

三次元動的解析による非線形性を考慮した コンクリート重力式ダムの耐震性評価について

渡邊 啓行¹・有賀 義明²・曹 増延³

¹フェロー会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

²フェロー会員 博(工) 電源開発株式会社 新エネルギー・技術開発部 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

³Ph.D. 株式会社開発計算センター 科学システム 2部 土木技術室 (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

動的解析によりダムの耐震性を評価する場合、評価結果は、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性等の設定条件に応じて大きく変動する。動的解析によりダムの耐震性評価を行うためには、ダムと基礎岩盤の地震時変形特性の定量的評価、適切な貯水池のモデル化手法等が必要不可欠である。また、強い地震動を想定した場合は、地震時変形特性の非線形性を適正に考慮することが必要になる。そこで、本研究では、まず、釧路沖地震の際に観測された実地震動に基づき、三次元動的解析により糠平ダムの実地震時挙動の再現解析を行い、ダムの地震時変形特性を定量的に評価した。そして、貯水池モデル化の重要性と付加質量法の局限性を指摘し、地震時のダムと基礎岩盤の変形特性の非線形性を考慮した高レベル地震動に対する耐震性の評価手法について検討した。

Key Words : the 1993 Kushiro-oki earthquake, concrete gravity dam, earthquake observation, 3-D dynamic analysis, dynamic shear modulus, damping factor

1. はじめに

わが国では、ダムの耐震設計は、震度法に基づいて行われており¹⁾、コンクリート重力式ダムに関しては、①ダム堤体上流面に鉛直方向の引張応力が発生しないこと、②ダム堤体と基礎岩盤の接触面等においてせん断に対して安全であること、③ダム堤体内の応力が許容応力を超えないことを基本条件として耐震設計がなされている²⁾。一方、数値解析技術の進歩発展に伴い、特に兵庫県南部地震以降は、建設省³⁾、通産省⁴⁾、土木学会^{5),6)}等の調査研究報告を受けて、動的解析によるダムの耐震性の照査が行われるようになってきている。

コンクリート重力式ダムを対象に動的解析を行なうと、ダム堤体には地震時引張応力が発生し、また、地震時応力や地震時ひずみの算出結果は、ダムおよび基礎岩盤の地震時変形特性の設定によって大きく変動する。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的確に評価することが必要不可欠である。

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⁷⁾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^{8),9)}が少なく、また、室内の载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的確に反映したものであるか否かについての実証^{10),11)}は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らかになっていない。

このような必要性から、まず、コンクリート重力式ダムの地震時変形特性を現実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、筆者らは、ダムの地震時変形特性の非線形性を考慮した解析手法、および、ダムの構造継目の地震時挙動を考慮した解析手法について研究しているが、ここでは、地震時変形特性

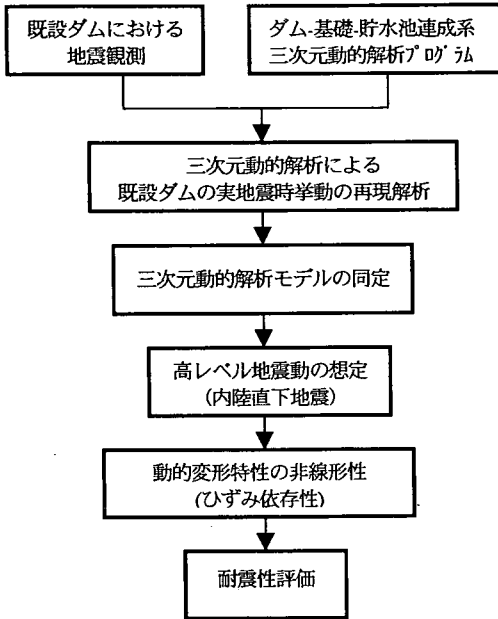


図-1 非線形性を考慮した三次元動的解析による耐震性評価手法の検討の流れ

の非線形性を考慮した三次元動的解析によるコンクリート重力式ダムの耐震性の評価手法について報告する。本研究では、図-1 に示したように、実際の現象に即して、定量的かつ実証的に耐震性評価手法について検討した。

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45.95万 m^3 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

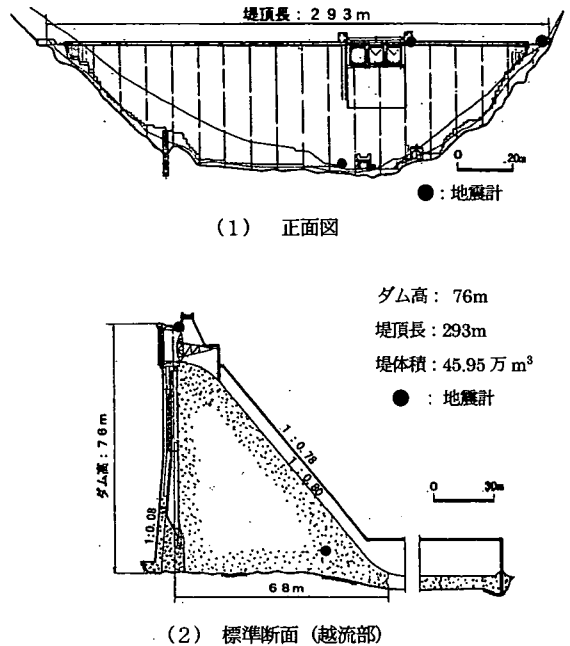


図-2 解析対象ダムの形状と地震計の配置

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. 01. 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	

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-2に示す。

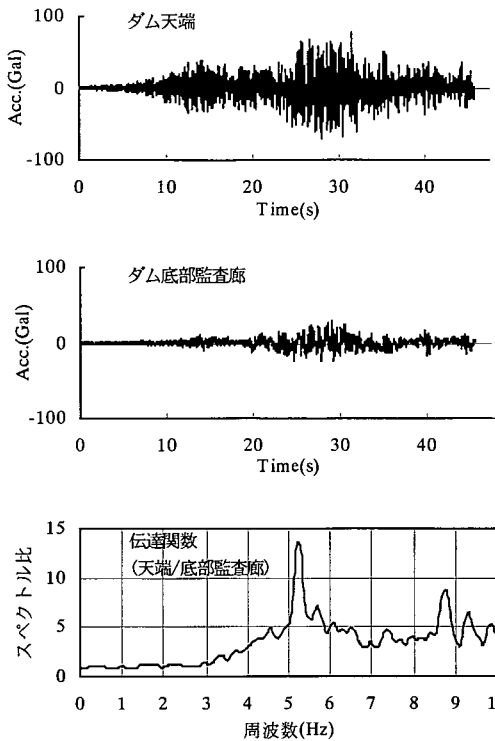


図-3 鉋路沖地震の際に観測された加速度時刻歴と伝達関数 (ダム天端/ダム底部監査廊)

(2) 鉋路沖地震の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の鉋路沖地震(震源位置:北緯42度15分,東経144度22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-3に示すとおりである。

3. 三次元ダム-基礎-貯水池連成動的解析手法の実用化開発

ダムの耐震性を精度良く評価するためには,ダムと基礎岩盤との相互作用,ダムと貯水池との相互作用,基礎岩盤の境界から半無限自由地盤へのエネルギーの逸散,貯水池境界を透過するエネルギーの損失等,地

震時の様々な影響要因を正しく考慮することが必要である。そこで,本研究では,三次元ダム-基礎-貯水池連成動的解析プログラムの実用化開発を行なった。

(1) ダム-基礎-貯水池の連成

ダム-基礎-貯水池の連成解析手法については,多数の研究事例がある^{12),13)}。これらの既往の研究を参照しながら,動水圧問題,基礎岩盤の境界問題,自由地盤の取扱い,数値解法の効率などに重点を置いて,解析手法の厳密性と実用性を追求した。

本研究で開発した三次元解析プログラム“UNIVERSE”では,ダムと基礎岩盤と貯水池の連成を次式のように表現している^{14),15)}。

$$\begin{bmatrix} M_d & M_{df} \\ M_{fd} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_d \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_d & C_{df} \\ C_{fd} & C_f^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_d \\ \dot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_d & K_{df} \\ K_{fd} & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_d \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_w \\ T_e + T_f \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{C_0^2 \partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (1.2)$$

$$\begin{bmatrix} M_g \\ C_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_g \\ \dot{u}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_b \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

式(1.1)は,ダムと基礎岩盤,式(1.3)は,自由地盤の運動方程式であり,式(1.2)は,貯水池の波動方程式である。 M, C, K は,それぞれ質量,減衰,剛性マトリックスである。添字 $d, df (fd), f, g$ は,それぞれダム,ダムと基礎岩盤との連結部,基礎岩盤,自由地盤を意味する。 u, \dot{u}, \ddot{u} は,変位,速度,加速度ベクトルを表す。 F_w は,貯水の動水圧荷重であり, T_e と T_f は,それぞれ基礎岩盤の底面に作用する地震荷重と自由地盤の運動により基礎岩盤の側面に作用する力である。 T_b は,自由地盤底面に作用する地震荷重である。 ϕ は,貯水粒子運動速度ポテンシャル関数である。 x, y, z は,デカルト座標であり, t は,時間である。 C_0 は,水中音速である(=1440 m/s)。 C_f^* は,粘性境界の成分を含み,基礎岩盤の減衰マトリックス C_f と粘性境界マトリックス C_b との和である($C_f^* = C_f + C_b$)。ここで導入している粘性境界マトリックス C_b は,仮想仕事原理に基づいて導かれたもので,従来の粘性境界マトリックス¹⁶⁾より,エネルギー吸収能が格段に向上している。詳細な論述は,参考文献^{15),17)}を参照されたい。

式(1.1)と式(1.3)は,有限要素法により定式化し,式(1.2)は,有限差分法により定式化している。そして,式(2.1)と式(2.2)に示した連成条件によって,ダム-基礎

岩盤-貯水池を連成させている。これによって、複雑な形状と材料分布を持つ構造系への有限要素法の適用と波動問題への有限差分法の適用を明快に結合させている。また、この連成系の数値解法としては、有限要素の部分に対しては三次元構造解析用ICCG法¹⁶⁾、有限差分の部分に対しては並列計算のICCG法¹⁹⁾を用い、計算の高速化、マトリックスのコンパクト化を図っており、自由地盤を含むダム-基礎-貯水池連成系の大規模な解析への適用を実現している。

(2) 連成条件

ダムと貯水池の連成条件は、次式のとおりである。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_d & (2.1) \\ F_w = P_w & (2.2) \end{cases}$$

式(2.1)は、ダムと貯水池の連続面において水粒子の運動速度 $\partial \Phi / \partial n$ はダムの運動速度と等値であることを示し、式(1.2)の境界条件として取扱う。そして、次式(3)により動水圧を計算し、この連続面での動水圧をダムの外荷重と見なす。

$$P_w = \rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

ここに、 ρ_w は水の密度である。

ダムと基礎岩盤との連成については、式(1)によって相互作用が自然に考慮される。自由地盤の運動により基礎岩盤の側方境界に作用する力 T_f は、次式(4)により得られる。

$$\{T_f\} = [K_b]\{u_g\} + [C_b]\{\dot{u}_g\} \quad (4)$$

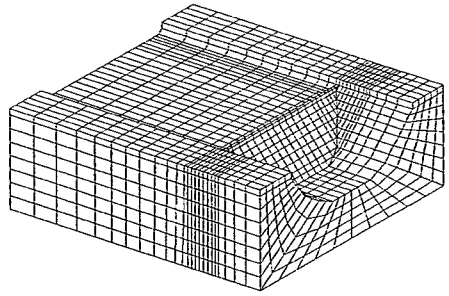
ここに、 $[K_b]$ は、基礎岩盤の側方境界の剛性マトリックスであり、基礎岩盤に対する自由地盤の相対変位の影響を評価するものである。これについての詳細は、参考文献^{15),17)}を参照されたい。 $[C_b]$ は前出した粘性境界マトリックスである。

(3) 境界条件

前述したように、基礎岩盤の周辺には半無限の自由地盤を取込んでいるので、この連成系で処理しなければならないのは貯水池の境界のみである。

貯水池の境界については、貯水池底面の堆積物によるエネルギーの吸収、上流端でのエネルギーの逸散を考慮している²⁰⁾。貯水池の底面(両岸の斜面を含む)及び上流端境界を通る波動エネルギーの逸散は次式(5)で表す。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - C_0 \beta \frac{\partial \Phi}{\partial n_r} = 0 \quad (5)$$



(側方粘性境界, 下方剛基盤)

図-4 三次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成解析モデル

ここに、 β は、境界内外の媒体のインピーダンス比であり、 n_r は、境界面の法線方向を意味する。

貯水池の自由表面では、式(6)で示す表面波条件を用いる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (6)$$

ここに、 g は重力加速度である。

4. 三次元的解析による実地震時挙動の再現

(1) 再現解析の方法

実地震時挙動の再現解析に際しては、まず、予備解析として、地震観測データに基づきダムの基本的な動的特性(固有周波数、減衰定数)を評価し、また、三次元解析モデルを用いてダム底部監査廊で観測された地震動を下方基盤まで引き戻しを行った。次に、ダムコンクリートの一般的な密度を設定し、剛性を調整しながら、固有値解析結果と観測されたダムの固有周波数が一致するように堤体の固有値解析を行った。これらの予備解析の後、解析プログラム“UNIVERSE”を用いて、ダム天端の加速度時刻歴およびダム底部に対するダム天端の伝達関数に関して、観測結果と解析結果が合うように実地震時挙動の三次元再現解析を行った。

(2) 再現解析モデル

糠平ダムの実地震挙動の再現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-4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、波動方程式を差分法で定式化した貯水モデル¹⁵⁾でモデル化した。

(3) 再現解析用物性値

ダムコンクリートの剛性については、ダム底部監査

表-2 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)	2.40
動的せん断剛性 (N/mm ²)	11,032
動ポアソン比	0.20
減衰定数 (%)	5.00
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)	2.60
動的せん断剛性 (N/mm ²)	9,380
動ポアソン比	0.30
減衰定数 (%)	5.00
せん断波速度 (m/s)	2,059

廊に対するダム天端の伝達関数における1次ピークの周波数が固有値解析の結果と合うように、ダムコンクリートの動的せん断剛性を調整して定めた。また、この伝達関数においてハーフパワー法により減衰定数を評価した。ダムの質量密度とポアソン比はダムコンクリートの一般的な値を用いた。基礎岩盤の剛性、密度及びポアソン比はダム建設当時の調査試験結果を参考に設定した。減衰定数はダム底部観測廊で観測された地震動のスペクトルから評価した。これらの作業により、ダムおよび基礎岩盤の動的物性を設定し、釧路沖地震時のダム応答の再現解析に用いた。具体的な値を表-2に示す。

(4) 再現解析での入力地震動

再現解析では、ダム底部監査廊で観測された実地震動を堤体と基礎岩盤の地震時相互作用を考慮して下方入力基盤での地震動に変換して入力した。前出図-3に示した地震動の内、18.05秒から38.53秒までの20.48秒間(刻み 1/100秒)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関数(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、ダムと基礎岩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一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-5に示したように、解析モデル

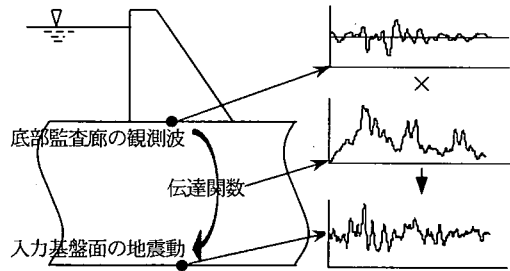


図-5 動的解析モデルの伝達関数を利用した地震動の引き戻し計算方法

表-3 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	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
伝達関数のピーク周波数 (水平上下流方向)		5.2Hz

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。

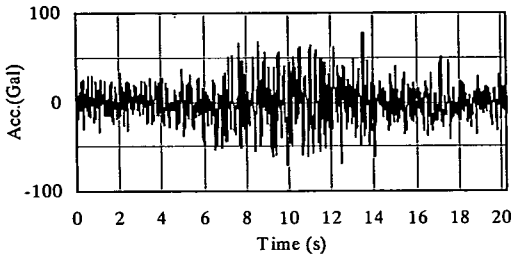
(6) 再現解析結果

実地震観測結果と三次元再現解析結果の比較を表-3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-6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-7に示す。

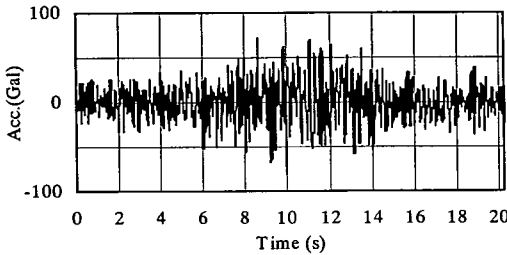
図-6および図-7から明らかなように、ダム-基礎岩盤-貯水池連成モデルを用いた三次元動的解析によって、糠平ダムの実地震時挙動を非常に良く再現することができた。この三次元再現解析によって定量的かつ実証的に評価した、糠平ダムの地震時変形特性は、動的せん断剛性 11,032N/mm²(S波速度 2140m/s)、減衰定数 5%であった。なお、糠平ダムの三次元再現解析は、これまでに市販の解析プログラムを用いた解析も実施したが、それらでは、結局良い再現結果は得られなかった。ここに示した三次元再現解析の再現性の高さは、三次元動的解析プログラム“UNIVERSES”の有効性・実用性の高さを示すものと考えられる。

(7) 三次元解析の必要性和有効性

既往の研究では、二次元動的解析による解析評価事例が数多く報告されているが、二次元動的解析の精度・信頼性がどの程度あるかについては、まだ十分な実

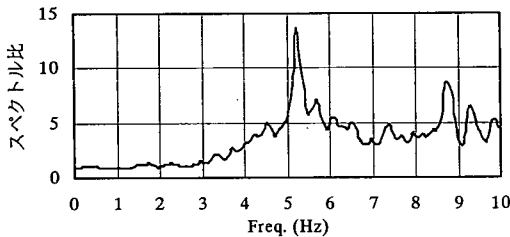


(1) 地震観測結果

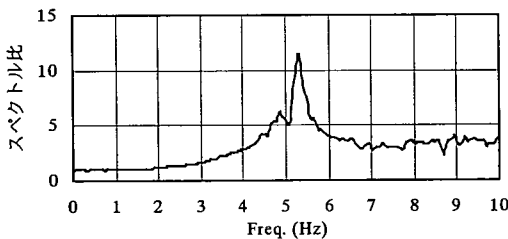


(2) 三次元再現解析結果

図-6 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-7 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

証が行なわれていない。本研究では、地震観測で得られた既設ダムの実地震時挙動を再現する過程の中で、様々な条件設定で数多くの二次元動的解析および三次元的動的解析を行なった。その結果、二次元動的解析では、現実に発生している、ダムと基礎岩盤と貯水池との地震時相互作用を的確に再現することができないことを示す結果を得た。動的解析手法の精度・信頼性を検証するためには、現実に発生した実地震時挙動に基づいた研究が必要不可欠である。数値解析による比較検

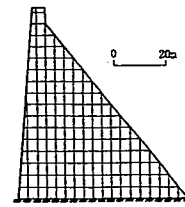
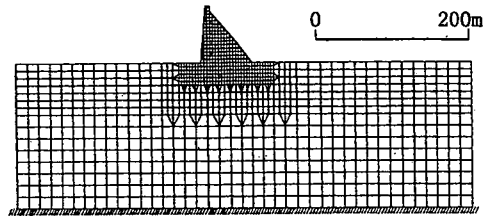


図-8 二次元ダム堤体モデル



(反射境界 : 側方水平ローラ, 下方剛基盤)
(無反射境界 : 側方伝達境界, 下方粘性境界)

図-9 二次元ダム-基礎岩盤連成モデル

討だけでは、何が真の値かが分らないので、定性的な論議は可能ではあっても定量的な論議ができない。この点を解決するために、本研究では、現実に実ダムで生じた地震時挙動を真値として再現解析を行ない、二次元解析と三次元解析の精度・信頼性について実証的な検討を行なった。

比較に用いた二次元解析モデルは、既往の研究で最も多用されている手法として、ダム堤体だけをモデル化した二次元堤体モデル(図-8 参照)とダムと基礎岩盤を連成させた二次元連成モデル(図-9 参照)を設定した。二次元連成解析モデルに関しては、波動エネルギーの逸散効果を考慮できない反射境界(側方: 水平ローラ, 下方: 剛基盤)を設定した場合と波動エネルギーの逸散効果を考慮できる無反射境界(側方: エネルギー伝達境界, 下方: 粘性境界)を設定した場合について比較検討した。

地震動の入力は、二次元堤体モデルではダム底部監査廊で観測された実地震動をそのまま下方基盤より入力し、二次元連成モデルでは、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伝達関数を用いて下方基盤の入力地震動に変換し入力した。二次元解析では、水平上下流方向と鉛直方向の2方向同時入力とした。貯水についても、ここでの比較解析では、既往の研究で最も多用されている、Westergaard の式²⁰⁾による付加質量法でモデル化した。現行の二次元動的解析として、最も一般的に多用されている手法に基づいて、糠平ダムの実地震時挙動の再現解析を行ない、ダムおよび基礎岩盤

表-4 動的変形特性に関する三次元再現解析結果と二次元再現解析結果の比較

解析条件	動的せん断弾性係数(N/mm ²)	減衰定数 (%)	
		ダム堤体	基礎岩盤
三次元連成モデル (無反射境界)	ダム:11,032 基礎:9,380	5	0
二次元堤体モデル (剛基礎)	ダム:11,032	20	—
二次元連成モデル (反射境界)	ダム:11,032 基礎:9,380	10	15
二次元連成モデル (無反射境界)	ダム:11,032 基礎:9,380	10	10

《備考》貯水池は、三次元解析では貯水池モデルで、二次元解析では Westergaard の付加質量法でモデル化

の動的変形特性を同定した結果を表-4 に示す。

これらの結果から、ダムの動的せん断剛性に関しては、二次元解析でも三次元解析でも同様の結果が得られたが、減衰定数に関しては、三次元解析と二次元解析では大きな差が生じた。二次元解析相互間の比較においても、基礎岩盤のモデル化や境界条件の設定方法によって、減衰定数の同定結果は大きな相違が生じた。こうした差異が生じた基本的な原因は、一つは動的解析における波動エネルギーの逸散の考慮の問題、もう一つは貯水池のモデル化の問題である。波動エネルギーの逸散の取扱い如何によって減衰定数の数値が大きく変えることは、既往の研究でも指摘されているが、貯水池のモデル化が減衰定数の数値に大きな影響を及ぼすことはまだ十分に認識されていない。Westergaard の式に代表される、貯水池の動水圧の影響を付加質量法で模擬する手法は、従来のダムの動的解析で非常に良く多用されているが、付加質量法では、ダムの固有振動数を便宜的に再現することは可能であるが、貯水池とダムの地震時の相互作用効果を的確に再現することはできないと考えられる。付加質量法を用いた解析では、貯水のない空虚時の解析よりもダムの揺れは大きくなり、その結果として、大きな減衰定数を設定することが必要になる。

一方、実際のダムでは、貯水池の存在がダムの振動エネルギーを逸散させる。この効果を再現できることが重要であり、ここに示した比較解析の結果、精度・信頼性の高い耐震性評価を行なうためには、“二次元解析、付加質量法、反射境界”では不適切であり、“三次元解析、貯水池モデル、無反射境界”が必要であることが明らかである。二次元解析と三次元解析との比較から、減衰定数の考え方について考察した結果を表-5 に示す。

表-5 に示した付加的な減衰定数（付加減衰定数）は、動的解析におけるエネルギーの逸散が十分に考慮されている場合は見込む必要はなく、エネルギーの逸

表-5 減衰定数に関する考察

解析モデルと境界条件	減衰定数 (%)			
	ダム堤体		基礎岩盤	
	材料減衰	付加減衰	材料減衰	付加減衰
三次元連成モデル (無反射境界)	5	0	5	0
二次元堤体モデル (剛基礎)	5	15	—	—
二次元連成モデル (反射境界)	5	5	5	10
二次元連成モデル (無反射境界)	5	5	5	5

《備考》三次元解析：貯水池モデル

二次元解析：Westergaard の付加質量法

散効果が十分に考慮できない場合には便宜的かつ付加的に見込むべきものである。本研究における糠平ダムの事例解析の結論として、材料減衰定数については、ダム堤体および基礎岩盤ともに統一的に 5% と評価することができた。ダム堤体に関する付加減衰定数については、二次元堤体解析モデルでは 15%、二次元連成解析モデルでは 5% を見込む必要がある。基礎岩盤に関する付加減衰定数は、反射境界を設定した二次元連成解析モデルでは 10%、無反射境界を設定した二次元連成解析モデルでは 5% を見込む必要がある。無反射境界を設定した三次元ダム-基礎岩盤-貯水池連成解析モデルでは、波動エネルギーの逸散効果が動的解析の中での確に考慮されるので付加的な減衰定数を与える必要はない。なお、ダムの地震応答に対するダム堤体と基礎岩盤の波動インピーダンス比の影響については、二次元モデルの場合は、三次元モデルの場合より顕著に現れる。特に基礎岩盤がダム堤体より著しく軟らかい場合、波動インピーダンスの小さい領域から大きい領域へと地震動が伝搬する際に高周波の成分になるほど伝搬しにくくなるという現象が起り得るので、解析結果の評価、考察を慎重に行うべきである。

5. 非線形性を考慮した強い地震動に対する耐震性評価手法の検討

既設ダムの耐震性を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について検討した。強い地震動に対する耐震性を評価する際には、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察されることから、ここでは、ひずみ依存性を考慮した三次元等価

表-6 模擬地震動の作成条件

目標設定値 (gal)	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
750	8.0	20	658gal

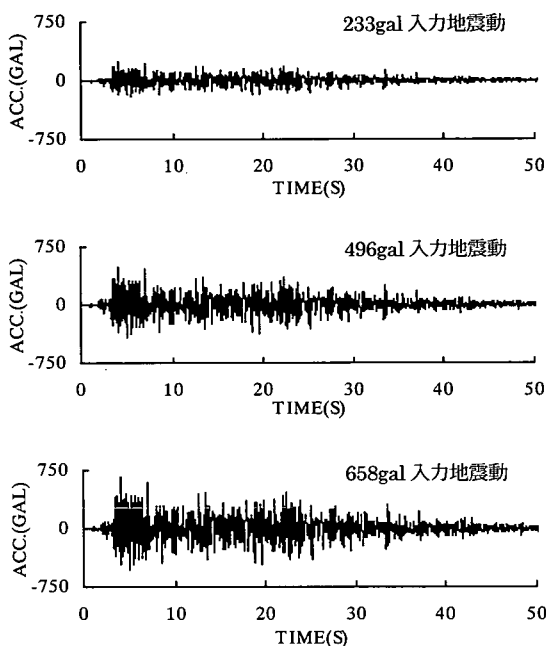


図-10 想定した入力地震動

線形解析について研究した。

(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-6に示したように、基礎岩盤表面での目標最大加速度を250gal、500gal、750galに設定し、大崎スペクトルに基づく経験的手法により作成した。作成した模擬地震動は、図-10に示したとおりである。

(2) 耐震性評価用解析モデル

強い地震動に対する耐震性を評価するための解析モデルとしては、糠平ダム の三次元再現解析において同定した解析モデル(前出図-4)をそのまま使用した。また、強い地震動を想定した耐震性評価に関する、二次

表-7 耐震性評価に用いた物性値

項目	ダム	基礎岩盤
密度 (t/m^3)	2.4	2.6
静弾性係数 (N/mm^2)	20580	3920
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

元解析と三次元解析の比較検討に際しては、前出図-8の二次元ダム堤体解析モデルを使用した。

(3) 非線形性の想定

強い地震動を受けた場合、ダム堤体および基礎岩盤内では、地震時のひずみが増大するにつれて、これらの材料の応力-ひずみ関係には非線形性が現れるものと考えられる。このような非線形性を考慮する方法のひとつとして、弾塑性解析があるが、弾塑性解析に必要なパラメーターを定量的かつ実証的に設定することは現状では難しい。そこで、本研究では、簡便かつ実用的にダム堤体の非線形性を考慮する手法として、地盤材料に良く適用されている等価線形化法の適用性について検討した。

周知のように、コンクリート材料は、圧縮側と引張側の強度特性及び破壊ひずみレベルが明確に異なる。しかし、弾性係数及び粘性係数(減衰係数)は、圧縮側でも引張側でもほとんど同じであることが畑野²³⁾の研究により実証されている。また、破壊段階に入っても、引張クラックが生じた材料は、圧縮状態に戻る時の圧縮剛性係数も低下していることから、引張側と圧縮側の剛性係数がともに引張側のひずみレベルに依存する可以考虑することができる。一方、ダムのような大規模大容積のコンクリート構造物が、マクロの視点から見るとコンクリート供試体のように脆性破壊を起こす可能性は非常に少ないと考えられる。これらのことから、コンクリートの弾性係数をひずみ依存型の非線形性として考慮することの可能性について検討した。

図-11に示したのは、載荷速度を速くして実施された一軸引張試験から得られた、コンクリートの応力-ひずみ曲線である。これを参考に、ダムに関しては、図-12に示したような引張過程における非線形性を想定した。図-12の横軸は、引張軸ひずみをとっている。破壊引張軸ひずみは、 2×10^{-4} と想定し、引張破壊領域での動的剛性と減衰定数は一定と仮定した。非常に強い地震動に対する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-7に示す。基礎岩盤に関しては、既往の岩盤試験の結果を参考に線形弾性材料として表-7に示す物性値を設定した。

表-8 貯水池のモデル化の影響
(最大振幅 233gal の地震動を入力した際)

貯水池モデル	最大加速度	最大引張応力	最大引張軸ひずみ
空虚時	802gal	0.52N/mm ²	0.62×10 ⁻⁴
付加質量法	992gal	1.40N/mm ²	1.20×10 ⁻⁴
貯水池モデル	687gal	1.26N/mm ²	0.96×10 ⁻⁴

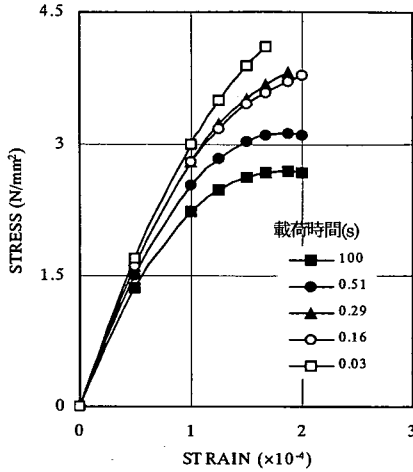


図-11 ダムコンクリートの引張応力～ひずみ関係⁷⁾

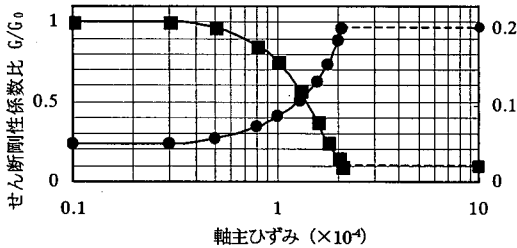
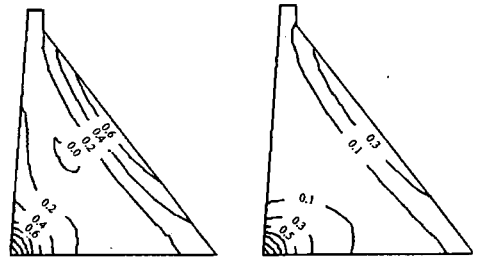


図-12 ダムコンクリートの引張過程における非線形性(ひずみ依存性)

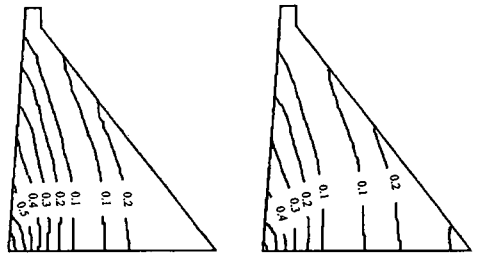
(4) 評価結果

a) 貯水池のモデル化が地震時応力に及ぼす影響

地震時のダムの応答に対する貯水池のモデル化手法の影響について、貯水池をモデル化しない場合(空虚時)、貯水を付加質量法で模擬した場合及び筆者らが開発した貯水池連成モデルでモデル化した場合の比較検討を行った。貯水池のモデル化手法の影響は、入力地震動の加速度レベルが大きい場合でも、同じ傾向を示したので、ここでは、代表事例として、最大振幅233galの地震動を入力した解析ケースについて、貯水池のモデル化が、ダム堤体に発生する地震時引張応力および地震時引張軸ひずみに対してどのような影響を及ぼすかを検討した結果を表-8に示す。また、図-13と図-14に、付加質量法と貯水池連成モデルに関する、



(1) 付加質量法 (2) 貯水池モデル
図-13 最大引張応力の分布 (N/mm²)



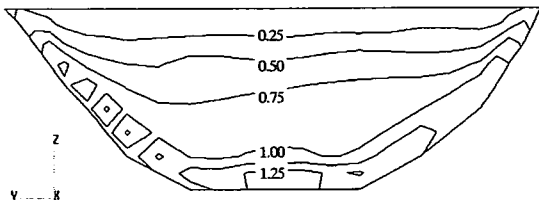
(1) 付加質量法 (2) 貯水池モデル
図-14 最大引張軸ひずみ分布 (×10⁻⁴)

表-9 強い地震動に対する耐震性の評価結果

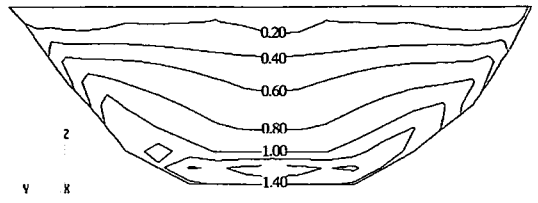
項目	入力地震動レベル(gal)		
	233	496	658
ダム天端の最大加速度(gal)	687	1496	2325
ダム底部の最大加速度(gal)	219	411	605
加速度応答倍率	3.1	3.6	3.8
伝達関数のピーク周波数(Hz)	5.25	5.25	5.25
天端での最大相対変位(cm)	2.70	4.28	5.96
最大圧縮ひずみ (10 ⁻⁴)	-0.78	-1.52	-2.35
最大引張ひずみ (10 ⁻⁴)	0.96	1.80	2.69
最大せん断ひずみ(10 ⁻⁴)	0.71	1.33	1.99
最大圧縮応力 (N/mm ²)	-3.30	-4.35	-5.39
最大引張応力 (N/mm ²)	1.26	2.06	2.99
最大せん断応力(N/mm ²)	1.86	2.33	2.78

ダム堤体で生じる最大引張応力分布と最大引張ひずみ分布の比較を示す。

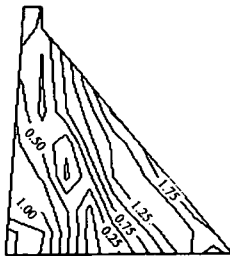
この結果から明らかなように、Westergaardの式に基づく付加質量法では、“UNIVERSE”の貯水池モデルよりも大きな数値が算出される。付加質量法に基づく耐震設計法は安全側の設計になると考えられるが、耐震設計の高度化の視点からは適正な方法ではないと考えられる。空虚時と貯水池モデルの解析結果を比較すると、貯水によって高周波成分が抑えられ、加速度応答は小さくなる反面、低周波成分が助長され、堤体



(1) 上流面の地震時引張応力の分布

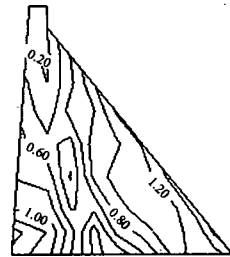


(1) 上流面の地震時引張軸ひずみの分布



(2) 中央断面の地震時引張応力の分布

図-15 最大振幅 658gal の地震動を入力した際の地震時引張応力の分布 (N/mm²)



(2) 中央断面の地震時引張軸ひずみの分布

図-16 最大振幅 658gal の地震動を入力した際の地震時引張軸ひずみの分布 (×10⁴)

の引張応力と引張ひずみは大きくなっている。このような現象は、ダムと貯水との相互作用の影響を明示しており、付加質量法では表現できないと考えられる。

b) 強い地震動に対する耐震性の評価結果

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-9 に示す。また、一例として、ダム底部で最大加速度 658gal の地震動に対する引張応力分布と引張ひずみ分布をそれぞれ図-15 と図-16 に示す。

ダム底部で最大加速度 233gal 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 1.26N/mm²、最大引張軸ひずみは 0.96×10⁴ 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/mm² 程度を見込むことができるが、三次元等価線形解析で算出された最大引張応力は 3 N/mm² 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 2×10⁴ 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 496gal の地震動を作用させた場合は、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 1.80×10⁴ であり、この場合も想定した判断基準値より小さい結果となった。

ダム底部で最大加速度 658gal の地震動を作用させた

場合は、ダム堤体での最大引張応力は 2.99N/mm²、最大引張軸ひずみは 2.69×10⁴ となった。このひずみの大きさは、想定される評価基準値を上回る結果となったが、評価基準値を上回る領域はダム下流側表面に限定されており、堤体を貫通するようなクラックの発生は考えられないことから、糠平ダムの耐震性が損なわれることはないと考えられる。

6. まとめ

1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震の際の実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、糠平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。糠平ダムの実地震時挙動は、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・実用性についても実証することができた。

貯水状態における貯水池のモデル化手法は、解析結果に著しい影響を与える。貯水池をモデル化した場合、貯水によって高周波成分の揺れが抑えられ、加速度応答は小さくなるが、低周波成分は助長され、堤体の引張応力と引張ひずみは大きくなる傾向がある。貯水の影響を付加質量法で考慮した場合、貯水池連成モデル

よりも大きな数値が算出される。そのため、付加質量法に基づく耐震設計法は安全側の設計になると考えられるが、ダム耐震設計の精度、信頼性の向上の観点からは、貯水池連成解析を指向すべきである。地震時のダムの応答に対する貯水の相互作用の影響は、付加質量法によるモデルでは適切に再現することができない。

再現解析によって同定した三次元解析モデルを用いて、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 496gal 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/mm^2 、最大引張軸ひずみは 1.80×10^{-4} であった。ダムコンクリートの地震時引張強度を 3N/mm^2 程度、破壊軸ひずみを 2×10^{-4} 程度と想定すると、糠平ダムについては、地震による損傷が発生することはないと考察することができる。

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的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を評価する手法として、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可能性と有用性を示した。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ことに留意すべきである。

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になる。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な非線形特性、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確認手法等について、今後とも、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と考えられる。

参考文献

- 1) 河川管理施設等構造令(政令第199号:昭和51年7月20日制定)及び同施行規則(建設省令第13号:昭和51年10月1日公布)
- 2) (財)ダム技術所センター:多目的ダムの建設(昭和62

年版)第3巻,pp.109

- 3) ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書, 1995年11月
- 4) 電気設備防災対策検討会報告書, 平成7年11月
- 5) 土木学会耐震基準等基本問題検討会議:土木構造物の耐震基準等に関する提言, 平成7年5月
- 6) 土木学会:土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996年1月10日
- 7) 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, pp.31~39, 1968.5
- 8) 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, pp.26~31, 1999
- 9) 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, pp.43~55, 1997
- 10) 大町達夫, 片岡正次郎:二次元ダム-基礎-貯水系における動的相互作用の評価, 土木学会論文集, 第519号, pp.199-209, 1995.7
- 11) 塩尻弘雄, 上田稔:ダム-岩盤-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
- 12) Chopra, A. K. and Chakrabarti, P.: Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.9, pp.363-383, 1981
- 13) Fenves, G and Chopra, A. K.: Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Reservoir Bottom Absorption and Dam - Water - Foundation Rock Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.12, pp.663-683, 1984
- 14) 有賀義明, 渡辺啓行, 吉田昌稔, 曹増延:三次元ダム-基礎-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, pp.2021~2026, 1998.11
- 15) 電源開発株式会社:“UNIVERSE” A Program for the 3-D Static & Dynamic Analysis of Dams, 1999
- 16) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L.: Finite dynamic model for infinite media, *Proc. ASCE*, EM4, pp.859-877, 1969
- 17) 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-地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集第404号, I-11, pp.395-404, 1989
- 18) 小国 力:行列計算ソフトウェア, WS, スーパーコン, 並列計算機, 丸善, 1991年11月
- 19) 森 正武:Fortranによる数値計算法, 岩波書店, 1988
- 20) Watanabe, H. and Cao, Z.: Upstream Boundary of Reservoir

In Dynamic Analysis, *Journal of Engineering Mechanics*,
ACSE, Vol.124, pp.468~470, April, 1998

21) Westergaard, H. M.: Water Pressures on Dams during
Earthquakes, *Trans. ASCE*, Vol.98, pp.418-433, 1933

22) 畑野 正: 衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動, 土木
学会論文集, 第73号, pp.28-34, 昭和36年3月

(2001. 1. 25 受付)

EARTHQUAKE RESISTANCE OF A CONCRETE GRAVITY DAM REVALUATED WITH 3-D NONLINEAR ANALYSES

Hiroyuki WATANABE, Yoshiaki ARIGA and Zengyan CAO

In this study a hybrid coupling method for the dynamic analysis of dam – foundation – reservoir system has been developed. With this method, 3-D dynamic analyses were carried out to simulate the actual earthquake behaviors of an 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 $11,032\text{N/mm}^2$, and the material damping factors of the dam and the foundation are evaluated to be 5%. With the identified analytic model, the reevaluation of the seismic stability of the dam against very strong earthquake was done considering the non-linearity of dam and foundation materials. Furthermore, it is pointed out that the interaction between dam and reservoir exerts an important effect on the dam responses, and the added mass method can not give an accurate solution.