

強い地震動を想定した既設コンクリート 重力式ダムの耐震性再評価

有賀 義明¹・曹 増延²・渡邊 啓行³

¹工修 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究センター (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

²Ph.D. 株式会社開発計算センター 科学システム部 技術室 (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

³正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

It is necessary to make the dynamic property values of dam and foundation clear, in order to improve the accuracy and reliability of dynamic analysis for dams. Therefore, the 3-D FEM dynamic analyses were carried out to reproduce the actual earthquake behavior of existing concrete gravity dam at the Kushiro-oki Earthquake(1993. M7.8). As the results, the dynamic shear modulus of the dam was evaluated to be 11,032N/mm² (Vs:2,140m/s), the material damping factor of dam and foundation to be 5%. Furthermore, the method for evaluating the seismic stability of existing concrete gravity dam against strong earthquake motion was studied by using 3-D FEM model which was identified by the 3-D reproduce analysis. The non-linearity of dynamic properties of dam and foundation was considered in this method.

Key Words : 1993 Kushiro-oki Earthquake, Concrete Gravity Dam, Earthquake Observation, 3-D Dynamic Analysis, Dynamic Shear Modulus, Damping Factor,

1. はじめに

コンクリート重力式ダムを対象に動的解析を実施すると、堤体に発生する地震時の応力及びひずみの算出結果は、ダムや基礎岩盤の地震時変形特性の設定によって大きく変化する。ダムや基礎岩盤の地震時変形特性の設定は、単にダムの加速度応答に対してのみならず、ダム堤体に発生する地震時の引張応力や引張ひずみに対して大きな影響を及ぼす。そのため、動的解析によるコンクリート重力式ダムの耐震性評価の精度・信頼性を向上させるためには、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性を適確に評価することが必要である。

ダム堤体材料の強度変形特性は、一般に室内試験によって評価される場合が多い¹⁾が、ダムコンクリートの地震時変形特性に関しては、基本的に室内試験による評価事例^{2),3)}が少なく、また、室内の載荷試験によって評価された物性値が、実際の地震動を受けた実ダムの地震時変形特性を適確に反映したものであるかどうかについての実証^{4),5)}が十分になされていない。

ダムは、強い地震動に対しても高い耐震性を有していると考えられるが、強い地震動に対する耐震性を定量的に評価した事例は少なく、また、強い地震動を想

定した場合に、コンクリートダムの非線形性を耐震性評価の中でどのように考慮するかについても明確になっていない。

このような必要性から、本研究では、まず、コンクリート重力式ダムの地震時変形特性を現実的に即して評価するために、三次元動的解析により、釧路沖地震(1993年1月15日)における既設コンクリート重力式ダムの地震時挙動の再現解析を行った。そして、再現解析によって同定した三次元解析モデルを用いて、強い地震動に対する耐震性の評価手法について検討した。強い地震動を想定した場合のコンクリートダムの耐震性評価手法に関して、本研究では、ダムの構造継目の地震時挙動を考慮した解析手法とダムの地震時変形特性の非線形性を考慮した解析手法について検討しているが、ここでは、地震時変形特性の非線形性を考慮した場合について報告する。

2. 既設コンクリート重力式ダムでの地震観測

既設構造物の耐震性を定量的に評価するためには、実際の現象に基づいて解析モデルが同定されていなければならない。そこで、三次元動的解析により既設コンクリート重力式ダムの釧路沖地震における実地震時挙動の再現解析を行い、解析モデルを同定した。

(1) 糠平ダムにおける地震観測

評価対象とした糠平ダムは、1956年に建設された高さ76m、堤頂長293m、下流面勾配1:0.78、堤体積45.95×10⁴m³のコンクリート重力式ダムである。糠平ダムは、釧路市の西北西約110km、北海道の中央部やや太平洋側に位置しており、ダムサイトの基礎岩盤は安山岩であり、岩石そのものは極めて堅硬ではあるが、不規則な亀裂が多い。安山岩の厚さは10~20mであり、その下方には、安山岩よりも軟質な凝灰質砂岩・頁岩の互層が分布している。地震計は、ダム天端、ダム底部監査廊、右岸岩盤の3ヶ所にそれぞれ3成分、合計9成分設置されている。解析対象ダムの下流側正面と越流部標準断面および地震計の設置位置を図-1に示す。

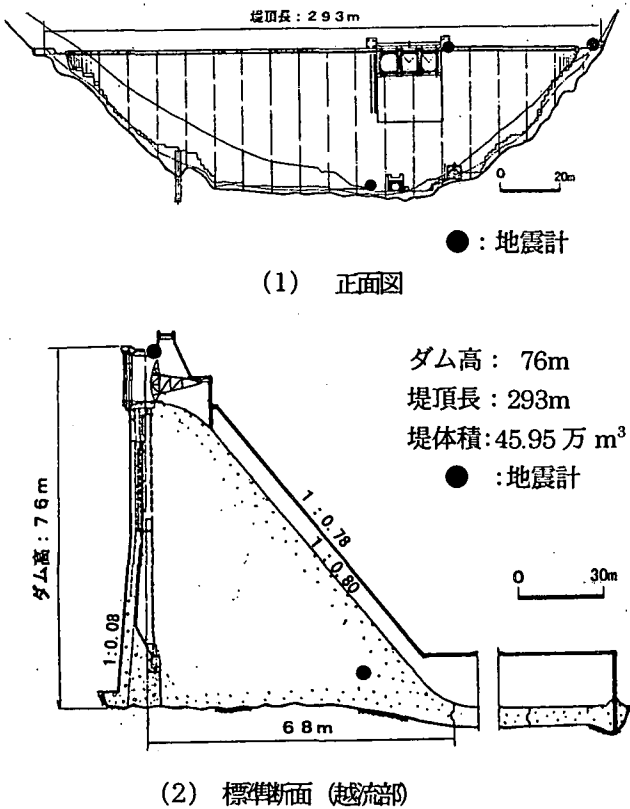


図-1 解析対象ダムの形状と地震計の配置

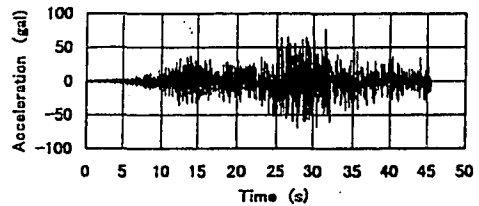
(2) 釧路沖地震に際に観測された地震動

1993年1月15日に発生したマグニチュード7.8の釧路沖地震(震源位置:北緯42度51分、東経144度23分、震源深さ107km、震央距離110km)の際に糠平ダムで観測された地震動記録の概要を表-1に示す。観測された地震動の加速度レベルは、ダム天端で最大77.4gal、ダム底部監査廊では最大28.7gal、右岸岩盤では34.7galであった。ダム堤体での水平上下流方向の加速度応答倍率(ダム天端/ダム底部監査廊)は2.8倍であり、ダム天端とダム底部監査廊の伝達関数の卓越周波数は5.2Hz(上下流方向)であった。ダム天端で

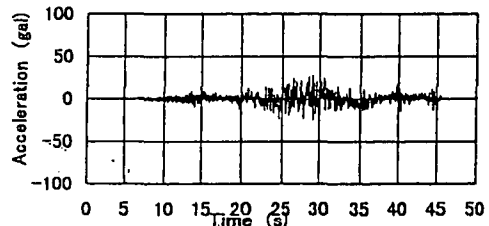
観測された加速度時刻歴、ダム底部監査廊で観測された加速度時刻歴、ダム天端とダム底部監査廊との伝達関数は、図-2に示すとおりである。

表-1 釧路沖地震の際に既設コンクリート重力式ダムで観測された地震観測記録の概要

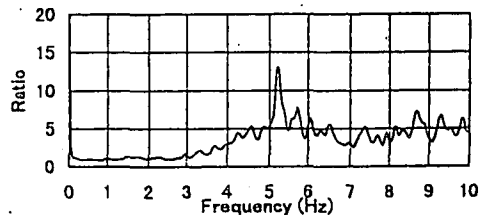
釧路沖地震の概要		
発生年月日	1993. 1.15.	
震央	北緯	42度15分
	東経	144度22分
マグニチュード	7.8	
震源深さ	107 km	
震央距離	110 km	
震源距離	153 km	
観測された地震動の最大加速度		
ダム天端	水平上下流方向	77.4gal
	水平ダム軸方向	42.6gal
	鉛直方向	19.8gal
ダム底部監査廊	水平上下流方向	27.5gal
	水平ダム軸方向	28.7gal
	鉛直方向	14.7gal
右岸岩盤	水平上下流方向	28.7gal
	水平ダム軸方向	34.7gal
	鉛直方向	18.1gal
伝達関数のピーク振動数		5.2Hz



(1) ダム天端で観測された加速度時刻歴



(2) ダム底部監査廊で観測された加速度時刻歴



(3) 伝達関数 (ダム天端/ダム底部監査廊)

図-2 釧路沖地震の際に観測された加速度時刻歴と伝達関数 (ダム天端/ダム底部監査廊)

3. 三次元動的解析による実地震時挙動の再現

(1) 解析方法

ダムと貯水池との相互作用、基礎岩盤や貯水池での波動エネルギーの逸散等を適確に再現することができる動的解析手法が必要であることから、本研究では、厳密な理論に基づき、ダム-基礎-貯水池連成三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”を実用化開発した。ダムと貯水池の連成に関しては、貯水を可圧縮性弾性媒体と見なし、水の粘性を無視し、Reynolds 数が小さいとの仮定で、貯水の地震応答を波動方程式により定式化し、貯水池の底面堆積物によるエネルギーの透過、上流端でのエネルギーの逸散を考慮している。波動方程式は、差分法により離散化している。基礎岩盤の境界条件に関しては、仮想仕事の原理に基づく粘性境界(三浦の方法⁶⁾)を用いており、基礎岩盤から自由地盤へのエネルギーの逸散、自由地盤から基礎岩盤へのエネルギーの流入を考慮している。その他、三次元ジョイント要素の利用によりダムの構造継目やクラック等をモデル化した解析評価が可能であり、また、三次元シェル要素を活用することにより表面遮水壁型ロックフィルダムの三次元動的解析等が可能である。三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”の主な解析機能を表-2に示す。

表-2 三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”の機能概要

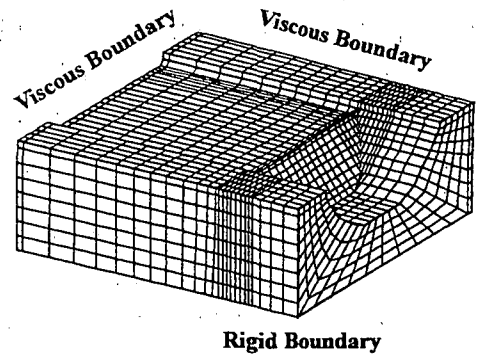
解析機能	構成式	解析法		
静的解析	一斉盛立解析	線形	逐次増分反復法	
	瞬時湛水解析			
	築堤過程解析	原田・松井式		
	湛水過程解析	Duncan-Chang 式		
固有値解析	線形	サブスペース法		
動的解析	ダム堤体	線形	直接積分法	
	基礎岩盤	等価線形		
	自由地盤	レーリー減衰		
	貯水池	楕円方程式		混合差分法
	接触面 (ジョイント要素)	線形 非線形		荷重伝達法

既設コンクリート重力式ダムの実地震時挙動の再現解析は、加速度時刻歴の最大振幅と伝達率数(ダム天端/ダム底部監査廊)の卓越周波数に着目して、実測値と解析値が一致するように動的せん断剛性と減衰定数を調整して実施した。三次元動的解析は、上記の三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”を用いて実施した^{7),8)}。

(2) 三次元再現解析モデル

糠平ダムの実地震挙動の三次元解析に用いた三次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成解析モデルを図-3に示す。基礎岩盤の側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。ダムおよび基礎岩盤は、8節点ソリッド要素でモデル化し、貯水池は、

差分グリッド⁹⁾で分割した。



(無反射境界：側方粘性境界、下方剛基盤)

図-3 三次元ダム-基礎岩盤-貯水連成解析モデル

(3) 再現解析の解析用物性値

再現解析で用いた、ダムおよび基礎岩盤の動的物性値を表-3に示す。密度は、建設当時の調査試験結果を参考に設定した。なお、動的せん断剛性及び減衰定数は、三次元再現解析の結果として、逆解析的に同定した数値である。

表-3 再現解析における動的物性値

項目	物性値
ダム堤体の再現解析物性値	
密度 (t/m ³)	2.4
動的せん断剛性 (N/mm ²)	11,032
動ポアソン比	0.2
減衰定数 (%)	5
せん断波速度 (m/s)	2,140
基礎岩盤の再現解析物性値	
密度 (t/m ³)	2.6
動的せん断剛性 (N/mm ²)	9,380
動ポアソン比	0.3
減衰定数 (%)	5
せん断波速度 (m/s)	2,059

(4) 再現解析での入力地震動

再現解析では、ダム堤体と基礎岩盤との地震時相互作用を考慮してダム底部監査廊で観測された実地震動を解析モデルの下方入力基盤での入力地震動に変換した結果を、動的解析に使用した。三次元解析では、前出の図-2に示した地震動の内、18.05秒から38.29秒までの20.24秒間を使い、水平上下流方向、水平ダム軸方向、鉛直方向の3方向同時入力とした。

(5) ダム底部監査廊で観測された観測地震動を下方入力基盤の入力地震動に変換する方法

ダム天端の地震動と伝達率数(ダム天端/ダム底部監査廊)に着目して地震時挙動の再現性を判定するためには、その前提としてダム底部監査廊位置での地震動が再現されてなければならない。ダム底部で観測された実地震動には、ダムと基

基礎盤の動的相互作用の影響が既に含まれているため、ダム底部監査廊での観測地震動をそのまま下方入力基盤から入力した場合、あるいは、開放基盤表面で定義された模擬地震動の引き戻し計算の際に慣用的に多用される、重複反射理論に基づく次元引き戻し計算を適用した場合には、ダム底部監査廊での観測地震動を再現することができない。そこで、ここでは、図-4に示したように、解析に用いたFEMモデルのダム底部監査廊位置と下方入力基盤位置との間の伝達関数を求め、この伝達関数を用いてダム底部監査廊で観測された実地震動を下方入力基盤の入力地震動に変換する方法を採った。

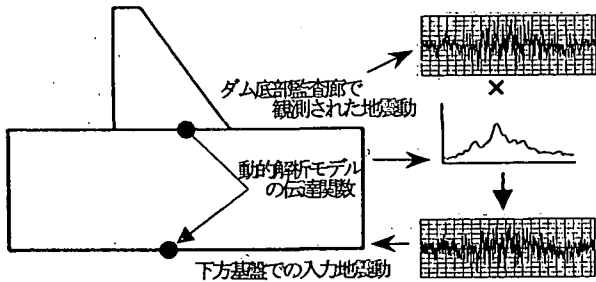


図-4 動的解析モデルの伝達関数を利用した地震動の引き戻し計算方法

(5) 貯水のモデル化

貯水は、波動方程式を差分法で離散化した貯水モデル⁹⁾でモデル化した。

(6) 再現解析結果

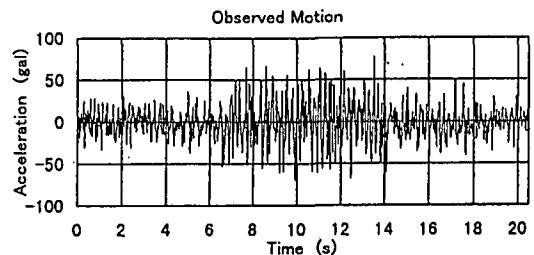
実地震観測と三次元再現解析の比較結果を表-4に示す。また、ダム天端の加速度時刻歴に関する比較結果を図-5に、伝達関数(ダム天端/ダム底部監査廊)に関する比較結果を図-6に示す。図-5および図-6から明らかなように、ダム-基礎岩盤-貯水池連成モデルを用いた三次元的動的解析によって、既設コンクリート重力式ダムの実地震時挙動を非常に良く再現することができた。この三次元再現解析によって同定した糠平ダムの地震時変形特性は、動的せん断剛性 11,032N/mm²(せん断波速度 2140m/s)、減衰定数 5%であった。この三次元再現解析では、実ダムの動的変形特性を定量的かつ実証的に評価したが、併せて、三次元的動的解析プログラム“UNIVERSE”の有効性を実証した。

糠平ダムに関しては、さまざまな解析条件を設定した二次元および三次元的動的解析の比較検討に基づき、減衰定数を材料減衰と付加減衰とに分けて評価したが、材料減衰については、ダム堤体、基礎岩盤ともに統一的に約 5%との結論を得た。付加減衰に関しては、ダム堤体に関する付加減衰に関しては、二次元ダム堤体解析モデルでは 15%、二次元ダム-基礎岩盤連成解析モデルでは 5%を見込む必要があり、基礎岩盤に関す

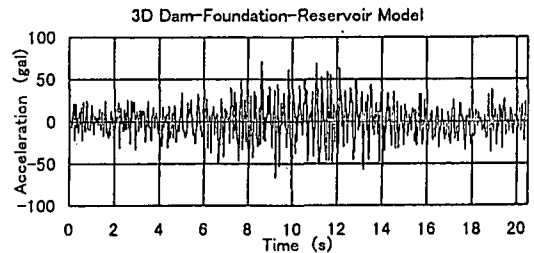
る付加減衰は、反射境界を設定した二次元ダム-基礎岩盤連成解析モデルでは 10%、無反射境界を設定した二次元ダム-基礎岩盤連成解析モデルでは 5%を見込む必要があるとの結論を得た¹⁰⁾。

表-4 地震観測結果と三次元再現解析結果の比較

項目	地震観測結果	三次元再現解析結果
最大加速度 (水平上下流方向)	ダム天端	77.4gal
	ダム底部	27.5gal
加速度応答倍率 (ダム天端/ダム底部)	2.8	2.9
伝達関数のピーク周波数 (水平上下流方向)	5.2Hz	5.2Hz

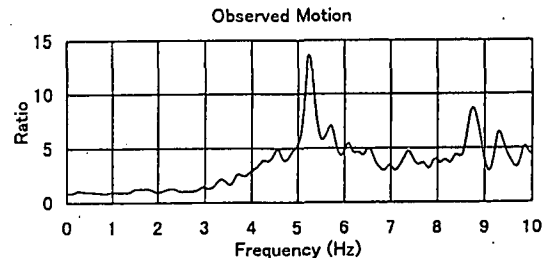


(1) 地震観測結果

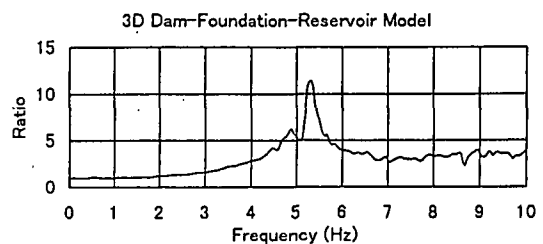


(2) 三次元再現解析結果

図-5 ダム天端の加速度時刻歴に関する観測結果と解析結果の比較



(1) 地震観測結果



(2) 三次元再現解析結果

図-6 伝達関数(天端/底部監査廊)に関する観測結果と解析結果の比較

4 強い地震動に対する耐震性評価

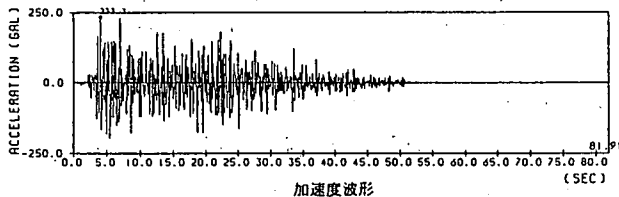
既設ダムの耐震性を現実に即して精度良く評価するためには、信頼性のある解析モデルを用いることが必要不可欠であることから、本研究では、実地震時挙動の再現解析で同定した三次元解析モデルを用いて、内陸直下地震を想定した場合のコンクリート重力式ダムの耐震性の評価手法を検討した。強い地震動に対する耐震性の評価する際には、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性の非線形性を考慮することが必要であると考えられ、ここでは、ひずみ依存性を考慮した三次元等価線形解析を行なった。

(1) 想定した入力地震動

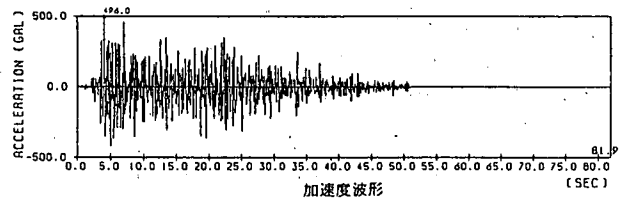
過去に発生した内陸の直下地震としては、1891年に発生した濃尾地震が良く知られている。こうした歴史地震の発生を考慮して、想定される最大クラスの地震として、マグニチュード8の直下地震を仮定して模擬地震動を作成した。模擬地震動は、表-5に示したような条件で、大崎スペクトルを用いた経験的手法により作成した。作成した模擬地震動は、図-7に示したとおりである。

表-5 模擬地震動の作成条件

目標設定値 (gal)	M マグニチュード	震央距離 (km)	模擬地震動 最大加速度
250	8.0	60	233gal
500	8.0	30	496gal



(1) 250gal 想定地震動



(2) 500gal 想定地震動

図-7 想定した入力地震動

(2) 動的変形特性の非線形性

耐震性を評価する際に設定した初期の解析用物性値を表-6に示す。強い地震動を受けた場合には、ダム堤体および基礎岩盤内の地震時のひずみが大きくなると考えられるので、非線形性の考慮が必要になると考えられる。そこで、ダムおよび基礎岩盤の動的変形特性について、図-8および図-9

に示したような非線形性を設定した。図-8に示したひずみ依存性は、載荷速度を速くして実施した圧裂試験の結果に基づいて設定したものであり、図の横軸には、軸ひずみをとっている。破壊軸ひずみは、 2×10^{-4} と仮定し破壊領域の動的せん断剛性と減衰定数は便宜的に一定と仮定した。

表-6 耐震性評価に用いた初期物性値

項目	ダム	基礎岩盤
密度 (t/m^3)	2.4	2.6
熱膨張係数 ($1/^\circ C$)	1.0×10^{-5}	—
静弾性係数 (N/mm^2)	20580	3920
動的せん断剛性 (N/mm^2)	11025	9380
静ポアソン比	0.17	0.20
動ポアソン比	0.17	0.25
減衰定数 (%)	5	5

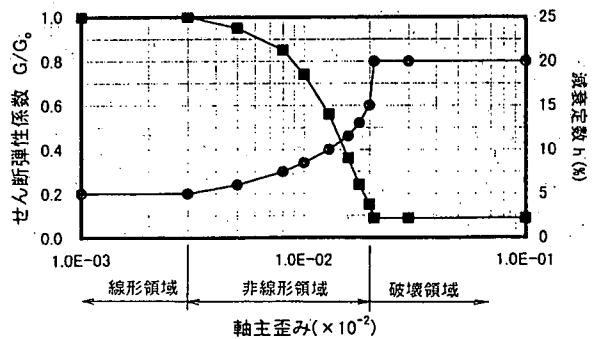


図-8 ダムコンクリートの非線形性(ひずみ依存性)

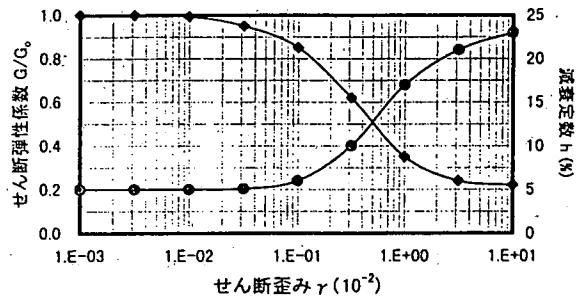


図-9 基礎岩盤の非線形性(ひずみ依存性)

(3) 耐震性の評価結果

ダムおよび基礎岩盤の動的変形特性の非線形性を考慮した三次元等価線形解析によって算出した地震時応力および地震時ひずみの結果を表-7に示す。

ダム底部で最大加速度216galの地震動を作用させた場合、ダム堤体での最大引張応力は $1.26 N/mm^2$ 、最大引張軸ひずみは 0.96×10^{-4} となった。一般的に、コンクリート重力式ダムの地震時引張強度は $3 N/mm^2$ 程度は見込むことができると考えられるが、三次元等価線形解析で算出された最大引張応力は $3 N/mm^2$ よりかなり小さな結果となった。ダムコンクリートの破壊引張軸ひずみについては、既往の研究事例を参考に 2×10^{-4} 程度を設定すると、解析で算出された最大引張軸ひずみ

に関してもこの数値よりも小さい結果となった。

ダム底部で最大加速度 411gal の地震動を作用させた場合においても、ダム堤体での最大引張応力は 2.06N/mm²、最大引張軸ひずみは 1.80×10⁻⁴ であり、想定した判断基準値より小さい結果となった。これらの結果から、ダム底部での最大加速度が約 500gal 程度の地震動に対しては、コンクリート重力式ダムの耐震性が損なわれることはないと考えられる。

表一 7 強い地震動に対する耐震性の評価結果

項目	解析ケース	
	250gal 想定地震動	500gal 想定地震動
ダム天端の最大加速度	687 gal	1496 gal
ダム底部の最大加速度	219 gal	411 gal
加速度応答倍率	3.1	3.6
伝達係数のピーク周波数	5.25 Hz	5.25 Hz
天端での最大相対変位	2.70 cm	4.28 cm
最大圧縮ひずみ (×10 ⁻⁴)	-0.78	-1.52
最大引張ひずみ (×10 ⁻⁴)	0.96	1.80
最大せん断ひずみ(×10 ⁻⁴)	0.71	1.33
最大圧縮応力 (N/mm ²)	-3.30	-4.35
最大引張応力 (N/mm ²)	1.26	2.06
最大せん断応力 (N/mm ²)	1.86	2.32

5. まとめ

1993年1月15日に発生した釧路沖地震の際の現地震時挙動について、三次元動的解析により再現解析を行ない、既設コンクリート重力式ダムの地震時変形特性を定量的に評価した。その結果、ダム堤体の動的せん断剛性は 11,032N/mm² (S波速度 2140m/s)、材料減衰定数は 5% と評価された。既設ダムの現地震時挙動は、三次元動的解析によって非常に良く再現でき、これによって、三次元動的解析プログラム“UNIVERSE”の有効性・実用性を実証した。

この再現解析によって同定した三次元動的解析をそのまま用いて、マグニチュード 8 の直下地震を想定し、ダムおよび基礎岩盤の非線形性を考慮した耐震性の評価手法について検討した。ダム底部で最大加速度 411gal の地震動を作用させた場合、ダム堤体での最大引張応力は 2.06N/mm²、最大引張軸ひずみは 1.80×10⁻⁴ であった。コンクリート重力式ダムの地震時引張強度を 3 N/mm² 程度、ダムコンクリートの地震時破壊軸ひずみは 2×10⁻⁴ 程度と想定すると、ダム堤体に地震による損傷が発生することはないと判断することができる。

強い地震動に対するコンクリート重力式ダムの耐震性を適確に評価するためには、ダムおよび基礎岩盤の非線形性を考慮した合理的な評価手法が必要であり、本報では、高レベル地震動に対する耐震性の評価法として、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性の非線形性(ひずみ依存性)を考慮に入れた三次元等価線形解析の有用性を示した。等価線形解析との比

較において、線形解析では、地震時引張応力の算出に関しては安全側の解析になるが、地震時引張ひずみの算出に関しては逆に危険側の解析になる。

高レベル地震動を想定してダムの耐震性能を照査する場合、大きなひずみレベルにおけるダムコンクリートの地震時変形特性をどのように考慮するかが重要な課題である。また、強い地震動に遭遇したコンクリートダム堤体における地震時の損傷としては、クラックの発生が想定されるが、こうした地震時の損傷を評価するには、精度の高い“応力評価”、“ひずみ評価”が必要であり、そのためには、ダムコンクリートの動的非線形特性、地震時の引張強度、地震時の破壊限界ひずみ、クラックの進展メカニズム、クラック発生後の安全性評価手法等について、実際の現象に即した、実証的な研究の積み重ねが必要である。

参考文献

- 1) 畑野正: コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論, 土木学会論文集 第153号 p31~39, 1968.5.
- 2) 永山功, 佐々木隆, 波多野政博: コンクリートの動的引張強度についての検討, 土木技術資料 41-1, p26~31, 1999
- 3) 佐藤正俊, 上田稔, 長谷部宣男, 梅原秀哲: ダムコンクリートの地震時の動弾性係数に関する研究, 土木学会論文集 No.564 V-35 p43~55, 1997
- 4) Ohmachi T., Kataoka S.: Evaluation of dynamic interaction effects of 2-D dam-foundation-reservoir systems, Proc. JSCE Japan, 519, 199~209
- 5) 塩尻弘雄, 上田稔: ダム一岩盤一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 p85~92, 1998
- 6) 三浦房紀, 沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物一地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集第404号, I-11, pp395-404, 1989
- 7) 有賀義明, 渡辺啓行, 吉田昌稔, 曹増延: 三次元ダム一基礎一貯水池連成系における逸散減衰に関する一考察, 第10回日本地震工学シンポジウム E4-18, p2021~2026, 1998.11
- 8) 電源開発株式会社: “UNIVERSE” A Program for the 3-D Static & Dynamic Analysis of Dams, 1999.
- 9) Watanabe H., Cao Z.: Upstream Boundary of Reservoir In Dynamic Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ACSE, Vol.124, p468~470, April 1998
- 10) 有賀義明, 曹増延: 既設コンクリート重力式ダムの現地震時応答の再現解析, 土木学会第54回年次学術講演会 I-B520, I-B-p1036~1037, 1999年9月