

# 論文 既設アーチダムの常時挙動評価に関する検討

西内 達雄<sup>\*1</sup>

要旨：アーチダム堤体ブロック間の鉛直方向の施工ジョイント部をモデル化した三次元 FEM 解析手法を構築し、手法の適用性を、外気温の年変化や貯水位変化による既設アーチダムでの変位実測データに基づき検証した。その結果、解析結果は実測値と良好に一致し、既設アーチダムの変形挙動を良好に評価できることが明らかとなった。また、アーチダムの堤体内部には、鉛直方向の施工ジョイント部での剥離やすべりによる状態変化に起因して力を伝達する領域(セカンダリーアーチ)が形成されて、外力に抵抗する耐荷機構が明らかとなった。

キーワード：アーチダム, 施工ジョイント部, 常時挙動, FEM 解析, 耐荷機構

## 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として、既設ダムの耐震性能や健全性を評価する技術の確立が以前にも増して強く望まれている。アーチダムは薄肉の構造物であり、ダムの構造安定性を合理的に評価する際、気温の年変化により発生する温度応力や、構造的に不連続な鉛直方向の施工ジョイント部（以下、鉛直ジョイント部と称す）における力の伝達を適切に評価することが重要であると言われている<sup>1),2)</sup>。本研究では、堤体の鉛直ジョイント部の非線形挙動を考慮した有限要素解析（以下、FEM 解析と称す）を用いて、外気温の年変化や貯水位変化による既設アーチダムの常時挙動シミュレーションを実施した。解析結果に基づき、鉛直ジョイント部での剥離やすべり挙動の変化を明らかにするとともに、堤体内部に形成された応力伝達経路に基づくアーチダムの耐荷機構を明らかにした。

## 2. 鉛直ジョイント部のモデル化概要

### 2.1 断面構造とモデル化における考え方

アーチダムの堤体には、施工時のコンクリートの温度収縮防止を主目的とした鉛直ジョイント部が約 15m 間隔で配置されている。この鉛直ジョイント部には、図 - 1 に示すようなキープブロックが上下流方向と鉛直方向に配置され<sup>1)</sup>、せ

ん断力に対して抵抗する構造となっている。地震時には、鉛直ジョイント部で剥離やすべりが生じた後、キープブロックが噛み合う大変形を起こすと想定されるが、常時挙動では、剥離や微小なすべりが生じる程度の小さな変形に留まると考えられることから、本研究では、せん断面が平滑な試験体を用いて、鉛直ジョイント部を想定した接合面でのすべり特性を把握した。

### 2.2 試験概要

試験体の形状と寸法を図 - 2 に示す。試験には、せん断面が 15 × 30cm の標準試験体と、標準試験体の 4 倍のせん断面を有する大型試験体を供した。コンクリートブロック間の接合部は幅 2mm とし、そこに W/C = 80% のセメントペーストを充填した。試験要因は、せん断面の大きさ（寸法効果）、接合部へのセメントペースト充填の有無（接合面が再接触した後のすべり特性は充填無しの状態と同じと仮定）、応力経路（せん断面に対する直応力とせん断力の大きさ、および静的加力方向）とした

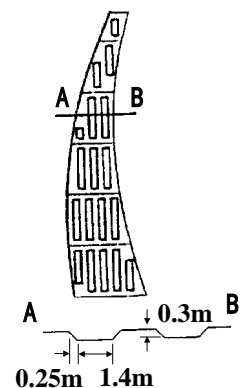


図 - 1 堤体断面

\*1 (財)電力中央研究所 地球工学研究所主任研究員 工修 (正会員)

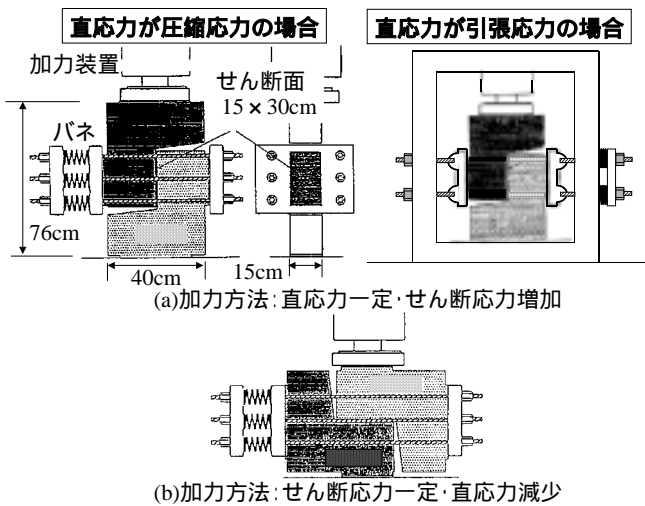


図 - 2 標準試験体の形状と寸法

### 2.3 試験結果

接合部ですべり破壊が生じた時のせん断応力と直応力の関係を図 - 3 に示す。

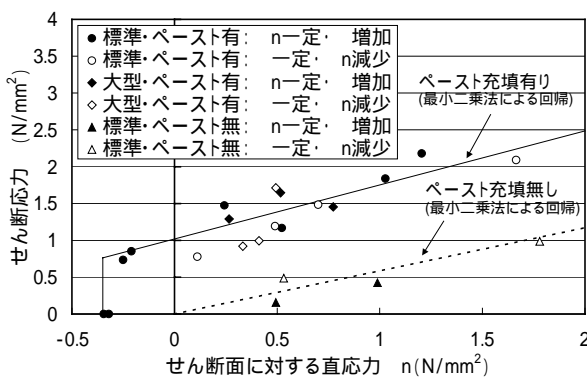


図 - 3 破壊時のせん断応力と直応力の関係

図から、加力方向に係わらず、破壊時のせん断応力と直応力は線形関係にあることが分かる。そして、直応力が引張領域においても剥離が生じるまでは ( $\tau_n = -0.34N/mm^2$ ) ほぼ線形関係は成立していることがわかる。また、接合面の寸法効果はあまり認められないことがわかる。接合部にセメントペーストを充填していない場合、接合面の接着力がゼロとなり、セメントペーストを充填した場合と同程度の摩擦抵抗力が期待できることがわかる。これらの結果に基づき、次章の FEM 解析において、アーチダム鉛直ジョイント部には、接合面に対するせん断応力と直応力の関係で剥離とすべりを定義できる非線形

接合要素を用いることとした。剥離とすべりの応力判定規準は図中に示した 2 つの回帰式を用いることとした。

### 3. 解析概要

解析では、応力解析、熱伝導解析とも、汎用構造解析コード ABAQUS を使用した。

#### 3.1 解析手法の特徴

本手法の主な特徴は以下の通りである。

- 鉛直ジョイント部での剥離とすべり、再接触を表現できる力学モデルを ABAQUS に組み込んだ、三次元有限要素解析手法である。
- 気温の変化によるコンクリートの温度応力を適切に評価し、温度ひび割れの発生を判定できる。

#### 3.2 解析ケース

貯水位を一定とし、外気温の年変化による堤体挙動を把握したケース 1 と、冬季の貯水位変化による堤体挙動を把握したケース 2 の 2 つとした。

#### 3.3 解析モデル

##### (1) モデル化領域と要素分割

解析対象とした既設アーチダムは堤高が約 130m である。解析におけるモデル化領域は、堤体を中心として左右岸方向は堤頂長の約 5 倍、上下流方向は堤頂長の約 2 倍、鉛直深さ方向は堤高の約 2 倍と、岩盤部が堤体挙動に影響を及ぼさない程度の領域とした。解析に用いた要素分割を図 - 4 に示す。

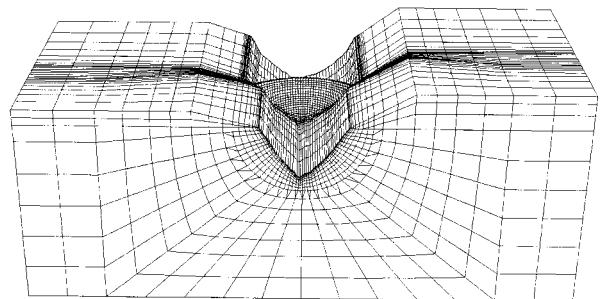


図 - 4 要素分割

##### (2) 堤体

堤体は、20 のコンクリートブロックと 19 の鉛

直ジョイント部の全てを考慮した。各ブロックは、ダム軸方向(ジョイント間)は均等2分割、上下流方向(厚さ方向)は均等5分割とした。解析において、コンクリートは線形弾性体(ヤング係数  $3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ )として扱った。

### (3) 鉛直ジョイント部

鉛直ジョイント部は、前述の試験結果に基づき、すべりと剥離、再接触を考慮した非線形接合要素を用いて離接挙動を考慮した。すべり特性は下記の式(1)に示すクーロン則により表現し、粘着力( )と摩擦係数( )は図-3中に示した回帰直線により定めた。式(1)に用いる と の設定値は、剥離とすべりを生じていない鉛直ジョイント部の要素に適用する場合には係数設定1を、過去に剥離やすべりを生じた鉛直ジョイント部の要素が再接触した際に適用する場合には係数設定2を用いる。

$$\tau = c + \mu \cdot \sigma_n \quad (1)$$

ここで、 $\tau$  :せん断応力 ( $\text{N/mm}^2$ )

$\sigma_n$  :直応力 ( $\text{N/mm}^2$ ; 圧縮+)

$c$  :粘着力 (試験係数)

$\mu$  :摩擦係数 (試験係数)

係数設定1 :  $c = 1.02$ ,  $\mu = 0.733$

ただし、 $\mu = -0.34$

係数設定2 :  $c = 0.0$ ,  $\mu = 0.587$

要素のヤング係数は  $8.83 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 、要素応力が式(1)の判定規準(図-3中の回帰直線)に達した場合、剥離では軸方向およびせん断方向の剛性は健全要素の 1/1000、応力は両方向とも全解放とした。剥離要素が再接触した場合、圧縮応力は完全に伝達するが引張応力は伝達せず、引張抵抗は零とした。すべりではせん断方向の剛性のみ健全要素の 1/1000 とし、同方向の応力のみ全解放とした。なお、1/1000 剛性とは数値解析上の措置である。

### (4) 岩盤

岩盤部はヤング係数  $5.25 \times 10^3 \text{N/mm}^2$  の線形弾性体として扱った。

## 3.4 作用外力

作用外力は、貯水池の水圧と気温、水温による温度荷重、自重とした。貯水池の水圧は、静水圧分布で堤体の上流面および貯水池内岩盤部へ作用させた。気温、水温による温度荷重は、非定常熱伝導解析により堤体内部の温度分布を求めて、応力解析により温度応力を算出した。入力する外気温は、解析対象とするダムで観測された外気温の実測データを用いて、1年間で1周期となる正弦関数を用いて回帰式を設定した。貯水池の表面温度と深さ方向の温度分布も、気温と同様に正弦関数として実測値に基づいて設定した。

## 3.5 解析手順

解析手順を図-5に示す。ケース1では、貯水位一定条件下で、気温と貯水温の年変化による堤体挙動を評価した。手順として、まず、熱伝導解析により堤体の温度分布の年変化を求めた。熱伝導解析は、堤体内の温度分布が経年的に定常状態に達するまで約3年間実施した。そして、堤体内の温度分布に基づき、温度応力解析を実施して、季節毎の温度応力を算出した。次に、応力解析により堤体自重と静水圧による発生応力を算出した。その後、堤体自重と静水圧による発生応力、温度応力を全て加算して、

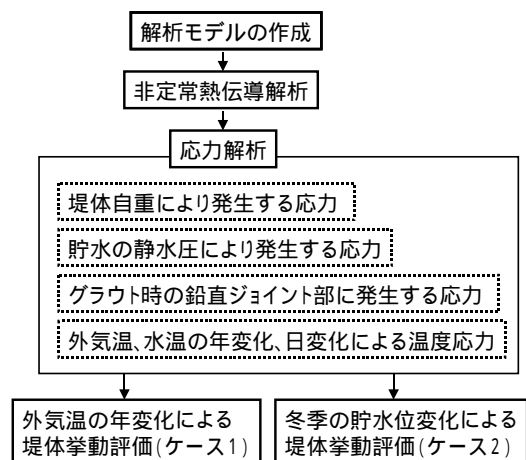


図-5 解析手順

年間を通じた堤体挙動を評価した。ケース2では、堤体コンクリートに引張応力が発生し、そ

の発生領域が年間を通して卓越する冬季(2月)に着目して、貯水位の日変化を考慮して堤体挙動を評価した。手順として、まず、熱伝導解析により堤体の温度分布の日変化を求め、堤体内の温度分布に基づき応力解析を実施して、温度応力を算出した。次に、貯水位の変化により発生する応力を算出した。そして、温度応力と貯水位の変化による発生応力、ケース1で算出した堤体自重による発生応力を全て加算して、堤体挙動を評価した。

#### 4. 既設アーチダムの常時挙動評価

##### 4.1 堤体変位の計測概要

堤体変位は、堤体のほぼ中央部に位置する既存のプラムライン(下げ振り)により水平面内の変位量を計測した。プラムラインによる変位計測位置を図-6に示す。

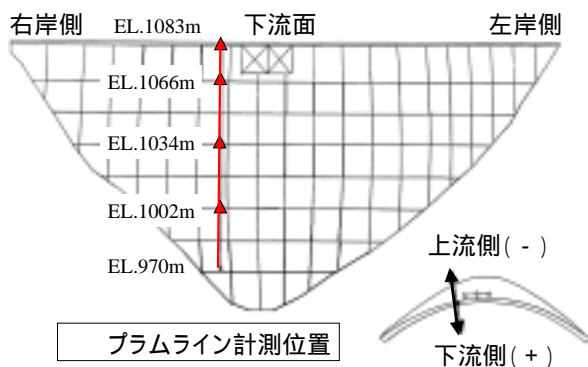


図-6 堤体変位の計測位置図

##### 4.2 計測結果と解析結果との比較

###### (1) プラムラインによる堤体変形

堤体中央部のプラムラインによるアーチ半径方向の変位計測データを用いて、解析条件と同一の貯水位、気温での変位を回帰分析<sup>3)</sup>し、解析結果と比較した。回帰式の関数形は、気温(T)に対しては一次(T)の、貯水位(H)に対しては一次から三次( $H^3$ ,  $H^2$ , H)の関数形で評価した。

ケース1において、堤体プラムライン変位の解析結果と計測値の比較を図-7に示す。この図から、堤体天端における変位の年振幅は、解析結果と計測値はほぼ同じで約30mmを示すこ

とがわかる。また、堤体岩着部から中段標高部までの変位において、夏季の解析結果は、計測値よりも上流側へ変位しており、解析結果の方が変位の年振幅も大きくなっている。原因として、実際のコンクリートのヤング係数が、解析で用いた値よりも小さい可能性や、温度応力による堤体ブロック間の拘束力(軸力)が、解析よりも実際の方が大きいことなど推測される。全般的に見た場合、解析結果は計測値とほぼ合致していると判断できる。

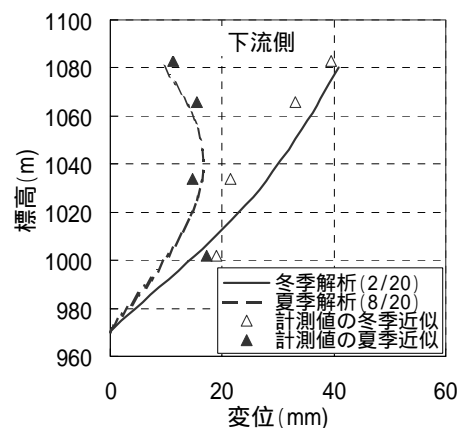


図-7 冬季と夏季の堤体プラムライン変位

ケース1において、冬季と夏季の堤体変形を図-8に示す。この図から、堤体は夏季に上流側へ、冬季は下流側に相対的に変形していることがわかる。この差は、温度応力による堤体ブロック間の拘束力(軸力)によると考えられる。

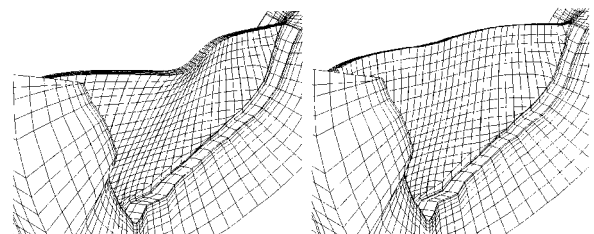


図-8 冬季と夏季の堤体変形(下流面より)

ケース2において、冬季における貯水位の低下に伴う堤体変形の解析結果を図-9に示す。この図から、貯水位の低下に伴い、堤体は全体的に上流側へ変形し、堤体の高標高部よりは中

段標高部の方が大きく上流側へ変位していることがわかる。また、左右岸岩盤近傍よりも堤体中央部の方が変位は大きい。これは、左右岸岩盤による変形拘束の影響と考えられる。

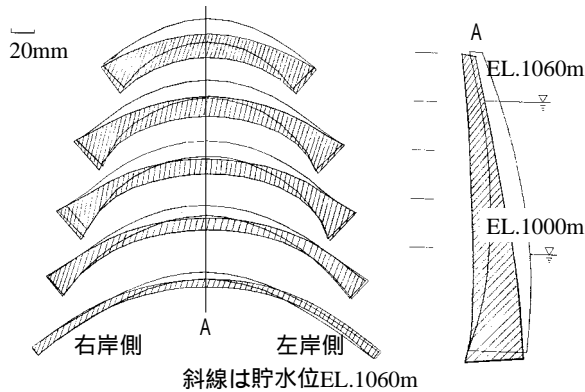


図 - 9 貯水位の低下に伴う堤体変形

ケース 2 において、堤体プラムライン変位の解析結果と計測値の比較を図 - 10 に示す。この図から、貯水位の低下に伴う堤体変形は、計測値と解析結果は良好に合致していることがわかる。また、貯水位の低下に伴い、堤体は全体的に上流側へ変形し、前述の解析結果で認められた、堤体の高標高部よりは中段標高部の方が大きく上流側へ変位している傾向も確認できた。

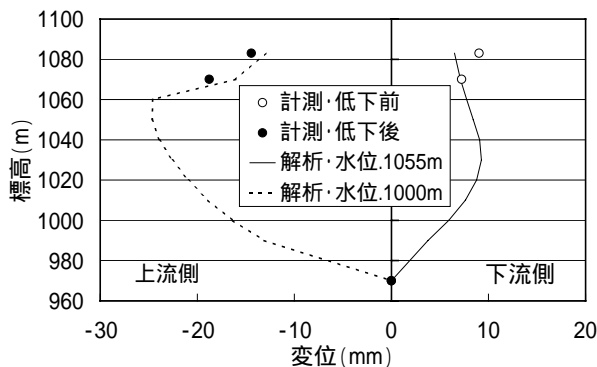


図 - 10 冬季の貯水位低下に伴う堤体変位

## (2) 堤体コンクリートの応力状態

夏季と冬季の堤体下流面コンクリートの主応力分布を図 - 11 に示す。この図から、夏季は堤体の中段標高以上では水平（ダム軸）方向の圧縮応力が、中段標高以下では鉛直方向の圧縮応力が卓越していることがわかる。冬季は全体的

に引張応力が発生し、岩着から中段標高までは水平（ダム軸）方向の引張応力が卓越する傾向にあることがわかる。これらの結果から、アーチダムの堤体発生応力において、気温による温度応力の影響が大きいことがわかる。

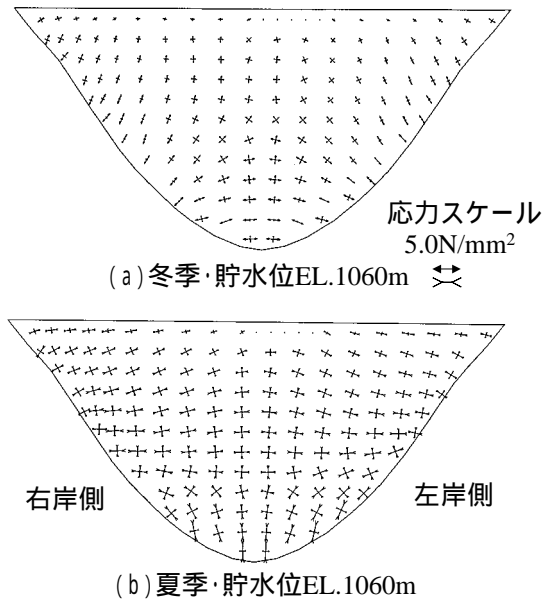


図 - 11 夏季と冬季の堤体下流面の主応力分布

## 4.3 アーチダムの耐荷機構に関する考察

ケース 1 において、冬季と夏季の鉛直ジョイント部で生じた剥離とすべりの状態変化の解析結果を図 - 12 および図 - 13 に示す。これらの図から、冬季は下流面中央部の鉛直ジョイント部で広範囲に剥離が認められるものの、内部層や上流面では剥離やすべりはほとんど生じておらず、比較的多くの鉛直ジョイント部が力学的に連続した状態であることがわかる。夏季は、冬季に剥離していた下流面中央部の鉛直ジョイント部が閉じて再接触し、下流面中央着岩部近傍を除いて、鉛直ジョイント部ではほぼ全断面が圧縮領域となってアーチ推力に寄与していることがわかる。このように、アーチダムの堤体内部には、鉛直ジョイント部での季節的な剥離やすべりによる状態変化に起因して、力を伝達する領域が形成されて、外力に抵抗していることが明らかとなった。この現象は、従来から経験的に分かっており、セカンダリーアーチ、イン

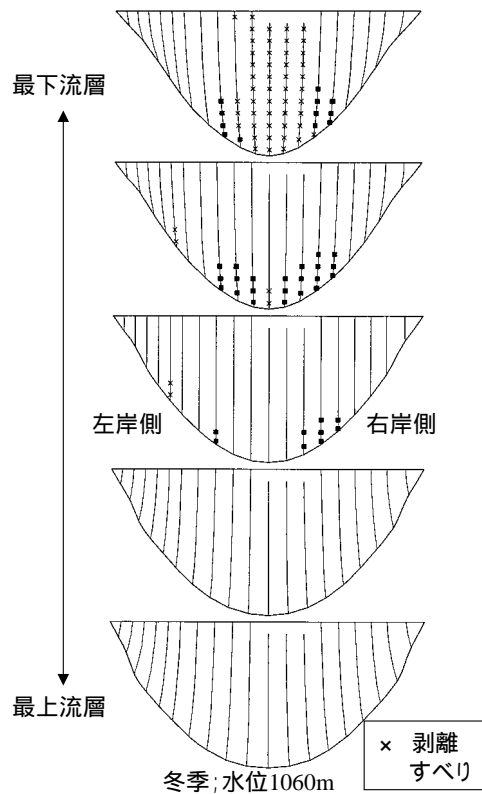


図 - 12 冬季における鉛直ジョイント部の状態

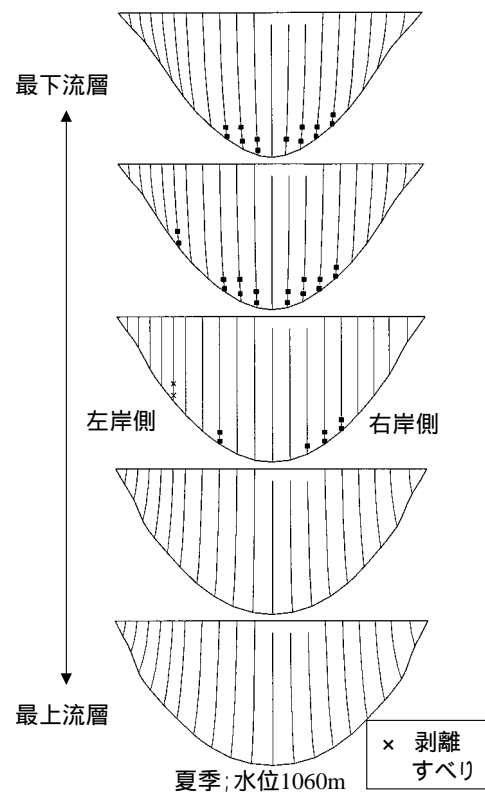


図 - 13 夏季における鉛直ジョイント部の状態

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。本解析結果から、このようなアーチダムの耐荷機構を定性的に明らかにすることができた。

なお、解析結果の精度を確認するため、冬季の貯水位変化による鉛直ジョイント部の相対変位を計測したところ、堤体下流面中央部において0.1～0.4mmの開口変位が示された。解析結果によるとこの位置は剥離を示しており、計測と解析結果は定性的に合致することが確認された。

## 5. まとめ

アーチダム鉛直ジョイント部での剥離やすべりを考慮できる力学モデルを組み込んだ有限要素解析手法を用いて、既設アーチダムの常時挙動を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1)年間を通じた堤体変形や水位低下に伴う堤体変形に関して、解析結果は実測値と良好に一致し、既設アーチダムの変形挙動を良好に評価できることが明らかとなった。

(2)堤体内部には、鉛直ジョイント部での剥離やすべりによる状態変化に起因して力を伝達する領域(セカンダリーアーチ)が形成されて、外力に抵抗していることが明らかとなった。

今後、本手法の精緻化を図り、ダムの維持管理における堤体挙動予測に活用したい。

## 参考文献

- 1) 上田稔, 豊田幸宏, 塩尻弘雄, 佐藤正俊: アーチダムの観測記録から求めた固有振動数とブロックジョイントの影響, 土木学会論文集, No.654 / -52, pp.207-221, 2000.7
- 2) 渡辺啓行, ラザビソヘイル, 高島賢二, 谷山尚: ペリメータ沿いのジョイントと鉛直ジョイントの開口がコンクリートアーチダムの地震応答に与える影響, ダム工学, Vol.9, No.2, pp.79-94, 1999
- 3) 城島誠之, 斉藤孝三: 真名川アーチダムの挙動と重回帰分析, 大ダム, No.112, pp.39-46, 1985.6