

電力中央研究所報告

重力式コンクリートダム洪水吐ピアの
耐震性能評価に関する研究
(その1) 実務的な左右岸方向静的地震力の
設定方法

研究報告：N18001

2018年6月

 電力中央研究所



CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

重力式コンクリートダム洪水吐ピアの耐震性能評価に関する研究 (その1) 実務的な左右岸方向静的地震力の設定方法

西内 達雄*

キーワード：洪水吐ピア

静的解析

加速度応答スペクトル比

重力式コンクリートダム

耐震性能

Key Words : Spillway pier

Static analysis

Acceleration response spectrum ratio

Concrete gravity dam

Seismic performance

A study on seismic performance evaluation method for spillway piers of concrete gravity dams (part 1) Procedure of practical static earthquake force on axis direction of dam

Tatsuo Nishiuchi

Abstract

The seismic performance verification method of the attached structures including the gate pier are not developed in comparison with dam body.

In this study, the 3D linear seismic response analysis for radial gate's pier and roller gate's pier of concrete gravity dam which assumed the effect of dam's height, dam's crest bridge and earthquake property were carried out.

Based on analytical result, the seismic behaviors of gate's pier were clarified.

The analysis model and analysis condition were proposed considering the actual specification as safety side.

The procedure and setting method of practical static earthquake force was suggested to use by the seismic performance verification in axis direction of gate's pier.

*地球工学研究所 構造工学領域 副研究参事

背景

大規模地震に対する水力発電設備の安全性に関して、電力会社は、国土交通省や経済産業省が策定した指針案やマニュアル類を参考にしながら、設備の耐震性能照査を進めている。ダム本体については計画的に照査が実施されている一方で、洪水吐ピア（ピアと称す）などの本体付属構造物については、それらの地震時挙動が十分に把握されていないこともあり、照査手法の開発や適用性検証が進んでいない。

目的

有限要素解析により重力式コンクリートダム堤頂部のピアの地震時挙動を把握するとともに、実構造に即し安全側に評価できる解析モデルや解析条件を示し、ピアの左右岸方向に対する耐震性能照査で用いる実務的な静的地震力の設定方法を提示する。

主な成果

重力式コンクリートダムのラジアルゲートとローラーゲートのピアを模擬した 3 次元線形時刻歴地震応答解析を実施した。解析パラメータは、堤高（25m、50m、100m）、入力地震動（位相特性 2 種類）、ピア頂部橋梁および堤体天端橋梁の有無と接合条件とした。比較基準として、堤体に洪水吐開口部を設けないモデルでの解析も実施した（図 1）。解析結果から以下の成果が得られた。

1. 解析に基づくピアの地震時挙動

ラジアルゲートおよびローラーゲートピアの加速度応答および変位応答は、ゲート開口部の影響により、これを設けない解析モデルでの応答値よりも大きい。特にローラーゲートピア頂部での応答値は卓越する（図 2）。

2. 標準的な解析モデル、解析条件の提示

実態に即したピアの耐震性能評価を行う上で、ゲート形式に応じたピアの形状を解析モデルで考慮する必要性が示された。そして、ピア頂部橋梁や堤体天端橋梁については、安全側評価の観点から解析モデルとして考慮しなくてもよいことがわかった。

3. ピアの左右岸方向に対する耐震性能照査の手順とそこで用いる静的地震力

一般に、重力式コンクリートダムは上下流方向 2 次元断面で解析が実施されるため、その解析ではピアの左右岸方向の耐震性能照査は実施できない。これに対処するため、上記 1 と 2 の成果を踏まえて、ダムの 2 次元解析に基づくピアの左右岸方向に対する地震力（静的慣性力）を設定するための手順（図 3）を考案し、そこで用いる加速度応答スペクトル比（上下流方向に対する左右岸方向の加速度応答値の比）を提示した（図 4）。

今後の展開

現場計測等に基づき提示結果を用いたピアの耐震性能照査手法の精度の改善を図る。

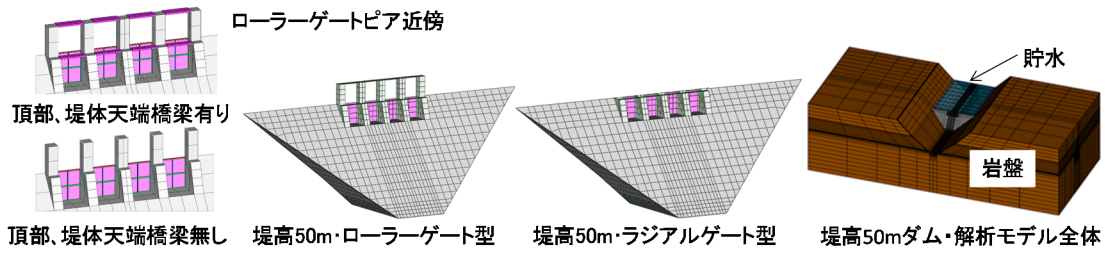


図1 解析で用いた要素分割例

堤高 50m ダムの 3次元有限要素解析モデルである。ラジアルゲートとローラーゲートを想定したピアを配置している。モデル化においてピア頂部橋梁や堤体天端橋梁の有無が考慮されている。

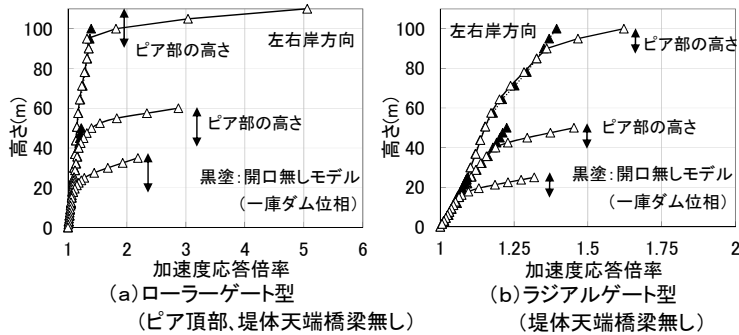
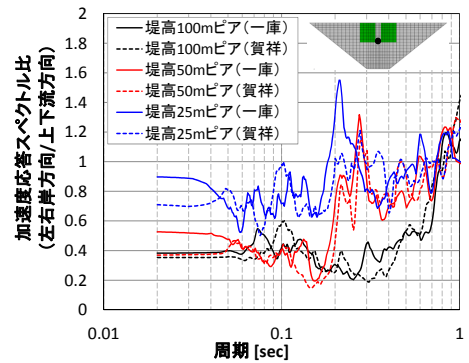
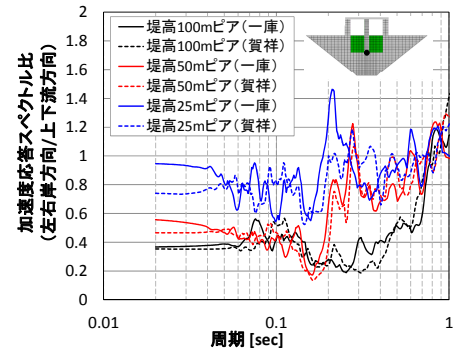


図2 堤体中央ピア左右岸方向の加速度応答倍率の例

ピアに相当する頂部 10m~20m 高さ (図面縦軸) の応答は、洪水吐開口部を設けない場合よりも大きい。ピアを含む堤体断面の動的変形イメージに資する観点で、解析パラメータである堤高を図面の縦軸表示としている。



(a)ラジアルゲート型・天端橋梁無し



(b)ローラーゲート型・ピア頂部、天端橋梁無し

()内は地震波の位相特性

図4 堤体中央ピア取付部の最大加速度応答スペクトル比

静的地震力を用いたピアの左右岸方向に対する耐震性能照査に用いる加速度応答スペクトル比 (左右岸方向応答/上下流方向応答) である。

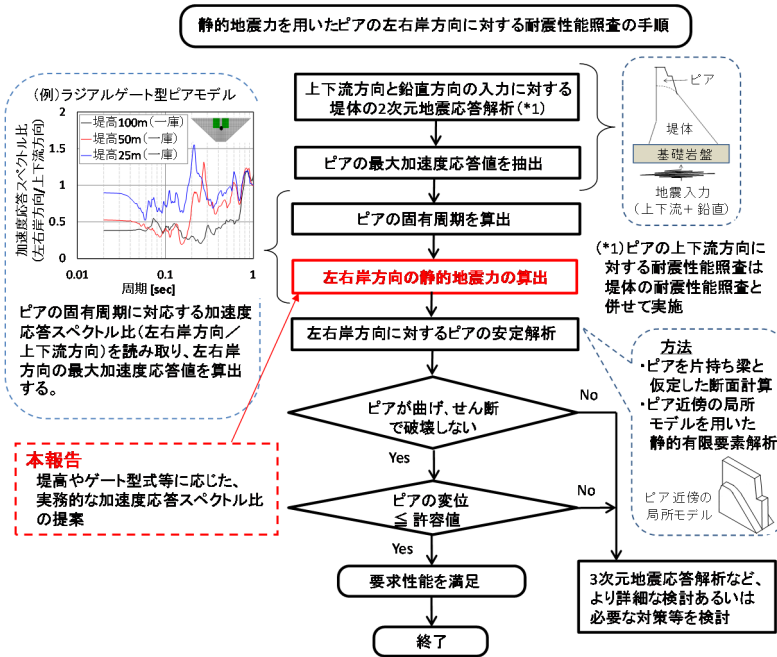


図3 静的地震力を用いたピアの左右岸方向に対する耐震性能照査の手順

本手順の前半部分が、ピアの左右岸方向に対する静的地震力の設定手順となる。

目 次

1. はじめに.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 目的.....	1
2. 洪水吐ピアの耐震性能評価法に関する知見と課題.....	2
2.1 洪水吐ピアの構造的な特徴.....	2
2.2 レベル2地震動に対する要求性能.....	2
2.3 耐震性能評価の考え方.....	3
2.4 既存の耐震性能評価法.....	3
2.5 評価事例.....	5
2.6 静的地震力を用いた耐震性能評価法における課題.....	6
3. 3次元動的解析による洪水吐ピアの応答特性.....	7
3.1 解析概要.....	7
3.2 解析手法ならびに解析条件.....	8
3.3 荷重条件と物性値.....	12
3.4 解析ケース.....	12
3.5 解析結果.....	13
3.5.1 加速度応答倍率.....	13
3.5.2 変位応答.....	20
3.5.3 加速度応答スペクトル比.....	24
4. まとめ.....	28
5. 今後の展開.....	28
参考文献.....	28

1. はじめに

1.1 背景

日本国内におけるダムや堰、水門の耐震設計は、1976年制定の「河川管理施設等構造令」¹⁾や1997年改訂の「建設省河川砂防技術基準(案)同解説 設計編」²⁾等に基づき、地震動を静的荷重として考慮する震度法で行われてきた。この震度法で設計されたダム等施設は、これまで大地震に対しても重大な損傷を生じることなく、十分な耐震性能を有していることが確認されている。しかし、近年では、岩手・宮城内陸地震(2008年)、東北地方太平洋沖地震(2011年)、平成28年熊本地震(2016年)と大地震が続き、内閣府の中央防災会議による「南海トラフの巨大地震モデル検討会」(2011年)から被害想定等の発表もあり、大地震に対する構造物等の安全性に対する社会的関心が益々高まってきた。

ダム等河川構造物に対しては、設計基準とは別に、耐震性能を合理的に説明できる技術指針を整備する必要性から、国土交通省より2005年3月に「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」³⁾(以下、国交省ダム照査指針案と称す)が通知され、直轄ダムに対して試行されている。その後、2012年2月には「河川構造物の耐震性能照査指針・解説」⁴⁾(以下、国交省河川構造物照査指針と称す)が通知され、堤防や水門・樋門および堰等に対して適用されている。一方、経済産業省においても、水力発電設備のうち土木設備(洪水吐ゲート、独立型取水塔、サージタンク、水圧管路等)を対象として、これらの耐震性能を検証する方法の確立を目的にケーススタディが実施され、その成果は2012年2月に「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」⁵⁾(以下、経産省水力発電設備照査マニュアル

と称す)として通知されている。

ダムや堰など水力発電設備土木構造物を所有、管理する電力会社においては、各種土木構造物の安全性に対する社会的説明責任から、このような指針、マニュアル等を参考にしながら順次、耐震性能評価を進めている。ダム本体の耐震性能評価は計画的に進められており、評価結果のいくつかは報告⁶⁾⁷⁾され、十分な耐震性能を有することが示されている。一方で、ダムゲートや門柱などの本体付属構造物の耐震性能評価については結果の報告は少ない。特に、門柱については、前述した参照すべき技術指針類はいくつか示されているものの、具体的な評価を実施する上での条件や仮定等の基本的な考え方において課題があると考えられている。

当所では、これまで重力式コンクリートダム本体や洪水吐ゲートの耐震性能について、評価手法の整備や解析マニュアルの提案⁸⁾などを進めてきた。この一連の耐震検討に関連して、洪水吐を有するダムでは本体の一部となる門柱(以下、洪水吐ピアと称す)についても、耐震性能を評価する上での課題を整理し、評価手法を提案することとなった。

1.2 目的

本報告は、重力式コンクリートダム洪水吐ピアの耐震性能評価法に係わる検討のうち、線形動的解析に基づく洪水吐ピアの地震時挙動を把握するとともに、実構造に即し安全側に評価できる解析モデル、解析条件を示し、洪水吐ピアのダム軸方向(左右岸方向)に対する耐震性能照査で用いる実務的な静的地震力の設定方法(2.6参照)を提示したものである。実務的とは重力式コンクリートダム堤体の2次元地震応答解析結果を利用した簡便かつ概算評価が可能なことを意味している。

2. 洪水吐ピアの耐震性能評価法に関する知見と課題

国交省ダム照査指針案では、ダムへの要求性能として、当該地点で考えられるレベル 2 地震動（当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動）に対して、「地震時に損傷が生じたとしても、ダムの貯水機能が維持されるとともに、生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること」の 2 点を設定している。コンクリートダムでは、洪水吐ピアは堤体の一部であると同時に、ゲートの支持構造物でもある。このため、耐震性能評価においては、堤体（ダム本体）の照査に加えて、ゲートと共に照査を実施する場合が多い。以下では、洪水吐ピアの構造的な特徴や要求性能を示すと共に、参照すべき技術指針類や事例で示された耐震性能評価法について概要を紹介する。

2.1 洪水吐ピアの構造的な特徴

ダム堤頂部に取り付けられた洪水吐は、ゲートの有無に係わらず、基本的には開口部を設けた構造である（図 2.1 参照）。洪水吐ピアの断面は、一般的に上下流方向に比べて左右岸方向は短い。また、ローラーゲートの洪水



図 2.1 ラジアルゲート洪水吐ピアの例
（北陸電力(株)神通川第二ダム）

吐ピアは、堤体天端より上方に立ち上がる構造が基本となる（図 2.2 参照）。このような構造的な特徴から、洪水吐ピアは上下流方向よりも左右岸方向の応答が相対的に卓越する傾向にあり、この方向に対する耐震性能評価において、発生応力や変位等の評価基準を満たさない厳しい結果になることが推察される。

2.2 レベル 2 地震動に対する要求性能

国交省ダム照査指針案等によると、洪水吐ピアの要求性能は、地震時に損傷を受けたとしても、制御できない貯水の流出が生じないことと、地震後に、ダムの安全性を確保するための水位制御が可能であることと記されている。

性能と照査内容との関係⁹⁾については、『制御できない貯水の流出を生じさせないことは、洪水吐ピア全体の損傷状態を確認して、そこでの重大な損傷や、ゲートの脱落等が生じていないこと』を確認すればよいとされている。そして、地震後にゲート操作による水位制御が可能であることは、洪水吐ピアの変形がゲートに与える影響を確認して、貯水機能が維持できないゲートの変形が生じているか、洪水吐ピアが損傷しても、その塑性変位がゲート

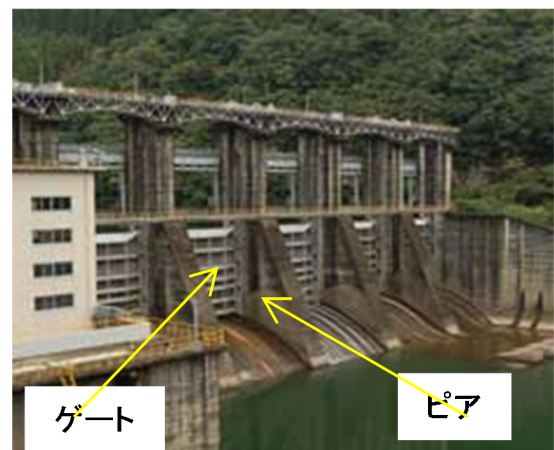


図 2.2 ローラーゲート洪水吐ピアの例
（九州電力(株)大内原ダム）

トとの遊間長に収まり、ゲートの開閉が可能であるかを確認すればよいとされている。

2.3 耐震性能評価の考え方

重力式コンクリートダムの耐震性能評価は、基本的に上下流方向の堤体断面を対象として、その方向の地震動入力に対して実施される。従って、洪水吐ピアは堤体と共に上下流方向の応答に対しては評価されることとなる。しかし、左右岸方向の応答に対する評価は、新たに解析モデルを作成して実施することなどが必要となる。

なお、アーチ式コンクリートダムの耐震性能評価は、3次元の有限要素解析モデルが作成されて実施される。従って、洪水吐ピアの3次元モデルによる地震応答解析での評価は可能である。ただし、有限要素解析モデルにおいて、堤体の要素分割寸法に比べて洪水吐ピアの要素分割寸法は、対象構造全体の寸法との比較において相対的に粗く（大きく）なってしまうことから、堤体に比べて洪水吐ピアの応力評価の精度が劣る場合が多い。このような場合には、洪水吐ピアを対象として新たに解析モデルを作成して、このモデルの入力条件（荷重条件）として、ダム全体を対象とした解析より得られた洪水吐ピアでの加速度応答や動水圧等の結果を利用した解析を実施する方法が考えられる。

2.4 既存の耐震性能評価法

ダムの洪水吐ピアを対象とした耐震性能評価に関わる指針、マニュアルは「国交省ダム照査指針案」と「経産省水力発電設備照査マニュアル」が該当する。ダムの洪水吐ピアの構造は、堰や水門等も同じであることから、これらを対象とした「国交省河川構造物照査

指針」の内容についても紹介する。

(1) 国交省ダム照査指針案

ダムの洪水吐ピアは主ゲートを支持する門柱として、大規模地震により重大な損傷が生じ主ゲートの脱落等が生じないことを確認する必要がある、特に、左右岸方向の地震動の影響が大きくなる可能性があることに留意する必要があると記されている。具体的な照査方法の例としては、国土交通省・国土技術政策総合研究所の国総研資料第244号「参考資料1 指針（案）・同解説の補足説明資料」¹⁰の「資料1-18 クレストゲート門柱部の照査」（以下、国総研資料と称す）に記載がある。以下で概要を紹介する。

a. 解析モデル

有限要素法を用いる照査では、門柱部を含む堤体全体で3次元モデルを作成して地震応答解析を実施する方法以外に、門柱部のみを3次元でモデル化して、そのモデル基部に堤体部の時刻歴地震応答解析（動的解析）の結果から得られる加速度の時刻歴を入力する方法が示されている。

b. 解析方法

動的解析による方法と、地震力を慣性力に置き換えた静的解析による方法が示されている。動的解析による方法として、堤体部の動的解析結果から求まる門柱部基部の加速度応答時刻歴を入力波として、門柱部のモデル基部に入力する方法が示されている。静的解析による方法として、堤体部の動的解析結果から求まる堤頂部の最大加速度応答値に相当する静的荷重を慣性力として考慮する方法が示されている。

c. 左右岸方向地震動の設定

一般に重力式コンクリートダム堤体部の解析では、上下流方向断面による2次元解析が行われており、門柱部が設置される堤体上部における動的応答は上下流方向に対するもの

しか算出されない。このような場合、『当該ダム
の基礎および堤頂部において強震時の地震
動記録が得られていれば、その記録をもとに
当該ダムの動的応答特性を勘案して、左右岸
方向の地震動成分について設定することがで
きる』と記されている。さらに、このような
記録がない場合には、例えば以下のような方
法を用いることができるとされている。

左右岸方向については、加速度時刻歴とし
て入力波形を設定することはできないが、堤
体部の 2 次元解析から求まる堤頂部におけ
る上下流方向の最大応答と左右岸方向の最大
応答の関係（門柱部の固有振動周期に対応す
るもの）があらかじめわかっているならば、堤頂部
の上下流方向の最大応答から左右岸方向の最
大応答を推定することができる。これにより、
左右岸方向に対する最大応答に相当する地震
力を、門柱部に対して左右岸方向に作用する
静的荷重（慣性力）として考慮する静的解析
による照査が可能となる。実務的には、図 2.3
に示された加速度応答スペクトル比の関係を
用いて、当該ダム門柱部の固有値解析により
求まる固有周期に対応する加速度応答スペク
トル比（上下流方向に対する左右岸方向の割

合）を推定することにより、上下流方向に対
して左右岸方向の照査で考慮すべき地震力の
相対的な大きさを設定する方法である。

(2) 経産省水力発電設備照査マニュアル

洪水吐ピアの照査フローによると、まず、
堤体部の動的解析結果から洪水吐ピアにひび
割れが発生しない、洪水吐ピアの鉄筋が降伏
しない等により安全性を確認することとなっ
ている。解析結果から洪水吐ピアの安全性が
確認できなければ、洪水吐ピアに作用する動
水圧、加速度を抽出して、それらを用いて別
途洪水吐ピアの解析を実施して、曲げ破壊お
よびせん断破壊に対する照査や、洪水吐ピア
の許容変位（応答変位、残留変位等）に対す
る照査を行うこととなっている。以下ではケ
ーススタディの概要を紹介する。

a. 解析モデル

ローラーゲートを有する重力式コンクリー
トダムにおいては、洪水吐ピアを上下流方向
断面と左右岸方向断面の 2 つの断面に対する 2
次元解析モデルを作成して、それぞれの方向
の断面で照査を行う例が示されている。ラジ
アルゲートを有するアーチ式コンクリートダ
ムにおいては、洪水吐ピアを線材でモデル化

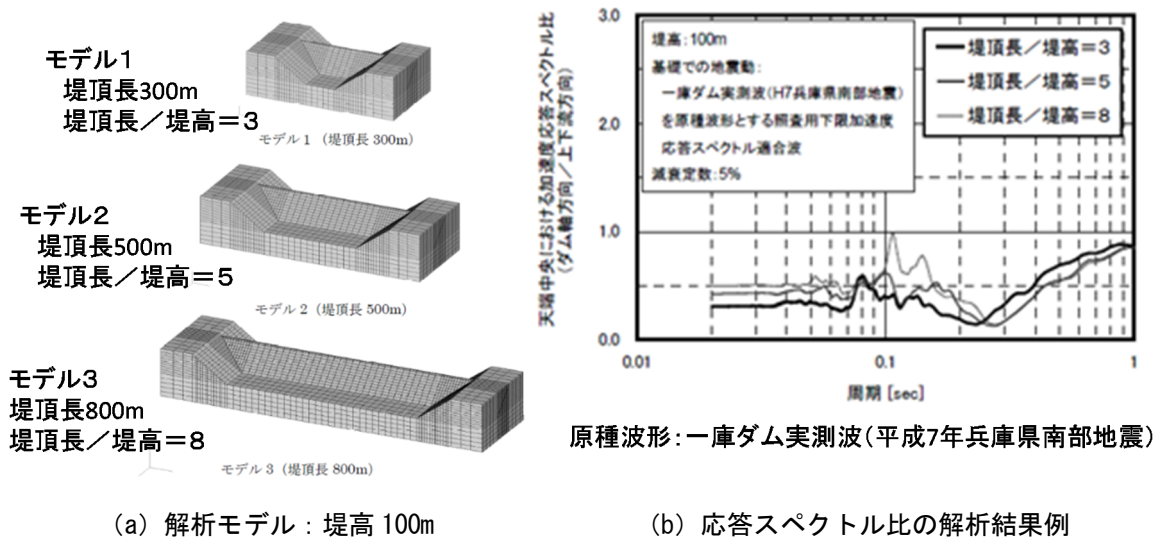


図 2.3 堤頂部における上下流方向応答に対する左右岸（ダム軸）方向応答の応答スペクトル比¹⁰⁾

した骨組構造による解析モデルを作成して照査を行う例が示されている。

b. 解析方法

堤体部の 3 次元動的解析を実施して、得られた洪水吐ピアに作用する動水圧ならびにゲート反力の最大値を静的荷重として、洪水吐ピア基部の加速度の時刻歴波形として、上下流断面および左右岸断面の両方の荷重を用いる方法が記されている。

(3) 国交省河川構造物照査指針

レベル 1 地震動とレベル 2 地震動に相当する静的荷重を、地盤種別と固有周期、地域別補正係数を考慮した水平震度としてそれぞれ設定して、レベル 1 地震動に対しては震度法を、レベル 2 地震動に対しては地震時保有水平耐力法で静的に照査する方法を標準としている。レベル 2 地震動に対する耐震性能照査では、地震時保有水平耐力が作用する慣性力を下回らないとともに、残留変位がゲートの開閉性から決定される許容残留変位以下であることを照査するものとされている。

2.5 評価事例

公表されている既設ダムでの評価事例は少なく、以下では、中部電力(株)と関西電力(株)の評価、検討事例^{11)・12)}および、前述の経産省水力発電設備照査マニュアルに示されたケーススタディの例⁵⁾を示す。

(1) 評価、検討事例

中部電力(株)では、東海地震等の大規模地震の発生に備えて、ダムおよび主要設備の耐震安全性を検討している。このうち、洪水吐ピアの耐震裕度向上に関する検討結果が報告¹¹⁾されている。この報告は、堤体中央天端に 2 門のラジアルゲートを有する堤高 46.4m の重力式コンクリートダムの例である。

この検討では、堤体はソリッド要素、洪水

吐ピアはシェル要素として 3 次元有限要素解析モデルを作成して、全体モデルの中で洪水吐ピアの動的応答を直接評価している。ダムの 3 次元動的解析によりレベル 2 地震動に対する耐震性能照査を行った結果、洪水吐ピア基部の局所安全率（ひび割れ曲げモーメントで評価、文献 11) 参照) が 1.0 を下回った。このことから、管理橋を活用した洪水吐ピアの耐震裕度向上策として、高減衰ダンパーを用いる耐震補強工法の適用を提案し、実際のダムで適用している。

関西電力(株)では、耐震裕度の小さいダムピアに対しての耐震補強工法を検討するために、ダムピアとゲートの連成解析の高精度化やダムピアの耐震補強工法の解析的検討¹²⁾が進められている。この報告は、ダムピアと 5 門のラジアルゲートの連成解析の例である。

この検討では、ダムピアは梁要素、ゲートはシェル要素として 3 次元有限要素解析モデルを作成して、この簡易モデルを用いた動的解析によりダムピアの耐震性能を評価している。動的解析において左右岸方向に対する入力加速度波形は、ダム基盤の上下流方向入力波形に対して、ダムの上下流方向の応答倍率を乗じたものとしている。ダムピアの耐震補強工法としては、既設管理橋とダムピア間を固定化させる方法や緩衝ゴムで接触させる方法が検討され、工法として適用可能な見通しを得ている。

(2) ケーススタディの例

a. ローラーゲートの洪水吐ピア

重力式コンクリートダムの洪水吐ピアを対象とした例⁵⁾（堤高 75.5m、ゲートは堤体中央天端に 2 門）である。まず、堤体の 3 次元動的解析（図 2.4 参照）を実施してレベル 2 地震動に対する耐震性能評価を行い、その結果から洪水吐ピアの照査に用いる洪水吐ピア基部の加速度応答や洪水吐ピア上流面の動水圧を

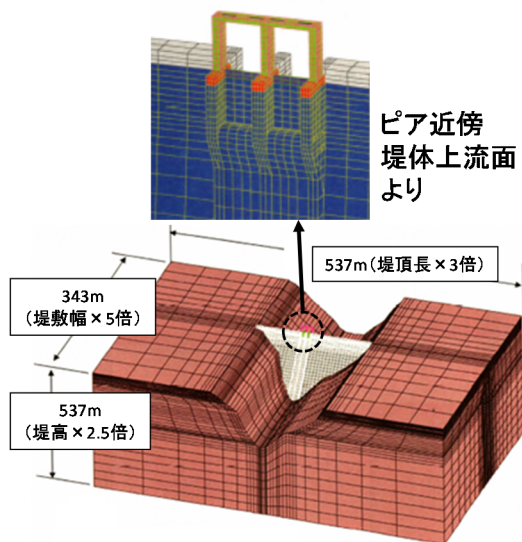


図 2.4 ローラーゲートのピア照査用の全体解析モデル例⁵⁾

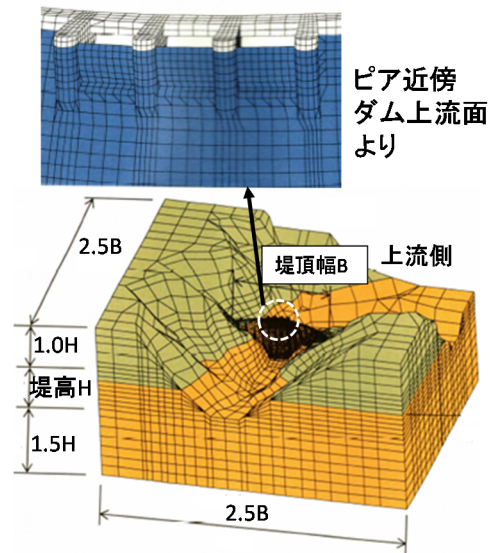


図 2.5 ラジアルゲートのピア照査用の全体解析モデル例⁵⁾

算出している。次に、洪水吐ピアの上下流方向断面と左右岸方向断面の 2 つの断面に対しては、ソリッド要素で 2 次元解析モデルを作成して、それぞれの方向毎に評価を実施している。それぞれの方向の断面とも、曲げ破壊とせん断破壊に対する評価、変位に対する評価が実施されている。

b. ラジアルゲートの洪水吐ピア

アーチ式コンクリートダムの洪水吐ピアを対象とした例⁵⁾ (堤高 86.1m、ゲートは堤体中央天端に 3 門) である。まず、堤体の 3 次元動的解析 (図 2.5 参照) によりレベル 2 地震動に対する耐震性能評価を行い、その結果から洪水吐ピアの評価に用いる洪水吐ピア基部の加速度応答や洪水吐ピア上流面の動水圧を算出している。次に、洪水吐ピアと天端橋梁を線材による骨組構造とした解析モデルを作成して評価を実施している。評価の内容は前述のローラーゲートの洪水吐ピアと同じで、曲げ破壊とせん断破壊に対する評価、変位に対する評価である。

2.6 静的地震力を用いた耐震性能評価法における課題

一般に、重力式コンクリートダムの耐震性能評価は、上下流方向に対する 2 次元断面を対象として動的解析により行われることが多い。このため、堤体の評価に引き続き洪水吐ピアの左右岸方向に対する耐震性能を評価する場合には、前述の国総研資料に示された方法により、洪水吐ピアの固有周期に対応する加速度応答スペクトル比 (上下流方向に対する左右岸方向の比率) を推定して、左右岸方向の照査で考慮すべき静的地震力 (慣性力) を定めて行う方法が簡便で合理的と考えられる。しかし、前述図 2.3 の加速度応答スペクトル比を算出した解析条件には、堤高の相違や洪水吐開口部、ピア高さ (ゲート形式) 等の構造諸元による影響が考慮されていない。さらに、3 次元構造によりダムの動的解析を行う場合においても、天端橋梁やゲートと洪水吐ピアとの接合条件も含めた標準的な洪水吐ピアのモデル化方法が明確になっていないことや、洪水吐ピアが複数ある場合に、どの洪水吐ピア

アに注目して評価すべきかなど明らかになっていない。

このため本報告では、3次元モデルを用いたパラメータ解析により、これらの影響を勘案して標準的な洪水吐のモデル化方法を示し、それに基づき得られた加速度応答スペクトル比を提示する（後述「3.5.3」）。静的地震力を用いたピアの左右岸方向に対する耐震性能照査の手順案は図2.6に示すとおりである。

なお、ピアの耐震性能評価において、加速度応答スペクトル比以外に最大加速度応答倍率を用いる方法も考えられる。例えば、ピアに作用させる静的地震力として入力地震動強度にピアの最大加速度応答倍率を乗じた値を用いる¹²⁾等である。この方法はピアの固有振動特性を考慮せず静的地震力を定める簡便なものであるが、概算評価の一つとしての利用が考えられる。方法の適用性については別途報告するが、本報告書ではこの方法で利用す

る最大加速度応答倍率の結果についても参考として提示する。

3. 3次元動的解析による洪水吐ピアの応答特性

3.1 解析概要

本研究で用いる解析手法および解析条件、モデル化、荷重条件等は、既報⁸⁾の重力式コンクリートダム堤体の耐震性能照査に関する検討で用いたものと同じであり、手法の適用性等については確認されている。

堤体、基礎岩盤および貯水を考慮した3次元有限要素解析モデルを作成して、線形時刻歴地震応答解析により、洪水吐ピア（ピアと称す）の動的応答や応答スペクトルを把握した。主な解析パラメータは、堤高の影響、ゲートの形式（ラジアルゲートとローラーゲー

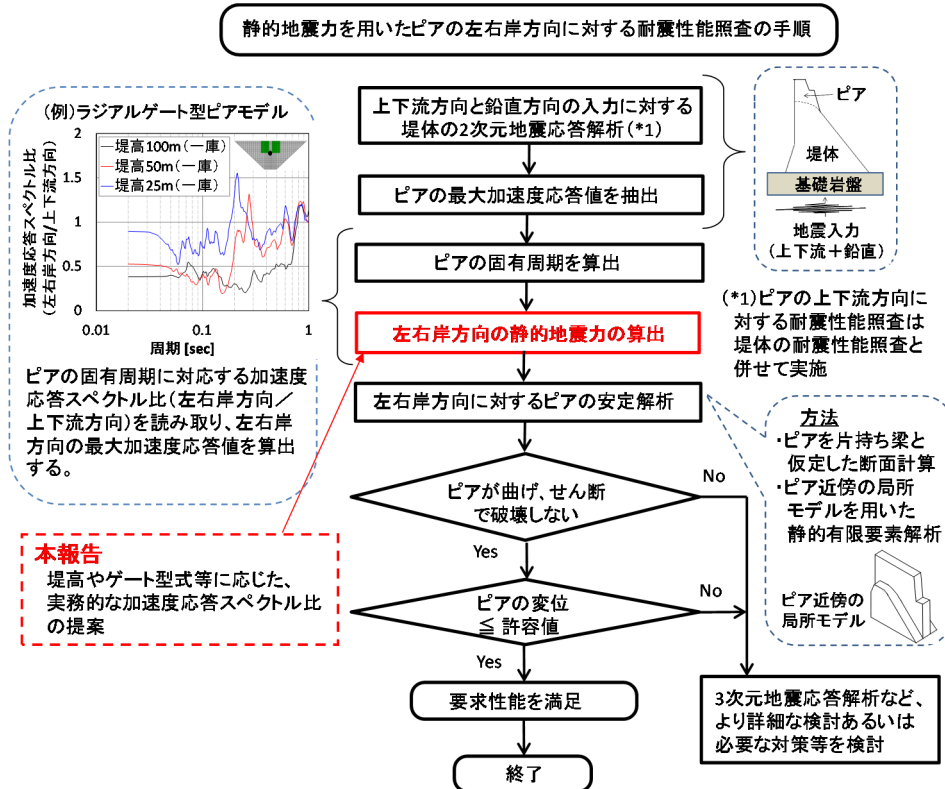


図 2.6 静的地震力を用いたピアの左右岸方向に対する耐震性能照査の手順

トを対象としたピアの高さ)、ピアと堤体天端橋梁の接合条件、地震動（兵庫県南部地震一庫ダム観測波と鳥取県西部地震賀祥ダム観測波の位相特性を使用）である。比較として国総研資料の解析で用いられている、洪水吐開口部の無い 3 次元モデルでの解析も実施した。なお、非線形時刻歴地震応答解析によるピアの耐震補強結果と比較する必要があり、ここでは線形時刻歴地震応答解析を用いた。

3.2 解析手法ならびに解析条件

(1) 解析手法と解析モデル

a. 解析手法

解析手法は、有限要素法による堤体、基礎岩盤および貯水連成モデルでの線形時刻歴地

震応答解析（動的解析）である。解析は、汎用解析コード「ABAQUS(ver.6.5-6)」を用いて、貯水部は水要素（流体要素、後述 3.3(1)参照）で扱った。

b. 解析モデル

解析モデルの作成においては、経産省水力発電設備照査マニュアルのケーススタディ⁵⁾や電力会社のダム諸元等を見ながら基本となる概算の寸法を定めた。

まず、重力式コンクリートダムの堤体形状については、堤体断面の基本諸元は全てのモデルで共通とした。堤体断面の基本諸元を図 3.1 に示す。その諸元として、堤高は 100m、50m、25m の 3 種類、上流面には堤高の高さ 30%まで勾配 1:0.3 のフィレットを有し、堤体の下流面勾配は 1:0.8 とした。堤体の 3 次元形

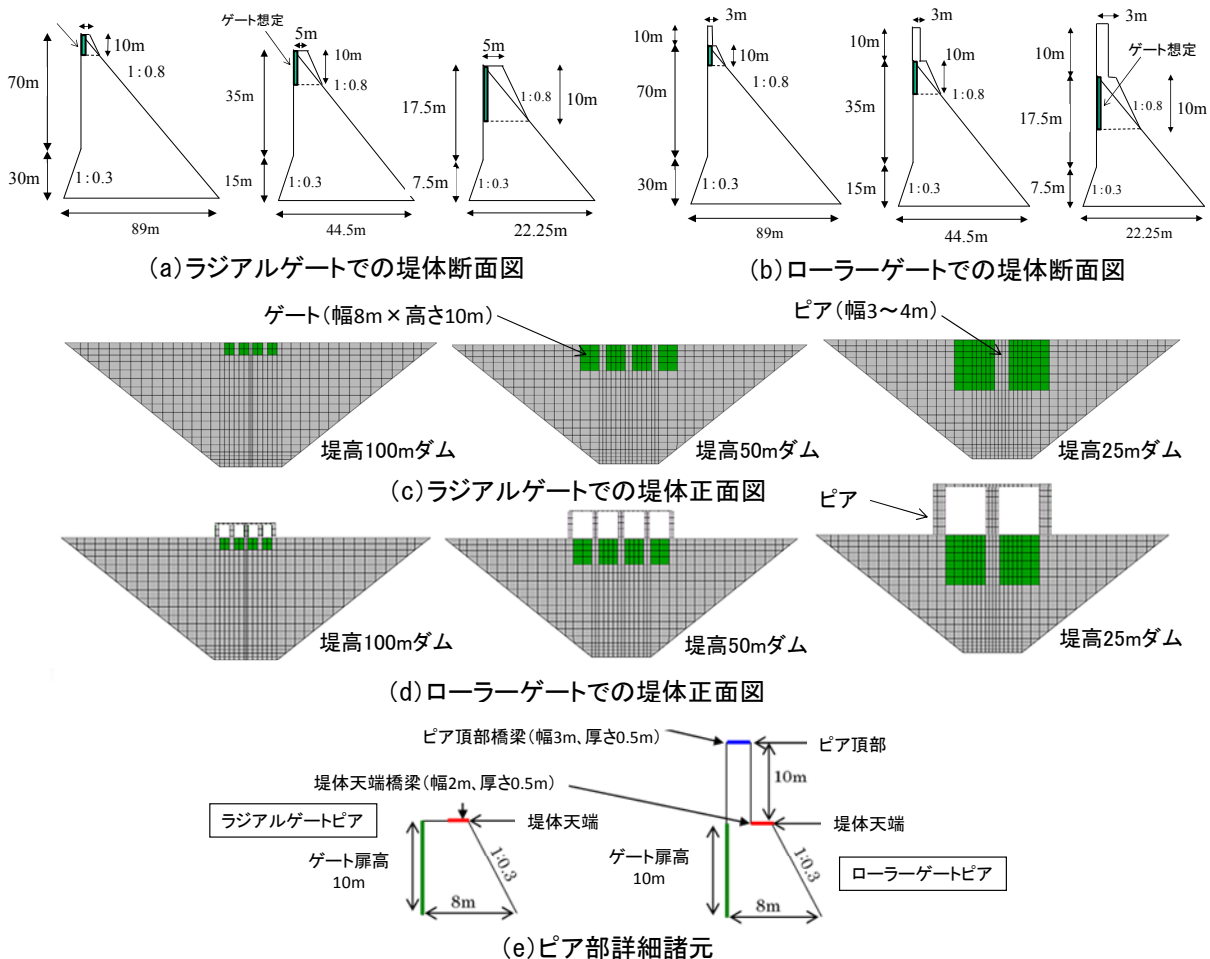


図 3.1 解析対象ダムの堤体断面および正面、ピア部の基本諸元

状としては、堤頂長は堤高の 3.0 倍、堤体最大断面の左右岸方向幅は堤高の 0.5 倍とした。

次に、ゲートおよびピアの配置については以下の通りとした。堤高 100m および 50m ダムでは、洪水吐として堤体中央に幅 8m×高さ 10m の開口部を 4 箇所設けて、そこに 4 門のゲートを配置した。開口部の左右岸方向の離隔は 3~4m 間隔として、この幅の箇所をラジアルゲート形式でのピアとして扱った。ローラーゲート形式のモデルでは、ピアの高さとして、堤体天端標高から上方に高さ 10m を立ち上げてピアとして扱った。堤高 25m ダムでは、洪水吐として堤体中央に幅 8m×高さ 10m の開口部を 2 箇所設けて、そこに 2 門のゲートを配置した。ピアの幅や高さについては堤高 100m および 50m ダムと同じである。

ピア近傍のモデル化においては以下を解析パラメータとして考慮した。それは、ピア間をつなぐピア頂部の橋梁（堤体越流天端の橋

梁、天端橋梁と称す）の有無と、ピアと天端橋梁の接合条件（剛結合、弱結合（コンクリートの 1/1000 剛性の線形要素を使用))、ピアとゲート側方の接合条件（剛結合と弱結合）である。橋梁については、実際には堤体やピアと剛結するような設置方法ではないことを勘案するとともに、実際とは異なるが解析上、簡易な方法である剛結合を考慮した。

最後に、モデル化の考え方と解析パラメータの設定根拠について以下に記す。

ゲートについては、堤体に比べて重量、厚さとも小さいことから、単位厚さのシェル要素を堤体最上流面に配置して、貯水池水圧の伝達を考慮した。ピアとゲート側方の接合条件については、ローラーゲートは水圧でピアに接すると考えて剛結合、ラジアルゲートは側方の水密ゴムを勘案して弱結合と剛結合のパラメータを設定した（表 3.1 参照）。

次に、堤体形状のうち堤高をパラメータと

表 3.1 ゲートとピアの結合条件

ゲート 型式	部位	方向	結合条件のケース		
			剛結合	弱結合	
ラジアル ゲート	ゲート 側面	上下流方向	ピアのピン節点と等変位拘束(左右岸側とも)		
		左右岸方向	ピアの直近節点と等変位拘束	ピアの直近節点とノーテンションバネで結合(*)	
		鉛直方向	拘束なし		
	ゲート 底面	上下流方向	拘束なし		
		左右岸方向	拘束なし		
		鉛直方向	越流天端の直近節点と等変位拘束		
ローラー ゲート	ゲート 側面	上下流方向	ピアの直近節点と等変位拘束	/	
		左右岸方向	ピアの直近節点と等変位拘束		
		鉛直方向	拘束なし		
	ゲート 底面	上下流方向	拘束なし		
		左右岸方向	拘束なし		
		鉛直方向	越流天端の直近節点と等変位拘束		

* ピアが左右岸方向に変位した際は、圧縮側はサイドローラーのクリアランス程度（1cm）を超えるまで抵抗しないように設定。

したのは、堤高の低いダムでは洪水吐の開口部が堤体に占める比率が相対的に大きくなり、ピアの地震時応答が卓越すると考えたためである。電力会社が保有する約 240 基の重力式コンクリートダムのうち、その約半数は堤高 30~70m のもので、堤高 100m を越すダムは約 10 基と少ない¹³⁾。これらを考慮して 3 種類の堤高を設定した。

また、ゲート形式とピア・天端橋梁間の接合条件をパラメータとしたのは、前述 (2.1(1)参照) したとおり、ピアは特に左右岸方向に対して変形しやすい構造であること、天端橋梁はピアの左右岸方向に対する変形を抑制する効果が考えられることからである。

モデル化領域については、堤体の応答に影響を及ぼさないように⁸⁾、上下流方向は堤体部を中心に堤高の約 4.5 倍、左右岸方向は堤体部を中心に堤頂長の約 3.0 倍、基礎岩盤深さ方向は堤高の約 3.0 倍とした。解析に用いた要素分割の代表例を図 3.2 に示す。前述した通り、ここで用いたダムの有限要素解析モデルは、既報⁹⁾の検討で用いたモデルに、ゲートおよびピ

アを配置する改良を加えたものである。

c. 堤体と岩盤の境界条件

解析モデルの境界条件として、常時解析では、基礎岩盤の側面を鉛直ローラー支承、底面は鉛直および水平方向とも拘束とした。動的解析では、水平動入力の場合は基礎岩盤の側面を水平方向ローラー支承、底面は鉛直方向拘束で水平方向ローラー支承とした。鉛直動入力の場合は基礎岩盤の側面を鉛直方向ローラー支承、底面は鉛直方向ローラー支承、水平方向拘束とした。

(2) 地震動

地震動は、国交省ダム照査指針案の方法³⁾に準拠して、各方向の成分波形とも、波形振幅は照査用下限加速度応答スペクトルで規定し、既存ダム観測波の位相¹⁴⁾(兵庫県南部地震一庫ダム観測波、鳥取県西部地震賀祥ダム観測波)を用いて作成した。用いた 2 種類の観測波については、既設コンクリートダムの耐震性能照査において利用実績が非常に多い^{3)、8)、10)}ものである。作成した地震動の加速度時刻歴波形、加速度応答スペクトル、水平成分の加

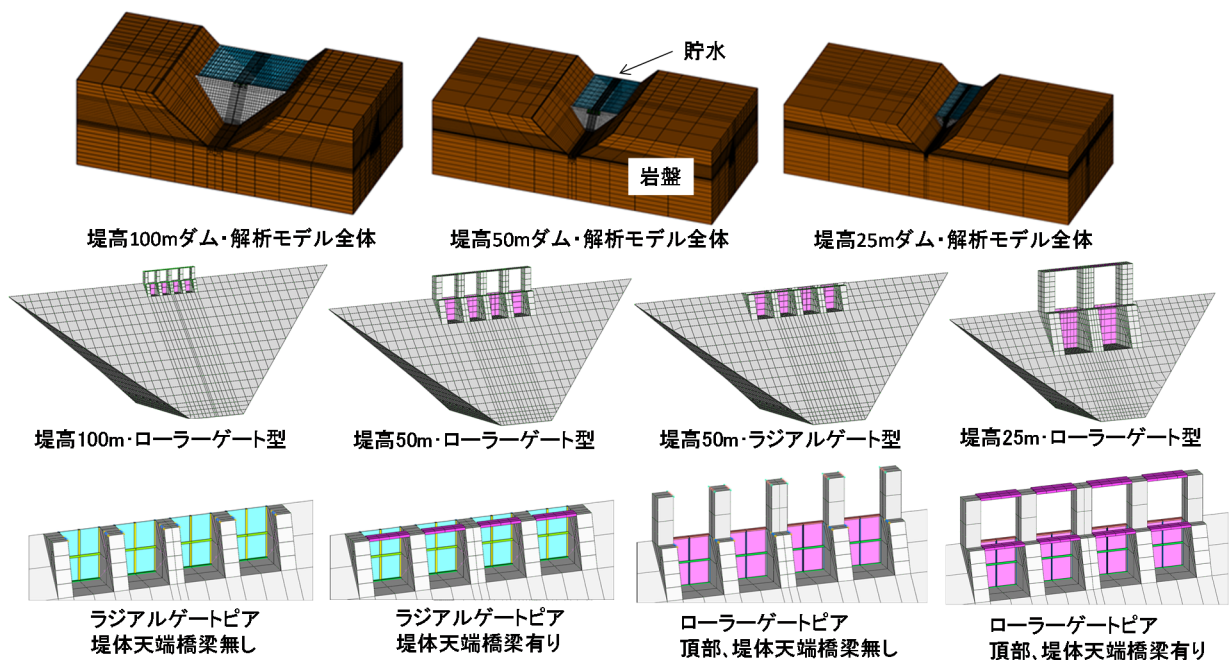


図 3.2 解析に用いた要素分割

速度履歴を図 3.3 に示す。ここで、地震動の水平成分については、各方向とも照査用下限加速度応答スペクトル適合波となっている。このため、各方向の波形をベクトル合成した際の最大加速度は、各方向での最大加速度の約 1.4 倍となることに留意が必要である (図 3.3

水平成分の加速度履歴参照)。

解析では、この作成した地震動に対して重複反射理論 (SHAKE) を用いて有限要素解析モデルの底面へ引き戻した波形を用いた。

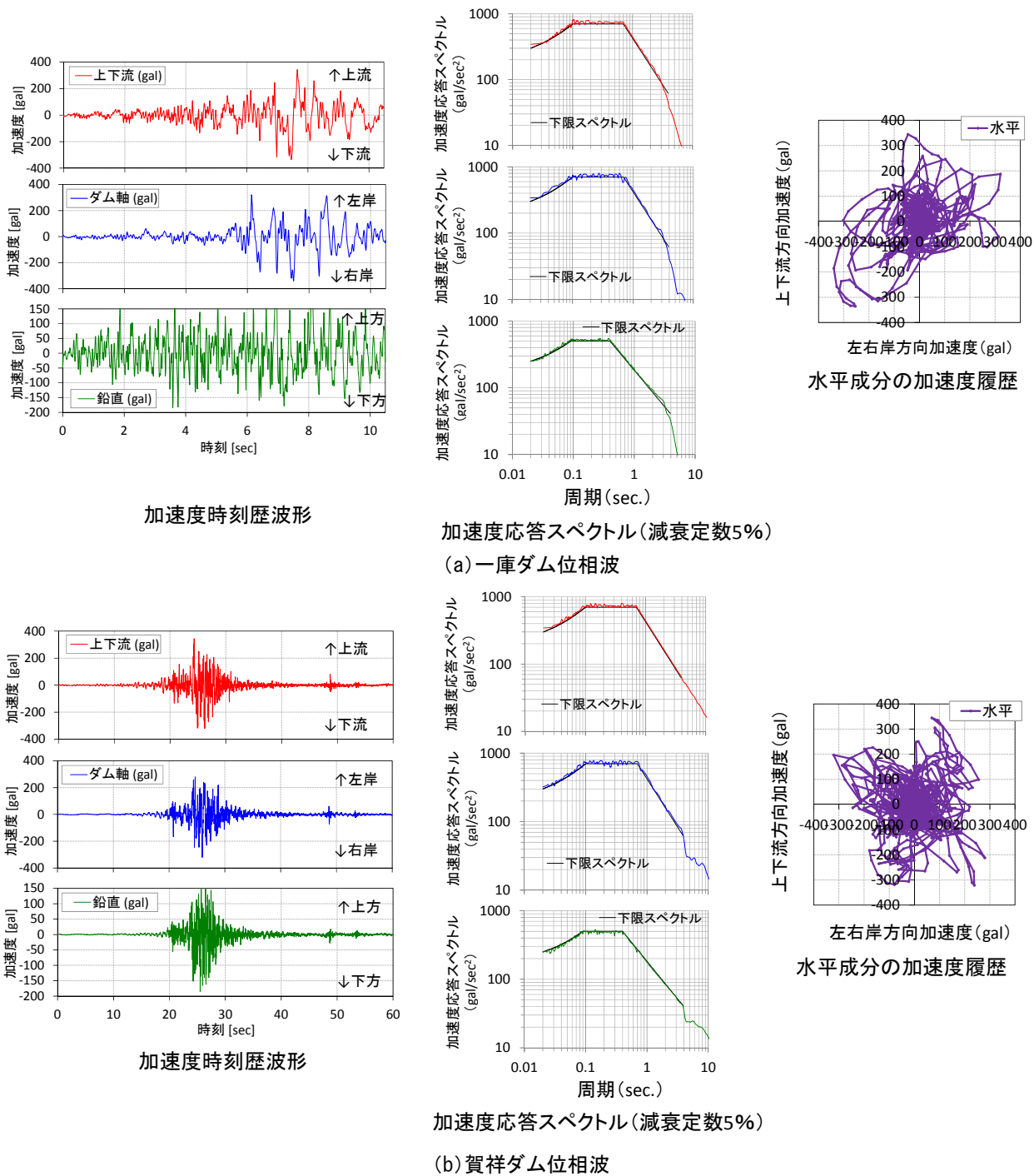


図 3.3 解析に用いた地震動

3.3 荷重条件と物性値

荷重条件として、常時荷重は貯水の静水圧、揚圧力、堆泥圧、自重を、地震時荷重は貯水の動水圧と地震動を考慮した。荷重条件の計算に用いる係数、定数は河川管理施設等構造令¹⁾もしくはダム設計基準¹⁵⁾に準拠した。以下に、主な荷重条件の詳細を記す。

(1) 荷重条件

a. 静水圧

貯水位は堤体天端より-5mと便宜上仮定した。静水圧は水の単位体積重量 1.0t/m^3 として、堤体上流面に対して直交方向の面圧として作用させた。

b. 揚圧力

揚圧力分布は、堤体底面の上流端を $1/3$ 水頭、下流端を 0 水頭とする三角形分布で作用させた。ダム設計基準¹⁵⁾によると、この分布は堤体底面の基礎処理（カーテングラウトやコンソリデーショングラウト）が適切に実施された場合に該当する。

c. 堆泥圧

堆泥高さは貯水位の $1/3$ 水深と便宜上仮定し、堆泥圧はダム設計基準¹⁵⁾での平均的な係数として泥圧係数 0.4 、堆泥の水中における見かけの重さ 1.1t/m^3 として、堤体上流面に対して直交方向の面圧として作用させた。

d. 動水圧

解析コード「ABAQUS」の音響要素（水要素）により動水圧を考慮した。すなわち、堤体-貯水間および貯水-基礎岩盤間の界面には、水圧を伝達する音響インターフェース要素を設けた。ただし、貯水境界面でのインピーダンス比は考慮しておらず、非圧縮性流体として完全反射の条件¹⁶⁾である。

(2) 物性値

解析に用いた物性値を下記に記す。

a. 単位体積重量

堤体の単位体積重量は 2.3t/m^3 、基礎岩盤の単位体積重量 2.6t/m^3 とした。いずれの値も一般値である。

b. 動弾性係数とポアソン比

堤体の動弾性係数は $2.5 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、基礎岩盤の動弾性係数は $1.5 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ゲートの動弾性係数は $20.6 \times 10^4\text{N/mm}^2$ とした。ポアソン比は堤体および基礎岩盤は 0.2 、ゲートは 0.3 とした。いずれの値も、重力式コンクリートダムのコンクリート配合や基礎岩盤（ C_M 級基礎岩盤の一般値¹⁷⁾）、鋼材としての標準的な値を想定したものである。なお、動弾性係数は静弾性係数（ヤング係数）の 1.3 倍¹⁰⁾としている。

c. 減衰

減衰はレイリー減衰で設定した。レイリー減衰の設定に際し、まず、それぞれの堤高に応じた堤体-基礎岩盤-貯水連成モデルで固有値解析を実施して、堤体の 1 次と 2 次の固有振動数を把握した。次に、堤体の 1 次と 2 次の固有振動数で所定の減衰となるようにレイリー減衰定数（質量比例減衰 α 、剛性比例減衰 β ）を設定した。所定の減衰としては、既往解析事例¹⁸⁾、¹⁹⁾を参考に、堤体および基礎岩盤とも 5% とした。ゲートについては 2% と 5% で堤体部の応答に大差ない結果であったことから、ここでは 5% に設定した。

3.4 解析ケース

解析ケースと解析条件の組み合わせを表^{3.2}に示す。 3 種類の堤高（ 100m 、 50m 、 25m ）に対して、洪水吐開口部の無いモデルとラジアルゲート型モデル、ローラーゲート型モデルの 3 種類を設定し、それぞれに対して 2 種類の地震動（上下流方向と左右岸方向、鉛直方向の 3 方向入力）と、ピアと天端橋梁間の接合条件を組み合わせたケースを設定している。

表 3.2 解析ケースと解析条件

ケース名称	堤高	ゲート型式	ゲートとピアの結合条件	堤体天端の結合条件	ピア頂部の結合条件(*1)	入力地震動(*2)
開口無し	100m	開口無し	—	—	—	2波
天端橋梁無し		ラジアル	剛結合	橋梁無し		2波
天端橋梁剛結合			剛結合	剛結合		2波
天端橋梁弱結合			弱結合	弱結合		1波
天端橋梁無し		ローラー	剛結合	橋梁無し	橋梁無し	2波
天端橋梁剛結合			剛結合	剛結合	剛結合	2波
天端橋梁弱結合			剛結合	弱結合	剛結合	1波
開口無し	50m	開口無し	—	—	—	2波
天端橋梁無し		ラジアル	剛結合	橋梁無し		2波
天端橋梁剛結合			剛結合	剛結合		2波
天端橋梁弱結合			弱結合	弱結合		1波
天端橋梁無し		ローラー	剛結合	橋梁無し	橋梁無し	2波
天端橋梁剛結合			剛結合	剛結合	剛結合	2波
天端橋梁弱結合			剛結合	弱結合	剛結合	1波
開口無し	25m	開口無し	—	—	—	2波
天端橋梁無し		ラジアル	剛結合	橋梁無し		2波
天端橋梁剛結合			剛結合	剛結合		2波
天端橋梁弱結合			弱結合	弱結合		1波
天端橋梁無し		ローラー	剛結合	橋梁無し	橋梁無し	2波
天端橋梁剛結合			剛結合	剛結合	剛結合	2波
天端橋梁弱結合			剛結合	弱結合	剛結合	1波

*1 ラジアルゲートピアの場合、ピア頂部の橋梁は堤体天端の橋梁と同じ。

*2 入力地震動3波は位相特性として一庫ダム観測波、賀祥ダム観測波を使用したもの。
1波は位相特性として一庫ダム観測波を使用したもの。

3.5 解析結果

以下では、堤体およびピアの加速度と変位の応答特性、静的解析によるピアの耐震性能評価で用いる加速度応答スペクトル比（上下流方向に対する左右岸方向の加速度応答値の比率）について考察する。ここで、加速度と変位の応答特性については、ピアの耐震性能評価における着目箇所（部位）を抽出する目

的で実施したものであり、堤体およびピアの全体的な地震時挙動を把握した。

3.5.1 加速度応答倍率

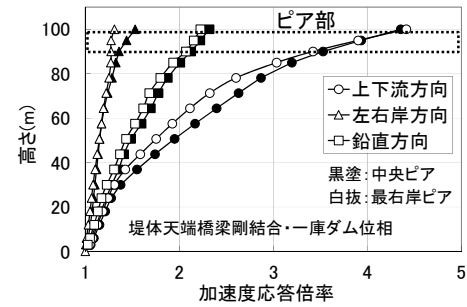
加速度応答については、加速度応答倍率の最大値分布で評価した。最大値分布は、等時刻性を考慮して、全時刻を通じた特定時刻の加速度応答倍率を求めて、その最大値が発生した時刻の分布を抽出した。加速度応答倍率

は堤体断面の底面における加速度応答値で正規化した値である。ここではまず、堤高別で設置位置の異なるピアの影響として、中央ピアと最右岸ピアの応答を比較した。ここで、解析で用いたモデルは左右対称形で、線形解析であることを踏まえて、最左岸と最右岸に位置するピアでの加速度応答倍率は大きくないと考えて、中央ピアと最右岸ピアで比較した。その後、相対的に応答が大きい中央ピアについて、地震動の相違やゲート型式の相違等の影響を比較した。最後に、中央ピアにおいて、標準的と考えられる洪水吐のモデル化方法に対して、ゲート型式別で堤高の相違による影響を比較した。

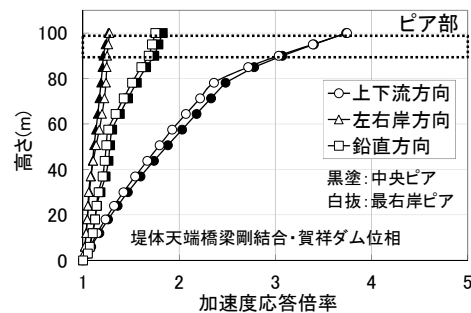
(1) 堤高 100m ダム洪水吐ピア中央と最右岸の応答の比較

洪水吐ピアの中央断面（中央ピア）と、最も右岸側に位置するピア断面（最右岸ピア）での加速度応答倍率を比較した結果を図 3.4～図 3.10 に示す。図 3.4 は洪水吐開口部を設け

ないケース、図 3.5～図 3.7 はラジアルゲートのケース、図 3.8～図 3.10 はローラーゲートのケースである。

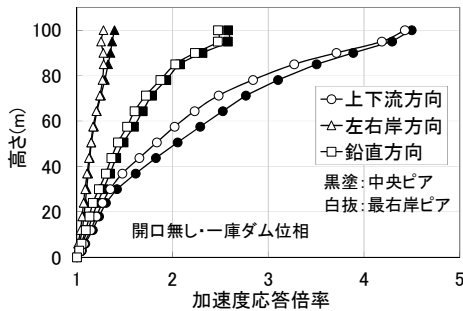


(a)一庫ダム位相波入力

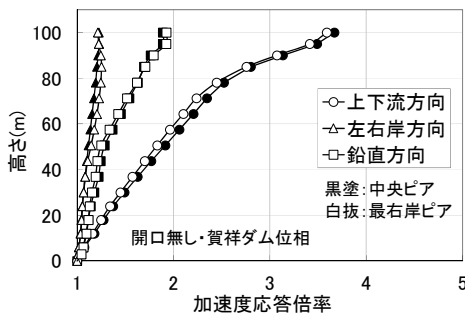


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.5 堤高 100m・ラジアルゲート・天端橋梁剛結合モデルでの加速度応答倍率

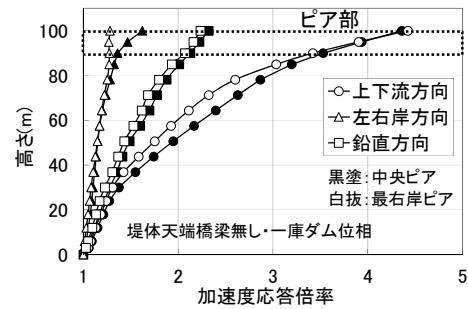


(a)一庫ダム位相波入力

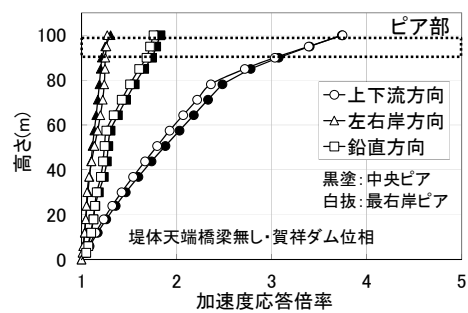


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.4 堤高 100m・開口無しモデルでの加速度応答倍率

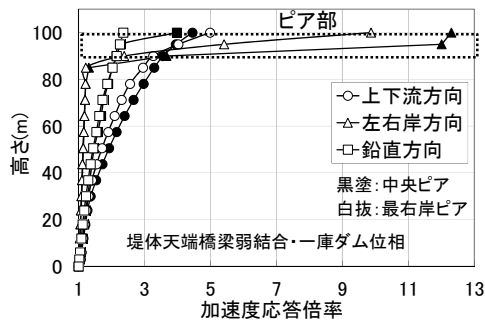


(a)一庫ダム位相波入力



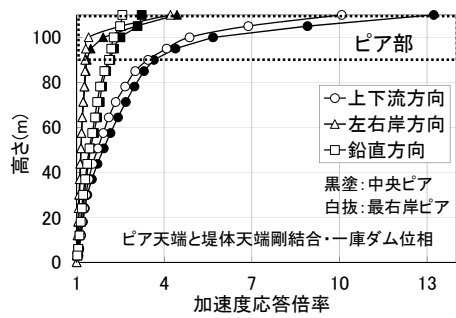
(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.6 堤高 100m・ラジアルゲート・天端橋梁無しモデルでの加速度応答倍率

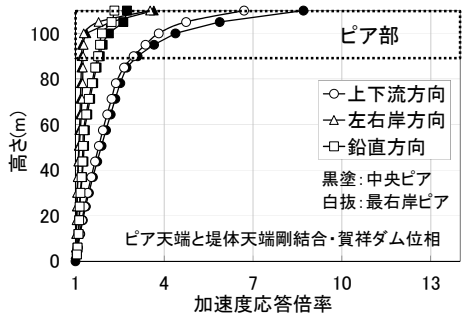


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.7 堤高 100m・ラジアルゲート・天端橋梁弱結合モデルでの加速度応答倍率



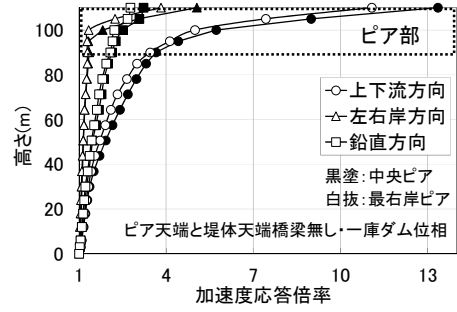
(a)一庫ダム位相波入力



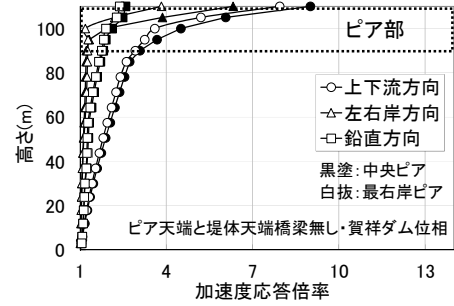
(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.8 堤高 100m・ローラーゲート・天端橋梁剛結合モデルでの加速度応答倍率

ラジアルゲートのピアにおいては、洪水吐開口部の有無や天端橋梁の有無に係わらず、中央ピアの方が最右岸ピアよりも若干大きな値を示すものの、両者に大差ないことがわかる。ピアと天端橋梁が弱結合の場合には、ピア天端近傍での左右岸方向の値が急増しており、上下流方向の値よりも大きくなっている。これは、解析結果を確認したところ、ピアと天端橋梁の接触に伴い発生したものである。

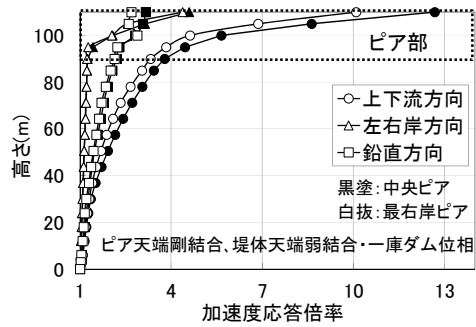


(a)一庫ダム位相波入力



(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.9 堤高 100m・ローラーゲート・天端橋梁無しモデルでの加速度応答倍率



(a)一庫ダム位相波入力

図 3.10 堤高 100m・ローラーゲート・天端橋梁弱結合モデルでの加速度応答倍率

このため、後述 3.5.2 の変位応答の結果において変位は急増していない。また、地震動の相違により、加速度応答倍率の値は各方向ともやや異なる傾向を示す。

ローラーゲートのピアにおいては、堤体天端橋梁やピア頂部橋梁の有無に係わらず、中央ピアの方が最右岸ピアよりも大きな値を示し、この差はラジアルゲートのピアでの差よりも大きい傾向にある。そして、地震動の相

違により、加速度応答倍率の値は各方向ともやや異なる傾向を示している。加速度応答倍率の分布は、堤体天端からピア頂部までの10m 標高で急増している。特に上下流方向と左右岸方向での値の増加が顕著である。鉛直上方に立ち上がったピアの構造的な特徴に起因した応答と考えられる。堤体天端標高（高さ 100m）での値は、ラジアルゲートのピアでの値と同程度である。また、ピア頂部橋梁と堤体天端橋梁が無い場合でも、他条件での結果と大差ない。これは、ローラーゲートの側面はピアと剛結合であり、ゲート側面における拘束の影響が支配的となったためと考えられる。

(2) 堤高 50m ダム洪水吐ピア中央と最右岸の応答の比較

洪水吐ピアの中央断面（中央ピア）と、最も右岸側に位置するピア断面（最右岸ピア）での加速度応答倍率を比較した結果を図 3.11～図 3.17 に示す。図 3.11 は洪水吐開口部を設

けないケース、図 3.12～図 3.14 はラジアルゲートのケース、図 3.15～図 3.17 はローラーゲートのケースである。

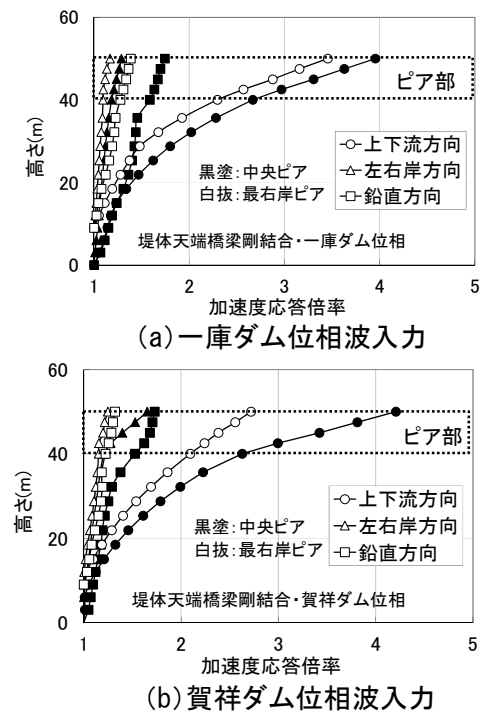


図 3.12 堤高 50m・ラジアルゲート・天端橋梁剛結合モデルでの加速度応答倍率

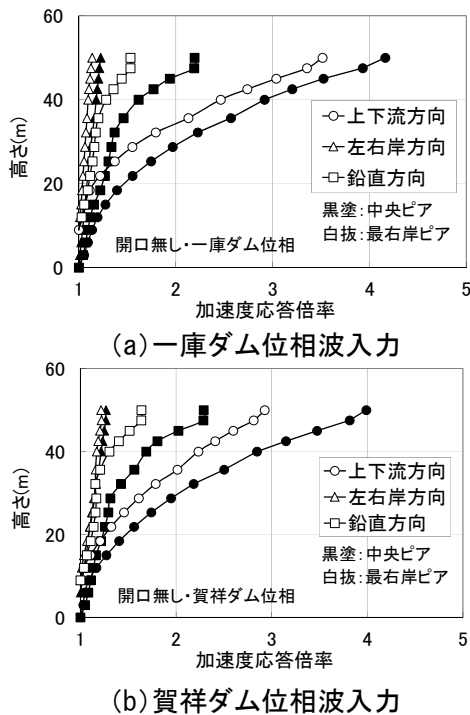


図 3.11 堤高 50m・開口無しモデルでの加速度応答倍率

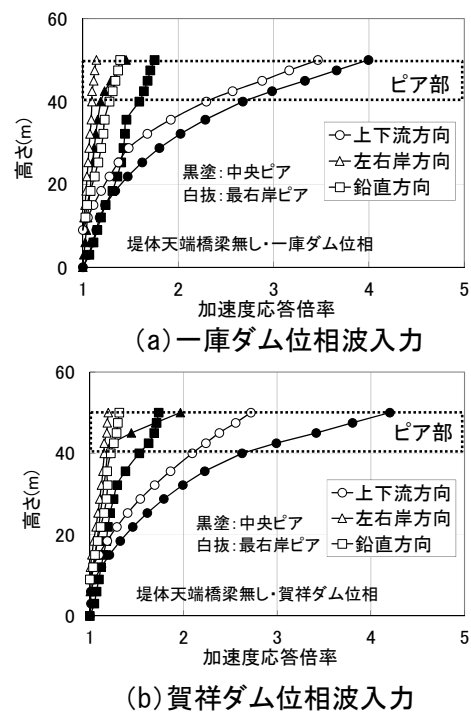
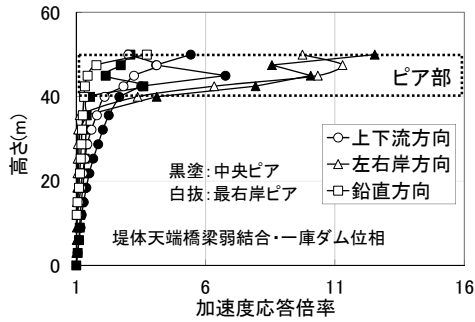
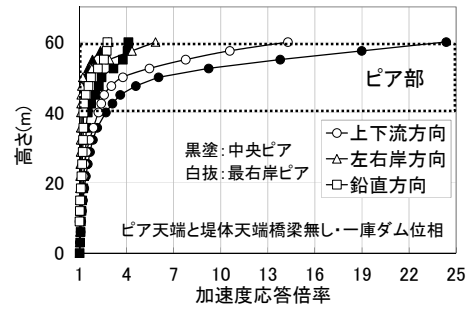


図 3.13 堤高 50m・ラジアルゲート・天端橋梁無しモデルでの加速度応答倍率

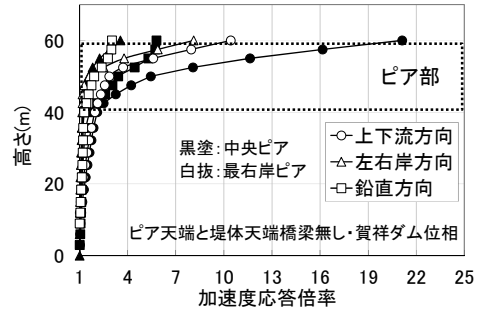


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.14 堤高 50m・ラジアルゲート・天端橋梁弱結合モデルでの加速度応答倍率

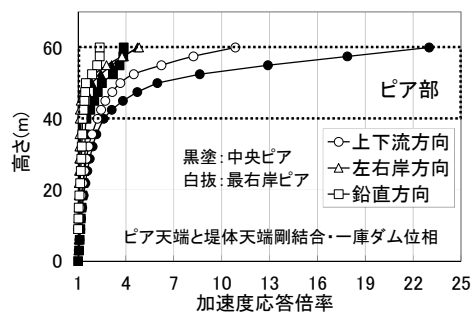


(a)一庫ダム位相波入力

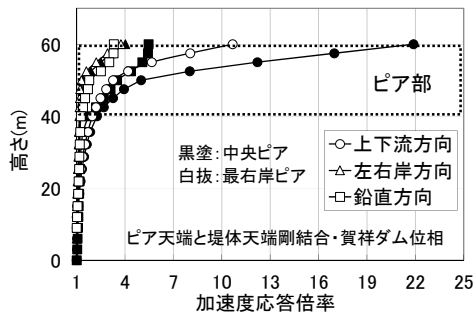


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.16 堤高 50m・ローラーゲート・天端橋梁無しモデルでの加速度応答倍率

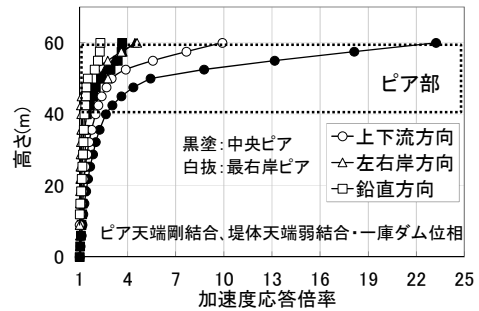


(a)一庫ダム位相波入力



(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.15 堤高 50m・ローラーゲート・天端橋梁剛結合モデルでの加速度応答倍率



(a)一庫ダム位相波入力

図 3.17 堤高 50m・ローラーゲート・天端橋梁弱結合モデルでの加速度応答倍率

ラジアルゲートのピア、ローラーゲートのピアとも傾向は堤高 100m ダムと同様であり、中央ピアの方が最右岸ピアよりも大きな値を示し、この差は堤高 100m ダムよりも大きい傾向を示している。特にローラーゲートのピアでは差が大きい。ラジアルゲートのピアでピアと天端橋梁が弱結合の場合も同様に、ピア天端近傍での上下流方向と左右岸方向の応答倍率の値が増大ならびに分布が乱れている。ローラーゲートのピアでは、堤体天端から

ピア頂部までの 10m 標高で加速度応答倍率は急増しており、ピア頂部での値は、堤高 100m ダムの値よりもかなり大きい。この理由として、既報等^{20)・21)}より堤高 100m ダムおよび堤高 50m ダムとも、堤体の一次固有周期は地震動の加速度応答スペクトルが最大となる範囲 (0.1~1.0 秒、図 3.3 参照) にあり、堤体の応答の影響は同程度と推測される。一方、堤高に対するピアの高さの比は堤高 50m ダムの方が相対的に大きいことから、堤高 50m ダムの

ピアの応答が卓越したことによると考えられる。ピアと堤体天端橋梁が弱結合の場合については堤高 100m ダムと同様に他条件での結果と大差ない。

(3) 堤高 25m ダム洪水吐ピア中央と最右岸の応答の比較

洪水吐ピアの中央断面（中央ピア）と、最も右岸側に位置するピア断面（最右岸ピア）での加速度応答倍率を比較した結果を図 3.18～図 3.24 に示す。図 3.18 は洪水吐開口部を設けないケース、図 3.19～図 3.21 はラジアルゲートのケース、図 3.22～図 3.24 はローラーゲートのケースである。

ラジアルゲートのピア、ローラーゲートのピアとも基本的には堤高 100m ダムならびに堤高 50m ダムの傾向と同様である。特徴的な応答としては、天端橋梁が無い場合に、上下流方向の加速度応答倍率に対して左右岸方向の値が相対的に大きくなり、地震動の相違によっては上下流方向の値よりも大きくなっている。この理由として、上下流方向の応答への影響は堤体の固有周期が、左右岸方向の応答への影響はピアの固有周期が支配的と考えられ、堤高 25m ダム堤体の一次固有周期は

の影響は堤体の固有周期が、左右岸方向の応答への影響はピアの固有周期が支配的と考えられ、堤高 25m ダム堤体の一次固有周期は

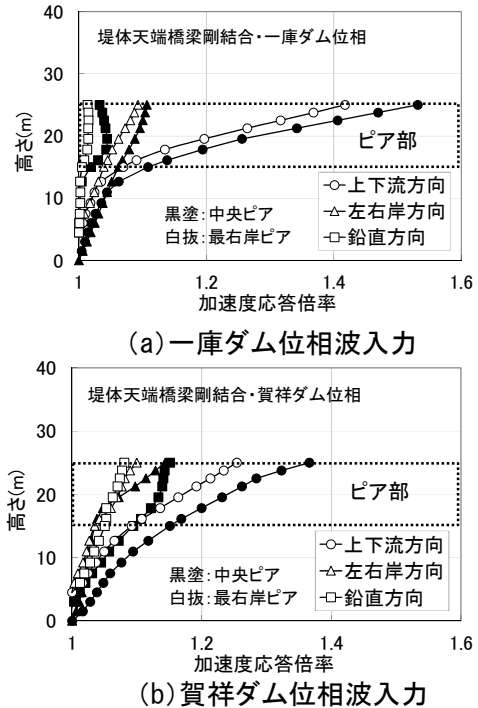


図 3.19 堤高 25m・ラジアルゲート・天端橋梁剛結合モデルでの加速度応答倍率

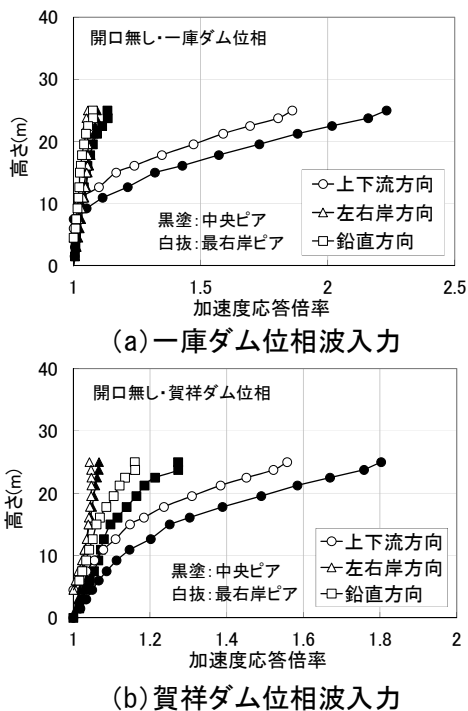


図 3.18 堤高 25m・開口無しモデルでの加速度応答倍率

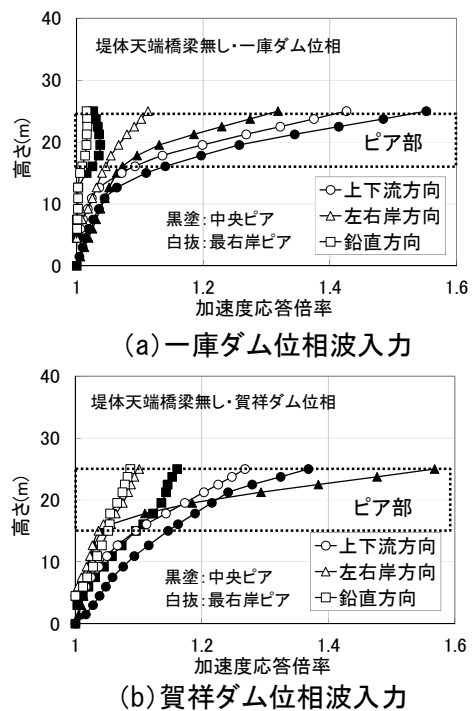
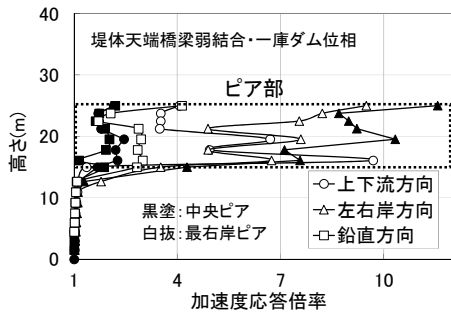
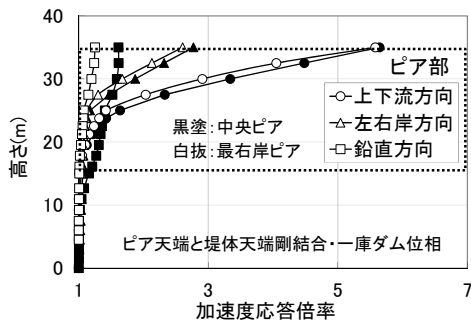


図 3.20 堤高 25m・ラジアルゲート・天端橋梁無しモデルでの加速度応答倍率



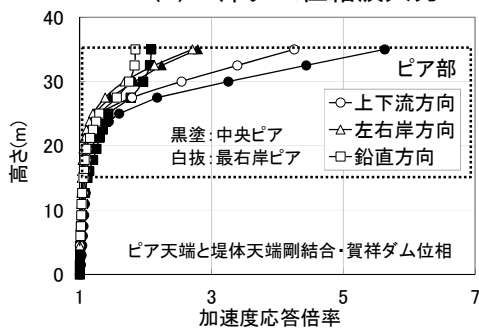
(a)一庫ダム位相波入力

図 3.21 堤高 25m・ラジアルゲート・天端橋梁弱結合モデルでの加速度応答倍率

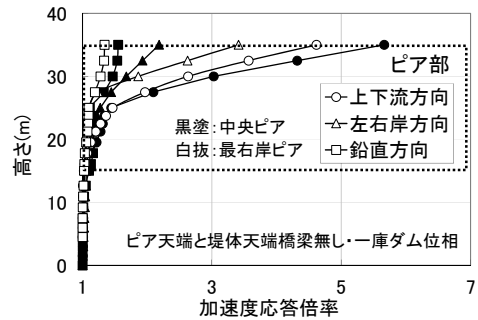


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.22 堤高 25m・ローラーゲート・天端橋梁剛結合モデルでの加速度応答倍率

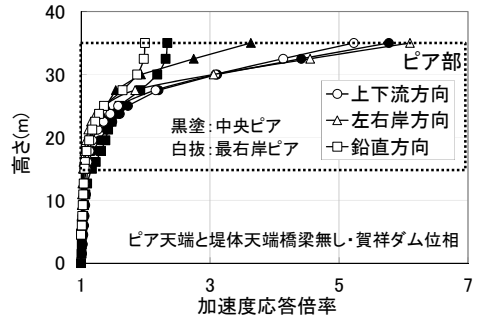


(b)賀祥ダム位相波入力

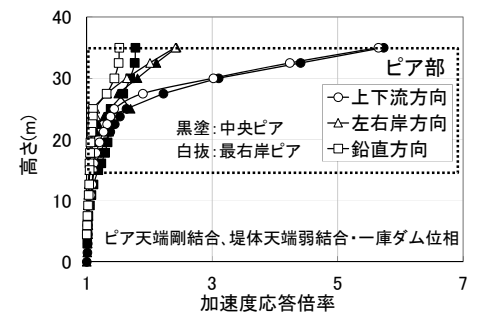


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.23 堤高 25m・ローラーゲート・天端橋梁無しモデルでの加速度応答倍率



(b)賀祥ダム位相波入力



(a)一庫ダム位相波入力

図 3.24 堤高 25m・ローラーゲート・天端橋梁弱結合モデルでの加速度応答倍率

0.1 秒未満^{20)・21)}であることから、地震動の加速度応答スペクトルが最大となる範囲と大きく異なっている。従って、堤体の応答よりもピアの応答の影響が卓越したためと考えられる。なお、加速度応答倍率の値は堤高 100m ダムや堤高 50m ダムの値よりも小さい。

以上の比較から、ラジアルゲートでの結果は洪水吐開口部を設けないケースでの結果と大差ないこと。ローラーゲートでの堤体天端

標高までの加速度応答倍率の分布は、ラジアルゲートでの同標高までの分布と大差ないことがわかった。そして、天端橋梁の扱いとして、ゲート形式に係わらず、必ずしも考慮する必要がないことが示された。さらに、中央ピアの応答が最右岸ピアの応答よりも大きい傾向を示すことから、耐震性評価においては、相対的に応答が大きくなる中央ピアに着目することが、安全側評価であることが示唆され

た。

(4) 洪水吐ピア中央の応答

着目するピア中央の応答に関して、結果を再整理したものを付録図 1～付録図 14 に示す。

また、上述したとおり、加速度応答に局所的な分布は認められず、応答が大きく安全側の耐震評価が行えるのは、ラジアルゲートでは堤体中央断面の天端橋梁無しのケースが、ローラーゲートでは堤体中央断面の堤体天端橋梁およびピア頂部橋梁無しのケースであることが示された。これらのケースを標準条件と称して再整理した図のうち、一庫ダム位相特性を用いた地震動によるケースで、堤高の相違による方向別加速度応答倍率の比較を付録図 13 および付録図 14 には示す。特徴等の考察については前述を参照されたい。

3.5.2 変位応答

変位応答は等時刻性を考慮して、全時刻を通して上流方向と下流方向のそれぞれの方向における最大値が発生した時刻での変位分布で比較した。加速度応答の分析と同様に、まず、堤高別で中央ピアと最右岸ピアの応答を比較して、中央ピアの応答が相対的に大きいことを確認した。

(1) 堤高 100m ダム洪水吐ピア中央と最右岸の応答の比較

洪水吐ピアの中央断面（中央ピア）と、最も右岸側に位置するピア断面（最右岸ピア）での変位応答を比較した結果を図 3.25～図 3.31 に示す。図 3.25 は洪水吐開口部を設けないケース、図 3.26～図 3.28 はラジアルゲートのケース、図 3.29～図 3.31 はローラーゲートのケースである。

ラジアルゲートのピアにおいては、中央ピアの方が最右岸ピアよりも若干大きな変位を示すものの、両者に大差ないことがわかる。そして、洪水吐開口部の有無や天端橋梁の有

無、天端橋梁の結合条件の相違による影響はほとんど認められず、地震動の相違による影響が若干認められる。いずれの条件でも上流

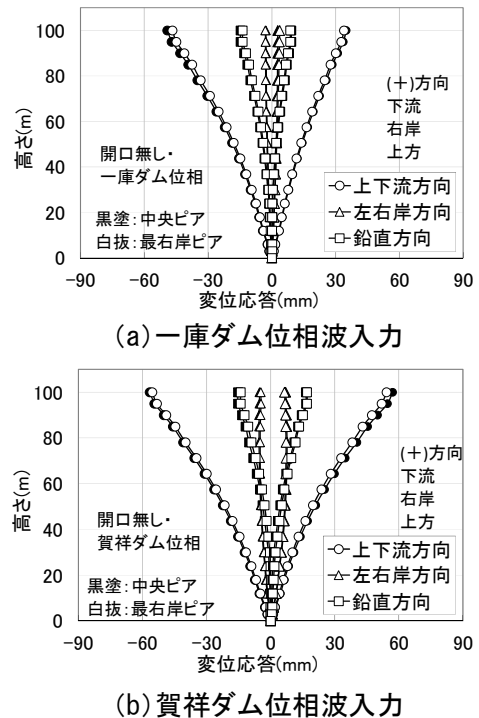


図 3.25 堤高 100m・開口無しモデルでの変位応答

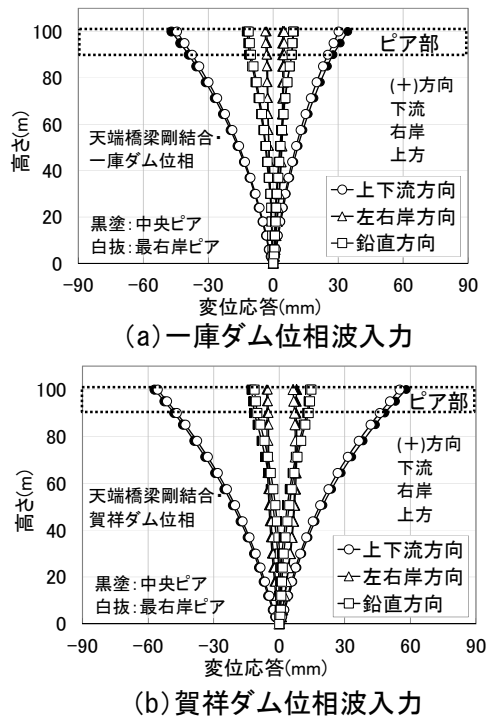
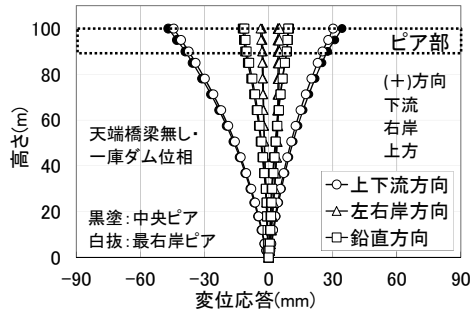
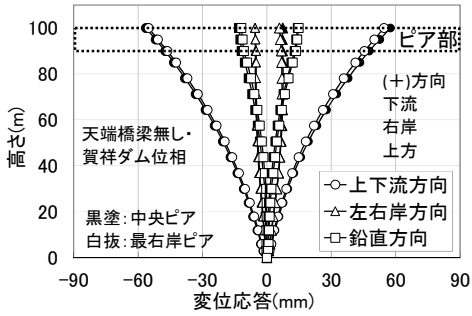


図 3.26 堤高 100m・ラジアルゲート・天端橋梁剛結合モデルでの変位応答

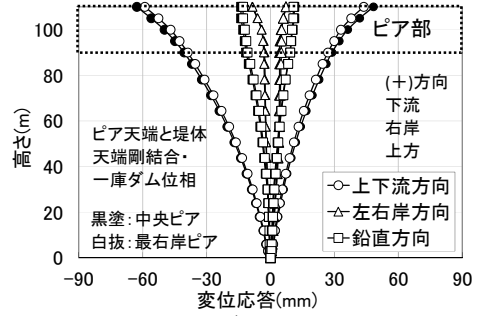


(a)一庫ダム位相波入力

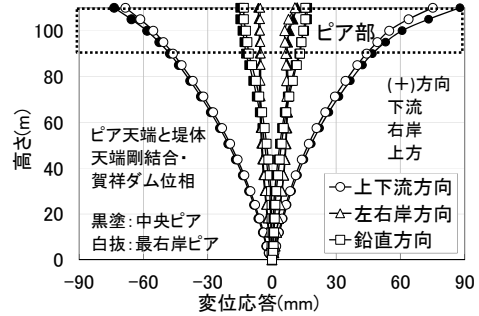


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.27 堤高 100m・ラジアルゲート・天端橋梁無しモデルでの変位応答

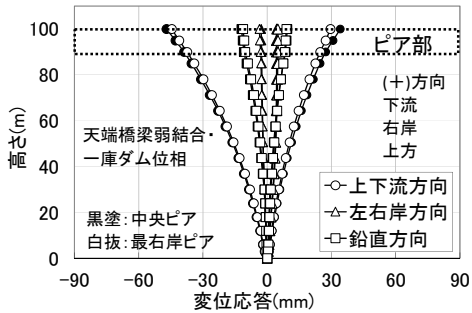


(a)一庫ダム位相波入力



(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.29 堤高 100m・ローラーゲート・天端橋梁剛結合モデルでの変位応答

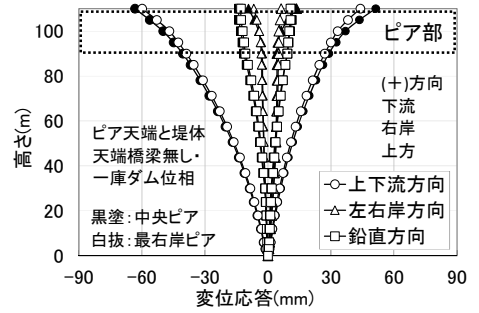


(a)一庫ダム位相波入力

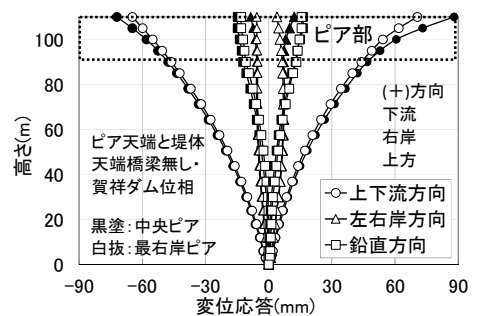
図 3.28 堤高 100m・ラジアルゲート・天端橋梁弱結合モデルでの変位応答

側変位の方が下流方向変位よりも大きい傾向を示す。方向別では上下流方向変位が卓越して最も大きく、次に大きいのが鉛直方向変位であり、左右岸方向変位が最も小さい。

ローラーゲートのピアにおいてもラジアルゲートのピアの結果と同様である。ピア部の変位はラジアルゲートのピアに比べて大きく、特に上流側変位の方が下流方向変位よりも大きくなる傾向はより顕著に現れている。堤体天端より上方に高く張り出したピア部の応答



(a)一庫ダム位相波入力

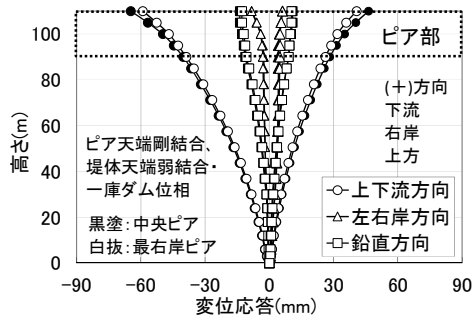


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.30 堤高 100m・ローラーゲート・天端橋梁無しモデルでの変位応答

による影響と考えられる。

(2) 堤高 50m ダム洪水吐ピア中央と最右岸の応答の比較



(a)一庫ダム位相波入力

図 3.31 堤高 100m・ローラーゲート・天端橋梁弱結合モデルでの変位応答

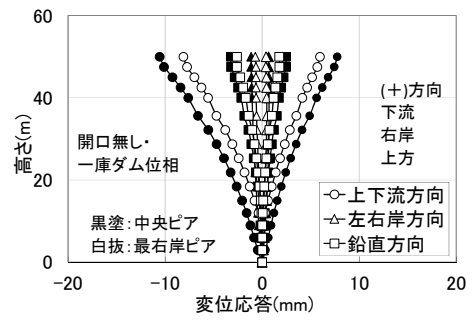
洪水吐ピアの中央と最右岸での変位応答を比較した結果を図 3.32～図 3.38 に示す。図 3.32 は洪水吐開口部を設けないケース、図 3.33～図 3.35 はラジアルゲートのケース、図 3.36～図 3.38 はローラーゲートのケースである。

堤高 100m ダムでの傾向と同じであり、ラジアルゲートのピアおよびローラーゲートのピアとも、中央ピアの方が最右岸ピアよりも大きな変位を示し、堤高 100m ダムでの差よりも大きい。そして、差はローラーゲートのピアにおいて顕著に認められる。堤高 100m ダムと比べて、堤高に占めるピア部の高さが相対的に大きくなることで、応答の影響が顕著に現れたと考えられる。

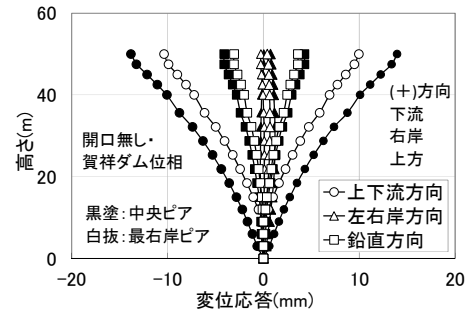
(3) 堤高 25m ダム洪水吐ピア中央と最右岸の応答の比較

洪水吐ピアの中央ピアと、最右岸ピアでの変位応答を比較した結果を図 3.39～図 3.45 に示す。図 3.39 は洪水吐開口部を設けないケース、図 3.40～図 3.42 はラジアルゲートのケース、図 3.43～図 3.45 はローラーゲートのケースである。

ラジアルゲートのピアおよびローラーゲートのピアとも、堤高 50m ダムと同様に、中央ピアの方が最右岸ピアよりも大きな変位を示しており、特にローラーゲートの中央ピアに

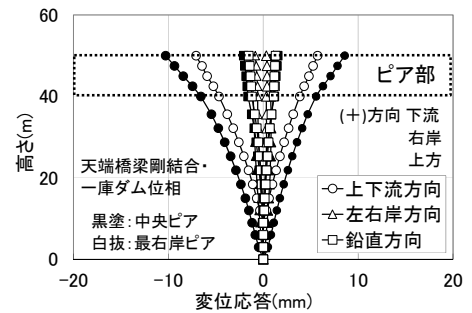


(a)一庫ダム位相波入力

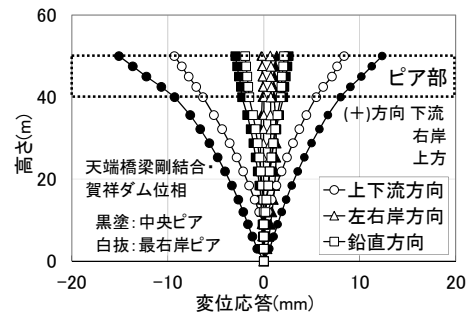


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.32 堤高 50m・開口無しモデルでの変位応答



(a)一庫ダム位相波入力

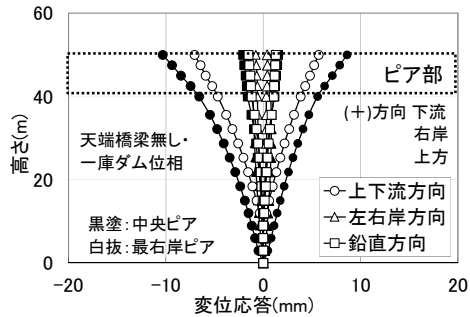


(b)賀祥ダム位相波入力

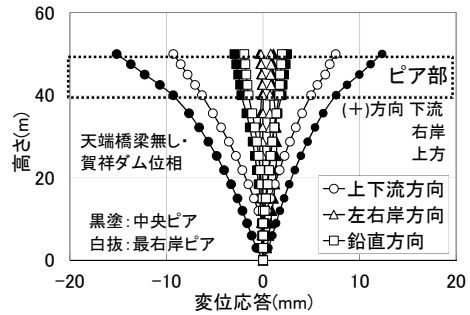
図 3.33 堤高 50m・ラジアルゲート・天端橋梁剛結合モデルでの変位応答

においては最右岸ピアよりも大きい。

以上より、変位応答を比較した傾向については加速度応答を比較した傾向と類似してお

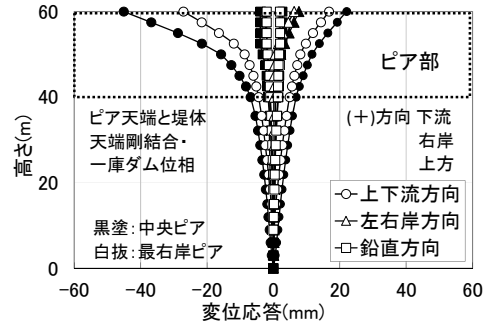


(a)一庫ダム位相波入力

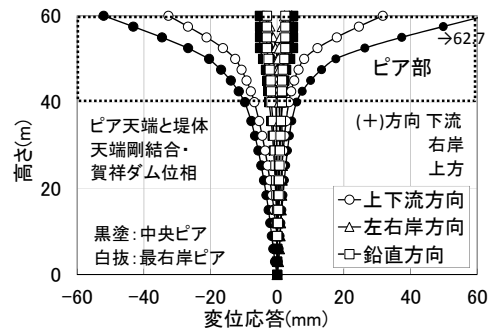


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.34 堤高 50m・ラジアルゲート・天端橋梁無しモデルでの変位応答

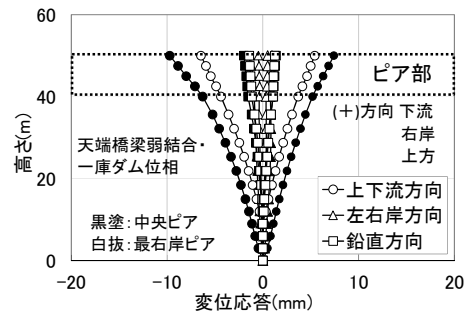


(a)一庫ダム位相波入力



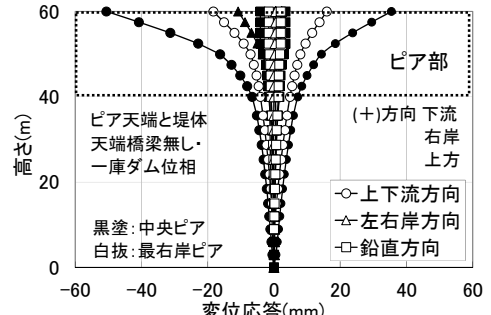
(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.36 堤高 50m・ローラーゲート・天端橋梁剛結合モデルでの変位応答

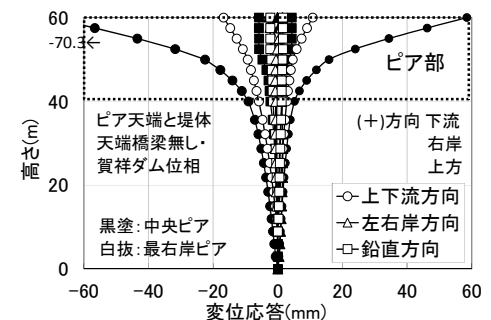


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.35 堤高 50m・ラジアルゲート・天端橋梁弱結合モデルでの変位応答



(a)一庫ダム位相波入力



(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.37 堤高 50m・ローラーゲート・天端橋梁無しモデルでの変位応答

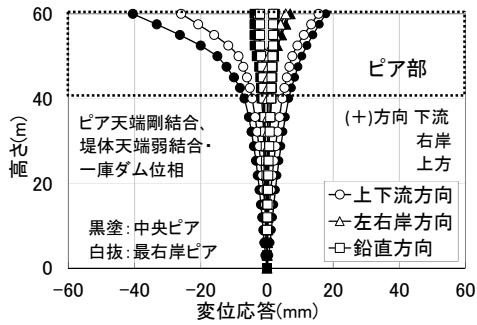
り、着目するのは中央ピアでよいことが確認できた。

(4) 洪水吐ピア中央の応答

着目するピア中央の変位応答に関して、結果を再整理したものを付録図 15～付録図 28 に示す。

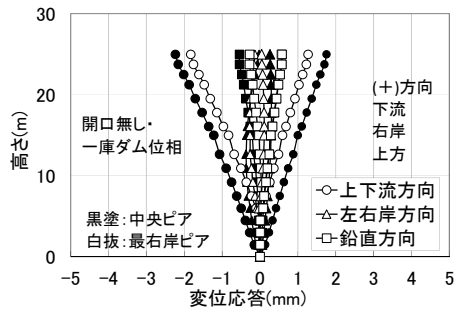
また、加速度応答の結果から標準条件と考えたケースで再整理した図のうち、一庫ダム位相特性を用いた地震動によるケースで、堤高の相違による方向別変位応答の比較を付録

図 27 および付録図 28 には示す。特徴等の考察については前述を参照されたい。

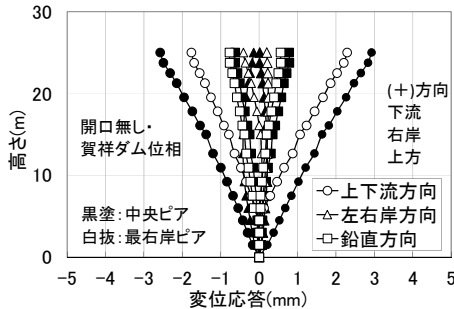


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.38 堤高 50m・ローラーゲート・天端橋梁弱結合モデルでの変位応答



(a)一庫ダム位相波入力



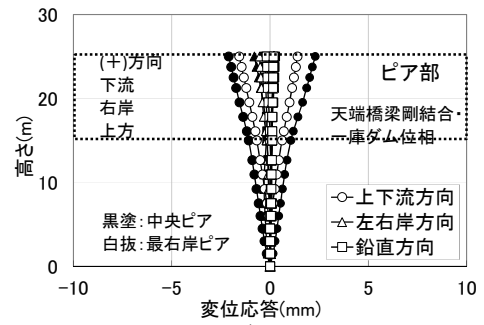
(b) 賀祥ダム位相波入力

図 3.39 堤高 25m・開口無しモデルでの変位応答

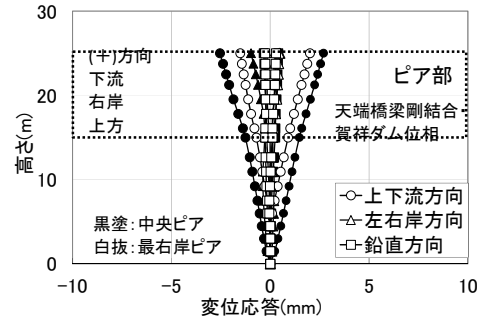
3.5.3 加速度応答スペクトル比

静的解析による洪水吐ピアの左右岸方向に対する耐震性能評価で用いる加速度応答スペクトル比（上下流方向に対する左右岸方向の加速度応答値の比率）を計算して提示した。

前述の加速度応答や変位応答に関する結果から、評価は中央断面に着目し、標準条件のケースで実施した。基本となる中央のピア基部（取付部）に加えて、ピア頂部を比較対象

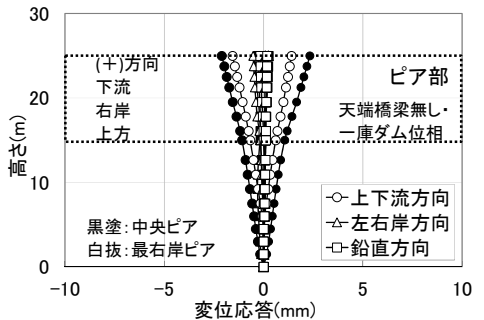


(a)一庫ダム位相波入力

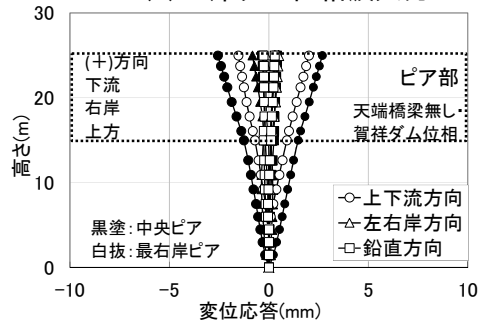


(b) 賀祥ダム位相波入力

図 3.40 堤高 25m・ラジアルゲート・天端橋梁剛結合モデルでの変位応答



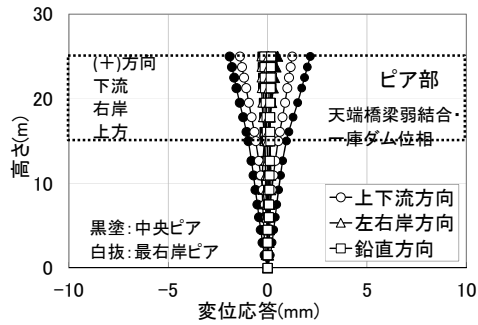
(a)一庫ダム位相波入力



(b) 賀祥ダム位相波入力

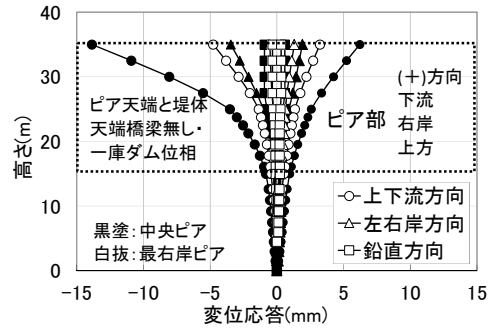
図 3.41 堤高 25m・ラジアルゲート・天端橋梁無しモデルでの変位応答

とした。ここで、ラジアルゲートモデルでのピア頂部は開口無しモデルでの堤体天端と同じ箇所（標高）である。参考として、国総研

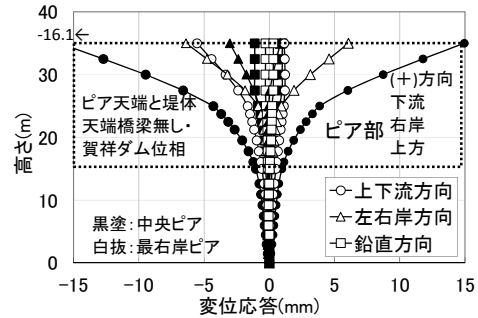


(a)一庫ダム位相波入力

図 3.42 堤高 25m・ラジアルゲート・天端橋梁弱結合モデルでの変位応答

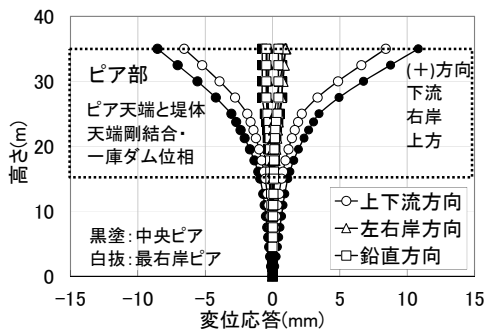


(a)一庫ダム位相波入力

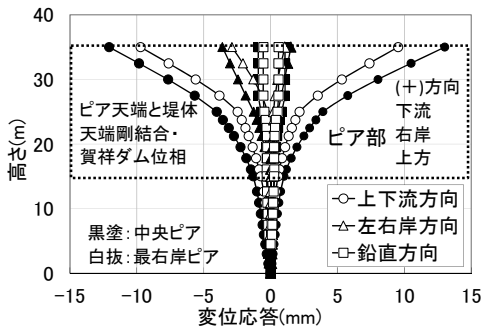


(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.44 堤高 25m・ローラーゲート・天端橋梁無しモデルでの変位応答

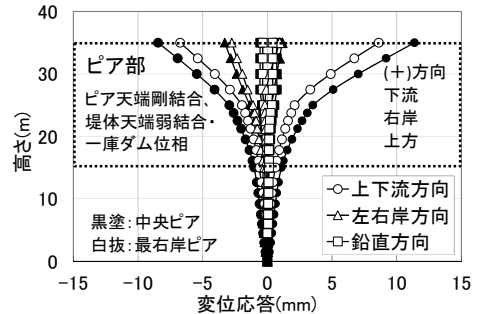


(a)一庫ダム位相波入力



(b)賀祥ダム位相波入力

図 3.43 堤高 25m・ローラーゲート・天端橋梁剛結合モデルでの変位応答



(a)一庫ダム位相波入力

図 3.45 堤高 25m・ローラーゲート・天端橋梁弱結合モデルでの変位応答

資料に示された開口無しモデルでの対象箇所の結果（図中の凡例「天端頂部（開口無し）」）についても示した。地震動の相違の影響については、ダム本体の耐震性能照査の検討で多く用いられている^{8)・10)}、一庫ダムと賀祥ダムの観測波の位相を用いた2種類である。

ラジアルゲートモデルでの結果を図 3.46 に、ローラーゲートモデルでの結果を図 3.47 に示す。

(1) ゲート型式と洪水吐開口部無しの比較

ラジアルゲートモデルでのピア取付部の値は、いずれの堤高とも周期 0.15 秒より短周期側（周波数 6.7Hz 以上）では洪水吐開口部の無いモデルでの値より大きい。特に堤高 50m ダムと堤高 25m ダムでの値の差は顕著である。堤高の相違により応答スペクトル比の分布と大きさは異なり、特に堤高 50m ダムと堤高 25m ダムでは、周期 0.2 秒以上（周波数

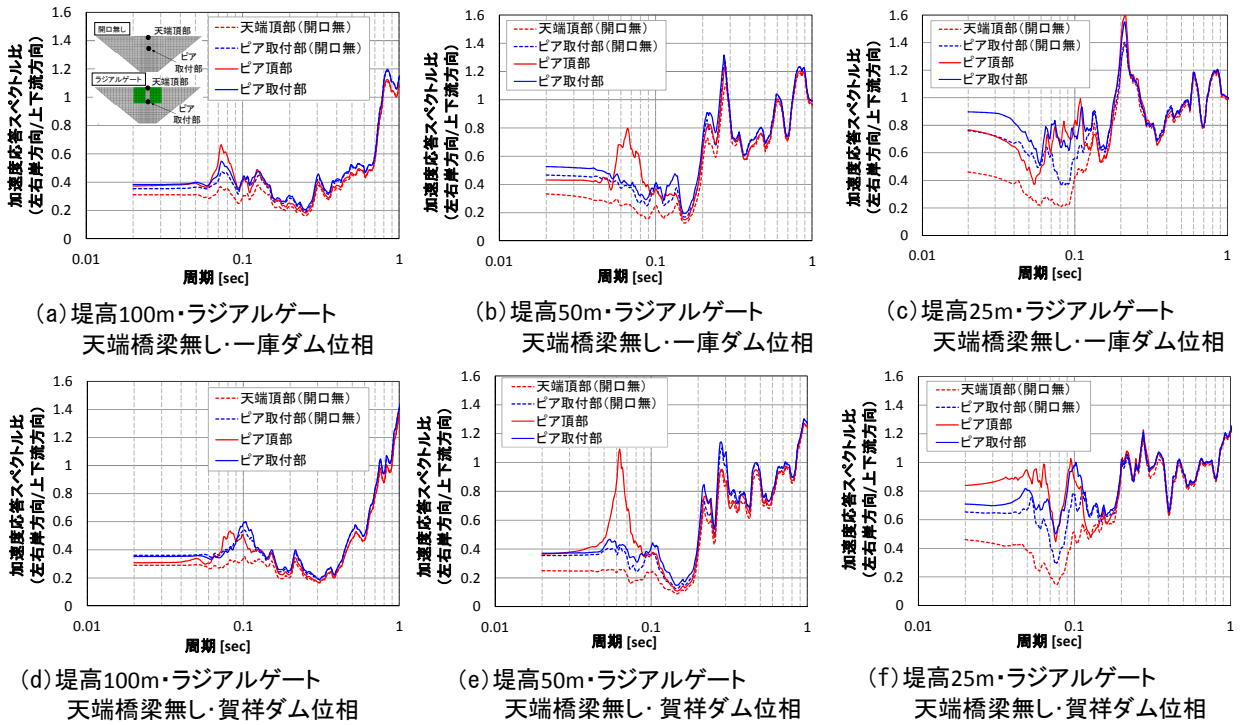


図 3.46 ラジアルゲート・堤体中央断面での加速度応答スペクトル比（左右岸方向／上下流方向）

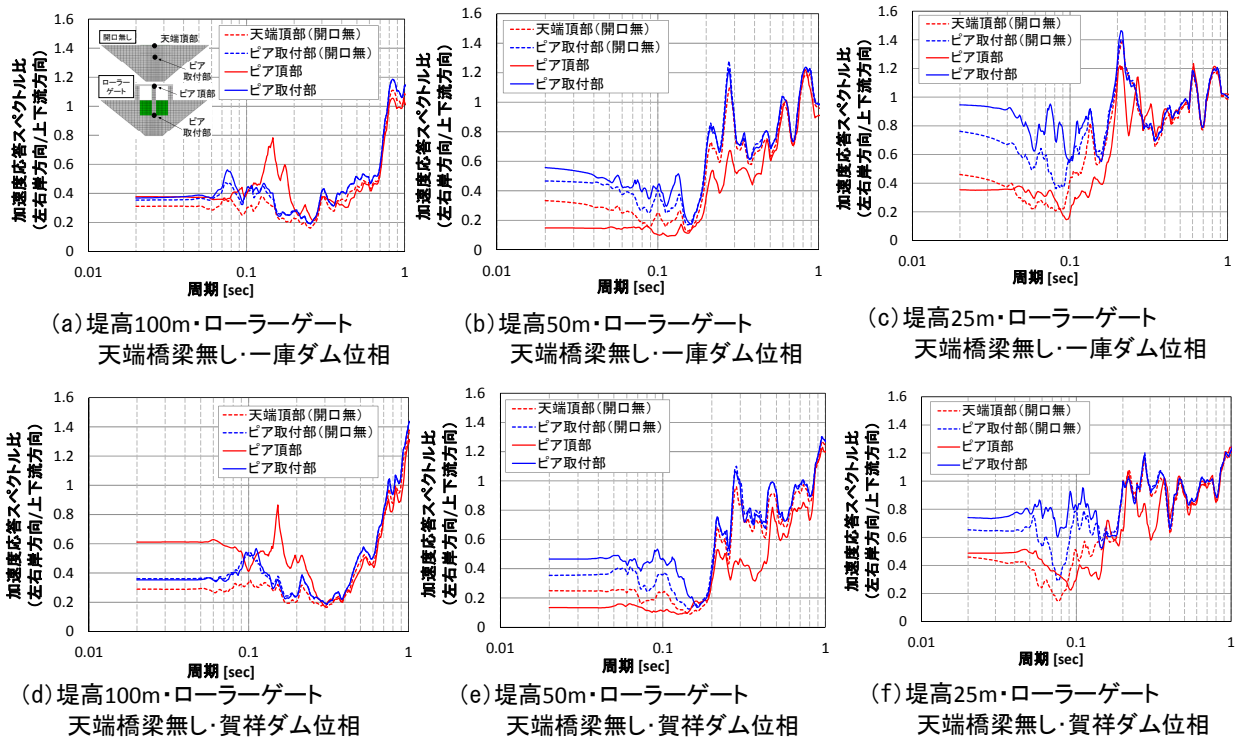


図 3.47 ローラーゲート・堤体中央断面での加速度応答スペクトル比（左右岸方向／上下流方向）

5.0Hz 以上)の応答スペクトル比は、堤高 100m ダムの値よりもかなり大きい。この周期は堤体の一次固有周期と近接しており、ピアの応答が堤体の応答で増幅されたことなどの影響が考えられる。

ローラーゲートモデルでのピア取付部の値についても同様で、堤高 100m ダムでは洪水吐開口部の無いモデルでの同じ箇所での値とは同程度であるが、天端での値よりは若干大きい。堤高 50m ダムと堤高 25m ダムでは洪水吐開口部の無いモデルでの同じ箇所での値より大きく、天端での値よりはかなり大きい。この傾向は、特に周期 0.15 秒より短周期側(周波数 6.7Hz 以上)で顕著となっている。そして、堤高 50m ダムと堤高 25m ダムでは、周期 0.2 秒以上(周波数 5.0Hz 以上)の応答スペクトル比は、堤高 100m ダムの値よりも

かなり大きい。

ピアの耐震性能評価に用いる加速度応答スペクトル比の出力は基本的にピア取付部となるが、堤体のモデル化において洪水吐開口部やピアを設けない場合には、加速度応答スペクトル比の分布やその大きさが大きく異なることが確認された。

(2) 堤高別、ゲート型式別での比較

中央ピア取付部での加速度応答スペクトル比について、前述結果を堤高別およびゲート形式別で再整理した。堤高別での結果を図 3.48 に、ゲート形式別での結果を図 3.49 に示す。

静的地震力を用いた洪水吐ピアの左右岸方向に対する耐震性能評価を実施する上では、前述図 2.6 に示したとおり、これらの加速度応答スペクトル比の図面に加えて、当該ピアの

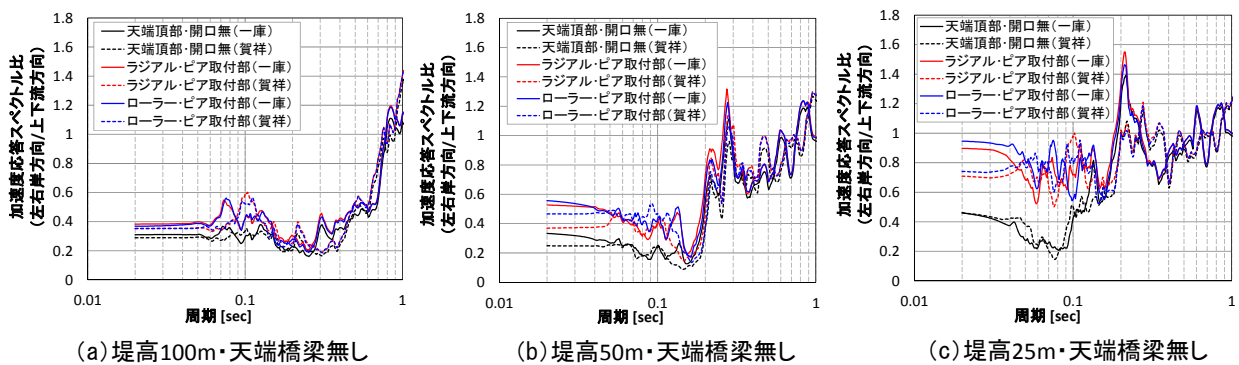


図 3.48 堤高別での中央断面加速度応答スペクトル比(左右岸方向/上下流方向)

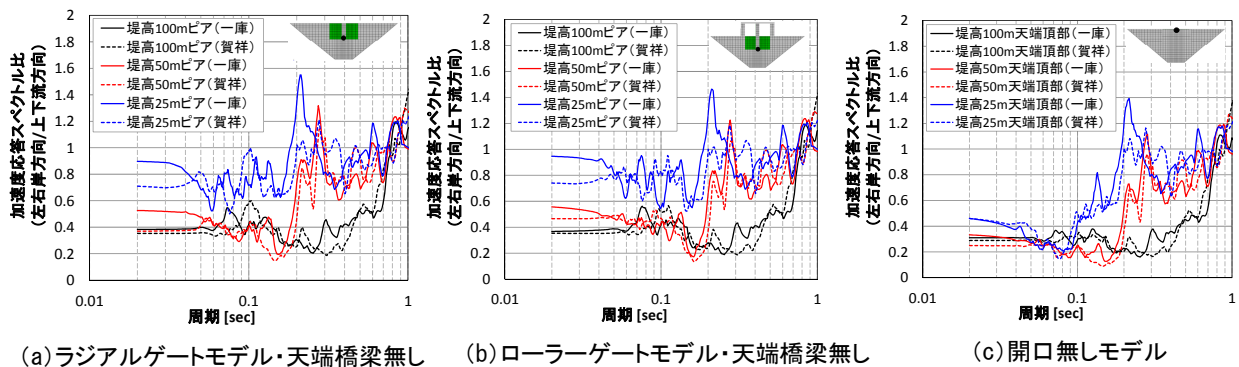


図 3.49 ゲート型式別での中央断面加速度応答スペクトル比(左右岸方向/上下流方向)

上下流方向に対する最大加速度応答値、当該ピアの上下流方向ならびに左右岸方向の固有振動数などが必要となる。このうち加速度応答スペクトル比については、今回の成果を反映することで、より精緻な評価が可能となる。なお、この方法の適用性検討結果や具体的な手順、実施例について別途報告する。

4. まとめ

ラジアルゲートとローラーゲートを有する堤高 100m と 50m、25m の重力式コンクリートダム洪水吐ゲートピアを対象として、ピア頂部および堤体天端橋梁およびピアの有無やその境界条件、入力地震動等を解析パラメータとした 3 次元線形時刻歴地震応答解析を実施した。解析結果から、洪水吐ピアの動的応答特性を把握するとともに、実構造に即し安全側に評価できる解析モデル、解析条件を示し、洪水吐ピアの左右岸方向に対する耐震性能照査で用いる実務的な静的地震力の設定方法を提示した。

(1) 解析パラメータの相違に係わらず、加速度応答や変位応答は堤体中央に位置するピアが卓越する。よって、耐震性能評価においては中央のピアに着目することが安全側評価となる。

(2) ラジアルゲートおよびローラーゲートピアの加速度応答および変位応答は、ゲート開口部の影響により、これを設けない解析モデルでの応答値よりも大きい。特にローラーゲートピア頂部での応答値は卓越する。

(3) 実態に即したピアの耐震性能評価を行う上で、ゲート形式に応じたピアの形状を解析モデルにおいて考慮する必要が示された。そして、ピア頂部橋梁および堤体天端橋梁については、安全側評価の観点から解析モデルとして考慮しなくてもよいことがわかった。

(4) 一般に、重力ダムは上下流方向 2 次元断面で解析が実施されるため、その解析ではピアの左右岸方向の耐震性能照査は実施できない。これに対処するため、上記成果を踏まえて、ダムの 2 次元解析に基づくピアの左右岸方向に対する地震力（静的慣性力）を設定するため手順を考案し、そこで用いる加速度応答スペクトル比（上下流方向に対する左右岸方向の加速度応答値の比）を提示した。従来、国土技術政策総合研究所から提示されていた限定条件のものに加えて、今回、堤高やピア形状等の影響を加味した実務的な加速度応答スペクトル比である。この提示により、堤高やゲート形式等の相違に応じて適切な加速度応答スペクトル比を選択することが可能となった。

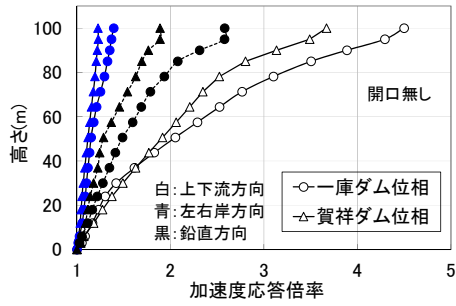
5. 今後の展開

提示した加速度応答スペクトル比を用いた、静的地震力による洪水吐ピアの左右岸方向に対する耐震性能評価法の適用性を確認し、評価法の手順と事例を整理する。さらに、既設の洪水吐ピアにおける地震観測記録の分析に基づき、評価法の妥当性を検証する。

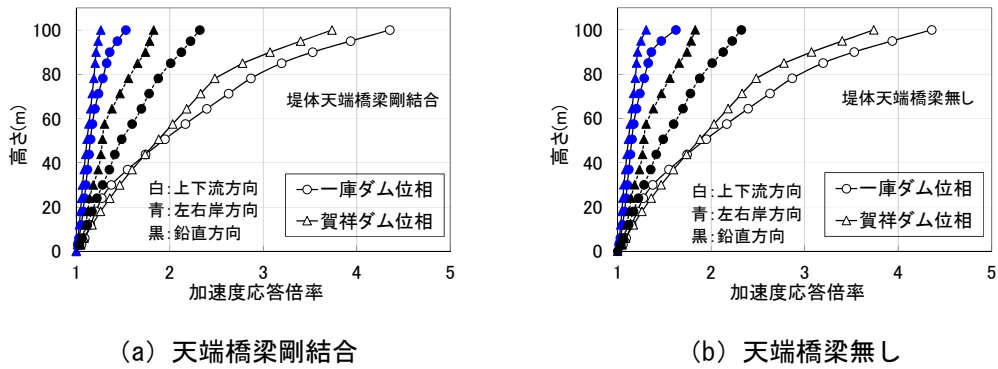
参考文献

- 1) 解説・河川管理施設等構造令：日本河川協会、1978.3
- 2) 日本河川協会：改訂新版 建設省河川砂防技術基準（案）同解説 設計編、1997.10
- 3) 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、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guide_line/bousai/daml2/、2005.3
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：

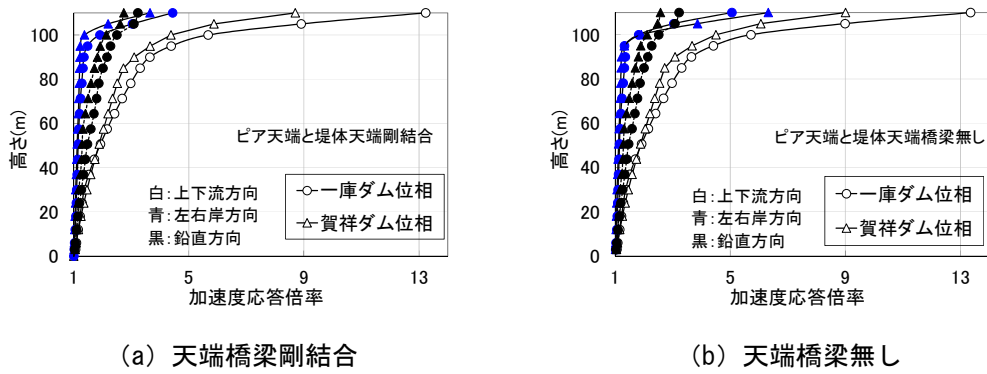
- 河川構造物の耐震性能照査指針・解説、
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guide/line/bousai/wf_environment/structure/index2.html、2012.2
- 5) 経済産業省原子力安全・保安院、電源開発、東電設計、ニュージェック：水力発電設備の耐震性能照査マニュアル、2012.2
 - 6) 黒瀬高秀、塩野知弘、久保田克寿：重力式コンクリートダムの大規模地震に対する耐震性能照査手法、電力土木 No.348、pp.23-27、2010.7
 - 7) 大熊信之、西内達雄、松田泰治：竣工後50年以上経過した大規模アーチダムの耐震性能照査、電力土木 No.352、pp.63-67、2011.3
 - 8) 西内達雄：有限要素解析を用いた重力式コンクリートダムの耐震性能照査マニュアル、電力中央研究所総合報告 N21、2014.1
 - 9) 三石真也：大規模地震に対するダム耐震性能照査について一照査方法と試行の概要一、第65回ダム施工技術講習会テキスト、日本ダム協会、2009.7
 - 10) 国総研資料 第244号 大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料、参考資料1 指針(案)・同解説の補足説明資料、1-9 コンクリートダム本体の照査における材料物性値の設定における留意点、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0244.htm>
 - 11) 熊崎幾太郎、澤井洋介：既設管理橋を活用したダム水門柱の耐震裕度向上工法の開発、電力土木 No.352、pp.10-19、2011.3
 - 12) 日比俊輔、山根雄一、内田諭：ダムピアの耐震補強工法の検討、電力土木 No.389、pp.27-31、2017.5
 - 13) 電力土木技術協会：水力技術百年史、1992.6
 - 14) 日本大ダム会議：Acceleration Records on Dams and Foundations No.2 (CD)、2002.4
 - 15) 日本大ダム会議：ダム設計基準(第2次改訂)、1978.8
 - 16) 塩尻弘雄：地震時のダムへの動水圧について、大ダム No.99、pp.71-85、1982.3
 - 17) 菊池宏吉：地質工学概論、土木工学社、1990.
 - 18) 塩尻弘雄、上田稔：ダムー岩盤ー貯水の連成を考慮した重力式ダムの三次元地震応答シミュレーション、土木学会論文集 No.640/I-50、pp.177-192、2000.1
 - 19) 塩尻弘雄、上田稔：ダムー岩盤ー貯水の連成を考慮した一庫重力式コンクリートダムの兵庫県南部地震応答シミュレーション解析、ダム工学 Vol.8、No.2、pp.85-92、1998.
 - 20) 西内達雄：静的地震力を用いた重力式コンクリートダムの耐震解析手法の適用性評価、電力中央研究所研究報告 N15009、2016.4
ダム技術センター：多目的ダムの建設第4巻(設計I編)、2005.6
 - 21) 松本徳久、大町達夫、安田成夫、山口嘉一、佐々木隆、倉橋宏：ダムで観測された強震記録の解析、大ダム、No.193、pp.88-94、2005.10



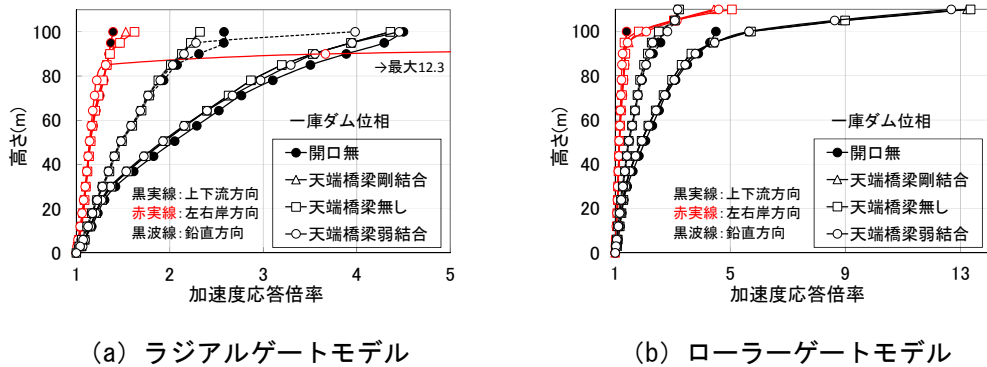
付録図1 堤高 100m・開口無しモデルでの中央断面加速度応答倍率



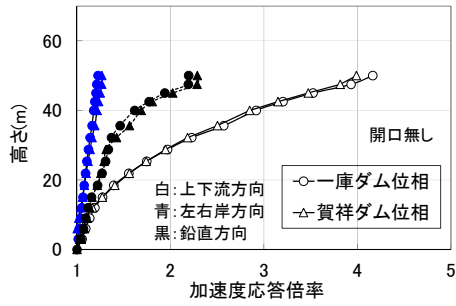
付録図2 堤高 100m・ラジアルゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率



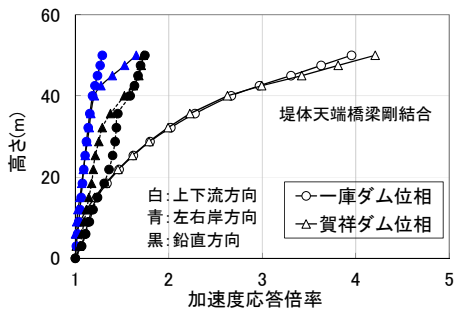
付録図3 堤高 100m・ローラーゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率



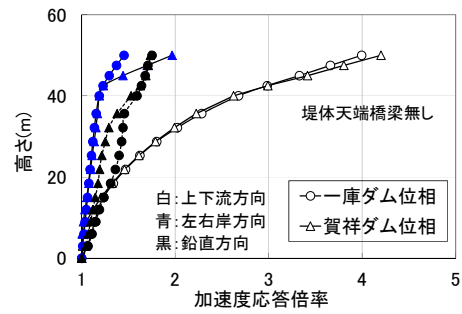
付録図4 堤高 100m モデルでの中央断面加速度応答倍率（一庫ダム位相）



付録図5 堤高 50m・開口無しモデルでの中央断面加速度応答倍率

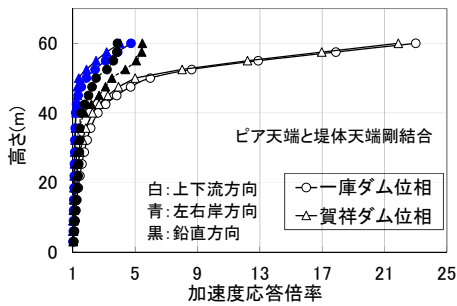


(a) 天端橋梁剛結合

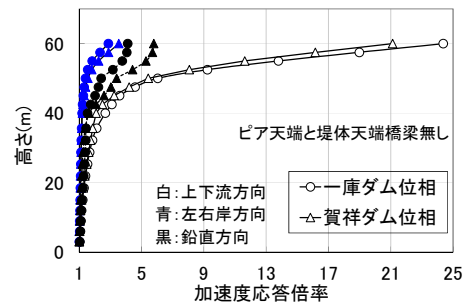


(b) 天端橋梁無し

付録図6 堤高 50m・ラジアルゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率

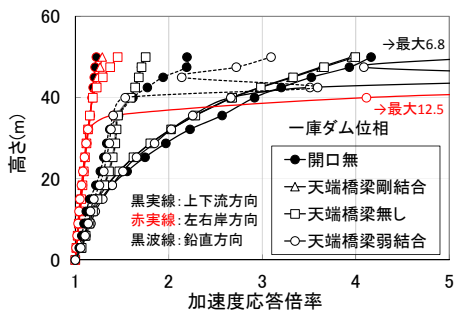


(a) 天端橋梁剛結合

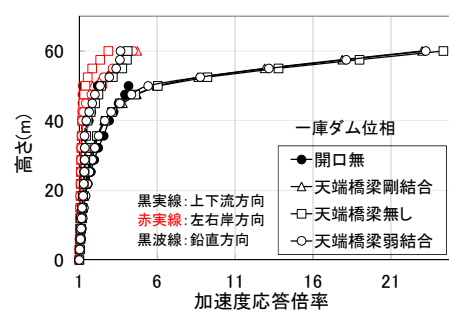


(b) 天端橋梁無し

付録図7 堤高 50m・ローラーゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率

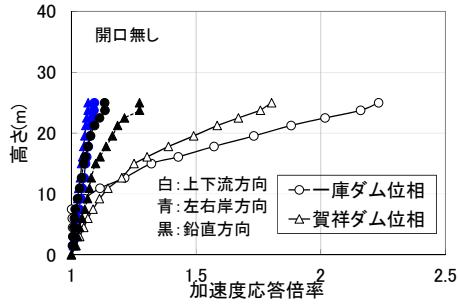


(a) ラジアルゲートモデル

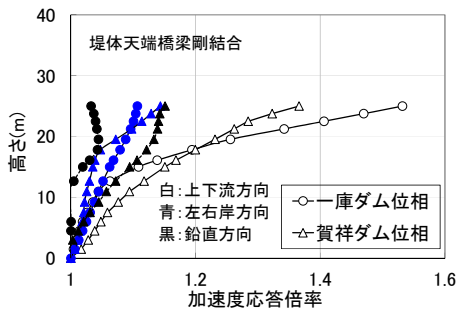


(b) ローラーゲートモデル

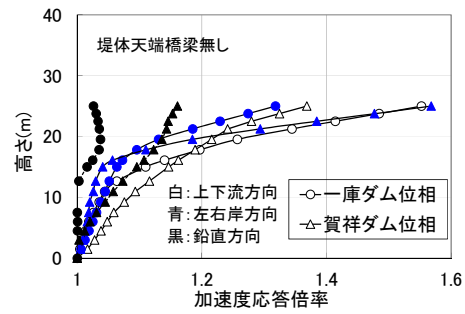
付録図8 堤高 50m モデルでの中央断面加速度応答倍率（一庫ダム位相）



付録図 9 堤高 25m・開口無しモデルでの中央断面加速度応答倍率

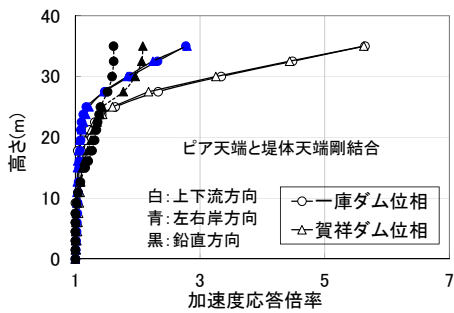


(a) 天端橋梁剛結合

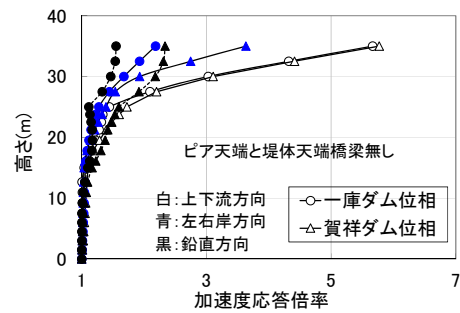


(b) 天端橋梁無し

付録図 10 堤高 25m・ラジアルゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率

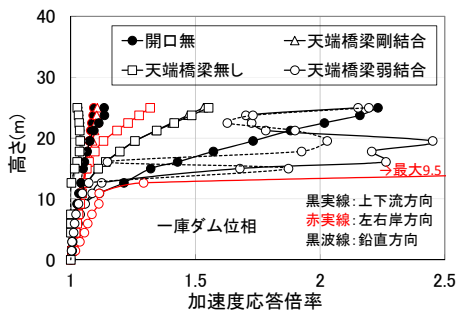


(a) 天端橋梁剛結合

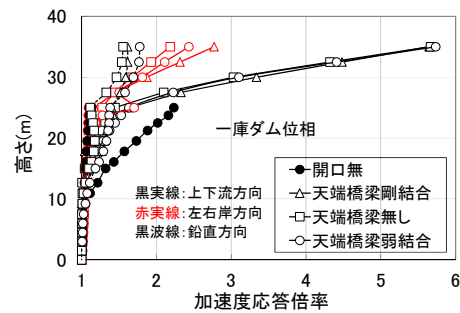


(b) 天端橋梁無し

付録図 11 堤高 25m・ローラーゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率

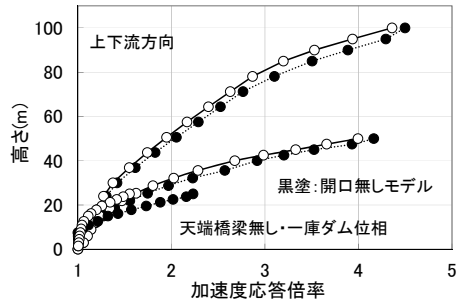


(a) ラジアルゲートモデル

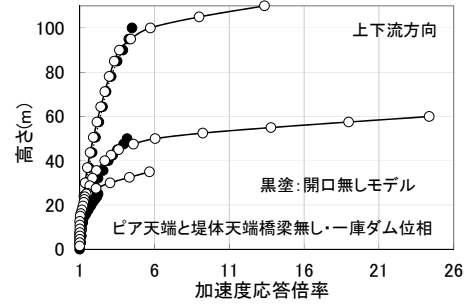


(b) ローラーゲートモデル

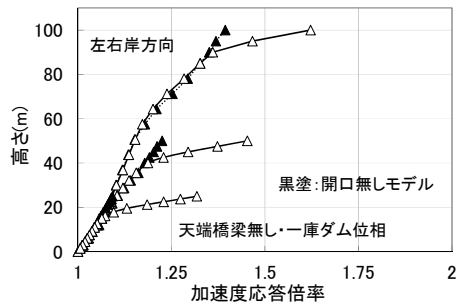
付録図 12 堤高 25m モデルでの中央断面加速度応答倍率 (一庫ダム位相)



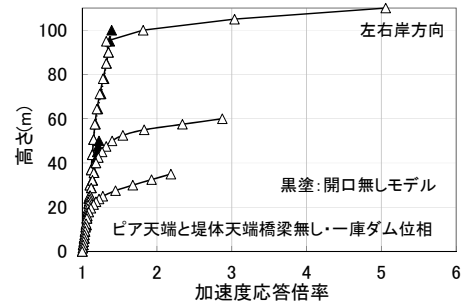
(a) 上下流方向応答



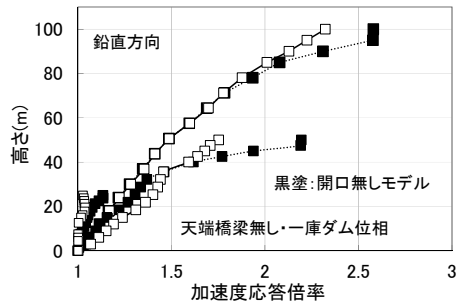
(a) 上下流方向応答



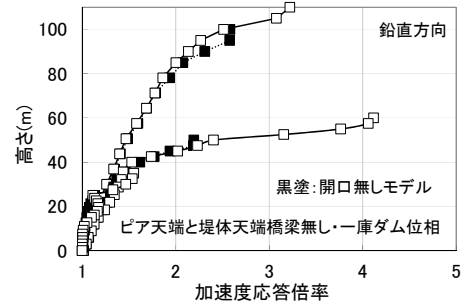
(b) 左右岸方向応答



(b) 左右岸方向応答



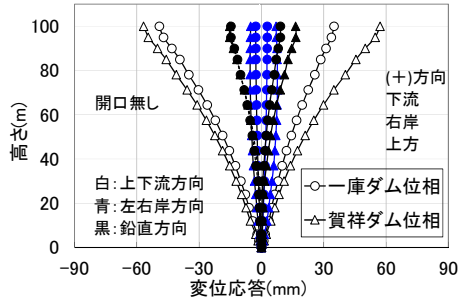
(c) 鉛直方向応答



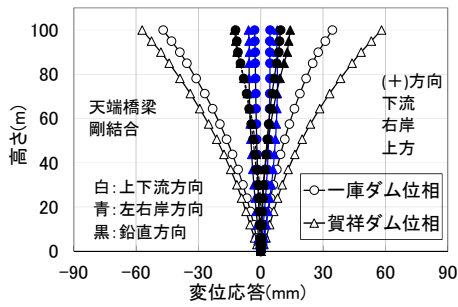
(c) 鉛直方向応答

付録図 13 全堤高・ラジアルゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率（一庫ダム位相）

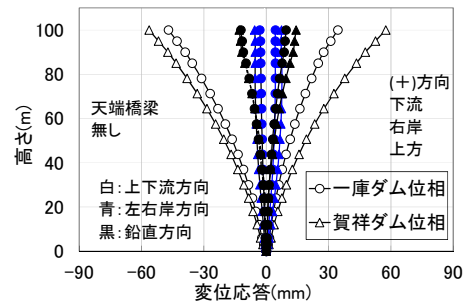
付録図 14 全堤高・ローラーゲートモデルでの中央断面加速度応答倍率（一庫ダム位相）



付録図 15 堤高 100m・開口無しモデルでの中央断面変位応答

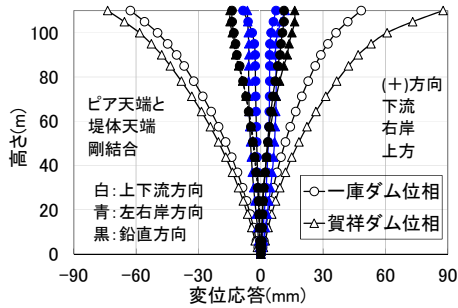


(a) 天端橋梁剛結合

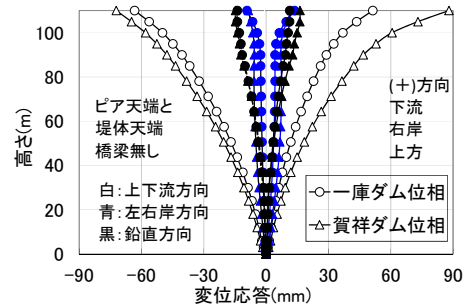


(b) 天端橋梁無し

付録図 16 堤高 100m・ラジアルゲートモデルでの中央断面変位応答

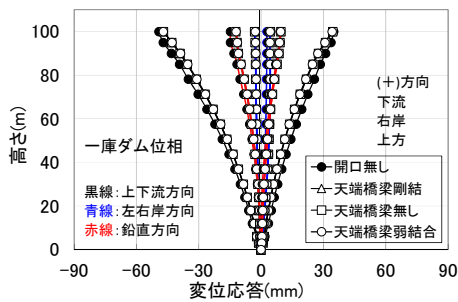


(a) 天端橋梁剛結合

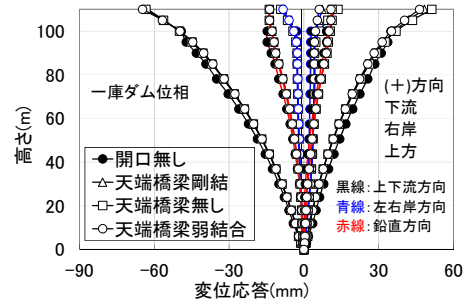


(b) 天端橋梁無し

付録図 17 堤高 100m・ローラーゲートモデルでの中央断面変位応答

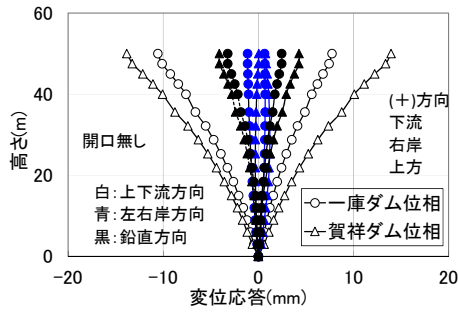


(a) ラジアルゲートモデル

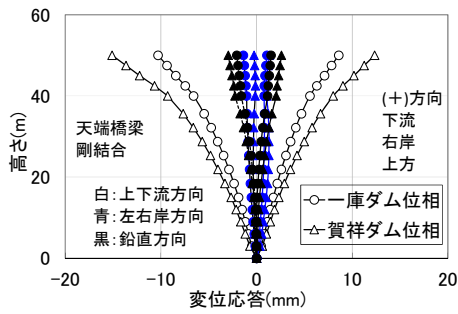


(b) ローラーゲートモデル

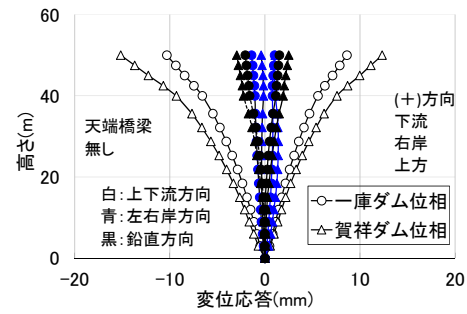
付録図 18 堤高 100mモデルでの中央断面変位応答（一庫ダム位相）



付録図 19 堤高 50m・開口無しモデルでの中央断面変位応答

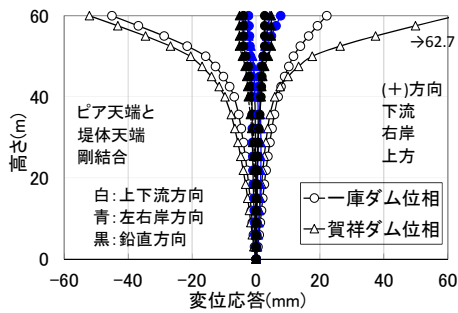


(a) 天端橋梁剛結合

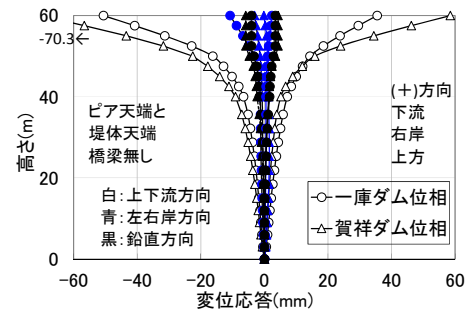


(b) 天端橋梁無し

付録図 20 堤高 50m・ラジアルゲートモデルでの中央断面変位応答

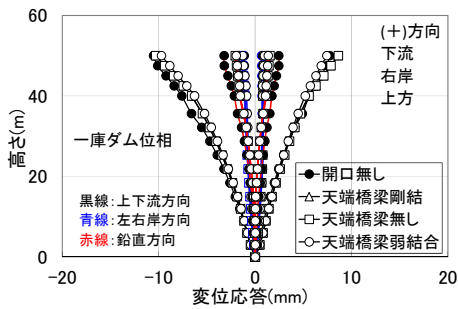


(a) 天端橋梁剛結合

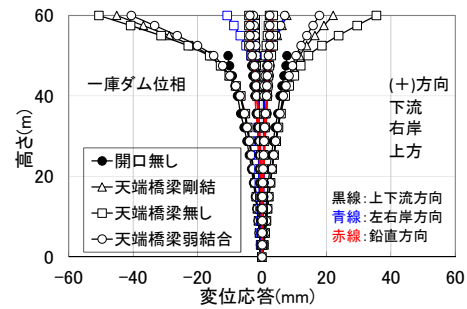


(b) 天端橋梁無し

付録図 21 堤高 50m・ローラーゲートモデルでの中央断面変位応答

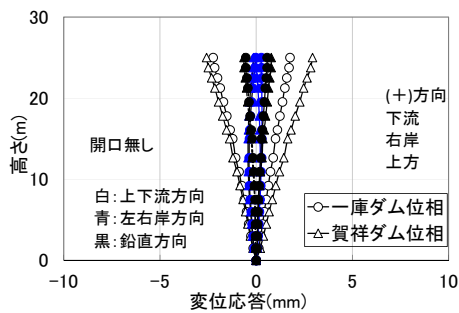


(a) ラジアルゲートモデル

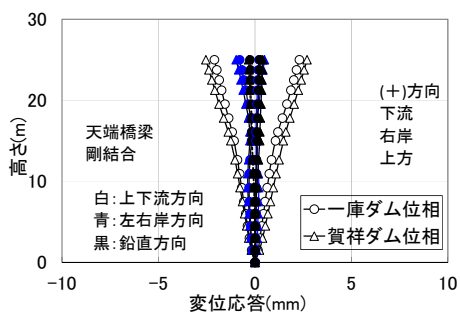


(b) ローラーゲートモデル

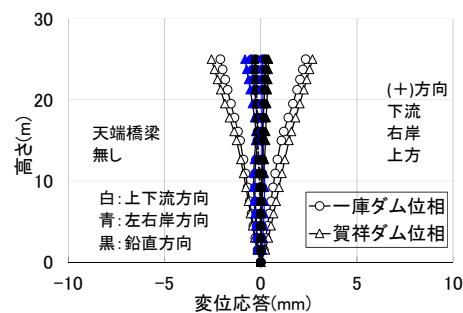
付録図 22 堤高 50m モデルでの中央断面変位応答 (一庫ダム位相)



付録図 23 堤高 25m・開口無しモデルでの中央断面変位応答

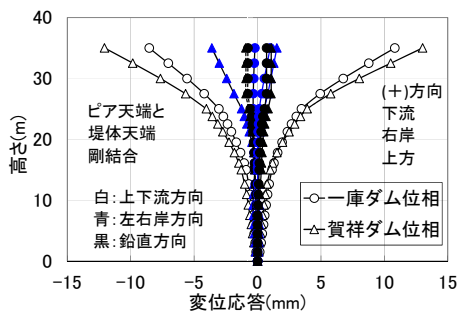


(a) 天端橋梁剛結合

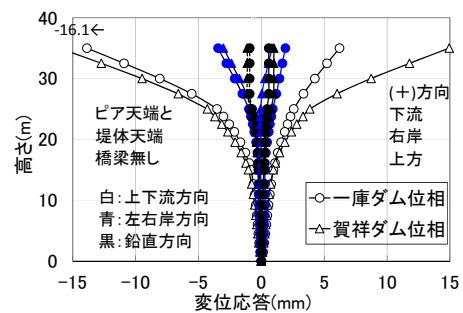


(b) 天端橋梁無し

付録図 24 堤高 25m・ラジアルゲートモデルでの中央断面変位応答

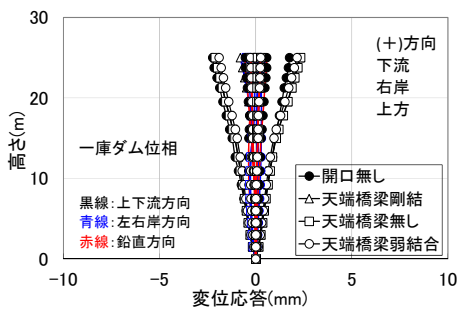


(a) 天端橋梁剛結合

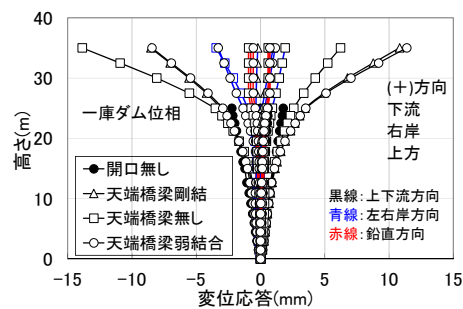


(b) 天端橋梁無し

付録図 25 堤高 25m・ローラーゲートモデルでの中央断面変位応答

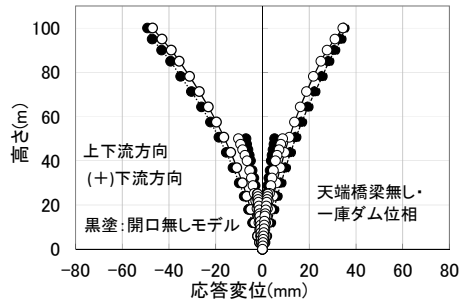


(a) ラジアルゲートモデル

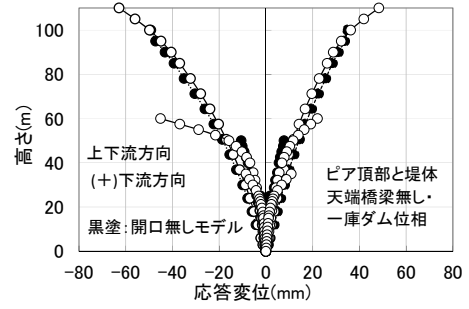


(b) ローラーゲートモデル

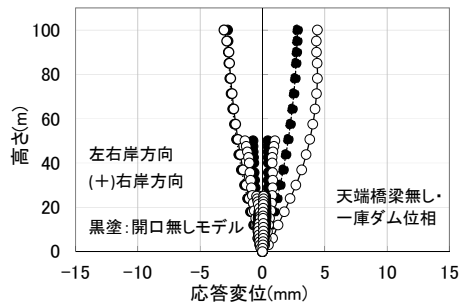
付録図 26 堤高 25m モデルでの中央断面変位応答（一庫ダム位相）



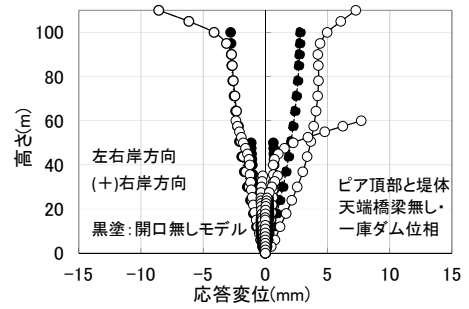
(a) 上下流方向応答



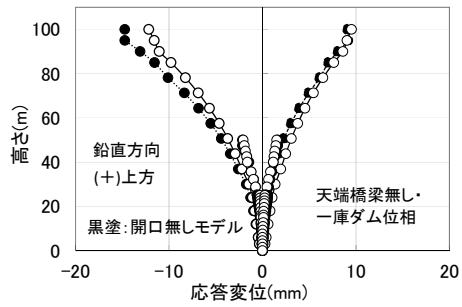
(a) 上下流方向応答



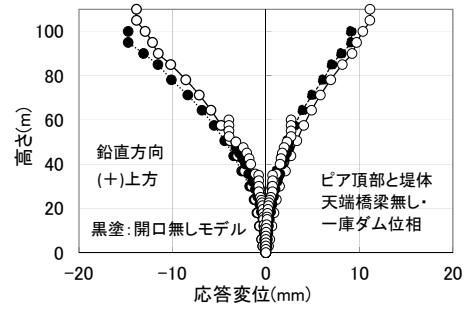
(b) 左右岸方向応答



(b) 左右岸方向応答



(c) 鉛直方向応答



(c) 鉛直方向応答

付録図 27 全堤高・ラジアルゲートモデルでの中央断面変位応答（一庫ダム位相）

付録図 28 全堤高・ローラーゲートモデルでの中央断面変位応答（一庫ダム位相）



CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

電力中央研究所報告

[不許複製]

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
地球工学研究所長
千葉県我孫子市我孫子1646
e-mail cerl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行・著作・公開 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1

ISBN978-4-7983-1699-4

