

地震観測記録に基づく重力式ダムゲート振動と  
動水圧の発生要因に関する研究

2021年 3月

藤田 将司

地震観測記録に基づく重力式ダムゲート振動と  
動水圧の発生要因に関する研究

藤田 将司

システム情報工学研究科

筑波大学

2021年 3月

# 目 次

第1章 序 論	1
1.1 背景と目的	1
1.2 ダムゲート動水圧に関する既往研究の現状と課題	1
1.3 ラジアルゲートの被災事例	3
1.4 論文構成	5
第2章 地震観測記録によるダムゲート振動および動水圧の分析	8
2.1 はじめに	8
2.2 対象ダムゲートと観測の概要	8
2.3 地震観測記録の分析	15
2.3.1 空水時のゲート振動	15
2.3.2 貯水時のゲート振動	16
2.3.3 ゲート部動水圧	23
2.3.4 ゲート部動水圧と堤体部動水圧の発生要因の比較	26
2.3.5 ゲート振動と門柱振動の相互作用	31
2.4 まとめ	33
第3章 地震観測記録の再現解析による分析	35
3.1 はじめに	35
3.2 解析の概要	35
3.3 解析モデルおよび解析条件	36
3.3.1 解析モデルおよび解析ケース	36
3.3.2 動水圧の解析条件	41
3.4 解析結果	47
3.4.1 空水時の解析 (CASE1-1)	47
3.4.2 貯水時の解析 (CASE1-2: ゲート振動による動水圧発生状況)	47
3.4.3 貯水時の解析 (CASE1-3, CASE1-4: ゲート振動と動水圧の状況)	48

3.4.4	貯水時の解析 (CASE2-1:ゲートおよび堤体振動と動水圧の状況) . . . . .	50
3.4.5	貯水時の解析 (CASE2-2:ゲート部動水圧と堤体部動水圧の比較) . . . . .	52
3.5	アンカーレッジの影響検討 . . . . .	54
3.5.1	解析モデルおよび解析ケース . . . . .	54
3.5.2	解析結果 . . . . .	59
3.6	まとめ . . . . .	63
<b>第4章</b>	<b>感度解析による分析</b> . . . . .	<b>66</b>
4.1	はじめに . . . . .	66
4.2	3次元 FEM モデルによる再現解析 . . . . .	66
4.2.1	解析モデルおよび解析条件 . . . . .	66
4.2.2	解析ケースおよび解析結果 . . . . .	68
4.3	3次元 FEM による感度解析 . . . . .	70
4.3.1	クレストゲートの諸元と感度解析ケース . . . . .	70
4.3.2	セットバックによる影響 . . . . .	74
4.3.3	ゲート振動によるゲート部動水圧の発生にゲートの3次元形状が及ぼす 影響 . . . . .	78
4.4	まとめ . . . . .	83
<b>第5章</b>	<b>大規模地震に対する耐震性能照査への適用性分析</b> . . . . .	<b>86</b>
5.1	はじめに . . . . .	86
5.2	クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法の提案 . . . . .	88
5.2.1	耐震性能照査方法の考え方 . . . . .	88
5.2.2	クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法 (詳細法) の提案 . . . . .	90
5.2.3	クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法 (簡易法) の提案 . . . . .	92
5.3	クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法の今後の課題 . . . . .	94
5.4	まとめ . . . . .	96
<b>第6章</b>	<b>結 論</b> . . . . .	<b>98</b>
6.1	本研究で得られた成果 . . . . .	98

6.2 今後の課題と展望 . . . . . 100

謝 辞 . . . . . 102

# 第1章 序 論

## 1.1 背景と目的

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と考えられている<sup>1)</sup>。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観測記録がなく<sup>2)</sup>、ゲートの加速度を測定した観測記録<sup>3)</sup>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。それらの地震観測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。また、これらの検討結果を踏まえ、耐震性能照査において、より実態に近い動水圧やゲート振動を表現できる解析方法を提案した。

## 1.2 ダムゲート動水圧に関する既往研究の現状と課題

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発生する動水圧に関する既往研究、現状と課題を以下(1)、(2)および(3)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<sup>4)</sup>や耐震性能照査<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>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<sup>4)</sup>において、Westergaardの式<sup>7)</sup>を用いて計算することが定められている。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」、「地震動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<sup>8)</sup>。また、コンクリートダムの動的解析において考慮する動水圧は、近似的に貯水を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<sup>9)</sup>

## (2) ダムゲートにおける動水圧算出の現状

ダムゲートの設計における地震時動水圧は、(1)で示した Westergaard の式により、ダム堤体上流面の動水圧をダム底面までの高さを考慮して算定し、そのうちゲートの高さ方向の範囲にかかる動水圧を抽出している。

また、耐震性能照査における大規模地震時にゲート部に発生する動水圧は、ゲートもダム堤体と一体となった振動と仮定したダム堤体の応答を考慮した方法により堤体上流面に作用する動水圧を算出し、そのうちゲート部にかかる動水圧を用いている事例が多い<sup>6)</sup>。さらに、ゲートは堤体上流面よりも少し下流側に設置されており、堤体上流面の振動によるゲート部動水圧が低減することを考慮している。そのため、堤体と異なるゲートの固有振動による動水圧は考慮されていない状況にある。それらの元になった研究論文の事例として、以下がある。

山口ら<sup>10)</sup>は、ダム堤体の中位標高に設置したゲート部の振動を想定して、解析的検討により検討している。その結果、ゲートが堤高に比較して小さい場合、ゲートに作用する地震時動水圧においては、堤体全体振動により発生する動水圧と比較して、ゲート部の堤体振動に対する相対振動により発生する動水圧は小さいとの結果を得ている。しかし、クレストゲート等の複数のゲート位置や大きさに関する解析による検討は行われてはいない。

中山ら<sup>11)</sup>は、水中振動台を用いて、堤体上流面よりゲートが下流側に設置されている場合、上流面に設置されている場合よりも動水圧が低減することを、堤体とゲートの剛体振動を前提とした実験的検討を実施して確認し、その影響を、実用的評価式として提案した。

このように、ダムゲートの動水圧について検討された研究は少ない状況にあるが、実際のダムゲートは、堤体の設置位置・大きさ・ゲート数も異なり、ダム軸方向の堤体およびゲート形状による影響も受けると考えられ、それらの様々なケースに対応できる研究成果が十分ではない。また、解析や実験による検討に対し、実ダムによる実測記録による検討事例は極めて少ない状況にある。

### (3) ダムゲートにおける動水圧算出の課題

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、そのことが動水圧の発生にどのような影響を及ぼしているかについては、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<sup>1)</sup>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。ダム堤体、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した結果、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<sup>3)</sup>は、重力式コンクリートダムの堤頂部の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している。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しているが、脚柱部等ははり要素で簡易的にモデル化している。しかし、これまでに加速度記録も限定した水位での記録が小数ある程度で、地震時のゲート部動水圧の記録はなく、観測と解析により実態を解明できていない。

これらを踏まえて、本研究ではゲートに動水圧計と加速度計を設置し、地震観測記録を取得し、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、ゲート上流の常時貯水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地震観測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。

### 1.3 ラジアルゲートの被災事例

これまでに国内外のクレストゲートで大きな地震被害事例は見られていない<sup>12),13)</sup>。しか



し、中間標高の洪水吐におけるラジアルゲートの地震被害事例として、イランのセフィールドルッドダム（Sefid-Rud）における事例<sup>14),15)</sup>がある。同ダムでは、1990年6月21日のマンジール地震（Manjil）において、動水圧の影響により、ラジアルゲートの脚柱のウェブが座屈し、それに伴い、ゲートのずれの発生や漏水増加などの被害が発生している。

また、地震以外の被災要因によるゲートの被災事例としていくつかの報告事例がある。そのうち、ゲートの動水圧が一因と考えられている主な事例を以下に示す。

和知ダムにおいては、試験湛水中の1967年にクレストラジアルゲートが崩壊し、ダム下流に流出する事故が発生している。事故調査報告書<sup>16)~18)</sup>によると、ゲートの破壊は、ゲートを全閉操作した際に発生しているが、破壊の経過は、まず、外力による脚柱の座屈が3本の脚柱に同時に起り、ゲートが下流側にずれるなどし、最終的にゲートの流出につながったと推定されている。ゲート崩壊の主要要因は、ゲートの脚柱全体としての強さが水圧に対して十分でなく、座屈に至ったと考えられている。

アメリカのフォルソンダム（1955年完成）においては、通常の運用中の1995年にクレストラジアルゲートが損傷し、最大約1,100m<sup>3</sup>/sの制御できない放流をする事故が発生している。事故報告書<sup>19)</sup>によると、重要な構造部材の強度と剛度が不十分であったことと、経年でのトラニオンピンの腐食により摩擦により、ゲートの脚柱や斜材への荷重が増加したことが主要因とされている。なお、フォルソンダムの設計時は、ゲート構造の設計荷重にトラニオンの摩擦が考慮されていなかったことも問題点とされている。また、事故報告書では、その他の考えられる事故原因として、ゲート振動の可能性なども挙げられている。

和知ダムとフォルソンダムの事故事例の共通点は、いずれも放流中のゲートを開閉操作した際に発生している。石井、阿南らの研究<sup>20)~23)</sup>において、ゲートの微小開度時に自励振動が発生し動的に不安定になると、振動振幅が増大し、それと同時に動水圧も増大すると指摘がある。

以上の事故事例を踏まえると、クレストラジアルゲートでは地震時の事故事例がないものの、ゲートに発生する地震時動水圧の影響は、ゲートの安全性に対して重要な要素の一つと考えられる。そのため、地震時のゲートに発生する動水圧の実態解明が必要であると考えられる。

## 1.4 論文構成

本論文は「地震観測記録に基づく重力式ダムゲートの動水圧の発生要因を考慮した耐震性能照査に関する研究」と題し、6章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章は、研究の背景と目的を述べるとともに、その前提となったダムゲートの地震時動水圧に関する既往研究と課題、ダムのクレストラジアルゲートの被災事例を紹介した。また、研究の概要と本論文の構成を示した。

第2章では、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、実ダムゲートで地震時の加速度に加え、動水圧を初めて記録した。また、第3章では、実ダムの地震観測記録を解析により再現した。再現解析では、より実態を反映できるよう、ゲート、堤体、岩盤及び貯水一体の3次元モデルも用いて、地震応答解析を実施した。第2章の地震観測記録の分析および、第3章の再現解析による分析により、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について述べる。

第4章では、一般的なクレストゲートにおける動水圧の発生要因について、ゲート等の各種諸元の違いによる影響について、感度解析結果により分析した結果を述べる。

第5章では、動水圧の発生要因、ゲートや門柱振動の動水圧による影響を踏まえた大規模地震に対する耐震性能照査方法の適用性を分析するとともに、その課題について述べる。

第6章では、全体を総括した本論文の結論と、今後の課題および展望について述べる。

## 第 1 章の参考文献

- 1) 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.
- 2) 経済産業省原子力安全・保安院; 発電設備耐震性能調査報告書, 2012
- 3) 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), pp.I\_601-I\_608, 2013.
- 4) (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.
- 5) 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.
- 6) 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) Westergaard, H. M.: Water pressures on dams during earthquakes, Trans. ASCE, Vol.98, 1933.
- 8) 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.
- 9) 永山功, 自閑茂治: 重力ダムの動的挙動特性とその簡易耐震設計法, 大ダム, No.119, pp.14-34, 1987.
- 10) 山口嘉一, 佐々木隆, 金縄健一, 高須修二, 永山功: ダムゲートの地震応答解析における地震時動水圧の算出方法に関する検討, ダム技術, No.227, pp.60-68, 2005.8.
- 11) 中山義紀, 大町達夫, 井上修作: ダムゲートに作用する地震時動水圧の実用的評価式の提案, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.959-969, 2008.
- 12) 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, 日本地震工学会第 14 回年次大会梗概集, 2019.
- 13) 中山義紀, 大町達夫, 井上修作: ダムゲート系構造物の地震被害事例に基づく耐震性能照査の手順と要点, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.386-395, 2007.
- 14) Jalal Zadeh, A.A, Fouladi Nashta, C.: Measures on Gated Spillway of Sefidrud and Marun Dams- Case Studies, 20th International Congress on Large Dams, pp. 599-612, 2000.
- 15) Design Feature of Dams to Resist Seismic Ground Motion, Bulletin 120, ICOLD, 2001.
- 16) 和知ダムゲート事故技術調査委員会: 和知ダムゲート事故原因調査報告, 1968.
- 17) 川村幸司, 中野俊次: 和知ダムゲートの事故原因調査報告の概要, 土木技術資料, Vol.10, No. 9, pp. 26-32, 1968.

- 18) 矢野勝正：和知ダムのゲート事故について，京大防災研究所年報，第 11 号 B，pp. 203-219，1968.
- 19) Forensic Report Spillway Gate 3 Failure Folsom Dam, Bureau of Reclamation, 1996.
- 20) 阿南景子，石井徳章，山崎雅裕：フォルソンダムゲートのせき板の回転運動によって生じる流体圧力，日本機械学会論文集（B 編），第 66 巻，652 号，pp. 3116-3123，2000.
- 21) 石井徳章，阿南景子，巻幡敏秋，奥達也，大原健史：我国におけるテンターゲートの崩壊事故，構造工学論文集，Vol.53A，pp.589-596，2007.
- 22) 阿南景子，ZHANG Shuzhe：モデルゲートの自励振動時の圧力測定，日本機械学会関東支部・精密工学会，山梨講演会講演論文集，2015.
- 23) 阿南景子，石井徳章，Knisely Charles W.：テンタゲートの流水方向固有振動モードの上流側水位に対する非依存性，日本設計工学会論文集，第 52 巻，第 10 号，pp. 609-620，2017.

## 第2章 地震観測記録によるダムゲート振動および動水圧の分析<sup>1)</sup>

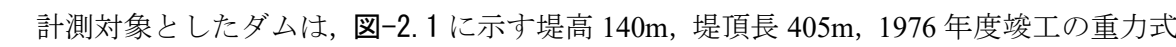
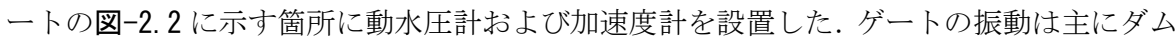
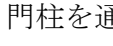
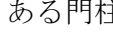
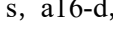
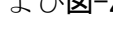
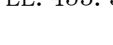
### 2.1 はじめに

前章で述べたとおり，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観測記録がなく<sup>2)</sup>，ゲートの加速度を測定した観測記録<sup>3)</sup>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および堤体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．

本章では，それらの地震観測記録を分析し，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，また，ゲート振動と堤体振動の違いと動水圧の発生状況の違いを分析し，それらがゲート振動に与える影響をとりまとめる．

### 2.2 対象ダムゲートと観測の概要

計測対象としたダムは，に示す堤高 140m，堤頂長 405m，1976 年度竣工の重力式コンクリートダムである．同ダムでは，管理開始時から堤体基礎 L1 と門柱（堤体天端）T1 の加速度計で計測（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 門の同型式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-2.1 に示す．同ゲートのに示す箇所に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，およびに示すとおり，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．加速度計（a15-s, a16-d, a17-v）は T1 と同じ位置である．動水圧計および加速度計の設置状況をおよびに，主要諸元を表-2.2 に示す．また，動水圧計測状況（貯水時：常時満水位 EL. 453.3m 付近時）をに示す．

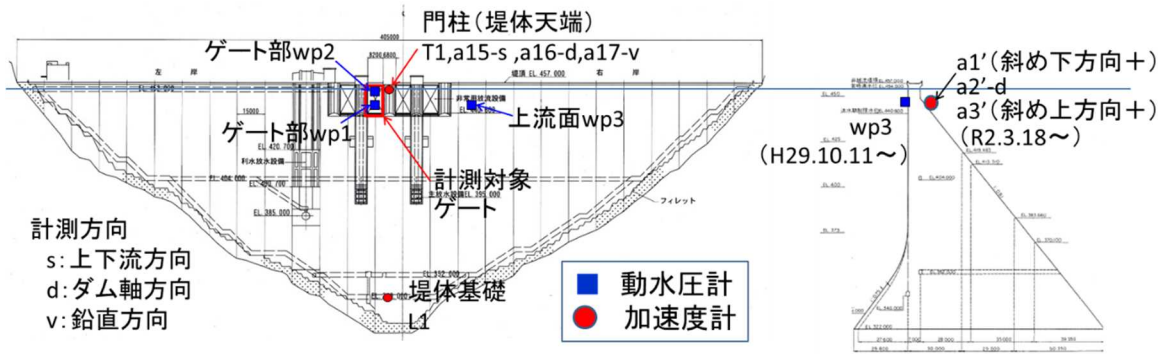


図-2.1 計測対象ダムの上流面図と堤体計測箇所

表-2.1 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
質量	72Mg

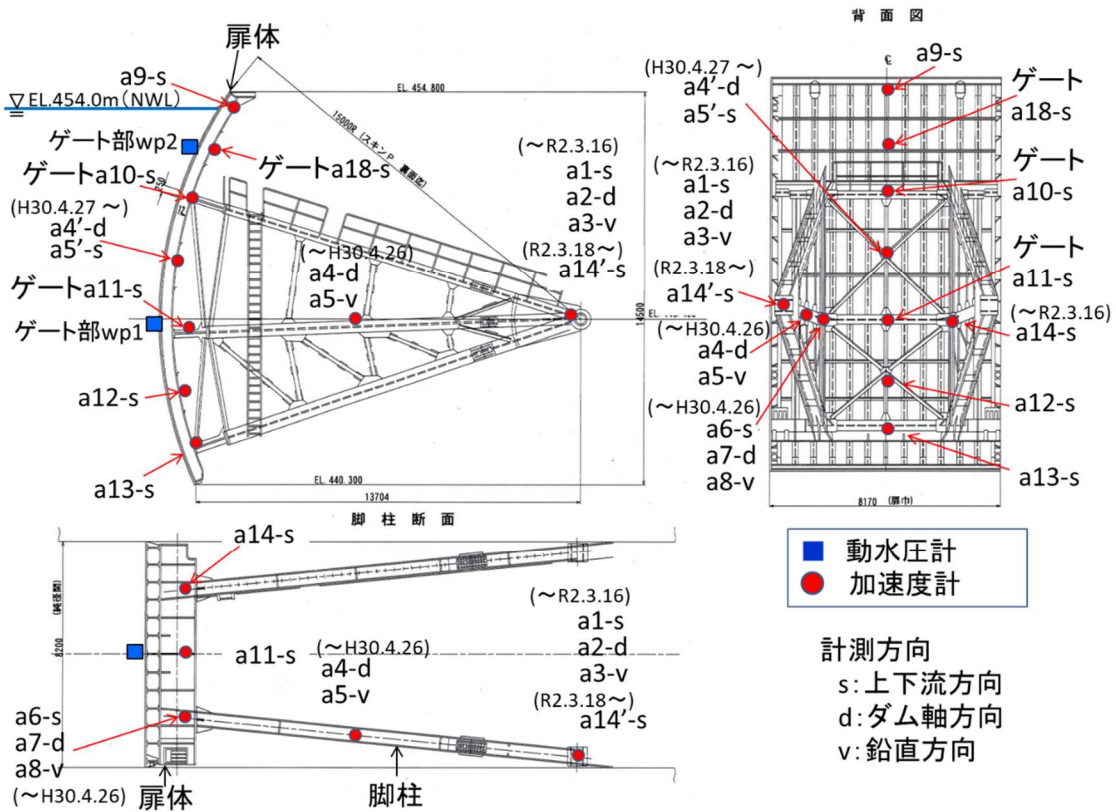
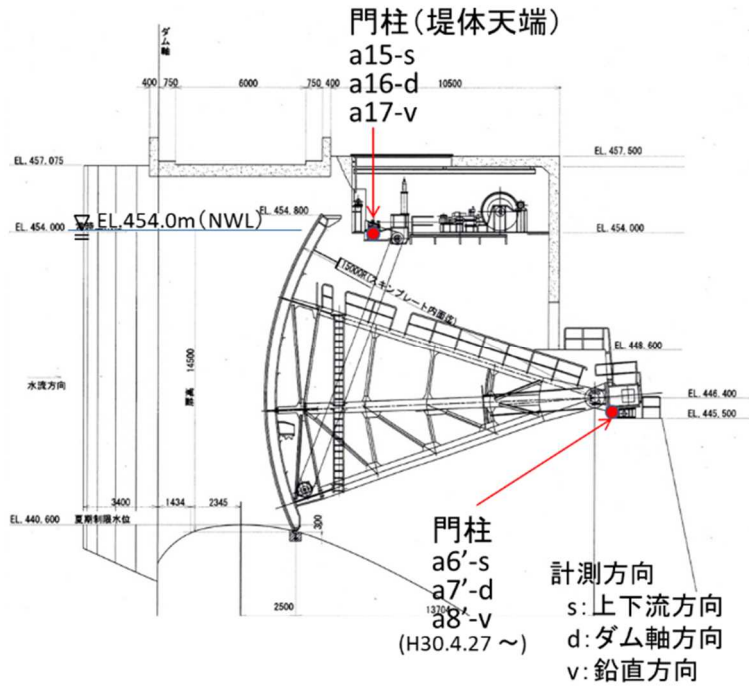
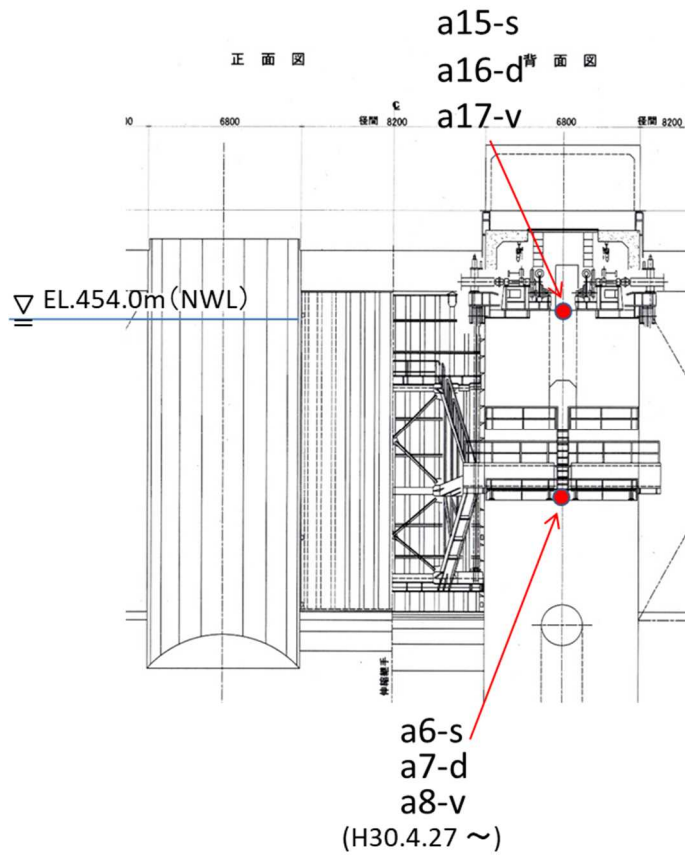


図-2.2 ゲートの計測箇所

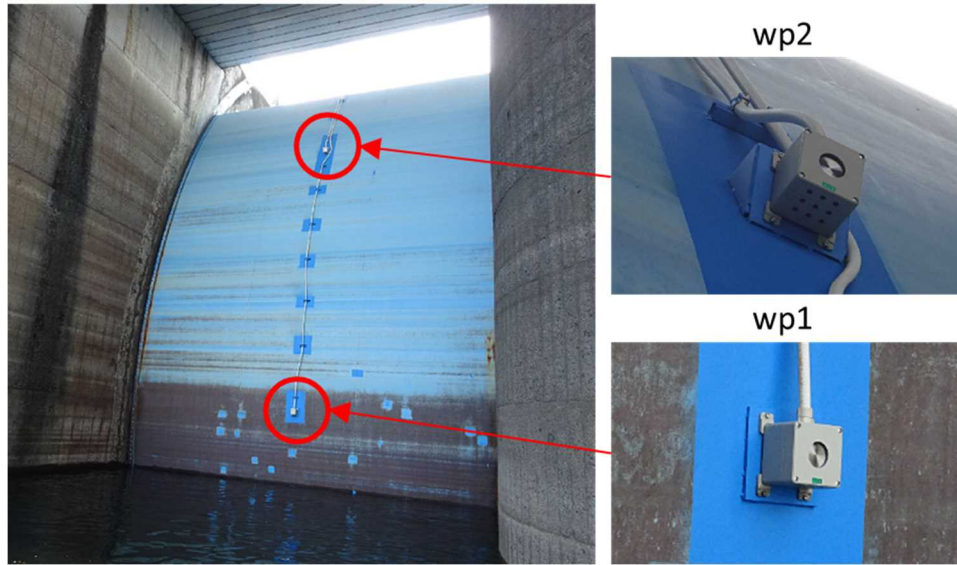


(a) 横断面

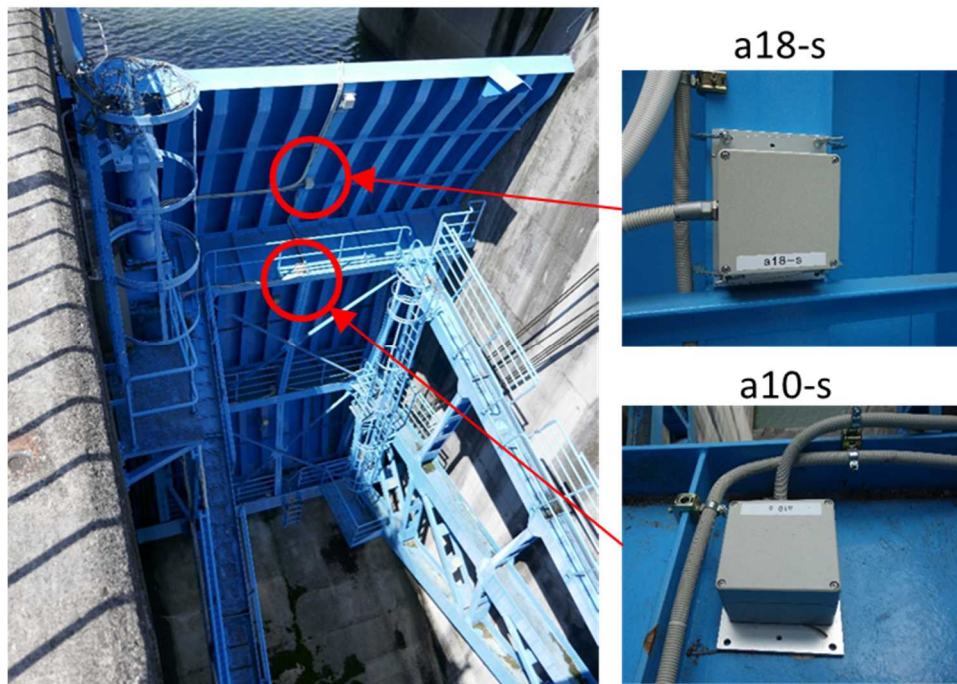


(b) 下流面

図-2.3 門柱(堤体天端, トラニオン付近)の計測箇所



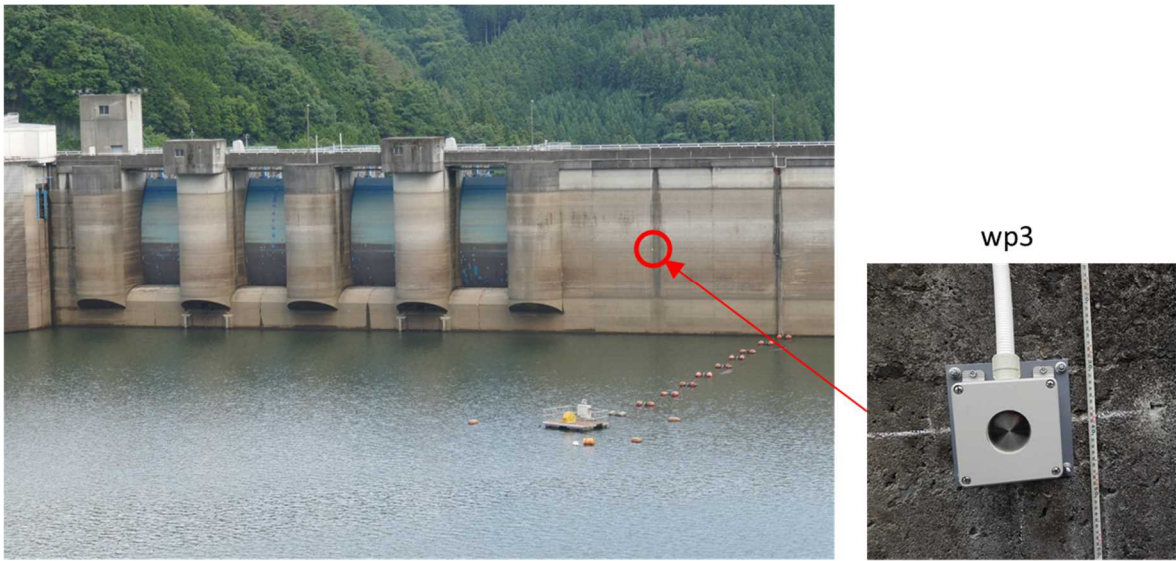
(a) 動水圧計設置状況



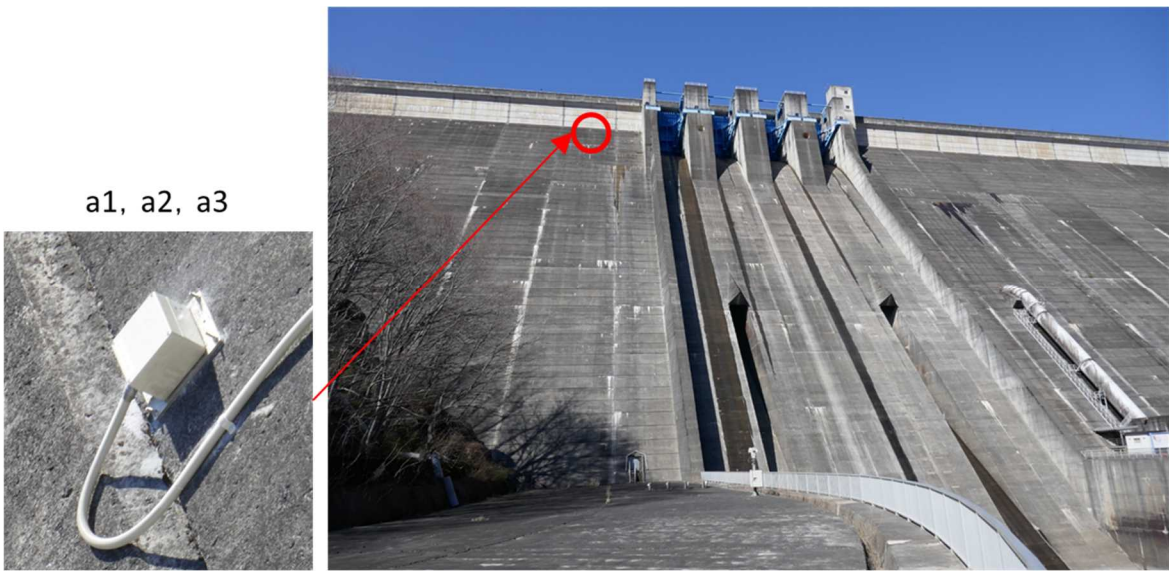
(b) 加速度計設置状況

図-2.4 動水圧計および加速度計の設置状況（ゲート部）





(a) 動水圧計設置状況（空水時）



(b) 加速度計設置状況

図-2.5 動水圧計および加速度計の設置状況（堤体部）

表-2.2 動水圧計と加速度計の主要諸元

動水圧計 (フラッシュ ダイヤフラム 型圧力計)	容量	500kPa
	定格出力	約1.5mV/V 約 $3000 \times 10^{-6}$ (ひずみ出力 K=2.00)
	固有振動数	約4.5kHz (応答周波数 約400Hz)
加速度計 (サーボ型)	フルスケール	$\pm 3000 \text{cm/s}^2$
	応答周波数	DC~250Hz



図-2.6 動水圧計測状況（貯水時：常時満水位 EL.453.3m付近時）

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 a4'-d, a5'-s, a6'-s, a7'-d, a8'-v の位置に移設した。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、動水圧計 wp3 については 2017 年 10 月 11 日から計測している。また、a1-s, a2-d, a3-v, a14-s の 4 箇所については、2020 年 3 月 16 日~3 月 18 日に a1', a2-d, a3', a14-s の位置に移設した。なお、a1'および a3'は、堤体下流面の勾配がある箇所に設置したため、両計器の観測値から、上流方向および鉛直方向を算出し、それぞれ a1a3-s および a3a1-v と整理した。各計測については、2021 年 3 月現在も継続しているが、本論文では、2020 年 9 月末までの観測記録で整理した。

表-2.3 にゲートの観測期間での主な地震として、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  $10 \text{cm/s}^2$  以上となる

表-2.3 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 10cm/s<sup>2</sup> 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 (cm/s <sup>2</sup> )				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	堤体 a1a3-s	ゲート部 wp1	ゲート部 wp2	堤体部 wp3			
1	2015/7/6 18:30	434.52	0.00	-3.3	25.1													4.1	68
2	2015/7/10 1:15	435.86	0.00	2.1	-19.7													4.4	68
3	2015/8/6 18:22	437.25	0.00	-9.7	-93.8													5.2	112
4	2015/8/14 5:14	435.54	0.00	1.5	-11.6													5.1	196
5	2015/9/2 16:17	439.67	0.00	-2.1	-18.2													3.8	66
6	2015/9/12 5:49	440.22	0.00	2.4	16.1													5.2	117
7	2015/10/1 20:11	432.11	0.00	-1.5	-12.8													3.9	128
8	2015/10/16 5:36	429.28	0.00	3.0	-13.6													3.0	11
9	2015/10/21 15:05	429.22	0.00	-2.6	23.7													5.3	183
10	2015/11/7 22:45	429.14	0.00	4.5	-37.1													4.9	81
11	2015/11/22 8:20	429.40	0.00	-1.5	-13.6													4.8	118
12	2015/12/11 21:33	429.13	0.00	-3.3	-16.9													3.7	16
13	2016/1/15 4:29	437.50	0.00	-3.8	26.5													4.3	108
14	2016/3/31 11:48	444.01	3.71	-1.9	-14.8													4.4	77
15	2016/4/14 15:39	448.38	8.08	3.3	-19.2													3.4	12
16	2016/5/7 6:37	453.20	12.90	-1.3	10.4													3.3	13
17	2016/5/16 21:23	453.12	12.82	3.6	-26.8													5.5	73
18	2016/6/7 3:15	443.90	3.60	-86.1	-561.4													3.5	4
19	2016/6/12 7:54	439.39	0.00	-1.9	-17.2													4.8	78
20	2016/7/9 6:28	433.08	0.00	-1.7	14.9													4.4	22
21	2016/7/17 13:24	436.61	0.00	-3.0	29.5													5.0	77
22	2016/7/20 7:25	439.30	0.00	3.4	22.6													5.0	74
23	2016/7/27 23:47	439.76	0.00	-4.6	-40.0													5.4	111
24	2016/8/19 21:08	439.88	0.00	2.1	18.1													5.4	157
25	2016/8/27 22:46	439.84	0.00	2.1	18.8													4.1	68
26	2016/9/7 13:29	439.62	0.00	-2.7	28.1													4.9	72
27	2016/9/13 19:12	439.86	0.00	2.4	21.3													4.9	78
28	2016/10/19 23:40	429.11	0.00	2.3	-18.1													3.9	77
29	2016/10/20 20:12	429.11	0.00	8.8	-53.5													3.8	13
30	2016/11/22 6:00	429.16	0.00	-5.2	-32.3													7.4	218
31	2016/11/24 6:24	429.23	0.00	-1.1	-10.1													6.2	189
32	2016/12/26 4:52	429.56	0.00	1.6	13.8													4.2	78
33	2017/2/26 5:12	422.07	0.00	-2.0	15.3													4.0	54
34	2017/2/28 16:49	422.05	0.00	-1.4	13.6													5.7	207
35	2017/4/12 3:11	429.64	0.00	-6.1	38.1													4.6	77
36	2017/6/5 15:40	449.10	8.80	2.6	-17.1													3.4	13
37	2017/6/19 1:24	440.87	0.57	-1.4	12.8													3.8	65
38	2017/7/21 16:08	436.11	0.00	1.2	-10.9													4.4	108
39	2017/8/2 2:02	439.04	0.00	-5.3	-43.7													5.5	107
40	2017/8/2 7:16	439.08	0.00	1.8	-20.0													4.6	74
41	2017/8/10 9:36	440.08	0.00	-1.4	11.4													5.0	105
42	2017/8/27 11:26	439.81	0.00	-1.1	12.0													4.8	110
43	2017/10/6 23:57	442.06	1.76	3.0	28.7													5.9	170
44	2017/11/2 22:31	453.30	13.00	-2.5	16.7													3.5	0.7
45	2018/1/6 0:54	453.24	12.94	1.7	10.4													3.2	0.6
46	2018/2/18 22:29	450.16	9.86	6.4	-25.8													2.0	0.8
47	2018/2/26 1:29	449.27	8.97	1.2	11.3													1.1	*3
48	2018/2/27 8:08	449.11	8.81	2.2	-13.0													1.8	0.4
49	2018/3/30 8:17	453.21	12.91	3.7	19.6													3.8	0.8
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									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									5.2	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*4	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
57*4	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
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
59	2019/1/14 13:23	450.90	10.60	-5.3	-40.5	29.2	87.7	90.4	120.3									4.7	1.7
60	2019/6/8 12:46:11	452.00	11.70	1.5	-11.4	6.5	29.1	27.6	35.4									1.8	0.3
61	2019/6/17 8:00:29	450.33	10.03	3.9	-30.1	19.6	68.1	45.7	110.3									3.8	1.4
62	2019/7/28 3:32:16	440.41	0.00	-1.8	-12.8	10.0	11.0	13.1	21.5									6.6	417
63	2019/8/4 19:23:42	440.49	0.00	-2.9	17.0	13.0	14.0	13.9	20.3									*3	6.4
64	2019/9/30 1:02:50	441.22	0.92	-2.4	19.2	12.7	18.1	27.2	63.0									*3	4.3
65	2019/11/4 11:50:06	453.15	12.85	-1.7	-11.4	7.5	24.1	26.8	24.1									1.4	0.3
66	2019/11/8 18:18:44	453.16	12.86	2.6	15.2	9.7	49.0	42.3	48.0									3.2	0.6
67	2019/11/22 5:24:02	453.21	12.91	-1.8	16.7	9.4	32.6	28.7	46.8									1.7	0.4
68	2019/12/3 10:18:16	453.17	12.87	-10.8	94.0	66.2	191.0	168.2	151.8									13.3	2.1
69	2019/12/4 10:39:11	453.15	12.85	1.4	12.7	9.4	42.7	35.8	26.3									2.8	0.5
70	2019/12/4 19:35:14	453.12	12.82	-1.3	-11.2	6.6	26.8	25.5	26.3									2.0	0.4
71	2020/1/14 4:54:02	453.23	12.93	4.5	-24.2	15.6	74.5	80.6	77.1									4.8	1.0
72	2020/2/12 19:37:48	453.23	12.93	1.9	12.7	9.9	31.7	28.5	33.5									2.4	0.5
73*4	2020/4/12 0:45:00	453.20	12.90	5.6	50.8	35.4	130.9	107.2	92.9	33.2								8.8	1.5
74	2020/4/26 9:49:25	453.15	12.85	2.9	17.8	12.3	64.9	71.8	56.6	14.3								4.2	0.9

- \*1 ゲート水深は、越流部 EL.440.6m を超えた場合、ゲート下端 EL.440.3 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
- \*4 第3章および第4章の解析に用いた記録

74 地震を選定し、本研究の分析対象とした。地震観測記録は、ゲート扉体部に貯水がかかっていない時（以下、「空水時」という。）と、貯水がかかっている時（以下、「貯水時」という。）の様々な貯水位で記録ができた。2.3 に、地震観測記録より解明されたゲート挙動について示す。

## 2.3 地震観測記録の分析

### 2.3.1 空水時のゲート振動

空水時の代表的な地震観測記録（2018/9/14 14:35 地震）のゲートと門柱の加速度時刻歴を図-2.7 に、また、フーリエスペクトルを図-2.8 に示す。図-2.7 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、最大加速度応答倍率（ゲート a11-s/門柱 a6'-s）が約 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-2.8 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-2.9 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、空水時におけるゲートの上下流方向の固有振動数は本ゲートでは約 28Hz と考えられる。

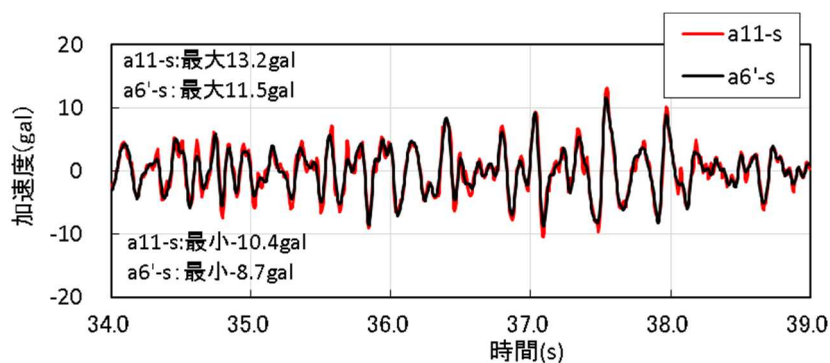


図-2.7 地震観測記録（加速度時刻歴）空水時（2018/9/14 14:35 地震）

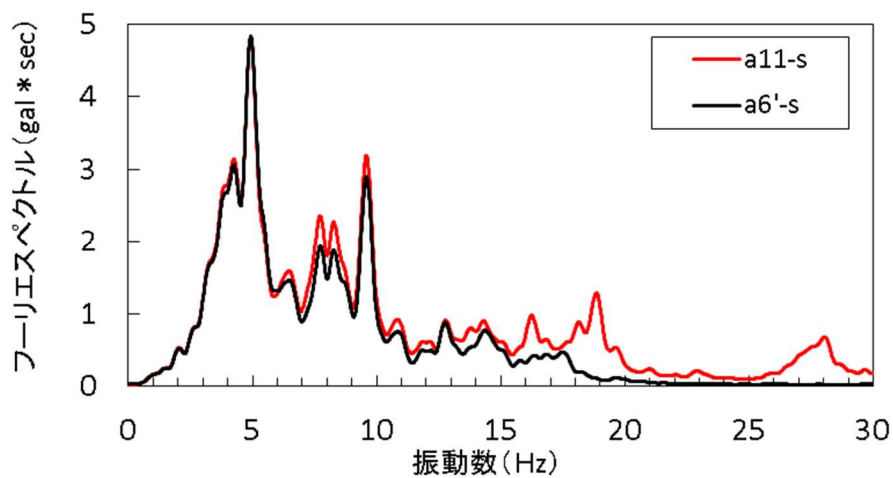


図-2.8 加速度フーリエスペクトル 空水時 (2018/9/14 14:35 地震)

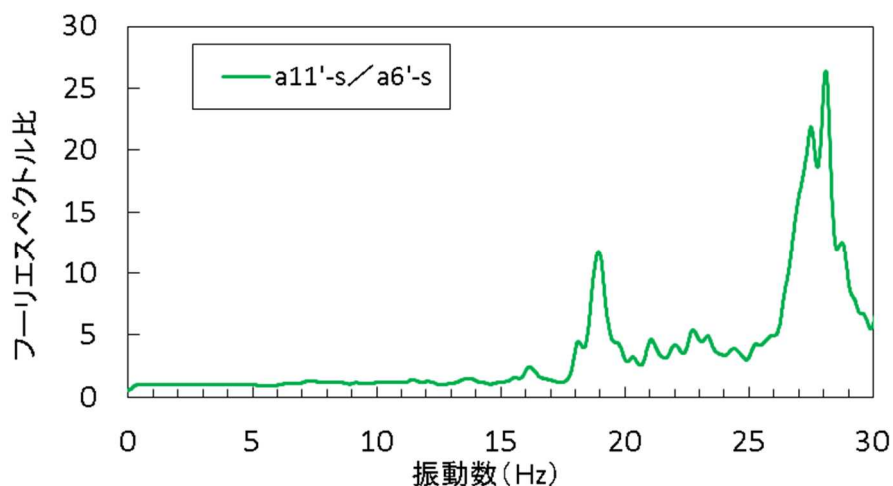


図-2.9 加速度のフーリエスペクトル比 空水時 (2018/9/14 14:35 地震)

### 2.3.2 貯水時のゲート振動

#### (1) ゲートの加速度応答

貯水時の代表的な地震観測記録 (2018/11/27 8:34 地震) の加速度時刻歴を図-2.10 に示す。また、表-2.3のうち、門柱 a6'-s の記録がある 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 (ゲート a11-s / 門柱 a6'-s) とゲート水深

の関係を図-2.11 に示す。図-2.10 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、最大加速度応答倍率（ゲート a11-s/門柱 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-2.11 より、門柱とゲートの最大加速度応答倍率（ゲート a11-s/門柱 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、ゲート水深 13m 程度の満水時には、約 3~4 倍となった。

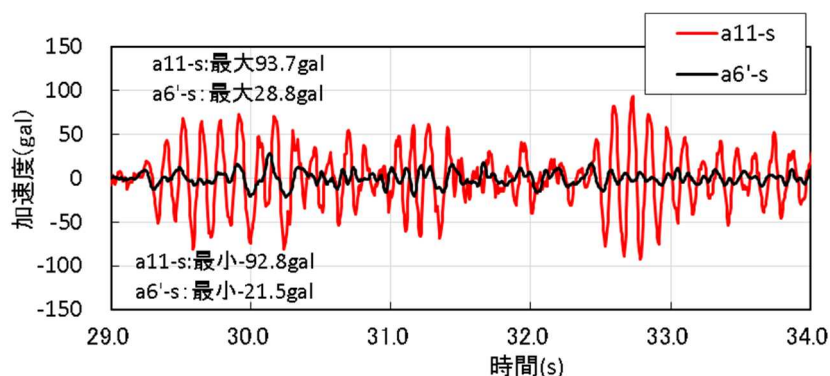


図-2.10 地震観測記録（加速度時刻歴）貯水時（ゲート水深 12.92m）  
（2018/11/27 8:34 地震）

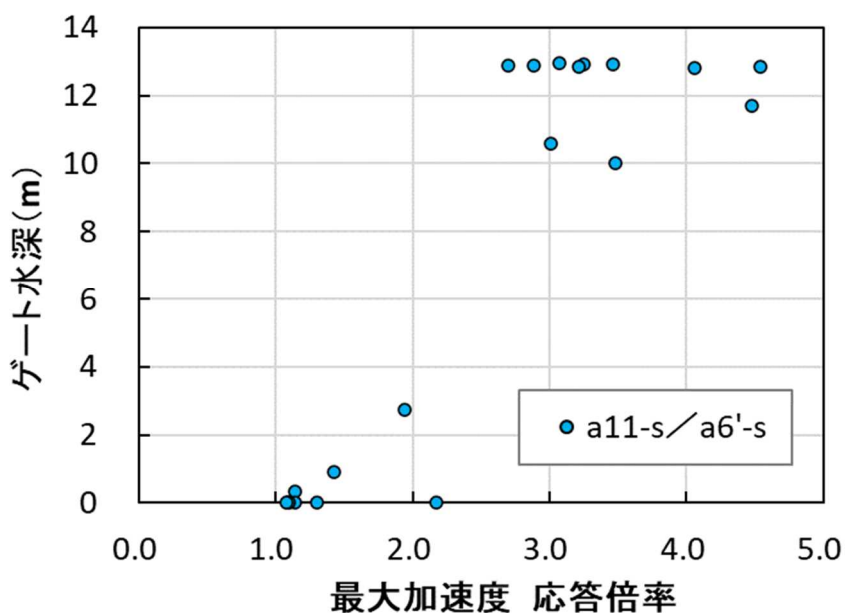


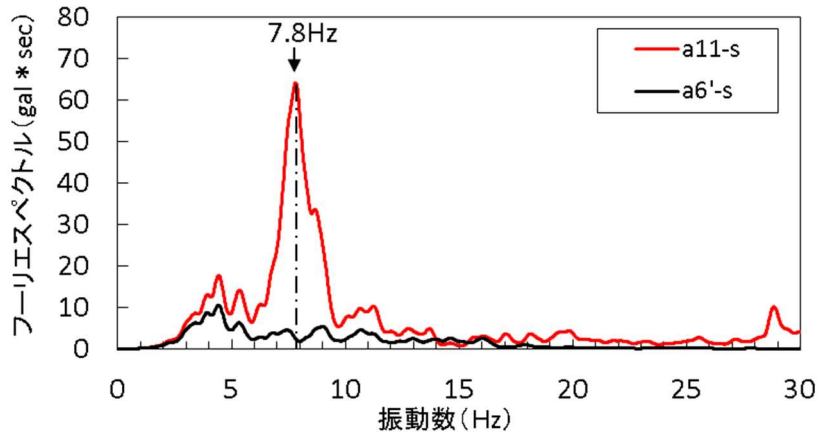
図-2.11 門柱に対するゲート扉体の最大加速度応答倍率（ゲート a11-s/門柱 a6'-s）  
とゲート水深の関係（空水時～貯水時）

## (2) ゲートの卓越振動数と振動モード

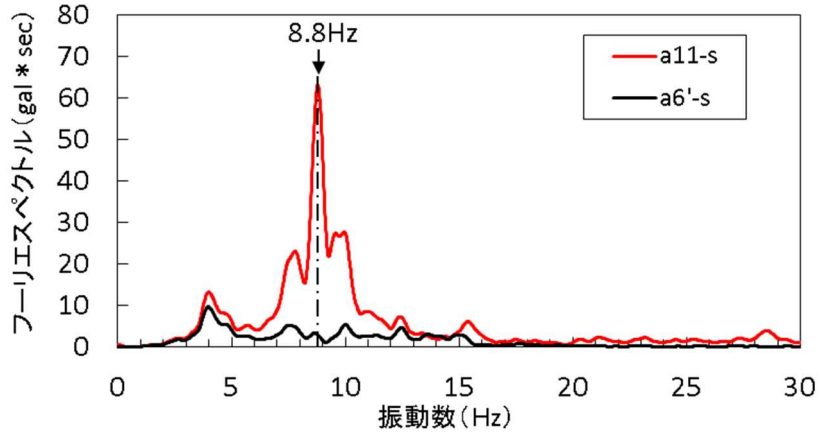
貯水時の満水、中間、低水位における代表的な地震観測記録のフーリエスペクトルを図-2.12に示す。図-2.12(a)のゲート a11-s のフーリエスペクトルに着目すると、満水付近のゲート水深 12.92m での卓越振動数は約 7.8Hz である。また、図-2.12(b)および図-2.12(c)に示すとおり、ゲート水深が 10.60m および 2.73m に低下すると、卓越振動数がそれぞれ約 8.8Hz と約 22Hz に変化し、水位が低くなると振動数が高くなる。また、ゲート水深が高い図-2.12(a)の 門柱 a6'-s のフーリエスペクトルに着目すると、図-2.8 の空水時と同様に約 4Hz で卓越しているが、図-2.12(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-2.12(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 の振幅が低減していることがわかる。

上記同様に、各水位毎の地震観測記録における卓越振動数を算出した結果を、図-2.13 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。

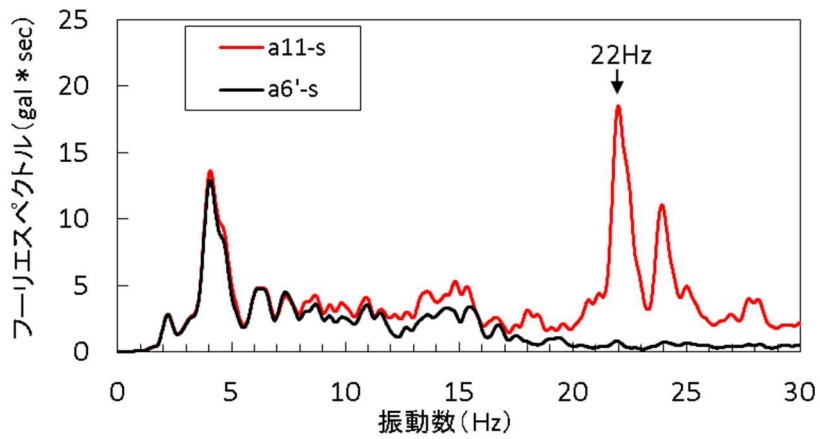
また、加速度計は常時連続計測しており、洪水により貯水位が2日間で大きく変化した期間（2017年10月22日15時～10月24日23時）において1時間毎の記録をフーリエ変換し、卓越振動数を把握した結果を図-2.13の常時微動 a11-s のとおり示す。図-2.13の常時微動（ポータブル微動計）a11-s 付近の結果については、図-2.14に示すとおり、ゲートの横主桁にポータブル微動計を設置して計測し、フーリエ変換した。観測日は2015年4月27日15時（ゲート水深13.40m）、2018年6月8日14時（ゲート水深7.21m）、2018年7月10日14時（ゲート水深0m）、2019年6月13日14時（ゲート水深11.91m）の4回である。それらの計測結果は、地震観測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、地震観測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。



(a) ゲート水深 12.92m (2018/11/27 8:34 地震)



(b) ゲート水深 10.60m (2019/1/14 13:23 地震)



(c) ゲート水深 2.73m (2018/6//17 15:27 地震)

図-2.12 加速度フーリエスペクトル 貯水時





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-2.15 に示す。また、ゲートの横主桁に設置した加速度計が最も多かった 2018 年 4 月 27 日までの代表地震における、ゲートの卓越振動数（約 7.6Hz）における振動モードを図-2.16 に示す。これらの振動モードは、卓越振動数における各部材点のフーリエ振幅と位相差により対象部材の振動モードを位相差 45° ごとに表現したものである。図-2.15 および図-2.16 より、脚柱で支えられて剛性が比較的高い箇所（ゲート a10-s, a11-s, a13-s）とその間の箇所（ゲート a5'-s, a12-s）で振幅比が若干異なるものの、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。

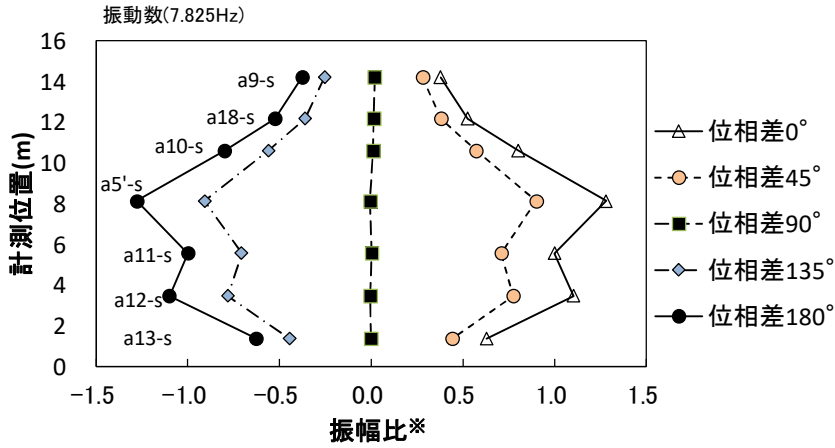
以上より、ゲートの主要な振動は、1 質点系の単純な振動（1 質点がバネにより上下流方向に振動）と同様の振動をしていると考えられる。そのため、卓越振動数変化の要因は、脚柱の剛性とゲート自重が変わらないことから、ゲートの貯水時の動水圧による付加質量増減によるものであると考えられる。

固有振動数の理論値は、式(2.1)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、単位幅当たりの付加質量 $m_d$ にゲートの純径間 $W$ を乗じた付加質量が約 856Mg と算出できる。比較として Westergaard の式(2.2) <sup>4)</sup>で水深をゲート水深と考えた場合の単位幅当たりの付加質量 $m_d$ にゲートの純径間 8.2m を乗じて、ゲート水深による付加質量を算出すると 798 Mg であり、観測値と式(2.1)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。

$$f_2 = f_1 \sqrt{\frac{(M_0 + m_d W)}{M_0}} \quad (2.1)$$

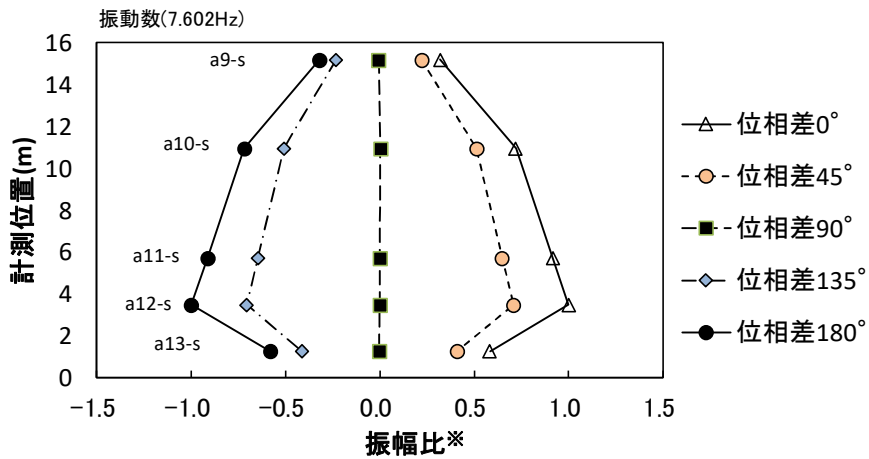
$$m_d = \frac{7}{12} w_0 h^2 \quad (2.2)$$

ここに、 $M_0$ ：ゲートの質量、 $m_d$ ：単位幅当たりの付加質量、 $W$ ：ゲートの純径間、 $f_1$ ：満水時の固有振動数、 $f_2$ ：空水時の固有振動数、 $w_0$ ：水の単位重量、 $h$ ：ゲート水深である。

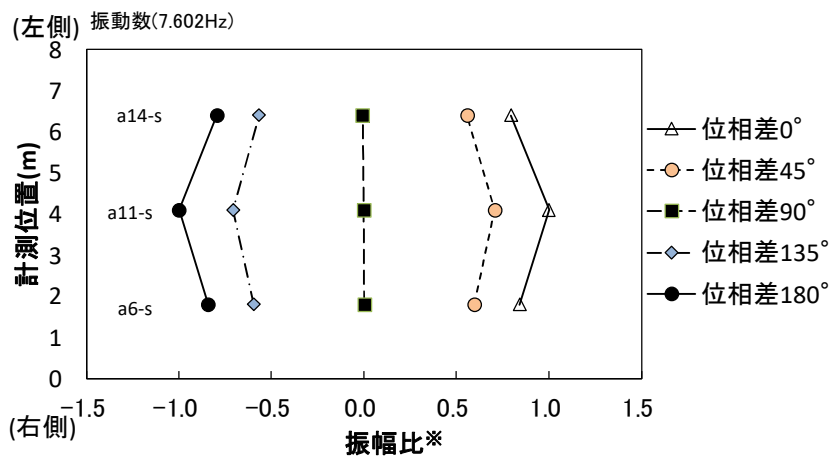


※振幅比は、位相差0°のゲート a11-s の加速度フーリエ振幅に対する比率で示す。

図-2.15 ゲートの主要な振動モード (2018/11/27 8:34 地震)



(a) 縦桁



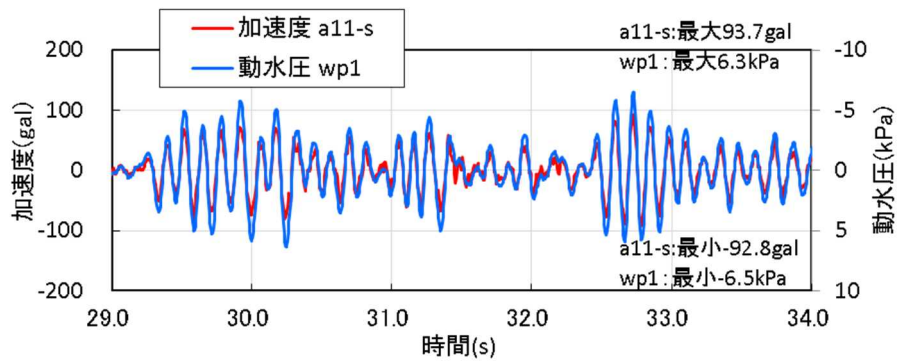
(b) 横主桁

※振幅比は、位相差0°のゲート a11-s の加速度フーリエ振幅に対する比率で示す。

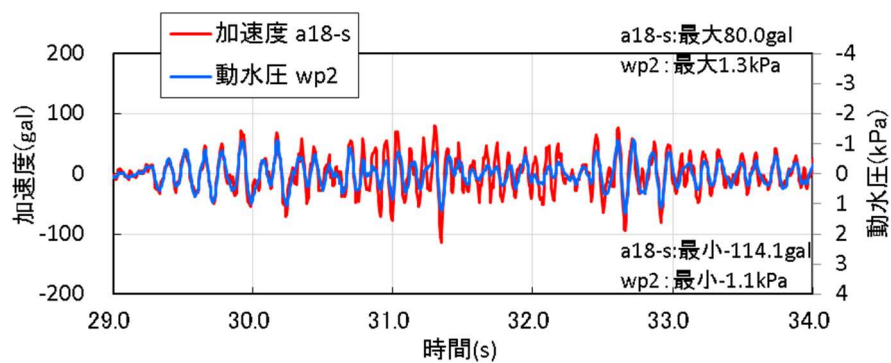
図-2.16 ゲートの主要な振動モード (2016/5/16 21:23 地震)

### 2.3.3 ゲート部動水圧

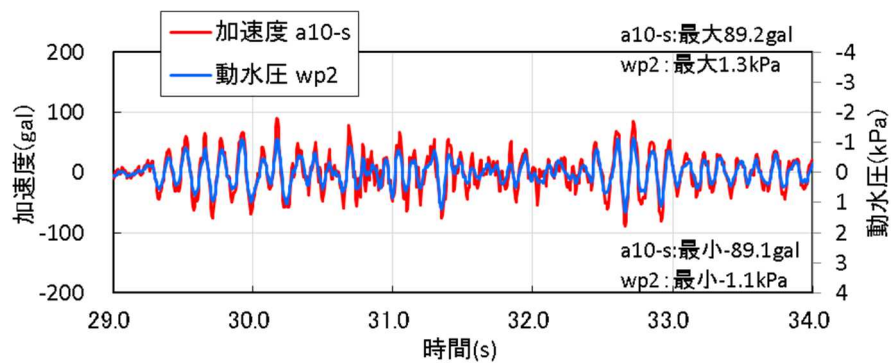
貯水時の代表的な地震観測記録の動水圧の時刻歴を図-2.17 に加速度時刻歴と併せて示す。また、同地震の動水圧と加速度のフーリエスペクトルを図-2.18 に示す。図-2.17(a)



(a) 加速度（ゲート a11-s），動水圧（ゲート部 wp1）



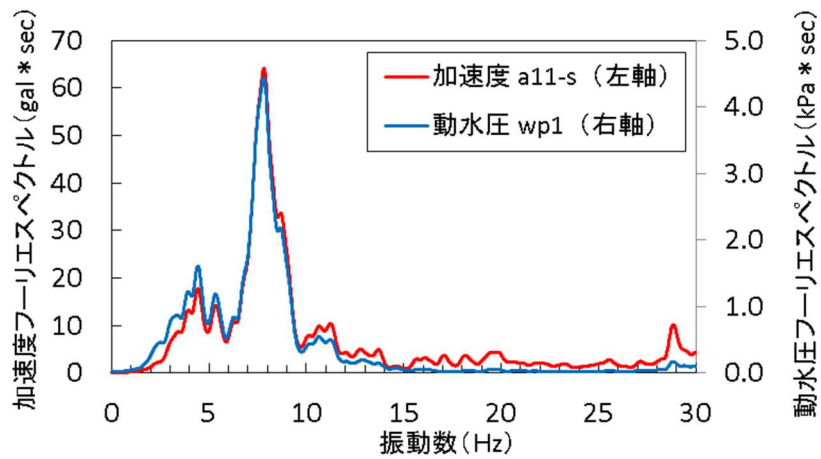
(b) 加速度（ゲート a18-s），動水圧（ゲート部 wp2）



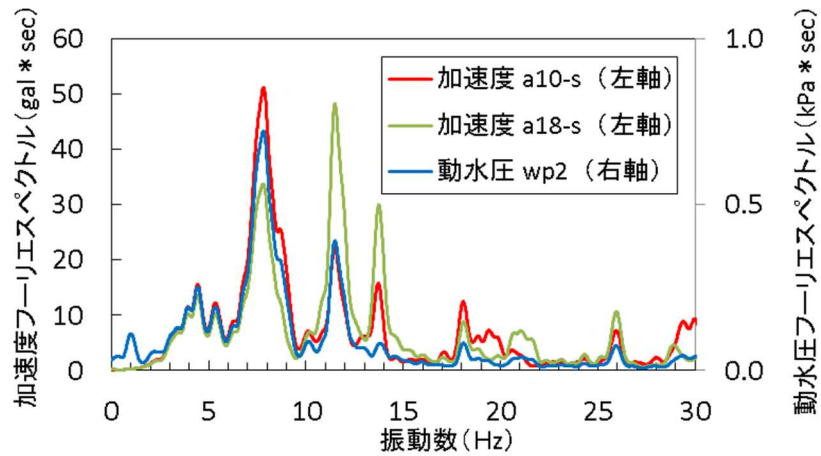
(c) 加速度（ゲート） a10-s，動水圧（ゲート部 wp2）

図-2.17 貯水時の地震観測記録（加速度および動水圧時刻歴）

(2018/11/27 8:34 地震，貯水時)



(a) 加速度 (ゲート a11-s), 動水圧 (ゲート部 wp1)



(b) 加速度 (ゲート a18-s), 加速度 (ゲート a10-s), 動水圧 (ゲート部 wp2)

図-2.18 フーリエスペクトルの比較 (加速度および動水圧)

(2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)

より, ゲート部 wp1 の動水圧の波形はゲート a11-s の加速度波形とほぼ同位相, 同形状の波形となっていることが解る. また, 図-2.18(a)のゲート部 wp1 とゲート 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. ゲート部 wp2 の動水圧は, 図-2.17(b), 図-2.17(c)および図-2.18(b)より, 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に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 付近の形状が合っ

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-2.15 および図-2.16 に示すとおり、扉体の脚柱で支えられているゲート a10-s～a13-s の範囲が同位相で振幅の比率が近い振動をしている。さらに、図-2.19 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 (ゲート a10-s～a13-s) の上下流方向のゲート振動 (7.8Hz) により発生しており、上下流方向の堤体振動 (4Hz) や各箇所のだム軸方向や鉛直方向の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 の振動による影響は小さく、ゲート部 wp1 と同様に、主に脚柱で支えられている範囲 (ゲート 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 (7.8Hz) と考えられる。また、ゲート最大加速度 (a11-s) とゲート部最大動水圧 (wp1) の関係がほぼ線形関係にあり、2.3.2(2)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。

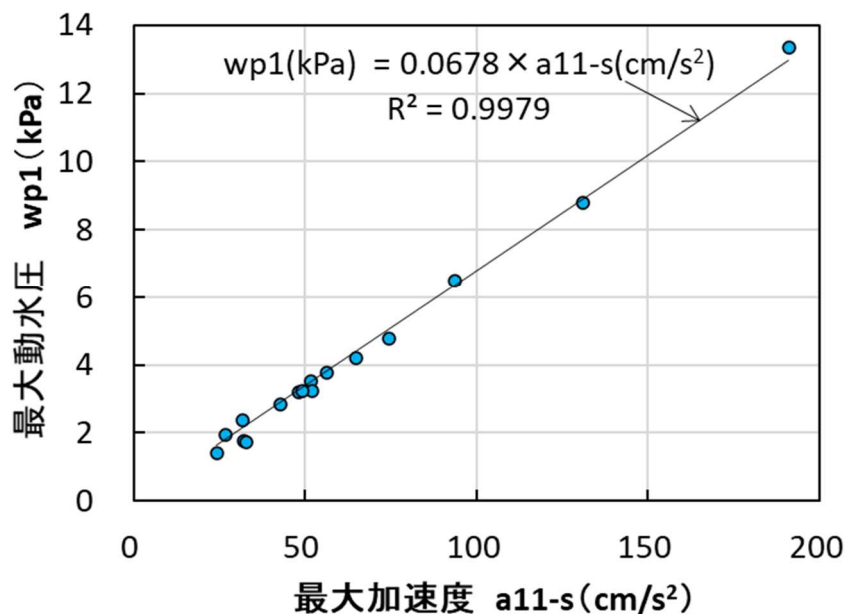


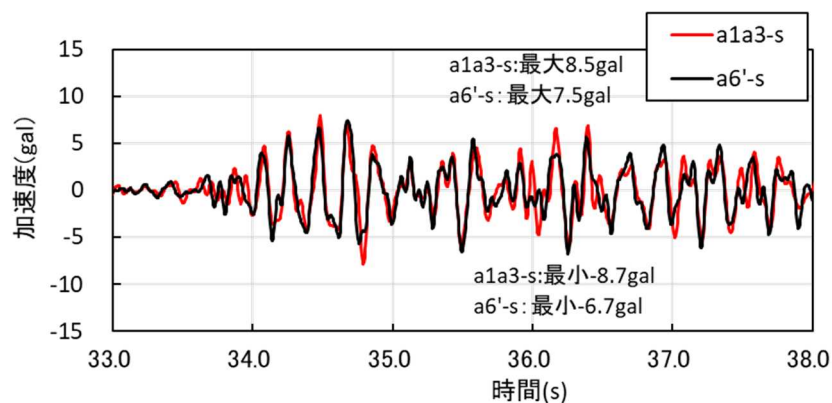
図-2.19 最大加速度と最大動水圧の関係 (ゲート水深 12.88m～13m の地震)

## 2.3.4 ゲート部動水圧と堤体部動水圧の発生要因の比較

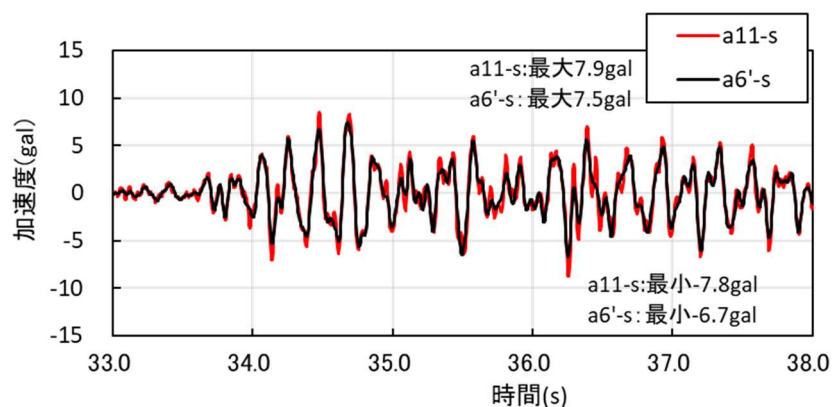
本節では、ゲート部動水圧と堤体部動水圧の発生要因の違いを比較するため、ゲート、門柱および堤体の非越流部の地震観測記録を分析した。まず、ゲート振動、門柱振動および堤体振動の違いを分析し、その違いを踏まえて、動水圧の発生要因を整理した。本節での代表地震は、堤体部の動水圧 wp3 と加速度 a1a3-s がともに記録できている、2020年3月18日以降の観測記録から選定した。

### (1) 空水時の振動

空水時の代表的な地震観測記録（2020/9/20 9:05 地震）の堤体部、門柱およびゲートの加速度時刻歴を図-2.20 に、フーリエスペクトルを図-2.21 に示す。図-2.20(a)より、堤体



(a) 加速度（堤体 a1a3-s, 門柱 a6'-s）



(b) 加速度（ゲート a11-s, 門柱 a6'-s）

図-2.20 地震観測記録（加速度時刻歴）空水時（2020/9/20 9:05 地震）

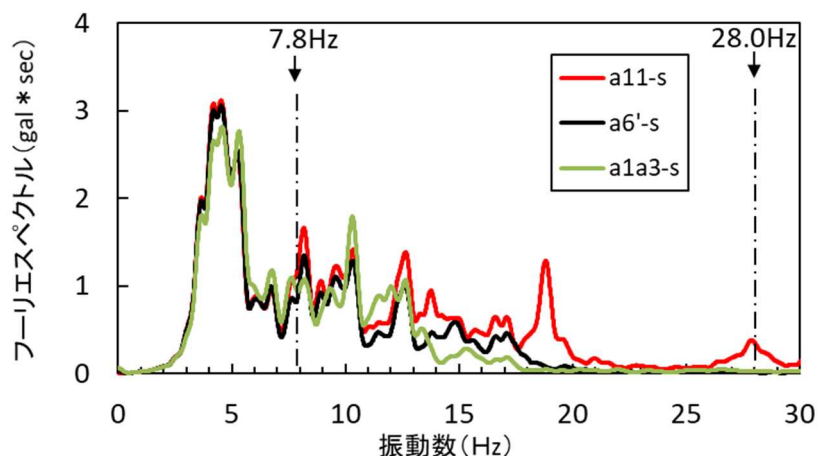


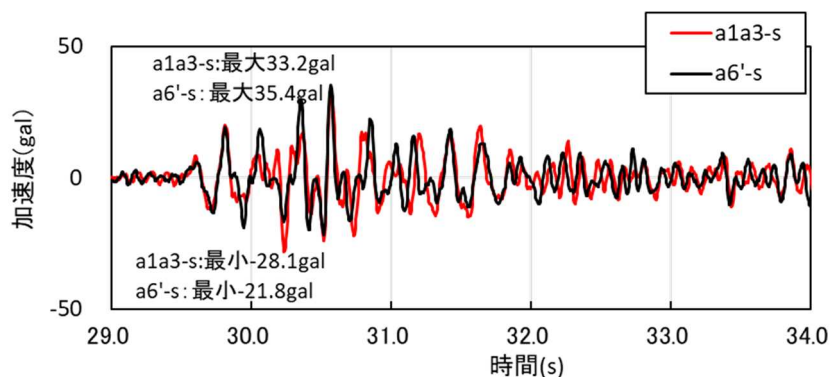
図-2.21 加速度フーリエスペクトル 空水時 (2020/9/20 9:05 地震)

a1a3-s と門柱 a6'-s の加速度は、主要な部分では近い振動をしており、最大加速度応答倍率（堤体 a1a3-s/門柱 a6'-s）が約 1.2 倍であり、門柱は堤体と概ね一体の振動をしている。図-2.20(b) は、2.3.1 で前述したとおり、門柱とゲートが概ね一体の振動をしている。図-2.21 のフーリエスペクトルに着目すると、堤体 a1a3-s の卓越振動数（約 4Hz）や 13Hz より低振動数域では、堤体 a1a3-s、門柱 a6'-s およびゲート a11-s のフーリエスペクトルが概ね一致している。これは、堤体振動と門柱振動が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。また、フーリエスペクトルの 14~17Hz 付近では、堤体 a1a3-s よりも門柱 a6'-s が大きくなっている。これは、堤体と門柱の断面形状の相違による影響によるものと考えられる。一方で、(2)で後述する貯水時に見られるゲート振動による門柱振動への影響は、空水時には見られない。

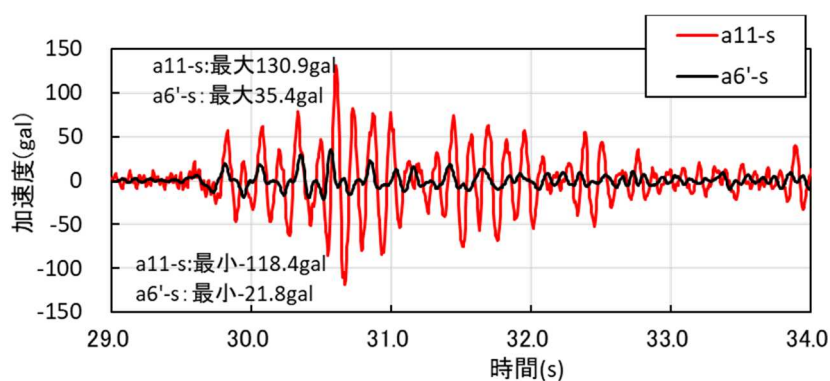
## (2) 貯水時の振動

貯水時の代表的な地震観測記録 (2020/4/12 0:45 地震) の堤体、門柱およびゲートの加速度時刻歴を図-2.22 に、また、フーリエスペクトルを図-2.23 に示す。図-2.22(a) より、堤体 a1a3-s と門柱 a6'-s の加速度は、最大加速度応答倍率（堤体 a1a3-s/門柱 a6'-s）が約 0.9 倍で、近い振動をしている時間帯もあるが、位相がずれており異なる振動をしている時間帯もある。図-2.22(b) は、2.3.2 で示した結果と同様、2020/4/12 0:45 の地震でも門柱 a6'-s とゲート a11-s の位相がずれており、加速度が増幅している。図-2.23 のフーリエスペクトルに着目すると、2.3.2 で示した結果と同様、図-2.21 の空水時と同様に約 4Hz で卓越してい





(a) 加速度 (堤体部 a1a3-s, 門柱 a6'-s)



(b) 加速度 (ゲート a11-s, 門柱 a6'-s)

図-2.22 地震観測記録 (加速度時刻歴) 貯水時 (ゲート水深 12.89m)  
(2020/4/12 0:45 地震)

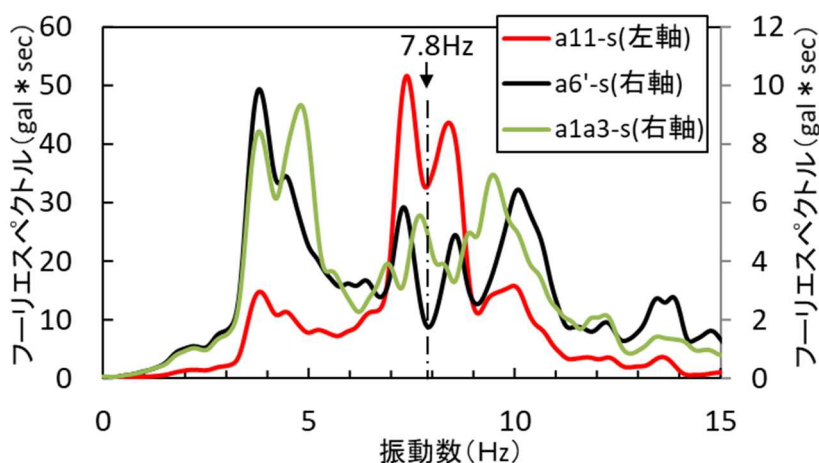


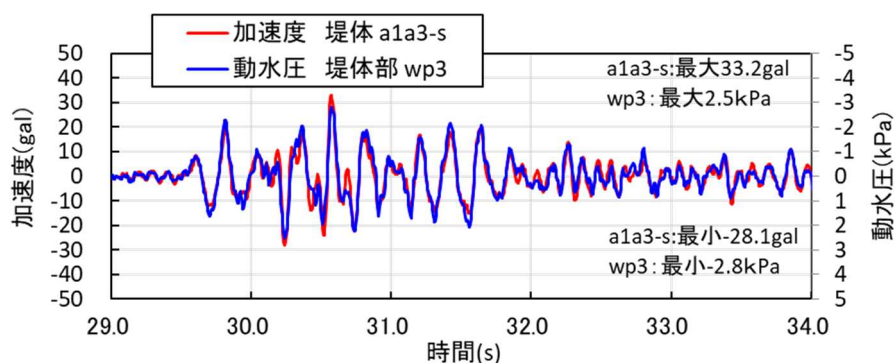
図-2.23 加速度フーリエスペクトル 貯水時 (ゲート水深 12.89m)  
(2020/4/12 0:45 地震)

るが、図-2.12(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。しかし、同図の堤体 a1a3-s のフーリエスペクトルでは、ゲート a11-s の卓越振動数約 7.8Hz 付近で振幅が低減していない。そのため、ゲート振動と門柱振動には相互作用があると考えられるが、ゲート振動による堤体振動への影響は小さいと考えられる。

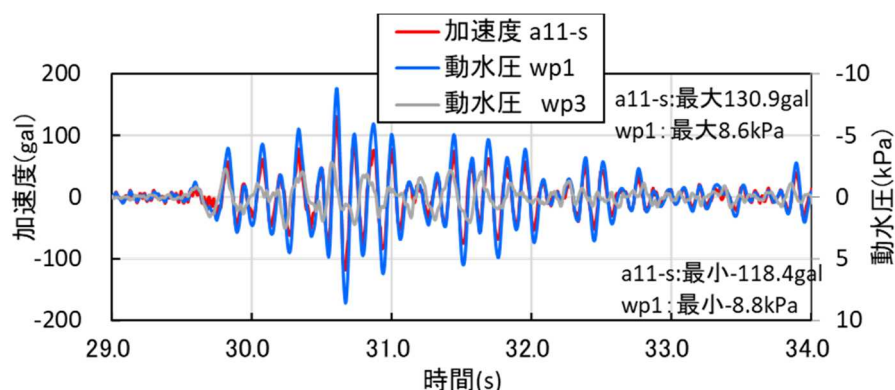
### (3) 動水圧

貯水時の代表的な地震観測記録（2020/4/12 0:45 地震）の動水圧の時刻歴を図-2.24 に加速度時刻歴と併せて示す。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-2.25 に示す。

図-2.24(a)より、堤体部 wp3 の動水圧の波形は、堤体 a1a3-s の加速度の波形とほぼ同位



(a) 加速度（堤体 a1a3-s），動水圧（堤体部 wp3）

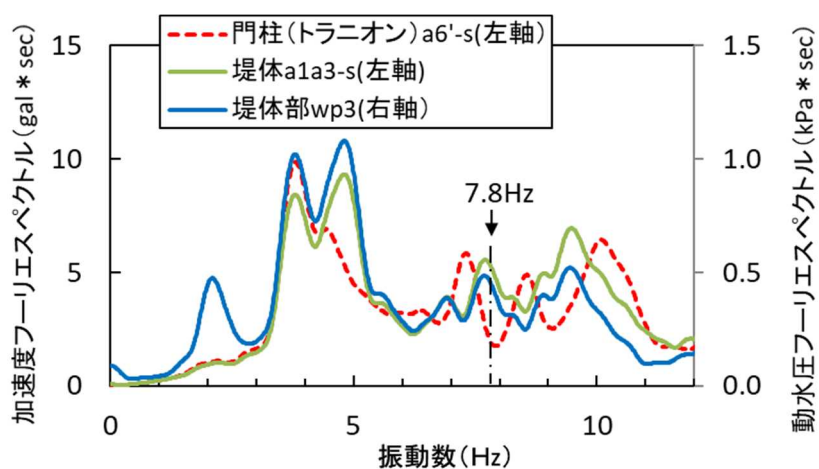


(b) 加速度（ゲート a11-s），動水圧（ゲート部 wp1）

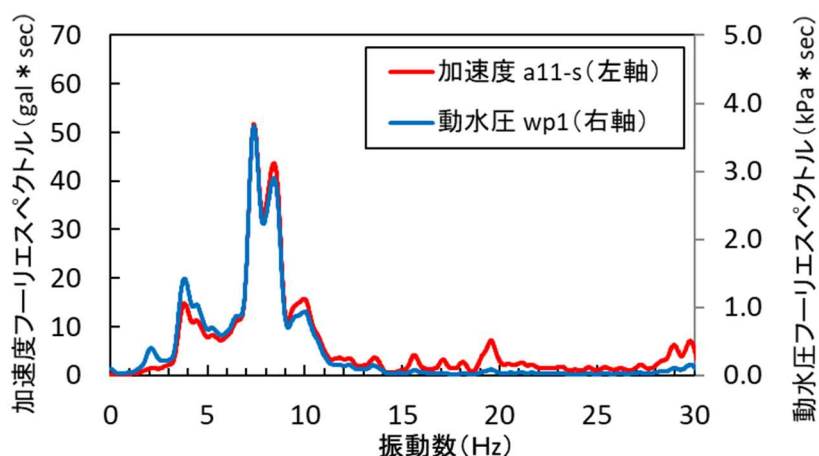
図-2.24 貯水時の地震観測記録（加速度および動水圧時刻歴）  
（2020/4/12 0:45 地震，貯水時（ゲート水深 12.89m））

相，同形状の波形となっている．また，**図-2.24 (b)**より，2.3.3 で示した結果と同様，ゲート部 wp1 の動水圧の波形はゲート a11-s の加速度波形とほぼ同位相，同形状の波形となっている．一方，**図-2.24 (b)**にはゲート部 wp1 と堤体部 wp3 を比較して示したが，堤体部（非越流部）wp3 の動水圧に対して，ゲート部 wp1 の動水圧が大きく，位相差がある観測記録となっている．

**図-2.25 (a)**の堤体部 wp3 と堤体 a1a3-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4Hzで一致している．また，**図-2.25 (b)**より，2.3.3 で示した結果と同様，ゲート部 wp1 とゲート



(a) 加速度（門柱 a6'-s），加速度（堤体 a1a3-s），動水圧（堤体部 wp3）



(b) 加速度（ゲート a11-s），動水圧（ゲート部 wp1）

**図-2.25** フーリエスペクトルの比較（加速度および動水圧）  
（2020/4/12 0:45 地震，貯水時（ゲート水深 12.89m））

ト all-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-2.25 (a) で見られた堤体の卓越振動数約 4Hz の動水圧は、ゲート部 wp1 には明確には見られていない。

以上より、堤体部 wp3 の動水圧は主に堤体振動により発生しているのに対して、ゲート部 wp1 の動水圧は、前述のとおり主にゲート振動により発生していると考えられるが、堤体の卓越振動数 4Hz による影響により発生する動水圧の影響は小さいと考えられる。

### 2.3.5 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-2.13 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観測記録は、堤体基礎 L1 および門柱（堤体天端）T1 の地震観測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  $10\text{cm/s}^2$  以上の記録とした。整理対象とした貯水時の主な地震観測記録を表-2.4 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

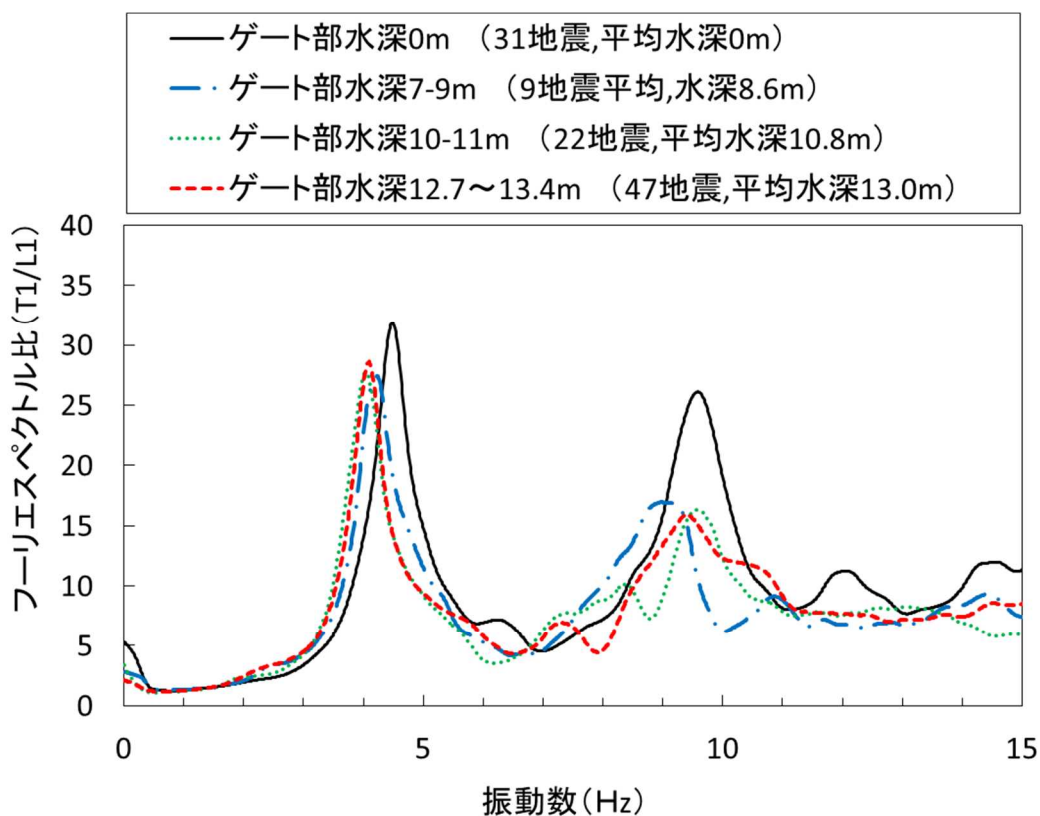
表-2.4 図-2.26 の整理対象とした地震のうち主な観測記録

No.	年月日, 時間 (ダム地点)	貯水位 (EL.m)	ゲート 水深 (m)	最大加速度(gal)						気象庁 M	ダム～ 震央距 (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	-126.63	-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	-101.35	82.49	-33.2	7.6	174	
5	2012/7/16 4:31	439.78	0.00	10.29	-6.67	5.34	-110.26	-78.51	-20.52	4.8	58	
6	2013/4/30 22:09	453.2	12.90	38.27	35.53	-59.61	-269.27	-245.14	-201.73	4.2	2	
7	2013/5/2 22:04	453.13	12.83	-123.98	54.31	-75.58	-824.62	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  $100\text{cm/s}^2$  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  $100\text{cm/s}^2$  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。

図-2.26 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 付近の卓越した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-2.13 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おり, ゲートの固有振動数が約 9Hz や約 8Hz となるゲート水深時も同様に, 同じ振動数付近のフーリエスペクトル比が低下している. 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.



※ゲート部水深0mは, 貯水位が越流部EL.440.6m以下から  
EL.439.6m以上の概ね同一水位の範囲とした

図-2.26 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比

## 2.4 まとめ

本章では、実ダムのクレストラジアルゲートおよび堤体に設置した動水圧計と加速度計により、実ダムゲートで地震時の動水圧を初めて計測した。それらの、地震観測記録を分析し、ゲート振動および動水圧の発生要因と、門柱振動、堤体振動および動水圧の発生要因の関係を、以下の通り解明した。

- 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（ゲート a10-s～a13-s）が上下流方向に同位相で振幅の比率が近い振動をし、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) ゲート部動水圧と堤体部動水圧の発生要因を比較すると、堤体部 wp3 の動水圧は主に堤体振動により発生しているのに対して、ゲート部 wp1 の動水圧は主にゲート振動により発生していると考えられるが、堤体の卓越振動数 4Hz による影響により発生する動水圧の影響は小さいと考えられる。
- 5) 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。

## 第2章の参考文献

- 1) 藤田将司, 佐藤信光, 田中聖三, 京藤敏達, 「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」, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No. 4 (地震工学論文集第 39 巻), pp.I\_472-I\_485, 2020.
- 2) 経済産業省原子力安全・保安院 ; 発電設備耐震性能調査報告書, 2012
- 3) 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), pp.I\_601-I\_608, 2013.
- 4) Westergaard, H. M.: Water pressures on dams during earthquakes, Trans. ASCE, Vol.98, 1933.

## 第3章 地震観測記録の再現解析による分析<sup>1)</sup>

### 3.1 はじめに

第2章の地震観測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、地震観測記録の結果と比較・分析した。分析結果により、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、また、ゲート振動と堤体振動の違いと動水圧の発生状況の違いを分析し、それらがゲート振動に与える影響をとりまとめる。

### 3.2 解析の概要

解析モデルは、地震観測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。第2章における地震観測記録により、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たため実施したものである。

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。

解析コードは有限要素法汎用構造解析コードISCEF<sup>2)</sup>を用いた。なお、本研究の対象となる10Hz程度のゲート振動の場合は、表面張力波（波長1cm程度）となり、水面波による増波抵抗は無視できる。また、水の圧縮性については、圧力波の伝搬速度に対して、ゲートの速度が十分小さいと考えられるため、非圧縮性流体として解析した。



### 3.3 解析モデルおよび解析条件

#### 3.3.1 解析モデルおよび解析ケース

モデル1は、図-3.1に示すとおり、図-2.1の計測対象としたゲートの各部材をシェル要

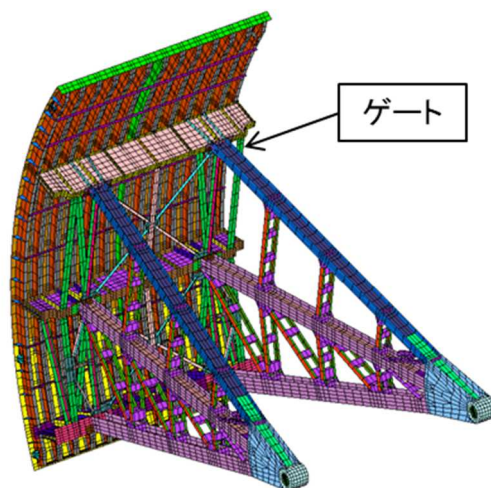


図-3.1 モデル1：ゲートの3次元シェルモデル

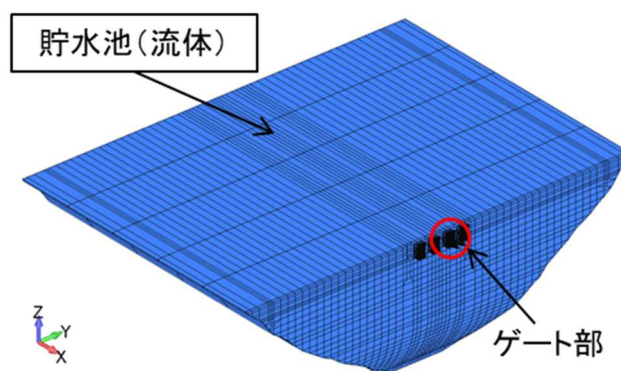
素でモデル化した。同図のモデルを用いて動的解析を行ったが、ゲートと流体の相互作用に関しては、一般的にコンクリートの動的解析で用いられる方法<sup>3)</sup>と同様に、ゲートの運動方程式に付加質量マトリクスを考慮し、得られたゲートの加速度より動水圧を算出した。付加質量マトリクスは、図-3.2に示す付加質量算出用のモデルで別途作成し、図-3.1の動的解析で用いた。

モデル2は、図-3.1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-3.3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、付加質量マトリクスを作成するが、流体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。

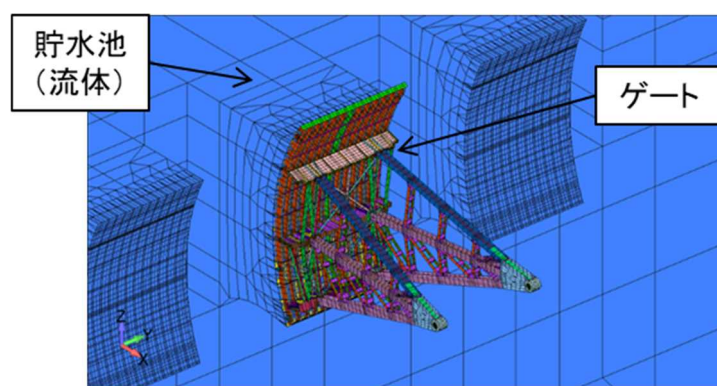
ゲートモデルの境界条件は、トラニオンピン位置の並進三方向を拘束し、ゲート下部戸当たりについては、鉛直方向のみ拘束した。解析ケース、解析条件および物性値一覧を表-3.1に示す。

解析ケースは、CASE1-1からCASE1-4はモデル1で実施し、CASE1-1は空水時のゲー

ト振動を確認するケース，CASE1-2 は貯水時のゲート a11-s の振動を地震観測記録に合わせた場合に動水圧が観測値と一致するか確認するケース，CASE1-3 およびCASE1-4 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．CASE2-1 およびCASE2-2 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，ゲート振動と門柱振動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



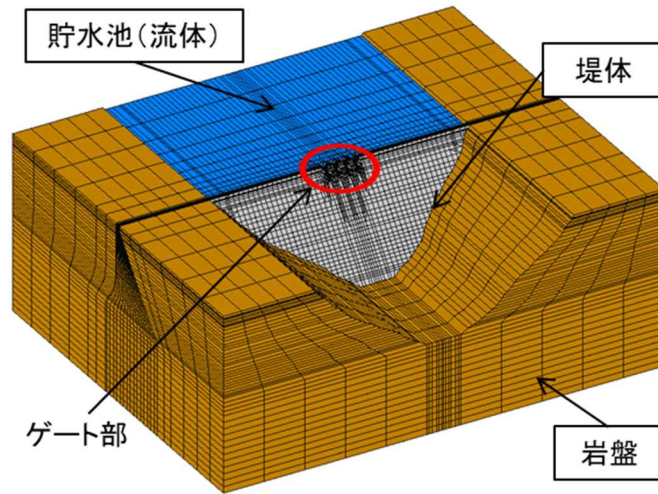
(a) 全体モデル(貯水池+ゲート)



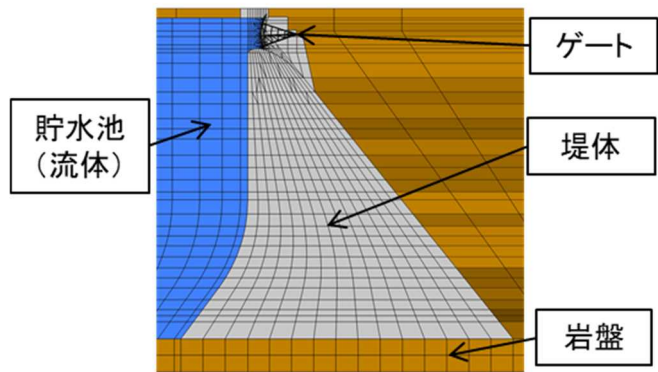
(b) ゲート部拡大

図-3.2 モデル 1 の付加質量算出モデル図

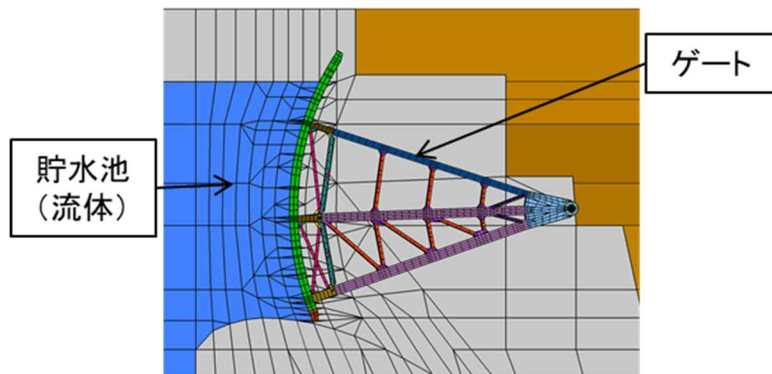
動作成に用いた地震観測記録を図-3.4(a), (b), (c)および(d)に示す．各地震の選定は，CASE1-1 から CASE1-4 および CASE2-1 については，2019 年 8 月までの空水時またはゲート水深 12.88m 以上の貯水時の記録のうち，それぞれ門柱 a6'-s の加速度が最大の観測記録とした．CASE2-2 については，堤体 a1a3-s の記録がある 2020 年 3 月 18 日以降のゲート水深 12.88m 以上の貯水時の記録のうち，それぞれ門柱 a6'-s の加速度が最大の観測記録とした．



(a) モデル全体 (鳥瞰図)



(b) 断面図



(c) ゲート部断面図

図-3.3 モデル2：ゲート，堤体，岩盤及び貯水一体の3次元モデル

表-3.1 解析ケース，解析条件および物性値一覧

(a) 解析条件

解析ケース	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2
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	貯水
観測地震日時	2018/9/14 14:35	2018/11/27 8:34			2018/11/27 8:34	2020/4/12 0:45
入力地震動	s6'-s, a7'-d, a8'-vの観測地震波形をゲートトラニオンピンに直接入力	s11-sの観測地震波形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の観測地震波形をゲートトラニオンピンに直接入力		L1の観測地震波形を基礎岩盤に引き戻して入力	

(b) 物性値

解析ケース		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1,2-2		
		ゲート	ゲート	ゲート	ゲート	堤体	岩盤	
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	205,000	205,000	205,000	170,000	170,000	38,400, 13,500 ※1	
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	85.41				85.41	23.65	22.56
ポアソン比		0.3				0.3	0.2	0.3
減衰定数 h	%	2	2	2	2	2	5	5
レイリー周波数※2	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	f1 : 8.08, f2 : 22.09	f1 : 4.10, f2 : 9.86	f1 : 2.18, f2 : 30.0

※1 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/mm<sup>2</sup> と設定した。

※2 減衰は質量比例型および剛性比例型の両者に比例したレイリー減衰を用いた。減衰マトリックスは式(3.1)で表される。

$$[C] = \alpha \times [M] + \beta \times [K] \quad (3.1)$$

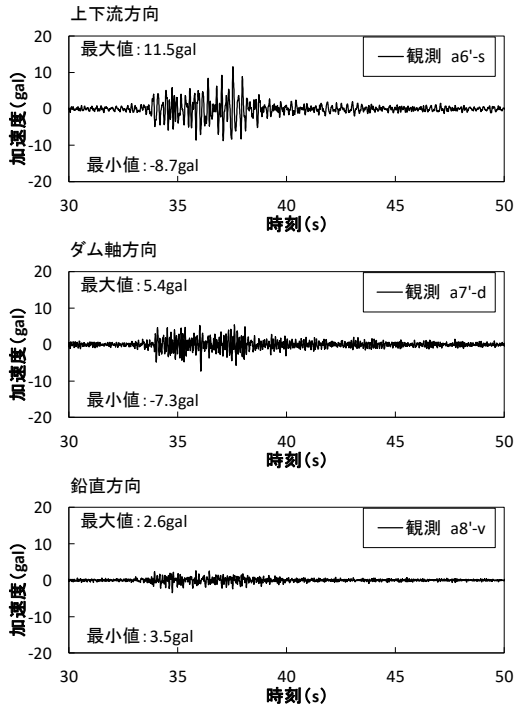
ここに、 $[C]$  : 減衰マトリックス， $[M]$ は質量マトリックス， $[K]$ は合成マトリックス， $\alpha$ ， $\beta$ は比例係数である。

本検討では、地震応答に影響が大きい2つの固有振動数 $f_1$ および $f_2$ で同じ減衰定数 $h$ とし、式(3.2)および式(3.3)により質量マトリックスおよび剛性マトリックスの比例係数

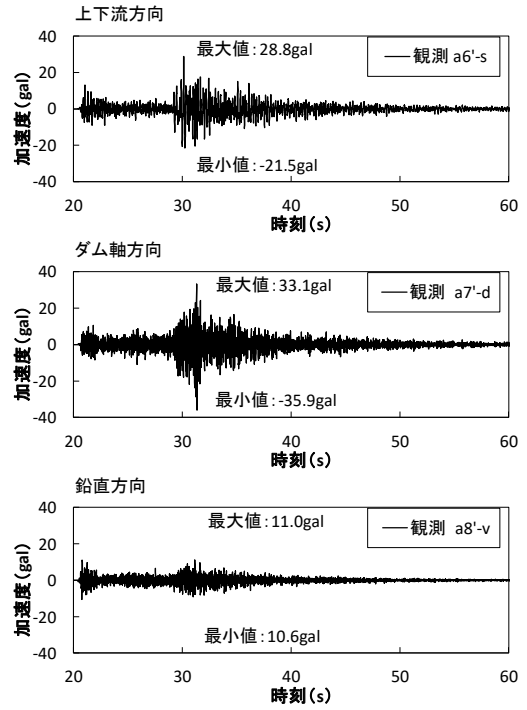
( $\alpha$ および $\beta$ )を設定した。

$$\alpha = 4\pi h \times f_1 \times f_2 / (f_1 + f_2) \quad (3.2)$$

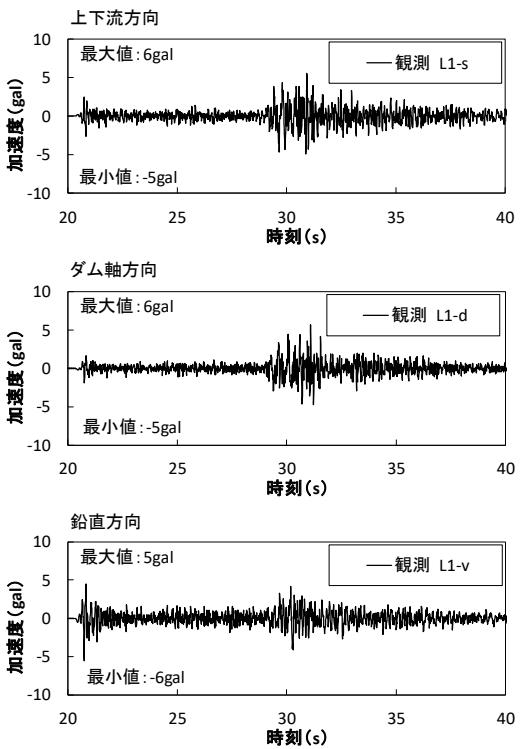
$$\beta = h / \pi (f_1 + f_2) \quad (3.3)$$



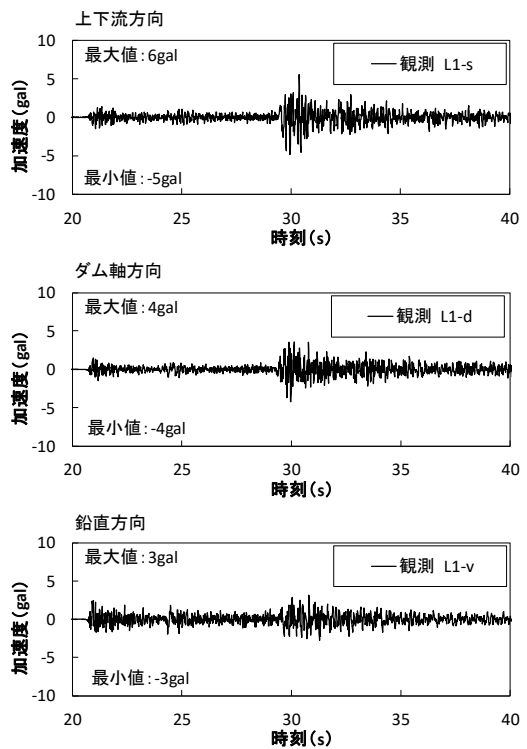
(a) 2018/9/14 14:35 地震，門柱



(b) 2018/11/27 8:34 地震，門柱



(c) 2018/11/27 8:34 地震，堤体基礎



(d) 2020/4/12 0:45 地震，堤体基礎

図-3.4 入力地震動作成に用いた地震観測記録

### 3.3.2 動水圧の解析条件

本章の再現解析で用いた有限要素法汎用構造解析コード ISCEF<sup>2)</sup>における，構造と流体の連成による動水圧の発生と，動水圧による構造への影響を考慮した解析条件を以下に示す．

#### (1) 流体と構造の連成

流体の運動方程式は，波動方程式より圧縮性流体では式(3.4)，非圧縮性流体では式(3.5)で表せる．

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.5)$$

ここに， $\phi$  は速度ポテンシャル， $C$ は圧力波の伝搬速度である．

本研究では，非圧縮性流体で実施している．なお，非圧縮性流体は圧力波の伝搬速度 $C \rightarrow \infty$ として考えることができるため，時間項に依存しないラプラス方程式となる．

流体を有限要素法で解析するために，ガラーキンの法による定式化を行う．両辺に流体の密度 $\rho_w$ をかけて，仮想速度ポテンシャル $\delta\phi$ を使用してガラーキンの法で展開すると，式(3.6)のように変換できる．

$$\frac{\rho_w}{C^2} \iiint_V \delta\phi \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} dV + \rho_w \iiint_V \left( \frac{\partial \delta\phi}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \delta\phi}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \delta\phi}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dV = \rho_w \iint_S \delta\phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (3.6)$$

ここに， $\delta\phi$  は仮想速度ポテンシャル， $\rho_w$ は流体の密度， $V$ は流体の体積， $S$ は流体の境界面である．

式(3.6)の左辺項が流体内の速度ポテンシャルの関係式，右辺項が流体境界面の条件式となる．構造との連成を考える場合は，右辺項に流体と構造の連成条件を入力すると，構造

像側から流体への影響を考慮することができる。

## (2) 構造から流体への影響

流体が構造と接している場合，図-3.5に示すように流体側と構造側で発生する流体面直方向  $n$  の速度は一致する．流体側の節点自由度は速度ポテンシャル  $\phi$ ，構造側の節点自由度は変位ベクトル  $u$  で解くため，流体と構造間には式(3.7)の関係が成り立つ．

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \dot{u}_n \quad \text{on } \Gamma_{IF} \quad (3.7)$$

ここに， $\phi$  は速度ポテンシャル， $n$  は流体側と構造側節点の流体面直方向， $\dot{u}_n$  は  $n$  方向の構造節点の速度， $\Gamma_{IF}$  は流体と構造の境界面である．

したがって，式(3.6)の右辺項に式(3.7)を代入すると，構造から流体への影響を考慮することができる．

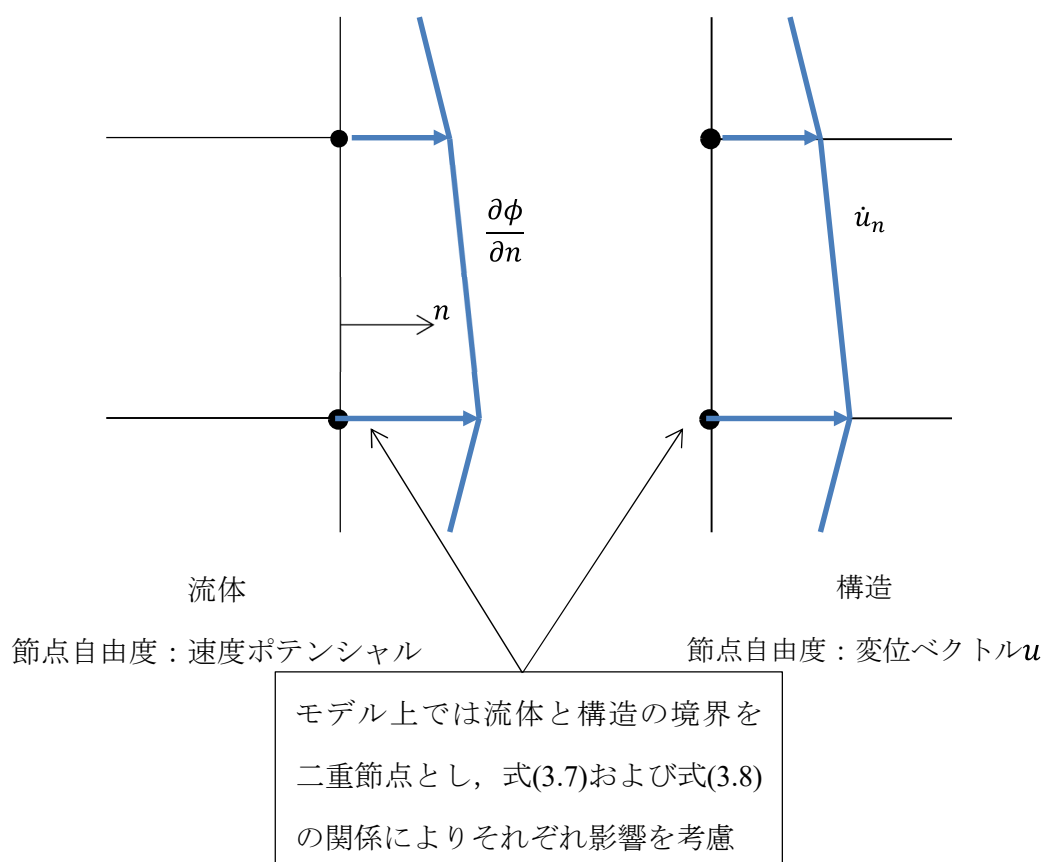


図-3.5 構造から流体への影響

### (3) 流体から構造への影響

流体内に発生する圧力  $p$  は速度ポテンシャル  $\phi$  から式(3.8)となる.

$$p = -\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.8)$$

ここに,  $\phi$  は速度ポテンシャル,  $p$  は圧力,  $\rho_w$  は流体の密度,  $t$  は時間である.

図-3.6 に示すように流体が構造に接しているのならば, 流体境界面で発生した圧力は同じように構造側に作用することになり, 流体から構造への影響を考慮することができる.

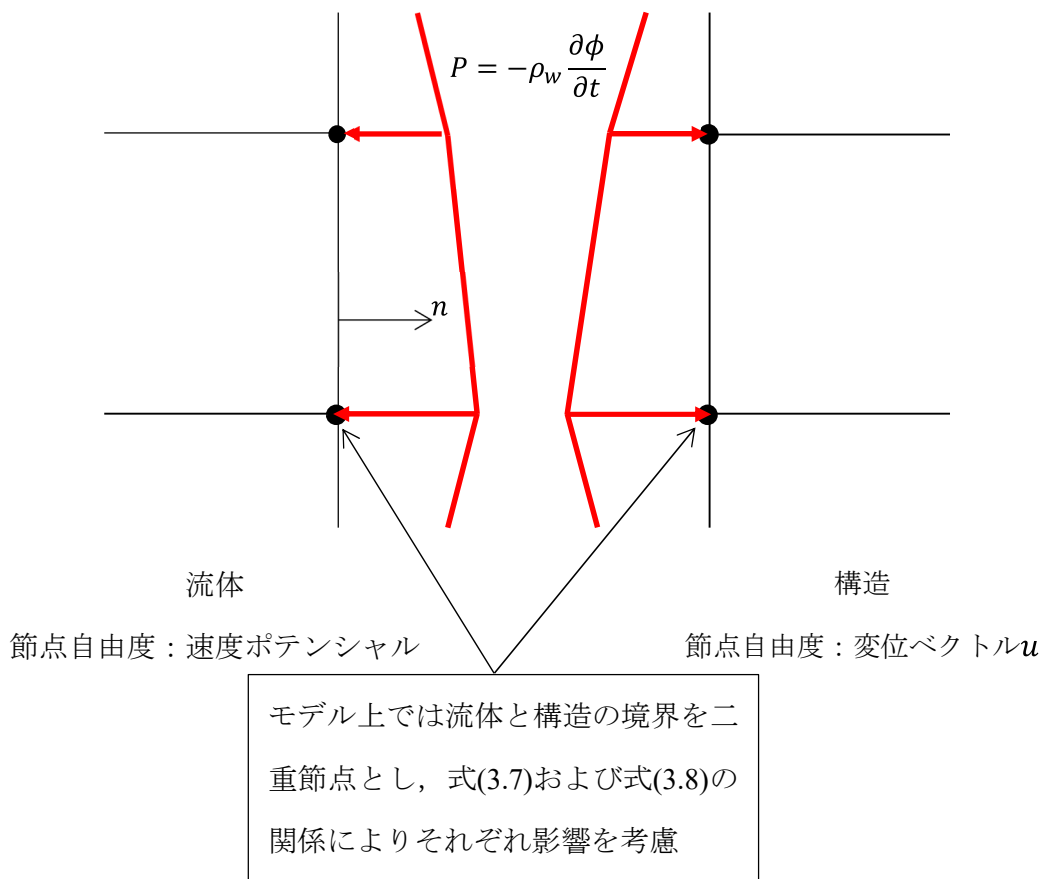


図-3.6 流体から構造への影響



以上のことから、流体と構造との連成については構造から流体への影響は速度の一致、流体から構造への影響は発生した流体圧力を構造に作用して表現することになる。有限要素法への離散化過程についてはここでは割愛するが、流体と構造の連成問題の有限要素法の方程式をマトリクス形式で表すと式(3.9)となる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & L_{\phi s}^T \\ -L_{\phi s} & C_\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

ここに、 $[M_s]$ は構造の質量マトリクス、 $[C_s]$ は構造の減衰マトリクス、 $[K_s]$ は構造の剛性マトリクス、 $[M_\phi]$ は式(2)左辺第1項とスロッシング境界条件の和、 $[C_\phi]$ はインピーダン境界条件、 $[K_\phi]$ は式(2)左辺第2項、 $[L_{\phi s}]$ は流体-構造の連成マトリクスである。

ここで、 $-[L_{\phi s}]$ は構造から流体への影響による条件から、 $[L_{\phi s}]^T$ は流体から構造への影響による条件から求まる係数マトリクスである。上記式を書き下すと、構造側の運動方程式は式(3.10)、流体側の運動方程式は式(3.11)となる。

$$M_s \ddot{u} + C_s \dot{u} + L_{\phi s}^T \dot{\phi} + K_s u = F \quad (3.10)$$

$$M_\phi \ddot{\phi} - L_{\phi s} \dot{u} + C_\phi \dot{\phi} + K_\phi \phi = 0 \quad (3.11)$$

それぞれの運動方程式は流体と構造の連成項が含まれる形で表現される。構造から流体への影響は $-[L_{\phi s}]\{\dot{u}\}$ となり、構造の速度 $\{\dot{u}\}$ に比例する。一方、流体から構造への影響は $[L_{\phi s}]^T\{\dot{\phi}\}$ となり、速度ポテンシャルの時間項の一階微分の $\{\dot{\phi}\}$ に比例することになる。この両者の関係により、流体と構造の連成を考えることができる。

なお、非圧縮性流体でスロッシングを考慮しない場合、伝搬速度  $C \rightarrow \infty$  となり、式(3.9)の $[M_\phi]$ 、 $[C_\phi]$ を0とすることができ考えることができるため、式(3.12)で表される。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & L_{\phi s}^T \\ -L_{\phi s} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

(4) 付加質量マトリクスの算出

前頁で導出した式(3.12)を書き下すと，構造側の運動方程式は式(3.13)，流体側の運動方程式は式(3.14)のように書ける．

$$M_S \ddot{u} + C_S \dot{u} + L_{\phi_s}^T \dot{\phi} + K_S u = F \quad (3.13)$$

$$-L_{\phi_s} \dot{u} + K_\phi \phi = 0 \quad (3.14)$$

このうち流体にかかわる運動方程式の式(3.14)について，時間による一階微分をし，式(3.15)の関係を導く．

$$[K_\phi] \{\dot{\phi}\} = [L_{\phi_s}] \{\ddot{u}\} \quad (3.15)$$

式(3.15)の両辺に左から $[K_\phi]^{-1}$ をかけて，式(3.16)のとおり $\{\dot{\phi}\}$ の関係式を導く．


$$\{\dot{\phi}\} = [K_\phi]^{-1} [L_{\phi_s}] \{\ddot{u}\} \quad (3.16)$$

式(3.16)より，構造側の運動方程式の式(3.13)における $L_{\phi_s}^T \dot{\phi}$ は， $L_{\phi_s}^T \dot{\phi} = [L_{\phi_s}]^T [K_\phi]^{-1} [L_{\phi_s}] \{\ddot{u}\}$ となる．

ここで動水圧により生じる荷重 $\{F_{DW}\}$ のみに着目すると，式(3.17)のように加速度項 $\ddot{u}$ に比例する付加質量マトリクス $[M_{DW}]$ が求まる．

$$\{F_{DW}\} = -[L_{\phi_s}]^T [K_\phi]^{-1} [L_{\phi_s}] \{\ddot{u}\} = -[M_{DW}] \{\ddot{u}\} \quad (3.17)$$

$$[M_{DW}] = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{16} & M_{17} \\ & M_{22} & \dots & M_{26} & M_{27} \\ & \vdots & \ddots & \vdots & \\ & sym & \dots & M_{66} & M_{67} \\ & & & & M_{77} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

このマトリクスは構造側の流体との連成面の自由度数がある質量マトリクスで，-3.7に示すように，ある節点に加速度 $\ddot{u}_j$ が発生した場合，連成面のすべての節点に $-M_{ij}^{DW} \cdot \ddot{u}_j$

の動水圧荷重が作用する。したがって、節点に作用する動水圧荷重は式(3.19)のように表現することができる。

$$F_i^{DW} = - \sum_{j=1}^{j=n} M_{ij}^{DW} \cdot \ddot{u}_j \quad (3.19)$$

また、この付加質量マトリクス $[M_{DW}]$ は、貯水池形状と連成面が定めれば一意に定まるものであることから、貯水池モデルから付加質量マトリクスを計算すれば、以降のゲート解析においては別途貯水池との連成を逐一計算する必要はない。

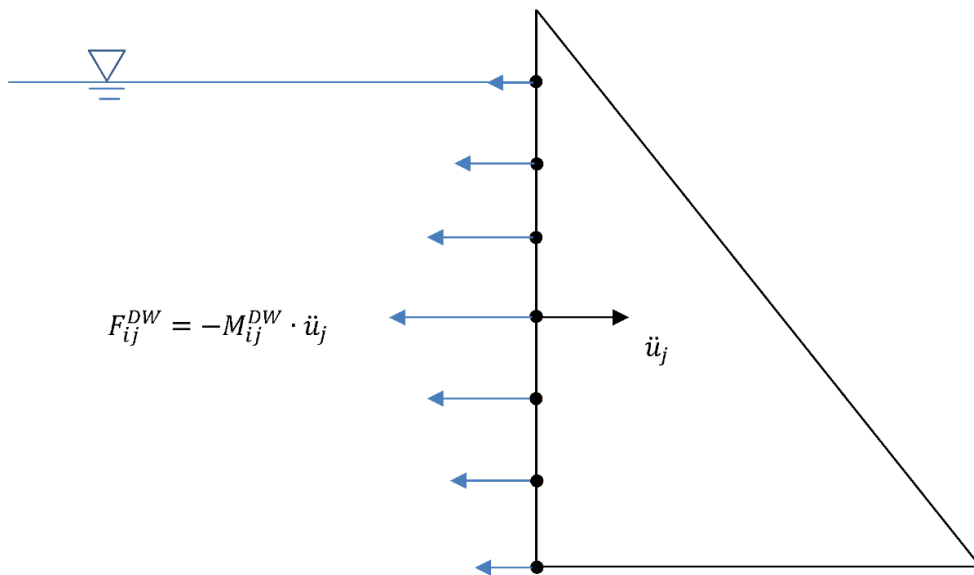


図-3.7 節点に作用する動水圧荷重の概念図 その1



図-3.8 節点に作用する動水圧荷重の概念図 その2

### 3.4 解析結果

#### 3.4.1 空水時の解析 (CASE1-1)

CASE1-1 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-3.9 に CASE1-1 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  $205,000\text{N/mm}^2$  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振動の増幅がほとんどなく、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ニオンピン箇所に入力すれば、空水時のゲート扉体の加速度を概ね再現できると考えられる。

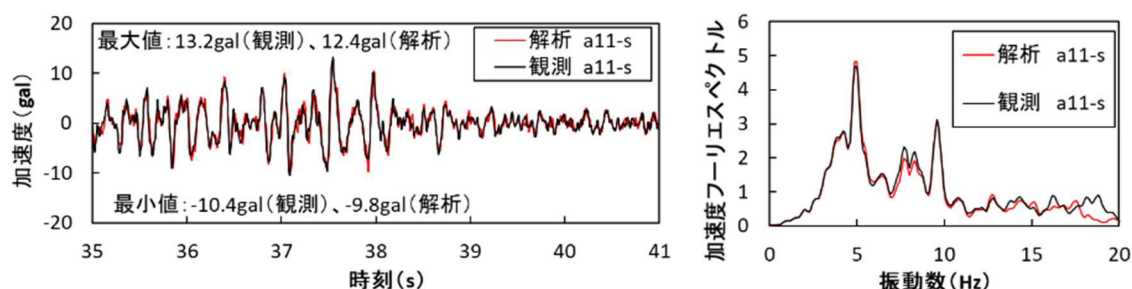


図-3.9 CASE1-1 の解析結果と地震観測記録の加速度の比較 (2018/9/14  
14:35 地震, 空水時)

#### 3.4.2 貯水時の解析 (CASE1-2: ゲート振動による動水圧発生状況)

CASE1-2 は、貯水時のゲート a11-s の振動を地震観測記録に合わせた場合に動水圧が観測値と一致するか確認するケースとして実施した。図-3.10 に CASE1-2 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 の扉体振動を地震観測記録に合わせると、動水圧の解析結果と観測記録が概ね一致した結果となった。そのため、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とし、非圧縮性流体とした今回の解析条件

とすれば、地震観測記録の動水圧を概ね再現できると考えられる。この結果は、第2章地震観測記録の分析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。

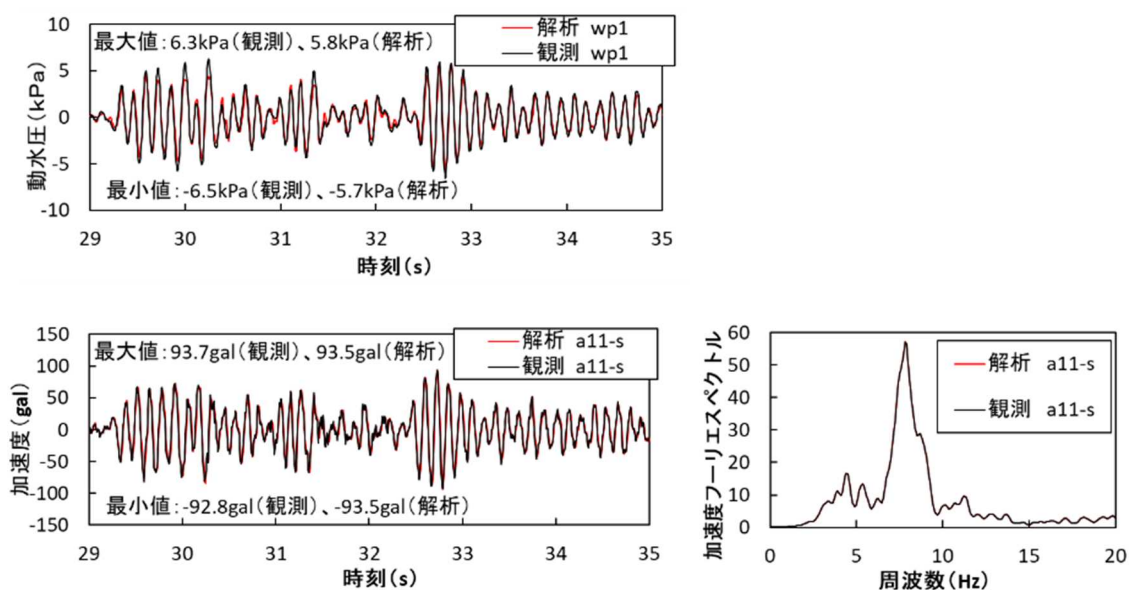
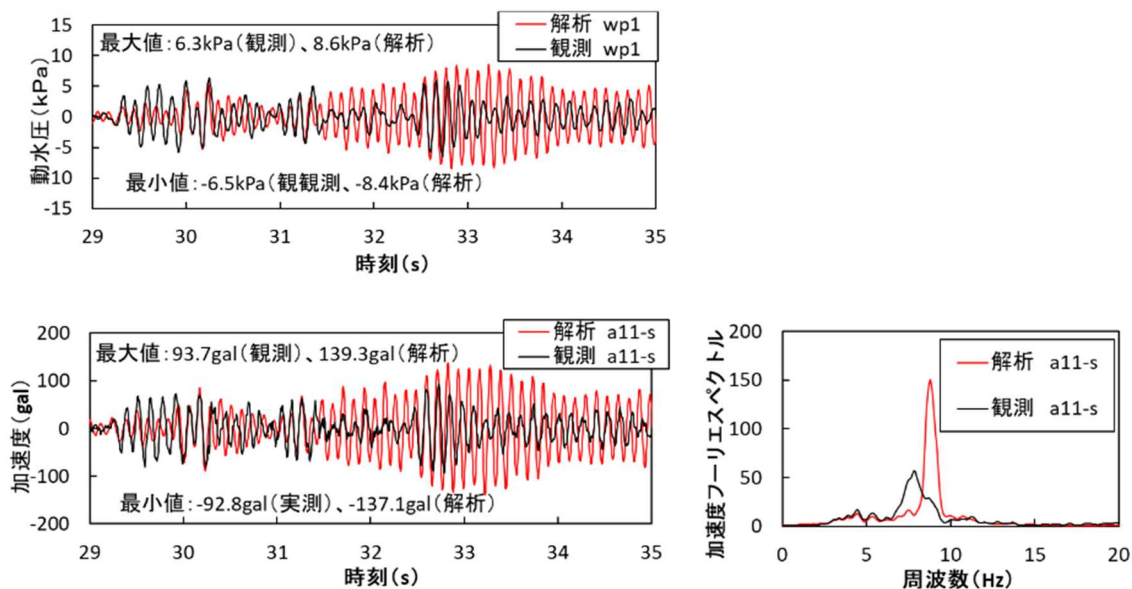


図-3.10 CASE1-2 の解析結果と地震観測記録の比較 (2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)  
(動水圧, 加速度時刻歴波形, 加速度フーリエスペクトル)

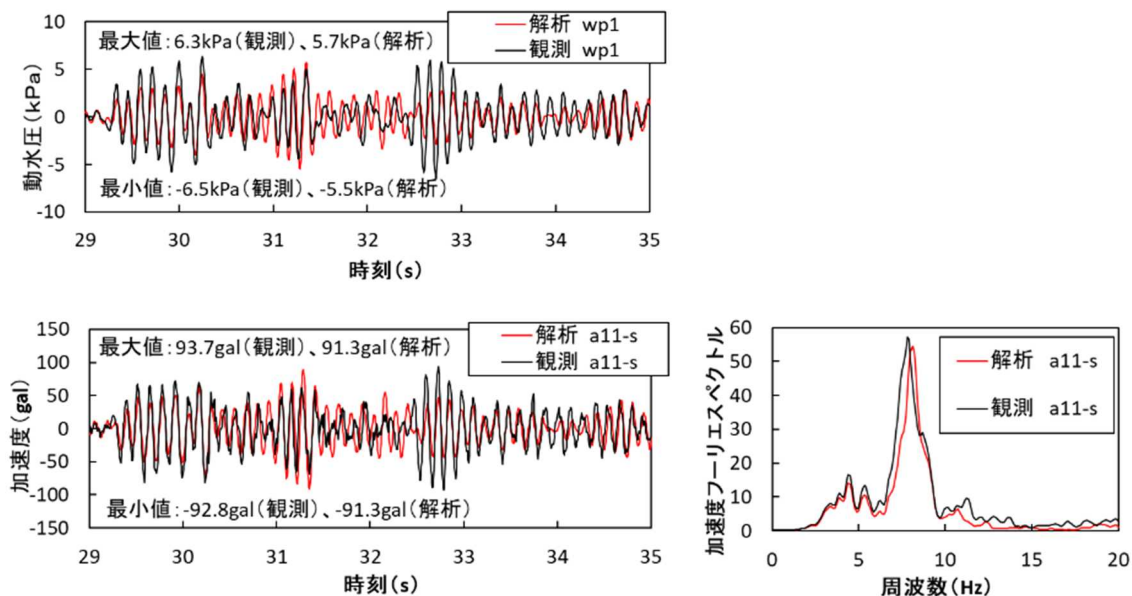
### 3.4.3 貯水時の解析 (CASE1-3, CASE1-4 : ゲート振動と動水圧の状況)

CASE1-3 および CASE1-4 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-3.11(a)に CASE1-3 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  $205,000\text{N/mm}^2$  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  $8.87\text{Hz}$  となっており、地震観測記録によるゲートの固有振動数 (約  $8\text{Hz}$ ) と合っていないこと。また、図-17 で示した門柱 (堤体天端) の 2 次モードの振動数 (約  $9\text{Hz}$ ) とゲートモデルの固有振動数 ( $8.87\text{Hz}$ ) 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。

CASE1-3 の結果を踏まえ、モデルの固有振動数を地震観測記録(約 8Hz)と合わせるため、本検討では鋼材の弾性係数を  $170,000\text{N/mm}^2$  に調整したケース (CASE1-4) を行った。その結果を図-3.11(b)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



(a) CASE1-3 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) CASE1-4 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-3.11 解析結果と地震観測記録の比較 (2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)

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地震観測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、地震観測記録と同様、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。

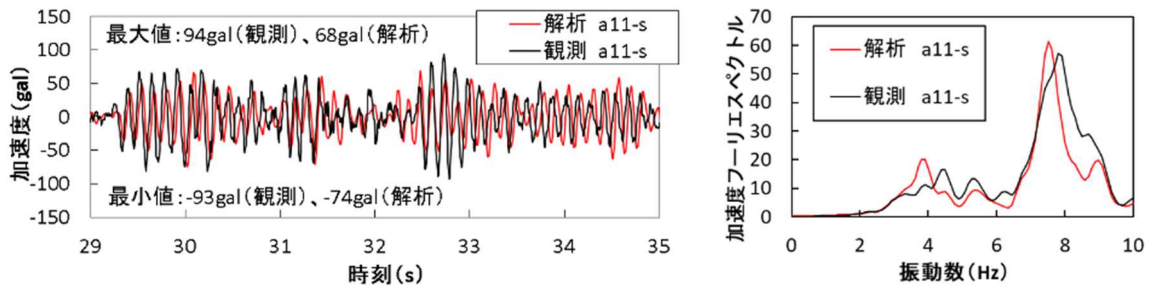
#### 3.4.4 貯水時の解析（CASE2-1：ゲートおよび堤体振動と動水圧の状況）

CASE2-1 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-3.12 に CASE2-1 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、CASE2-1 も CASE1-4 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  $170,000\text{N/mm}^2$  に調整している。

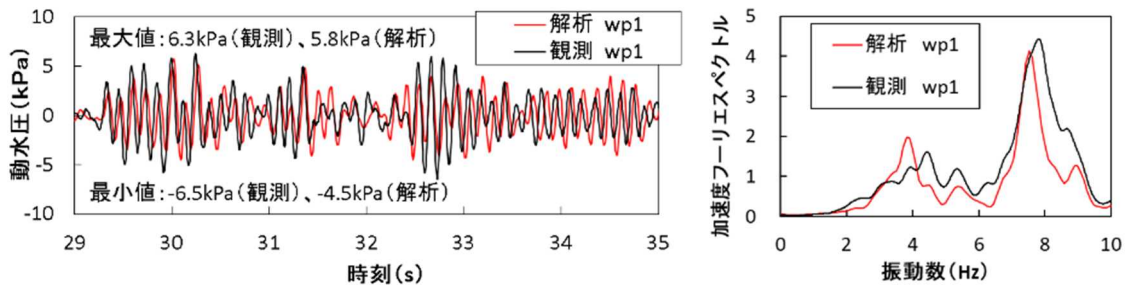
図-3.12(a)および(b)より、ゲート a11-s の加速度は主要動の前半（29s～31.5s）は概ね一致しており、その時間帯ではゲート部 wp1 の動水圧も概ね一致している。しかし、31.5s 以降は一致している時間帯と一致していない時間帯があり最大値にも差が見られた。加速度および動水圧のフーリエスペクトルは卓越振動数が解析結果の約 7.5Hz に対し、観測記録では約 7.8Hz になっており、低振動側となった。また、図-3.12(c)より、門柱 a6'-s の加速度の最大値は概ね一致した。門柱 a6'-s の時刻歴波形は、ゲート a11-s の加速度とゲート部 wp1 の動水圧と同様、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、地震観測記録と同様、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、2.3.5 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。

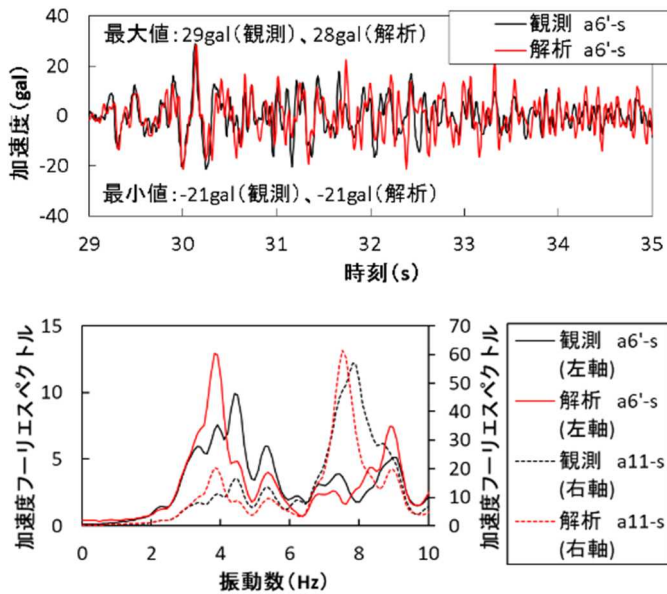
一方で、門柱 a6'-s の加速度を再現できていない時間帯においては、ゲート a11-s の加



(a) ゲート a11-s 加速度



(b) ゲート部 wp1 動水圧



(c) 門柱 a6'-s 加速度

図-3.12 解析結果 CASE2-1 と地震観測記録の比較 (2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)

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, 一体 3 次元モデルの入力地震動を, 堤体基礎 L1 の 1 点のみの



地震観測記録で合わせているが、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。

### 3.4.5 貯水時の解析（CASE2-2：ゲート部動水圧と堤体部動水圧の比較）

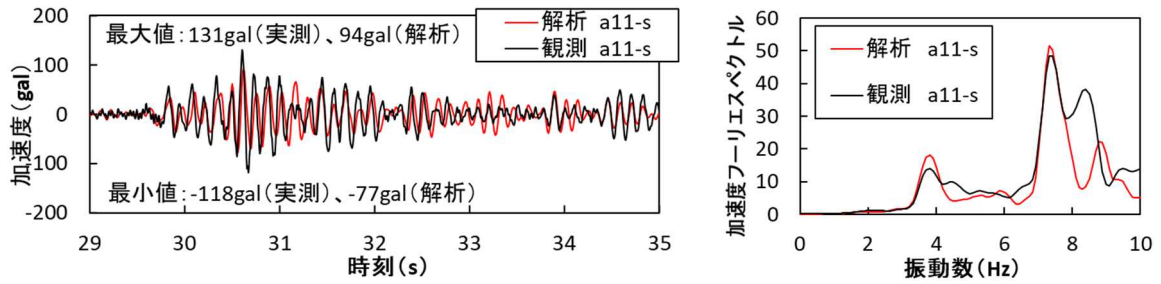
CASE2-2 は、ゲート部動水圧と堤体部動水圧の発生要因の違いを比較するため、一体3次元モデルで実施した。本節での代表地震は、堤体部の動水圧 wp3 と加速度 a1a3-s がともに記録できている、2020年3月18日以降の観測記録から選定した。図-3.13 に CASE2-2 解析結果の動水圧および加速度の時刻歴波形および加速度フーリエスペクトルを、地震観測記録と比較して示す。なお、CASE2-2 も CASE1-4 と同様、ゲートの固有振動数（約 8Hz）を合わせるため、鋼材の弾性係数を  $170,000\text{N/mm}^2$  に調整している。

図-3.13(a)および(b)のゲート部については、前節の図-3.12(a)および(b)と同様の傾向で、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。また、ゲート a11-s の加速度およびゲート部 wp1 の動水圧のフーリエスペクトルの比較では、観測値と解析値で若干異なるものの、卓越振動数が概ね同様の傾向となっている。

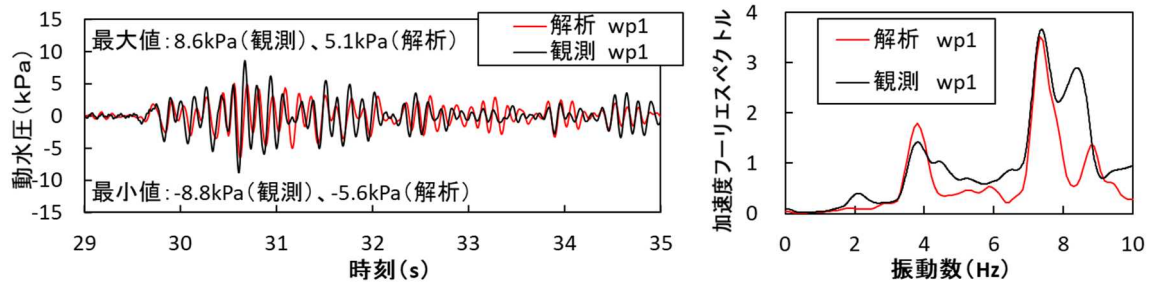
図-3.13(c)および(d)の堤体部については、堤体 a1a3-s の加速度の解析値と観測値が一致している時間帯においては、その時間帯ではゲート部 wp3 の動水圧も概ね一致している。また、堤体 a1a3-s の加速度および堤体部 wp3 の動水圧のフーリエスペクトルの比較では、観測値と解析値で若干異なるものの、卓越振動数が概ね同様の傾向となっている。

一方、図-3.13(b)および(c)より、ゲート部 wp1 の動水圧は堤体 a1a3-s の加速度と傾向が異なっている。また、図-3.13(a)および(d)より、堤体部 wp3 の動水圧はゲート a11-s の加速度と傾向が異なっている。

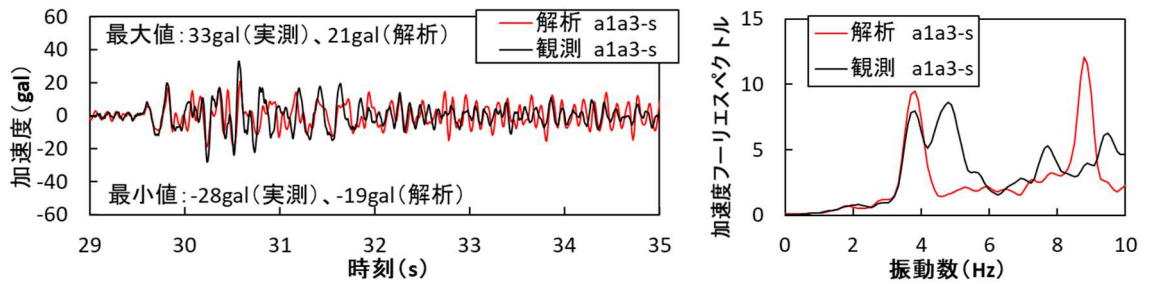
以上より、地震観測記録と同様、解析結果からも、堤体部 wp3 の動水圧は主に堤体振動により発生しているのに対して、ゲート部 wp1 の動水圧は、主にゲート振動により発生していると考えられるが、堤体の卓越振動数 4Hz による影響により発生する動水圧の影響は小さいと考えられる。



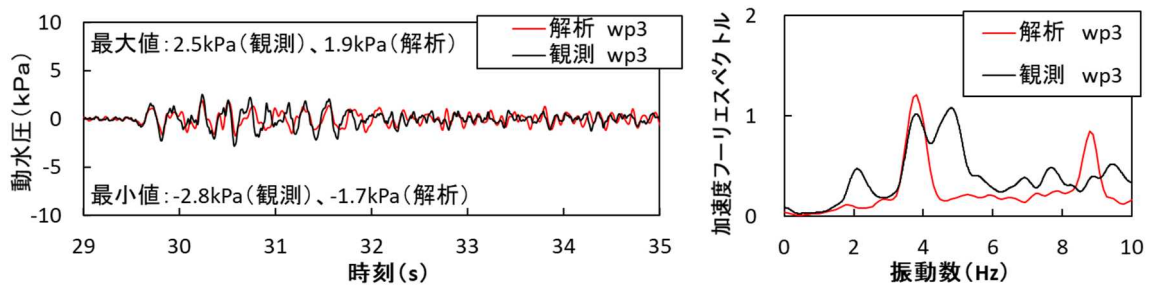
(a) ゲート a11-s 加速度



(b) ゲート部 wp1 動水圧



(c) 堤体 a1a3-s 加速度



(d) 堤体部 wp3 動水圧

図-3.13 解析結果 CASE2-2 と地震観測記録の比較 (2020/4/12 0:45 地震, 貯水時)

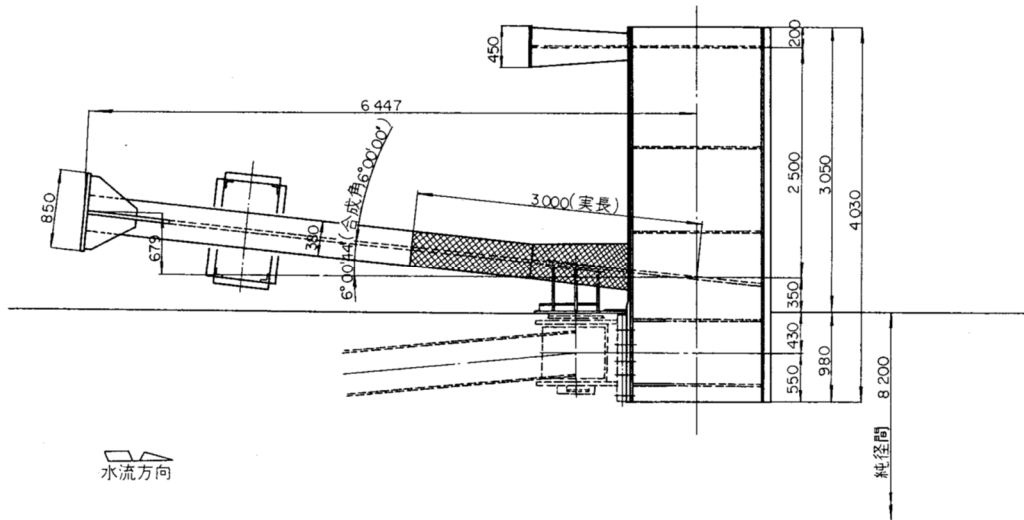
### 3.5 アンカーレッジの影響検討

#### 3.5.1 解析モデルおよび解析ケース

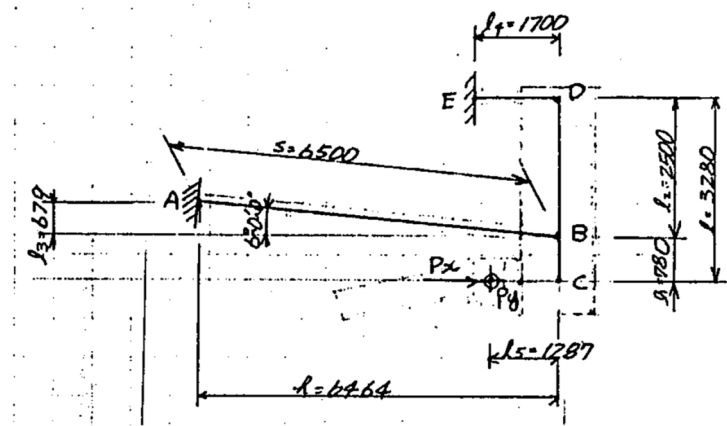
前節における CASE1-4, CASE2-1 および CASE2-2 は, ゲートの固有振動数を合わせるため, ゲートの弾性係数を設計値の  $205,000\text{N/mm}^2$  に対し  $170,000\text{N/mm}^2$  に調整することで, 観測記録の再現性が良くなった. しかし, 実ゲートに顕著な劣化は見られておらず, 弾性係数が実際に低下している状況にはないと考えられた. そのため, ゲートの固有振動数の相違には別の要因があると考えられたため, アンカーレッジの固定状況を変更したケースについて実施した.

解析モデルは, 図-3.3 モデル 2 では, アンカーレッジの影響が小さいと仮定して, アンカーレッジをモデル化せず, ゲートのトランニオン位置で並進三方向を堤体(門柱)コンクリートに拘束させていた. しかし, 実際にはゲートはアンカーレッジを通じて堤体に固定されているため, 解析モデル 2 のゲート固定部を, 図-3.14 のアンカーレッジの構造(設計)を参照し, 図-3.15 のとおりアンカーレッジの A-B 間部材, D-E 間部材および C-D 間部材を骨組要素でモデル化する追加修正をし, モデル 2 (アンカーレッジ修正モデル) とした. その他の解析条件は, 3.3 と同様である.

解析ケース, 解析条件および物性値一覧を表-3.2 および図-3.16 示す. CASE3-1 は, アンカーレッジの固定状況を図-3.14 に示す設計どおり, A 部および E 部のみで固定されているケースとした. CASE3-2 および CASE3-3 は, アンカーレッジの門柱コンクリート内に固定されている箇所が, 設計上は考慮していない摩擦等の影響があることを想定し, 表-3.2(c) および図-3.16 示すとおり物性値を調整した. CASE3-2 は, ゲートのみの固有振動数が地震観測記録のゲートの固有振動数(約 7.8Hz)に合うように A-B 間部材の弾性係数を調整した. CASE3-3 は, A-B 間部材の門柱コンクリート内の箇所が摩擦を受け, B 点がほぼ固定されていると仮定した条件を設定した.



(a) アンカーレッキ組立図

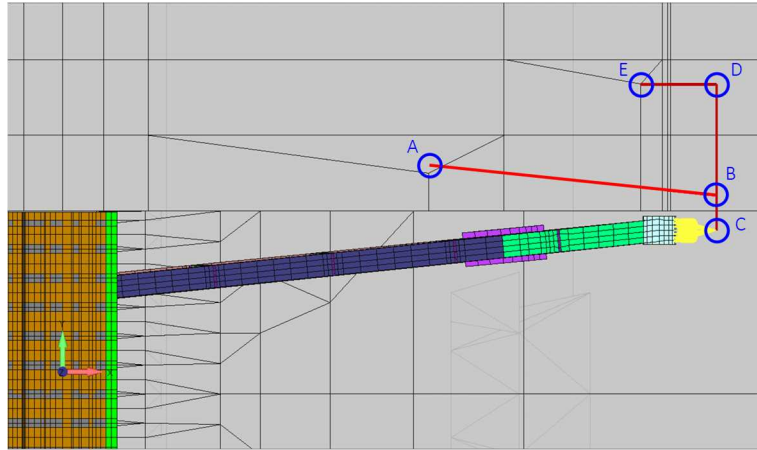


(b) アンカーレッキ設計計算書における固定状況



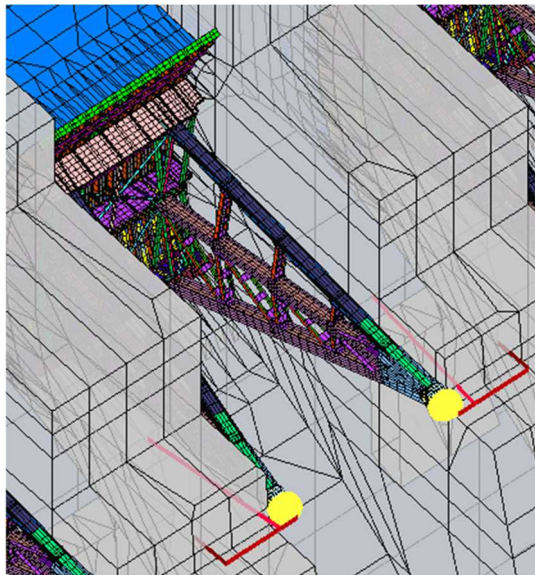
(c) アンカーレッキ (トラニオンゲーター部) の状況

図-3.14 アンカーレッキの構造 (設計)



※A～Eは、図-3.14に示す箇所のとおり骨組要素でモデル化した。

(a) 平面図



(b) 鳥瞰図

図-3.15 モデル2 (アンカーレッジ修正モデル)

表-3.2 解析ケース，解析条件および物性値一覧

(a) 解析条件

解析ケース	3-1～3-3
モデル	モデル2 (アンカーレッジ修正モデル)
貯水・空水	貯水
観測地震日時	2018/11/27 8:34
入力地震動	L1の観測地震波形を基礎岩盤に引き戻して入力

(b) 物性値

解析ケース		3-1～3-3		
		ゲート	堤体	岩盤
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	205,000	43,000	38,400, 13,500 <sup>※1</sup>
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	85.41	23.65	22.56
ポアソン比		0.3	0.2	0.3
減衰定数 h	%	2	5	5
レイリー周波数 <sup>※2</sup>	Hz	f1 : 8.87, f2 : 24.24	f1 : 4.10, f2 : 9.86	f1 : 2.18, f2 : 30.0

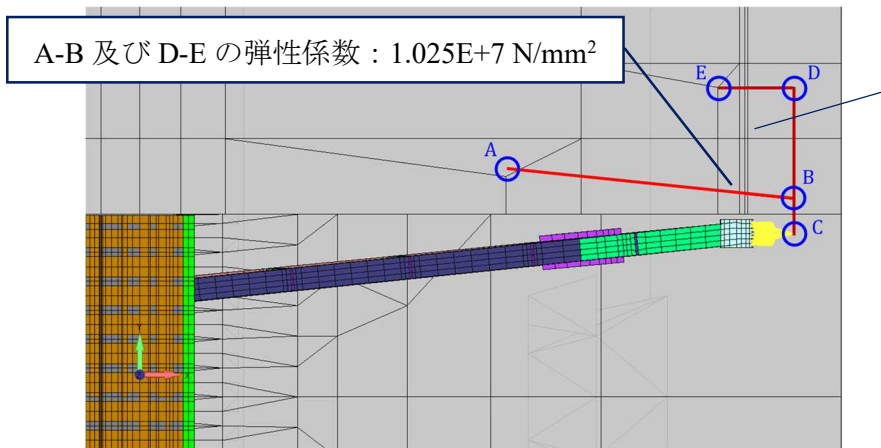
※1 実ダムの基礎掘削時に確認された岩級区分を参考に、左岸基礎地盤の EL334m 以上の標高で、堤体と接しているメッシュのみ弾性係数を 13,500N/mm<sup>2</sup> と設定した。

※2 3.3.1 の表-3.1 と同様に設定した。

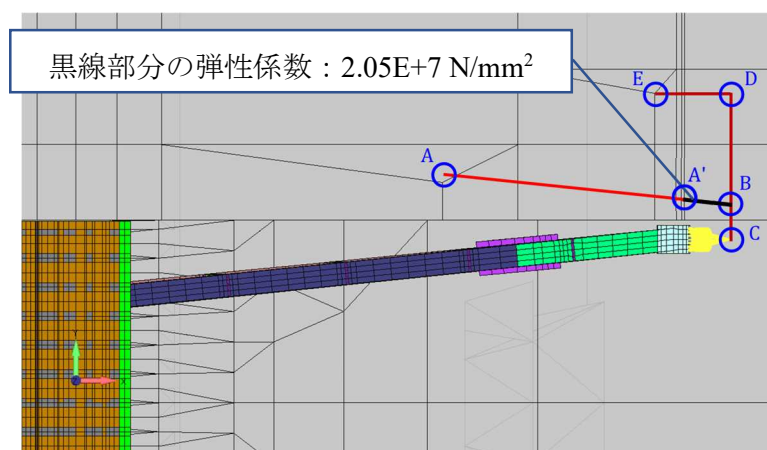
(c) 物性値 (アンカーレッジ骨組要素)

解析ケース		3-1			3-2			3-3		
		A-B間	C-D間	D-E間	A-B間 <sup>※3</sup>	C-D間	D-E間	A-B間 <sup>※3</sup>	C-D間	D-E間
断面二次モーメント : Iz	m <sup>4</sup>	8.182E-03	0.016953	2.126E-03	8.182E-03	0.016953	2.126E-03	8.182E-03	0.016953	2.126E-03
断面二次モーメント : Iy	m <sup>4</sup>	3.327E-04	0.029195	4.403E-05	3.327E-04	0.029195	4.403E-05	3.327E-04	0.029195	4.403E-05
断面積 : A	m <sup>2</sup>	0.05976	0.101728	0.01752	0.05976	0.101728	0.01752	0.05976	0.101728	0.01752
弾性係数 : E	N/mm <sup>2</sup>	205,000	205,000	205,000	1.025E+07	205,000	1.025E+07	205,000 (A-A'間), 2.05E+7 (A'-B間)	205,000	205,000
ポアソン比 : 0.3	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
単位体積重量 : γ	N/mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
有効せん断断面積 : Asy	m <sup>2</sup>	0.032994	0.030230	0.010670	0.032994	0.030230	0.010670	0.032994	0.030230	0.010670
有効せん断断面積 : Asz	m <sup>2</sup>	0.035501	0.056978	0.015620	0.035501	0.056978	0.015620	0.035501	0.056978	0.015620

※3 CASE3-2 および CASE3-3 では、アンカーレッジの固定状況を修正するため、図-3.16 に示す箇所についてアンカーレッジの骨組要素の弾性係数を調整した。CASE3-3 では、アンカーレッジを A'点で堤体 (門柱) に固定させた。



(a) CASE3-2



(b) CASE3-3

図-3.16 アンカーレッジ骨組要素の物性値修正箇所

なお、各ケースの固定条件設定の参考にするため、アンカーレッジを含むゲート部のみの固有値解析を実施し、表-3.3に示す結果を得た。地震観測記録のゲートの固有振動数(約7.8Hz)に対し、CASE3-1モデルの固有振動数(1次)は5.95Hzとなっており、地震観測記録より低振動の結果となった。CASE3-2モデルの固有振動数(1次)は7.82Hzとなっており、概ね地震観測記録の固有振動数に近い結果となった。また、CASE3-3モデルの固有振動数(1次)は8.07Hzとなっており、地震観測記録の固有振動数より若干高振動側の結果となった。

表-3.3 固有値解析結果（アンカーレッジを含むゲート部のみ）

(a) CASE3-1

次数	固有円振動数	固有振動数	固有周期		X	Y	Z
1	37.39	5.95	0.17	刺激係数	7.82E-01	2.39E-06	5.81E-02
				有効質量	6.11E-01	5.73E-12	3.38E-03
				有効質量比	0.99234	0.00000	0.03672

(b) CASE3-2

次数	固有円振動数	固有振動数	固有周期		X	Y	Z
1	49.11	7.82	0.13	刺激係数	7.74E-01	5.26E-06	6.08E-02
				有効質量	6.00E-01	2.77E-11	3.69E-03
				有効質量比	0.97425	0.00000	0.04012

(c) CASE3-3

次数	固有円振動数	固有振動数	固有周期		X	Y	Z
1	50.68	8.07	0.12	刺激係数	7.73E-01	5.85E-06	6.10E-02
				有効質量	5.97E-01	3.42E-11	3.72E-03
				有効質量比	0.97018	0.00000	0.04041

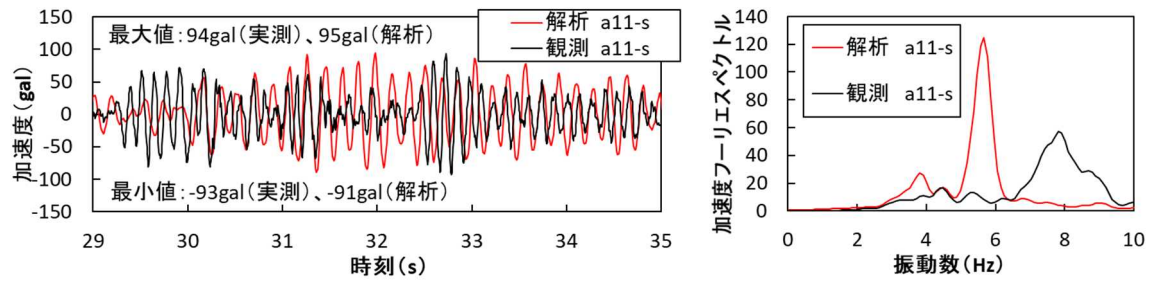
### 3.5.2 解析結果

図-3.17～図-3.19 に CASE3-1～CASE3-3 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。

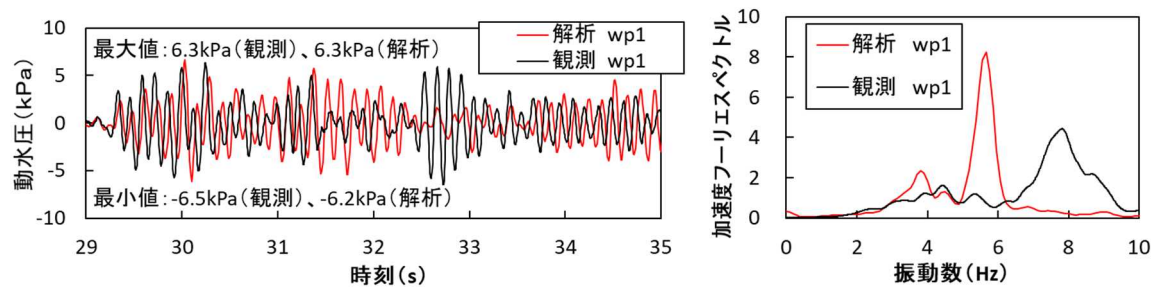
図-3.17(a)および(b)より、設計どおり、A 部および E 部のみで固定した CASE3-1 では、加速度応答と動水圧が再現できていない。この要因としては、アンカーレッジを含むゲート部のみの固有値解析結果（1 次）が 5.95Hz となっており、地震観測記録によるゲートの固有振動数（約 8Hz）と合っていないためと考えられる。

図-3.18(a)および(b)より、アンカーレッジの門柱コンクリート内に固定されている箇所、設計上は考慮していない摩擦等の影響があることを想定した CASE3-2 では、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

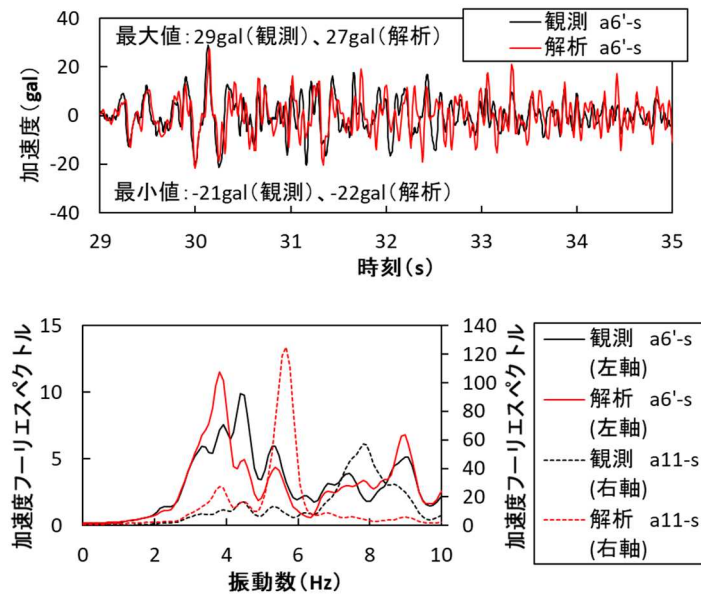




(a) ゲート a11-s 加速度



(b) ゲート部 wp1 動水圧

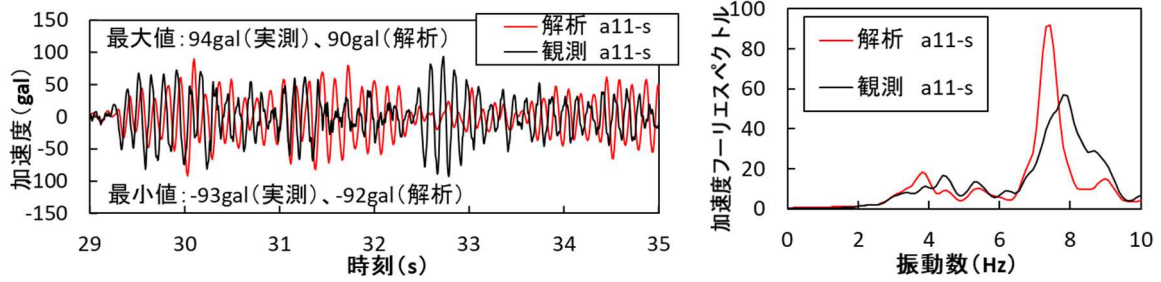


(c) 門柱 a6'-s 加速度

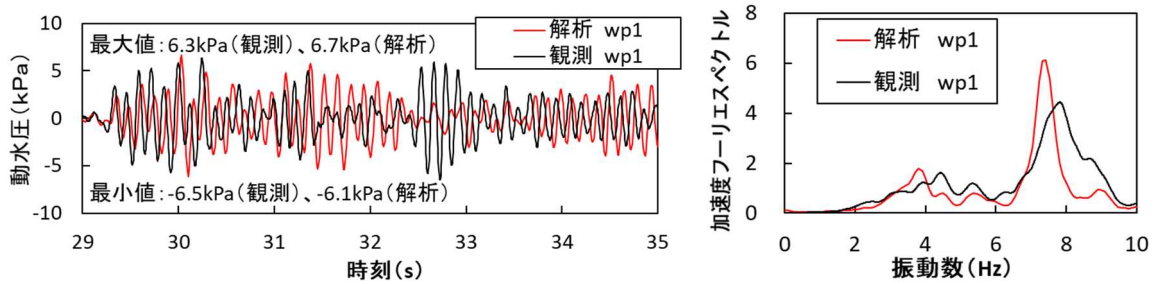
図-3.17 解析結果 CASE3-1 と地震観測記録の比較 (2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)

ルは卓越振動数が解析結果の約 7.3Hz 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。

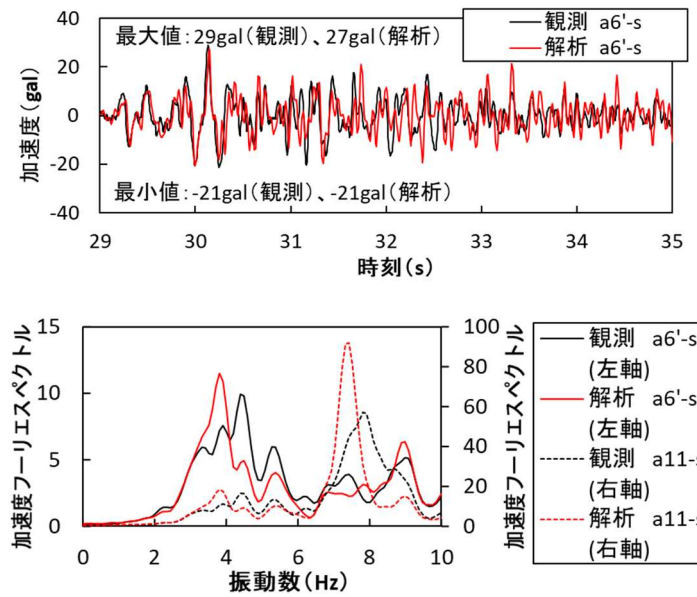
図-3.19(a)および(b)より、アンカーレッジの門柱コンクリート内に固定されている箇所



(a) ゲート a11-s 加速度



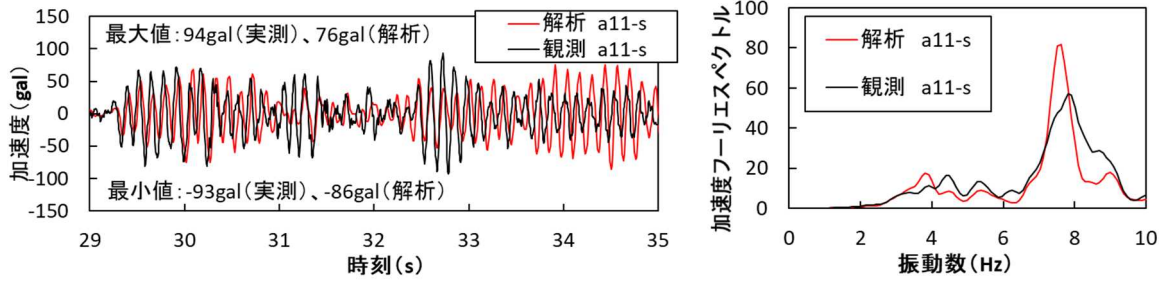
(b) ゲート部 wp1 動水圧



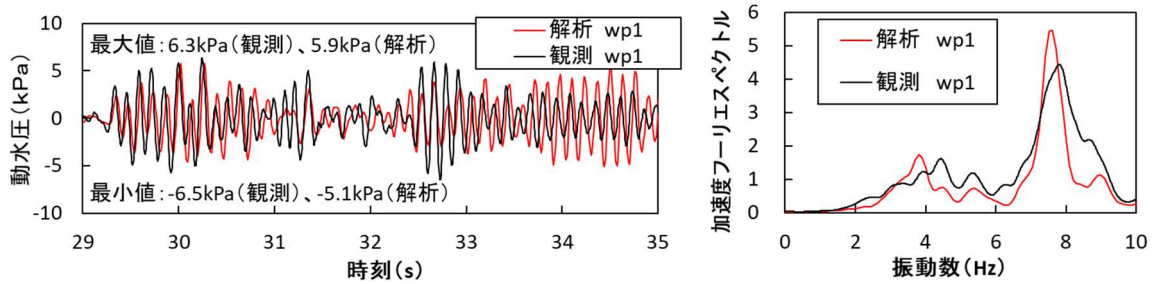
(c) 門柱 a6'-s 加速度

図-3.18 解析結果 CASE3-2 と地震観測記録の比較 (2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)

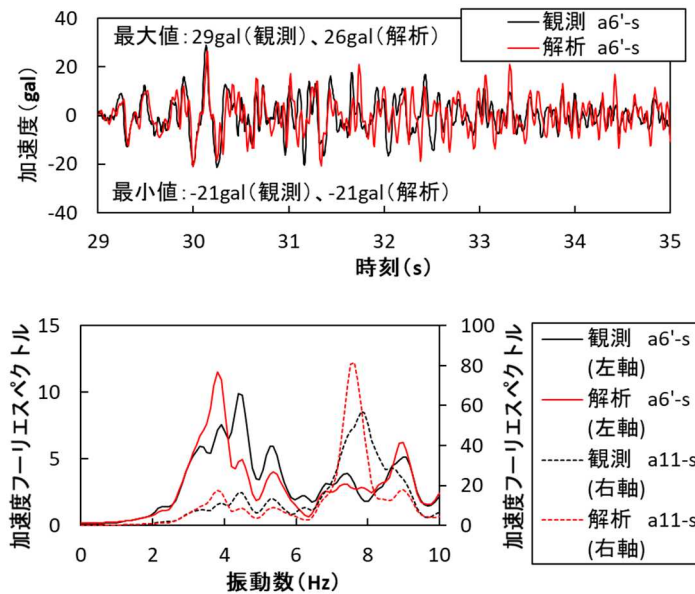
が、設計上は考慮していない摩擦等の影響で、図-3.16(b)に示す A-B 間の門柱コンクリート内の箇所が固定されていることとした CASE3-3 では、ゲート a11-s の加速度は主要動の前半 (29s~31.5s) は概ね一致しており、その時間帯ではゲート部 wp1 の動水圧も概ね一



(a) ゲート a11-s 加速度



(b) ゲート部 wp1 動水圧



(c) 門柱 a6'-s 加速度

図-3.19 解析結果 CASE3-3 と地震観測記録の比較 (2018/11/27 8:34 地震, 貯水時)

致している。しかし、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7.6Hzとなり、観測記録の約7.8Hzに近い値となった。

以上より、ゲートの固有振動数は、ゲート部のみでは無く、アンカーレッジの固定状況の影響を受けていると考えられる。アンカーレッジの固定状況は、設計上は門柱コンクリートの深部（図-3.19(b)に示す A 部および E 部）で固定されている。しかし、設計通りモデル化した CASE3-1 の解析結果では、ゲート振動の固有振動数が合わなかった。実際には、アンカーレッジが門柱コンクリートに摩擦等で拘束されている影響を受けていると考えられ、そのことを考慮した解析結果（CASE3-2, CASE3-3）の方が、地震観測記録に近い固有振動数となった。

また、CASE3-2 と CASE3-3 の解析結果では、表-3.3 に示すアンカーレッジを含むゲート部のみの固有値解析結果（1次）に対し、動的解析結果による固有振動数は、0.5Hz 程度低振動側となった。これは、ゲートが堤体や岩盤と一体で振動しているため、特にゲートを支えている門柱と一体で振動している影響を受けたためと考えられる。その結果、CASE3-2 と比較しアンカーレッジがより固定されている条件とした CASE3-3 の方が、3次元一体モデルでの解析結果におけるゲートの固有振動数が地震観測記録に近く再現性が良い結果となっており、実際のゲートの固定状況に近いと考えられる。

### 3.6 まとめ

本章では、第2章の地震観測記録について、各モデルで再現解析実施した。それらの結果を分析し、ゲート振動および動水圧の発生要因と、門柱振動、堤体振動および動水圧の発生要因の関係を、以下の通り解明した。

- 1) ゲートモデルの解析結果より、空水時は、弾性係数を鋼材の一般値  $205,000\text{N/mm}^2$  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。
- 2) 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、ゲートの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。また、一体3次元モデルにおいて、非圧縮性流体で、流体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、地震観測記録と同様、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。

- 3) 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。
- 4) 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のゲート部動水圧と堤体部動水圧の比較では，堤体部 wp3 の動水圧は主に堤体振動により発生しているのに対して，ゲート部 wp1 の動水圧は，主にゲート振動により発生していると考えられるが，堤体の卓越振動数 4Hz による影響により発生する動水圧の影響は小さいと考えられることを解析上でも確認できた。
- 5) ゲートの固有振動数は，アンカーレッジの固定状況や門柱振動の影響も受けることを示した。また，ゲートの固有振動数は，アンカーレッジを含むゲート部のみで決まるものではなく，堤体と一体で振動することにより，特に門柱振動と一体で振動することによる影響を受けていると考えられることを示した。

### 第3章の参考文献

- 1) 藤田将司, 佐藤信光, 田中聖三, 京藤敏達, 「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」, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No. 4 (地震工学論文集第 39 卷), pp.I\_472-I\_485, 2020.
- 2) センチュリテクノ株式会社 : 構造解析プログラム ISCEF.
- 3) 永山功, 自閑茂治 : 重力ダムの動的挙動特性とその簡易耐震設計法, 大ダム, No.119, pp.14-34, 1987.

## 第4章 感度解析による分析<sup>1)</sup>

### 4.1 はじめに

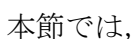
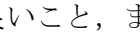

本章では、ゲート諸元の違いによる動水圧発生要因の変化を分析するため、感度解析を実施した。

第2章および第3章では、Aダムクレストゲートにおいて堤体、基礎岩盤、貯水、およびゲートの3次元FEMモデルで詳細の分析をしたもので、他ダムの様々なダムゲートの純径間や扉高等の諸元、堤頂部ゲートの上下流方向の設置位置の相違により、どのような傾向となるか明らかにされていなかった。

そこで本章では、Aダムクレストゲートにおけるゲート部動水圧の主な発生要因がゲート振動によるものであることに着目し、まず簡易的な3次元FEMモデルを用いて、ゲート振動により計算されるゲート部動水圧が地震観測記録を概ね再現できることを確認することとした。さらに、一般的なクレストゲートにおけるゲート部動水圧の発生要因とその強さの変化を分析するため、同じ3次元FEMモデルを用いて、ダム上流面に対するゲート扉体の下流方向の設置位置（以下、「セットバック」という。）やクレストゲートの各種諸元（扉高に対する純径間の比率等）による影響を分析することとした。

### 4.2 3次元FEMモデルによる再現解析

#### 4.2.1 解析モデルおよび解析条件

本節では、に示すゲート、貯水の3次元FEMによる検討を行った。本章では、4.3における感度解析によりゲート諸元やセットバック等の堤頂部のゲート配置による動水圧の発生要因の分析が主目的で、ゲートは扉体部の上下流方向の加速度を設定できれば良いこと、また、およびに示した地震観測記録<sup>2)</sup>においてゲート扉体部の支配振動は脚柱で支えられている範囲（ゲート a10-s～a13-s）が上下流方向に同位相で振幅比が近い振動である。そのため、モデルのゲート諸元やセットバック等の変更が容易

にできるように、図-4.1のゲートは扉体部のみを剛体板とした簡易モデルとし、入力地震動は上下流方向のみとした。なお、本節では堤体振動による動水圧の発生は考慮しないため、堤体はモデルに含めていない。貯水は、鉛直方向は平常時の管理水位から堤体基礎標高までとし、上下流方向とダム軸方向はゲート部の動水圧に影響が及ばない範囲を設定した。ゲートと貯水（流体）の相互作用に関しては、一般的にコンクリートダムの動的解析で用いられる方法<sup>3)</sup>と同様に、ゲートの運動方程式に非圧縮性流体付加質量マトリクスを考慮し、得られたゲートの加速度より動水圧を算出した。解析コードはISCEF<sup>4)</sup>を用いた。構造と流体の連成による動水圧の発生と、動水圧による構造への影響を考慮した解析条件は3.3.2と同様である。

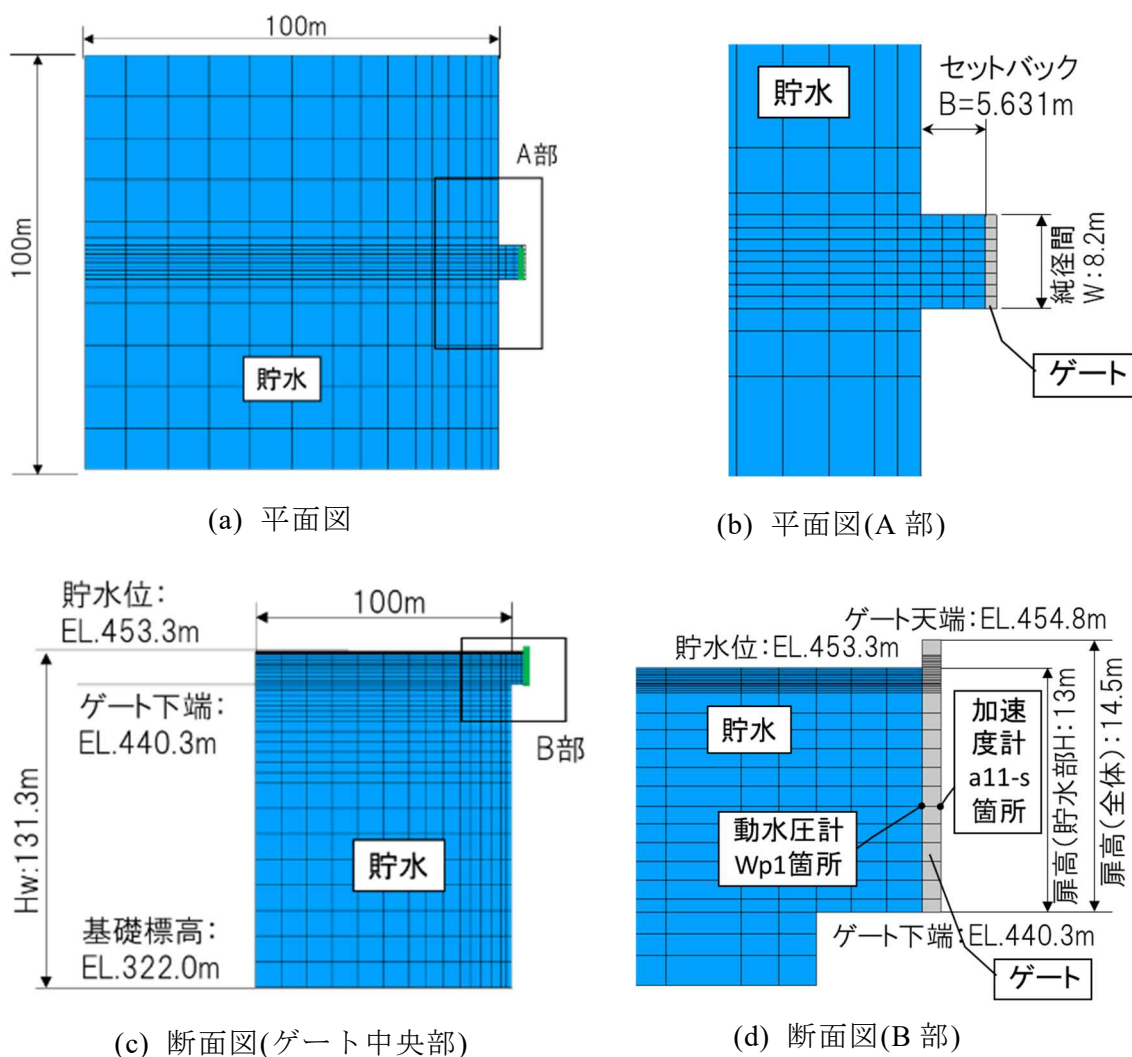


図-4.1 解析モデル



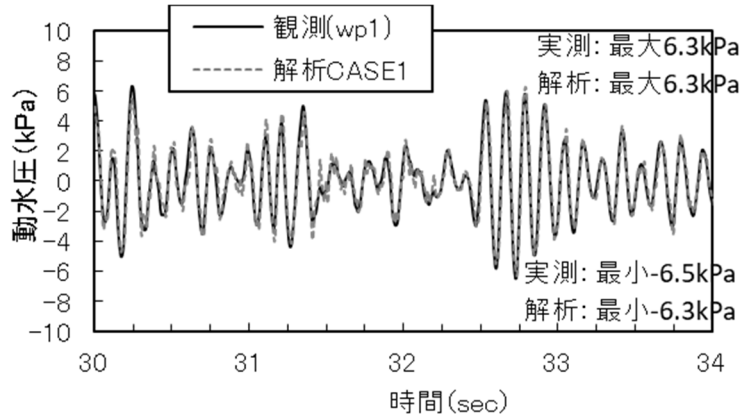
#### 4.2.2 解析ケースおよび解析結果

解析ケースを表-4.1に示す。CASE1は、解析モデルの再現性を確認するために、ゲート(a11-s)の実測地震記録により解析し、動水圧(wp1)の実測値と比較を行った。解析結果を図-4.2に示すが、動水圧時刻歴およびフーリエスペクトルの実測値と解析値が概ね一致しており、ゲート振動による動水圧のみで、ゲート部の動水圧を概ね再現できることが確認できた。なお、ゲートを詳細のシェル要素でモデル化した第3章の解析結果(図-3.10)<sup>2)</sup>においても、同様にゲート振動による動水圧のみでゲート部の動水圧を概ね再現できていたことから、ゲートを剛体としても、動水圧の結果について再現性が良い結果が得られることを確認できた。

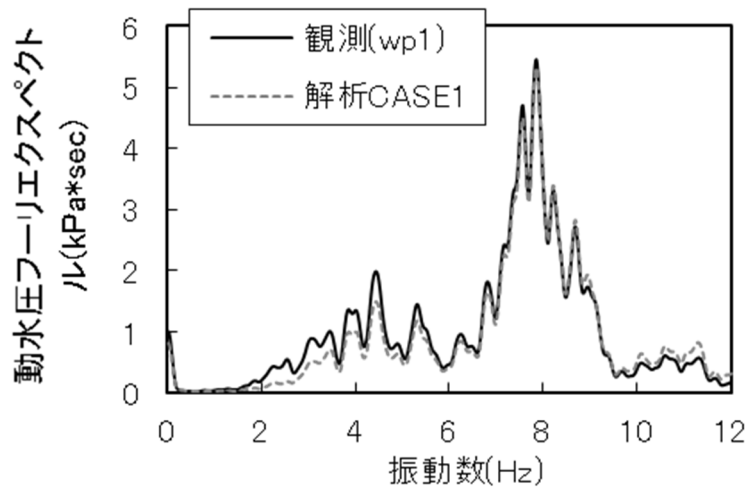
次に、最大加速度を合わせた正弦波(CASE2)で解析を行った。図-4.3に動水圧の最大時刻時の鉛直方向分布を示す。同図より、実測地震(CASE1)を正弦波(CASE2)としても、最大加速度が一緒であれば最大時刻時動水圧分布も一緒の結果となる。そのため、4.3における感度解析は最大時刻時動水圧分布を比較するため、入力地震動は正弦波として検討を行った。

表-4.1 解析ケース(再現解析)

CASE	入力地震動	加震箇所	セットバックB
1	観測地震(2018/11/27) a11-s(上下流方向), $a_{max}=92.8gal$	ゲートのみ を剛体振動	B=5.631m (Aダム形状より)
2	正弦波(1Hz), $a_{max}=92.8gal$ (上下流方向)	ゲートのみ を剛体振動	B=5.631m (Aダム形状より)



(a) 動水圧時刻歴



(b) 動水圧フーリエスペクトル

図-4.2 解析結果 (CASE1) と地震観測記録の比較

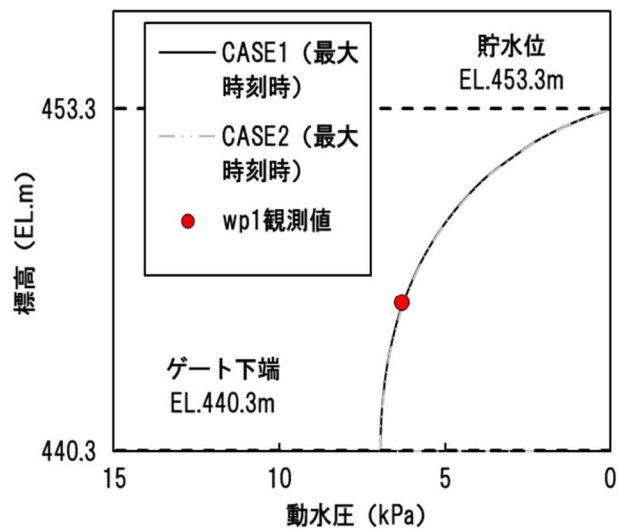


図-4.3 解析結果 (動水圧分布：最大時刻時)

### 4.3 3次元FEMによる感度解析

#### 4.3.1 クレストゲートの諸元と感度解析ケース

感度解析のケース設定の参考にするため、水資源機構のコンクリートダムにおけるクレストラジアルゲートの諸元を調査し、表-4.2、図-4.4に示すとおりとりまとめた。なお、第2章における地震観測を実施したダムは、Aダムのゲートである。図-4.5にAダムのゲートにおけるセットバック箇所を示す。表-4.2中には扉高に対するセットバック比(B/H)を $\beta$ 、純径間比(W/H)を $\gamma$ として示す。図-4.4より、ばらつきは大きいものの、クレストゲートでは扉高が高いほど、セットバック、およびゲート純径間が大きくなるが、セットバック比 $\beta$ および純径間比 $\gamma$ は逆に小さくなる傾向がある。

以上の調査結果に対して、Westergaardの式<sup>5)</sup>は2次元断面にしか適用できないこと、および、中山らの既往研究<sup>6)</sup>では、ゲートの扉高の違い等の鉛直方向や上下流方向の2次元断面の違いによる影響は多数検討されているが、ダム軸方向の影響について十分検討されていない状況にあることを踏まえ、本研究では表-4.3のとおり、ゲートの純径間比 $\gamma$ の違いを含めた3次元断面による影響も含めて感度解析の各種諸元を設定した。

表-4.2 コンクリートダムのクレストラジアルゲートの諸元

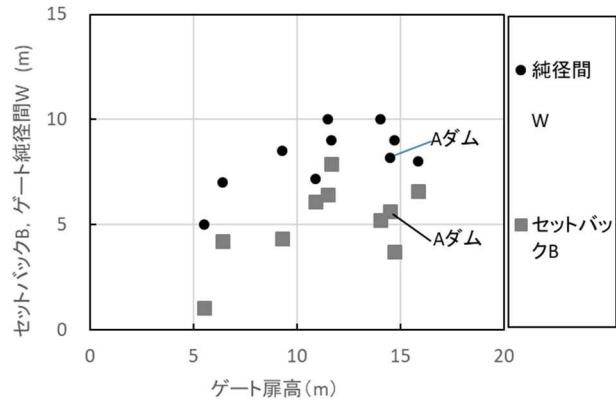
	堤高 (m)	型式	門数	扉高 H (m)	純径間 W (m)	セット バック B <sup>*1</sup> (m)	純径間 比 $\gamma$ <sup>*2</sup>	セット バック 比 $\beta$ <sup>*3</sup>
Aダム <sup>*4</sup>	140.0	ラジアルゲート	4	14.50	8.20	5.63	0.57	0.39
Bダム	129.0	ラジアルゲート	2	15.85	8.00	6.62	0.50	0.42
Cダム	63.5	ラジアルゲート	3	14.70	9.00	3.73	0.61	0.25
Dダム	42.0	ラジアルゲート	4	14.05	10.00	5.24	0.71	0.37
Eダム	140.0	ラジアルゲート	3	11.49	10.00	6.41	0.87	0.56
Fダム	70.4	ラジアルゲート	4	11.65	9.00	7.89	0.77	0.68
Gダム	111.0	ラジアルゲート	4	10.90	7.20	6.10	0.66	0.56
Hダム	75.0	ラジアルゲート	2	9.30	8.50	4.33	0.91	0.47
Iダム	79.2	ラジアルゲート	3	6.40	7.00	4.21	1.09	0.66
Jダム	26.0	ラジアルゲート	3	5.50	5.00	1.07	0.91	0.19
平均	87.6			11.43	8.19	5.12	0.76	0.45

\*1 セットバックは堤体上流面からゲート扉体面2箇所（扉体最下部および扉体曲線部のうち最上流部）までの上下流方向の距離の平均値。ここでの堤体上流面は、越流部下流の上流端位置とした。

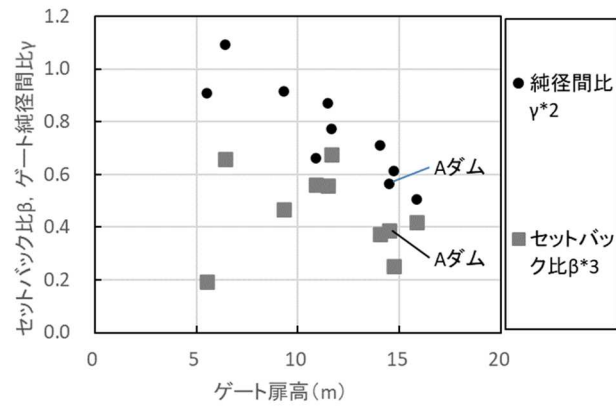
\*2 「純径間比 $\gamma$ ＝純径間W÷扉高H」とする。

\*3 「セットバック比 $\beta$ ＝セットバックB÷扉高H」とする。

\*4 Aダムは、動水圧および加速度の地震観測をしたダムゲート



(a) ゲート扉高とセットバック B およびゲート純径間 W の関係



(b) ゲート扉高とセットバック比  $\beta$  およびゲート純径間比  $\gamma$  の関係

図-4.4 ゲート諸元 (クレストゲート)

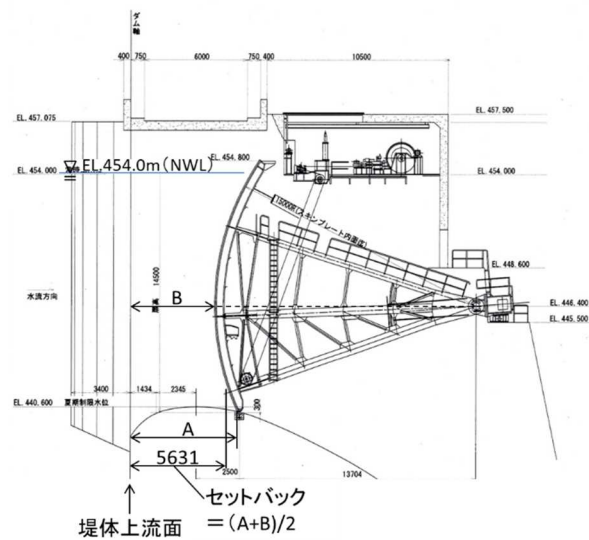


図-4.5 A ダムゲートのセットバック

CASE3 は、A ダムクレストゲートの諸元を基準にし、セットバックの違いによる比較（各ケースについて、A ダムを基準に、セットバックなし（0 倍）～最大 7 倍で実施）を実施した。また、CASE3-1 に対して、ゲートの純径間の違い（CASE4, CASE5）、扉高（貯水部）の違い（CASE6, CASE7）について、ゲートのみを剛体振動させたケースを実施した。また、ゲート振動によるゲート部動水圧の 2 次元モデル（CASE8, CASE9）に対する 3 次元モデルによる影響を分析した。3 次元の解析モデルは図-4.6 に代表事例を示すが、同モデルを表-4 に示す各諸元に変更して各ケースの解析を実施した。流体と構造物の連成面は、ゲートおよび堤体の加震箇所を設定した。CASE8, CASE9 は、3 次元モデルの図-4.6 (c)および(d)に示すゲート中央部断面の 2 次元モデルである。貯水は、鉛直方向は平常時の管理水位（EL.453.3m）から堤体基礎標高（EL.322.0m）までとし、上下流方向とダム

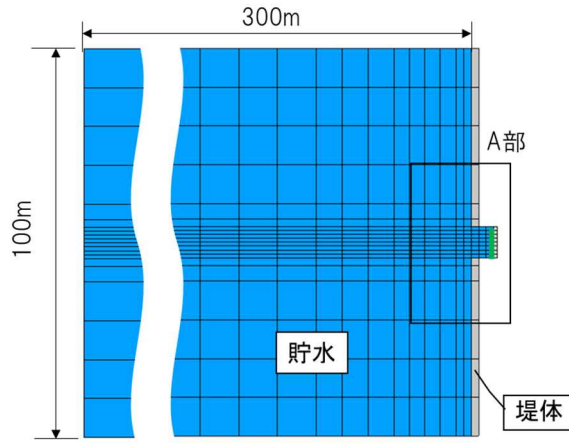
表-4.3 解析ケース（感度解析）

CASE	ゲート諸元			ゲート設置位置		入力地震動	加震箇所
	扉高 (貯水部) H*1 (m)	純径間 W (m)	純径間比 γ*2	セットバック B (m)	下端標高 (EL. m)		
3-1	13.0	8.2	0.631	B=5.631mの 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 7 倍	440.3	正弦波 (1Hz), 981cm/s <sup>2</sup> (上下流 方向)	ゲートのみを 剛体振動
3-2				B=5.631mの 0, 1, 2, 4, 6, 7倍			ゲートおよび 堤体を一体で 剛体振動
3-3				B=5.631mの0, 1倍			堤体のみを剛 体振動（ゲー ト振動なし）
4		4.1	0.315	B=5.631mの 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 7 倍			ゲートのみを 剛体振動
5		12	0.923				
6	6.5	8.2	1.3	446.8			
7	3.25		2.5	450.05			
8	13.0	_*3	_*3	B=5.631mの 0.5, 1, 2倍	440.3		
9	6.5			B=5.631mの 0.25, 0.5, 1倍	440.3		

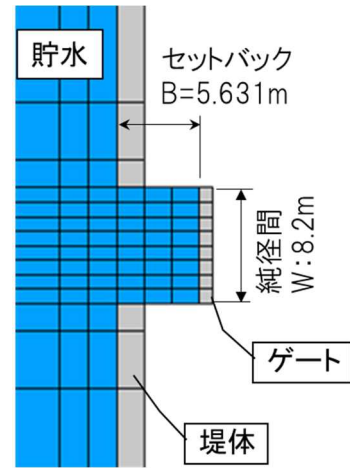
\*1 ゲート扉高は、動水圧と関係する貯水されている高さ扉高（貯水部）Hで示す。

\*2 「純径間比  $\gamma = \text{純径間} W \div \text{扉高（貯水部）} H$ 」とする。

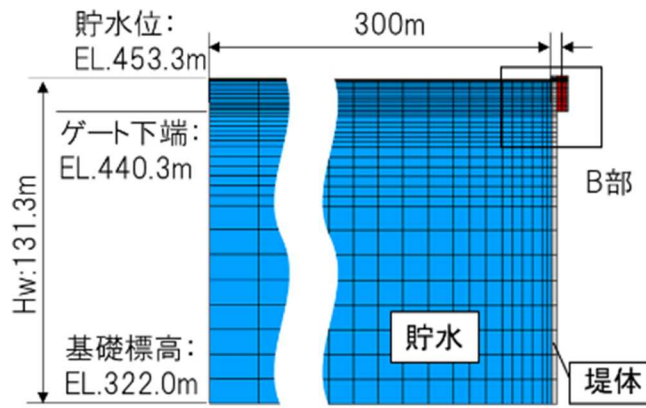
\*3 CASE8およびCASE9は、比較のためゲート中央部断面の2次元モデルで行った。



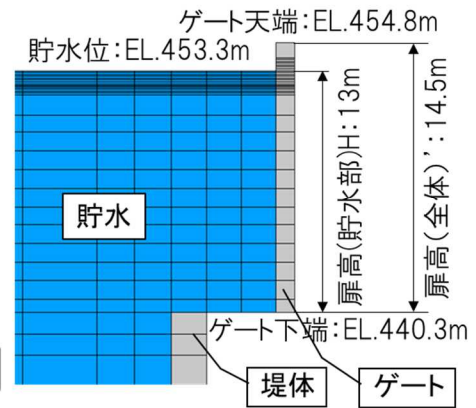
(a) 平面図



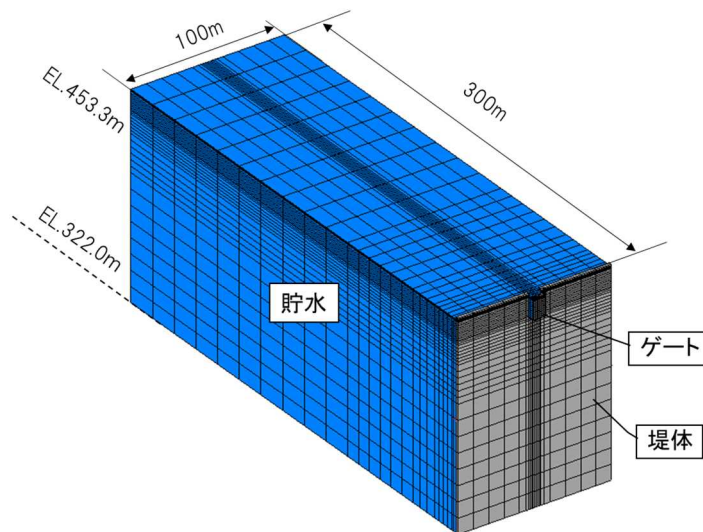
(b) 平面図(A部)



(c) 断面図(ゲート中央部)



(d) 断面図(B部)



(e) 鳥瞰図

図-4.6 解析モデル (CASE3-1, 3-2, 3-3)

軸方向はゲート部の動水圧に影響が及ばない範囲を設定した。その他の解析方法は、第 3 章と同様である。

#### 4.3.2 セットバックによる影響

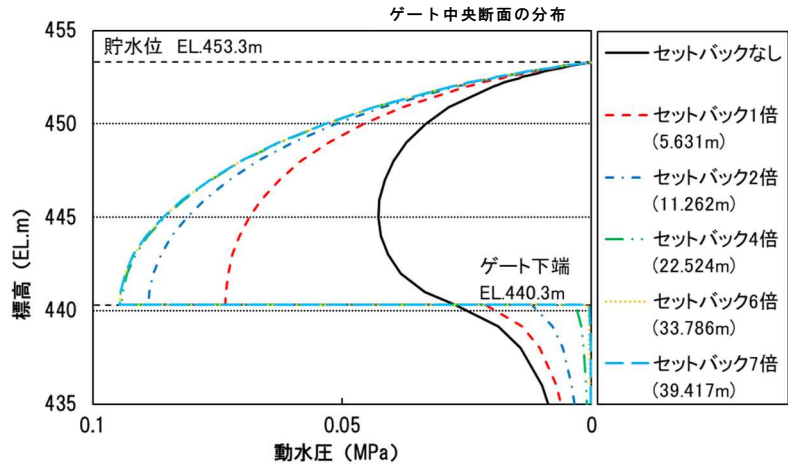
本節では、クレストゲートのセットバックの違いによる動水圧の発生要因を分析した。また、ゲート動水圧の発生要因（①ゲート振動により発生するものと、②堤体振動により発生するもの）を分析するため、加振箇所は表-4.3 および図-4.6 に示すとおり、CASE3-1 はゲートのみを剛体振動させて堤体振動は無し、CASE3-2 はゲートおよび堤体を一体で剛体振動させ、CASE3-3 は堤体のみを剛体振動させてゲート振動は無しとした。図-4.7 および図-4.8 にセットバックの違いによる動水圧の上流面分布を示す。同図の比較ケースは、A ダムの形状である CASE3-1、CASE3-2 のセットバック 5.631m を基準に、セットバックを変更して比較した。

図-4.7(a)より、①ゲート振動による動水圧は、セットバックが大きくなると、ゲート部に発生する動水圧は増加する。ただし、セットバックが 4 倍程度（ $B=$ 約 22m で、セットバック比  $\beta$  が約 1.7 倍程度）で動水圧が上限値となり、それ以上は増加していない。また、セットバックが小さくなると、ゲート部に発生する動水圧は減少し、逆に、図-4.7(b)および(c)に示すとおりゲート部周囲（ゲート下端より下部や、ゲートの水平方向外側）の堤体上流面に発生する動水圧は増加している。よって、①ゲート振動による動水圧は、セットバックが大きくなる方が、ゲート部周囲の堤体上流面側に動水圧の影響が及びにくくなるため、大きくなると考えられる。ただし、ゲート部周囲の堤体上流面側に動水圧の影響が及ばなくなると、それ以上セットバックが増加しても、ゲート部動水圧は上限値で一定になると考えられる。

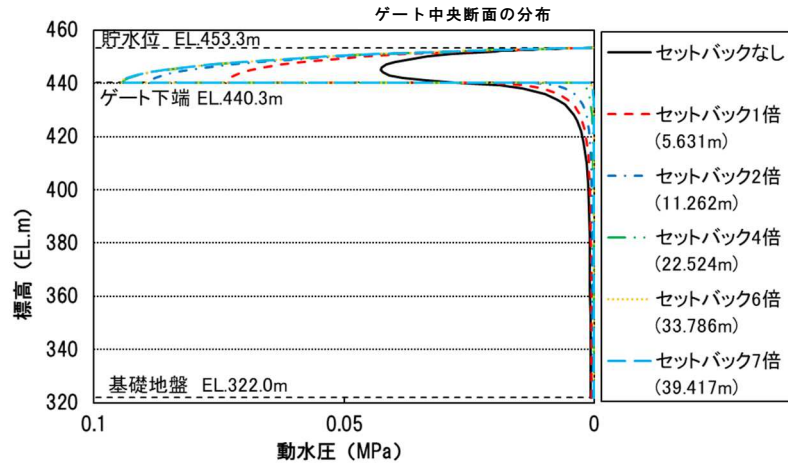
一方、図-4.8(a)より、ゲート振動および堤体振動による動水圧は、セットバックが大きくなると、ゲート部に発生する動水圧は減少する。②堤体振動により発生するゲート部動水圧は、セットバックが大きい方がゲート部に動水圧の影響が及びにくくなるため、小さくなると考えられる。なお、この傾向は、中山らの研究結果<sup>9)</sup>と同様の傾向である。

しかし、第 2 章で前述したとおりゲート扉体の加速度が堤体天端部付近の門柱よりも増幅する（A ダムの事例では約 3~4 倍となる）ことも考慮する必要がある。

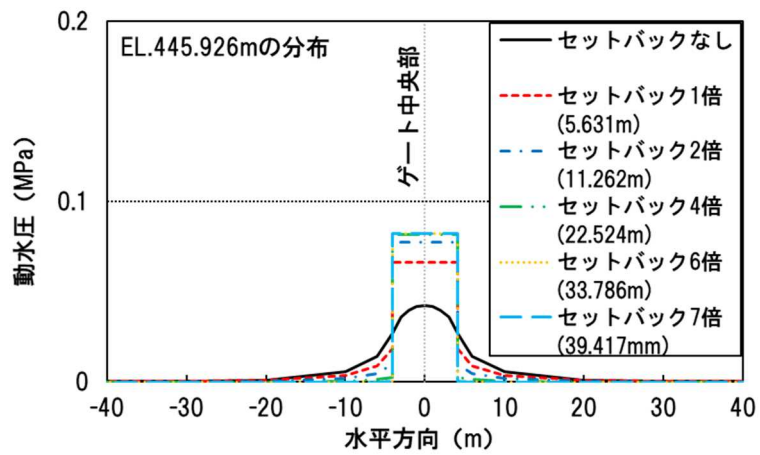
この影響を分析するため、図-4.9 にゲート振動 1~3 倍と堤体振動それぞれによるゲ-



(a) 鉛直分布 (拡大)



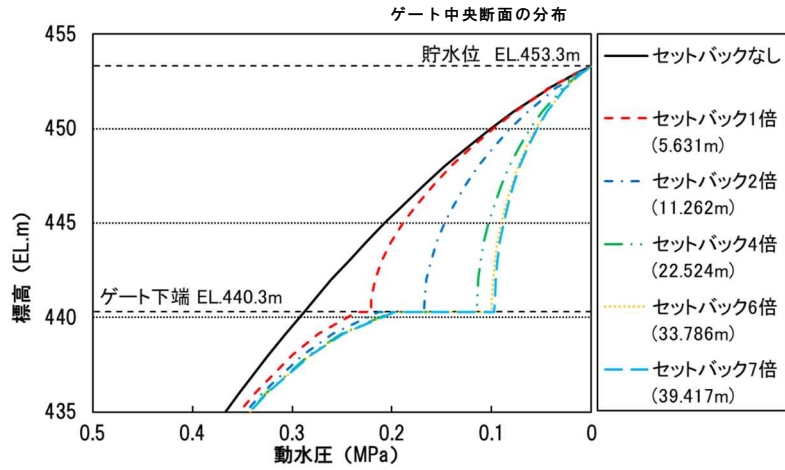
(b) 鉛直分布 (全体)



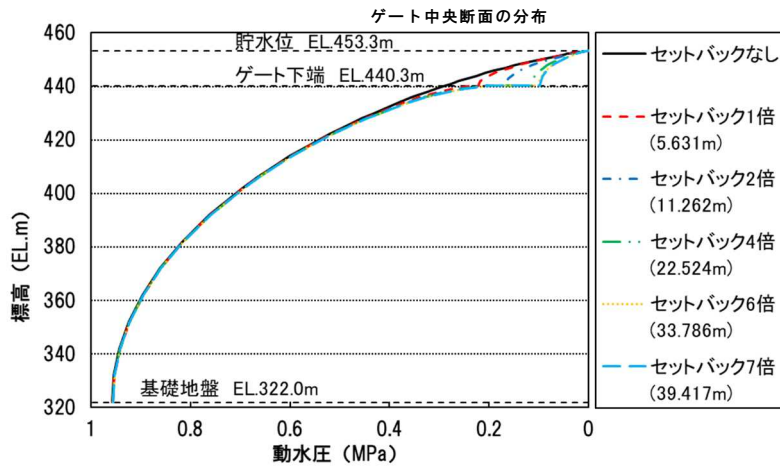
(c) 水平分布

図-4.7 ゲート振動による動水圧の上流面部の分布 (CASE3-1 解析結果)

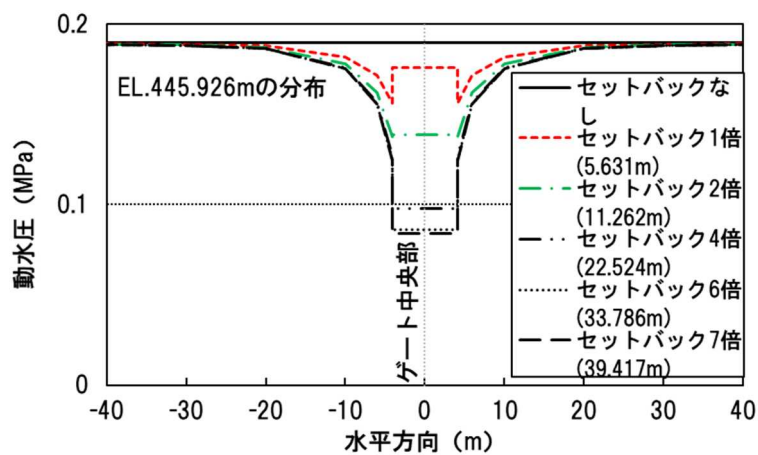




(a) 鉛直分布 (拡大)

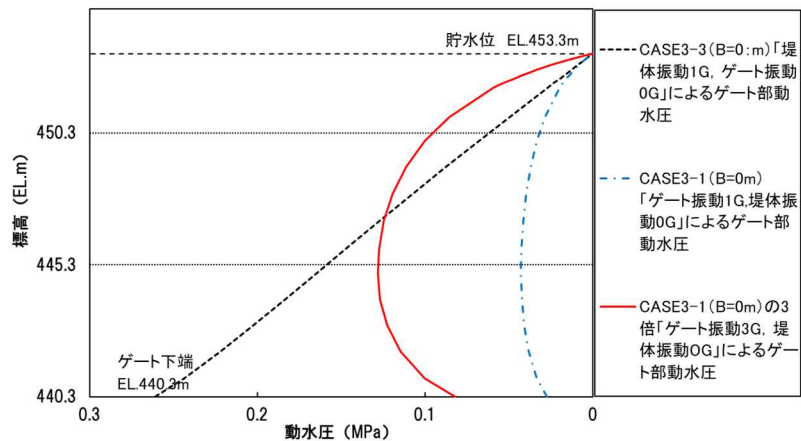


(b) 鉛直分布 (全体)

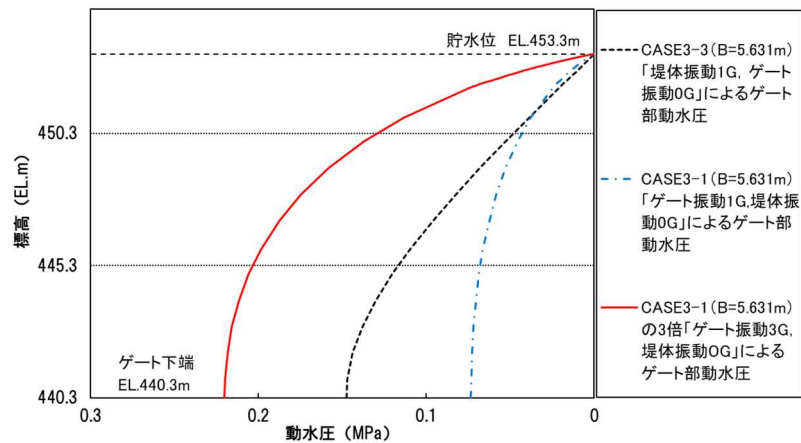


(c) 水平分布

図-4.8 ゲートおよび堤体振動による動水圧の上流面部の分布  
(CASE3-2 解析結果)



(a) セットバック B=0m のケース



(b) セットバック B=5.631m のケース

図-4.9 ゲート振動 1～3 倍と堤体振動によるゲート部動水圧の鉛直分布比較

ト部動水圧の鉛直分布を比較して示す。同図は、CASE3-3「堤体振動 1G (981gal)，ゲート振動 0G によるゲート部動水圧」，CASE3-1「ゲート振動 1G，堤体振動 0G によるゲート部動水圧」と，CASE3-1 の 3 倍「ゲート振動 3G，堤体振動 0G によるゲート部動水圧」の動水圧の鉛直分布を示したものである。図-4.9(a)の結果より，セットバック B=0m のケースでは，ゲート部動水圧の主な発生要因は，「堤体振動 1G」により発生する動水圧が，堤体よりも加速度が増幅した「ゲート振動 3G」により発生する動水圧よりも，ゲートの中央付近より下部で大きい，ゲートの中央部より上部では小さくなっている。また，図-4.9(b)の結果より，セットバック B=5.631m のケースでは，ゲート部動水圧の主な発生要因は，

「堤体振動 1G」により発生する動水圧に対して、堤体よりも加速度が増幅した「ゲート振動 3G」により発生する動水圧の方が大きいことがわかる。なお、実ダムでは、堤体基礎に対して堤体天端の応答が増幅することが知られており、堤体天端よりも堤体下部の加速度が小さいため、堤体振動により発生するゲート部動水圧は、堤体を剛体振動で加速度一律として算出した図-4.9(a)および図-4.9(b)の各 CASE3-3 に示すものよりもさらに小さくなると考えられる。

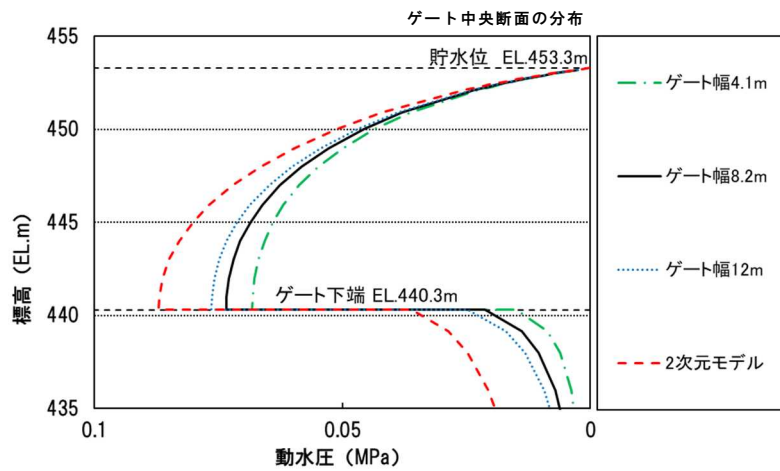
以上より、表-4.2、および図-4.4 に示したようなセットバックがある一般的な堤体天端付近に設置されたセットバックがあるクレストゲートでは、ゲート部動水圧の発生要因は、セットバックが大きい方が①ゲート振動により発生するゲート部動水圧が大きくなり、逆に②堤体振動により発生するゲート部動水圧が減少する。その結果、一般的な堤体天端付近に設置されたセットバックがあるクレストゲートでは、ゲート部動水圧の支配的な発生要因は、ゲート振動自体によるものと推察される。ただし、堤体基礎に対する堤体天端の加速度増幅割合、および、堤体天端部付近の門柱に対するクレストゲート扉体の加速度増幅割合は、個別のダム毎に異なると考えられるため、個別のダム毎に詳細を検討する必要がある。

#### 4.3.3 ゲート振動によるゲート部動水圧の発生にゲートの 3 次元形状が及ぼす影響

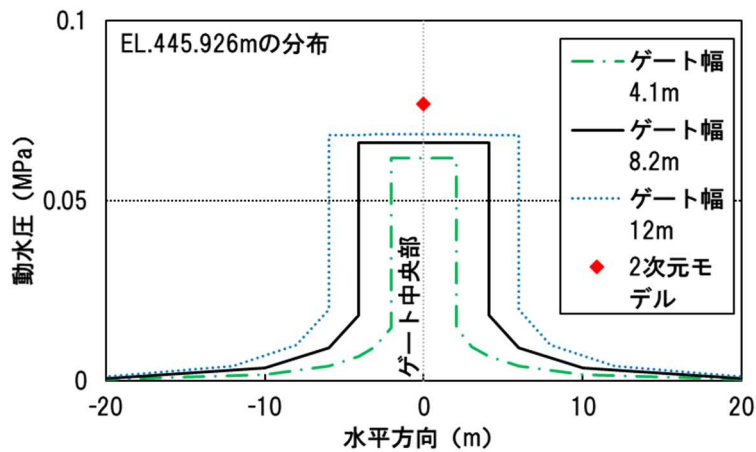
本節では、セットバックのある多くのゲートにおいて、ゲート部動水圧の主要な発生要因と想定されるゲート振動自体による動水圧の発生状況について、ゲートの 3 次元形状が及ぼす影響（2 次元モデルではゲート幅がダム軸方向に無限にあるのと同様なのに対し、3 次元モデルでゲート幅等の形状を考慮できることによる影響）をセットバック比  $\beta$  と純径間比  $\gamma$  に着目して分析した。

##### (1) ゲート純径間の影響

図-4.10 にセットバックは同じにして、ゲート純径間の違いによるゲート振動による動水圧の比較を示す。同図で比較対象としたのは、A ダムの形状である CASE3-1, CASE4, CASE5 および CASE8 のセットバック 5.631m のケースである。図-4.10(a)に鉛直分布、図-4.10(b)に水平分布の結果を示すが、ゲート振動による動水圧は、ゲートの純径間 4.1m よ



(a) 鉛直分布



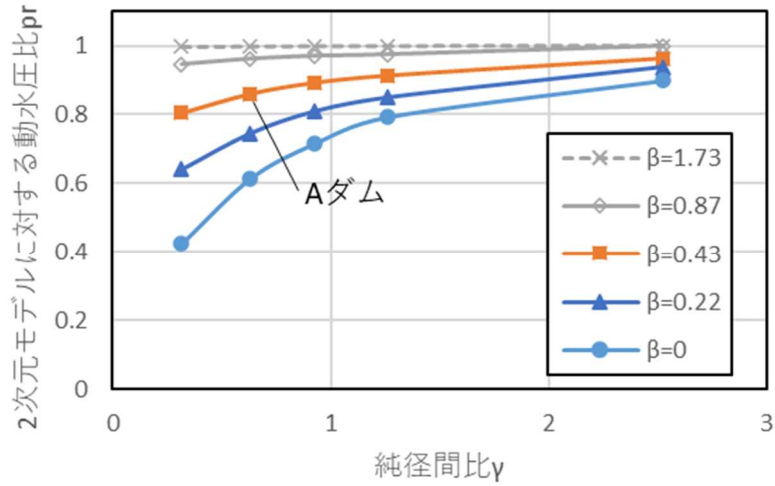
(b) 水平分布

図-4.10 ゲート純径間の違いによるゲート振動による動水圧 (CASE3-1, CASE4, CASE5, CASE8 (2次元) のセットバック 5.631m 解析結果)

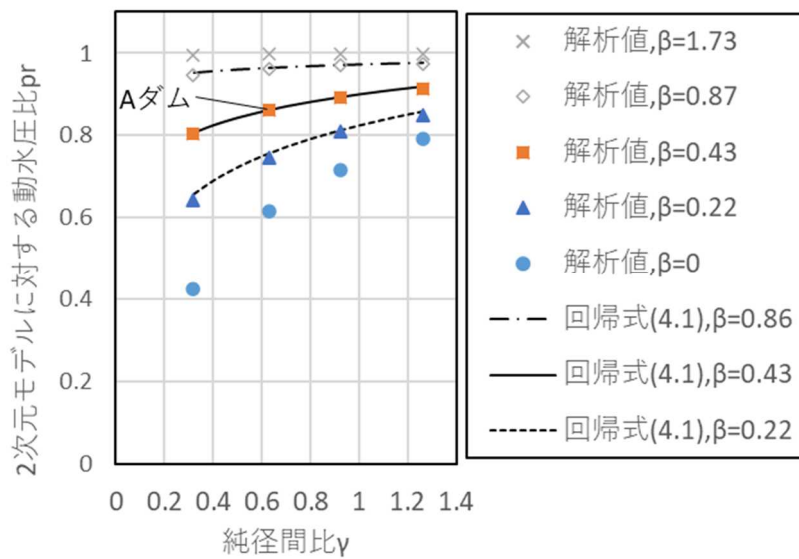
りもゲートの純径間が 8.2m, 12m と増加した方が, ゲート部動水圧の最大値が増加した. また, 2次元モデルでは動水圧がさらに増加する傾向となり, A ダムゲートと同じ純径間 8.2m のケースに対して2次元モデルが, 標高 445.926m のゲート中央部で約 16%大きい結果となった. これは, 図-4.10(b)示すとおり, 3次元モデルのケースでは, ゲートのダム軸方向の周囲(堤体上流面)に動水圧が見られており, その影響によりゲート部の動水圧が低減したと考えられるのに対し, 2次元断面ではゲートがダム軸方向に連続しているのと同等の解析結果になるためと考えられる.

(2) ゲートの3次元形状が及ぼす影響

図-4.11に、純径間比 $\gamma$ と2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ （以下、「動水圧比 $pr$ 」とい



(a) 全ケース



(b) 純径間比  $\gamma$  0.32~1.3 の値と対数近似

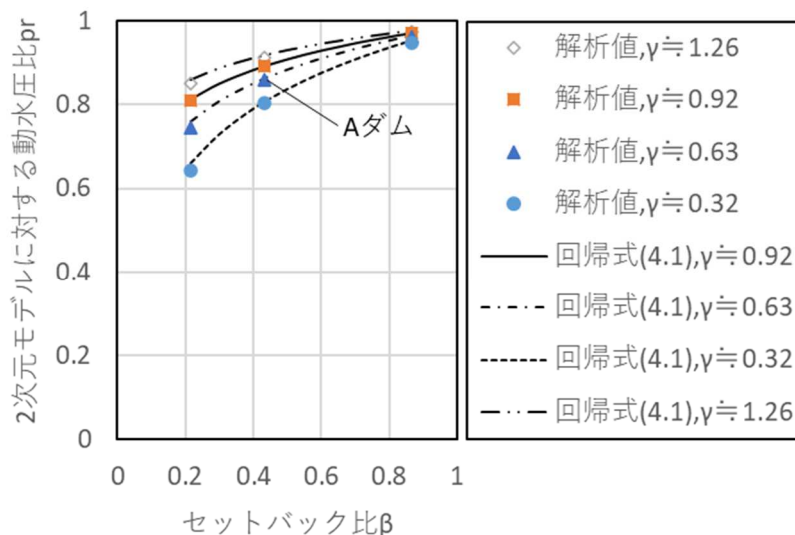
※動水圧比 $pr$ の算出における動水圧は、Aダムにおける動水圧計 wp1 の設置位置に相当する扉高(貯水部)の約 56.7%水深箇所の値を抽出して整理した。

図-4.11 純径間比  $\gamma$  と 2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ の関係

う.) の関係を示す。同図の動水圧比 $pr$ は、「3次元モデルの動水圧÷2次元モデルの動水圧」により算出し、無次元化して示したものである。同図の動水圧比 $pr$ の算出における動水圧は、Aダムにおける動水圧計 $wp1$ の設置位置に相当する扉高（貯水部）の約56.7%水深箇所の値を抽出して整理した。

図-4.11(a)より、純径間比 $\gamma$ が小さいほど動水圧比 $pr$ が低下する傾向がある。また、セットバック $\beta$ が小さいケースほど、同じ純径間比 $\gamma$ での動水圧比 $pr$ が小さい。よって、2次元モデルに対して、3次元モデルの動水圧は純径間比 $\gamma$ の影響を受けている。セットバック比 $\beta$ が1.73の大きいケースでは、純径間比 $\gamma$ による動水圧比 $pr$ の低下がほぼなくなり、純径間比 $\gamma$ の影響をほとんど受けなくなる。ただし、表-4.2、図-4.4に示した実ダムの中のクレストゲートでは、セットバック比 $\beta$ が0.19~0.68、純径間比 $\gamma$ が0.50~1.09の範囲であり、一般的なクレストゲートの動水圧は、純径間比 $\gamma$ の影響を受けると考えられる。

図-4.11(b)は、表-4.2、図-4.4に示したダムの純径間比 $\gamma$ が0.5~1.09の範囲を包括する純径間比 $\gamma$ が0.32~1.3の範囲で、純径間比 $\gamma$ と動水圧比 $pr$ の関係を示したものである。



※動水圧比 $pr$ の算出における動水圧は、Aダムにおける動水圧計 $wp1$ の設置位置に相当する扉高（貯水部）の約56.7%水深箇所の値を抽出して整理した。

図-4.12 セットバック比 $\beta$ と2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ の関係

また、図-4.11(b)と同様に、図-4.12は、セットバック比 $\beta$ と動水圧比 $pr$ の関係を整理したものである。図-4.11(b)および図-4.12より、動水圧比 $pr$ は純径間比 $\gamma$ およびセットバック比 $\beta$ と対数で近似される関係がある。また、図-4.10(a)の鉛直方向の2次元と3次元の動水圧分布より、水深が深い箇所に対して、水深が浅い箇所では、3次元の動水圧が2次元の動水圧に摺付いて行っており、ゲート扉高(貯水部) $H$ に対する水深 $h$ の比率( $h/H$ )も動水圧比 $pr$ と関係がある。一方、図-4.10(b)より、ゲート部動水圧のダム軸方向の分布はほぼ一律であり、動水圧比 $pr$ には影響しないと考えられる。そのため、説明変数を、 $\ln(\beta)$ 、 $\ln(\gamma)$ 、および $\ln(h/H)$ を組み合わせるものとし、また、解析結果は、表-4.2に示すゲートの純径間比 $\gamma$ およびセットバック比 $\beta$ の値を包括出来るよう、純径間比 $\gamma$ が0.32~1.3のCASE3-1, CASE4, CASE5, CASE6およびCASE8, CASE9で、セットバック比 $\beta$ が0.22, 0.43および0.87の動水圧値を用いて重回帰分析を実施し、以下の関係式を得た。重回帰分析における決定係数 $R^2$ は0.979であった。

$$\begin{aligned}
 pr = & -0.00149 * \ln(\beta) * \ln(\gamma) * \ln(h/H) \\
 & -0.101 * \ln(\beta) * \ln(\gamma) \\
 & +0.0206 * \ln(\beta) * \ln(h/H) \\
 & +0.00129 * \ln(\gamma) * \ln(h/H) \\
 & +0.118 * \ln(\beta) + 0.00577 \ln(\gamma) \\
 & -0.00152 * \ln(h/H) + 0.988
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ただし、式(4.1)の適用範囲は、重回帰分析に用いた純径間比 $\gamma$ が0.32~1.3、セットバック比 $\beta$ が0.22~0.87、 $h/H$ が水面の0を除いた0.01~1の範囲内と考えられる。式(4.1)により算出した動水圧比 $pr$ を、図-4.11(b)および図-4.12の回帰式(4.1)のとおり $\beta$ 値毎または $\gamma$ 値毎に示すが、概ね各解析値と同程度となっている。以上より、式(4.1)を用いることにより、ゲート振動によるゲート部動水圧の2次元モデルに対する3次元モデル形状による低減傾向を水深 $h$ 毎に概略値として把握できると考えられる。

以上の結果より、式(4.1)で算出した動水圧比 $pr$ は、セットバック比 $\beta$ が小さいゲートほど、純径間比 $\gamma$ の減少時に2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ が小さくなるため、ゲートのダム軸方向の形状(純径間)の違いによる影響が大きいと考えられる。この結果を考慮すると、一般的なクレストラジアルゲートの動水圧は、ゲート振動によるゲート部動水圧を

評価する場合、ダム軸方向の影響も考慮することができる3次元モデルを用いることが望ましいと考えられる。

#### 4.4 まとめ

本章では、Aダムクレストゲートにおけるゲート部動水圧の主な発生要因がゲート振動であることに着目し、ゲート扉体を剛体振動とした簡易的な3次元FEMモデルで、ゲート部動水圧の再現解析を実施した。また、一般的なクレストゲートにおけるゲート部動水圧の発生要因とその強さの変化を分析するため、同モデルを用いて感度解析を実施し、ゲート部に発生する動水圧の発生要因とセットバック比 $\beta$ および純径間比 $\gamma$ の影響を分析し、以下の成果が得られた。

- 1) ゲート扉体を剛体振動とした簡易的な3次元FEMモデルによる解析により、詳細のシェル要素でモデル化した既往研究<sup>3)</sup>結果と同様に、ゲート振動による動水圧のみでゲート部の動水圧を概ね再現できることを確認した。よって、ゲートを剛体振動としても、動水圧の結果について再現性が良い結果が得られることを確認できた。
- 2) セットバックによる感度解析結果により、各発生要因によるゲート部動水圧は、セットバックが大きい方が、①ゲート振動により発生するゲート部動水圧が増加し、逆に②堤体振動により発生するゲート部動水圧が減少する。その結果、一般的な堤体天端付近に設置されたセットバックがあるクレストゲートでは、ゲート部動水圧の支配的な発生要因はゲート振動自体によるものと推察される。ただし、堤体基礎に対する堤体天端の加速度増幅割合、および、堤体天端部付近の門柱に対するクレストゲート扉体の加速度増幅割合は、個別のダム毎に異なると考えられるため、個別のダム毎に詳細を検討する必要がある。
- 3) 純径間比 $\gamma$ に着目した感度解析結果により、クレストゲート振動により発生するゲート部動水圧の発生にゲートの3次元形状が及ぼす影響を分析し、純径間比 $\gamma$ が小さくなるほど動水圧が低下することを明らかにした。
- 4) 2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ について、セットバック比 $\beta$ 、純径間比 $\gamma$ およびゲート扉高（貯水部） $H$ に対する水深 $h$ の比率（ $h/H$ ）による関係式を整理した。その関係



では、セットバック比 $\beta$ が小さいゲートほど、純径間比 $\gamma$ の減少時に、2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ が小さくなるため、ゲートのダム軸方向の形状（純径間）の違いによる影響が大きいと考えられる。この結果を考慮すると、一般的なクレストラジアルゲートの動水圧は、ダム軸方向の影響も考慮することができる3次元モデルを用いることが望ましいと考えられる。

#### 第4章の参考文献

- 1) 藤田将司, 佐藤信光, 田中聖三, 京藤敏達, 「地震観測記録および感度解析による重力式ダムクレストゲート部動水圧の発生要因分析」, ダム工学, 31 巻 1 号, 2021 (印刷中).
- 2) 藤田将司, 佐藤信光, 田中聖三, 京藤敏達, 「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」, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No. 4 (地震工学論文集第 39 巻), pp.I\_472-I\_485, 2020.
- 3) センチュリテクノ株式会社: 構造解析プログラム ISCEF.
- 4) 永山功, 自閑茂治: 重力ダムの動的挙動特性とその簡易耐震設計法, 大ダム, No.119, pp.14-34, 1987.
- 5) Westergaard, H. M.: Water pressures on dams during earthquakes, Trans. ASCE, Vol.98, 1933.
- 6) 中山義紀, 大町達夫, 井上修作: ダムゲートに作用する地震時動水圧の実用的評価式の提案, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.959-969, 2008.

## 第5章 大規模地震に対する耐震性能照査への適用性分析

### 5.1 はじめに

本章では、第2章から第4章で示した、ダムゲートの地震観測記録、再現解析結果および、感度解析結果を踏まえ、詳細なモデルにより、より実態にあった、地震時のゲート振動および動水圧の算出が可能な解析方法について、実務における大規模地震に対する耐震性能照査への適用性を分析する。

本研究で提案する詳細の耐震性能照査方法は、大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説り(以下、「指針(案)」という。)の図-5.1に示す放流設備のゲート(扉体、戸当りおよび固定部)の耐震性能照査の流れのうち、ゲート位置における照査用地震動の設定および線形動的解析の部分に関連する事項について提案するものである。具体的には、提案する方法により、入力地震動の設定、モデル作成や各種物性値の設定、線形動的解析までを実施し、ゲートの各構成部材に発生する応力を算出するものとする。これらの実施方法は、指針(案)の解説において「地震応答解析により確認する必要がある。」とされている。しかし、解析モデルなどの具体的な解析方法までは定められていないため、任意の適切な方法によることができる。現状の耐震性能照査では、一般に、ゲート単体の3次元モデルによる線形動的解析を実施しているが、ゲートに入力する外力は別途算出する方法<sup>2)</sup>がとられている。外力のうち動水圧については、ゲートを含まない堤体非越流部断面の2次元モデルにより動的解析を別途実施し、その解析結果から、堤体振動により堤体上流面に発生する動水圧のうちゲート標高部分を抽出している。また、もう一つの外力のゲート位置における照査用入力地震動は、同解析結果の堤体の加速度応答を抽出して設定している。そのため、より実態にあった耐震性能照査の解析方法を提案できれば、ゲートの重要性に応じて、その方法を採用することも考えられる。なお、発生する応力に対して、全体座屈の照査、局部座屈の照査および塑性化の照査については、本研究の対象とされていないため、現在実施されている方法<sup>2)</sup>によるものとする。それらを、本提案のモデルによる線形動的解析で算出したゲートの各構成部材に発生する応力と組み合わせて耐震性能照査を実施することで、より実態にあった耐震性能照査が可能と考えられる。

ただし、本章で提案する方法は、より実態にあった耐震性能照査方法の一つとして提案

するものであり、照査方法の採用や照査結果の評価にあたっては 5.3 に示す今後の課題も踏まえる必要があると考えられる。

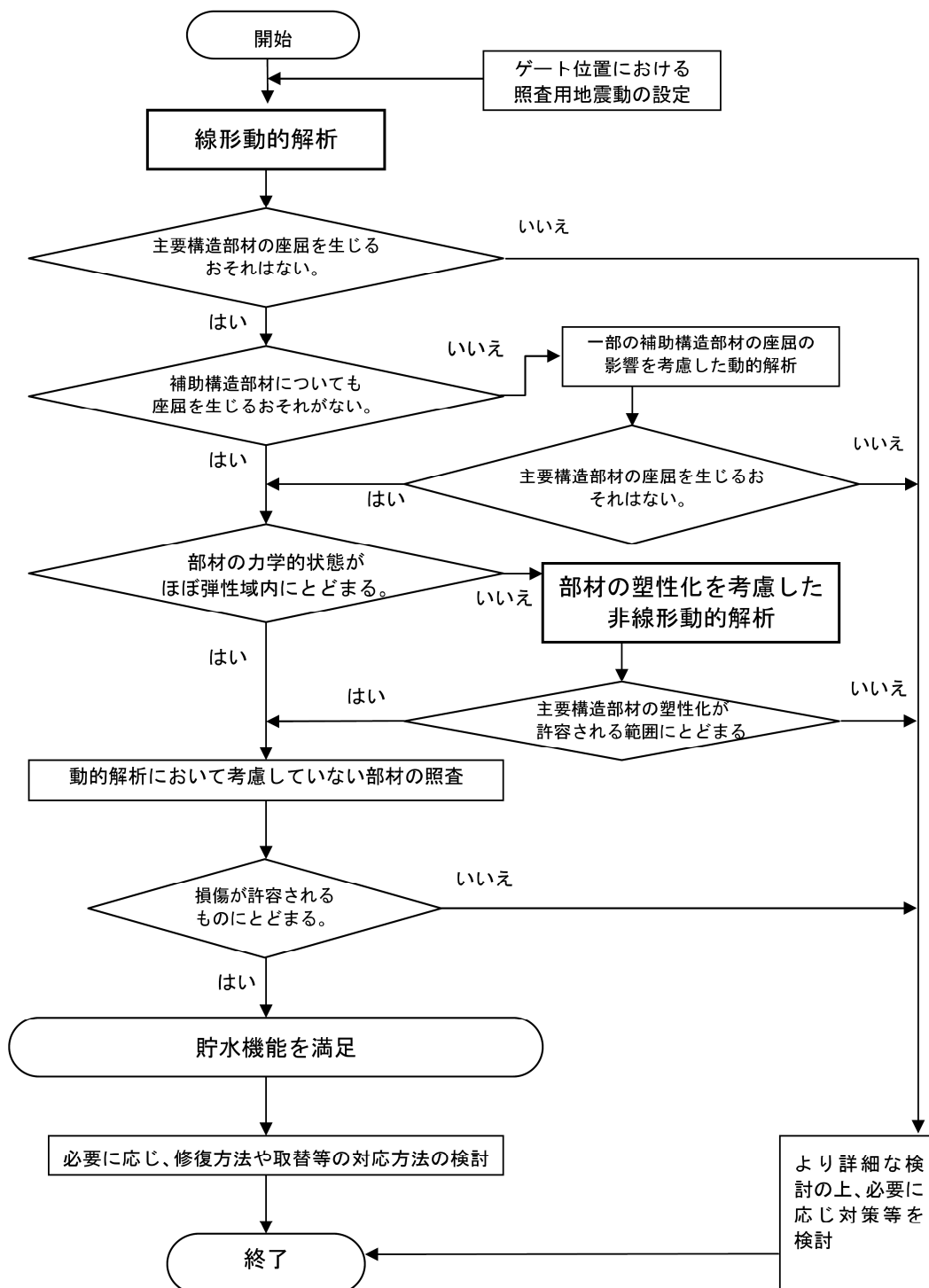


図-5.1 放流設備のゲート（扉体、戸当りおよび固定部）の耐震性能照査の流れ<sup>1)</sup>

## 5.2 クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法の提案

### 5.2.1 耐震性能照査方法の考え方

より実態にあった耐震性能照査を実施するため、本研究で明らかになった、以下の実態を反映できる照査方法とすることが考えられる。

#### (1) ゲート部動水圧

既往の解析方法によるゲート部動水圧<sup>1), 2)</sup>は、一般に、堤体非越流部断面の2次元モデルにより動的解析を別途実施し、その解析結果から、堤体振動により堤体上流面に発生する動水圧のうちゲート標高部分を抽出している。しかし、第2章から第4章で示したとおり、一般的な重力式コンクリートダムのカレストゲートでは、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た。また、ゲート振動と堤体振動の最大加速度、固有振動数や位相が異なると考えられた。よって、既往の解析方法では、動水圧の大きさが異なる場合やゲート振動と位相差がある動水圧となっている場合があると考えられる。実際に、小地震時の観測記録であるが、2.3.4の図-2.24に示したとおり堤体部(非越流部)wp3の動水圧に対して、ゲート部wp1の動水圧が大きく、位相差がある観測記録となっている。

そのため、より実態にあったにゲート部動水圧を算出するには、ゲート振動と貯水の連成を考慮した方法とする必要があると考えられる【考え方①-1】。

また、影響が小さいものの、ゲート部動水圧は、堤体振動によっても発生していると考えられるため、その影響も含めた解析方法が望ましいと考えられる【考え方①-2】。

以上のように、ゲート振動と貯水の連成を考慮した方法とすることで、既往の解析方法によるゲート部動水圧と比較し、より実態にあった耐震性能照査が実施できると考えられる。

#### (2) ゲート振動

第2章および第3章で示したとおり、貯水時のカ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、門柱に対するゲート扉体の加速度応答が増幅するとともに、ゲート扉体の固有振動数が低下していく。

そのため、より実態にあったゲート振動を算出するには、ゲートの固有振動数を正確に再現する必要があると考えられる【考え方②-1】。

ゲートの固有振動数は、本研究の第3章および第4章で示したとおり、ゲートの各部材の物性値とともに、ゲート部に発生する動水圧が付加質量として作用することが影響している。そのため、まず、ゲートの各部材を、既往の解析方法<sup>1) 2)</sup>と同様にゲートをシェル要素で実態にあったモデルにするとともに、(1)ゲート部動水圧の算出方法（貯水と連成したゲート振動によるゲート部動水圧）を考慮しておくことが重要と考えられる。

また、ゲートの固有振動数は、第3章3.5で示したとおり、アンカーレッジの固定状況や、(3)に示すゲート振動と門柱振動の相互作用も影響している場合がある。その場合は、アンカーレッジ部の固定状況をモデル化することや、門柱を含めたモデルとすることが望ましいと考えられる【考え方②-2】。

実ゲートの固有振動数は、第2章および第3章で示したとおり、地震観測記録で把握することや、常設の加速度計が無い場合でも常時微動計測により把握することが可能と考えられる。その値をモデルの修正を適宜行い、実測の固有振動数と合わせることで、ゲート振動を正確に算出できると考えられ、より実態にあった耐震性能照査が実施できると考えられる。

### (3) 門柱振動（ゲートへの入力地震動）

第2章および第3章で示したとおり、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た。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た。

そのため、より実態にあったゲート振動を算出するには、ゲート振動と門柱振動の相互作用を再現する必要があると考えられる【考え方③】。

既往の解析方法<sup>1) 2)</sup>でのゲートへの入力地震動は一般に、堤体非越流部断面の2次元モデルにより動的解析を別途実施し、その解析結果から、ゲートトラニオン標高の加速度を抽出されている。よって、ゲート振動と門柱振動の相互作用を考慮した方法に改善することで、既往の解析方法によるゲートへの入力地震動とし、より実態にあった耐震性能照査が実施できる方法と考えられる。

## 5.2.2 クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法（詳細法）の提案

### (1) 解析モデルおよび物性値

5.2.1 で示した【考え方①-1】～【考え方③】を考慮できるよう、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する必要があると考えられる。そのため、第3章に示したとおり、図-5.1に示す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だ、図-5.2に示す一体3次元モデルで実施する必要があると考えられる。

ゲート振動の【考え方②-1】については、まず、ゲート扉体の固有振動数を現地で実測して把握する必要がある。その実測値と合うようにモデルを作成するため、ゲートを詳細なシェルモデルとするとともに、【考え方②-2】を考慮し、必要に応じて、ゲートのトラニオンピン箇所の固定にアンカーレッジ等を組み込む必要があると考えられる。なお、ゲートの固有振動数は、門柱と一体になった振動により決定されてくる。よって、ゲートのみ固有値解析ではなく、モデル全体の線形動的解析結果によるゲート扉体の振動が、実際の固有振動数と一致しているか確認する必要があると考えられる。

### (2) ゲート部動水圧の算出方法

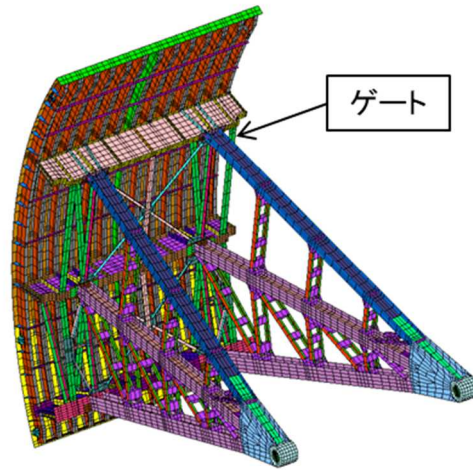
動水圧の【考え方①-1】および【考え方①-2】に対応するため、第3章に示したとおり、流体要素を完全流体とし、流体と構造物の連成面を、貯水とゲートおよび貯水と堤体が接する面とする必要があると考えられる。

### (3) ゲート位置における照査用地震動の設定

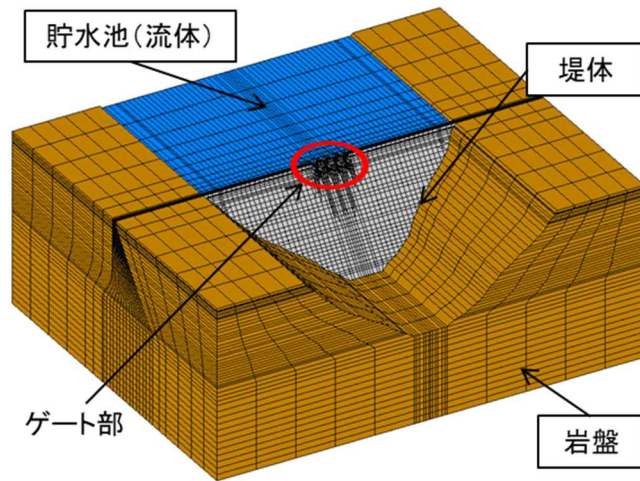
ゲート、堤体、門柱を含めた一体3次元モデルで線形動的解析を実施すれば、ゲート位置における地震動が、【考え方③】を考慮できると考えられる。そのため、入力地震動は、ダム堤体の耐震性能照査でダム堤体基礎におけるレベル2地震動が設定されていれば、そのまま用いれば良いと考えられる。

### (4) 線形動的解析

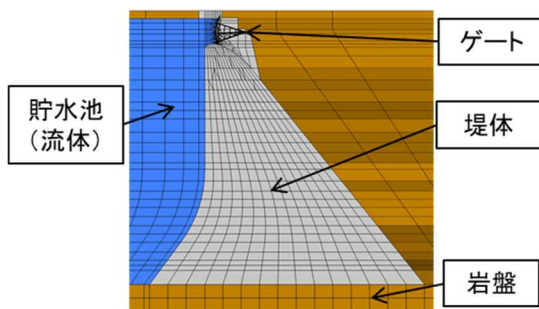
(1)～(3)により、線形動的解析を実施し、ゲートの各構成部材に発生する応力を算出する。



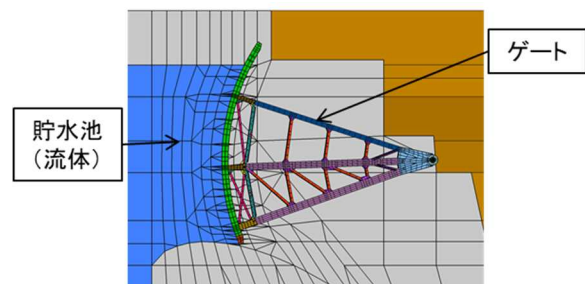
(a) ゲートの3次元シェルモデル



(b) モデル全体 (鳥瞰図)



(c) 断面図



(d) ゲート部断面図

図-5.2 ゲート，堤体，岩盤及び貯水一体の3次元モデル



### 5.2.3 クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法（簡易法）の提案

#### (1) 解析モデル

5.2.1 で示した【考え方①-1】～【考え方③】を考慮するには、5.2.2 に示した一体3次元モデルで実施することが望ましい。しかし、同モデルは、鋼構造物のゲート、コンクリート構造物の堤体等、岩盤および貯水と、様々な物性のものを同時に解析する必要があり、物性値の設定や解析が複雑である。よって、各物性値を精度良く設定しないと、解析精度がむしろ低下する可能性もあると考えられる。また、複雑なモデルの作成と解析に、現状の方法<sup>2)</sup>と比較して時間と費用を要すると考えられる。そのため、全てのダムゲートに適用することは実務上困難であると考えられる。

よって、本項では、現在行われている解析と同程度の、比較的簡易に実施できる方法について提案する。

解析モデルは、既往の解析方法と同様に、**図-5.3**に示すゲートの詳細なシェルモデルで実施する。また、ゲートのトラニオンピン箇所の固定は、【考え方②-2】を考慮できるようにするため、ゲート扉体の固有振動数が現地の実測値と合うようアンカーレッジ等を適宜組み込む必要があると考えられる。

#### (2) ゲート部動水圧の算出方法

ゲート部の動水圧についての【考え方①-1】に対応するため、ゲート水深の貯水と連成

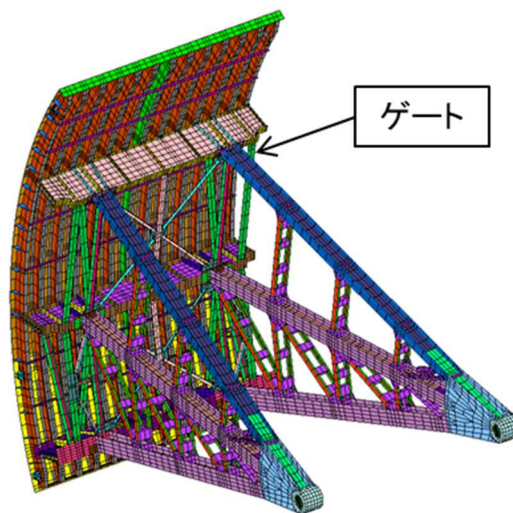
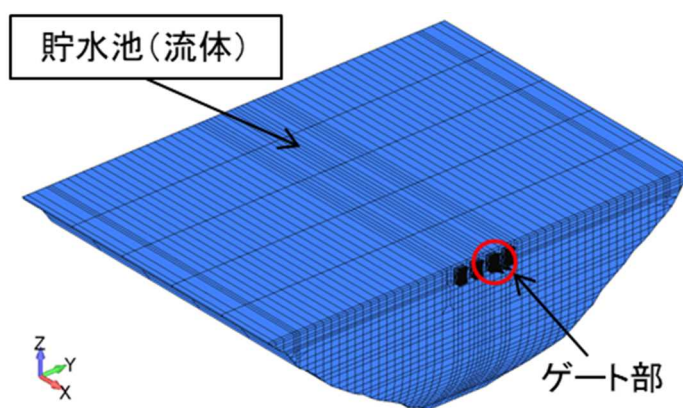


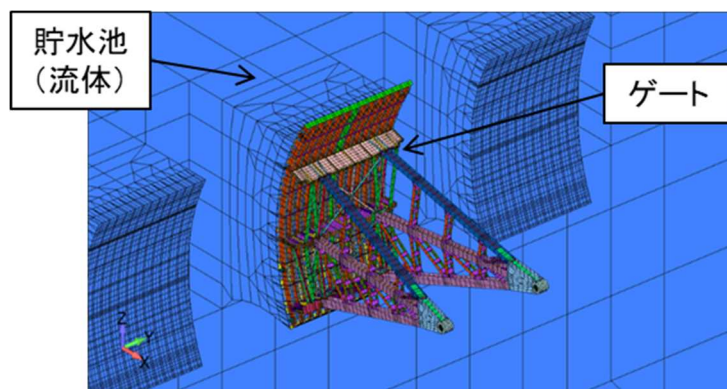
図-5.3 ゲートの3次元シェルモデル

したゲート振動により発生するゲート部動水圧は、主な発生要因で、ゲートの解析結果に大きな影響を及ぼすと考えられることから、精度良く求める必要があると考えられる。そのため、図-5.4 に示す付加質量算出モデルにおいて、第3章に示したとおり、流体要素を完全流体とし、流体と構造物の連成面を、貯水とゲートが接する面とする必要があると考えられる。

また、ゲート部の動水圧についての【考え方①-2】（ゲート部動水圧の堤体振動によって発生する分）への対応としては、堤体振動により発生するゲート部動水圧の影響が比較的小さいと考えられることも考慮して、簡易的に算出することで一定の精度は保てると考えられる。そのため、現状の一般的な耐震性能照査方法<sup>2)</sup>と同様に、別途、堤体（ゲート部を除く）および貯水モデルの動的解析により算出した動水圧から、ゲート部分にかかる動水圧を抽出し、ゲートモデルの各接点に荷重として作用させることが考えられる。



(a) 全体モデル(貯水池+ゲート)



(b) ゲート部拡大

図-5.4 付加質量算出モデル図

### (3) ゲート位置における照査用地震動の設定

門柱の地震観測記録がある場合は、以下の方法により、【考え方③】のゲート振動と門柱振動の相互作用を考慮した照査用地震動を設定できると考えられる

- ・ 堤体基礎部に加え、門柱部の地震観測記録がある場合は、堤体基礎部と門柱部の複数の地震観測記録についてフーリエ変換し、それぞれフーリエスペクトルを求める。それらの記録から、伝達関数<sup>3)</sup>を算出する。
- ・ 堤体基礎部の入力地震動として、ダム堤体の耐震性能照査でダム堤体基礎におけるレベル2地震動が設定されていれば、それを用いて、上記で設定した伝達関数を用いて、ゲート位置（門柱部）の照査用入力地震動を設定する。
- ・ 門柱の地震観測記録が無い場合は、既往の解析方法による入力地震動<sup>1) 2)</sup>と同様に、ダム堤体の2次元モデルによる線形動的解析を実施し、その解析結果のゲート標高部の加速度時刻歴結果を抽出することが考えられる。ただし、この方法では、【考え方③】のゲート振動と門柱振動の相互作用を考慮できないと考えられる。

### (4) 線形動的解析

(1)~(3)により、線形動的解析を実施し、ゲートの各構成部材に発生する応力を算出する。

## 5.3 クレストラジアルゲートの耐震性能照査方法の今後の課題

5.2で提案したクレストラジアルゲートの耐震性能照査方法（詳細法、簡易法）の適用にあたっては、以下の今後の課題も踏まえて、慎重に採用する必要があると考えられる。

### (1) ゲートの地震時の被害

第1章で示したとおり、これまでに国内外のクレストゲートで大きな地震被害事例は見られていない<sup>4)5)</sup>。そのことも踏まえて、(2)および(3)等の現象を解明し、より実態にあった耐震性能照査が求められる。

### (2) 大規模地震時のゲート動水圧の非線形性

第2章および第3章により、実測できた地震観測記録の中小地震規模においては、動水

圧が加速度に対して線形で増加することが確認できた。しかし、大規模地震時に、線形で増加するかは不確実な部分があり、非線形の関係となる可能性がある。

動水圧と加速度の非線形性となる可能性の一つとして、大規模地震時に静水圧と大気圧の合計に相当する値まで、負の動水圧が発生する可能性があることが考えられる。本研究においては、主に地震時の動水圧部分について着目してきたが、ゲート扉体上流面に掛かる全ての圧力は、動水圧の他に、静水圧と大気圧がある。圧力の合計値は、大気圧を基準としてゼロと考えた場合、-1気圧以下の負圧は存在しない<sup>6)</sup>。言い換えると、静水圧、地震時動水圧および大気圧の合計がマイナスになることはない。また、水自体に水温に応じた蒸気圧があることから、少なくとも、静水圧、動水圧および大気圧の合計がゼロとなるまでには、キャビテーションが発生し、それ以下の動水圧にはならないと考えられる。よって、そのような動水圧まで達する場合に、動水圧と加速度の関係が非線形になると考えられる。

なお、動水圧の実験事例として、Niwaらが、振動台を用いて、重力式コンクリートダムの上流面に発生するキャビテーションのメカニズムに関する実験的検討<sup>7)</sup>を行った事例がある。

### (3) ゲートの耐荷力の評価方法

本研究で示したゲート振動および動水圧により、ゲート部材に動的な応力が発生するが、ゲートが実際に損傷するかは、その動的な応力に対して、ゲートが塑性化や座屈等するかとの関係による。ゲートの設計では、鋼部材の許容応力度を補正（割増）して設計される<sup>8)</sup>が、そのことがゲートの耐震性能照査における課題と関係している可能性があるとの指摘<sup>9)</sup>もある。そのため、ゲート部材に動的な大きな応力が発生した際に、ゲートが実際に塑性化や座屈等してゲートの損傷に至るかについて、詳細が解明され、より実態に近い評価ができるようになることが望まれる。

ゲート耐荷力の詳細な評価方法と、本研究において提案した詳細法によるゲート振動および動水圧の解析方法を組み合わせて実施することにより、より実態に近い耐震性能照査が実施できると考えられる。

## 5.4 まとめ

本章では、第2章から第4章で示した、ダムゲートの地震観測記録、再現解析結果および、感度解析結果を踏まえ、詳細な解析方法により、より実態にあった地震時のゲート振動および動水圧の算出が可能な耐震性能照査方法を提案し、その適用性を分析した。

また、提案した耐震性能照査方法の適用に当たっての今後の課題を整理した。

## 第5章の参考文献

- 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) 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.
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 4) 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，日本地震工学会第14回年次大会梗概集，2019.
- 5) 中山義紀，大町達夫，井上修作：ダムゲート系構造物の地震被害事例に基づく耐震性能照査の手順と要点，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.386-395，2007.
- 6) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1992.
- 7) Niwa Akira, Clough Ray W: Shaking table research on concrete dam models, Report No. UCB/EERC-80/05, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1980.
- 8) 国土交通省：ダム・堰施設技術基準（案），2016.
- 9) 金銅将史，佐藤弘行，佐々木隆：ダムの耐震設計及び関連技術の発展と今後の展望，ダム技術，No.400，pp.21-33，2020.

## 第6章 結 論

### 6.1 本研究で得られた成果

本論文では、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観測できた。それらの地震観測記録の分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。その結果、得られた結論は以下のとおりである。

#### (1) 地震観測記録によるダムゲート振動および動水圧の分析（第2章）

地震観測記録の分析を実施し、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、以下の結論を得た。

- 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、動水圧が付加質量として作用した影響により、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。
- 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の振動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) ゲート部動水圧と堤体部動水圧の発生要因を比較すると、堤体部 wp3 の動水圧は主に堤体振動により発生しているのに対して、ゲート部 wp1 の動水圧は、堤体の卓越振動数4Hzによる影響により発生する動水圧の影響は小さいと考えられる。
- 5) 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。

## (2) 地震観測記録の再現解析による分析（第3章）

地震観測記録の再現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、以下の結論を得た。

- 1) ゲートモデルの解析結果より、空水時は、弾性係数を鋼材の一般値  $205,000\text{N/mm}^2$  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。
- 2) 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、ゲートの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、地震観測記録と同様、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。
- 3) 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。また、堤体部動水圧は主に堤体振動により発生しているのに対して、ゲート部動水圧は、主にゲート振動により発生していると考えられるが、堤体の卓越振動数  $4\text{Hz}$  による影響により発生する動水圧の影響は小さいと考えられることを解析上でも確認できた。
- 4) ゲートの固有振動数は、アンカーレッジの固定状況や門柱振動の影響も受けることを示した。

## (3) 感度解析による分析（第4章）

地震観測記録の再現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、以下の結論を得た。

- 1) セットバックによる感度解析結果により、各発生要因によるゲート部動水圧は、セットバックが大きい方が、①ゲート振動により発生するゲート部動水圧が増加し、逆に②堤体振動により発生するゲート部動水圧が減少する。その結果、一般的な堤体天端付近に設置されたセットバックがあるクレストゲートでは、ゲート部動水圧の支配的な発生要因はゲート振動自体によるものと推察される。
- 2) 感度解析結果により、クレストゲート振動により発生するゲート部動水圧の発生にゲートの3次元形状が及ぼす影響を分析し、純径間比 $\gamma$ が小さくなるほど動水圧が低下することを明らかにした。



3) セットバック比 $\beta$ が小さいゲートほど、純径間比 $\gamma$ の減少時に、2次元モデルに対する動水圧比 $pr$ が小さくなるため、ゲートのダム軸方向の形状（純径間）の違いによる影が大きいと考えられる。この結果を考慮すると、一般的なクレストラジアルゲートの動水圧は、ダム軸方向の影響も考慮することができる3次元モデルを用いることが望ましいと考えられる。

#### (4) 大規模地震に対する耐震性能照査への適用性分析（第5章）

本章では、第2章から第4章で示した、ダムゲートの地震観測記録、再現解析結果および、感度解析結果を踏まえ、詳細な解析方法により、より実態にあった地震時のゲート振動および動水圧の算出が可能な耐震性能照査方法を提案し、その適用性を分析した。

また、提案した耐震性能照査方法の適用に当たっての今後の課題を整理した。

## 6.2 今後の課題と展望

本研究は、クレストラジアルゲートの振動および動水圧の発生要因を明らかにしたものであり、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。ただし、地震観測記録は小規模地震によるものであり、大規模地震による影響の解明には課題がある。本研究で提案した耐震性能照査方法の適用にあたっては、5.3で示したとおり、ゲートの地震時の被害事例の実態<sup>1) 2)</sup>、大規模地震時のゲート動水圧の加速度と動水圧の関係の非線形性の可能性、ゲート耐荷力の評価方法といった課題<sup>3) 4)</sup>も踏まえる必要があると考えられる。

また、これまでにゲートの耐震性能照査を踏まえたゲートの耐震補強や更新事例は見られていないが、経年劣化等によりゲート更新される事例もあり、その際に大規模地震に対する安全性を確認している事例<sup>5) 6)</sup>も見られてきている。

今後は、ゲート更新等を検討する際に、より実態に近い解析結果により、実ゲートの耐震性能照査について適切に評価するとともに、必要に応じて耐震補強やゲート更新が実施されることを期待したい。

## 第6章の参考文献

- 1) 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，日本地震工学会第14回年次大会梗概集，2019.
- 2) 中山義紀，大町達夫，井上修作：ダムゲート系構造物の地震被害事例に基づく耐震性能照査の手順と要点，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.386-395，2007.
- 3) 国土交通省：ダム・堰施設技術基準（案），2016.
- 4) 金銅将史，佐藤弘行，佐々木隆：ダムの耐震設計及び関連技術の発展と今後の展望，ダム技術，No.400，pp.21-33，2020.
- 5) 山本将範，田中秀夫：和知ダム発電所 和知ダム洪水吐ゲート取替工事の概要，電力土木，No.374，2014.
- 6) 土木学会 新技術・エネルギー小委員会：水力発電所土木設備の再開発・更新事例に関する調査報告書，2018.

## 謝 辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻博士後期課程に社会人として在籍した3年間と、入学前2年間の独立行政法人水資源機構総合技術センターでの検討も含めて、計5年間の研究成果をまとめたものです。本研究は、筆者が在職中の独立行政法人水資源機構の耐震に関する検討に関連したものでありますが、主査の筑波大学システム情報系構造エネルギー工学域の京藤敏達教授および副査の広島工業大学環境土木工学科の田中聖三准教授においては、本研究の意義を理解していただき、博士論文をとりまとめるための指導を引き受けていただいたこと、また、入学する1年前から計4年間に渡りご指導及びご助言を賜りましたこと、心から感謝申し上げますとともに、厚く御礼申し上げます。また、本論文のとりまとめおよび審査にあたり、副査の筑波大学システム情報系構造エネルギー工学域の磯部大吾郎教授、三目直登助教、武若聡教授には、有益なご助言とご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。研究を通じて先生方からご指導いただいた事は、職務上の課題では学べない視点のものが多数あり、今後の仕事を進める上でも大きな糧になったと思っております。

本論文は、水資源機構の耐震に関する検討にも関連して実施してきたものですが、ダムゲート動水圧に関する検討の企画から、筆者の博士論文作成まで、水資源機構総合技術センターの佐藤信光 元次長のご指導を受けながら進めてきました。心から感謝申し上げます。総合技術センターの桜井力 元所長には、学位取得を勧めていただき、博士課程入学の大きなきっかけを与えていただきました。また、総合技術センターの神矢弘 元所長、総合技術センターの高橋陽一所長、現勤務先の水資源機構思川開発建設所の竜澤宏昌所長、阪元恵一郎副所長および大谷知樹課長には、通常の勤務を続けながら博士課程へ在籍することを後押ししていただきました。総合技術センターの上司であった白川信之 元次長、加納茂紀次長、武田浩一情報グループ長、木戸研太郎ダムグループ長、小牧健二チーフ、富田尚樹 元チーフ、佐野貴之 元チーフからは、水資源機構総合技術センターでの耐震に関する検討を通じて様々なご助言をいただきました。皆様には心より感謝申し上げます。

本論文では、実ダムゲートでの動水圧と加速度の地震観測記録とその再現解析が中心となっております。実ダムゲートでの地震観測記録においては、ダム管理所職員のご理解と多大なる協力のもと実施することができました。再現解析においては、解析プログラムの開発者であるセンチュリテクノ株式会社の中川弘明氏、安江卓氏、林植恒氏、勝間田憲子

氏には、解析に協力いただくとともに、プログラムの詳細についてご助言をいただきました。心から感謝申し上げます。

耐震に関する先行研究を実施されてきた国土技術政策総合研究所の佐々木隆部長、金銅将史室長、佐藤弘行主任研究官、小堀俊秀主任研究官には、筆者が土木研究所に出向で在職時に耐震に関する研究のご指導をいただくとともに、本研究に関しても技術相談を受けて頂き、有益な助言を頂きました。また、ダムゲート動水圧の先行研究をされてきた電源開発株式会社の中山義紀氏には、本研究に関する技術相談を受けて頂き、有益な助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に、勤務をしながらの大学院進学により苦勞と心配をかけてしまいましたが、常に支えてくれた妻と子供に感謝申し上げます。