

1994 年北海道東方沖地震における洪水吐の地震時挙動の三次元再現解析

電源開発株式会社 フェロー会員 有賀 義明

1. 研究目的

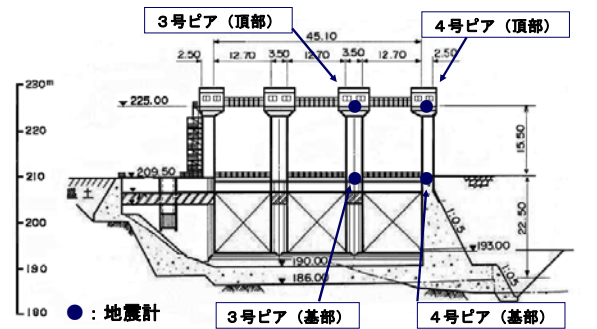
ダムに要求される基本性能は、貯水機能であり、それに連動して放流機能の保持も要求される。洪水吐は、放流機能を担う施設であり、地震時の機能喪失が許容されない構造物である。洪水吐は、地震時挙動特性が異なる部材や構造体によって構成されるので、地震時には、ピアの破壊、ゲート巻上機の破損、ゲート扉体の損傷等の被害が想定される。洪水吐の耐震設計は、従来、震度法に基づいて行われているが、震度法は、マッシュで剛性の高い構造物を対象にした設計法であり、複雑な地震時挙動を示す構造物に適用するのは必ずしも妥当ではない。複雑な地震時挙動を示す構造物の耐震性能を精度良く評価するためには、実際の地震時挙動を再現することができる、三次元的解析に基づく性能照査が必要であるとの考えから、精度・信頼性の高い性能照査法の確立を目的に、洪水吐の実地震時挙動の三次元再現解析を行った。

2. 解析対象とした地震と構造物

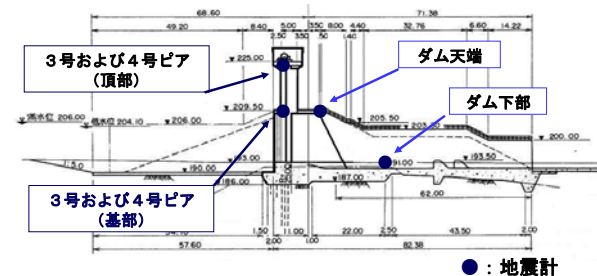
1993 年釧路沖地震(1/15, M7.8, 震央距離 120km)の際に、Kダムでは、ピアの頂部に設置されたゲート巻上機の固定用ボルトの破損、巻上機軸の変形等が生じた。この地震を機に、洪水吐に地震計を設置したところ、1994 年北海道東方沖地震(10/4, M8.1, 震央距離 388km)の際に、ダム底部で最大 81gal、ピア基部で最大 177gal、ピア頂部で最大 709gal の地震動が記録された。この洪水吐の実地震時挙動を対象に三次元再現解析を行った。Kダムは、堤高 27.5m、堤頂長 220.1m のロックフィルダム(1987 年竣工)であり、洪水吐は、左岸に位置し、4 本のピアと導流壁は鉄筋コンクリート造であり、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。洪水吐の形状と地震計の配置は図-1 に示すとおりである。

3. 三次元再現解析

解析に用いた三次元モデルを図-2 に示す。ピアとゲートは構造的には分離されているので、ここでは、ゲート扉体は省略してモデル化した。ピア頂部のゲート巻上機、収納建屋、連絡橋は、単位体積重量に換算してソリッド要素で模擬した。解析モデルの側方は粘性境界、下方は剛基盤を設定した。再現解析の精度に考慮して、洪水吐の形状は、できるだけ忠実にモデル化した。洪水吐の周辺は、左右 20m 区間をモデルに含めた。1994 年北海道東方沖地震の際にダム底部で観測された地震動を図-3 に示す。再現解析では、解析対象周波数を揃えるために、5Hz 以上の周波数成分をカットした後にダム底部の観測地震動を入力地震動として使用した。解析法は、著者が開発した三次元的動的解析法(UNIVERSE)¹⁾を用いた。



(1) 正面図 (上流側)



(2) 断面図 (縦断)

図-1 解析対象とした洪水吐の形状と地震計の配置

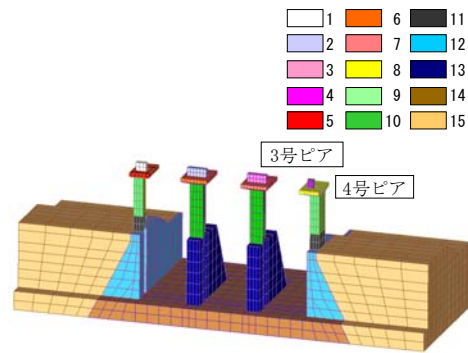


図-2 三次元的動的解析モデル (上流側より)

4. 解析結果

再現解析の結果として同定した動的物性値を表-1 に示す。3号ピアと4号ピアについて、最大加速度の値と固有振動数に関する地震観測結果と再現解析結果の比較を表-2 に示す。また、加速度時刻歴の観測結果と解析結果の比較を図-4 に、スペクトルの比較を図-5 に示す。3号ピアに関しては、比較的良好な再現性が得られたが、4号ピアに関しては、加速度時刻歴の後半部(概ね 20 秒以降の区間)で、解析結果が観測結果よりも大きい結果となった。動的解析の視点では、設定した減衰定数の値が小さかったためと解釈できるが、現象面では、地震の際に 4 号ピア基部に亀裂が発生し、その影響によって 4 号ピアの加速度応答が減少した可能性があると考えられる。

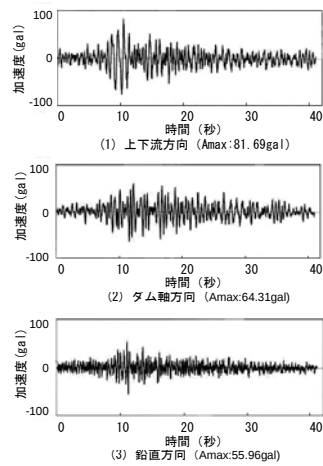


図-3 1994年北海道東方沖地震の際にダム下部で観測された加速度時刻歴

表-1 動物的物性値 (No. は、図-2の区分番号に対応)

対象		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
No.	部所				
1	1号巻上機	20800	34.9	0.20	0.02
2, 3	2・3巻上機	20800	29.6	0.20	0.02
4	4号巻上機	20800	36.9	0.20	0.02
5-8	巻上機基礎	9375	23.5	0.20	0.02
9	1, 4号ピア	9375	23.5	0.20	0.04
10	2, 3号ピア	9375	23.5	0.20	0.03
11	1, 4基部	3125	23.5	0.20	0.09
12	1, 4導流壁	9375	23.5	0.20	0.03
13	2, 3導流壁	9375	23.5	0.20	0.03
14	洪水吐基礎	9375	23.5	0.20	0.02
15	フィルダム部	310	16.7	0.30	0.08

表-2 地震観測結果と三次元解析結果の比較

ピアの位置		地震観測結果		三次元解析結果	
		加速度 gal	固有振動数 Hz	加速度 gal	固有振動数 Hz
3号	頂部	321.3	2.22	318.5	2.29
	基部	81.2		89.6	
4号	頂部	507.5	1.64	487.9	1.64
	基部	92.1		91.9	

図-6は、各ピア頂部の間の相対変位の解析結果である。両サイドの1号ピアと4号ピアは、逆L字型の形状でピアの厚さが薄い。中間の2号ピアと3号ピアはT字型の形状でピアの厚さが厚い。そのため、両サイドの逆L字型ピアは偏心して大きく揺れ易く、両サイドの逆L字型ピアと中間のT字型ピアでは固有周期が異なるため位相差が生じて、相対変位が増大する結果となった。今回の解析では、2号ピアと3号ピアの相対変位はほぼ0であったが、3号ピアと4号ピアの最大相対変位は約4.9cmとなった。1993年釧路沖地震の際に見られたゲート巻上機に係る地震時損傷は、このような相対変位が第一の原因であると考察される。なお、今回の再現解析では、4号ピア基部での最大引張応力 4.61N/mm² と評価され、1994年北海道東方沖地震の際にピア基部で軽微な亀裂が発生した

ことも想定し得るレベルの結果であった。

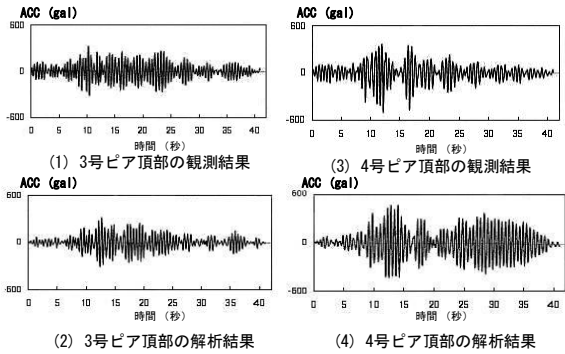


図-4 ピア頂部の加速度時刻歴の比較

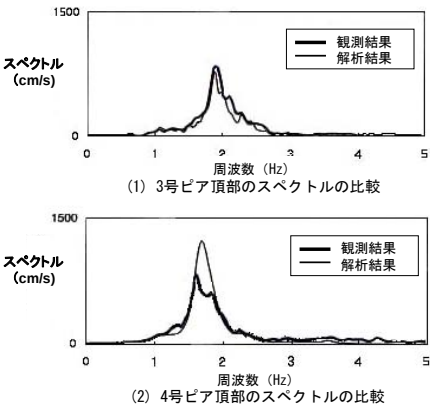


図-5 ピア頂部のスペクトルの比較

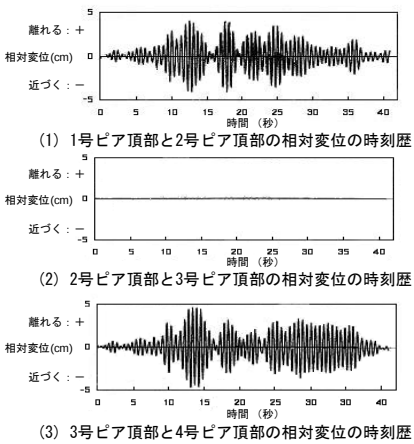


図-6 ピア頂部の相対変位時刻歴

5. 結論

既設洪水吐の実地震時挙動の三次元再現解析により、洪水吐では、ダム軸方向の相対変位が地震時損傷の第一の原因になることを明らかにした。地震時挙動が異なる部材や構造体が複雑に連結されている複合構造体の耐震性能照査に際しては、複雑な地震時挙動を適切に評価することが必要である。既設ダムでは、ダム天端に洪水吐が設置されている事例が多く、こうした場合は、ダム堤体での地震動増幅を考慮することが必須の要件になる。

参考文献

1) 有賀義明, 曹増延, 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/ I-67, p. 53-67, 2004. 4.