

# 論文 ジョイント部の非線形挙動を考慮したアーチダムの 三次元有限要素解析手法の開発

西内達雄 \*1 金津努 \*2

**要旨：**ジョイント部の挙動やコンクリートの非線形性を考慮したアーチダムの三次元非線形有限要素解析手法を開発した。この手法を用いてアーチダムの挙動を評価した結果、年間を通じたジョイント部のひらきやすべり挙動が解析上明らかにされた。また、アーチダムの堤体内部には、ジョイント部の季節的な状態変化に起因した応力伝達領域が形成され、外力に抵抗することが示され、セカンダリーアーチによる耐荷機構を定性的に検証することができた。従来の連続弾性体解析では評価が難しかった、冬期の堤体表層コンクリートの応力やひびわれ性状に関しても、より現実的な評価が行えるものと推測される。

**キーワード：**アーチダム、ジョイント部、非線形解析手法、耐荷機構

## 1. はじめに

アーチダムは、一般的にダム軸方向 15~20m 毎に、鉛直方向のジョイントを設置し、そこにグラウトを注入して一体化させた構造となっている。従来は、これらのジョイントを考慮することなく堤体全体を一体構造として弾性的に取り扱い、アーチダムの挙動の評価を行ってきた。しかし、実際には、ジョイント部では不連続となっている領域があり、例えば、気温変化によるダムの温度応力を検討する場合には、ジョイント部の非線形的な特性を考慮することが必要とされている。

本研究は、アーチダムのジョイント部の挙動や堤体コンクリートのひびわれ等の非線形特性を考慮した三次元非線形有限要素解析手法を開発し、アーチダムの常時挙動を精度良く解析し、健全性評価や設計技術に反映させることを目的として実施したものである。

## 2. 解析手法の概要

### 2. 1 解析条件および物性値

ダムは堤高 150m クラスの実機をモデル化した。解析に用いた要素分割を図-1 に示す。解析領域は堤体を中心として左右岸方向 1.5km、上下流方向 0.8km、高さ方向 1.0km とした。堤体は厚さ方向に 5 層分割し、下流面表層および上流面表層の厚さは 1m、中間層は残りの厚さを均等に 3 等分割した。解析では 8 節点アイソパラメトリック要素を用い、ジョイント部には非線形接合要素を組み込み、すべりと剥離とを表現できるようにした [1,2]。

コンクリートは非線形特性として Kupfer 則、ひびわれ特性として二軸応力判定を適用した。解析に用いた物

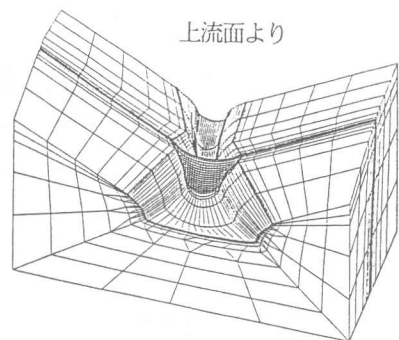


図-1 解析に用いた要素分割

\*1 (財)電力中央研究所 構造部 主任研究員、工修(正会員)

\*2 (財)電力中央研究所 構造部 上席研究員、工修(正会員)

性値は、弾性係数  $E = 300000 \text{ kgf/cm}^2$ 、せん断弾性係数  $G = E/2(1+\nu)$ 、ポアソン比  $\nu = 0.2$ 、圧縮強度  $\sigma_c = 300 \text{ kgf/cm}^2$ 、引張強度  $\sigma_t = 25.0 \text{ kgf/cm}^2$  とした。ひびわれ後の特性は、ひびわれ主軸方向（ひびわれ面と垂直方向）の剛性をほぼ零とし、同方向の応力は全て解放するものとした。基礎岩盤は弾性体として扱い、弾性係数  $E = 50000 \text{ kgf/cm}^2$ 、せん断弾性係数  $G = E/2(1+\nu)$ 、ポアソン比  $\nu = 0.2$  とした。

作用荷重は、静水圧、外気温および貯水池の水温に伴う温度荷重、堤体自重とした。静水圧は堤体および貯水池の底部岩盤に作用させた。解析の水位条件は満水位とした。

### 2. 2 堤体の温度分布解析

堤体の温度分布解析（熱伝導解析）では、気温および水温の年変化は正弦関数と仮定した。解析で用いた気温の年変化を図-2に示す。解析領域内で空気に接する要素は熱伝達境界、水との境界は温度固定境界として扱った。熱伝導解析は、堤体内部の温度分布が定常状態となるまで2日きざみで4年間行った。堤体内部の経年的な温度変化が定常となった最終4年目の温度分布解析結果を温度応力計算時の入力値とした。堤体中央断面での温度分布の解析結果を図-3に示す。堤体表層部の温度は外気温の影響を受け変動しているが、堤体内部の温度は年平均気温の  $10^\circ\text{C}$  程度で年間を通じて一定していることがわかる。熱的物性および境界の伝達率を表-1に示す。

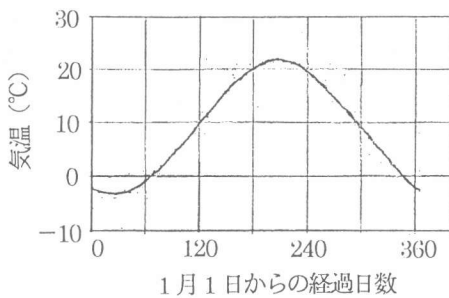


図-2 熱伝導解析で用いた気温の年変化

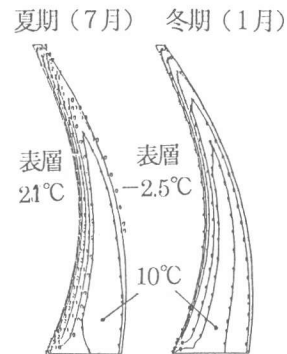


図-3 堤体中央断面での温度分布解析結果

表-1 熱伝導解析に用いた熱的物性

	単位体積重量 ( $\text{kg/m}^3$ )	熱伝導率 ( $\text{Kcal/mh}^\circ\text{C}$ )	比熱 ( $\text{Kcal/kg}^\circ\text{C}$ )	面伝達係数 ( $\text{Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ )	水面下
堤体およびジョイント部	2300	2.00	0.27	8.0	温度
岩盤部分	2600	2.39	0.19	8.0	固定

### 2. 3 堤体の自重解析

堤体を連続体として自重計算する際、水平面に対して傾斜を持つ部分で大きなせん断応力の発生が認められる。アーチダムの堤体コンクリートブロック建設過程を考えると、互いに不連続な柱状ブロックが建設され、その後、ジョイント部にグラウト注入されて堤体は一体構造となることから、本解析では、堤体は独立した柱状コンクリートブロックからなり、ブロック間での力の伝達は無いと仮定して自重計算を行った。計算結果のうち、鉛直方向に発生した応力を自重により発生する応

力と考え、その後の非線形解析では、他の荷重条件に先立ち先行応力（プレストレス）として扱った。

#### 2. 4 ジョイン部のモデル化

ジョイント部のせん断すべり特性はクーロン則により定義し、粘着力  $\alpha$  と摩擦係数  $\beta$  とは既報 [1,2] に基づき以下の値を用いた。また、接合面との直交方向の引張応力が  $3.5\text{kgf/cm}^2$  を上回った要素は剥離を生じるものとした。剥離部分が再結合（密着）した場合には、圧縮応力は完全に伝達し、引張抵抗は零とした。

せん断すべり規準 ;  $\tau = \alpha + \beta \cdot \sigma_n$  ( $\sigma_n \geq -3.5$ )

$\tau$  : せん断応力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )、 $\sigma_n$  : 直応力 ( $\text{kgf/cm}^2$ 、引張応力は負)

・すべりを起こしていない要素 ;  $\alpha = 10.2\text{kgf/cm}^2$ 、 $\beta = 0.733$

・すべりや剥離を起こした履歴を持つ要素 :  $\alpha = 0.0\text{kgf/cm}^2$ 、 $\beta = 0.587$

ジョイント部の物性は水セメント比 80% のグラウトを用いた室内実験 [3] に基づき、弾性係数  $E = 9000\text{kgf/cm}^2$ 、せん断弾性係数  $G = E/2(1+\nu)$ 、ポアソン比  $\nu = 0.2$  とした。なお、剥離を生じた要素では、軸方向、せん断方向の剛性ともほぼ零とし、両方向の応力は全て解放した。また、すべりを生じた要素では、せん断方向の剛性のみほぼ零とし、同方向の応力を全解放させた。

#### 2. 5 ジョイントグラウト注入時の堤体応力評価

ジョイント部へのグラウト注入は、冬期にコンクリートが収縮してジョイント部が開いた状態で実施され、注入時のグラウト圧力も小さいことから、例えば表層ジョイント部でコンクリートとの接合部の応力状態に着目した場合、冬期の無載荷状態では、若干の圧縮応力が作用していると考えられる。通常、温度応力の計算では堤体を連続体として扱うため、冬期には温度分布に起因した拘束応力（堤体が岩盤によって拘束されていることにより生じる外部拘束応力と堤体の内外温度差により生じる内部拘束応力）がジョイント部に発生することになる。このため、これらの応力を予めキャンセルするような逆方向応力をジョイント部へ先行応力（プレストレス）として導入した。

#### 2. 6 解析手順

温度変化による経年的なジョイント部の状態変化（すべりや剥離）を解析で表現するためには、ジョイント部の状態に着目して、健全なジョイント要素、すべりや剥離を生じているジョイント要素を区別し、それぞれに応じたせん断すべり規準を選択する必要がある。これらの状態変化を解析で自動的に判定することは困難である。本解析では、アーチダムの年間挙動のうち変形や応力の最大値が生じる冬期 1 月と夏期 7 月の時間断面に着目して、1 ヶ月分の温度荷重ステップで 6 ヶ月間毎で解析を一度止めて、ジョイント要素の状態変化を評価し、適切なせん断すべり規準を物性値として入れ替え、再度解析を進める方法を採用した。

解析の手順は、まず、温度分布解析（熱伝導解析）により堤体内部の温度分布を求め、次に、先行応力として堤体コンクリートおよびジョイント部に導入する堤体自重とグラウト注入効果を計算した。これらの計算結果を得た上で、先行応力を導入した状態で静水圧と 4 月の温度荷重を作用させて解析をスタートさせた。ダムの 1 年目の夏期 7 月時点の挙動評価を行う際のみ温度荷重ステップを 3 ヶ月間とした。解析は 3 年目の冬期 1 月時点まで実施した。

### 3. アーチダムの常時挙動解析結果

#### 3. 1 ジョイント部の挙動とアーチダムの耐荷機構

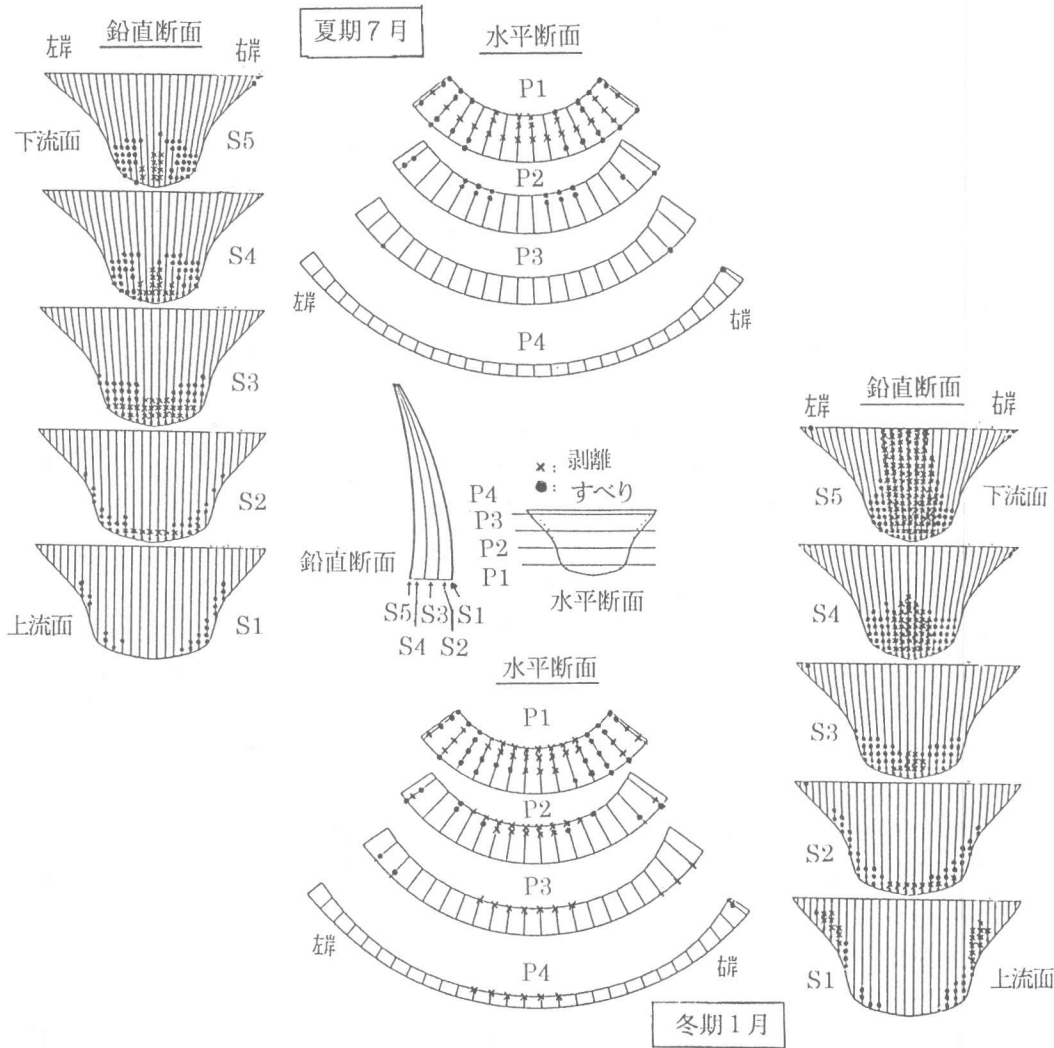


図-4 ジョイント部の挙動とアーチダムの耐荷機構

気温の年変化に影響されないジョイント部の領域は経年的に拡大して行くが、解析時間断面2年経過後に、この領域はほぼ安定化することが既報 [3] の解析結果で報告されている。以下では3年目の夏期と冬期の解析結果について考察する。

夏期および冬期のジョイント部の剥離およびすべり状況の解析結果を図-4に示す。夏期には、下流面では中段以下の堤体中央部および着岩部近傍のジョイント部で、堤体内部から上流面では中段以下の比較的着岩部近傍のジョイント部ですべりや剥離判定された要素が生じている。すべり判定された要素が比較的広範囲に生じており、夏期のジョイント部の挙動はすべり主体と考えられる。冬期には、下流面中央部のジョイント部で広範囲に剥離判定された要素が発生していることを除けば、夏期とほぼ同じ領域のジョイント部においてすべりや剥離判定された要素が生じている。また、着岩部近傍のジョイント部を除けば剥離判定となっていることから、冬期のジョイント部の挙動は剥離主体と考えられる。このようなジョイント部の挙動特性の解析結果は、夏期にダム軸方向のアーチ作用力が強まり、冬期にアーチ作用力が弱まりコンクリートブロック間で不連続となり

やすい状況を示すものと考えられる。堤体天端高付近では、年間を通じてほぼ全断面で一体化しており、強固なアーチリブが形成されていると考えられる。

夏期および冬期のジョイント部で、当該時間断面において剥離やすべりの状態変化を生じていない領域に着目すると、解析結果から、アーチダムの堤体内部にはジョイント部の季節的な状態変化に起因した応力伝達領域が形成されて外力に抵抗していることがわかる。この領域は、従来から経験的にはセカンダリーアーチ、インナーアーチと呼ばれていたが、堤体内部でどのような領域を形成しているか不明であった。本解析ではこのようなアーチダムの耐荷機構を定性的に評価することができた。

### 3. 2 ジョイント部に作用する応力状態

ジョイント部に作用する直応力とせん断応力との関係の解析結果を図-5に示す。表層部は中央層よりも大きな直応力の年変動を示しており、せん断応力の大きさの変化は認められない。また、下流面表層のジョイント部では、冬期に剥離していた部分が夏期に再結合（密着）して、また冬期に剥離を起こすという年間を通じた状態変化が経年的に繰り返して生じていると考えられる。

### 3. 3 堤体の変形挙動

堤体中央断面天端での上下流方向変位を図-6に、堤体変形図を図-7に示す。堤体天端の季節変化は夏期に上流側へ、冬期に下流側へ相対的に変位しており、このような変形は通常言われているアーチダムの変形挙動と合致するものである。

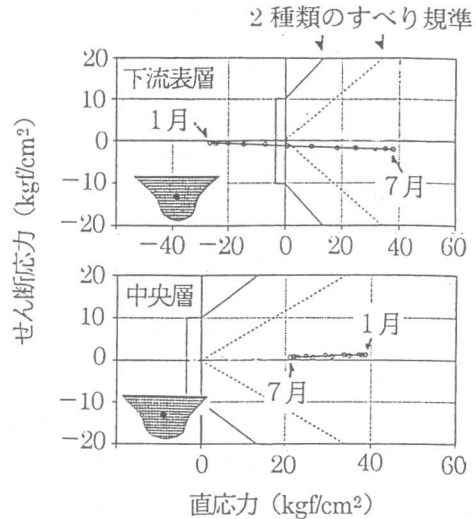


図-5 ジョイント部の応力経路（連続体解析）

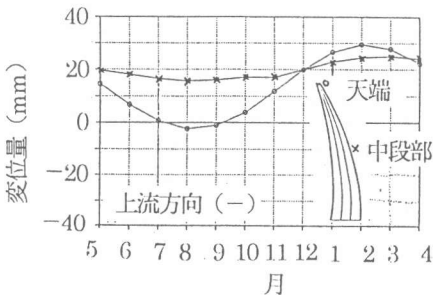


図-6 堤体天端の上下流方向変位

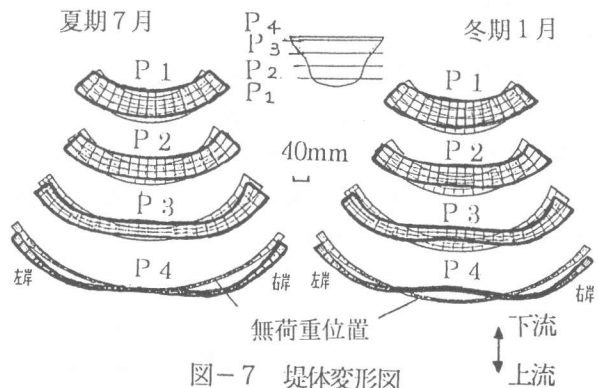


図-7 堤体変形図

### 3. 4 堤体コンクリートのひびわれ性状

解析結果から、冬期に下流面表層コンクリートで発生する引張応力を、ジョイント部で応力解放させてもなお、コンクリートの引張強度以上の応力が残存し、ひびわれを発生させる結果となった。図-8, 9にひびわれ性状に関する解析結果を示す。下流面の中央部に広範囲にひびわれが発生しているが、このひびわれは主として温度応力（堤体コンクリートの内外温度差に起因した内部拘束

応力)に起因したものと考えられ、深さ方向1m内部まで残存しているひびわれは少なく、経年的にひびわれ発生領域が拡大する傾向も認められないことから、堤体の構造健全性に問題を及ぼすものではない(セカンダリーアーチが健全に抵抗している)と判断できる。

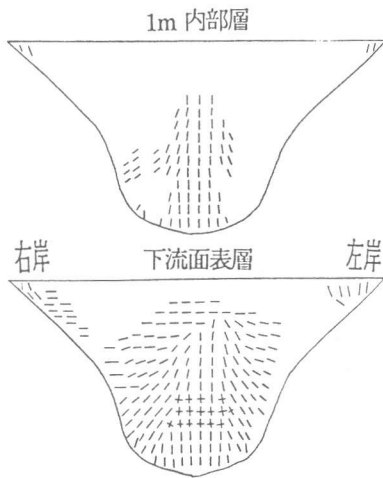


図-8 堤体コンクリートのひびわれ性状

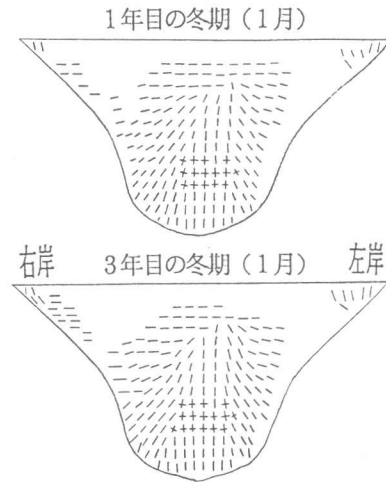


図-9 下流面表層の経年的なひびわれ性状

#### 4. まとめ

ジョイント部の挙動やコンクリートの非線形性を考慮したアーチダムの三次元非線形有限要素解析手法を開発した。この手法を用いて実機サイズのアーチダムを解析し、アーチダムの耐荷機構に関して検討した。解析結果から以下に示すことが明らかとなった。

##### (1) ジョイント部の挙動とアーチダムの耐荷機構

下流面表層のジョイント部では、冬期に剥離、夏期に再結合という状態変化を経年的に繰り返して生じることが明らかとなった。アーチダムの堤体内部には、ジョイント部の季節的な状態変化に起因した応力伝達領域(セカンダリーアーチ)が形成されて、外力に抵抗することが明らかとなった。

##### (2) 堤体の変形挙動とひびわれ性状

堤体天端は夏期に上流側へ、冬期に下流側へ相対的に変位し、通常言われているアーチダムの変形挙動と合致した。冬期に下流面表層コンクリートには、温度応力に起因したひびわれが発生した。このひびわれは深さ方向に1m程度で経年的なひびわれの進展は認められないことから、堤体の構造健全性に問題を及ぼすものではないと判断できる。

#### 参考文献

- [1] 金津他：ジョイント部のせん断すべり破壊基準に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1, pp.783~788、1995.6
- [2] 西内他：ジョイント部シアキープロックの形状効果に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1, pp.777~782、1995.6
- [3] 西内：ジョイント部の非線形挙動を考慮したアーチ式コンクリートダムの堤体解析技術の開発、平成7年度電力中央研究所研究年報 Vol.1、1995.3