

# 基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮したアーチ式コンクリートダムの耐震安全性評価

木全宏之<sup>1</sup>・堀井秀之<sup>2</sup>・Mahmoud YAZDANI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 清水建設株式会社土木技術本部グループ長 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)

E-mail:kimata@shimz.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院工学系研究科教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:horii@civil.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>Tarbiat Modares University, Associate Professor (Jalale-Ale Ahmad Ave., Tehran, Iran)

E-mail:mahyaz@gmail.com

アーチ式コンクリートダムを対象に、基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮した非線形動的解析を実施し、基礎岩盤に注目した耐震安全性評価を試みた。不連続面のすべりや開口に関する破壊指標を新たに提案、適用し、想定した入力地震動の加速度レベルを変化させた非線形動的解析から、基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度を求めた。非線形動的解析は、不連続面の方向や強度を変化させて実施し、限界加速度に基づいてアーチ式コンクリートダムの耐震安全性評価を試みた。

**Key Words :** *jointed rock foundation of concrete arch dam, seismic safety evaluation, earthquake-induced failure, non-linear dynamic analysis, failure index, critical acceleration*

## 1. はじめに

平成17年3月、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」<sup>1)</sup>が試行された。同指針において、重力式コンクリートダムやアーチ式コンクリートダムの大規模地震に対する耐震安全性評価の対象となる主な破壊現象は、堤体のクラック発生、進展による貫通破壊であるとされている。

ところで、ダムの耐震安全性を評価する上で、堤体のみならず基礎岩盤の破壊現象を併せて評価することは重要である。1959年にMalpassetダム(フランス)が基礎岩盤のすべりが原因で決壊に至ったように、とりわけ基礎岩盤に十分な支持力が要求されるアーチ式コンクリートダムにとって、基礎岩盤の破壊現象を評価することは重要である。しかしながら、大規模地震時のダムの耐震安全性評価において、堤体の破壊が中心に扱われているのが現状である<sup>1)</sup>。

基礎岩盤の破壊については、内在する節理等の不連続面のすべり破壊や開口破壊により生じる。このため、基礎岩盤の大規模地震時の耐震安全性を厳密に評価するためには、不連続面の進行性破壊挙動を精緻に予測、追跡する必要がある。

この分野の研究として、Valliappan, S.らは基礎岩盤を不連続面を有する損傷モデルとして扱い、ダム堤体-基礎岩盤連成系の地震応答解析を行っている<sup>2)</sup>。また、筆者らも連続体解析を基本に、不連続面を有するダム基礎岩盤の簡易な耐震安全性評価手

法を提案した<sup>3)</sup>。しかしながら、ダム基礎岩盤の大規模地震時の破壊挙動を進行性破壊挙動として直接的に取り扱った研究や加えてその耐震安全性を評価した研究はほとんど見当たらないのが現状である。これに対し、筆者らは既報<sup>4)</sup>において、重力式コンクリートダムを対象に、基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮した大規模地震時の動的クラック進展解析を実施し、クラック進展挙動について検討した。ただし、同研究<sup>4)</sup>では基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮しているものの、重力式コンクリートダムであることから堤体に注目した耐震安全性評価を行った研究である。

本研究では、アーチ式コンクリートダムを対象に、基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮した非線形動的解析を実施し、基礎岩盤に注目した耐震安全性評価を試みた。不連続面のすべりや開口に関する破壊指標を新たに提案、適用し、想定した入力地震動の加速度レベルを変化させた非線形動的解析から、基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度を求めた。非線形動的解析は、不連続面の方向や強度を変化させて実施し、限界加速度に基づいてアーチ式コンクリートダムの耐震安全性評価を試みた。

## 2. ダム基礎岩盤の耐震安全性評価方法

本研究では、アーチ式コンクリートダムの基礎岩

盤を耐震安全性評価の対象とした。アーチ式コンクリートダム基礎岩盤であることから、特に三次元的評価が望ましいと考えられるが、岩盤の不連続性を考慮した大規模地震時の進行性破壊挙動を三次元解析により予測、追跡することは数値解析上現実的でない。

このため、既報<sup>3)</sup>と同様にして、以下に示す方法に従い、近似的に二次元解析によってアーチ式コンクリートダム基礎岩盤の耐震安全性を評価することにした(図-1, 図-2参照)。

(i) 解析条件として後述する実規模モデルダムや入力地震動を設定し、三次元FEMによるダム堤体-基礎岩盤-貯水連成系の動的解析を実施する(図-2(a)参照)。三次元FEM動的解析は、ダム堤体ならびに基礎岩盤とも弾性体と仮定し、線形解析として実施する。

(ii) 三次元FEM線形動的結果より、着岩部の発生応力を求め、応力の大きさを勘案して基礎岩盤の耐震安全性を評価する着岩箇所を選定し、その着岩箇所を含む基礎岩盤面を詳細検討断面として抽出する(図-2(b)参照)。

(iii) 抽出した詳細検討断面について、着岩箇所近傍領域を対象とし、岩盤の不連続面を考慮して再メッシュ分割を行い、二次元FEMによる非線形動的解析を実施する(図-2(c)参照)。荷重として先に求めた時刻歴応力をダム堤体反力として用い、着岩部に作用させる。

(iv) 詳細は後述するが、不連続面の破壊指標を提案、適用し、想定した入力地震動の加速度レベルを変化させた非線形動的解析から、基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度を求め、耐震安全性評価を行う。非線形動的解析は、不連続面の方向や強度を変化させて実施する。

### 3. ダムの三次元FEM線形動的解析

アーチ式コンクリートダムの実規模モデルダムを想定し、三次元FEM線形動的解析を実施した。そして、二次元FEM非線形動的解析のための詳細検討断面の抽出と着岩部のダム堤体反力を求めた。

#### (1) 解析モデル・定数

想定したモデルダムは、堤高116.5m、堤頂長300m、堤体頂部および底部の平均厚がそれぞれ5.0m、19.6mのアーチ式コンクリートダムである。国内の主要な既設アーチ式コンクリートダムの実績から、平均的な堤高や堤頂長等を有するダムを想定した<sup>3),5)</sup>。解析モデルを図-3に示すが、ダム堤体ならびに基礎岩盤とも20節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いてモデル化した。貯水については、Westergaard式<sup>6)</sup>から求められる付加質量として考慮した。基礎岩盤について、水平方向領域はX方向(ダム軸方向)、Y方向(上下流方向)とも堤頂長の3倍の900m、鉛直方向(Z方向)領域は236.5mで堤体底面下方に堤高と同程度の120mの領域を設定した。

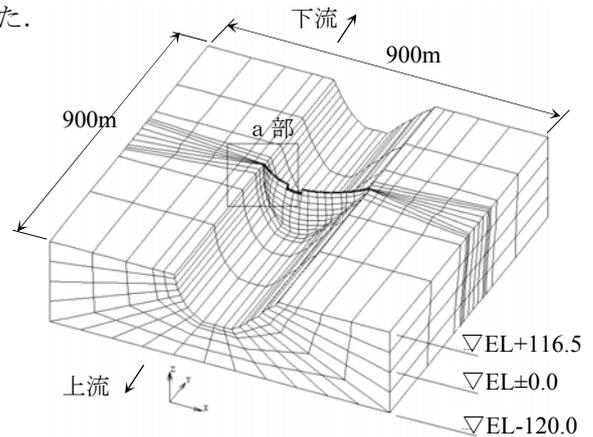


図-3 三次元 FEM 線形動的解析モデル

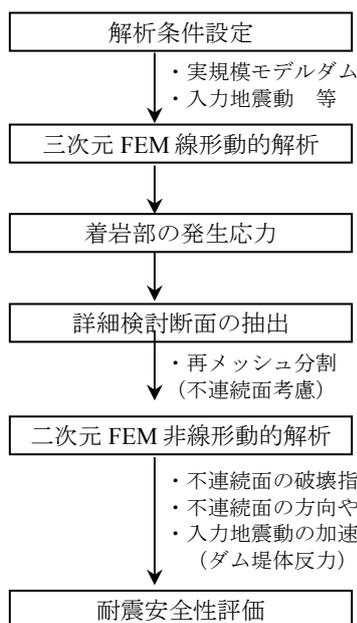


図-1 ダム基礎岩盤の耐震安全性評価方法

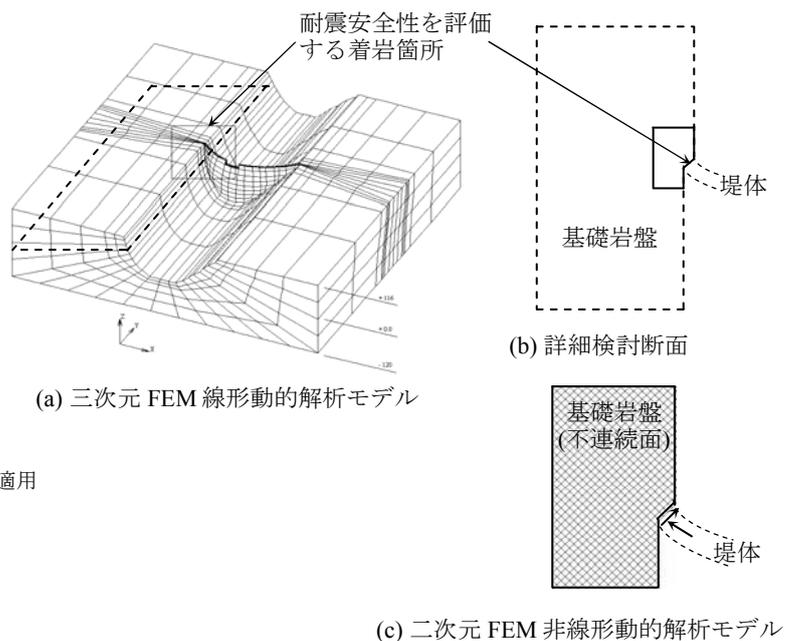


図-2 二次元・三次元 FEM 動的解析モデルと詳細検討断面の概念図

表-1 にモデルダムの主な解析定数を示す。これらの値は既往の研究<sup>5)</sup>を参考にして設定したものである。動的応答解析に先立ち、初期応力解析（静的解析）を実施したが、同表には初期応力解析に用いた解析定数を併せて示す。初期応力解析では静的荷重として、ダム堤体ならびに基礎岩盤の自重、貯水の静水圧および堆砂圧等を考慮した。貯水ならびに堆砂レベルは、それぞれ EL+114.0m, EL+47.0m とした。堆砂の単位体積重量  $\gamma$  は  $21\text{kN/m}^3$  とし、側圧係数  $K_0$  は 0.4 と設定した。

表-1 モデルダムの主な解析定数

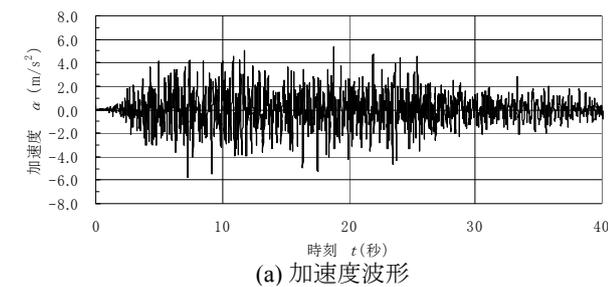
項目	ダム堤体	基礎岩盤
単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	23.7	25.0
静的ヤング係数 $E_s(\text{MPa})$	31,000	12,000
動的ヤング係数 $E_d(\text{MPa})$	40,000	18,000
静的ポアソン比 $\nu_s$	0.17	0.20
動的ポアソン比 $\nu_d$	0.20	0.25
1,2次モード減衰定数 $h_1, h_2$	0.05	0.05

注) 減衰にはレーリー減衰を適用。

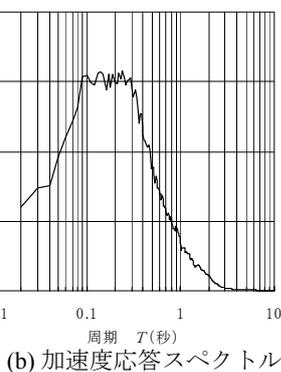
## (2) 入力地震動

大規模地震動として、マグニチュード M8.0 の地震がダムサイト近傍（震央距離  $L=25\text{km}$ ）で起きることを想定し、三次元 FEM 線形動的解析に用いる入力地震動を設定した。M8.0 は、国内既往最大の内陸型地震である 1891 年濃尾地震に注目して想定したものである。基礎岩盤表面で応答スペクトルを定義し、これをターゲットスペクトルとして模擬地震動を作成した。ターゲットスペクトルには、大崎スペクトル<sup>7)</sup>を用いることにした。

作成した模擬地震動を図-4 に示すが、岩盤表面での地震動であり、解析にはモデル底面に引き戻し



(a) 加速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-4 入力地震動(模擬地震動)

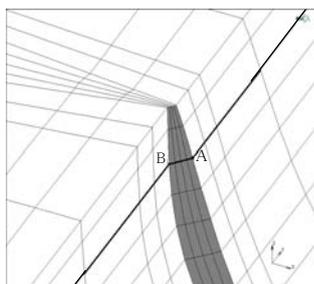


図-5 耐震安全性を評価する着岩箇所 (図-3 の a 部, EL+90.0m)

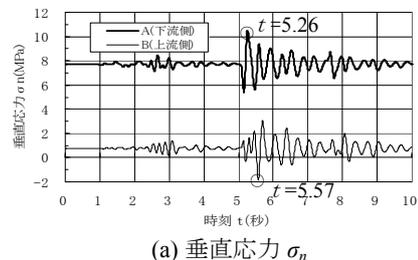
たものを上下流（水平）方向の入力地震動として用いることにした。当該地震動の最大加速度は  $5.74\text{m/s}^2$  であり、ダムサイト直下で発生し得る最大級の大規模地震動と考えられる。鉛直方向の地震動については、静的鉛直震度  $k_v$  として扱うこととし、水平方向の模擬地震動の最大加速度である  $5.74\text{m/s}^2$  の 1/2 を震度換算して  $k_v=0.293$  を解析モデル鉛直下向きに作用させた。

## (3) 解析結果

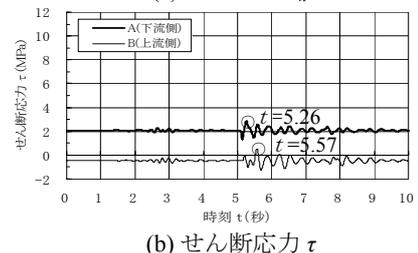
三次元 FEM 線形動的解析結果より、着岩部の発生応力を求め、応力の大きさを勘案して基礎岩盤の耐震安全性を評価する着岩箇所を選定した。選定した着岩箇所は、図-5 に示す左岸側 EL+90m の AB である。

一例として、A 点および B 点での垂直応力  $\sigma_n$  とせん断応力  $\tau$  の時刻歴波形を図-6 に示す。同図に示す  $\sigma_n$  と  $\tau$  は、それぞれ着岩面直角方向と着岩面方向に変換して求めた応力であり、正の値の方向は後述の図-8 に示すとおりである。応力の最大値は時刻  $t=5\sim 6$  秒付近で発生し、時刻歴波形は  $t=10$  秒までについて示した。また、 $t=5.26$  秒 (A 点の応力の最大値発生時刻) と  $t=5.57$  秒 (B 点の  $\sigma_n$  の負の最大値と  $\tau$  の最大値発生時刻) での AB の  $\sigma_n$  と  $\tau$  の分布を図-7 に示す。

以後の検討では、着岩箇所 AB を含む基礎岩盤面を詳細検討断面とし、岩盤の不連続面を考慮した二次元 FEM 非線形動的解析を実施する。荷重としては、AB の  $\sigma_n$  と  $\tau$  をダム堤体反力として作用させる。



(a) 垂直応力  $\sigma_n$



(b) せん断応力  $\tau$

図-6 着岩箇所の応力の時刻歴波形

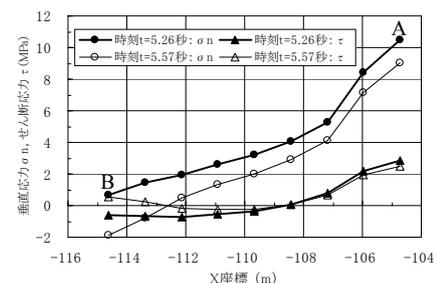


図-7 着岩箇所の応力分布

#### 4. 二次元FEM非線形動的解析

前章で検討した着岩箇所ABを含む基礎岩盤面を詳細検討断面とし、着岩箇所近傍領域を対象に岩盤の不連続面を考慮して再メッシュ分割を行い、二次元FEMによる非線形動的解析を実施した。二次元FEM非線形動的解析は、不連続面の方向や強度を変化させて実施した。

##### (1) 解析モデル

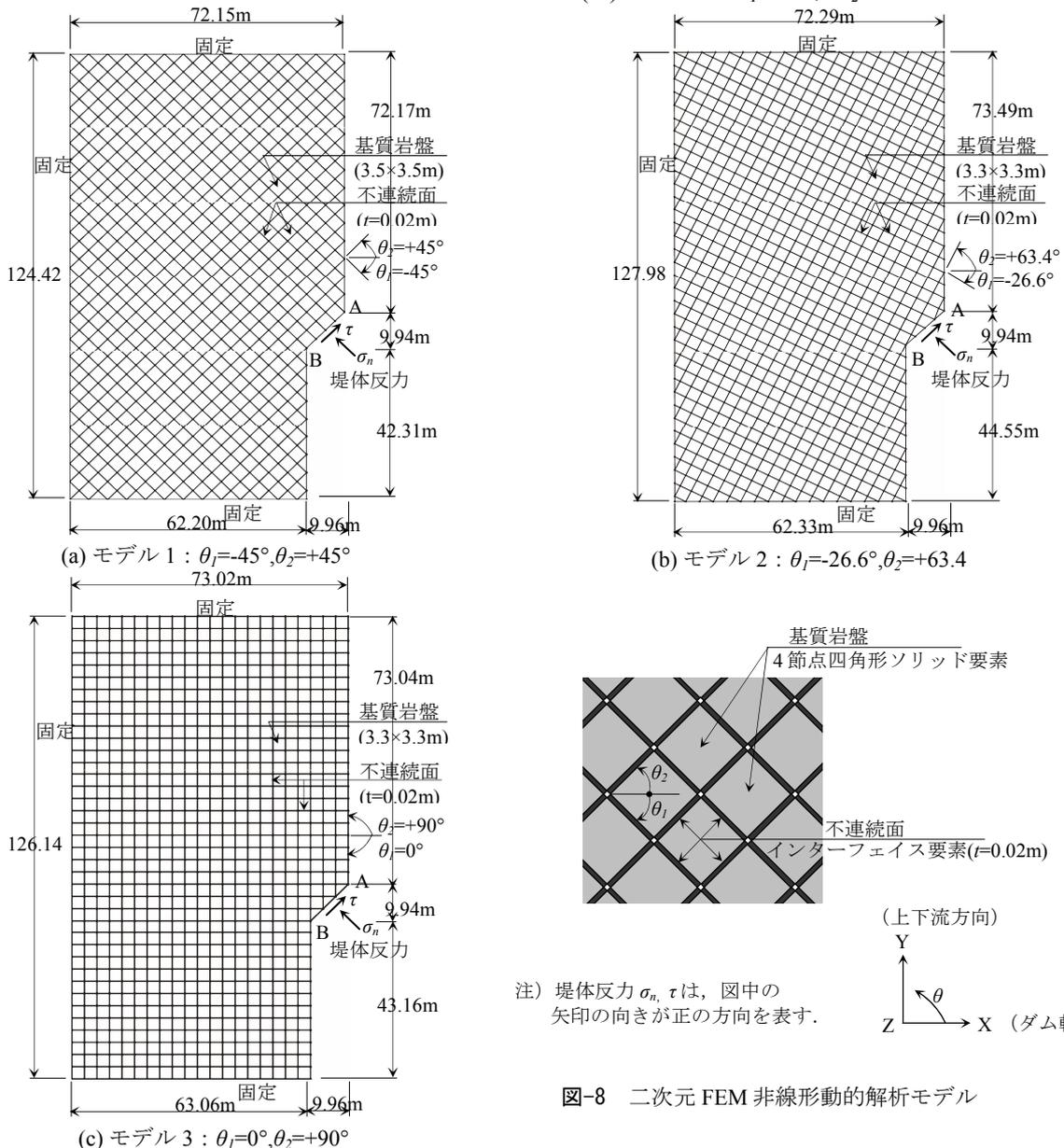
岩盤の不連続面を考慮して再メッシュ分割した解析モデルを図-8に示す。平面ひずみ状態を仮定し、基質岩盤は4節点四角形ソリッド要素、不連続面はインターフェイス要素を用いてメッシュ分割を行った。不連続面（インターフェイス要素）の構成則については、次節で述べる。

実岩盤においては複数の不連続面が存在するケースが多いが、ダム基礎岩盤として利用される花崗岩等の深成岩や堆積岩においては、しばしば互いに直交する3組の不連続面が存在することが知られている。

これより、二次元断面上で直交する2組の不連続面を考慮することにした。また、実岩盤において内在する不連続面の間隔は様々であるが、既往の研究<sup>8)</sup>を参考にして、不連続面の間隔を着岩面の長さ（約14m）の1/4程度（3.5m程度）とし、均一な不連続面分布を仮定した。ちなみに、菊地らによる岩盤分類では、比較的連続性のある（2m以上の連続性を有する）節理の分布間隔の目安として、岩盤が概ね新鮮である（節理面の状態はやや風化汚染されている場合もある）場合に2~10m、新鮮である（節理面の状態は全く風化されていない）場合に10m以上とされている<sup>9)</sup>。

さらに、基礎岩盤の進行性破壊挙動は、不連続面の方向に依存する可能性があることから、以下のような2組の不連続面の方向 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ （ダム軸方向のX軸から反時計回りに正）を想定して、3つのモデルを対象に二次元FEM非線形動的解析を実施した。

- (i) モデル1 :  $\theta_1 = -45^\circ$  ,  $\theta_2 = +45^\circ$
- (ii) モデル2 :  $\theta_1 = -26.6^\circ$  ,  $\theta_2 = +63.4^\circ$
- (iii) モデル3 :  $\theta_1 = 0^\circ$  ,  $\theta_2 = +90^\circ$



**(2) 不連続面の構成則**

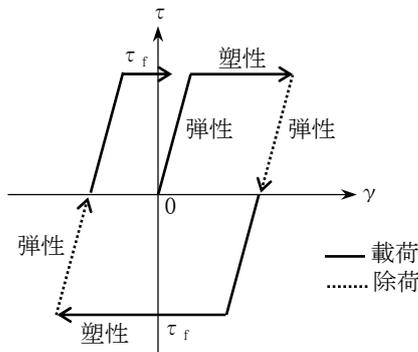
既報<sup>4)</sup>において基礎岩盤の不連続面（インターフェイス要素）の構成則を提案し、模型実験に対するシミュレーション解析から構成則の妥当性を検証している。提案した構成則の概要を以下に示すが、本解析でも同構成則を適用する。

(i) せん断応力  $\tau$ —せん断ひずみ  $\gamma$  関係には、完全弾塑性型の履歴特性を仮定する（図-9(a)参照）。せん断強度  $\tau_f$  は、式(1)に示す Mohr-Coulomb の破壊規準により設定し、引張強度はゼロとして、引張側でのせん断強度  $\tau_f$  はゼロとする Mohr-Friction モデルを想定する（図-10 参照）。

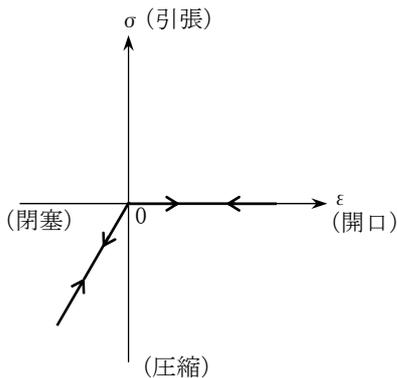
$$\tau_f = \pm c \mp \sigma \tan \phi \tag{1}$$

ここに、 $\sigma$ ：垂直応力、 $c$ ：粘着力、 $\phi$ ：内部摩擦角である。

(ii) 垂直応力  $\sigma$ —垂直ひずみ  $\varepsilon$  関係は、引張（開口）では剛性ゼロ、圧縮（閉塞）では弾性（線形）とする（図-9(b)参照）。



(a) せん断応力  $\tau$ —せん断ひずみ  $\gamma$  関係



(b) 垂直応力  $\sigma$ —垂直ひずみ  $\varepsilon$  関係

図-9 不連続面の構成則

(iii) 不連続面はインターフェイス要素で表現することとし、インターフェイス要素の弾性域での要素剛性マトリックス  $[D_e]$  は式(2)、塑性域での要素剛性マトリックス  $[D_{ep}]$  は式(3a)～式(3c)のとおりとする。 $[D_{ep}]$  は、増分ひずみに対するマトリッ

クスである。式(3a)の  $[D_{ep}]$  の非対角項に示すように、塑性域では垂直ひずみ  $\sigma$  が圧縮の場合に拘束によるせん断応力増分を考慮する。一方、不連続面の粗さの影響（ダイレイション）については無視することにする。

弾性域の場合：

$$[D_e] = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \tag{2}$$

塑性域の場合：

$$[D_{ep}] = \begin{bmatrix} S_h & -S_v \cdot \tan \phi \cdot \text{Sign}(\tau) \\ 0 & S_v \end{bmatrix} \tag{3a}$$

$$S_h = 0 \tag{3b}$$

$$S_v = \begin{cases} E(\sigma < 0) \\ 0(\sigma \geq 0) \end{cases} \tag{3c}$$

ここに、 $G$ ：せん断弾性係数、 $E$ ：ヤング係数、 $\text{Sign}(\tau)$ ： $+1(\tau \geq 0)$ 、 $-1(\tau < 0)$ である。

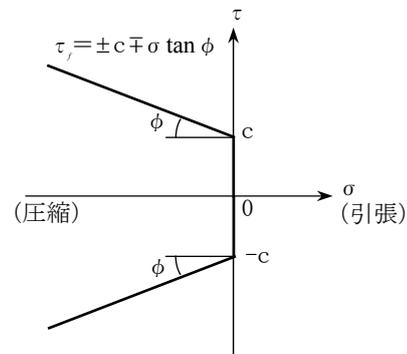


図-10 Mohr-Friction モデル

**(3) 解析定数**

基質岩盤は弾性体とし、不連続面は前節で示した構成則を適用し、二次元FEM非線形動的解析を実施した。解析定数に関しては、基質岩盤ならびに不連続面とも基本的に表-1に示した基礎岩盤の解析定数を用いることとした。

不連続面の強度、すなわち粘着力 $c$ や内部摩擦角 $\phi$ は、基礎岩盤の進行性破壊挙動に大きな影響を及ぼすことが予想される。ここでは、硬岩サイトの不連続面の強度定数として、筆者らが既報<sup>4),5)</sup>において想定した下記2タイプの強度定数を用いることにする。

(i) タイプ1：節理系不連続面の新鮮

$$c=0.16\text{MPa}, \phi=42^\circ$$

(ii) タイプ2：断層の上限  $c=0.54\text{MPa}, \phi=45^\circ$

**5. 耐震安全性評価**

**(1) 破壊指標の提案**

岩盤の不連続性を考慮した二次元FEM非線形動的

解析は、不連続面の方向の異なるモデル1～3と強度の違いによるタイプ1, 2の組み合わせとして、計6つのケースについて実施した。図-4に示した入力地震動の加速度レベルを変化させた解析を行い、当該アーチ式コンクリートダム耐震安全性評価を試みた。

ここで、次式に示す基礎岩盤に係わる $FI_1 \sim FI_4$ の4つの破壊指標を提案、適用し、当該アーチ式コンクリートダム耐震安全性評価を行うこととした。基礎岩盤では、不連続面のすべりや開口によるせん断ならびに引張破壊が生じるものと予想される。そこで、すべての不連続面中さらに全継続時間中の最大のすべり量と開口量に注目し、これらを破壊指標 $FI_1$ および $FI_2$ として提案した。一方、破壊指標 $FI_3$ および $FI_4$ は、各不連続面のすべり量や開口量に不連続面の面積を乗じて全不連続面で累積和を求め、その累積和の全継続時間中の最大値である。 $FI_1$ および $FI_2$ はすべての不連続面中の最大値であることから、基礎岩盤の局所的な破壊を評価するための指標となる。しかしながら、局所的な破壊が基礎岩盤全体としての終局破壊には繋がらないことが懸念される。このため、 $FI_1$ および $FI_2$ だけでなく、基礎岩盤の全体的な破壊を評価するための指標として、 $FI_3$ および $FI_4$ を併せて提案、適用することにした。

入力地震動の加速度レベルを変化させた解析を行い、これら4つの破壊指標が急激に増大する場合に基礎岩盤が終局破壊に至ったものとみなす。また、その時の最大入力加速度を限界加速度 $\alpha_{cr}$ とする(図-11参照)。

$$FI_1 = \max \left| \delta u_i(t) \right| \quad (4a)$$

$$FI_2 = \max \left| \delta v_i(t) \right| \quad (4b)$$

$$FI_3 = \max \left( \sum_i A_i \left| \delta u_i(t) \right| \right) \quad (4c)$$

$$FI_4 = \max \left( \sum_i A_i \left| \delta v_i(t) \right| \right) \quad (4d)$$

ここに、 $FI_1 \sim FI_4$ ：破壊指標、 $\delta u_i(t)$ ：時刻  $t$  の不連続面  $i$  のすべり量、 $\delta v_i(t)$ ：時刻  $t$  の不連続面  $i$  の開口量、 $A_i$ ：不連続面  $i$  の面積である。

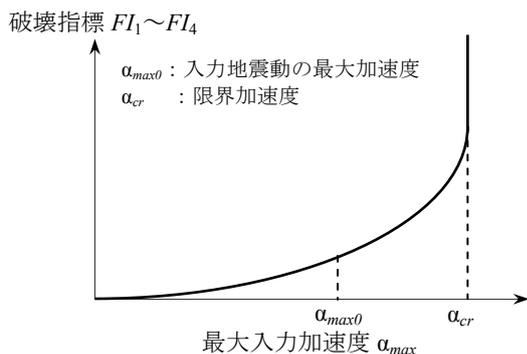


図-11 破壊指標と最大入力加速度の関係

## (2) 二次元FEM非線形動的解析結果

荷重として、着岩箇所ABに三次元FEM線形動的解析より得られたダム堤体反力を作用させた(図-6、図-8参照)。ダム堤体反力は、時間間隔 $\Delta t$ が0.01秒に対してさらに1/800に分割し、増分荷重として作用させた。収束計算にはNewton-Raphson法を適用し、収束判定は変位ノルム(収束誤差は $10^{-2}$ )で評価した。時間積分にはNewmarkの $\beta$ 法を用い、 $\beta = 0.3025$ 、 $\gamma = 0.6$ を採用した。

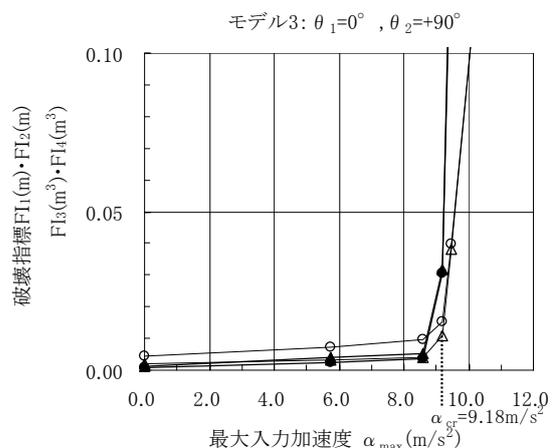
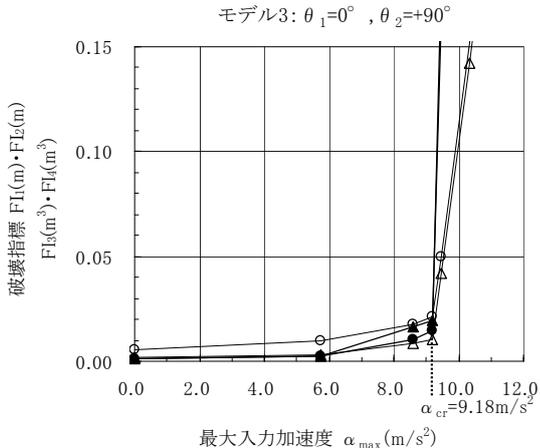
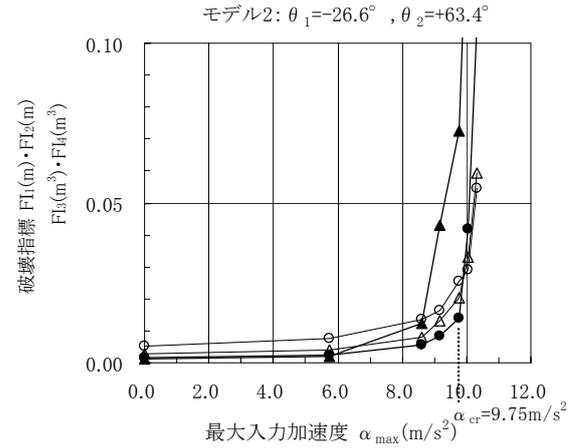
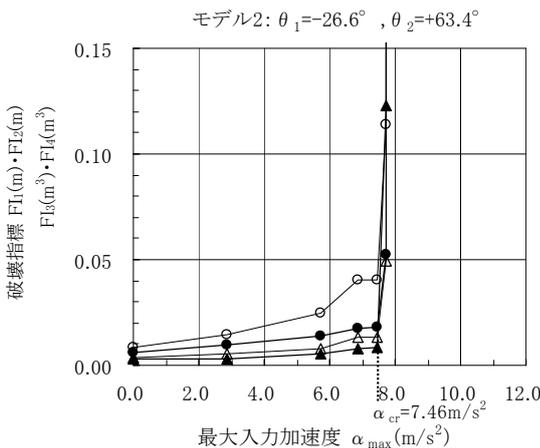
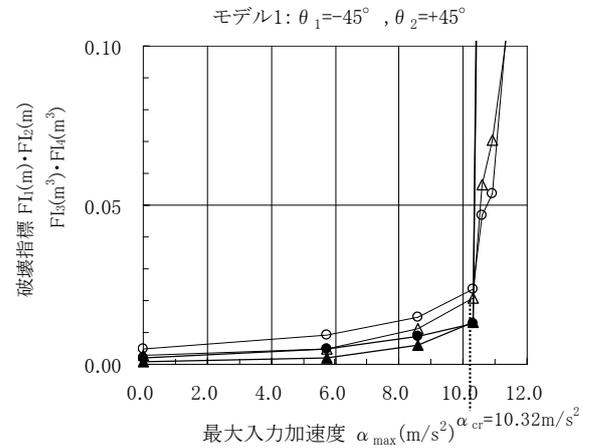
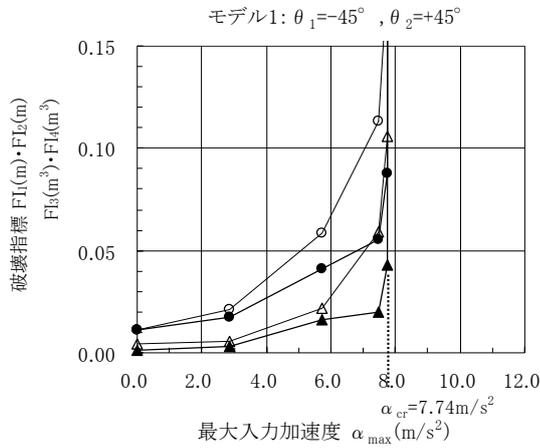
二次元FEM非線形動的解析結果を図-12～図-15に示す。図-12は、破壊指標 $FI_1 \sim FI_4$ と最大入力加速度 $\alpha_{max}$ の関係を示したものであり、 $FI_1 \sim FI_4$ が急激に増大する、すなわち基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度 $\alpha_{cr}$ を図中に示す。また、図-13は、 $\alpha_{cr}$ 入力時の基礎岩盤破壊直前の変形モードである。いずれのタイプ、モデルとも解析時刻 $t = 5.57$ 秒での変形モードであり、次の時刻では基礎岩盤は終局破壊に至っている。図-14は、基礎岩盤の終局破壊に対する不連続面の方向依存性について検討するため、 $\alpha_{cr}$ と不連続面の方向 $\theta_2$ ( $\theta_1$ )の関係について整理したものである。既述のように、 $\theta_2$ ( $\theta_1$ )はダム軸方向からの角度で反時計回りが正である。同様にして、図-15は $\alpha_{cr}$ と粘着力 $c$ の関係について再整理したものである。内部摩擦角 $\phi$ は、「節理系不連続面の新鮮」を想定したタイプ1( $c = 0.16$ MPa、 $\phi = 42^\circ$ )と「断層の上限」を想定したタイプ2( $c = 0.54$ MPa、 $\phi = 45^\circ$ )でほとんど変わらないことから、図-15は両タイプの $c$ の違いに着目して整理したものである。これより、以下のことがわかる。

(i)  $FI_1 \sim FI_4$ と $\alpha_{max}$ の関係を概観すると、いずれのタイプ、モデルとも $\alpha_{max}$ があるレベルを超えると $FI_1 \sim FI_4$ の概ねすべての破壊指標が急増している。この時の $\alpha_{max}$ が $\alpha_{cr}$ となり、 $\alpha_{cr}$ は本研究で想定した入力地震動の最大加速度 $\alpha_{max0} = 5.74$ m/s<sup>2</sup>以上となっている。 $\alpha_{cr}$ はタイプ1ではモデル1～モデル3でそれぞれ7.74m/s<sup>2</sup>( $\alpha_{max0}$ の1.35倍)、7.46m/s<sup>2</sup>(同1.30倍)、9.18m/s<sup>2</sup>(同1.60倍)、一方、タイプ2ではモデル1～モデル3でそれぞれ10.32m/s<sup>2</sup>(同1.80倍)、9.75m/s<sup>2</sup>(同1.70倍)、9.18m/s<sup>2</sup>(同1.60倍)となり、基礎岩盤は終局破壊に至る。本研究で想定した入力地震動は、マグニチュード $M = 8.0$ 、震央距離 $\Delta = 25$ kmの条件下で作成した模擬地震動であり、ダムサイト直下で起こり得る最大級の大規模地震動であると考えられる。 $\alpha_{cr}$ は $\alpha_{max0}$ の1.30～1.80倍であり、当該アーチ式コンクリートダム基礎岩盤は、十分な耐震安全性を有していると考えられる。

(ii) 基礎岩盤破壊直前の変形モードについて見れば、当該基礎岩盤は、いずれのタイプ、モデルとも着岩箇所直近の $\theta_2$ 方向の不連続面が大きく開口し、せん断抵抗を喪失して破壊に至っているものと考えられる。基礎岩盤破壊直前の解析時刻 $t = 5.57$ 秒では、荷重として作用させた着岩箇所の応力の時刻歴波形(図-6参照)において、下流側B点に全時刻歴中引張(負)の最大垂直応力 $\sigma_n$ が発生するとともに正の方向の大きなせん断応力 $\tau$ (B点の $\tau$ の正の値として

は全時刻歴中最大)が発生している. 一方,  $FI_1 \sim FI_4$ と $\alpha_{max}$ の関係で, 上述のように $\alpha_{cr}$ 入力時には $FI_1 \sim FI_4$ の概ねすべての破壊指標も急増しており, 当該アーチ式コンクリートダム基礎岩盤の破壊は, 不連続面の開口とすべりによる引張ならびにせん断の連成破壊であると考えられる. ところで, アーチ式

コンクリートダム基礎岩盤の現行耐震設計では, ダム堤体からの反力に対し, Hennyの式を用いせん断に対してのみ耐震安全性照査が行われている<sup>10)</sup>. 本解析結果のように, 大規模地震時には着岩箇所近傍で局所的に大きな引張の $\sigma_n$ が発生し, 不連続面には開口破壊が生じて基礎岩盤が破壊に至る可能性があることに留意する必要がある.



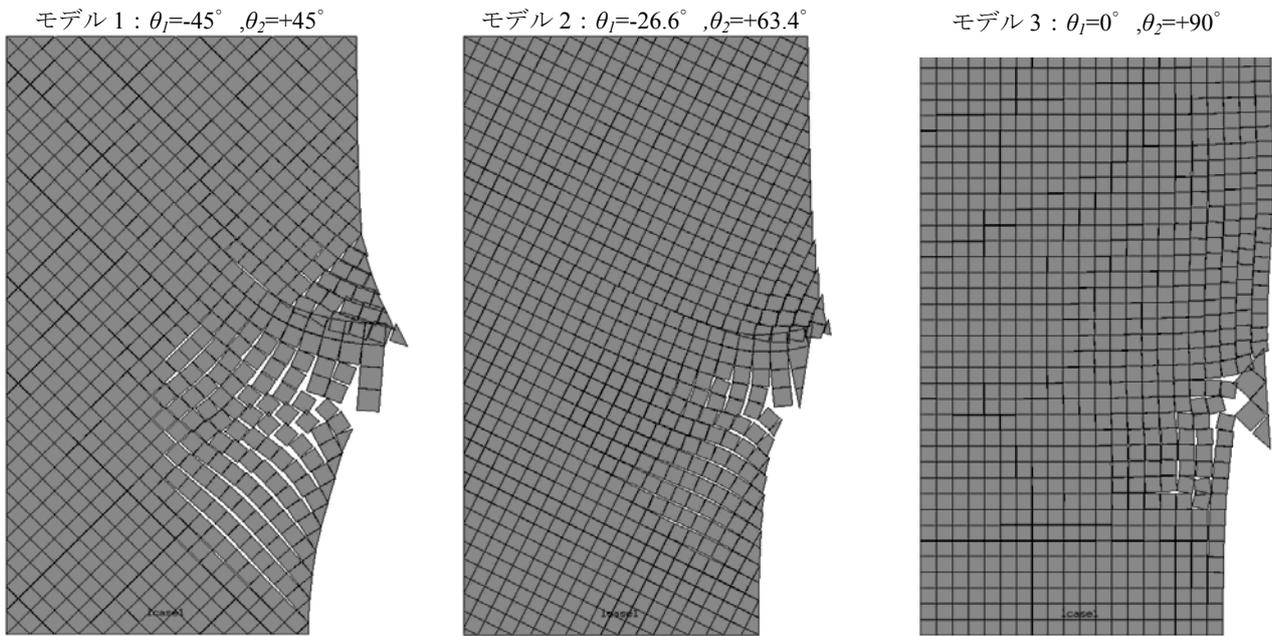
● FI1 ▲ FI2 ○ FI3 △ FI4

● FI1 ▲ FI2 ○ FI3 △ FI4

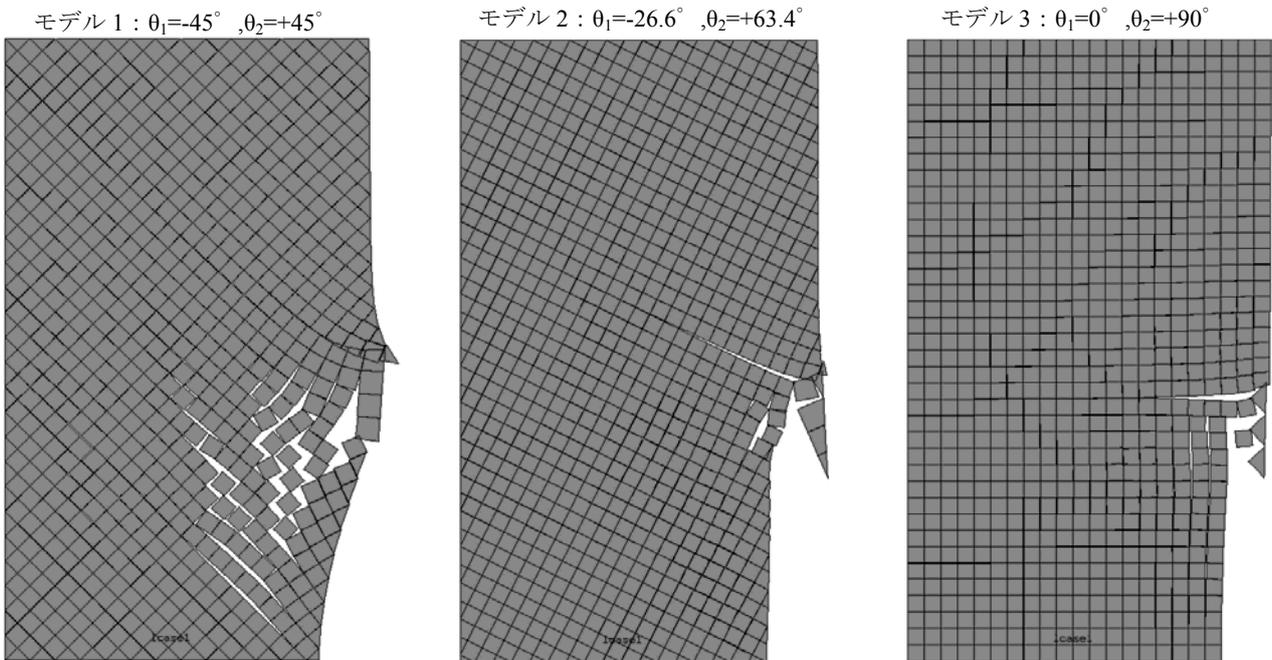
(a) タイプ 1 :  $c=0.16\text{MPa}$ ,  $\phi=42^\circ$

(b) タイプ 2 :  $c=0.54\text{MPa}$ ,  $\phi=45^\circ$

図-12 破壊指標  $FI_1 \sim FI_4$ と入力地震動の最大加速度  $\alpha_{max}$ の関係



(a) タイプ 1 :  $c=0.16\text{MPa}$ ,  $\phi=42^\circ$



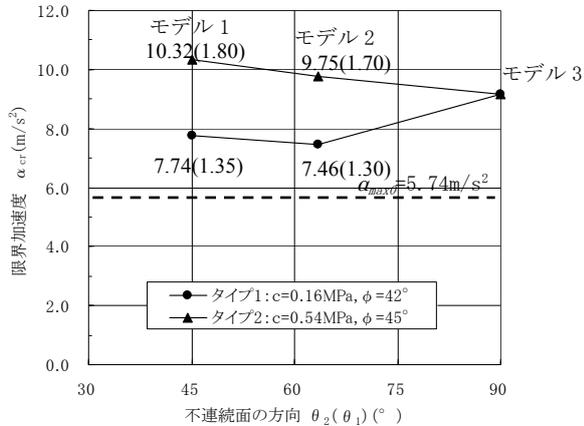
(b) タイプ 2 :  $c=0.54\text{MPa}$ ,  $\phi=45^\circ$

図-13 基礎岩盤の破壊直前の変形モード ( $t=5.57$  秒)

(iii)  $\alpha_{cr}$ と $\theta_2$  ( $\theta_1$ ) の関係より、タイプ1ではモデル1, モデル2の $\alpha_{cr}$ はそれぞれ $7.74\text{m/s}^2$ ,  $7.46\text{m/s}^2$ と同程度の値となっている。これに対し、モデル3の $\alpha_{cr}$ は $9.18\text{m/s}^2$ と20%程度大きくなっている。一方、タイプ2では $\alpha_{cr}$ は $\theta_2$ が大きくなるに従って暫減し、モデル1~3でそれぞれ $10.32\text{m/s}^2$ ,  $9.75\text{m/s}^2$ ,  $9.18\text{m/s}^2$ となっている。モデル1に対しモデル3では、 $\alpha_{cr}$ は10%程度小さい。これより、大局的に見れば、 $\alpha_{cr}$ に対するすなわち基礎岩盤の終局破壊に対する不連続面の方向依存性は顕著でないと考えられる。

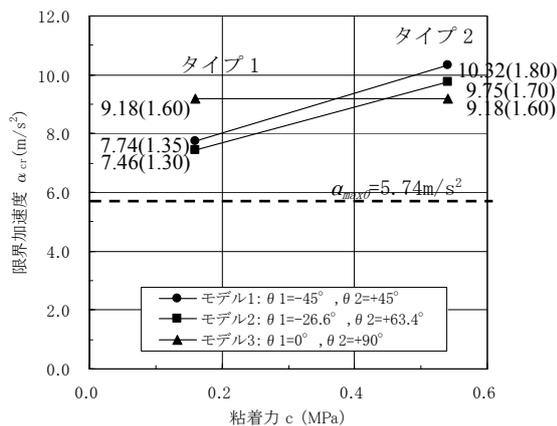
(iv)  $\alpha_{cr}$ と $c$ の関係より、モデル1では $\alpha_{cr}$ はタイプ1で $7.74\text{m/s}^2$ , タイプ2で $10.32\text{m/s}^2$ となり、 $c$ が大きくなると $\alpha_{cr}$ は増大している。モデル2でも $\alpha_{cr}$ は同様に増大し、タイプ1が $7.46\text{m/s}^2$ に対してタイプ2では $9.75\text{m/s}^2$ となっている。これに対し、モデル3ではタイプ1, タイプ2とも $\alpha_{cr}$ は $9.18\text{m/s}^2$ と同一値となっており、 $c$ の違いによる影響が現れない結果となっている。このことは、基礎岩盤破壊直前の変形モードにおいて、着岩箇所の下流側近傍領域に注目すると、モデル1とモデル2ではタイプ2よりタイプ1で $c$ に関

係するすべりによる破壊の兆候がより顕著に現れているのに対し、モデル3ではタイプ1、タイプ2ともすべりによる破壊の兆候がほとんど現れていないことに対応している。



注) 図中の数字は、限界加速度  $\alpha_{cr}$  の値であり、( ) の値は本研究で想定した入力地震動の最大加速度  $\alpha_{max0}=5.74\text{m/s}^2$  に対する倍率を示す。

図-14 限界加速度  $\alpha_{cr}$  と不連続面の方向  $\theta_2 (\theta_1)$  の関係



注) 図中の数字は、限界加速度  $\alpha_{cr}$  の値であり、( ) の値は本研究で想定した入力地震動の最大加速度  $\alpha_{max0}=5.74\text{m/s}^2$  に対する倍率を示す。

図-15 限界加速度  $\alpha_{cr}$  と粘着力 c の関係

## 6. まとめ

本研究では、アーチ式コンクリートダムを対象に、基礎岩盤の不連続面の進行性破壊を考慮した非線形動的解析を実施して、基礎岩盤に注目した耐震安全性評価を試みた。不連続面のすべりや開口に関する破壊指標を新たに提案、適用し、想定した入力地震動の加速度レベルを変化させた非線形動的解析から、基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度を求めた。非線形動的解析は、不連続面の方向や強度を変化させて実施し、限界加速度に基づいてアーチ式コンクリートダムの耐震安全性評価を試みた。得られた知見をまとめると、以下ようになる。

(i) アーチ式コンクリートダムの大規模地震に対する耐震安全性評価の対象が主に堤体であるの対

し、基礎岩盤に着目した耐震安全性評価を試みた。

基礎岩盤の不連続面のすべりや開口に関する4つの破壊指標を提案し、想定した入力地震動（最大加速度  $\alpha_{max0}=5.74\text{m/s}^2$ ）の加速度レベルを変化させた解析を行い、破壊指標の急増から基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度  $\alpha_{cr}$  を求めた。本研究で想定した入力地震動（マグニチュード  $M=8.0$ 、震央距離  $\Delta=25\text{km}$  の条件下で作成した模擬地震動）は、ダムサイト直下で起こり得る最大級の大規模地震動であると考えられるが、 $\alpha_{cr}$  は  $\alpha_{max0}$  の1.30～1.80倍となり、当該アーチ式コンクリートダム基礎岩盤は、十分な耐震安全性を有していると考えられる。

(ii) 当該基礎岩盤の破壊は、着岩箇所直近の不連続面が大きく開口し、せん断抵抗を喪失して生じており、不連続面の開口とすべりによる引張ならびにせん断の連成破壊であると考えられる。アーチ式コンクリートダム基礎岩盤の現行耐震設計では、せん断に対してのみ耐震安全性照査が行われているが、大規模地震時には着岩箇所近傍で局所的に大きな引張応力が発生し、不連続面には開口破壊が生じて基礎岩盤が破壊に至る可能性がある。

(iii) 不連続面の方向の違いによる限界加速度  $\alpha_{cr}$  の変化の度合いは、不連続の強度によって10%あるいは20%程度であり、大局的に見れば、基礎岩盤の終局破壊に対する不連続面の方向依存性は顕著でない。また、粘着力  $c$  が大きくなると  $\alpha_{cr}$  は増大する傾向にあるが、上下流方向とダム軸方向の不連続面を有するモデルでは、 $c$  の違いにより  $\alpha_{cr}$  は変化せず、基礎岩盤の終局破壊に及ぼす  $c$  の影響は現れない。

本研究では、不連続面を連続性のある均一分布と仮定したが、今後より実際に近い岩盤の不連続面分布を想定し、同様の解析的検討を実施して、アーチ式コンクリートダム基礎岩盤の耐震安全性評価を試みる予定である。

## 参考文献

- 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説，2005。
- Valliappan, S., Yazdchi, M. and Khalili, N.: Earthquake analysis of gravity dams based on damage mechanics concept, Int. J. for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.20, pp.725-751, 1996.
- 多田浩之，石塚与志雄，堀井秀之，内田善久，柏柳正之，木全宏之：不連続面を考慮したダム基礎岩盤の地震時安定性評価手法の提案，土木学会論文集，No.715/III-60, pp.201-213,2002.
- 木全宏之，藤田豊，堀井秀之，Mahmoud YAZDANI：基礎岩盤の不連続性を考慮した重力式コンクリートダムの地震時挙動，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 68, No. 4, pp. I\_891- I\_898, 2012年。
- 経済産業省資源エネルギー庁，(社)電力土木技術協会：ダム耐震設計高度化調査報告書，平成12年度電力施設地震対策調査(発電設備耐震信頼性実証試験)，2001。
- Westergaard, H.M.: Water Pressures on dams during

- earthquakes, Trans., ASCE, Vol.75, pp.418-433, 1933.
- 7) Osaki, Y. : Guideline for evaluation of basic design earthquake ground motions, 1979.
- 8) 高野稔 : アーチダムの基盤の安全性に対する実験的検討方法に関する研究, 土木学会論文集, 第78号, pp.43-70, 1962.
- 9) 菊地宏吉, 齊藤和雄, 楠建一郎 : ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について, 大ダム, No.102, 103合併号, 1982.
- 10) 河川管理施設等構造令および同施工規則.

## SEISMIC SAFETY EVALUATION OF CONCRETE ARCH DAMS AGAINST EARTHQUAKE-INDUCED FAILURE OF JOINTED ROCK FOUNDATIONS

Hiroyuki KIMATA, Hideyuki HORII and Mahmoud YAZDANI

In this study, non-linear dynamic analyses for earthquake-induced failure of jointed rock foundations are conducted evaluating the seismic safety of concrete arch dams. Damage indices are proposed for representing sliding and opening behavior of rock joints. By varying specified peak ground acceleration (PGA) in dynamic analyses, critical acceleration can be obtained, when damage indices dramatically increase and jointed rock foundations fail. Dynamic analyses are conducted considering rock joints with various orientations and strength properties. Seismic safety is evaluated for jointed rock foundations of concrete arch dams, comparing critical acceleration to PGA.