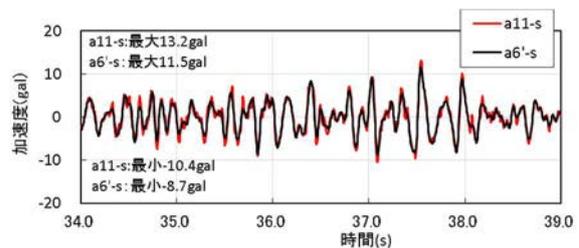


図-4 観測地震記録（加速度）空水時（2018/9/14 14:35 地震）

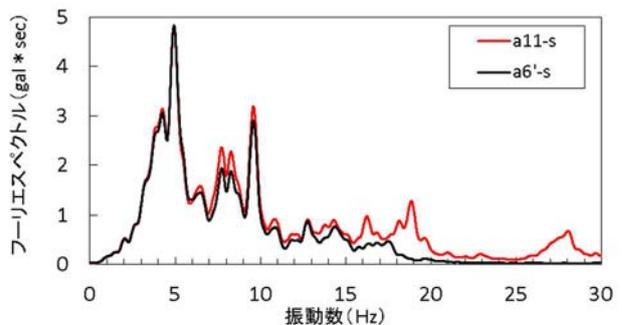


図-5 加速度フーリエスペクトル 空水時（2018/9/14 14:35 地震）

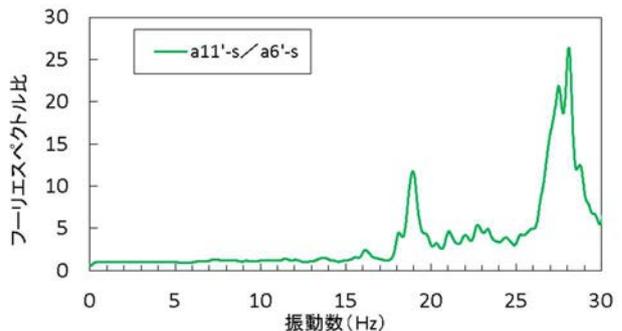


図-6 加速度のフーリエスペクトル比 空水時（2018/9/14 14:35 地震）

表-3 主要地震観測記録（気象庁M3以上、且つ、門柱（堤体天端）加速度 10gal以上）

No.	年月日、時間	貯水位 (EL.m)	ゲート水深*1 (m)	最大加速度*2(gal)					最大動水圧 (kPa)		気象庁 M	ダム～ 震央距離 (km)	
				堤体基礎 L1	門柱(堤体天端) T1	門柱 a6'-s	ゲート a11-s	ゲート a10-s	ゲート a18-s	ゲート部 wp1			ゲート部 wp2
1	2015/7/6 18:30	434.52	0.00	-3.3	25.1		25.2	36.6				4.1	68
2	2015/7/10 1:15	435.86	0.00	2.1	-19.7		19.3	27.7				4.4	68
3	2015/8/6 18:22	437.25	0.00	-9.7	-93.8		65.6	69.2				5.2	112
4	2015/8/14 5:14	435.54	0.00	1.5	-11.6		10.3	11.4				5.1	196
5	2015/9/2 16:17	439.67	0.00	-2.1	-18.2		11.1	15.1				3.8	66
6	2015/9/12 5:49	440.22	0.00	2.4	16.1		14.6	14.8				5.2	117
7	2015/10/1 20:11	432.11	0.00	-1.5	-12.8		8.9	14.8				3.9	128
8	2015/10/16 5:36	429.28	0.00	3.0	-13.6		15.1	14.9				3.0	11
9	2015/10/21 15:05	429.22	0.00	-2.6	23.7		16.3	22.2				5.3	183
10	2015/11/7 22:45	429.14	0.00	4.5	-37.1		33.4	45.9				4.9	81
11	2015/11/22 8:20	429.40	0.00	-1.5	-13.6		11.8	14.0				4.8	118
12	2015/12/11 21:33	429.13	0.00	-3.3	-16.9		20.5	28.7				3.7	16
13	2016/1/15 4:29	437.50	0.00	-3.8	26.5		18.9	25.2				4.3	108
14	2016/3/31 11:48	444.01	3.71	-1.9	-14.8		18.2	23.2				4.4	77
15	2016/4/14 15:39	448.38	8.08	3.3	-19.2		30.6	35.8				3.4	12
16	2016/5/7 6:37	453.20	12.90	-1.3	10.4		20.8	16.5				3.3	13
17	2016/5/16 21:23	453.12	12.82	3.6	-26.8		76.8	68.9				5.5	73
18	2016/6/7 3:15	443.90	3.60	-86.1	-561.4		747.0	885.2				3.5	4
19	2016/6/12 7:54	439.39	0.00	-1.9	-17.2		11.9	18.0				4.8	78
20	2016/7/9 6:28	433.08	0.00	-1.7	14.9		15.1	21.4				4.4	22
21	2016/7/17 13:24	436.61	0.00	-3.0	29.5		20.3	30.4				5.0	74
22	2016/7/20 7:25	439.30	0.00	3.4	22.6		17.1	25.1				5.0	77
23	2016/7/27 23:47	439.76	0.00	-4.6	-40.0	計器設置前	38.4	48.9				5.4	111
24	2016/8/19 21:08	439.88	0.00	2.1	18.1		15.1	16.5				5.4	157
25	2016/8/27 22:46	439.84	0.00	2.1	18.8		18.5	20.2				4.1	68
26	2016/9/7 13:29	439.62	0.00	-2.7	28.1		24.7	34.4				4.9	72
27	2016/9/13 19:12	439.86	0.00	2.4	21.3		21.2	23.0				4.9	78
28	2016/10/19 23:40	429.11	0.00	2.3	-18.1		11.7	18.0				3.9	77
29	2016/10/20 20:12	429.11	0.00	8.8	-53.5		64.1	85.1				3.8	13
30	2016/11/22 6:00	429.16	0.00	-5.2	-32.3		28.1	30.4				7.4	218
31	2016/11/24 6:24	429.23	0.00	-1.1	-10.1		7.3	9.5				6.2	189
32	2016/12/26 4:52	429.56	0.00	1.6	13.8		11.7	14.1				4.2	78
33	2017/2/26 5:12	422.07	0.00	-2.0	15.3		38.8	39.3	45.2			4.0	54
34	2017/2/28 16:49	422.05	0.00	-1.4	13.6		11.5	12.4	15.4	*3	*3	5.7	207
35	2017/4/12 3:11	429.64	0.00	-6.1	38.1		33.2	38.1	60.3			4.6	77
36	2017/6/5 15:40	449.10	8.80	2.6	-17.1		27.5	23.1	38.4	1.03	0.051	3.4	13
37	2017/6/19 1:24	440.87	0.57	-1.4	12.8		11.7	19.1	45.4			3.8	65
38	2017/7/21 16:08	436.11	0.00	1.2	-10.9		8.0	10.7	20.5			4.4	108
39	2017/8/2 2:02	439.04	0.00	-5.3	-43.7		32.3	40.2	76.4	計器位以下の	計器位以下の	5.5	107
40	2017/8/2 7:16	439.08	0.00	1.8	-20.0		11.7	21.8	63.5			4.6	74
41	2017/8/10 9:36	440.08	0.00	-1.4	11.4		9.9	10.4	24.3			5.0	105
42	2017/8/27 11:26	439.81	0.00	-1.1	12.0		9.0	11.3	25.2			4.8	110
43	2017/10/6 23:57	442.06	1.76	3.0	28.7		23.2	25.4	39.8			5.9	170
44	2017/11/2 22:31	453.30	13.00	-2.5	16.7		51.5	48.6	45.3	3.5	0.7	4.3	128
45	2018/1/6 0:54	453.24	12.94	1.7	10.4		48.0	42.4	39.7	3.2	0.6	4.7	115
46	2018/2/18 22:29	450.16	9.86	6.4	-25.8		41.6	33.9	54.3	2.0		3.0	12
47	2018/2/26 1:29	449.27	8.97	1.2	11.3		21.9	13.2	10.8	1.1	*3	5.8	239
48	2018/2/27 8:08	449.11	8.81	2.2	-13.0		44.0	26.8	32.0	1.8		4.3	73
49	2018/3/30 8:17	453.21	12.91	3.7	19.6		56.2	57.7	59.9	3.8	0.8	5.1	112
50	2018/6/17 15:27	443.03	2.73	13.2	-61.2	43.1	83.7	84.5	162.0			4.6	20
51	2018/7/17 4:34	437.02	0.00	1.5	12.8	8.0	10.5	12.5	28.4	計器位以下の	計器位以下の	4.8	118
52	2018/7/29 9:58	437.73	0.00	2.0	15.4	8.0	8.7	12.2	32.3			4.5	53
53	2018/9/5 5:11	440.63	0.33	-3.5	30.3	20.9	23.8	28.3	51.4			5.5	175
54	2018/9/14 14:35	440.45	0.00	1.9	15.6	11.5	13.2	15.1	19.8			4.9	112
55	2018/9/18 17:11	440.31	0.00	1.5	-13.2	8.9	19.3	18.4	32.1			4.3	66
56	2018/10/15 16:10	453.24	12.94	1.2	15.3	10.5	32.2	24.0	31.3	1.8	0.4	3.7	30
57	2018/11/27 8:34	453.22	12.92	5.6	37.7	28.8	93.7	89.2	114.1	6.5	1.3	5.0	68
58	2018/12/12 17:50	453.18	12.88	-4.7	29.9	19.3	52.0	48.3	69.9	3.3	0.6	4.3	108
59	2019/1/14 13:23	450.90	10.60	-5.3	-40.5	29.2	87.7	90.4	120.3	4.7	*3	4.9	57

*1 ゲート水深は、越流部 EL440.6mを超えた場合、ゲート下端 EL440.3からの水深

*2 最大加速度は、プラスが下流方向、マイナスが上流方向で、上下流方向の絶対値が最大時の値を示す

*3 計器以下の水位時

スペクトルが概ね一致している。これは、ゲート振動が門柱の振動と概ね一致していることを表しているが、門柱振動は堤体と一体で振動しており、堤体振動自体を主に表していると考えられる。一方、15Hzより高振動数域では、ゲート振動のみに卓越が見られる。これは、門柱の振動とは異なるゲート自体の振動によるものと考えられる。図-6に、門柱 a6'-s とゲート a11-s のフーリエスペクトル比を示すが、門柱の振動に対してゲート振動は、約 28Hz で卓越している。したがって、空水時ゲートの固有振動数は本ゲートでは約 28Hz と考えられる。

(3) 貯水時のゲート振動

a) ゲートの加速度応答

貯水時の代表的な実測地震記録の加速度を図-7に示す。また、表-3のうち、門柱 a6'-s の観測記録がある10地震観測記録について、門柱 a6'-s とゲート a11-s の上下流方向の最大加速度応答倍率とゲート水深の関係を図-8に示す。図-7より、貯水時は、門柱 a6'-s とゲート a11-s の加速度の位相がずれており、また、加速度応答倍率 (a11-s/ a6'-s) が最大加速度時で約 3.3 倍あり、門柱とゲートが異なる振動をしている。また、図-8より、門柱とゲートの最大加速度応答倍率 (a11-s/ a6'-s) は、空水時が 1.1 倍程度であるが、ゲート上流の水位上昇とともに加速度応答倍率が増加し、水深 13m 程度の

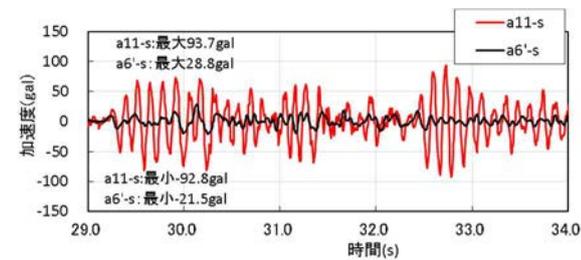


図-7 観測地震記録 (加速度) 貯水時 (ゲート水深 12.92m) (2018/11/27 8:34 地震)

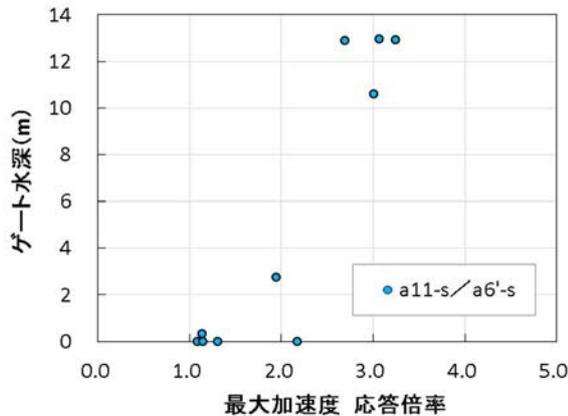
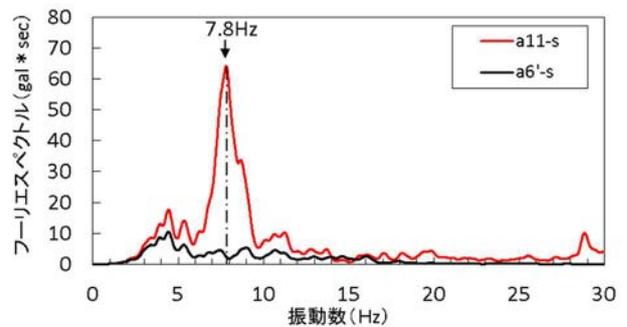


図-8 門柱に対するゲート扉体の最大加速度応答倍率 (a11-s/ a6'-s) とゲート水深の関係 (空水時～貯水時)

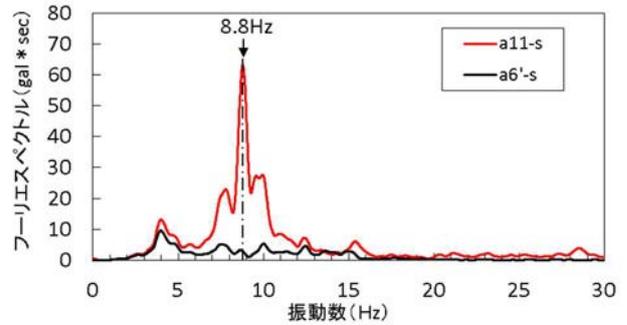
満水時には、約 3 倍となった。

b) ゲートの卓越振動数と振動モード

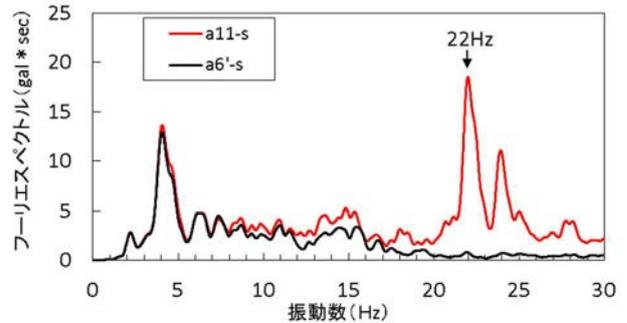
貯水時の代表的な実測地震記録のフーリエスペクトルを図-9に示す。図-9(a)のゲート a11-s のフーリエスペクトルに着目すると、満水付近のゲート水深 12.92m での卓越振動数は約 7.8Hz である。また、図-9(b)および図-9(c)に示すとおり、ゲート水深が 10.60m および 2.73m に低下すると、卓越振動数がそれぞれ約 8.8Hz と約 22Hz に変化し、水位が高い時よりも振動数が高くなる。また、ゲート水深が高い図-9(a)の門柱 a6'-s のフーリエスペクトルに着目すると、図-5の空水時と同様に約 4Hz で卓越しているが、図-9(a)のゲート a11-s の卓越振動数約 7.8Hz 付近に着目すると、門柱 a6'-s の振幅が低減していることがわかる。同様に、図-9(b)においてもゲート a11-s の卓越振動数約 8.8Hz 付近に着目すると、その振動数付近でも門柱 a6'-s の振幅が低減して



(a) ゲート水深 12.92m (2018/11/27 8:34 地震) 時



(b) ゲート水深 10.60m (2019/1/14 13:23 地震) 時



(c) ゲート水深 2.73m (2018/6/17 15:27 地震) 時

図-9 加速度フーリエスペクトル 貯水時

いることがわかる。

上記同様に、各水位毎の実測地震記録における卓越振動数を算出した結果を、**図-10**の地震観測記録 a11-s のとおり示す。同図より、満水時の卓越振動数約 7.8Hz に対し、ゲート水深の低下とともに振動数が増加し、空水時では約 28Hz となっている。

また、加速度計は常時連続計測しており、洪水により貯水水位が 2 日間で大きく変化した期間（2017 年 10 月 22 日 15 時～10 月 24 日 23 時）において 1 時間毎の記録をフーリエ変換し、卓越振動数を把握した結果を**図-10**の常時微動 a11-s のとおり示す。**図-10**の常時微動（ポータブル微動計） a11-s 付近の結果については、**図-11**に示すとおり、ゲートの横主桁にポータブル微動計を設置して計測し、フーリエ変換した。観測日は 2015 年 4 月 27 日 15 時（ゲート水深 13.40m）、2018 年 6 月 8 日 14 時（ゲート水深 7.21m）、2018 年 7 月 10 日 14 時（ゲート水深 0m）、2019 年 6 月 13 日 14 時（ゲート水深 11.91m）の 4 回である。それらの計測結果は、地震記録と概ね同様の結果となっているため、固定しないポータブルの微動計により計測した常時微動記録でも、地震記録と同様にゲートの卓越振動数を把握できると考えられる。

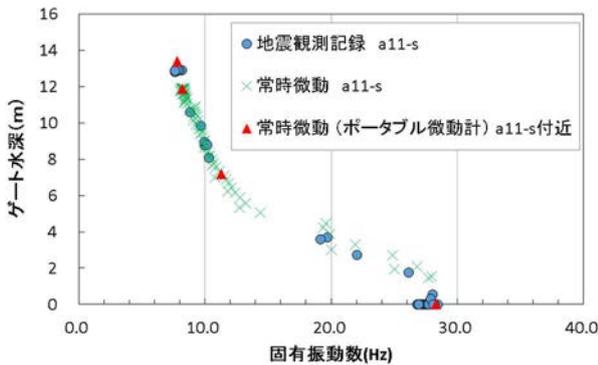


図-10 ゲート水深と固有振動数の変化



図-11 常時微動計測状況（中央：ポータブル微動計，右：加速度計 a-11-s）

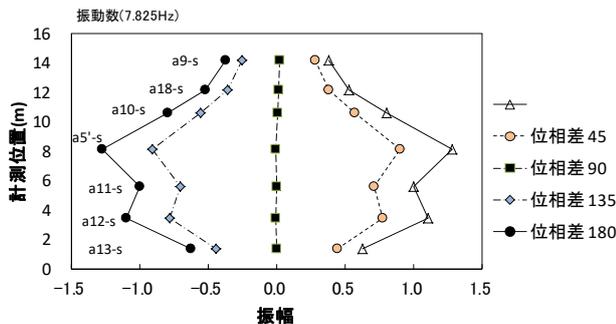


図-12 ゲートの主要な振動モード（2018/11/27 8:34 地震）

代表地震におけるゲートの卓越振動数（約 7.8Hz）における振動モードを**図-12**に示す。同図より、卓越振動数においては、扉体全体が位相差なく上下流方向に振動しており、脚柱の軸方向に力が入る振動をしている。よって、ゲートの主要な振動は、1 質点系の単純な振動（1 質点がバネにより上下流方向に振動）と同様の振動をしていると考えられる。そのため、卓越振動数変化の要因は、ゲート脚柱の剛性とゲート自重が変わらないことから、ゲートの貯水時の動水圧による付加質量増減によるものであると考えられる。固有振動数の理論値は、式(1)で表されることから、ゲート質量 M_0 を 72 Mg、満水時の固有振動数 f_1 を 7.8Hz、空水時の固有振動数 f_2 を 28Hz として算出すると、付加質量 m_d が約 856Mg と算出できる。比較として Westergaard の式(2)で貯水池水深をゲート水深と考えた場合の、ゲート水深による付加質量を算出すると 798 Mg であり、実測値と式(1)から算出される付加質量に近い値となった。以上より、付加質量はゲート質量の約 12 倍であり、ゲート振動の影響要因はゲート本体の自重よりも動水圧に支配されている。その結果、貯水時のゲート振動は、増幅応答するとともに、固有振動数が空水時よりも低くなったと考えられる。

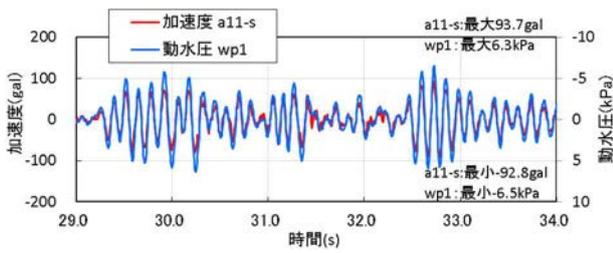
$$f_2 = f_1 \sqrt{\frac{(M_0 + m_d)}{M_0}} \quad (1)$$

$$m_d = \frac{7}{12} \omega_0 h^2 \quad (2)$$

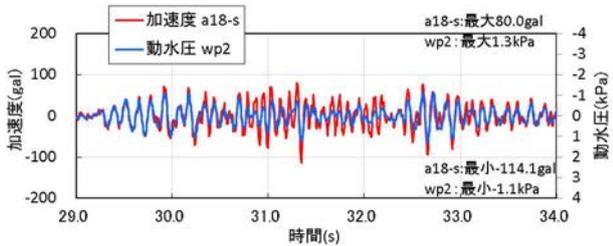
ここに、 M_0 ：ゲートの質量、 m_d ：付加質量、 f_1 ：満水時の固有振動数、 f_2 ：空水時の固有振動数、 ω_0 ：水の単位重量、 h ：ゲート水深である。

(4) 動水圧

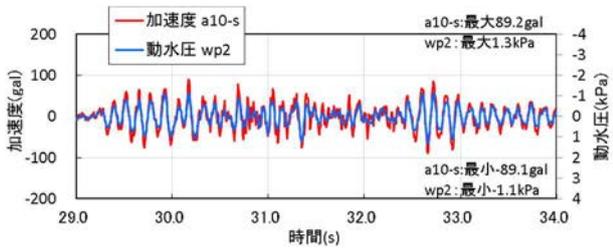
貯水時の代表的な実測地震記録の動水圧を**図-13**に加速度と併せて示す。また、同地震の動水圧と加速度のフーリエスペクトルを**図-14**に示す。**図-13(a)**より、ゲート部 wp1 の動水圧は、ゲート a11-s の加速度とほぼ同位相、同比率の記録である。また、**図-14(a)**のゲート部



(a) 加速度 a11-s, 動水圧 wp1

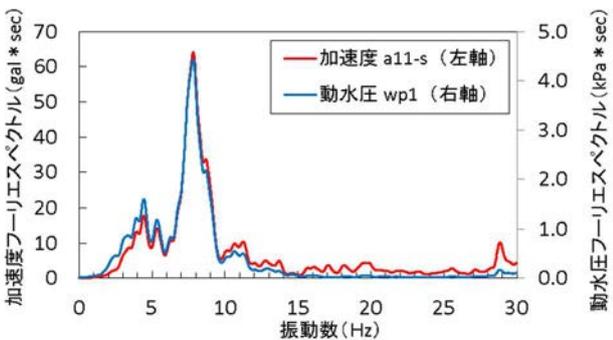


(b) 加速度 a18-s, 動水圧 wp2

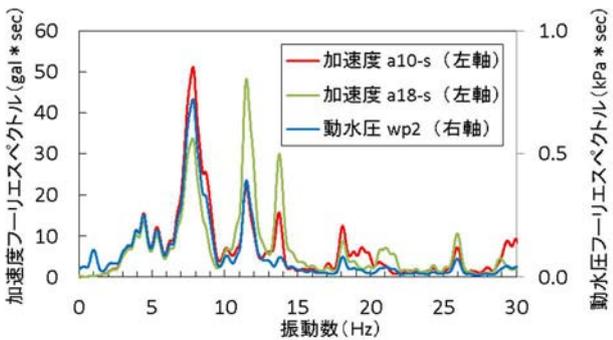


(c) 加速度 a10-s, 動水圧 wp2

図-13 貯水時の地震観測記録 (加速度および動水圧)
(2018/11/27 地震)



(a) 加速度 a11-s, 動水圧 wp1



(b) 加速度 a18-s, 加速度 a10-s, 動水圧 wp2

図-14 フーリエスペクトルの比較 (加速度および動水圧)
(2018/11/27 地震)

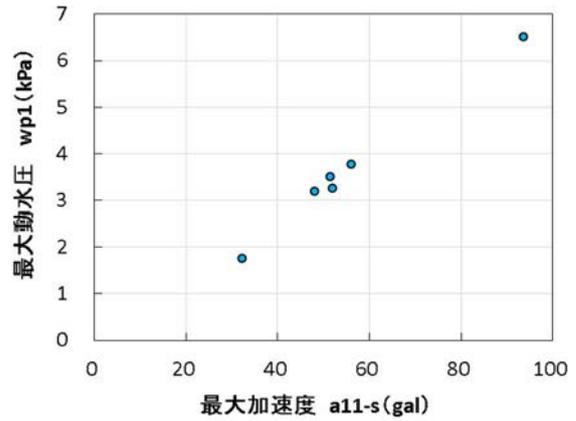


図-15 最大加速度と最大動水圧の関係 (ゲート水深 12.88m~13mの地震)

wp1 と a11-s のフーリエスペクトルの比較では、主要な振動数の 10Hz 程度までは、フーリエスペクトルの形状が概ね一致しており、卓越振動数も約 7.8Hz で一致している。図-13(b)、図-13(c) および図-14(b) より、ゲート部 wp2 の動水圧は、動水圧計と同標高のゲート a18-s よりも、動水圧計より少し下部で脚柱で支えられている範囲に設置されているゲート a10-s の加速度の方が、時速歴波形およびフーリエスペクトルの 8Hz 付近と 11.5Hz 付近の比率が合っている。一方、ゲート a18-s の加速度フーリエスペクトルで比較的大きい 13.8Hz 付近のゲート振動が、ゲート部 wp2 の動水圧に与える影響は比較的小さい。また、前記の図-12 に示すとおり、扉体の脚柱で支えられている a10-s~a13-s の範囲が概ね剛体振動をしている。さらに、図-15 に示すとおり、同一水位時のゲート最大加速度 (a11-s) とゲート最大動水圧 (wp1) の関係がほぼ線形関係にある。

以上の結果より、当該ゲートにおいては、ゲート部 wp1 の動水圧は主に、脚柱で支えられている範囲 (a10-s~a13-s) のゲート振動により発生しており、堤体振動により発生する動水圧の影響は小さいと考えられる。また、ゲート部 wp2 の動水圧は、動水圧計と同標高のゲート a18-s のゲート振動による影響は小さく、wp1 と同様に、主に脚柱で支えられている範囲 (a10-s~a13-s) のゲート振動により発生していると考えられる。すなわち、ゲート部動水圧の発生要因は、主にゲート水深の貯水と連成したゲート振動と考えられる。また、ゲート最大加速度 (a11-s) とゲート最大動水圧 (wp1) の関係がほぼ線形関係にあり、(3)で示したとおり、動水圧は、ゲート振動に付加質量として作用していると考えられる。

(5) ゲート振動と門柱振動の相互作用

ゲート振動と門柱振動の相互作用を確認するため、図-10 に示したゲート水深によるゲート固有振動数の変化が門柱振動にどのような影響を及ぼしているか分析した。

分析対象とした地震記録は、堤体基礎 L1 および門柱（堤体天端）T1 の地震記録が整理されている 2000 年 4 月～2019 年 3 月までの 19 年間の記録とし、それらの記録の内、気象庁マグニチュードが 3 以上、且つ、ゲートを支えている門柱（堤体天端）T1 の上下流方向の最大加速度が 10gal 以上の記録とした。整理対象としたゲート部水位時の主な地震観測記録を表-4 に示す。整理方法は、各地震について、堤体基礎 L1 と門柱（堤体天端）T1 の上下流方向のフーリエスペクトルをそれぞれ求め、堤体基礎 L1 に対する門柱（堤体天端）T1 のフーリエスペクトル比 (T1/L1) として求めた。その結果を水位が近い地震毎に平均して図-16 に示す。同図より、ゲート水深 0m 時のフーリエスペクトル比に対して、水位上昇時の各フーリエスペクトル比を比較すると、空水時に見られている 9Hz 付近のフーリエスペクトル比が、貯水時の各水位時は比較的小さくなっていることがわかる。また、図-10 で示した水位毎のゲート固有振動数付近で、堤体基礎に対する門柱（堤体天端）のフーリエスペクトル比が低下していることがわかる。つまり、ゲートの固

有振動数が約 10Hz となるゲート水深 7～9m では、約 10Hz のフーリエスペクトル比が低下している。同様に、ゲートの固有振動数が約 9Hz となるゲート水深 10～11m では、約 9Hz のフーリエスペクトル比が低下し、ゲートの固有振動数が約 8Hz となるゲート水深 12.7～13.4m では、約 8Hz のフーリエスペクトル比がゲート水深 0m と比較し低下している。したがって、貯水時にゲート水深が深くゲート振動が動水圧の影響を受ける場合は、ゲート振動と門柱振動の相互作用が大きくなり、ゲートの固有振動数付近における門柱振動が弱くなっていると考えられる。これらの影響は、貯水時のゲートが門柱に対してマスダンパーと同様の作用をしているためと考えられる。

これらの影響を解析上で考慮するには、ゲート、堤体および門柱を一体のモデルに含めて解析を実施する必要がある。

(6) まとめ

実測地震記録の分析より、ゲート振動は空水時と貯水時で大きく異なっている。空水時のクレストゲート扉体の振動は、門柱と概ね同じ加速度応答をしており、ゲート振動よりも堤体と一体で振動している門柱振動が支配的である。門柱に対するゲート自体の振動は、ダム堤体振動よりも高振動域でみられており、計測対象としたゲートの卓越振動数は約 28Hz である。貯水時は門柱 a6'-s に対するゲート a11-s の加速度応答が増幅するとともに、ゲート a11-s の固有振動数が空水時と比較して大きく低下する。これらは、ゲート貯水時の動水圧が付加質量として作用し、ゲート振動に大きな影響を与えたためと考えられる。

一方、ゲート部動水圧の発生要因は、主にゲート水深の貯水と連成したゲート振動によるものと考えられる。特に、ゲート扉体部の脚柱で支えられている範囲 (a10-s～a13-s) が上下流方向に概ね剛体振動していることが、動水圧の発生に大きく影響を与えていると考えられる。

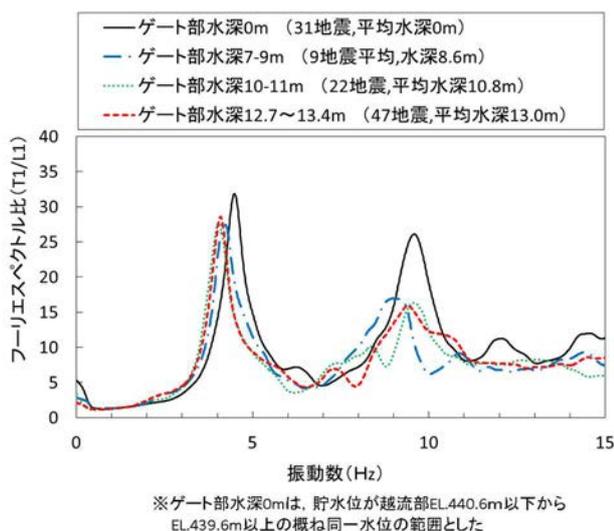


図-16 基礎 L1 と門柱（堤体天端）T1 の上下流方向のフーリエスペクトル比

表-4 図-16 の整理対象とした地震のうち主な観測記録

No.	年月日、時間 (ダム地点)	貯水位 (EL.m)	ゲート部 水深 (m)	最大加速度(gal)						気象庁 M	ダム～ 震央距 離 (km)	備考
				堤体基礎L1			門柱(堤体天端)T1					
				上下流 方向	ダム軸 方向	鉛直方 向	上下流 方向	ダム軸 方向	鉛直方 向			
1	2004/10/23 17:56	453.62	13.32	-13.63	14.63	15.56	108.06	-126.6	-52.63	6.8	95	新潟県中越地震
2	2004/10/23 18:34	453.62	13.32	-17.8	-19.06	26.86	190.99	140.4	70.44	6.5	94	
3	2011/3/11 14:47	451.14	10.84	77.13	35.53	44.84	385.23	379.58	136.65	9	354	東北地方太平洋沖地震
4	2011/3/11 15:16	451.14	10.84	16.08	-12.09	9.85	-101.4	82.49	-33.2	7.6	174	
5	2012/7/16 4:31	439.78	0.00	10.29	-6.67	5.34	-110.3	-78.51	-20.52	4.8	58	
6	2013/4/30 22:09	453.2	12.90	38.27	35.53	-59.61	-269.3	-245.1	-201.7	4.2	2	
7	2013/5/2 22:04	453.13	12.83	-124	54.31	-75.58	-824.6	447.7	-323.4	4.1	2	
8	2015/5/30 1:06	449.22	8.92	-7.17	-5.46	-6.86	-55.29	-76.86	-15.36	4.8	59	

※本表は、整理対象とした地震のうち堤体天端が 100gal 以上の地震観測記録を掲載した。ただし、ゲート水深 7-9m の記録 (全 9 地震) は、堤体天端が 100gal 以上の記録がないため、門柱 (堤体天端) の加速度が最大の記録を掲載した。

また、ゲート水深が深くなると、ゲートと貯水の連成によるゲート振動が門柱振動への相互作用を大きく及ぼすと考えられる。すなわち、貯水時の動水圧は、ゲート振動に影響するだけでなく、門柱振動にも影響を与えていると考えられる。

4. 解析によるダムゲート振動および動水圧の分析

(1) 解析の概要

3章の実測地震記録によるゲート振動と動水圧の状況を分析するため、解析による検討を実施し、実測地震記録の結果と比較・分析した。

解析モデルは、実測地震記録の結果を踏まえて、以下の2モデルにより実施した。モデル1は、ゲート振動によるゲート部動水圧の影響を評価するため、ゲート部の

み貯水との連成を考慮したモデルとして実施した。モデル2は、ゲート振動と門柱および堤体振動による動水圧や各箇所の振動の相互作用も評価できるように、ゲート、堤体、門柱と貯水、および、岩盤も含めた一体の3次元モデルとして実施した。解析コードはISCEFを用いた。

(2) 解析モデルおよび解析条件

モデル1は、図-17に示すとおり、図-1の計測対象としたゲートの各部材をシェル要素でモデル化した。ゲートにかかる動水圧は、図-18に示すモデルを用いて、非圧縮性流体動水圧マトリクスを作成し、図-17のゲートモデルに付与した。なお、図-18の流体要素は完全流体とし、運動方程式は式(3)で表せる。図-18における貯水と構造物の連成面は貯水とゲートが接するゲート扉体面のみとし、構造から流体への影響は式(4)により速度の

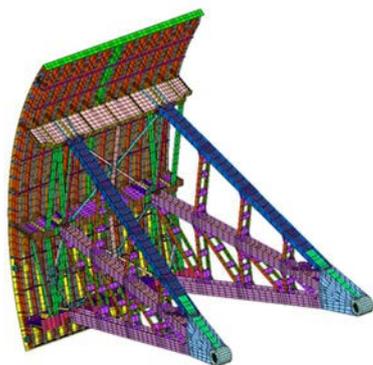
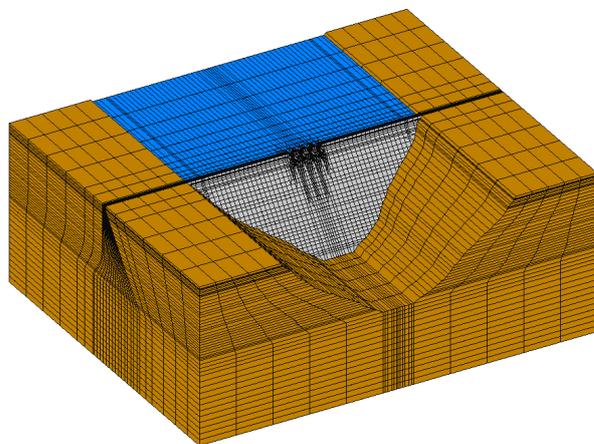
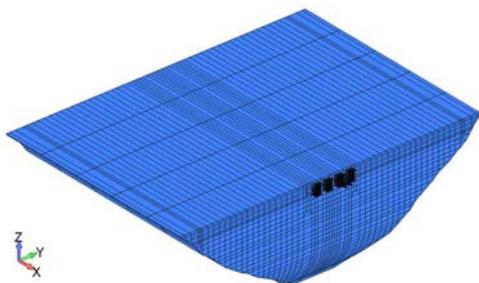


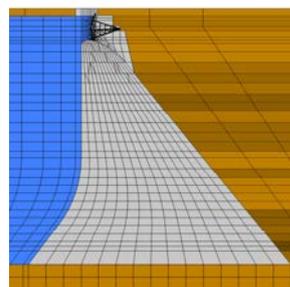
図-17 モデル1：ゲートの3次元シェルモデル



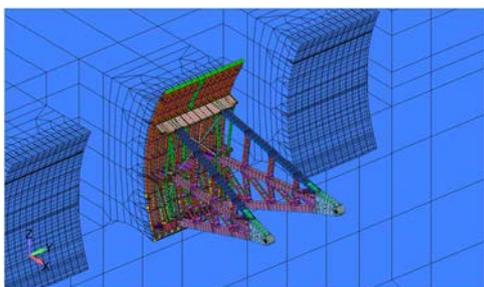
(a) モデル全体（鳥瞰図）



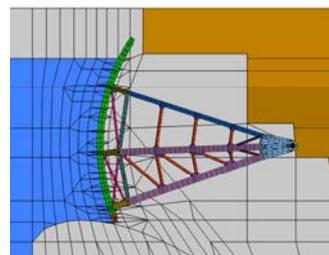
(a) 全体モデル(貯水地+ゲート)



(b) 断面図



(b) ゲート部拡大



(c) ゲート部断面図

図-18 モデル1の付加質量算出モデル図

図-19 モデル2：ゲート、堤体、岩盤及び貯水一体の3次元モデル

一致を考慮し、流体から構造への影響は式(5)により発生した流体圧力を構造に作用させた。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \dot{u}_n \quad \text{on} \quad \Gamma_{IF} \quad (4)$$

$$p = -\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5)$$

ここに、 ϕ は速度ポテンシャル、 \mathbf{n} は流体側と構造側節点の流体面直方向、 \dot{u}_n は \mathbf{n} 方向の構造節点の速度、 Γ_{IF} は流体と構造の境界面である、 p は圧力、 ρ_w は流体の密度、 t は時間である。

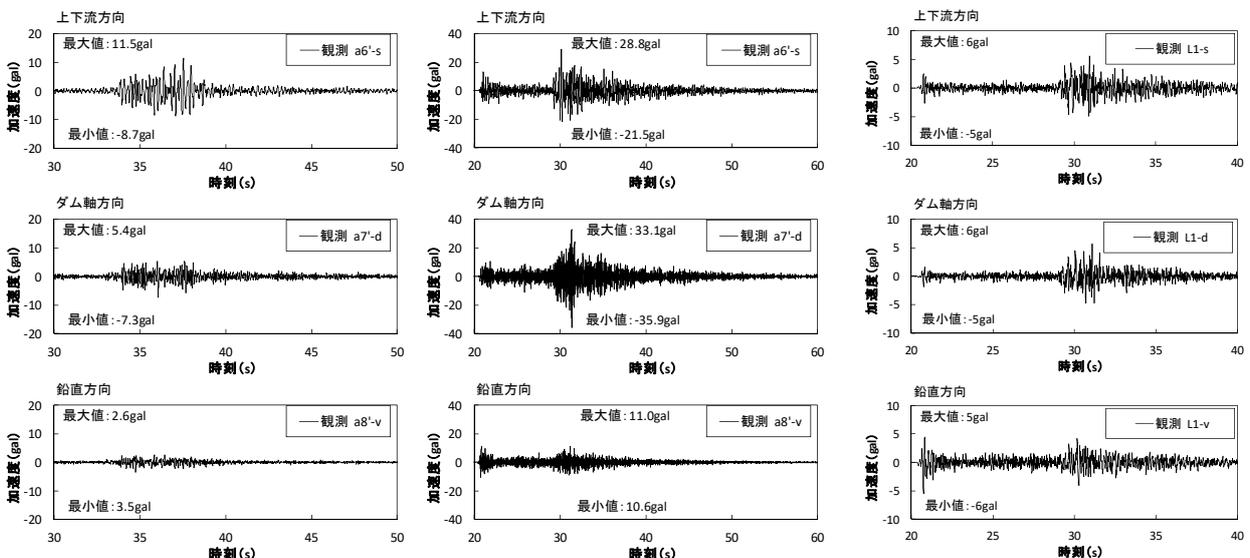
モデル2は、図-17のモデル1のゲートの詳細なシェルモデルを、堤体、岩盤、貯水の3次元モデルに組み込んで、図-19に示すゲート、堤体、岩盤及び貯水が一体の3次元モデル(以下、「一体3次元モデル」という。)とした。動水圧はモデル1と同様、非圧縮性流体動水圧マトリクスを作成するが、貯水と構造物の連成面は、貯水とゲートおよび貯水と堤体が接する面とした。

ゲートモデルの境界条件は、トラニオンピン位置の並進三方向を拘束し、ゲート下部戸当たりについては、鉛直方向のみ拘束した。解析ケース、解析条件および物性値一覧を表-5に示す。CASE1からCASE4はモデル1で実施し、CASE1は空水時のゲート振動を確認するケース、CASE2は貯水時のゲート a11-s の振動を実測地震記録に合わせた場合に動水圧が実測と一致するか確認するケー

表-5 解析ケース、解析条件および物性値一覧

解析ケース	1	2	3	4	5	
モデル		モデル1			モデル2	
貯水・空水	空水	貯水	貯水	貯水	貯水	
観測地震日時	2018/9/14 14:35	2018/11/27 8:34				
入力地震動	s6'-s, a7'-d, a8'-vの観測地震をゲート・トラニオンピンに直接入力	s11-sの観測地震をゲート・トラニオンピンに引き戻して入力	s6'-s, a7'-d, a8'-vの観測地震をゲート・トラニオンピンに直接入力	L1の観測地震を基礎岩盤に引き戻して入力		
ゲート	弾性係数	N/mm ² 205,000	205,000	205,000	170,000	170,000
	単位体積重量	kN/m ³		85.41		
	ポアソン比			0.3		
	減衰定数	%	2	2	2	2
	レイリー周波数	Hz	f1: 12.80, f2: 27.68	f1: 8.87, f2: 24.24	f1: 8.87, f2: 24.24	f1: 8.08, f2: 22.09
堤体	弾性係数	N/mm ²				43,000
	単位体積重量	kN/m ³				23.65
	ポアソン比					0.2
	減衰定数	%				5
	レイリー周波数	Hz				f1: 4.10, f2: 9.86
岩盤	弾性係数	N/mm ²				38,400, 13,500 [※]
	単位体積重量	kN/m ³				22.56
	ポアソン比	Hz				0.3
	減衰定数	%				5
	レイリー周波数	Hz				f1: 2.18, f2: 30.0

※実ダムの基礎掘削時に確認された岩級区分を参考に、左岸基礎地盤のEL334m以上の標高で、堤体と接しているメッシュのみ弾性係数を13,500N/mm²と設定した。



(a) 2018/9/14 14:35 地震, 門柱

(b) 2018/11/27 8:34 地震, 門柱

(c) 2018/11/27 8:34 地震, 堤体基礎

図-20 入力地震動作成に用いた地震観測記録

ス、CASE3 および CASE4 は貯水時のゲート振動とそれによる動水圧を確認するケースとして実施した。CASE5 はモデル2で実施し、ゲート振動とそれによる動水圧の発生要因に加え、ゲート振動と門柱の相互作用を確認するため実施した。また、各解析ケースの入力地震動作成に用いた地震観測記録を図-20(a), (b)および(c)に示す。各地震の選定は、空水時またはゲート水深 12.88m 以上の貯水時の記録のうち、それぞれ門柱 a6'-s の加速度が最大の観測記録とした。

(3) 解析結果

a) 空水時の解析 (CASE1)

CASE1 は、モデル1で空水時のゲート振動を確認するケースとして実施した。図-21 に CASE1 解析結果の加速度時刻歴波形およびフーリエスペクトルを地震観測記録と比較して示す。同図の結果より、弾性係数を鋼材の一般値 205,000N/mm² とし、減衰定数を鋼材の一般的な値

の 2%のレイリー減衰とすると、加速度の解析値が観測値と概ね一致し、再現性が良い結果となった。空水時のゲート振動は、ゲートが比較的軽量で、ゲート自重に対するゲート脚柱の剛性が十分高いため、門柱振動に対するゲート扉体の振動が小さく、ゲート扉体部が門柱と概ね一体の振動をしている。そのため、門柱の加速度記録がある場合は、その記録をゲートトランシオンピン箇所に入力すれば、ゲート扉体の加速度を概ね再現できると考えられる。

b) 貯水時の解析 (CASE2)

CASE2 は、貯水時のゲート a11-s の振動を実測地震記録に合わせた場合に動水圧が実測と一致するか確認するケースとして実施した。図-22(a)に CASE2 解析結果の動水圧および加速度の時刻歴波形および加速度フーリエスペクトルを地震観測記録と比較して示す。同図の結果より、モデル1でゲート a11-s の扉体振動を実測地震記録に合わせると、動水圧の解析結果と実測記録が概ね一致

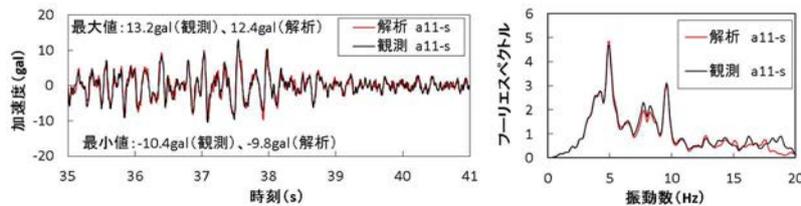
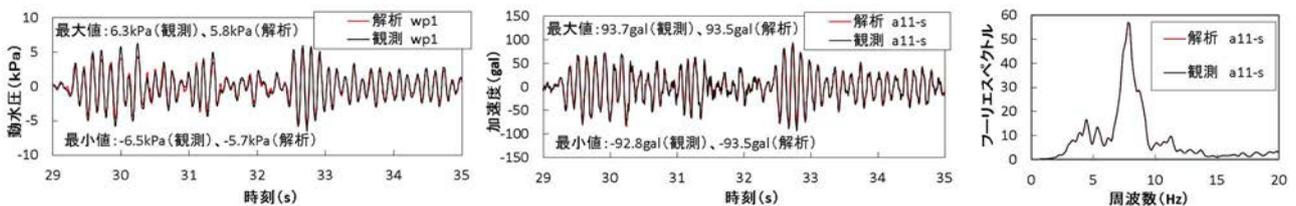
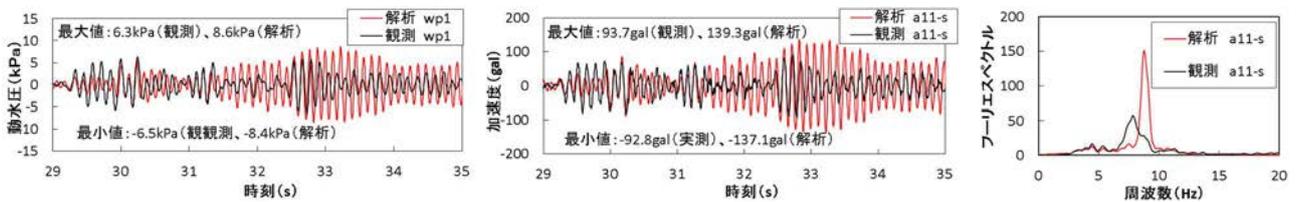


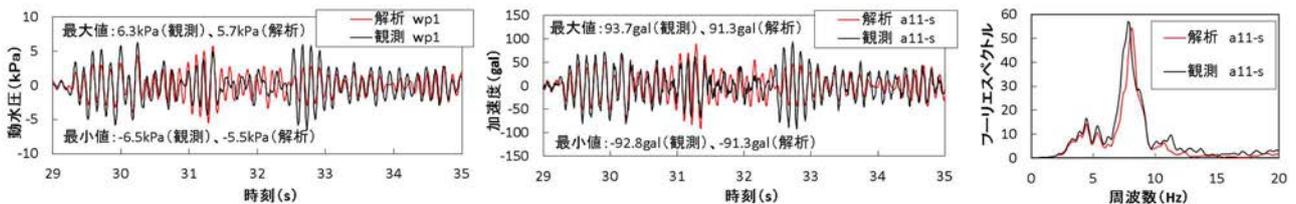
図-21 CASE1 の解析結果と地震観測記録の加速度の比較 (2018/9/14 14:35 地震, 空水時)



(a) CASE2 の解析結果と地震観測記録の比較 (動水圧, 加速度時刻歴波形, 加速度フーリエスペクトル)



(b) CASE3 の解析結果と地震観測記録の比較 (動水圧, 加速度時刻歴波形, 加速度フーリエスペクトル)



(c) CASE4 の解析結果と地震観測記録の比較 (動水圧, 加速度時刻歴波形, 加速度フーリエスペクトル)

図-22 解析結果と地震観測記録の比較 (2019/11/27 8:34 地震, 貯水時)

した結果となった。そのため、貯水と構造物の連成面は貯水とゲートが接するゲート扉体面のみとし、非圧縮性流体とした今回の解析条件で、実測の動水圧を概ね再現できると考えられる。この結果は、3.実測地震記録の結果から推察された動水圧の発生要因がゲート振動によるものが支配的で、堤体上流面の振動により発生する動水圧のゲートへの影響は小さいと考えられた結果と整合するものである。これは、ゲートの加速度が堤体と比較して大きいことが影響していると考えられる。

c) 貯水時の解析 (CASE3, CASE4)

CASE3 および CASE4 は貯水時のゲート振動とそれによる動水圧の発生要因を確認するケースとして実施した。図-22(b)に CASE3 解析結果の動水圧および加速度の時刻歴波形および加速度フーリエスペクトルを地震観測記録と比較して示す。同図の結果より、弾性係数を鋼材の一般値の 205,000N/mm² とし、減衰定数を鋼材の一般的な値の 2% のレイリー減衰とすると、加速度応答と動水圧が再現できていない。この要因としては、ゲートモデルの固有値解析結果 (1 次) が 8.87Hz となっており、実測地震記録によるゲートの固有振動数 (約 8Hz) と合っていないこと。また、図-16 で示した門柱 (堤体天端) の 2 次モードの振動数 (約 9Hz) とゲートモデルの固有振動数 (8.87Hz) が概ね一致したため、ゲートの振動が門柱振動と共振し、ゲートの加速度が増幅したと考えられる。

CASE3 の結果を踏まえ、モデルの固有振動数を実測地震記録 (約 8Hz) と合わせるため、本検討では便宜的に鋼材の弾性係数を 170,000N/mm² に調整したケース (CASE4) を行った。その結果を図-22(c)に示すが、ゲート a11-s の加速度フーリエスペクトルのピーク (8Hz) 付近が概ね一致しており、また、加速度と動水圧の最大値および最小値も実測地震記録に近い値となり再現性が良くなった。この結果より、非圧縮性流体で、貯水と構造物の連成面を貯水とゲートが接するゲート扉体面のみ考慮すれば、ゲート振動とそれにより発生する動水圧を考慮できることが確認できた。したがって、実測記録と同様、ゲート部に発生する動水圧はゲート振動によるものが主であることが解析上でも確認できた。

d) 貯水時の解析 (CASE5)

CASE5 は、ゲート振動とそれによる動水圧の発生要因に加え、ゲート振動と門柱の相互作用を確認するため、一体 3 次元モデルで実施した。図-23 に CASE5 解析結果の動水圧および加速度の時刻歴波形および加速度フーリエスペクトルを、地震観測記録と比較して示す。なお、CASE5 も CASE4 と同様、ゲートの固有振動数 (約 8Hz) を合わせるため、鋼材の弾性係数を 170,000N/mm² に調整している。

図-23 (a)および(b)より、ゲート a11-s の加速度は主要動の前半 (29s~31.5s) は概ね一致しており、その時間帯ではゲート部 wp1 の動水圧も概ね一致している。し

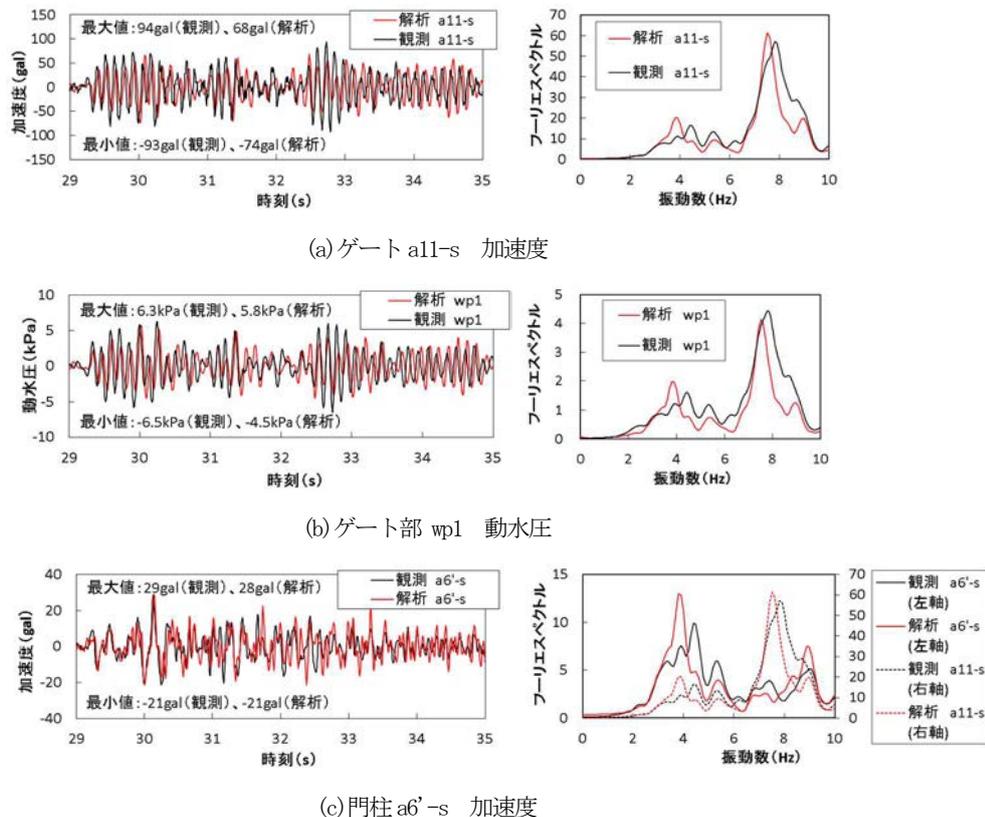


図-23 解析結果 CASE5 と地震観測記録の比較 (2019/11/27 8:34 地震, 貯水時)

かし、31.5s以降は一致している時間帯と一致していない時間帯があり最大値にも差が見られた。加速度および動水圧のフーリエスペクトルは卓越振動数が解析結果の約7.5Hzに対し、観測記録では約7.8Hzになっており、低振動側となった。また、図-23(c)より、門柱 a6'-s の加速度の最大値は概ね一致した。門柱 a6'-s の時刻歴波形は、ゲート a11-s の加速度とゲート部 wp1 の動水圧と同様、主要動の前半(29s~31.5s)は概ね一致しているが、31.5s以降は一致している時間帯と一致していない時間帯がある。門柱 a6'-s のフーリエスペクトルは、ゲート a11-s の固有振動数(観測値約7.8Hz、解析値約7.5Hz。)と同じ振動数付近で、観測値と同様に解析値でも低減が見られた。これは、ゲート振動と門柱振動の相互作用によるものと考えられる。

以上より、一体3次元モデルでは、門柱 a6'-s の加速度を再現できた時間帯においては、ゲート a11-s の加速度とゲート部 wp1 の動水圧も概ね再現できている。そのため、実測記録と同様、ゲート部に発生する動水圧はゲート振動によるものが主であることが、一体3次元モデルによる解析上でも確認できた。また、3章(5)で示した貯水時のゲート振動と門柱振動の相互作用を考慮できると考えられる。

一方で、門柱 a6'-s の加速度を再現できていない時間帯においては、ゲート a11-s の加速度とゲート部 wp1 の動水圧を再現できていない。門柱 a6'-s の加速度を再現できていない時間帯が生じた要因は、堤体を3次元モデルの入力地震動を、堤体基礎 L1 の1点のみの実測地震で合わせているが、実際にはアバット部等からも地震動が伝わることや、堤体や岩盤も含めた物性値の精度が十分ではないことが考えられる。そのため、堤体振動とゲート振動を含めた解析精度の確保に課題がある。

(4) まとめ

解析による分析結果より、非圧縮性流体で、貯水と構造物の連成面を貯水とゲートが接するゲート扉体面のみ考慮すれば、ゲート振動とそれにより発生する動水圧を考慮できることが確認できた。また、一体3次元モデルにおいて、非圧縮性流体で、貯水と構造物の連成面を貯水とゲートが接するゲート扉体面に加え、貯水と堤体上流面を考慮しても、ゲート加速度と動水圧の関係は同様である。したがって、実測記録と同様、ゲート部に発生する動水圧はゲート振動によるものが主であることが解析上でも確認できた。また、一体3次元モデルにおける解析結果より、実測値と同様、貯水時はゲート振動と門柱振動の相互作用が大きくなり、ゲートの固有振動数約8Hz付近における門柱振動が弱くなることが確認できた。

5. 結論

本研究では、実ダムのクレストラジアルゲートに動水圧計と加速度計を設置し、動水圧の地震記録を実ダムゲートで初めて実測できた。それらの実測地震記録の解析と解析による検討を実施し、実ダムゲートに発生する動水圧の発生要因とそれによるゲート振動への影響を分析した結果、以下の知見を得た。

- 1) 空水時のクレストゲート扉体の振動は、門柱と概ね同じ加速度応答をしており、ゲート振動よりも堤体と一体で振動している門柱振動が支配的である。門柱に対するゲート自体の振動は、ダム堤体よりも高振動域でみられており、計測対象としたゲートの卓越振動数は約28Hzである。
- 2) 貯水時のクレストゲート扉体部の振動は空水時と大きく異なっており、ゲート水深が深くなるほど、門柱 a6'-s に対するゲート a11-s の加速度応答が増幅するとともに、ゲート a11-s の固有振動数が低下していく。これらは、ゲート貯水時の動水圧が付加質量として作用し、ゲート振動に大きな影響を与えたためと考えられる。
- 3) ゲート部動水圧の発生要因は、主にゲート水深の貯水と連成したゲート振動によるものと考えられる。特に、ゲート扉体部の脚柱で支えられている範囲(a10-s~a13-s)が上下流方向に概ね剛体振動していることが、動水圧の発生要因に大きく影響を与えていると考えられる。
- 4) ゲート水深が深くなると、ゲートと貯水の連成によるゲート振動が門柱振動への相互作用を大きく及ぼすと考えられる。すなわち、貯水時の動水圧は、ゲート振動に影響するだけでなく、門柱振動にも影響を与えていると考えられる。
- 5) ゲートモデルによる解析結果より、非圧縮流体でゲートと貯水の連成のみ考慮すれば、ゲート(扉体)振動とそれにより発生するゲート部動水圧を概ね再現できることが確認できた。したがって、実測記録と同様、ゲート部に発生する動水圧はゲート振動によるものが主であることが解析上でも確認できた。
- 6) ゲート、堤体、岩盤及び貯水が一体の3次元モデルによる解析結果では、堤体と異なるゲートの固有振動と、ゲートと門柱・堤体振動の相互作用を考慮できることを示した。

以上のとおり、本研究により、ゲート部の動水圧がゲート自体の振動により発生すること。逆に、ゲート振動は動水圧の影響を大きく受けていることを示した。これらの成果は、ゲートの耐震性能照査の精度向上に資する成果と考えられる。なお、本研究は小地震記録におけるゲート振動および動水圧の発生要因分析であり、大規模地震において同様な特性を示すかは明らかではない。さ

らに、これまでに国内外でクレストゲートに大きな地震被害が見られていない⁸⁾。そのことも踏まえ、今後、実測値では確認できていない大規模地震に相当する加速度を踏まえた動水圧に関する実験による検討も必要と考えられる。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター：改訂解説・河川管理施設等構造令，2004.1.
- 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) 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.
- 4) Westergaard, H.M. : Water pressures on dams during earthquakes, Trans. ASCE, Vol.98, 1933.
- 5) 塩尻弘雄：地震時のダムへの動水圧について，大ダム，No.99，pp.71-85，1982.3.
- 6) 柏柳正之，小田川昌史，中野歩：水力発電設備に作用する動水圧の特性とその影響，電力土木，pp.74-79，2012.1.
- 7) 土居 裕幸，田中 良英，大坪 祐介，中野 歩，中西 泰之，有賀 義明：実挙動観測結果を用いた洪水吐ゲートの動的解析モデルに関する検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4（地震工学論文集第 32 巻），I_601-I_608，2013.
- 8) 佐藤信光：ダムの地震被害実態に基づく耐震性能の考察と今後の課題，日本地震工学会・大会－2019 発表論文，2019.9（掲載予定）。

STUDY ON THE FACTOR OF DYNAMIC PRESSURE ON CREST GATE OF CONCRETE GRAVITY DAM AND SEISMIC RESPONSE DURING EARTHQUAKE

Masashi FUJITA, Nobuteru SATO, Seizo TANAKA and Harumichi KYOTOH

In the evaluation of seismic performance of dam, the earthquake response acceleration has been used, generally. Though it is useful to estimate a damage of dam body, it is not enough for dam gate which is flexible structure. The mechanism of generating hydrodynamic pressure due to the motion of gate and dam body that It has not been elucidated.

In this paper, we measured hydrodynamic pressure and acceleration on the gate during earthquake. For the measurement, a hydrodynamic pressure gauge and an accelerometer were installed on the gate. Based on these measurement and reproduction analysis, we analyzed about the influence of the hydrodynamic pressure on the gate against the seismic response of the gate.