

T字型ピアと逆L字型ピアにより構成された洪水吐の 強震時挙動に関する三次元的解析

3-D dynamic analysis for earthquake behavior of concrete spillway composed of
T-shape piers and reverse L-shape piers against strong motions

有賀義明*

Yoshiaki Ariga

*博(工), 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

Relative displacement between piers is one of the main causes of earthquake damage of spillway which is composed of concrete piers with different shapes and different dynamic properties. In order to evaluate seismic safety of spillway, it is necessary to estimate the relative displacement accurately. In this study, I have made 3-D dynamic analyses regarding earthquake behavior of existing spillway against strong earthquake motions, and made clear the mechanism of earthquake damage of concrete spillway. As a result, it is considered that the dynamic behaviors of piers are largely affected by the shapes, the dynamic response properties, and the frequency characteristics of motions. The seismic measure by connecting the piers with the reinforcement materials is effective to reduce the relative displacements.

Key Words: spillway, 3-D analysis, earthquake damage, relative displacement, measures

キーワード: 洪水吐, 三次元的解析, 地震被害, 相対変位, 耐震対策

1. はじめに

洪水吐は、ダム放流機能を担う施設であり、ダム本体と同様に、地震による機能の喪失が許容されない構造物に分類される。従来、洪水吐の耐震設計は震度法に基づいて行われており、洪水吐を構成するピアやスラブ等の地震時挙動は考慮されていないのが通例である。震度法は、マッシュで剛性の高い構造物を対象とした設計法であるため、様々な構造体によって複合的に構成されている構造物の複雑な地震時挙動を震度法で精度良く評価することは基本的に難しい。1995年兵庫県南部地震以降、動的解析による構造物の耐震性能照査技術が進歩¹⁾、ダム本体に関しては、三次元的解析による耐震性能照査が数多く実施されるようになってきているが、洪水吐施設に関しては、ダム本体と同程度の耐震性能が要求されるにもかかわらず、三次元的解析による耐震性能評価は未だあまり行われていないのが実情である。

このような背景から、三次元的解析による耐震性能照査法の確立を目的として、屈足ダム洪水吐を研究対象に非常に強い地震動を想定した場合の三次元的解析を行った。そして、三次元的解析結果に基づいて、T字型ピアと逆L字型ピアによって構成されたコンクリート洪水吐の強震時の変位挙動について考察した。

2. 研究の経緯

1993年釧路沖地震の際に屈足ダム洪水吐ではゲート巻上げ機に地震被害が発生した。この地震を機に洪水吐に地震計を設置したところ、翌年の1994年北海道東方沖地震の際にダム底部で最大81.69gal、洪水吐ピア頂部で最大709.52galの地震動が観測された。屈足ダム洪水吐は、T字型ピアと逆L字型ピアによって構成されており、地震時の変位挙動が複雑になる形状となっている。これまで、二次元的解析による耐震性評価、1994年北海道東方沖地震の際の実地震時挙動の三次元再現解析²⁾を実施して来たが、ここでは、これまでの研究を踏まえ³⁾、ダム底部で最大加速度250galの強震動を仮定した場合の強震時の変位挙動に主眼を置いて、洪水吐のコンクリートピアの地震時変形挙動に及ぼす強震動の影響、相対変位を解消するためにコンクリートピアの頂部を補強部材で連結した場合の連結効果および強震時の引張応力の発生状況について三次元的解析により検討した。

3. 既設洪水吐の地震被害

洪水吐施設は、ピア、導流壁、ゲート扉体、ゲート巻上げ機、収納建屋、スラブ、連絡橋等、様々な部材や構

造体によって複合的に構成されている。そのため、強震動が作用した場合には、個々の部材や構造体が個別に複雑な地震時応答を示し、それによって地震被害が発生する可能性があると考えられる。洪水吐施設の過去の地震被害事例を調べてみると、1999年台湾集集地震(M7.6)では、ダム底部に出現した約7.5mの地表断層変位によって石岡ダム(堤高25m,重力式)および洪水吐と一緒に破壊した⁴⁾。地震の揺れによる地震被害事例としては、1990年ルソン島地震(M7.8)の際にAmbuklaoダム(堤高129m,ロックフィル)の洪水吐でゲートが損傷を受けた⁵⁾。1993年釧路沖地震の際には、屈足ダム(堤高27.5m,ロックフィル)の洪水吐でコンクリートピア頂部に設置されていたゲート巻上げ機の固定ボルトが破断し、ゲート巻上げ機のシャフトが変形を起こした⁶⁾。2000年鳥取県西部地震(M7.3)では、賀祥ダム(堤高46.6m,重力式)の下部で最大531galの地震動が観測され、ダム天端に設置されていた補助ゲート操作室のコンクリート基礎と壁面にクラックが発生した⁷⁾。2003年宮城県沖地震(M7.0)では、日向ダム(堤高56.6m,重力式)の天端に設置されていたコンクリートピアにクラックが発生した⁸⁾。2004年新潟県中越地震(M6.8)では、只見ダム(堤高30m,ロックフィル)の洪水吐でコンクリートピアの頂部でクラックが発生した⁹⁾。これらの地震被害事例を集約すると¹⁰⁾⁻¹³⁾、洪水吐の地震時損傷は、地震時応力によるものと地震時相対変位によるものに大別され、前者は、コンクリート部の亀裂・剥離・剥落、ゲート室の基礎や壁面の亀裂、後者は、ゲート巻上げ機の固定ボルトの破断、巻上げ機シャフトの変形、ゲート扉体の変形、ゲート支承部の損傷等に類型化することが可能であると考えられる。

4. 1993年釧路沖地震での屈足ダム洪水吐の地震時損傷

4.1 屈足ダム洪水吐

屈足ダムは、1987年に竣工した、堤高27.5m、堤頂長220.1mのロックフィルダムである。ダムおよび洪水吐の形状を図-1に示す。洪水吐は、ダム左岸に設置されており、4本のピアによって構成されている。ピアの頂部にはゲート巻上げ機が配置されており、ピアと導流壁は鉄筋コンクリート製であり、4本のピアの間には3門の鋼製ローラゲート(高さ13.5m,幅12.7m)が設置されている。ダム周辺には段丘地形が発達しており、ダム地点の地質は、未固結の砂層が水平に分布しており、その下位に、半固結の熔結凝灰岩、新第三紀の未固結の砂礫層等が分布している。

4.2 洪水吐での地震時損傷

1993年釧路沖地震(1/15, M7.8)の際に震央から約120km離れた屈足ダムでは、コンクリートピアの頂部に設置されていたゲート巻上げ機の固定用ボルトが破損し、

ゲート巻上げ機の駆動シャフトに変形が生じた。図-2に示したように、ゲート巻上げ機は、ピアの頂部に設置されており、3門のローラゲートに対応するように左右1対の駆動装置で構成され、それらは駆動シャフトによって連結されている。駆動シャフトは、ゲートを巻き上げるために必要な回転を伝達するためのものであり、材料は鋼、断面形状は円形の棒状である。1999年釧路沖地震の際に、ゲート巻上げ機が駆動シャフトに引っ張られた結果として巻上げ機の固定用ボルトが破断した。固定ボルトの破断は、1号ピアおよび3号ピアの巻上げ機で発生した。また、駆動シャフトが圧縮された結果として駆動シャフトにダム軸方向の圧縮変形が発生した。

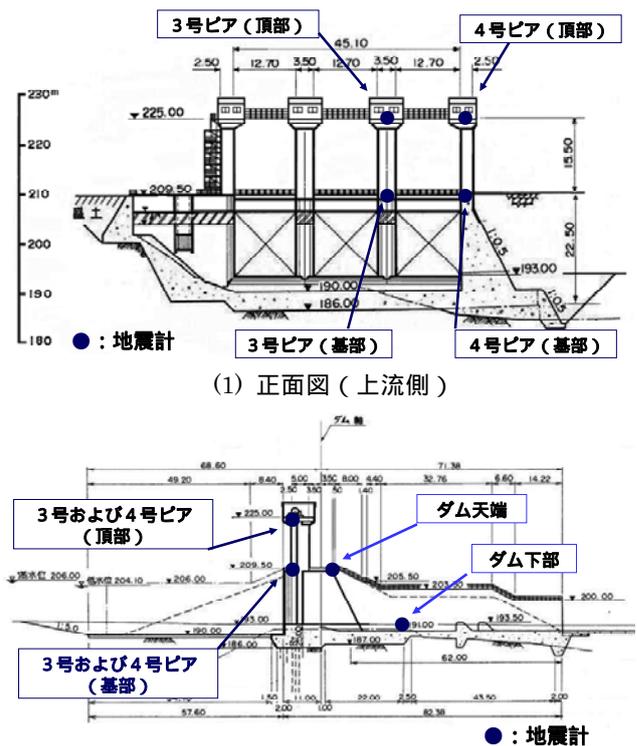


図-1 屈足ダム洪水吐の形状と地震計配置

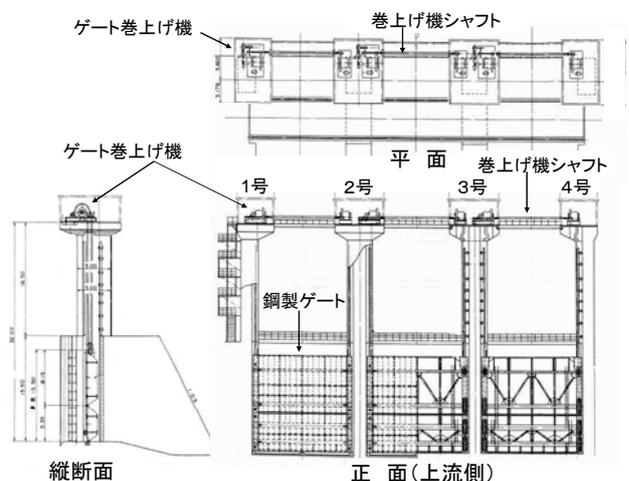


図-2 ゲート巻上げ機の設置位置

5 . 1994 年北海道東方沖地震での地震時挙動の再現解析による動的変形特性の同定

5.1 北海道東方沖地震での地震観測記録

1993 年に釧路沖地震が発生した時点では屈足ダム洪水吐には未だ地震計を設置していなかったが、この地震を機に図 - 1 に示したように、ダム天端(3 成分)、ダム底部(漏水測定室内、3 成分)、3 号ピア頂部(2 成分)、3 号ピア下部(1 成分)、4 号ピア頂部(2 成分)、4 号ピア下部(1 成分)、計 6 箇所 に 12 成分の地震計を設置した。その翌年、1994 年北海道東方沖地震(10/4, M8.1)が発生し、ダム地点(震央距離 388km)において、ダム下部(漏水測定室)で最大 81.69gal、ダム天端で最大 122.29gal、ピア基部で最大 177.65gal、ピア頂部で最大 709.52gal の地震動が記録された。観測された地震動の最大加速度および卓越周波数を表 - 1 に示す。

表 - 1 1994 年北海道東方沖地震の際に屈足ダム洪水吐で観測された地震観測記録の概要

位置		振動方向	最大加速度 (gal)	卓越周波数 (Hz)
ダム天端		上下流	122.29	1.22
		ダム軸	115.78	1.86
		鉛直	80.82	2.06
ダム底部 漏水測定室		上下流	81.69	1.22
		ダム軸	64.31	1.86
		鉛直	55.96	2.05
3号ピア	頂部	上下流	187.29	4.63
		ダム軸	333.83	1.87
	下部	ダム軸	177.65	1.88
4号ピア	頂部	上下流	243.96	4.24
		ダム軸	709.52	1.64
	下部	ダム軸	128.06	2.28

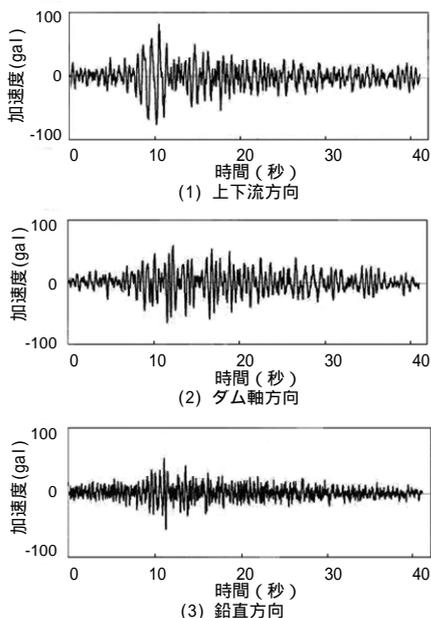


図 - 3 屈足ダム底部で観測された加速度時刻歴

各観測点で記録された地震動の最大加速度とフーリエスペクトルから求めた卓越周波数を表 - 1 に示す。観測された地震動の代表例として、ダム底部(漏水測定室)で観測された加速度時刻歴を図 - 3 に示す。観測された地震動の卓越周波数は、ダム堤体の上下流方向では 1.22Hz、ダム軸方向で 1.86Hz であった。3 号ピア頂部の上下流方向では 4.63Hz、ダム軸方向では 1.87Hz、4 号ピア頂部の上下流方向では 4.24Hz、ダム軸方向では 1.64Hz であった。ダム堤体は上下流方向に揺れやすく、洪水吐ピアはダム軸方向に揺れやすいこと、4 号ピアは 3 号ピアよりやや低い周波数で揺れたと考えられる。

5.2 三次元解析モデル

実現象に即した動的解析を行うためには、地震観測で記録された地震動を用いて解析を行い、実際の地震時挙動が再現されるように動的変形特性を同定しておくことが必要である¹⁴⁾。このような必要性から、図 - 4 に示した三次元解析モデル(以下、現状モデルと記す)を用いて屈足ダム洪水吐の実地震時挙動の再現解析を行った。ゲート扉体は、図 - 2 に示したようにコンクリートピアの間に位置しているが、扉体は上下に昇降されるものであるため、扉体の昇降が円滑できるように、扉体のダム軸方向の側面とコンクリートピアの間は接触しないように所定の隙間が設けられている。コンクリートピアとゲート扉体は構造的に分離されているため地震時の相互の影響は小さいと仮定し、解析モデルは、ゲート扉体は省略してモデル化した。貯水については、ゲートと共にモデル化して解析するのが望ましいが、貯水は洪水吐の地震時応答を抑制する方向に影響すると考えられること、洪水吐に関しては上下流方向の揺れよりもダム軸方向の揺れが卓越すると考えられ、ダム軸方向の揺れに対する貯水の影響は小さいと考えられることから、貯水は省略してモデル化した。ピアの頂部に設置されたゲート巻上げ機、収納建屋、連絡橋等は、単位体積重量に換算してソリッド要素でモデル化した。解析モデルの側方は粘性境界、下方は剛基盤を設定した。洪水吐周辺のフィルダム部と地盤部は、洪水吐の左右 20m 区間をモデル化した。

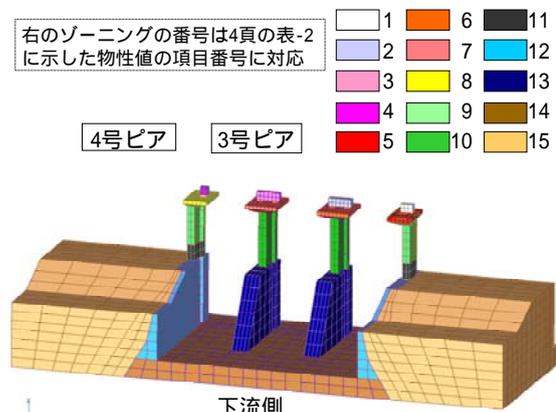


図 - 4 三次元動的解析モデル(現状モデル)

5.3 三次元再現解析の方法

実地震時挙動の再現解析は、これまでに実用化開発した、ダム - 基礎地盤 - 貯水池連成系の三次元的解析法 UNIVERSE¹⁵⁾ を用いた。本解析法は、直接積分法により時間領域で解析を行い、ダムや基礎岩盤の動的変形特性の非線形性やジョイントの非連続的挙動等の考慮した非線形解析機能を備えたものである。1994年北海道東方沖地震の後の現場での目視点検でコンクリートピアでのヘアクラック等の発生が全く認められなかったことから、屈足ダム洪水吐の再現解析は、線形解析で行った。

正確な再現解析を行うためには、各地震観測点で記録された地震動の周波数範囲を統一しておくことが必要であるため、再現解析では全観測波について5Hz以上の周波数成分をカットした後に使用した。入力地震動は、図-3に示した、ダム底部で観測された地震動下方基盤から3成分同時入力として解析を行った。

5.4 再現解析で同定した動的物性値

地震観測結果と再現解析結果が一致するように動的せん断剛性と減衰定数を同定した結果を表-2に示す。再現解析では、地震観測記録が得られている、3号ピア頂部と下部、4号ピア頂部と下部に着目し、各地震観測点のスペクトルが地震観測結果と再現解析結果で一致するように動的せん断剛性を同定し、加速度時刻歴が地震観測結果と再現解析結果で一致するように減衰定数の値を同定した。地震観測結果と再現解析結果の比較の代表例として、4号ピア下部のダム軸方向の加速度時刻歴とスペクトルに関する比較結果を図-5に示す。

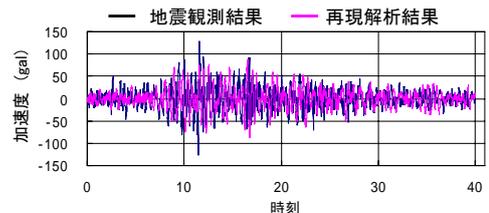
表-2 再現解析で設定した動的物性値
(表中のNo.は図-4の区分番号に対応)

項 目	動的 せん断剛性 N/mm ²	単位体積重量 kN/m ³	動ポア ソン比	減衰 定数
1 1号巻上機	20830	34.9	0.20	0.02
2,3 2・3号巻上機	20830	29.6	0.20	0.02
4 4号巻上機	20830	36.9	0.20	0.02
5-8 巻上機床盤	9370	23.5	0.20	0.02
9 1,4号ピア	9370	23.5	0.20	0.04
10 2,3号ピア	9370	23.5	0.20	0.04
11 1,4ピア基部	9370	23.5	0.20	0.03
12 1,4導流壁	9370	23.5	0.20	0.03
13 2,3導流壁	9370	23.5	0.20	0.03
14 洪水吐基礎	9370	23.5	0.20	0.02
15 7号ダム部	500	16.7	0.30	0.08

6. 三次元的解析による屈足ダム洪水吐の強震時挙動の検討

6.1 検討目的

屈足ダム洪水吐は、図-1に示したように、4本のコンクリートピアによって構成されており、両サイドの1号ピアと4号ピアは逆L字型の形状をしており、ピアの厚さが比較的薄い。中間に位置する2号ピアと3号ピアは



(1) 4号ピア下部の加速度時刻歴の比較(ダム軸方向)

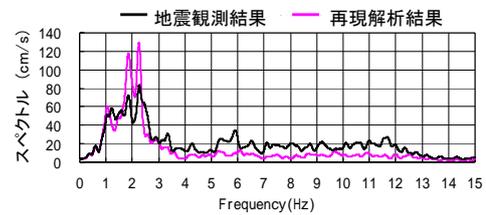


図-5 4号ピア下部の加速度時刻歴とスペクトルに関する地震観測結果と再現解析結果の比較

T字型の形状をしており、ピアの厚さが両サイドのピアよりも厚い。そのため、両サイドの逆L字型ピアと中間のT字型ピアとでは、地震時の変位応答が異なるようになる。また、T字型ピアは、基本的に左右対称に揺れるが、逆L字型ピアは、基本的に偏心して揺れるため、変位応答の位相が異なることになる。その結果、ピア頂部では相対変位が発生し、この相対変位がピア頂部に設置されたゲート巻上げ機等に関する損傷の原因になるものと考えられる。また、地震動の周期特性によってもピアの地震時挙動が変わってくるものと考えられる。地震動が短周期型か長周期型かによってピアの変位挙動が変化すると想定される。そこで、ピアの形状の違いによる地震時挙動の相違、地震動の違いによる地震時挙動の相違を明らかにするために三次元的解析を行った。

6.2 解析モデルと解析法

北海道東方沖地震に関する再現解析で同定した現状モデル(図-4)と動的物性値(表-2)を用いて三次元的解析を実施した。解析プログラムは、三次元的解析法 UNIVERSE を用いた。

6.3 想定した強震動

入力地震動については、強震動の違いによる地震時挙動の相違を検討するために、1994年北海道東方沖地震の際に屈足ダムで観測された地震動(以下「屈足波」と記す)と1995年兵庫県南部地震の際に一庫ダムで観測された地震動¹⁶⁾(以下「一庫波」と記す)の2種類を用いた。ここでは、表-3に示したように、屈足波、一庫波ともに、上下流方向の地震動の最大加速度が250galになるように、屈足波では原波形の振幅を3.06倍し、一庫波では1.34倍して、下方基盤から3成分同時入力して解析を行った。一庫ダムで記録された一庫波の原波形は図-6に示すとおりである。

表 - 3 地震動特性の影響を検討するための入力波

名称	観測された地震	最大加速度 原波形/本解析
	観測位置	
屈足波	1994年北海道東方沖地震	原波形：81.69gal
	ダム底部(漏水測定室)	本解析：250gal
一庫波	1995年兵庫県南部地震	原波形：186gal
	ダム底部(定設通廊)	本解析：250gal

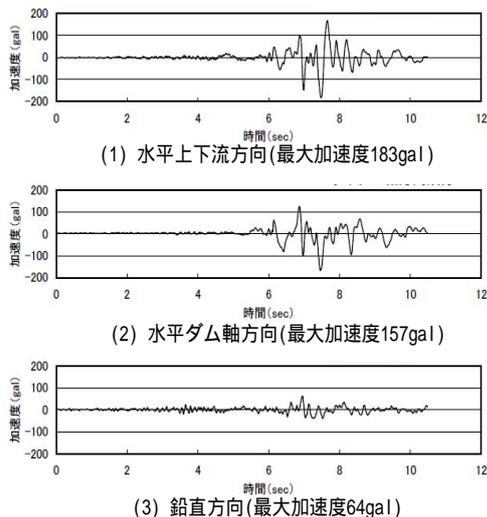


図 - 6 1995年兵庫県南部地震の際に一庫ダムで観測された一庫波(原波形 Amax183gal)

6.4 強震動に対する変位挙動の解析結果

入力地震動に一庫波と屈足波を用いた場合の強震時の変位挙動の比較結果を図 - 7 に示す。図 - 7 は、3号ピア頂部と4号ピア頂部の間の相対変位が最大値を示した時刻での変位状況を示しており、図 - 7 (1)の一庫波では7.72秒、図 - 7 (2)の屈足波では10.28秒の時刻での変位状況を示している。図 - 7 (1)に示した一庫波 250gal 入力時の場合は、両サイドの薄い逆L字型ピアの方が中間の厚いT字型ピアよりも大きく変位しているのに対して、図 - 7 (2)に示した屈足波 250gal 入力の場合は、逆に、両サイドの薄い逆L字型ピアよりも中間の厚いT字型ピアの方が大きく変位していることが理解できる。

北海道東方沖地震の再現解析においてコンクリートピアの下部に対する頂部の伝達関数から評価した、4号ピア(薄い逆L字型ピア)のダム軸方向の一次固有振動は1.64Hz、3号ピア(厚いT字型ピア)のダム軸方向の一次固有振動数は2.22Hzであった。また、最大加速度を250galに調整した場合の屈足波(ダム底部)と一庫波(ダム底部通廊)の周波数特性は図 - 8 に示したとおりである。ダム軸方向の地震動に着目した場合、屈足波(ダム底部)の卓越周波数は1~2Hzの狭い範囲に集中しているが、一庫波(ダム底部通廊)の卓越周波数は1~6Hzの範囲に分散している。強震動に対する変位挙動に主眼を置いた動的解析の結果から、形状が異なるピアの変位挙動が強震動の周波数特性によって大きな影響を受けることを確

認することができた。一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の全時刻を通じてのピア頂部の最大変位量を表 - 4 に、ピア頂部の間の最大相対変位量を表 - 5 に示す。ピア単体のダム軸方向の最大変位は、一庫波 250gal 入力時は1号ピアで5.59cm、屈足波 250gal 入力時では3号ピアで11.28cmとなった。ダム軸方向の最大相対変位は、一庫波 250gal 入力時は3号と4号ピアの間で6.92cm、屈足波 250gal 入力時では17.97cmとなった。同じ最大加速度 250gal を仮定した場合でも強震動によって相対変位が著しく変化することが分かる。

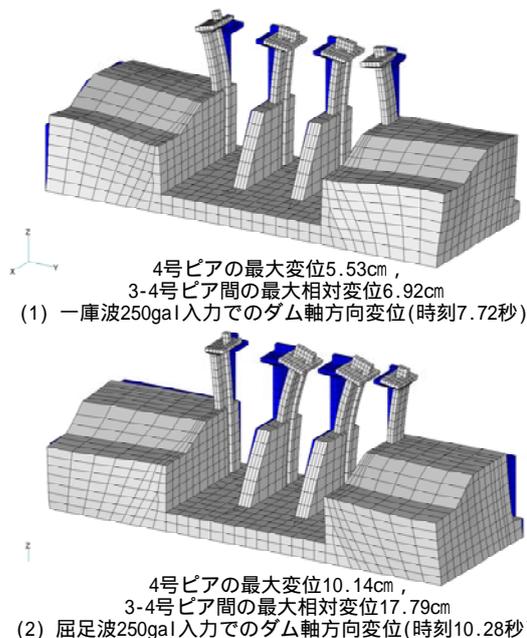


図 - 7 強震動の違いによる地震時変位挙動の比較

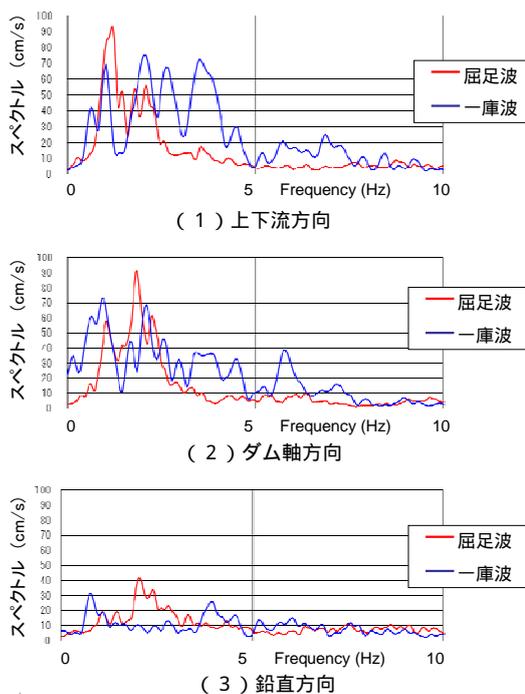


図 - 8 屈足波と一庫波のスペクトルの比較

表 - 4 一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の現状モデルでのピア頂部の最大変位

入力地震動	振動方向	ピア頂部の最大変位 (cm)			
		1号	2号	3号	4号
一庫波 250gal 入力	上下流方向	1.24	1.15	1.15	1.03
	ダム軸方向	5.59	4.88	4.93	5.53
	鉛直方向	0.29	0.01	0.09	0.25
屈足波 250gal 入力	上下流方向	1.08	0.54	0.54	1.22
	ダム軸方向	10.66	11.16	11.28	10.14
	鉛直方向	0.52	0.01	0.05	0.59

表 - 5 一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の現状モデルでのピア頂部間の最大相対変位

入力地震動	振動方向	ピア頂部間の最大相対変位 (cm)		
		1-2号の間	2-3号の間	3-4号の間
一庫波 250gal 入力	上下流方向	0.59	0.00	0.75
	ダム軸方向	6.57	0.13	6.92
	鉛直方向	0.30	0.11	0.27
屈足波 250gal 入力	上下流方向	0.99	0.00	1.09
	ダム軸方向	15.59	0.12	17.79
	鉛直方向	0.52	0.05	0.59

次に、全時刻を通じての強震時の最大引張応力の解析結果を表 - 6 に、強震動の違いによる地震時引張応力分布の比較結果を図 - 9 に示す。地震動の周波数特性の影響は、地震時引張応力に関しても地震時変位と同様であり、一庫波 250gal では最大 6.46N/mm²、屈足波 250gal 入力では最大 16.91N/mm² となった。

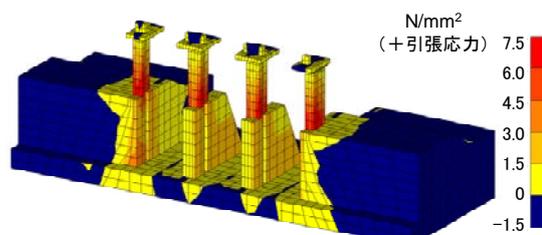
表 - 6 現状モデルのピア下部での最大引張応力

入力地震動	振動方向	ピア下部での最大引張応力(N/mm ²)			
		1号	2号	3号	4号
一庫波 250gal 入力	上下流方向	0.18	0.16	0.16	0.18
	ダム軸方向	0.36	0.12	0.12	0.13
	鉛直方向	6.34	4.24	4.24	6.46
屈足波 250gal 入力	上下流方向	0.22	0.14	0.14	0.52
	ダム軸方向	0.65	0.33	0.33	0.33
	鉛直方向	12.86	12.19	12.19	16.91

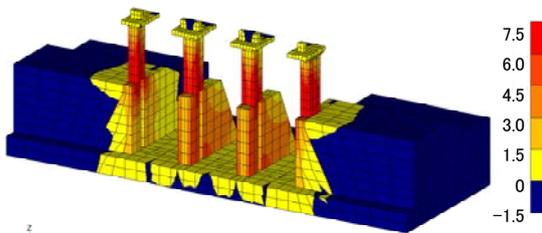
7. ピア頂部を連結した時の連結効果の検討

7.1 検討目的

新規に洪水吐を建設する場合は、トップ・ヘビー構造を避ける、個々のピアの変位挙動を抑制する、ピアの形状を統一する、ゲート巻上げ機を地表に設置する、制振・免震技術を活用する等の地震対策を事前に工夫することが可能である。しかし、既設施設の場合は、実施できる地震対策に制約が伴うことが多い。そこで、ここでは、ピア頂部間の相対変位の解消に主眼を置いて、4本のピアを補強部材で単純に連結した場合の強震時挙動について三次元動的解析により検討した。



鉛直方向引張応力：最大6.46N/mm²
(1) 一庫波250gal入力での地震時応力分布



鉛直方向引張応力：最大16.91N/mm²
(2) 屈足波250gal入力での地震時応力分布

図 - 9 地震動の違いによる地震時応力の比較

7.2 解析モデル

連結効果を検討するために、図 - 10 に示した三次元解析モデル（以下、連結モデル記す）を作成した。連結モデルは、ピア頂部の連結部材以外は現状モデル（図 - 4）と全く同じであり、解析用の動的物性値も表 - 2 に示した値をそのまま適用した。連結部材に関しては、現在の耐震対策技術では様々な材料や方法の適用が考えられるが、ここでは鋼製部材のように剛性の高い部材で連結した場合を想定し、高さ 50cm、厚さ 20cm のソリッド要素でモデルした。連結部材の動的物性値は図 - 7 に示したように、動的せん断剛性は一般的な鋼材の値を仮定し、減衰定数は減衰効果を高めるためのダンパー等の活用を想定して 0.1 を仮定した。コンクリートピアと連結部材の接合部は一体化した状態を仮定した。

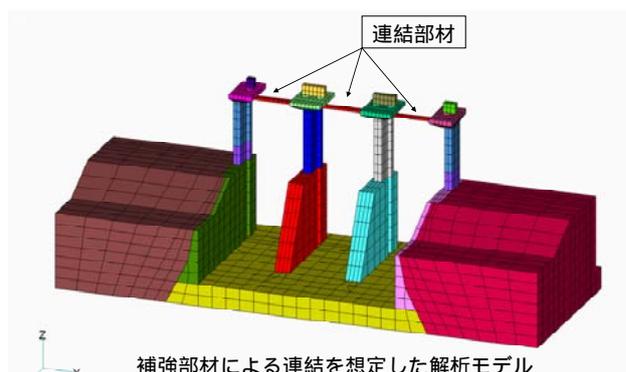


図 - 10 連結による相対変位の解消を検討するための三次元動的解析モデル（連結モデル）

表 - 7 想定した連結部材の物性値

項目	動的せん断剛性	単位体積重量	ポアソン比	減衰定数
連結部材	79000 N/mm ²	6.69 N/m ³	0.3	0.1

7.3 入力地震動

入力地震動には、表 - 3 に示した屈足波（図 - 3）と一庫波（図 6）を用い、上下流方向成分の最大加速度が250gal になるように各成分調整した後に3成分同時入力とした。

7.4 連結効果に関する解析結果

(1) 強震時の変位挙動に関する解析結果

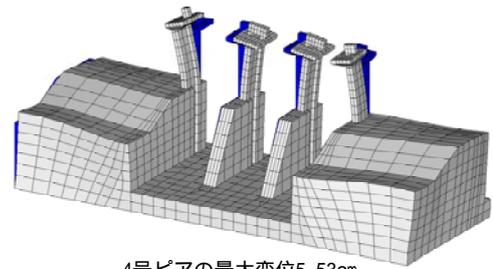
一庫波を 250gal で入力した際の現状モデルと連結モデルの変位挙動の比較結果を図 - 11 に、同様に、屈足波を 250gal で入力した時の変位挙動の比較結果を図 - 12 に示す。また、一庫波 250gal 入力時の現状モデルと連結モデルに関して、3号ピアと4号ピアの相対変位時刻歴を図 - 13 に、屈足波 250gal 入力時の3号ピアと4号ピアの相対変位時刻歴を図 - 14 に示す。

図 - 11 は、現状モデル、連結モデル共に時刻 7.72 秒での変位状態を示しており、図 - 12 は、両モデル共に時刻 10.28 秒での変位状態を示している。全時刻を通じての各ピア頂部の最大変位量については、一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の比較一覧を表 - 8 に示す。全時刻を通じてのピア頂部の間の最大相対変位量は表 - 9 に示すとおりである。

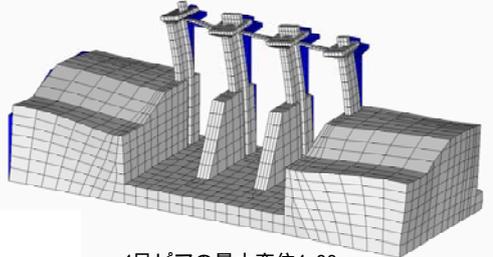
図 - 12、図 - 14、表 - 9 から明らかなように、ピアとピアを補強部材で連結することによって、各ピア間の相対変位はゼロに近い数値にまで低減させることが可能である。一庫波 250gal 入力時の場合、現状モデルでは 6.92cm(表 - 5)であった3号 - 4号ピア間のダム軸方向の相対変位が、連結モデルでは 0.23cm(表 - 9)になった。屈足波 250gal 入力時の場合は、現状モデルで 17.79cm(表 - 5)であったピア間の相対変位が連結モデルでは 0.38cm(表 - 9)になった。

既設の洪水吐施設に関しては、今後ますます耐震診断と耐震対策の重要性が増大して行くものと考えられるが、ピアとピアの間の相対変位の問題は、連結することによって簡便かつ確実に対策することが可能である。また、図 - 11、図 - 13、表 - 8 から明らかなように、連結した場合でも補強部材とピアの連成系の変位挙動は発生するので、連結したピア全体の変位量を抑制することが必要な場合には、補強部材 - ピア連成系としての動的剛性と減衰特性を増大させるような対策を講じる必要がある。連結モデルでのピア頂部の最大変位量は、一庫波 250gal 入力時で 4.88cm、屈足波 250gal 入力時で 8.84cm であった。

なお、表 - 8 から、洪水吐では、ダム軸方向が重要な振動方向であることが理解できる。ダム本体では、上下流方向が重要な震動方向になるが、洪水吐では、ダム軸方向が重要な振動方向になる。

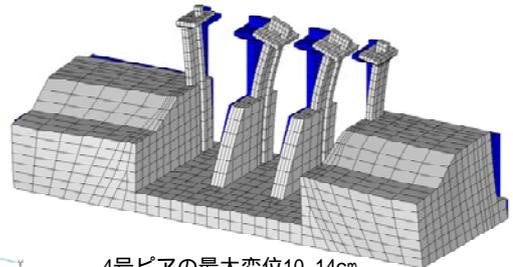


4号ピアの最大変位5.53cm
3-4号ピア間の最大相対変位6.92cm
(1) 現状モデルでのダム軸方向変位

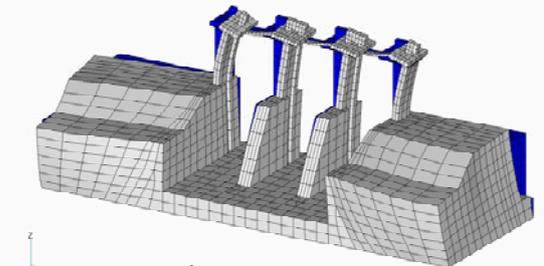


4号ピアの最大変位4.86cm
3-4号ピア間の最大相対変位0.23cm
(2) 連結モデルでのダム軸方向変位

図 - 11 一庫波 250gal 入力時の現状モデルと連結モデルの変位挙動の比較（時刻 7.72 秒）

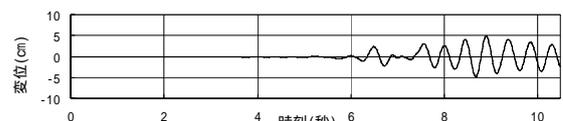


4号ピアの最大変位10.14cm
3-4号ピア間の最大相対変位17.79cm
(1) 現状モデルでのダム軸方向変位

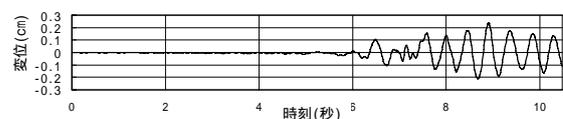


4号ピアの最大変位8.81cm
3-4号ピア間の最大相対変位0.38cm
(2) 連結モデルでのダム軸方向変位

図 - 12 屈足波 250gal 入力時の現状モデルと連結モデルの変位挙動の比較（時刻 10.28 秒）



(1) 現状モデル 一庫波250gal入力



(2) 連結モデル 一庫波250gal入力

図 - 13 一庫波 250gal 入力時の現状モデルと連結モデルでの3 - 4号ピア間の相対変位時刻歴

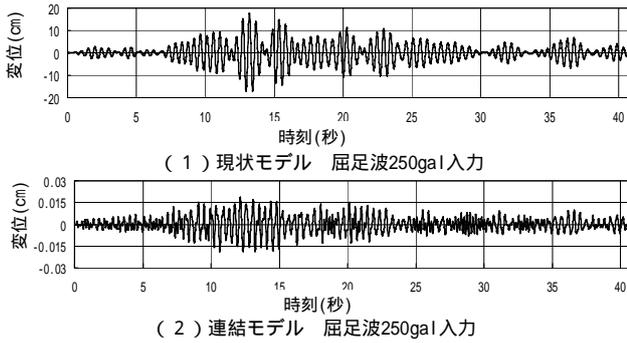


図 - 14 屈足波 250gal 入力時の現状モデルと連結モデルでの 3 - 4号ピア間の相対変位時刻歴

表 - 8 一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の連結モデルのピア頂部の最大変位

入力地震動	振動方向	ピア頂部の最大変位 (cm)			
		1号	2号	3号	4号
一庫波 250gal入力	上下流方向	1.13	1.27	1.22	1.02
	ダム軸方向	4.88	4.67	4.66	4.86
	鉛直方向	0.25	0.02	0.09	0.21
屈足波 250gal入力	上下流方向	0.80	0.58	0.59	0.97
	ダム軸方向	8.84	8.44	8.43	8.82
	鉛直方向	0.41	0.01	0.05	0.41

表 - 9 一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の連結モデルのピア頂部間の最大相対変位

入力地震動	振動方向	ピア頂部間の最大相対変位 (cm)		
		1-2号の間	2-3号の間	3-4号の間
一庫波 250gal入力	上下流方向	0.48	0.14	0.60
	ダム軸方向	0.22	0.12	0.23
	鉛直方向	0.26	0.12	0.23
屈足波 250gal入力	上下流方向	0.59	0.16	0.57
	ダム軸方向	0.40	0.06	0.38
	鉛直方向	0.41	0.06	0.41

(2) 地震時応力に関する解析結果

図 - 15 は、一庫波 250gal 入力時の鉛直方向の地震時引張応力に関する現状モデルと連結モデルの比較結果である。同様に、屈足波 250gal 入力時の地震時引張応力の比較結果を図 - 16 に示す。一庫波 250gal 入力時と屈足波 250gal 入力時の連結モデルでの地震時の最大引張応力を表 - 10 に示す。一庫波 250gal 入力時の鉛直方向の地震時引張応力は、現状モデルでは最大 6.46N/mm²、連結モデルでは 6.03N/mm²であった。屈足波 250gal 入力時の場合は、現状モデルで最大 16.91N/mm²、連結モデルでは 11.83N/mm²であった。通常、ダムコンクリートの動的引張強度は 3 ~ 5N/mm² 程度を想定しているため、16.91N/mm²や 11.83N/mm²の値は部分的かつ瞬間的に発生した結果ではあるが、洪水吐の耐震性能を考える際にはコンクリートピア下部にクラックが発生することを想定しておくことが必要であると思われる。

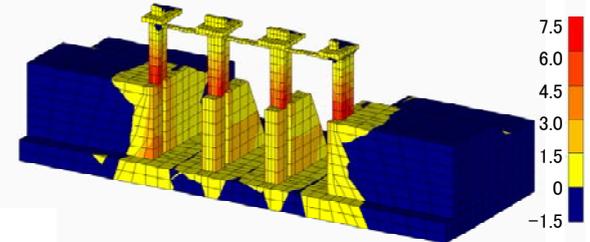
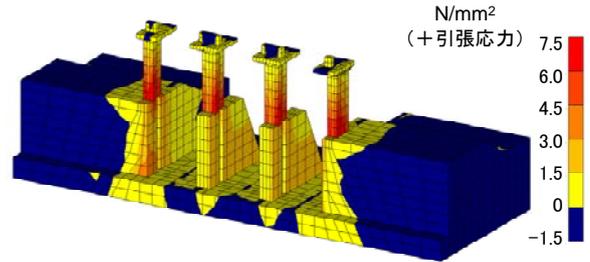


図 - 15 一庫波 250gal 入力での現状モデルと連結モデルの地震時引張応力分布の比較

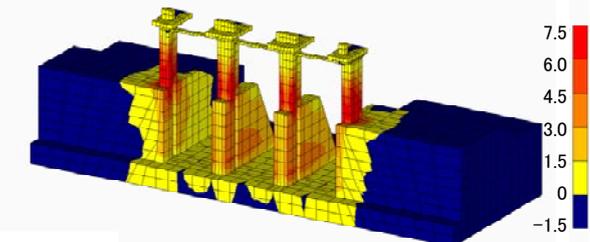
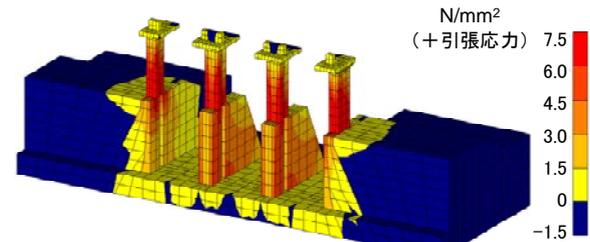


図 - 16 屈足波 250gal 入力での現状モデルと連結モデルの地震時引張応力分布の比較

ここに記載した解析事例は、線形解析で行ったが、動的せん断剛性および減衰定数の非線形性を考慮した場合には、地震時引張応力は、線形解析よりも非線形解析の方が小さくなる傾向があるので¹⁷⁾、より精度の良い応力評価を行うためには、非線形解析による比較検討を行うことが必要であると考えている。また、洪水吐のコンクリートピアは、クラックが発生しやすい構造物であると考えられるので、クラックの発生を想定した三次元動的解析による性能照査¹⁸⁾、クラックの発生を前提とした耐震

対策技術，クラックが発生しても洪水吐の放流機能が保持される地震対策技術についての配慮と工夫が重要であると考察される。

表 - 10 連結モデルのピア下部での最大引張応力

入力地震動	振動方向	ピア下部での最大引張応力(N/mm ²)			
		1号	2号	3号	4号
一庫波 250gal 入力	上下流方向	0.17	0.18	0.16	0.18
	ダム軸方向	0.35	0.13	0.12	0.12
	鉛直方向	6.03	4.56	4.30	5.89
屈足波 250gal 入力	上下流方向	0.17	0.10	0.09	0.37
	ダム軸方向	0.58	0.23	0.23	0.24
	鉛直方向	11.00	8.56	8.33	11.83

8. まとめと考察

・1993年釧路沖地震の際に屈足ダム洪水吐ではゲート巻上げ機で軽微な地震被害が発生した。この地震を機に洪水吐に地震計を設置したところ、翌年の1994年北海道東方沖地震の際にダム底部で最大81.69gal、洪水吐ピア頂部で最大709.52galの地震動が観測された。この地震観測記録を活用して、これまでに、1994年北海道東方沖地震の際の屈足ダム洪水吐の実地震時挙動の再現解析を行い動的変形特性の定量的評価を行った。

・本論文では、これまでの研究成果を踏まえ、ダム底部で最大加速度250galの強震動を2種類想定し、コンクリートピアの強震時の変位挙動、ピアに発生する強震時応力、相対変位対策としてピア頂部を連結した場合の連結効果について三次元的解析により検討した。

・研究対象とした屈足ダム洪水吐は、4本のコンクリートピアで構成され、両側の2本のピアは、逆L字型で厚さが薄く、中間の2本のピアはT字型で厚さが厚い形状になっている。このような場合、両側の逆L字型ピアと中間のT字型ピアでは、変位増幅特性、位相特性が異なるため、強震時にはピア頂部間で大きな相対変位が発生すると考えられる。そして、こうした相対変位が、ピア頂部に配置されたゲート巻上げ機の地震被害の主たる原因になると考えられる。これら事項を三次元的解析により確認することができた。

・薄い逆L字型ピアと厚いT字型ピアの強震時挙動は、強震動の周波数特性によって著しく変化することを三次元的解析により確認することができた。一庫波(卓越周波数3~6Hz)を入力した場合は、両サイドの薄い逆L字型ピアの方が中間の厚いT字型ピアよりも大きく変位したのに対して、屈足波(卓越周波数1.22~2.05Hz)を入力した場合は、逆に、両サイドの薄い逆L字型ピアよりも中間の厚いT字型ピアの方が大きく変位した。この結果から、異なる形状の構造体によって構成されている施設の地震時変位挙動を評価する場合には、周波数特性の異なる複数の地震動を想定して評価することが必要であ

ると考察される。

・三次元的解析による比較解析を行った結果、ピア頂部を補強部材で連結することによってピア間の相対変位を簡便かつ確実に解消することが可能であると考えることができた。ただし、連結に使用する補強部材の重量や位置によっては、トップ・ヘビーな構造を助長する危険性がある点に留意することが必要であると思われる。

・ピア頂部を連結した場合でも、補強部材とピアの連成系としての変位挙動は発生するので、連結したピア全体の変位量を抑制することが必要な場合は、補強部材-ピア連成系としての動的剛性と減衰定数をコントロールすることが必要になると考察される。

・逆L字型、T字型等のトップ・ヘビー構造物では、ピア頂部の変位挙動が大きくなるのみならず、ピア下部の地震時引張応力も大きくなると考えられる。そのため、ピア下部に関しては、クラックの発生を想定した性能照査、クラックの発生を前提とした地震対策等を工夫することが必要であると考察される。

・一般的に、ダム本体では上下流方向の地震時応答が卓越し、洪水吐ではダム軸方向の地震時応答が卓越する。したがって、ダム本体にとっては上下流方向の地震動が重要になるが、洪水吐にとってはダム軸方向の地震動が重要である。

9. あとがき

洪水吐施設は、ダムの放流機能を保持するための施設であり、地震時の機能喪失が許容されない重要構造物に位置付けることができる。しかし、これまで、ダム本体に比して、洪水吐施設の重要性がやや見過ごされていた感があるように思われる。洪水吐が大地震によって重大な被害を受け、放流機能が停止した場合には、貯水の越流の危険性が想定される。コンクリートダムでは、貯水の越流がダムの決壊に直接結びつくことは少ないと考えられるが、フィルダムでは、貯水の越流がダムの決壊に直結する危険性があるものと考えられる。そのため、洪水吐施設に関してはダム本体と同様に精緻な耐震性能照査と合理的な地震防災対策が重要であると考えられる¹⁹⁾。都市域に位置する地点、想定される流下水量が大きい地点、下流域に住宅地や社会基盤施設が多い地点、二次災害の派生が想定される地点、基礎地盤が柔らかく脆弱な地点に関しては、施設被害の抑止軽減のみならず、人的被害の未然防止、二次災害の未然防止の観点から地震防災を実現するための取り組みが重要であるように思われる²⁰⁾。

既設ダムでは、ダム天端に洪水吐施設が設置されている事例が少なくない。周知のように、ダム天端では、基礎地盤に比して地震動が増幅するので、ダム天端に設置された洪水吐施設は、基礎地盤に建設されたものよりも過酷な地震荷重の下に置かれることになる。ダム天端に

配置された洪水吐施設に関しては、堤体での地震動の増幅や地震時の相対変位の影響を考慮した性能照査が必要であり、ダム天端に建設された洪水吐施設の耐震診断と耐震対策は将来的な課題のひとつであると思われる。ダム天端に位置する洪水吐に関しては、ダム堤体での地震動の増幅、地震動の長周期化と長時間化、ダムと洪水吐での相対変位等が重要な事項になるものと考察される。

謝辞

解析ラン作業の実施に際して、J P ビジネスサービスの浅賀裕之氏、依田昌宏氏のご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉田秀樹：河川構造物の耐震設計の歴史・現状・展望，基礎工 2007.2月号，pp.36-41
- 2) 有賀義明：1994年北海道東方沖地震における既設洪水吐の地震時挙動の三次元動的解析，土木学会第62回年次学術講演会，-573，p.1-2，2007.9
- 3) 有賀義明：動的応答が異なるピアにより構成される洪水吐の地震時損傷メカニズムと地震対策法の検討，土木学会第29回地震工学研究発表会，No.11-0007，pp.1-8，2007.8
- 4) 大町達夫：1999年台湾集集地震によるダムの被害について，ダム工学，Vol.10，No.2，pp.138-150，2002
- 5) Wieland, M., Brenner, R.P. and Sommer, P. : Earthquake resiliency of large concrete dams – Damage, repair, strengthening concepts, International Congress on Large Dams, Montreal, 2003
- 6) 末次弘道，木村光良，市原昭司：鳥取県西部地震に伴う黒坂発電所水圧管路の復旧対策，電力土木，No.295，pp.57-61，2001.9
- 7) 佐々木隆，金銅将史，山口嘉一，川崎秀明：2003年5月26日宮城県沖地震によるダム被害，大ダム，No.189，pp.66-76，2004.10
- 8) 新潟県中越地震ダム工学会災害調査団：新潟県中越地震に関するダム工学災害調査団報告，ダム工学，Vol.14，No.4，pp.285-296，2004
- 9) 谷茂；平成16年新潟県中越地震による農業施設の被害，平成16年新潟県中越地震による被害調査報告会梗概集，81-86，2004
- 10) 土木学会鋼構造委員会編：鋼構造シリーズ10 阪神・淡路大震災における鋼構造物の震災の実態と分析，土木学会，1999
- 11) 藤沢侃彦，永山功：平成7年兵庫県南部地震災害調査報告 第8編 ダム施設の被害，土木研究所，1996
- 12) 木本悦郎，他：千葉県東方沖地震における房総導水路長柄ダムの状況について，水と土第73号，pp.89-95，1988
- 13) International Congress on Large Dams : Historic performance of dams during earthquakes, Design features of

dams to resist seismic ground motion (Guidelines and case studies), ICOLD Bulletin 120, 2001

- 14) Ariga, Y., Tsunoda, S. and Asaka, H. : Determination of dynamic properties of existing concrete gravity dam based on actual earthquake motions, 12th World conference on earthquake engineering, No.0334, p1-8, 2000
- 15) 有賀義明：三次元再現解析によるダムの動的変形特性の定量的評価に関する研究，埼玉大学学位論文，2001.3
- 16) ダムの耐震性に関する評価検討委員会：ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書（概要版）1995.11
- 17) 有賀義明，曹曹延，渡邊啓行：強震時の非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性の評価について，大ダム No.175，2001
- 18) 有賀義明，曹曹延，渡邊啓行：強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究，土木学会論文集 No.759/ -67，p.53-67，2004.4
- 19) Ariga, Y., Fujinawa, Y., Kawakami, N., Ohsumi, T. and Nishino, T. : An immediate evaluation method of earthquake damage of dams by utilizing real-time earthquake information, the Fifth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures (ERES2005), p.229-23, 2005
- 20) Ariga, Y., Fujinawa, Y. and Hori, M. : Development of immediate evaluation method for earthquake safety of existing dams, 100th Anniversary Earthquake Conference – commemorating the 1906 San Francisco Earthquake, No.196, p.1-11, 2006.

(2007年9月18日 受付)