

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

有賀 義明¹・曹 増延²・渡邊 啓行³

¹フェロー会員 博(工) 電源開発(株) 技術開発センター (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88)

² Ph.D. (株) 開発計算センター エンジニアリング事業部 (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

³ 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)

非常に強い地震動に対するアーチダムの耐震性評価の精緻化を目的として、ジョイントの非連続的挙動の影響を考慮した、ダム-ジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元動的解析手法を開発した。本研究で開発した三次元動的解析手法の実用性については、高さ 116.5m、堤頂長 311m の既設アーチダムの実地震時挙動の再現解析により検討した。そして、三次元再現解析により同定した既設アーチダムの解析モデルを用い、マグニチュード 8 クラスの直下地震を想定して、ジョイントの非連続的挙動を考慮した場合の高レベル地震動に対するアーチダムの耐震性について考察した。

Key Words : existing arch dam, contraction and peripheral joints, 3D dynamic analysis, strong earthquake motion, coupled dam-reservoir-foundation system

1. はじめに

アーチダムは、コンクリートの乾燥収縮や温度変化に起因するクラックの発生を防止するために、ダム堤体を複数のブロックに分けて建設されており、ブロックとブロックの間に設けられる継目は、一般にコントラクション・ジョイント (contraction joint : 収縮継目) と呼ばれている。また、基礎岩盤とダム堤体の間に設けられる継目は、ペリフェラル・ジョイント (peripheral joint : 周辺継目) と呼ばれている。コントラクション・ジョイントおよびペリフェラル・ジョイントを総称して、ここでは、ジョイントと記すが、非常に強い地震動を受けた際にジョイントがどのように挙動するか、また、ジョイントが挙動した場合にダム全体の地震時安全性にどのような影響を及ぼすかが、重要な課題であると考えられる。

アーチダムに関しては、1970 年代以降、地震観測や模型実験、数値解析等により、堤体の地震時応答やジョイントの挙動等に関する研究が行われている¹⁾²⁾³⁾。その代表的事例としては、Pacoima ダムに関する研究を挙げることができる⁴⁾。Pacoima ダムでは、1994 年の Northridge 地震の際にジョイントでの開口が観察され、地震後、多くのジョイントは閉合したが、ブロック間でジョイントの残留変位が観察された。堤体コンクリートに関しては、微細な亀裂は発生したが、大きな損傷は発生しなかった。こうした実例から、非常に強い地震動を受けたアーチダ

ムに関しては、堤体材料の力学的特性や材料非線形性よりも、ジョイントの地震時挙動の方が、ダムの地震時安全性に支配的な影響を及ぼすものと考えられる。

数値解析による研究では、ジョイント要素を用いた解析手法が開発され、地震時のジョイントの挙動を概ね表現することができるようになりつつある⁵⁾⁶⁾。しかし、従来の研究事例では、多数のジョイントの内、代表的なジョイントを限定的にモデル化し、ジョイントのすべり挙動を無視した手法が一般的である。また、耐震性の評価において重要な影響を及ぼす貯水池の取り扱いに関しては、付加質量によってモデル化する手法がほとんどであるが、これまでの筆者らの研究から、付加質量法による動的解析では、ダム堤体に発生する応力、ひずみが過大に評価される傾向があるため、概して安全側の耐震性評価にはなるが、ダムと貯水池との地震時相互作用を正確には再現することが難しい等の知見を得ている。特に、ジョイントの地震時挙動を考慮しようとする解析では、貯水池のモデル化が解析結果に非常に大きな影響を及ぼすので、ダムと貯水池との連成効果を厳密に再現することができる三次元動的解析法が必要である。

このような必要性から、本研究では、非常に強い地震動を受けたアーチダムの耐震性評価の精緻化を図るために、ダム-ジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元動的解析法を開発した。開発した解析法の有効性については、地震観測で記録された、既設アーチダムの実地

震時挙動の三次元再現解析を行い、実現象に即して検討した。解析対象とした既設アーチダムは、1972年に建設された、高さ116.5m、堤頂長311mの新豊根ダムである。また、解析対象とした地震は、1997年3月に豊橋市付近で発生したマグニチュード5.8の地震である。この地震の際に、新豊根ダムのクレスト中央では1000.2galの地震動が観測された。

更に、再現解析により同定した、新豊根ダムの三次元解析モデルを用いて、最大級の内陸直下地震としてマグニチュード8クラスの地震を想定し、ダム堤体のジョイントの非連続的挙動を考慮した場合のアーチダムの耐震性について考察した。

2. 本研究の特徴

本研究の主な特徴は、①強震時の非連続的挙動を考慮するために、三次元接触面要素を用いてジョイントをモデル化していること、②貯水池は、波動方程式を差分法によって離散化した手法によりモデル化していること、③実現象に基づき実証的に研究するために、地震観測で得られた実ダムの実地震時挙動の再現解析を検討の基本としていること、④再現解析によって同定した三次元解析モデルを用いて、高レベル地震動に対するアーチダムの耐震性について検討していることである。

3. ジョイントの非連続的挙動を考慮できるアーチダムの三次元動的解析法

(1) 概要

アーチ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、貯水池底面および貯水池上流端におけるエネルギーの逸散等を正確に解析することが必要である。更に、非常に強い地震動に対する耐震性を評価する際には、ジョイントや亀裂での非連続的挙動を的確に考慮することが必要である。本研究では、既往の研究^{7,8)}を踏まえ、特に、ダムと貯水池との相互作用、基礎岩盤におけるエネルギーの逸散、ジョイントのモデル化に重点を置いて、三次元解析手法の厳密性と実用性を追求した。

三次元動的解析におけるダムと貯水池との動的相互作用については、厳密な連成理論に基づく貯水池モデルによって考慮した。ダムと基礎地盤の動的相互作用については、半無限自由地盤モデルを導入し、半無限自由地盤へのエネルギーの逸散ならびに自由地盤の影響を考慮した。ジョイントのモデル化については、三次元接触面要素を用いて、ジョイントの剥離(開口)と滑動を考慮した。

本研究で開発した、ダム-ジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元動的解析法⁹⁾(解析プログラム“UNIVERSE”)について、理論概要を以下に記す。

(2) ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の解析法

a) 基本方程式

ダム-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元動的解析の基本解法は、式(1)に示すとおりである。

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

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

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

式(1.1)は、ダムと基礎岩盤の運動方程式、式(1.3)は、自由地盤の運動方程式、式(1.2)は、貯水池の波動方程式である。 M 、 C 、 K は、それぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、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、変位ベクトル、速度ベクトル、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与えられる力である。 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(≒1440m/s)である。 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($C_f^* = C_f + C_b$)である。ここで導入している粘性境界マトリックス C_b は、仮想仕事の原理に基づいて導かれたもの¹⁰⁾で、従来の粘性境界マトリックス¹¹⁾よりエネルギー吸収能が格段に向上している。

b) 連成条件

ダムと貯水池の連成条件は、式(2)に示すとおりである。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_d \\ F_w = P_w \end{cases} \quad (2)$$

すなわち、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り、この連続面での動水圧 P_w は、ダムの外荷重と見なされる。

ダムと基礎岩盤との連成については、式 (1) によって動的相互作用が自然に考慮される。基礎岩盤に対する自由地盤の影響 T_f は、式 (3) により与えられる。

$$\{T_f\} = [K_b] \{u_g\} + [C_b] \{\dot{u}_g\} \quad (3)$$

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¹⁰⁾。 $[C_b]$ は、前出の粘性境界マトリックスである。

c) 境界条件

基礎岩盤の下方境界は、剛基盤である。基礎岩盤の側方境界は、粘性境界であり、粘性境界の外側周辺には半無限自由地盤を設定している。

半無限自由地盤は、基礎岩盤の側方境界の外側に設定し、有限要素(層要素)によりモデル化している。半無限自由地盤をダムと基礎岩盤の連成系に取込む手順としては、まず、式 (1.3) により自由地盤の地震応答を解析する。次に、式 (3) により自由地盤の振動によって基礎岩盤に与えられる力 T_f を計算する。そして、 T_f を基礎岩盤底面の入力地震動と合わせて式 (1.1) によって考慮する。貯水池の底面(両岸の斜面を含む)における波動エネルギーの逸散は、式 (4) で表される¹²⁾。

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} - C_0\beta \frac{\partial\Phi}{\partial n_r} = 0 \quad (4)$$

ここに、 β は、境界内外の媒体の波動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。

貯水池の長さを水深の3倍として、貯水池の上流端では、境界の内側と外側がともに水であることから $\beta=1$ であり、式 (4) を貯水池の上流端に適用すると、式 (5) に示す粘性境界条件が得られる。

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} = -C_0 \frac{\partial\Phi}{\partial x} \quad (5)$$

ここに、軸 x は、貯水池の上流方向が正であると仮定している。式 (4) および式 (5) に示したように、水の波動エネルギーに関しては、貯水池の底面では波動インピーダンス比の大きさに応じて吸収され、上流端では、完全に吸収される。

また、貯水池の水面に関しては、表面波条件を適用している。

(3) ジョイントのモデル化

本研究では、ジョイントをモデル化するための接触面要素として、図-1 に示した、三次元接触面要素を用いており、任意形状の不連続面に対応することが可能である。更に、接触面の初期強度、滑動および貯水池との連成も考慮することが可能である。三次元アイソパラメトリック・ソリッド要素と同様の考え方により、要素面内の任意点の座標及び変形は、式 (6) の形状関数を用いて要素の構成節点の値から求められる。

$$\left. \begin{aligned} N_i &= \frac{1}{4}(1+\xi\xi_i)(1+\eta\eta_i)(\xi\xi_i+\eta\eta_i-1) && \text{頂点} \\ N_i &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta\eta_i) && \xi_i=0 \\ N_i &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1+\xi\xi_i) && \eta_i=0 \end{aligned} \right\} \text{辺の中点} \quad (6)$$

また、要素面内の任意点の応力 $\{\sigma\}$ と変位 $\{u\}$ の間には、式 (7) の関係が成立する。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\xi \\ \sigma_\eta \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_\xi & 0 & 0 \\ 0 & K_\eta & 0 \\ 0 & 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_\xi \\ u_\eta \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (7)$$

K_i ($i = \xi, \eta, n$) は、図-1 に示す方向の剛性係数であり、図-2 に示したような特性を有する。即ち、接触面の法線方向に接触面の引張強度 κ 及び静的応力 σ_0 の和を超える引張応力が生じた時に剥離が発生する。2回目以後の剥離に対する抵抗は、静的応力のみである。せん断すべりについては、Mohr-Coulomb の式を用いたせん断強度と接触面内のベクトル方向せん断応力の関係により判定する。アーチダムでは、引張応力の発生が重要な論点になり、引張応力が発生した際に想定される最も重要な非連続的挙動は剥離(開口)であると考えられることから、ここでは、ジョイントのモデル化に際しては、剥離(開口)に重点を置き、滑動に対するシアー・キーの抵抗性については考慮していない。貯水池とダム堤体の接触面要素を連成させる場合は、貯水池の1つの節点に接触面要素の2節点を対応させる。貯水池と接触面要素の対応関係は、図-3 に示すとおりであり、連成条件は、式 (8) に示すとおりである。

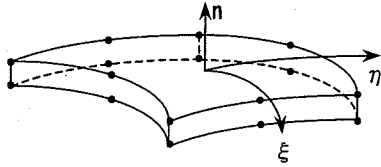


図-1 三次元接触面要素

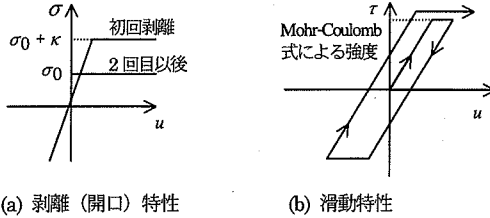


図-2 接触面要素の特性

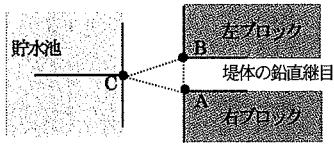


図-3 接触面要素と貯水池の連成関係 (平面図)

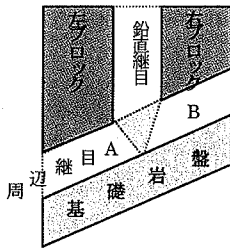


図-4 ダム堤体と基礎岩盤の連成関係 (ダム正面から見た模式図)

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{(V_A + V_B)}{2} & \text{速度条件} \\ P_C = F_A = F_B & \text{圧力条件} \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 Φ 、 n 、 V_A 、 V_B は、順に貯水池の波動のポテンシャル関数、ダムと貯水池との接触面の法線方向、ダムにおけるA点とB点の運動速度である。 P_C 、 F_A 、 F_B は、それぞれ貯水池メッシュのC点の動水圧、ダムのA点とB点の面荷重を意味する

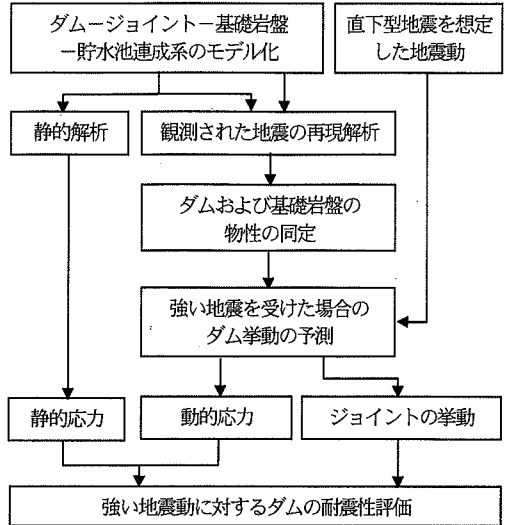


図-5 本研究でのアーチダムの耐震性評価フロー

ダム堤体と基礎岩盤の間に介在するジョイント（周辺継目）のモデル化においては、模式的に図-4に示したように、ダム堤体と基礎岩盤との間に三次元接触面要素を配置している。なお、ここでは、ジョイントが開いた際の、ジョイントの内面に作用する水圧については考慮していない。

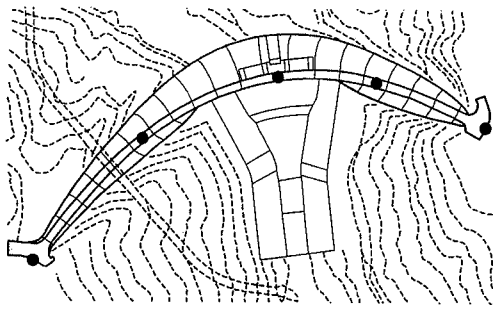
(4) 本研究におけるアーチダムの耐震性評価フロー

本研究では、まず、既設アーチダムの実地震時挙動に関する三次元再現解析を行い、既設ダム及び基礎岩盤の動的物性値を逆解析的に同定した。次に、同定した三次元解析モデルを用いて、非常に強い地震動を想定して地震応答解析を行い、ジョイントの非連続的挙動を考慮した際のダムの耐震性について考察した。また、耐震性評価における貯水池のモデル化の影響を明らかにするために、貯水条件に関して、空虚時と貯水時の比較解析を実施した。本研究におけるアーチダムの耐震性評価フローは、図-5に示すとおりである。

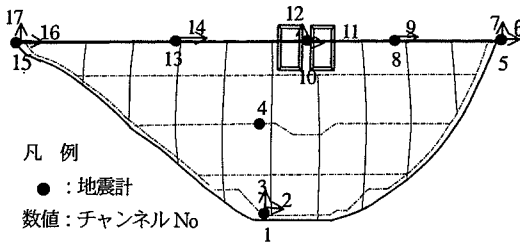
4. 既設ダムの実地震時挙動の三次元再現解析

(1) 三次元再現解析の目的

コンクリートの地震時変形特性は、一般に室内試験によって評価され¹³⁾、ダムコンクリートについても貴重な研究事例^{14)、15)}が報告されている。しかし、室内試験によって評価された地震時変形特性が実際の地震動を受けた実ダムの地震時変形特性を正確に反映したものであるかど



(1) ダムの平面と地震計の配置



凡例

● : 地震計

数値 : チャンネルNo

(2) ダムの下流面と地震計の配置

図-6 新豊根ダムの形状と地震計設置位置

うかに関する実証は、まだ十分になされていない。実地震動に基づいてアーチダムの地震時変形特性を評価した事例としては、池原ダム¹⁶⁾や川浦ダム¹⁷⁾の事例が報告されているが、研究事例は少なく、実ダムの地震時変形特性は、まだ十分には解明されていない。

1997年3月16日にマグニチュード5.8の地震が発生し、震央から35km離れた新豊根ダムにおいて、オリジナルの観測値として、ダムクレスト中央で最大1000.2galの地震動が記録され、ダムの地震時変形特性を定量的に評価するために貴重な地震動データが得られた。そこで、これらの地震動データに基づいて、新豊根ダムの地震時変形特性を定量的に評価するために実地震時挙動の三次元再現解析を行った。

(2) 再現解析の対象とした既設ダム

解析対象とした新豊根ダムは、1972年に建設された、高さ116.5m、堤頂長311m、堤体積34.8万m³のドーム型非対称放射物線コンクリートアーチダムである。堤高と堤体底部の最大幅の比は0.186であり、堤体は薄肉である。また、堤頂長と堤高の比は2.67であり、比較的狭い谷に建設されている。ダムの平面形状と下流側正面図は図-6に示すとおりである。

ダムの基礎岩盤は、主として黒雲母花崗岩によって構成されており、堅硬な岩盤である。花崗岩には、輝緑岩が貫入しており、左岸ダム下流部および右岸ダム基礎上流部に貫入岩体が分布している。地震計は、図-6に示し

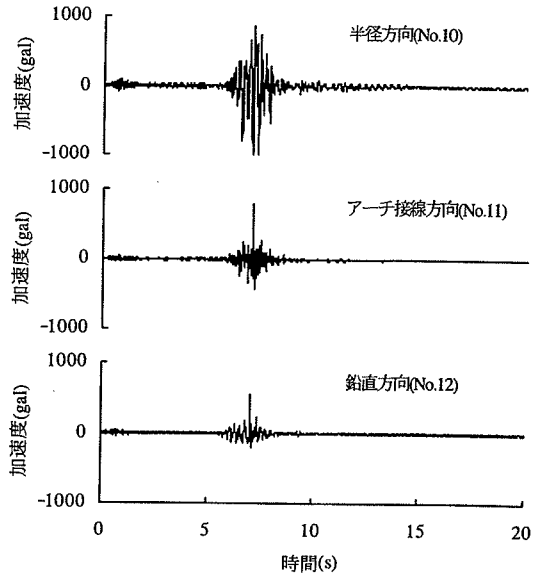


図-7 クレスト中央で観測された加速度時刻歴 (オリジナル)

表-1 新豊根ダムで観測された地震観測記録の概要

| 地震の概要 | | | |
|--------------------|------------|--------------------|-------------------------|
| 発 生 年 月 日 | 1997年3月16日 | | |
| 震 央 | 北 緯 | 34度56分 | |
| | 東 経 | 137度32分 | |
| マグニチュード | 5.8 | | |
| 震 源 深 さ | 38 km | | |
| 震 央 距 離 | 35 km | | |
| 震 源 距 離 | 52 km | | |
| 観測点位置 | 方 向 | オリジナルの 最大値(gal) | 30Hzハイカットの 最大値(gal)* |
| | 半 径 | 1000.2 | 709.2 |
| クレスト中央 | 接 線 | 790.2 | 186.0 |
| | 鉛 直 | 548.4 | 175.1 |
| ダムクレスト 1/4 左岸寄り | 半 径 | 513.8 | 476.4 |
| | 鉛 直 | 110.6 | 104.4 |
| ダムクレスト 1/4 右岸寄り | 半 径 | 564.4 | 550.4 |
| | 鉛 直 | 85.8 | 88.3 |
| ダム中腹中央 | 半 径 | 205.4 | 125.0 |
| | 半 径 | 70.1 | 68.5 |
| ダム底部 監査廊 | 接 線 | 46.2 | 39.5 |
| | 鉛 直 | 46.8 | 45.1 |
| 左岸岩盤 | 半 径 | 44.1 | 44.9 |
| | 接 線 | 56.8 | 57.2 |
| | 鉛 直 | 53.4 | 51.4 |
| 右岸岩盤 | 半 径 | 68.1 | 66.9 |
| | 接 線 | 44.9 | 45.0 |
| | 鉛 直 | 69.9 | 69.7 |

* :30Hz以上の高周波成分をカットした地震動の最大振幅

たように、左岸岩盤、ダムクレスト中央、右岸岩盤、ダム底部監査廊に3成分ずつ、ダムクレスト(1/4左岸寄り)、

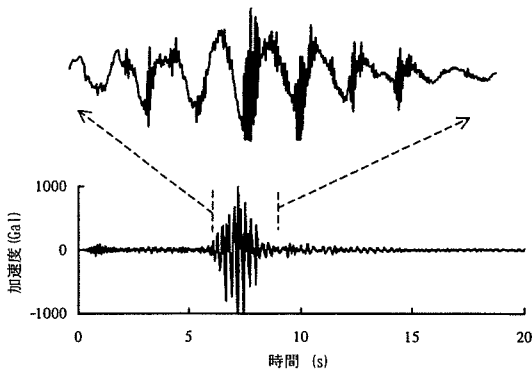


図-8 ダムクレスト中央で観測されたオリジナルの加速度時刻歴（半径方向成分）

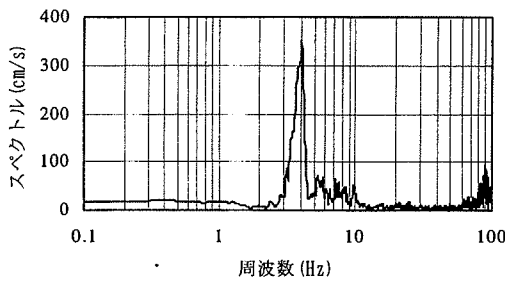


図-9 ダムクレスト中央で観測された加速度時刻歴のフーリエスペクトル

ダムクレスト(1/4 右岸寄り)に2成分づつ、ダム中央中腹部に1成分、計7ヶ所に合計17台設置されている。図-6の●印は、地震計の設置位置を示すとともに、半径方向の観測成分であることを示す。使用した地震計の観測可能周波数は、400Hzであり、サンプリング周波数は、200Hzである。

(3) 再現解析の対象とした地震事象

1997年3月16日、愛知県豊橋市近郊、ダムから35km離れた地点でM5.8（震源深さ38km）の地震が発生し、ダムクレスト中央で1000.2gal、ダム底部監査廊で70.1galの最大加速度の地震動が観測された。地震発生当時、貯水池の水位は約EL.+450m（ダム底面EL.+360m、水深約90m）であった。

観測された最大加速度は、表-1に示すとおりである。表-1には、オリジナルの観測値と30Hz以上の周波数成分をカットした最大加速度値を併記した。これらの内、ダムクレストで観測された加速度時刻歴を図-7に示す。

オリジナルの観測値に特徴的なことは、ダム天端（1/4左岸寄り）およびダムクレスト（1/4右岸寄り）に関しては、半径方向の加速度に比して鉛直方向の加速度が約

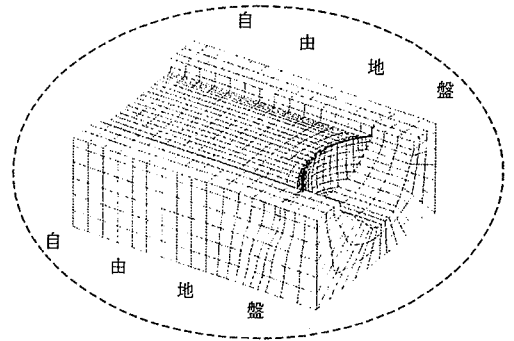


図-10 ダムジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元解析モデル

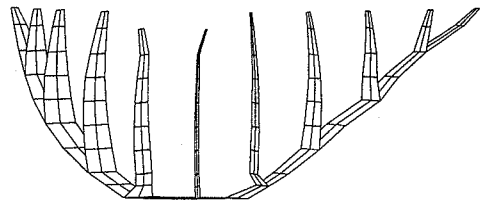


図-11 接触面要素の位置

1/5～1/6であるのに対して、ダムクレスト中央に関しては、半径方向、接線方向、鉛直方向のいずれの加速度も大きいことである。図-8と図-9に示したのは、それぞれダムクレスト中央で観測されたオリジナルの加速度時刻歴とフーリエスペクトルである。図-9から、ダム堤体の主要な揺れである2～10Hzの低周波数成分に加えて、80～100Hzの高周波数成分が多く含まれていることが分る。この高周波成分は、ダム底部監査廊で観測された地震動には見られない。ダムクレスト中央で観測された加速度時刻歴の時間軸を拡大して表示した結果（図-8および図-9）からも、クレスト中央の地震動が、低周波数成分と高周波数成分によって複合的に構成されていることが良く理解できる。この理由については、他の地震観測位置では80～100Hzの高周波数成分が認められないこと、そして、クレスト中央の地震計は、図-6に示したように、2門の洪水吐ゲートの間中部に位置していることから、ダム堤体の主要な揺れは、2～10Hzの低周波数成分であり、80～100Hzの振動成分は、洪水吐ゲートおよびピア部の振動の影響であると考察された。このような判断から、新豊根ダムの再現解析では、30Hz以上の周波数成分をカットした地震動を使用することとした。30Hz以上の周波数成分をカットした場合、クレスト中央の最大加速度は709.2gal、ダム底部監査廊での最大加速度は68.5galとなった。

表-2 再現解析で同定した新豊根ダムの物性値

| 対象 | せん断剛性 G(N/mm ²) | 密度ρ (g/cm ³) | ポアソン 比ν | 減衰定数 H(%) |
|------|--------------------------------|-----------------------------|------------|--------------|
| ダム | 10500 | 2.40 | 0.20 | 5 |
| 基礎地盤 | 9600 | 2.60 | 0.25 | 5 |
| 自由地盤 | 9600 | 2.60 | 0.25 | 5 |

表-3 仮定したジョイントの物性値

| 項目 | 鉛直ジョイント | 周辺ジョイント |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|
| 法線方向剛性 (N/mm ²) | 剥離時 | 10 ³ |
| | 接触時 | 2×10 ⁹ |
| せん断剛性 (N/mm ²) | 1×10 ⁹ | 1×10 ⁹ |
| 粘着力 (N/mm ²) | 0.0 | 0.0 |
| 内部摩擦角 (度) | 50.0 | 50.0 |
| 引張強度 (N/mm ²) | 0.0 | 0.0 |
| 減衰定数 (%) | 1 | 10 |

(補足) 鉛直ジョイント: ダム堤体のブロックとブロック間に分布するコントラクション・ジョイント
 周辺ジョイント: ダム堤体底面と基礎岩盤の間に分布するペリフェラル・ジョイント

(4) 再現解析の解析条件

a) 解析方法

新豊根ダムの三次元再現解析は、加速度時刻歴と伝達関数(ダムクレスト中央/ダム底部監査廊)に着目して、観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、ダム-ジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元解析モデルを作成して行った。

b) 三次元解析モデル

実地震時挙動の再現解析に用いた、新豊根ダムの三次元解析モデルを図-10に示す。基礎岩盤に関しては、ダム底面より地下下方へ120m、ダム天端両アバットメントより左右岸方向へそれぞれ120mのエリアをモデル化した。ダムと基礎岩盤は有限要素でモデル化し、貯水池は、差分グリッドでモデル化した。有限要素の節点数と差分グリッド数は、それぞれ1638と1848である。基礎岩盤の下方境界は剛基盤であり、側方境界は粘性境界である。基礎岩盤の側方境界の外側は、自由地盤が設定されている。堤体ブロック間の鉛直ジョイント、および堤体と基礎岩盤の間の周辺ジョイントの位置は、図-11に示すとおりである。これらのジョイントは、三次元接触面要素を用いてモデル化しており、接触面要素数は144である。貯水池の水深については、地震発生当時の記録から、水深90mとした。貯水池のモデル化に関しては、Westergaardの式に基づく付加質量でモデル化した場合と空虚時の場合の比較解析を併せて行った。

c) 再現解析での解析用物性値

再現解析で使用した解析用物性値を表-2に示す。この再現解析では、ダムコンクリートと基礎岩盤は、線形弾

性材料として取り扱っており、密度は、建設当時を実施された調査試験結果を参考に設定した。動的せん断剛性は、ダムの固有振動数が、固有値解析で再現されるように調整して同定した。減衰定数は、ダム堤体の最大加速度が、再現されるように同定した。ジョイントの物性値は、コンクリート構造物の解析の経験値を参考にし、表-3に示す値を設定した。岩着部の材料特性および基礎岩盤から堤体への構造形式の急変を考慮して、周辺ジョイントの減衰定数は、大き目に仮定した。

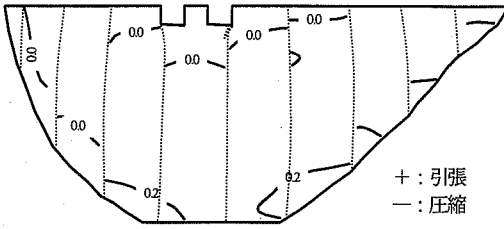
d) 常時応力解析

ジョイントの地震時挙動は、常時の応力状態に大きく依存するので、地震時の挙動を正確に評価するためには、常時応力状態の評価が重要である。ここでは、常時応力状態に関して、ジョイントを考慮しない場合と考慮した場合の比較解析結果について記述する。

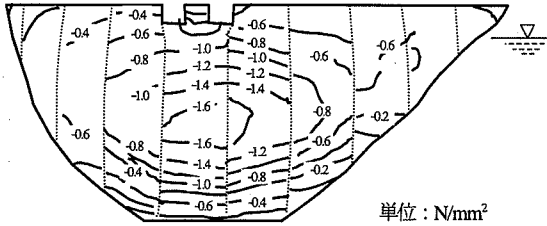
ジョイントを考慮しない場合とジョイントを考慮した場合のそれぞれについて、貯水条件に関して、空虚時と貯水時(地震発生時水位)の比較解析を行った。解析結果の一例として、ジョイントを考慮した場合および考慮しない場合の上流面における接線方向の応力分布をそれぞれ図-12と図-13に示す。空虚時でジョイントを考慮しない場合は、上下流面ともに接線方向に引張応力が生じた。これに対して、空虚時でジョイントを考慮した場合、接線方向の引張応力はほとんど生じない。また、貯水時でジョイントを考慮しない場合と比べて、ジョイントを考慮した場合、上下流面ともに圧縮応力が若干大きくなる傾向がある。図-12に示した応力分布から、ジョイントの存在によって、常時応力状態に非連続性が生じる場合があることが分かる。鉛直応力については、ジョイントの考慮の有無に関らず、最大応力値には大きな差はないが、ジョイントを考慮した場合、鉛直応力は、ほぼダムの標高に依存する。ジョイントを考慮しない場合は、基礎岩盤との隣接部付近において鉛直応力の変化が比較的大きくなる。これは、ジョイントの存在によって基礎岩盤の拘束の影響が変化したことによるものと考えられる。なお、図-14にジョイントをモデル化した場合について、空虚時と貯水時におけるダム堤体の変位の状況を示す。空虚時には、堤体の幾何形状及び自重の影響によってはジョイントに滑動や開口が生じ、貯水時には、水圧の作用によってジョイントが閉合し、堤体が一体化する傾向があることが理解できる。

e) 入力地震動

再現解析では、図-15に示すダム底部監査廊で観測された地震動を、三次元解析モデルの下方入力基盤まで引き戻し、その結果を下方入力基盤から3成分同時に入力した。加振時間は、主要動を含む10.24秒で、時間刻みは0.01秒とした。地震動の引戻しは、線形解析で行っており、ジョイントの非線形性は考慮していない。

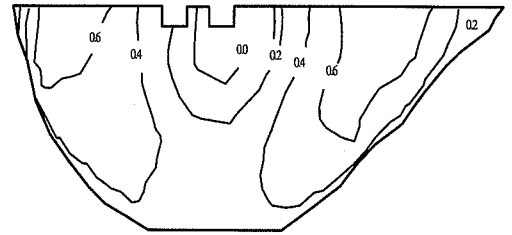


(a) 空虚時

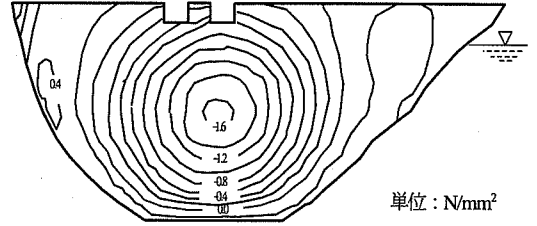


(b) 貯水時

図-12 ジョイントを考慮した場合のアーチ接線方向の応力分布 (常時)

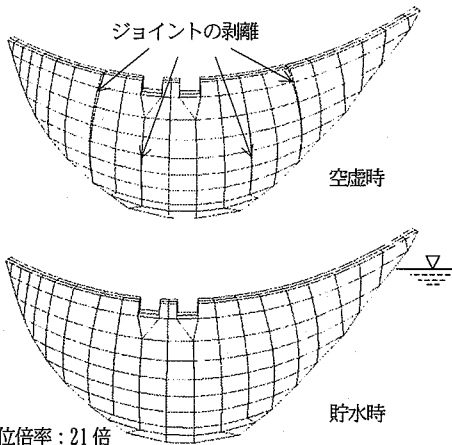


(a) 空虚時



(b) 貯水時

図-13 ジョイントを考慮しない場合のアーチ接線方向の応力分布 (常時)



変位倍率：21倍

図-14 空虚時と貯水時のダムブロック間の相対変位 (常時)

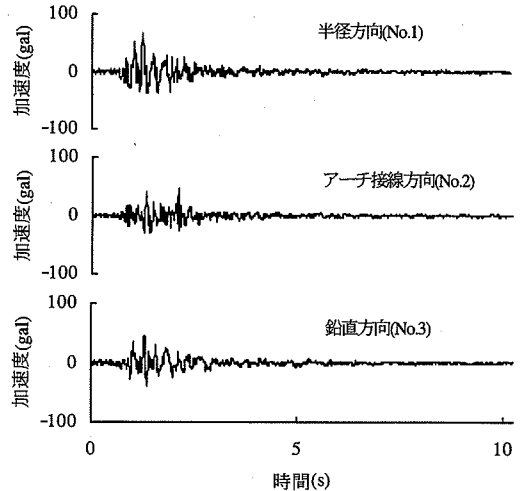


図-15 ダム底部監査廊の地震動 (30Hz 以上カット)

地震観測によって得られた地震動を解析モデルの下方入力基盤における入力波に変換する方法に関しては、参考文献 18) を参照されたい。

(5) 新豊根ダムの実地震時挙動の再現解析結果

表-4 に示したのは、ジョイントを考慮せずにダムを連続体モデルとして解析した場合と接触面要素でジョイントをモデル化して解析した場合の比較結果である。再現解析では、ダム底部での地震動の最大加速度は 68.5 gal

であるが、アーチ接線方向の最大引張応力および最大引張ひずみ以外、両解析ケースの解析結果は、ほぼ同等であった。ジョイントの挙動について、ダム上流面のクレスト中央付近での接触面要素 (図-11 参照) の剥離変位を図-16 に示す。この接触面要素の最大剥離変位は、約 0.009cm であり、極めて微量であった。それ以外の接触面要素では剥離変位は生じなかった。このことから、ダム底部で 60~70gal 程度の地震動に対しては、ジョイントの影響を考慮した場合でも考慮しない場合でも、解析

表-4 新豊根ダムの三次元再現解析結果

| 項目 | 方向 | ジョイント有 | ジョイント無 |
|-------------------------------|-----|--------|--------|
| 最大引張応力 (N/mm^2) | 接線 | 0.87 | 1.25 |
| | 鉛直 | 0.84 | 0.85 |
| 最大圧縮応力 (N/mm^2) | 接線 | 2.09 | 2.08 |
| | 鉛直 | 5.05 | 5.00 |
| 最大引張歪 ($\times 10^{-4}$) | 接線 | 0.34 | 0.49 |
| | 鉛直 | 0.30 | 0.30 |
| 最大圧縮歪 ($\times 10^{-4}$) | 接線 | 0.77 | 0.77 |
| | 鉛直 | 2.26 | 2.25 |
| 最大加速度(gal) | 上下流 | 679 | 683 |
| 最大変位 (cm) | 上下流 | 2.76 | 2.76 |

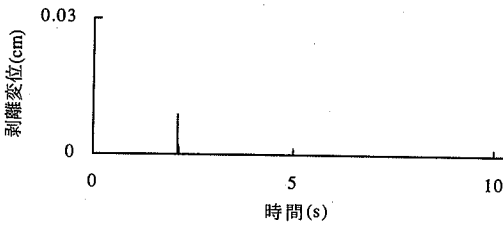
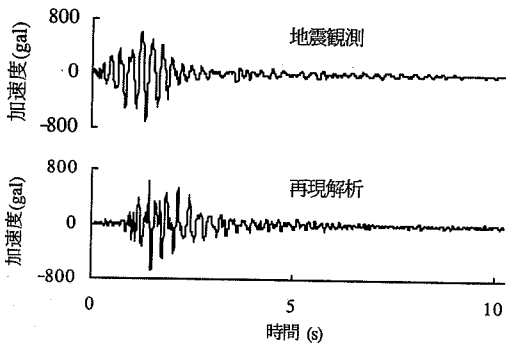
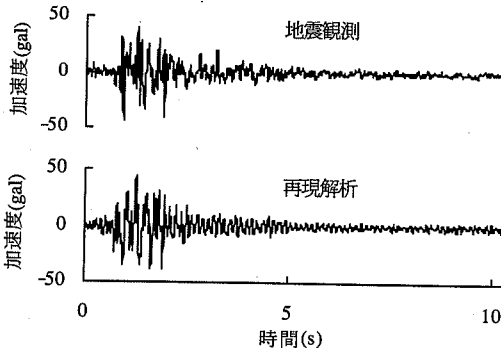


図-16 再現解析により得られたクレスト中央(上流面側)のジョイントの剥離変位時刻歴



(a) クレスト中央



(b) 左岸

図-17 クレスト中央および左岸観測点の加速度応答の比較

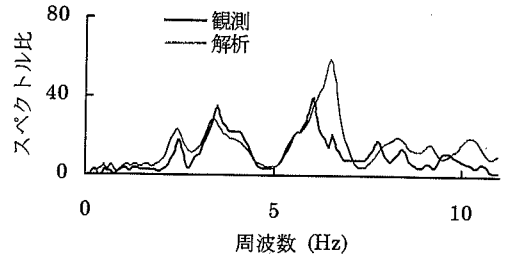


図-18 ダム底部監査廊に対するクレスト中央の伝達関数に関する比較結果

表-5 地震観測と三次元解析の最大加速度値の比較(gal)

| 位置 | 方向 | 地震観測* | 再現解析 |
|-------------------|----|-------|-------|
| クレスト中央 | 半径 | 709.2 | 683.1 |
| | 接線 | 186.0 | 175.6 |
| | 鉛直 | 175.1 | 191.5 |
| クレストの 1/4 左岸寄り | 半径 | 476.4 | 423.6 |
| | 鉛直 | 104.4 | 110.3 |
| クレストの 1/4 右岸寄り | 半径 | 550.4 | 517.9 |
| | 鉛直 | 88.3 | 97.6 |
| ダム中腹中央 | 半径 | 125.0 | 114.3 |
| ダム底部 監査廊 | 半径 | 68.5 | 67.8 |
| | 接線 | 39.5 | 36.3 |
| | 鉛直 | 45.1 | 47.1 |
| 左岸岩盤 | 半径 | 44.9 | 45.2 |
| | 接線 | 57.2 | 46.5 |
| | 鉛直 | 51.4 | 48.7 |
| 右岸岩盤 | 半径 | 66.9 | 42.8 |
| | 接線 | 45.0 | 42.2 |
| | 鉛直 | 69.7 | 55.9 |

(備考) *: 30Hz 以上の高周波成分をカットした地震動の最大振幅

結果には大差がなく、すなわち、ジョイントの存在が、ダム堤体の地震時挙動に及ぼす影響は非常に微量であると考察される。連続体としての線形解析によって、良い再現性が得られたことも、1997年3月16日の地震の際に、新豊根ダムの地震時挙動に対しては、ジョイントの非連続的挙動の影響はほとんどなかったものと考察することができる。

図-17は、ジョイントをモデル化せずに解析した場合の、クレスト中央および左岸観測点の半径方向の加速度時刻歴に関する地震観測結果と再現解析結果の比較である。図-18は、クレスト中央とダム底部監査廊の加速度時刻歴のスペクトル比に関する比較結果である。再現解析によって得られた最大加速度応答は683 galであり、観測結果とはわずかに約4%の差であった。スペクトル比の比較に関しては、解析結果では7Hz付近の周波数域でやや大きくなったが、ダムの主要振動成分である振動成分に関しては良好に再現することができた。なお、加速度応答に関する地震観測結果と三次元再現解析結果の比較は、表-5に示したとおりである。

5. 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耐震性の検討

(1) 検討目的

アーチダムが非常に強い地震動に遭遇した場合、コントラクション・ジョイント等の既存のジョイントにおいて、剥離や滑動といった非連続的挙動が生じる可能性があり、それによって、ダムの地震時挙動や堤体内に発生する応力～ひずみ状態が大きな影響を受ける可能性がある。この現象を数値解析により検討するために、マグニチュード8クラスの直下地震を想定して、ダム-ジョイント-基礎岩盤-貯水池連成系の三次元的解析を行った。本研究では、可能な限り実際の現象に即して検討するために、再現解析で同定した新豊根ダムの解析モデルを活用して解析を行った。ダムの耐震性に対するジョイントの影響については、ジョイントを考慮した場合と考慮しない場合（堤体を連続体として解析した場合）の比較解析によって考察した。

(2) 三次元的解析モデルと解析用物性値

非常に強い地震動に対するアーチダムの耐震性の検討に際しては、可能な限り実証的にアプローチするために三次元的解析モデルは、前出図-10 に示したモデルをそのまま使用した。解析用物性値についても、表-2 および表-3 に示した数値を使用し、ジョイントの分布も、前出図-11 と同様とした。

(3) 仮定した入力地震動

入力地震動としては、図-19 に示した、兵庫県南部地震の際に一庫ダムで観測された地震動を利用した。一庫ダムで観測された3成分の地震動の内、ここでは、ジョイントの剥離（開口）に対して影響度が大きいと考えられる、上下流方向の水平動と上下動（鉛直方向）の2成分を入力地震動として用いた。上下流方向の水平動に関して、ダム底部で最大加速度500galになるように調整し、上下動に関しても同じ倍率で振幅を調整して使用した。最大加速度を500galに設定した理由は、大崎スペクトルに基づく経験的手法により模擬地震動を作成した場合、マグニチュード8の地震がサイトから約30km離れた地点で発生したと仮定した場合に、最大加速度が概ね500galになることによる。これらの地震動を入力基盤面に引展し、二方向同時入力とした。

(4) 強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮した耐震性に関する検討結果

a) ジョイントの挙動

ジョイントの地震時挙動の例として、図-20 に、ダムクレスト中央の鉛直ジョイントおよびダム最底部の周辺ジョイントにおける接触面法線方向の挙動を示す。

表-6 強い地震動に対するジョイントの影響に関する解析結果

| 項目 | 方向 | ジョイント無 | ジョイント有 |
|--------------------------------|-----|--------|--------|
| 最大引張応力 (N/mm ²) | 接線 | 9.32 | 3.17 |
| | 鉛直 | 6.76 | 4.05 |
| 最大圧縮応力 (N/mm ²) | 接線 | 9.14 | 10.59 |
| | 鉛直 | 7.48 | 8.64 |
| 最大引張歪 (×10 ⁻⁴) | 接線 | 3.99 | 1.67 |
| | 鉛直 | 2.28 | 1.92 |
| 最大圧縮歪 (×10 ⁻⁴) | 接線 | 3.25 | 3.58 |
| | 鉛直 | 2.77 | 2.93 |
| 最大加速度(gal) | 上下流 | 3027 | 3080 |
| 最大変位 (cm) | 上下流 | 11.99 | 14.23 |

クレスト中央では最大約1.6cm、ダム底面では最大約2.6cmの開口が生じる結果となった。ダム底面の上流側は、貯水に押されて、地震発生前に既に僅かながら引張応力状態になっており、この影響を受けて、地震時に比較的大きな開口変位が生じたものと考察される。ただし、この解析では、ジョイントの接触面の引張強度とせん断強度を見込んでいないが、実際のダムでは、シアー・キーやジョイント部の狭径物の影響が変形挙動を抑制する方向に作用する可能性があるため、実際の開口量は、ここで示した解析結果よりも小さくなるものと推察される。ジョイントのすべり挙動については、ブロック相互間のズレは、鉛直ジョイントでは比較的小さく（ダム天端両岸より1/4中央寄りの地点で最大0.19cm）、周辺継目ではダム上流側最底面で最大0.7cmと計算された。

b) 堤体の挙動

表-6 に、ジョイントをモデル化した場合としない場合について、地震応答の最大値の比較結果を示す。地震応答の内、最大引張応力と最大圧縮応力の分布をそれぞれ図-21～図-24 に示す。また、クレスト中央の接線方向の応力時刻歴の代表例を図-25 に示す。

表-6 および図-21～図-24 から、ジョイントの地震時挙動を考慮した場合は、ジョイントを考慮せずに連続体として解析した場合に比して、堤体内に発生する引張応力が格段に小さくなることが理解できる。接線方向の引張応力は、ジョイントを考慮しない場合、9.32 N/mm²となった。この値は、ダムコンクリートの引張強度として一般的に考えられている値¹⁹⁾ 3～5 N/mm²を大きく上回る結果となった。これに対して、ジョイントを考慮した場合は、接線方向の引張応力は3.17 N/mm²となり、約1/3に低減した。周辺ジョイントが存在しているため、鉛直方向の引張応力も連動して低減する結果となった。圧縮応力については、ジョイントを考慮しない場合に比べ、ジョイントを考慮した場合は接線方向も鉛直方向も若干増大する結果となった。これは、ジョイントの開口の際に応力再配分が生じることに起因するものと考察される。ジョイントには、通常止水材が設置されており、また、開口は瞬間的な現象なので、ジョイントの開口の際に水

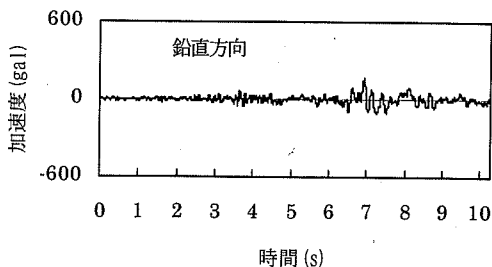
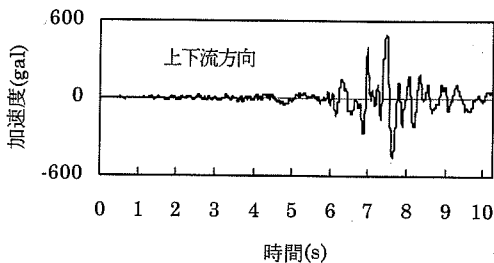
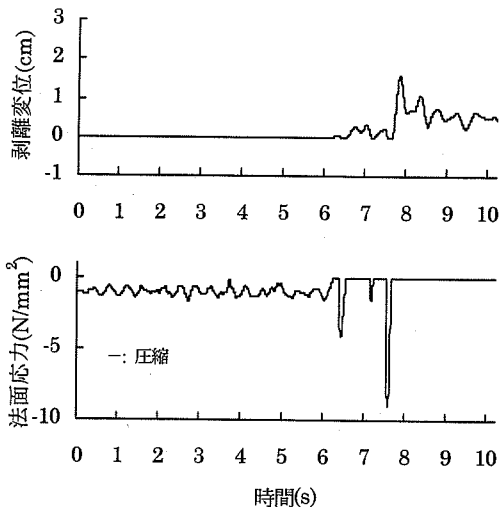
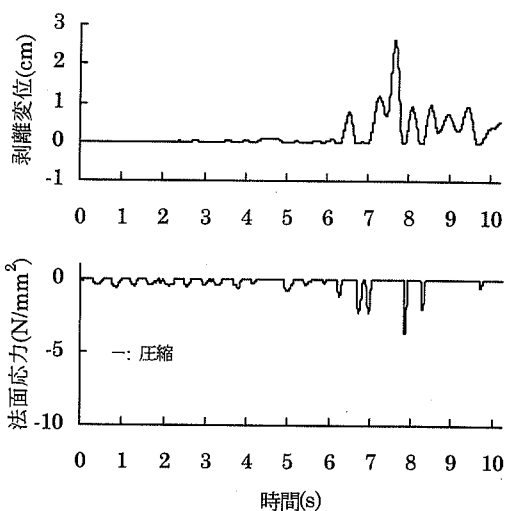


図-19 最大加速度を500galに規準化した一庫波



(a) クレスト中央の鉛直ジョイントの挙動



(b) ダム上流面最底部の周辺ジョイントの挙動

図-20 鉛直ジョイントおよび周辺ジョイントの地震時挙動の解析結果の例

が漏れることはないと考えられる。

地震時のひずみ応答に関しては、地震時応力に関して見られた傾向と類似の傾向が認められた。最大引張ひずみは、ジョイントを考慮しない場合、接線方向で 3.99×10^4 であり、一般的に想定されるコンクリートの破壊引張ひずみ 2×10^4 を上回る結果となった。これに対して、ジョイントを考慮した場合は、鉛直方向で 1.92×10^4 となった。

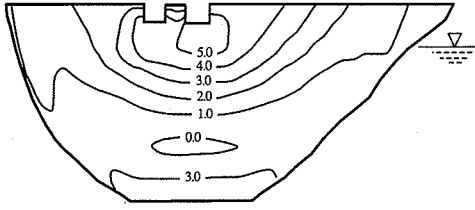
このように、地震時応力および地震時ひずみの最大値は、ジョイントの地震時挙動の影響を受けて大きく変化し、最大値のみならず、それらの分布形状もジョイントの地震時挙動の影響を受けて大きく変化する。すなわち、ジョイントを考慮しない場合は、接線方向の応力とひずみがダムの中央部に集中するが、ジョイントを考慮した場合は、応力およびひずみが分散され平滑化される。こうした現象は、ジョイントの地震時挙動が、非常に強い地震動に対するアーチダムの耐震性を考える上で重要であり、耐震性の保持にとって有利に作用すると解釈することができる。なお、最大変位量は、ジョイントを考慮した場合、約19%増大した

が、最大応答加速度に関して明確な変化は見られなかった。

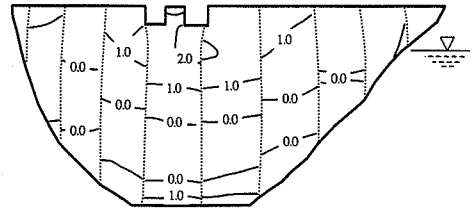
c) 動水圧の分布

ジョイントをモデル化した場合のダム上流面の最大動水圧分布および貯水池縦断方向の最大動水圧分布を図-26に示す。図-26では、最大動水圧が発生した瞬間の値を図化している。最大動水圧分布に関して、ジョイントを考慮した場合よりも考慮しない場合の方が小さくなる傾向(約2%程度)があるが、両者の差は大きくない。

図-26から、ダム上流面での最大動水圧は 0.37 N/mm^2 であり、しかも水面より約1/3の深さで発生していることが分る。従来、Westergaardの式¹⁹⁾に基づく付加質量法によって動水圧の影響を考慮する方法が便宜的に多用されているが、この結果は、付加質量法では動水圧の影響を精度良く適正に評価することができないことを示すものと考えられる。これは、主として、ダムの柔軟性及び貯水池境界からのエネルギー逸散の影響を考慮するかどうかによる違いであると考えられる。Westergaardの式では、貯水池の底面では完全反射条件であるが、本研究では、堆積物と水の波動イ

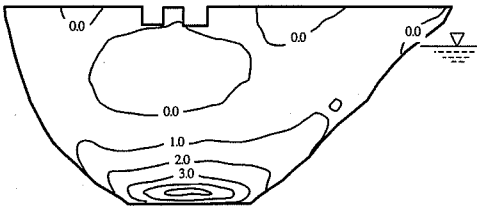


(a) ジョイントをモデル化しない場合

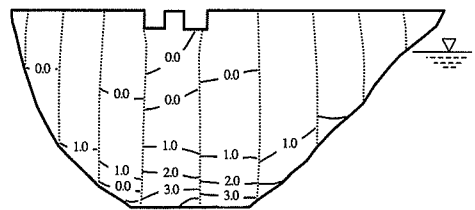


(b) ジョイントをモデル化した場合

図-21 ダム上流面のアーチ接線方向の最大引張応力分布 (N/mm²)

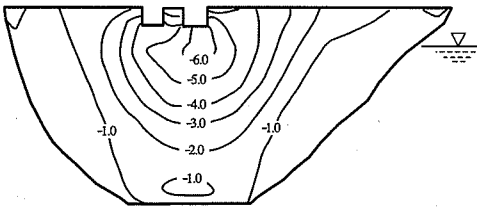


(a) ジョイントをモデル化しない場合

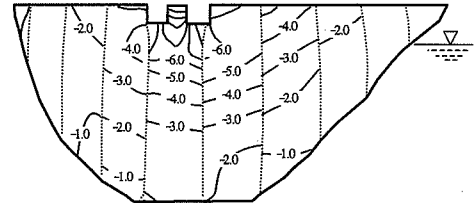


(b) ジョイントをモデル化した場合

図-22 ダム上流面の鉛直方向の最大引張応力分布 (N/mm²)

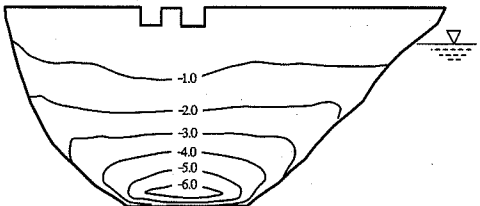


(a) ジョイントをモデル化しない場合

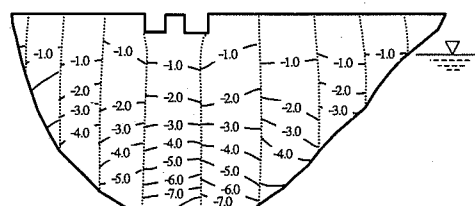


(b) ジョイントをモデル化した場合

図-23 ダム上流面のアーチ接線方向の最大圧縮応力分布 (N/mm²)



(a) ジョイントをモデル化しない場合



(b) ジョイントをモデル化した場合

図-24 ダム上流面の鉛直方向の最大圧縮応力分布 (N/mm²)

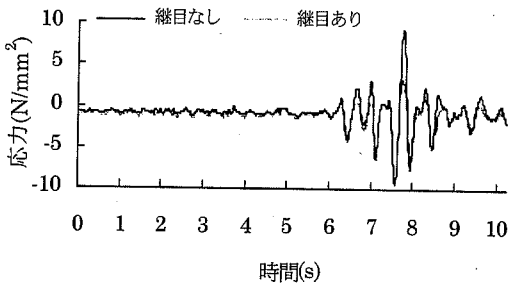


図-25 クレスト中央のアーチ接線方向の応力時刻歴

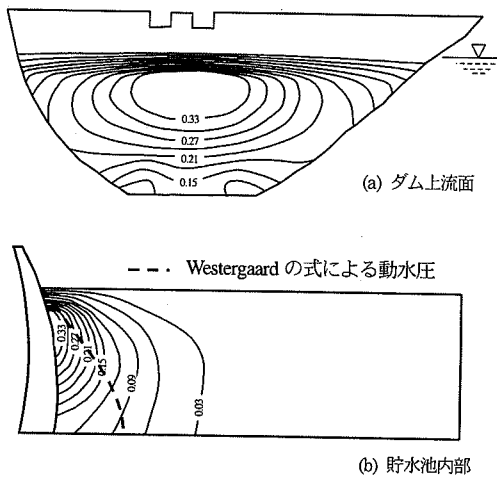


図-26 ダム上流面及び貯水池内の動水圧分布

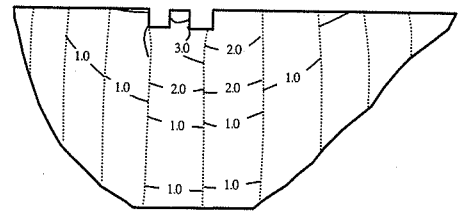


図-27 強震動に対する空虚時ダム上流面におけるアーチ接線方向の引張応力分布(N/mm²)

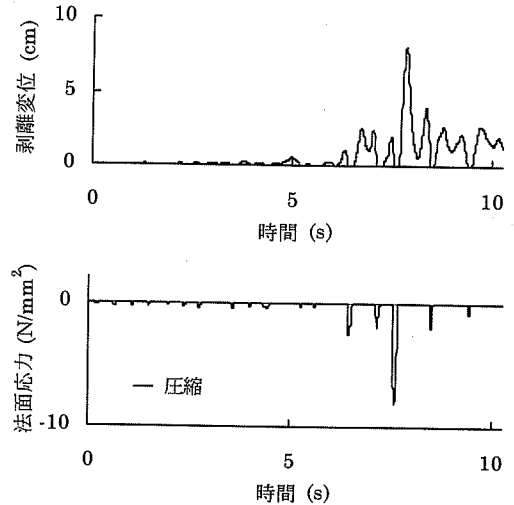


図-28 空虚時のダム天端中央(上流側)の鉛直ジョイント法線方向の挙動

ンピーダンス比に応じた反射境界条件を用いてエネルギーの逸散を考慮している。

d) 空虚時の地震時挙動

地震が発生した際、ほとんどの場合は、貯水池は貯水状態にあると考えられるが、貯水池が空の状態地震に遭遇する可能性もあり得る。そこで、想定した強震動に対する空虚時の解析を行い、貯水時との比較を行った。図-27には、上流面における接線方向の最大引張応力応答を示す。また、図-28には、クレスト中央の鉛直ジョイントの法線方向の地震時挙動を示す。

図-21 (b)と図-27を比較すると、空虚時には、接線方向の最大引張応力が大きくなり、洪水吐ピア下端付近で最大引張応力が約4.0 N/mm²発生する結果となった。最大引張応力の分布形状も貯水時よりも空虚時の方が乱れていることが理解できる。一方、図-20 (a)と図-28の比較から、クレスト中央の鉛直ジョイントがより激しく応答していることが分かる。最大開口変位は約8 cmに達しており、地震動が終わった時も開口変位が残留する結果

となった。しかし、実際のダムでは、各ブロック間にグラウチングの拘束効果があると想定され、開口変位量は現実にはもっと小さくなるものと推察される。

貯水池が空虚時の場合に関しては、堤体が貯水による圧縮作用を受けないため、地震動が作用する前に一部のジョイントが微小開口状態(圧縮応力が作用していない状態)になっている可能性があること、また、地震時には堤体から貯水池へのエネルギーの逸散減衰効果がなく、貯水の圧縮作用によってダムの揺れが抑制されることがないこと等の理由から、空虚時には貯水時よりも激しい地震時挙動を示す結果になったと考察される。

6. 非常に強い地震動に遭遇したアーチダムの耐震性に関する考察

ダム底面で最大振幅500 galという高レベル地震動を作用させた場合、ジョイントの非連続的挙動を考慮した

い三次元的解析では、ダム堤体に生じた最大引張応力は 9.32N/mm^2 であったが、ジョイントの非連続的挙動を考慮した三次元的解析では、 3.17N/mm^2 であった。ダムコンクリートの引張強度は、一般的に $3\sim 5\text{N/mm}^2$ 程度と考えられているが、強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮に入れた場合には、引張応力はさほど大きくなく、堤体表面の一部に軽微な亀裂が発生する可能性はあったとしても、ダム全体が瞬時に崩壊するような現象は発生しないと考察される。アーチ方向の最大引張応力は上下流面のクレスト中央付近に、鉛直方向の最大引張応力は上下流面の最底面付近に生じることから、クラックが発生する場合には、その方向は、クレスト中央付近では鉛直方向、上下流面の最底面付近では水平方向になるものと予想される。地震時の引張ひずみに関しても、ジョイントを考慮しなかった場合に 3.99×10^{-4} であったものが、ジョイントを考慮した場合には 1.67×10^{-4} にまで低減した。圧縮側に関しては、最大圧縮応力が 10N/mm^2 のオーダーであり、圧縮側の安全性は十分である。ダム堤体の各ブロック間の相対剥離変位は、ここに示した貯水時の解析では最大 2.6cm であり、空虚時の解析では約 8cm となった。新豊根ダムの堤体ブロック間には“Z”字型の止水材が設けられており、空虚時には止水材が部分的に損傷を受ける可能性があるが、貯水時には十分な安全性が確保されていると考えられる。このように、既存のジョイントを有するアーチダムに関しては、非常に強い地震動に遭遇した場合、ジョイントにおいて局所的な非連続的挙動が発生し、それに伴って地震時応力およびひずみが解放され、地震時の安全性が保たれるものと考察される。

堤体に対する貯水の影響に関しては、ダム堤体は貯水から圧縮作用を受けるため、アーチダムのジョイントは貯水時には空虚時よりも、より安定な状態になると考えられる。更に、地震時には、貯水への波動エネルギーの逸散効果が生じるので、貯水の存在は、非常に強い地震動を受けたダムの耐震性に対しては有利な影響を与えると考察される。

7. まとめ

本研究によって得られた結論は、次のとおりである。

- ① 既存のジョイントを有するアーチダムが非常に強い地震動を受けた場合、ジョイントの地震時挙動がアーチダムの耐震性に非常に大きな影響を及ぼす。したがって、非常に強い地震動に対するアーチダムの耐震性を評価する場合は、ジョイントの存在を考慮することが必要であり、これを考慮しない連続体解析では、堤体の応力およびひずみを精度良く評価

することができない。

- ② アーチダムが非常に強い地震動に遭遇した場合、ジョイント部では非連続的挙動が発生し、それに伴って応力とひずみが解放され、その結果、堤体に発生する地震時引張応力および地震時引張ひずみは大幅に低減される。
- ③ 1997年に記録された新豊根ダムの実地震時挙動の三次元再現解析によって、新豊根ダムおよび基礎岩盤の動的変形特性を定量的に評価した結果、堤体の動的せん断剛性は $10,500\text{N/mm}^2$ 、減衰定数は5%であり、また、基礎岩盤の動的せん断剛性は $9,600\text{N/mm}^2$ 、減衰定数は5%であった。
- ④ 三次元再現解析より同定した新豊根ダムの三次元解析モデルを用いて、ダム底面で最大加速度振幅 500gal の地震動を想定して、耐震性を検討したところ、ダム全体の安定性が損なわれるような損傷は生じないものと考察される。
- ⑤ 貯水時と空虚時との比較から、貯水時の場合、強震時にアーチダムのジョイントの剥離や滑動が発生する可能性は低くなるものと考察される。これは、貯水の作用によってダム堤体が拘束されるようになりジョイントの初期応力（圧縮）が大きくなること、ダムから貯水への波動エネルギーの逸散効果が生じること等に起因すると推察される。
- ⑥ 貯水の水压は、アーチダムのジョイントの力学的安定性を向上させるように作用し、貯水の存在は、ダムの地震時の安定性に対して、総合的に有利な影響を及ぼす。
- ⑦ アーチダムにクラックが発生する場合、クラックが発生する可能性のある場所は、クレスト中央あるいはダム最底部であり、クレスト中央部では堤体表面に縦方向のクラックが、ダム最底部では上下流面に水平方向のクラックが発生するものと推察される。
- ⑧ 本研究で開発した、ダムジョイントー基礎岩盤ー貯水池連成系の三次元的解析手法は、高レベル地震動に対するダムの耐震性能を照査する手法として有効である。

8. おわりに

今後の課題としては、ダムにおける地震観測を継続的に実施し、大地震が発生した際の強震動データの蓄積を図るとともに、ジョイントの非連続的挙動に関する実証的研究の積み重ねが必要である。そして、実測データに基づきジョイントの動的物性値を定量的に評価し、ダムの耐震性能照査技術の精度・信頼性の向上を図って行くことが大切である。

参考文献

- 1) Clough, R. W.: Nonlinear mechanisms in the seismic response of arch dams, *International research conference on earthquake engineering*, Skopje, Yugoslavia, 1980
- 2) Dowling, M.J. and Hall, J.F.: Non-linear seismic analysis of arch dams, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.115, No.4, pp.768-789, 1989
- 3) Fenves, G.L., Mojtahedi, S. and Reimer, R.B.: ADAP-88: A computer program for nonlinear earthquake analysis of concrete arch dams, *Report No. UCB/EERC-89/12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1989
- 4) Fenves, G.L.: Response of Pacoima Dam in the 1994 Northridge, California, Earthquake, *News EECR*, University of California at Berkeley, Vol.17, No. 4, 1996
- 5) Chen, H.Q. and Yeh, C.Y.: Joint opening of arch dam during earthquake, Experimental and analytical results, *Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research*, Beijing, China, 1996
- 6) 渡辺啓行, ラザビダバ ソヘイル, 高島賢二, 谷山尚: コンクリートアーチダムの地震応答における材料非線形性とジョイント開口の相互作用, *ダム工学*, Vol.10, No.4, pp.276-288, 2000
- 7) 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
- 8) 塩尻弘雄, 上田稔: ダム - 岩盤 - 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
- 9) 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
- 10) 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*, No.404/I-11, pp.395-404, 1989
- 11) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L.: Finite dynamic model for infinite media, *Proc.of ASCE, EM4*, pp.859-877, 1969
- 12) 畑野正, 中川友康: アーチダムの震動解析, *土木学会論文報告集*, No.207, pp.37-46, 1972
- 13) 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*, No.153, pp.31~39, 1968
- 14) 永山功, 佐々木隆, 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*, Vol.41, No.1, pp.26~31, 1999
- 15) 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
- 16) Ariga, Y.: Three-dimensional Dynamic Simulation Analysis of Existing Arch Dam, *Proc. of 10th WCEE*, pp.4617~4622, 1992
- 17) 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
- 18) 渡辺啓行, 有賀義明, 曹増延: 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, *土木学会論文集*, No.696/I-58, pp.99-110, 2002
- 19) Westergaard, H. M.: Water Pressures on Dams during Earthquakes, *Trans. of ASCE*, Vol.98, pp.418-433, 1933

(2002. 10. 28 受付)

STUDY ON 3-D DYNAMIC ANALYSIS OF ARCH DAM AGAINST STRONG EARTHQUAKE MOTION COSIDERING DISCONTINUOUS BEHAVIOR OF JOINTS

Yoshiaki ARIGA, Zengyan CAO and Hiroyuki WATANABE

A method for assessing the seismic stability of arch dams has been developed in the study. With the method the earthquake, observed at an existing arch dam, of its maximum acceleration over 700 gal has been simulated. Furthermore, the response analyses of the dam subjected to a strong earthquake of the maximum amplitude 500 gal at the dam base have been carried out. The dynamic behaviors of the contraction joints and the effects on the earthquake responses of the dam have been analyzed. It has been pointed out that the nonlinear behaviors of the contraction joints exert significant effects on the responses of the dams struck by strong earthquakes. And reservoir water has a favoring effect on the earthquake resistibility of the dam. Finally, the earthquake resistibility of the arch dam against very strong earthquakes has been given.