

# 論文 既設アーチダムの耐震性能評価に関する検討

西内 達雄\*1・豊田 幸宏\*2

**要旨:** 既設アーチダムの地震時挙動を現実的に即した形で評価することを目的として、鉛直ジョイント部での剥離やすべりの離接挙動を考慮した非線形地震応答解析を実施し、堤体変位や応力の応答値に与える鉛直ジョイント部の影響を把握した。鉛直ジョイント部での離接を考慮すると、堤体ブロックの上下流方向に対する片持梁的な曲げ変形が卓越し、発生・変動する応力も鉛直方向が支配的となる。また、滑動安定性を評価すると、冬期に堤体が下流側へ最大変形する時が、最も厳しい条件となり、線形解析よりも非線形解析の方が安全率は大きくなることが分かった。

**キーワード:** アーチダム, 鉛直ジョイント部, 地震応答解析, 耐震性評価

## 1. はじめに

アーチダムは、作用外力を周辺岩盤が受け持つ三次元構造形式であり、アーチダムの構造安定性を評価する際、構造的に不連続な鉛直方向の施工ジョイント部を適切に評価することが重要であると考えられている。San Fernando地震(1971年, M=6.6)では、Pacoimaダム(堤高113mアーチ式)の天端近傍において、水平1.25Gの最大加速度が観測されたが、堤体の被害は皆無であった。一般に、アーチダムの動的解析結果と比べ、堤体の地震による被害が小さいという事実を説明する仮説の一つとして、鉛直ジョイント部での引張力の解放が挙げられていたが、この事例においては、実際には発生しなかったひびわれを解析で再現するためには、鉛直ジョイント部で生じる地震力の減衰を適切に評価する必要があったことから、仮説を裏づける一つの根拠と考えられる。

本研究の目的は、鉛直ジョイント部で生じる離接挙動をモデル化した非線形地震応答解析手法(以下、非線形解析手法と称す)を用いて、既設アーチダムの地震時挙動を明らかにし、耐震安定性を合理的に評価することである。

## 2. 解析手法の概要

### 2.1 非線形解析手法の特徴

本解析手法の主な特徴を以下に示す。

- ①鉛直ジョイント部での剥離やすべり、再接触が考慮できる。
- ②堤体の柱状ブロック構造を考慮でき、自重解析や温度応力の評価に於いて、ジョイントグラウトの注入以前の堤体がダム軸方向に不連続な状態を再現できる。

### 2.2 解析条件

#### (1) 解析領域および境界条件

解析に使用した要素分割を図-1に示す。対象としたアーチダムの堤高は133mである。堤

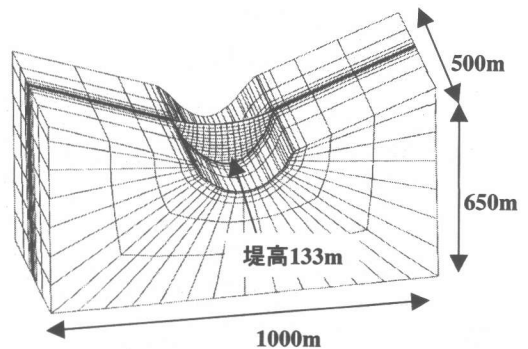


図-1 解析に用いた要素分割

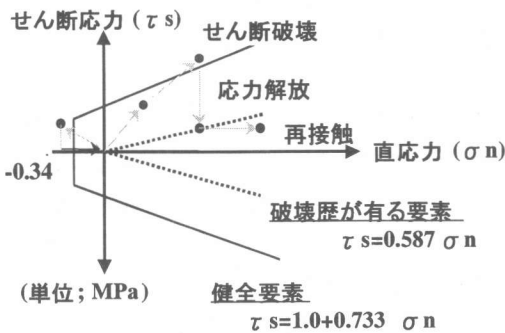
\*1 (財)電力中央研究所 構造部 工修 (正会員)

\*2 (財)電力中央研究所 構造部 工修

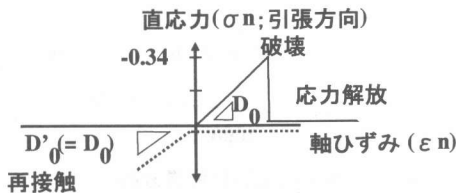
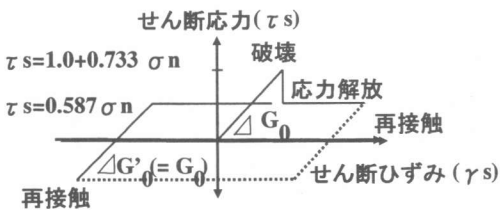
体は厚さ方向に5層分割した。岩盤の境界条件は、側方は鉛直方向固定の水平ローラー、底面は粘性境界(ダッシュポット要素を配置)を配置することにより、鉛直方向の動きを拘束した。

## (2) 鉛直ジョイント部のモデル化

アーチダムでは、堤体コンクリート築造時の温度応力対策のため、ダム軸方向に不連続な鉛直ジョイント部が設けられる。堤体完成後、鉛直ジョイント部にはグラウト材が注入されて、堤体は一体化するものの、大地震時には鉛直ジョイント部では繰返し開閉やすべりが起こり、堤体内の応力再配分が生じると考えられる。このような挙動を評価するため、図-2に示すようなモデル化を行った。剥離とすべりの状態判定は、既報<sup>2)</sup>のせん断すべり基準を適用し、すべり方向の履歴特性はノーマルバイリニア型と



(a)せん断すべり基準



(b)すべり方向と剥離方向の履歴特性

図-2 鉛直ジョイント部のモデル化

した。また、剥離方向は、直応力 0.34MPa 以上の引張応力でノーテンション、圧縮応力で弾性体とする離接の非線形性を考慮した。

## (3) 入力地震動

解析に用いた入力地震動はエルセントロ NS 波(最大加速度 341gal)とした。FEM 解析で用いた基盤入力地震動は、上記地震波を入力基盤面(解析領域底面)まで引き戻した地震動である。引き戻し方法は、堤体底面と解析領域底面間における応答波形の周波数伝達関数を求め、逆算して作成した。本解析での入力方向は堤体の上下流方向のみとした。

## (4) 物性値

解析で用いた物性値を表-1に示す。コンクリートおよび岩盤は線形弾性体として扱った。また、既往の研究成果<sup>3)</sup>を参考にして、動弾性係数と動ポアソン比は静的物性の1割増と仮定した。貯水の影響は付加質量で定義し、動水圧は Westergaard 式を用いた。減衰は、解析対象としたダムで実施した起振実験結果<sup>4)</sup>に基づき、モード減衰(一次 2%、二次 3%)を定義した。

表-1 解析に用いた動的物性

	動弾性係数	動ポアソン比	単位質量
コンクリート	33469MPa	0.2	2.3t/m <sup>3</sup>
ジョイント	9180MPa	0.2	2.3t/m <sup>3</sup>
岩盤	7648MPa	0.2	2.3t/m <sup>3</sup>

## 2.3 解析手順

非線形解析手法の手順を図-3に示す。解析内容は、常時挙動解析と地震時挙動解析から構成される。

解析手順として、まず、静水圧、温度荷重、自重を考慮した常時挙動解析<sup>1)</sup>により、鉛直ジョイント部でのすべりや剥離の状況を把握した。その結果に基づき、地震入力を想定する時期(季節)において、鉛直ジョイント部で想定されるすべりや剥離の状態変化に応じたせん断すべり基準を、鉛直ジョイント部の各要素特性として設定した。これらの解析とは別に、地震時挙動

解析の準備として、入力地震動の基盤入力波への変換と、貯水の付加質量によるモデル化とを行い、非線形地震応答解析（汎用構造解析コード「ABAQUS」を使用）を実施した。

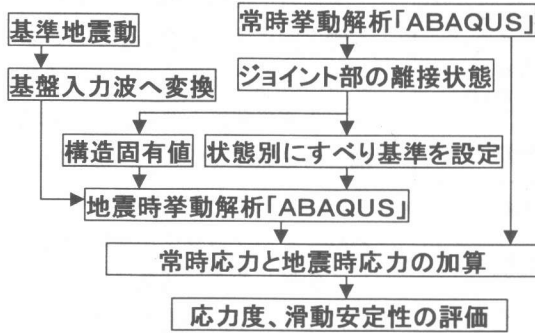


図-3 アーチダムの地震応答解析の手順

### 3. 非線形解析手法に基づく地震時挙動評価

#### 3.1 基本振動特性

堤体の一次固有振動数と貯水位の関係を図-4に示す。貯水位が堤高の2/3程度までの範囲では、貯水位の低下に伴う付加質量の減少が支配的となるため、何れの解析結果とも、固有振動数は増加する傾向が認められる。しかし、それ以降の貯水位の低下になると、線形解析結果では、一定値に収束する傾向が認められるのに対して、非線形解析では、固有振動数は減少する傾向が認められ、貯水位が堤高の1/3程度で固有振動数の極値が現れている。この極値が生じた貯水位レベルは、鉛直ジョイント部で生じた離接領域が最も広範囲となっていた。非線形解析結果により示された性状の原因としては、貯水位の低下により、ダム軸方向のアーチ力が弱まり、鉛直ジョイント部の一部で開口が生じることにより<sup>4)</sup>、堤体の全体剛性が低くなることに起因したと考えられる。

既設アーチダム9地点において、地震観測記録や常時微動計測、起振実験等により得られた記録<sup>4)5)6)7)</sup>に基づき、堤体の一次固有振動数と貯水位の関係を図-5に整理した。固有振動数と貯水位はダムに応じて異なるため、固有振動数は当該ダムでの高水位時に対する比率で、貯

水位は当該ダムでの堤高に対する比率で正規化した。上述の解析結果により示された性状が、実測値からも概ね認められることがわかる。

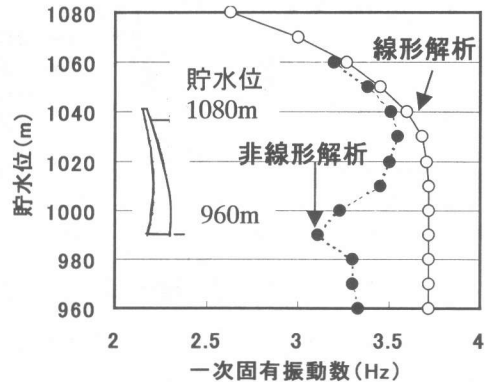


図-4 一次固有振動数と貯水位の関係

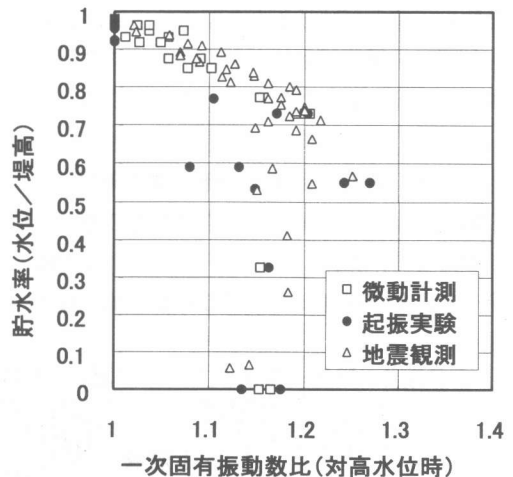


図-5 既設ダムでの一次固有振動数測定結果

#### 3.2 地震時の堤体変形

地震時の堤体変形に関して、夏期と冬期における堤体中央断面の上下流方向に関する最大変形時の解析結果を図-6に示す。

上下流方向の変位振幅は、非線形解析結果の方が大きくなっている。これは、鉛直ジョイント部をモデル化したことにより、堤体ブロックが互いに變形しやすくなったことによる影響と考えられる。また、堤体が上流側へ變形する時の方が、下流側へ變形する時よりも、鉛直ジョイント部のモデル化による影響が大きく現れて

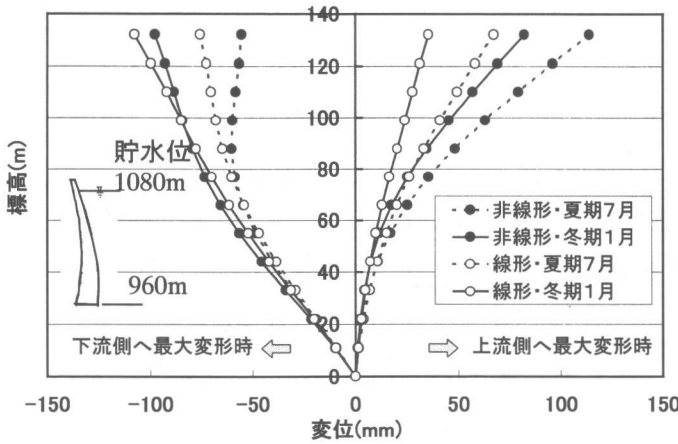


図-6 堤体中央断面の上下流方向変位

いる。これは、下流側への変形は、堤体の圧縮力が増加する方向であり、堤体剛性が高まり変形しにくいことに対して、上流側への変形は、堤体の圧縮力が減じる方向であり、鉛直ジョイント部での離接が生じやすく、堤体ブロックが独立して変形しやすいためと考えられる。

### 3.3 鉛直ジョイント部の離接挙動

鉛直ジョイント部で生じる地震時の離接挙動に着目して、鉛直ジョイント部において剥離とすべりによる状態変化を起こした領域が最も広

範囲であった冬期の upstream 側変形時と、状態変化を起こした領域が最も小さかった夏期の downstream 側変形時の解析結果を図-7に示す。

冬期の upstream 側変形時は、元々ダム軸方向に働く圧縮力が小さい状態で、さらに圧縮力が弱まる upstream 側への変形状態となるため、岩着部近傍の領域を除いて、広範囲の鉛直ジョイント部で剥離が生じており、堤体ブロックが比較的独立して変形しやすい状態にあると考えられる。逆に、夏期の downstream 側変形時は、鉛直ジョイント部が密着する変形方向であり、ダム軸方向に働く圧縮力が全体的に増加し、特に downstream 側では大きな圧縮力が働く領域が形成されると考えられる。このため、上流側の作用荷重が比較的大きい岩着部近傍や、スラスト力の大きい左右岸アバウト部近傍で状態変化が生じたと考えられる。

### 3.4 地震時のひびわれ性状

堤体コンクリートの引張応力に着目し、その発生領域と応力度の大きさ、方向に関して評価を行った。解析では、コンクリートは線形弾性体として扱っているため、引張応力 2.45MPa (一軸圧縮強度の約 1/12) をひびわれの発生判定値として、解析結果から得られた要素応力、主応力方向から、ひびわれの発生領域と方向を判定した。ひびわれが最も発生しやすい、冬期に堤体が upstream 側へ最大変形した時の、堤体下流面におけるひびわれ性状を図-8に示す。非線形解析では鉛直ジョイント部で剥離やす

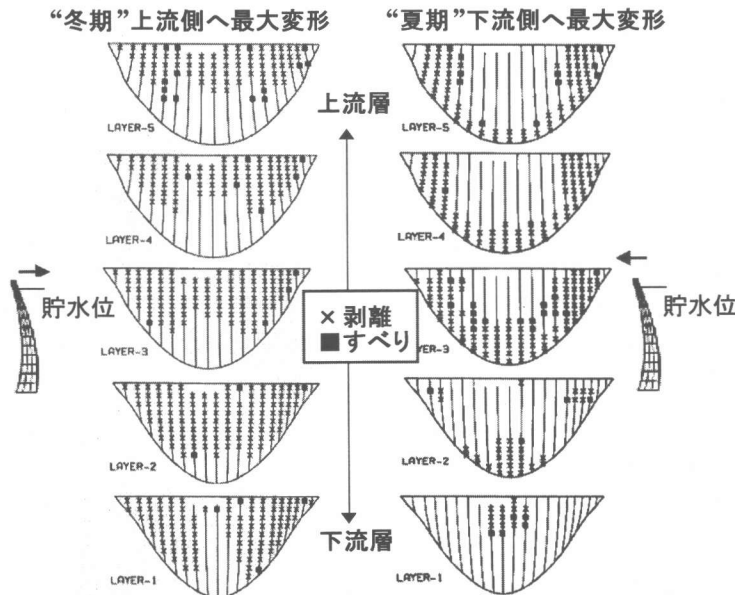


図-7 地震時の鉛直ジョイント部での離接挙動

べりが生じたことにより、堤体ブロックが独立した片持梁的な変形をしやすくなり、ひびわれ発生箇所は中段標高部に多く見られ、発生方向は水平となっている。線形解析では、堤体が連続構造として変形することに起因して、ひびわれ発生箇所はショルダー部に近い部位で、発生方向は鉛直方向となっている。堤体の奥行き(厚さ)方向に関するひびわれ領域は、厚さの1/3程度であった。

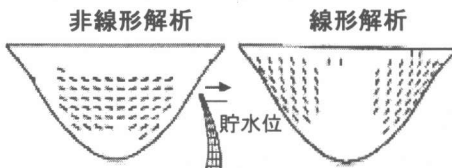
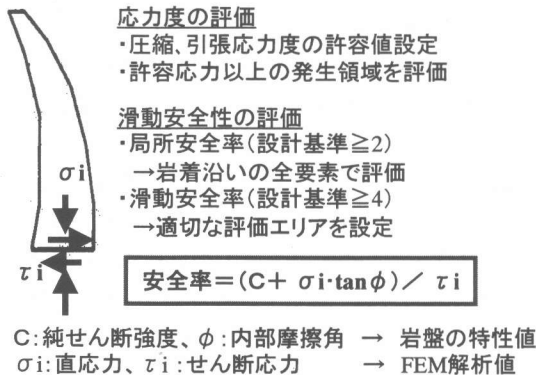


図-8 下流面のひびわれ性状

#### 4. 既設アーチダムの耐震性評価

##### 4.1 評価概要

アーチダムの耐震性を評価する場合、新設ダムに対しては、「ダム設計基準」<sup>8)</sup>(日本大ダム会議)や「河川管理施設等構造令」<sup>9)</sup>(建設省)で、設計時の評価項目や評価基準が定められている。しかし、既設ダムに対しては評価項目や評価規準は定められていない。このため、既設ダムの耐震性を、新設ダムの設計基準に準じて、



評価エリアの設定例

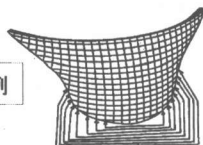
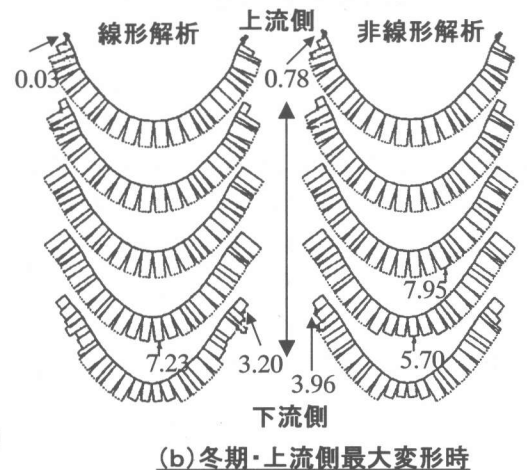
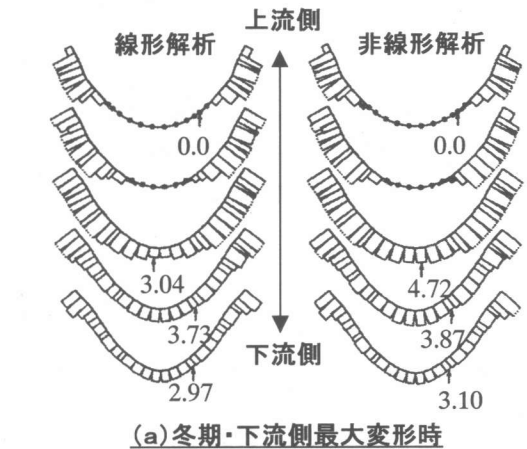


図-9 既設アーチダムの耐震性評価の概要

応力度と滑動安定性の観点から評価を行った。評価概要を図-9に示す。なお、以下では滑動安定性の評価結果を考察する。

#### 4.2 滑動安定性の評価

堤体の滑動安定性の評価として、岩着要素に着目して、局所的なすべりと、全体の滑動に対して評価した。安全率の計算では、Hennyのせん断摩擦安全率の計算式を用い、岩盤等級  $C_M$  級の上限值に相当する、岩盤の純せん断強度 1.96MPa、内部摩擦角  $40^\circ$  を用いた。



□ 安全率4.0  
 → 安全率<1.0

図-10 局所安全率の計算結果一例 (冬期の堤体上下流方向変形時)

冬期の上下流方向変形に対して、局所安全率を計算した結果を図-10に示す。

図から、堤体が下流側へ変形した時の方が安全率は小さくなり、堤体の上流側中央岩着部で1.0を下回る領域が認められた。堤体の底面全体として見れば、大半の領域で十分な安全率を有していることがわかる。

堤体が下流側へ変形した時の滑動安全率を計算した結果を図-11に示す。図に示した8要素幅は、安全率の値が最も小さかった結果である。安全率の値は冬期が最も小さくなり、非線形解析結果の方が、線形解析結果よりも大きくなっている。

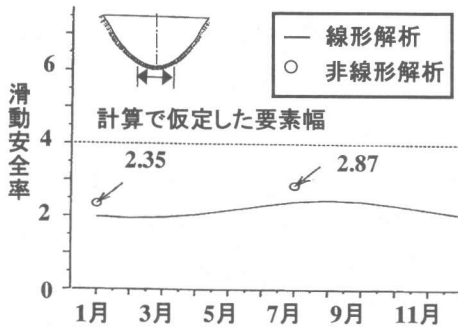


図-11 滑動安全率の計算結果一例  
(堤体が下流側変形時の季節変化)

荷重条件や物性が設計時と異なり、単純に設計基準で規定されている局所安全率 2.0、滑動安全率 4.0 と比較することはできないが、今回の解析条件に基づき、既設アーチダムの耐震性を評価した結果、冬期に堤体が下流側へ変形する時が、滑動に対して最も厳しい条件であることが示された。これは、ダムの設計において、堤体の慣性力は下流方向と規定されていることと合致する。

## 5. まとめ

鉛直ジョイント部で生じる離接挙動をモデル化した地震応答解析手法を用いて、既設アーチダムの地震時挙動を明らかにした。さらに、ダム設計基準に準じて既設アーチダムの耐震性を評

価した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 鉛直ジョイント部での離接を考慮すると、堤体ブロックの上下流方向に対する片持梁的な曲げ変形が卓越し、発生・変動する応力も鉛直方向が支配的となる。このような応答性状は、従来の経験的な知見と一致する。
- (2) 地震時における堤体の滑動安定性は、冬期に堤体が下流側へ最大変形する時が、最も厳しい条件となり、堤体岩着部における鉛直方向の応力レベルの違いにより、線形解析よりも非線形解析の方が安全率は大きくなる。

## 参考文献

- 1) International Engineering Company, Pacoima Arch Dam Investigation and Evaluation of Effects of San Fernando Earthquake, Los Angeles County Flood Control District, 1972
- 2) 西内達雄ほか：三次元非線形有限要素法を用いた既設アーチダムの常時挙動の検討，電力中央研究所報告(U97060)，1998.1
- 3) 佐藤正俊ほか：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-35，1997.5
- 4) 豊田幸宏ほか：現場振動計測に基づく既設アーチダムの動的応答特性に関する検討，電力中央研究所報告(U97031)，1997.9
- 5) 上田稔ほか：アーチダムの地震観測記録などから求めた固有振動数について，土木学会第51回年次学術講演会概要集I部門，1996.9
- 6) 有賀義明：アーチダムの三次元地震時シミュレーション解析，電力土木 No.258，1995.7
- 7) 高橋忠：コンクリートダムの振動性状に関する実験的研究，東京大学学位論文，1962.12
- 8) ダム設計基準，社団法人日本大ダム会議，1978.8
- 9) 解説・河川管理施設等構造令，社団法人日本河川協会，1978.3