

# 論文 高経年大規模コンクリートアーチダムの常時健全性評価と今後の維持管理の高度化

大熊 信之<sup>\*1</sup>・西内 達雄<sup>\*2</sup>・松田 泰治<sup>\*3</sup>

**要旨：**高経年アーチダムの常時健全性評価と今後の維持管理の高度化を目的として、ダム-岩盤-貯水池連成系の三次元 FEM 解析モデルを構築し、気温・水位変化に伴う常時挙動解析を行った。対象は九州電力㈱一ツ瀬ダムである。解析は堤体を連続体で取扱う線形解析と、堤体の鉛直ジョイント部の非線形性を考慮した非線形解析を行い、堤体変位計測値と比較した。その結果、解析結果は計測値と良好に一致し、一ツ瀬ダム堤体の応力状態が把握できた。また、解析結果から常に高い引張応力状態にある堤体岩着部の剥離を想定し解析を行った結果、この想定した剥離は日常計測している堤体変位で検知可能であることが明らかとなった。

**キーワード：**アーチダム, 常時挙動, 有限要素解析

## 1. はじめに

我が国の大規模アーチダムは、戦後の経済成長に伴う電力需要に応じ、大型水力電源の開発を目的として全国各地で建設されてきた。このため、国内の大規模アーチダムは建設後 50 年近く経過したものが多く、高経年化が進むこれらの健全性を的確に評価することは極めて重要である。また、近年では土木構造物の大規模地震時の安定性に対する社会的関心が高まっており、社会から設備管理者としての信頼性を獲得するためには、詳細な耐震性能照査を行い、社会への説明責任を果たす必要がある。しかしながらアーチダムは薄肉の三次元構造物であり、ダムの地震時の構造安定性を評価する際には、まず、常時におけるアーチダムの耐荷機構や堤体内部の応力状態を明らかにする必要がある。

アーチダムの常時挙動評価については、かつては堤体を連続体と取扱った線形解析評価が行われていたが、線形解析では堤体内部応力を過大評価する<sup>1)</sup>ことと、地震時の挙動においては、鉛直ジョイントの非線形特性が大きく影響する<sup>2)</sup>ことなどから、鉛直ジョイントの非線形性を考慮することの重要性が指摘されていた。このため、筆者の一人を含む研究グループは、アーチダムの鉛直ジョイント部の変位計測結果から、水位や気温の変化に伴うジョイントの状態変化を確認<sup>3)4)</sup>したうえで、鉛直ジョイント部を模擬したコンクリートブロックによる一面せん断試験により、コンクリートブロック接合部での剥離やすべり挙動の基礎特性を把握し、FEM 解析における鉛直ジョイント部のモデル化法を提案している<sup>4)</sup>。

本論文では、まず、筆者の一人を含む研究グループがこれまでに提案してきたダム-岩盤-貯水池連成系の三次

元 FEM 解析モデルを写真-1 に示す一ツ瀬アーチダムに適用し、堤体変位計測データとの比較による再現性の確認を行った常時健全性評価結果について述べる。次に、その解析結果の応力状態に基づき、常時、高い引張応力状態にある堤体および基礎岩盤部分が仮に剥離した場合を想定した解析を行い、その結果から、日常監視項目である堤体変位観測データの監視法について述べる。

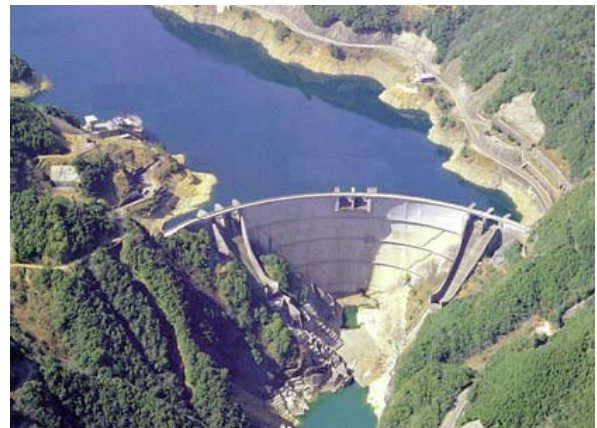


写真-1 一ツ瀬アーチダム

## 2. 一ツ瀬ダムの概要

一ツ瀬ダムは、九州地方の水力発電事業のため、九州電力㈱により 1963 年に建設された(経年 46 年)。発電出力 180MW、総貯水容量  $261,315 \times 10^3 \text{ m}^3$  である。堤体は堤高 130.00m (堤頂標高: EL.203.00m)、堤頂長 418.00m のドーム型コンクリートアーチダムであり、九州最大のアーチダムである。運用上の利用水深は 30.0m であり、最低水位は EL.170m、最高水位は EL.200m である。

\*1 九州電力(株) 総合研究所 土木グループ研究員 工修(正会員)

\*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域上席研究員 工博(正会員)

\*3 熊本大学大学院 自然科学研究科 環境共生工学専攻教授 工博(正会員)

### 3. 三次元 FEM 解析の概要

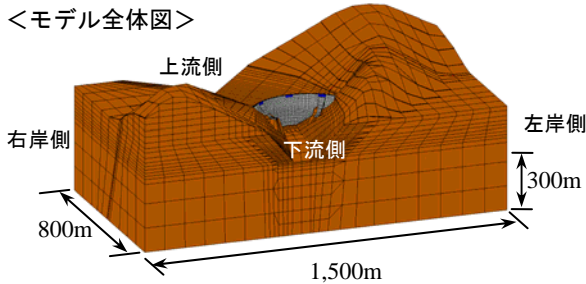
#### 3.1 概要

解析は、堤体および周辺岩盤の温度分布を把握する非定常熱伝導解析と、応力状態などを把握する応力解析からなり、汎用コード「ABAQUS(Ver.6.5-6)」を使用した。応力解析は、堤体挙動に対する鉛直ジョイント部の非線形性の影響度合いを把握するため、堤体を連続体で取扱う線形解析を実施し、次に鉛直ジョイント部の非線形性を考慮した非線形解析を行い、両者と堤体変位計測値との比較を行った上で健全性を評価した。

#### 3.2 解析領域と要素分割

解析モデルの要素分割図を図-1に示す。解析領域は、周辺岩盤も含めたダム-岩盤-貯水池連成系の三次元モデルで、周辺岩盤は堤体の挙動に影響を及ぼさない領域を確保するため、左右岸方向は堤頂長の3倍程度(1500m)、上下流方向は堤頂長の2倍程度(800m)、鉛直深さ方向は堤高の2倍程度(300m)とした。堤体は、これを構成するコンクリートブロック部、鉛直ジョイント部、余水路部、およびゲート部をモデル化した。コンクリートブロック部は、鉛直ジョイント部間を均等2分割、堤体の厚さ方向に均等5分割した。

<モデル全体図>



<堤体部分のみの拡大図>

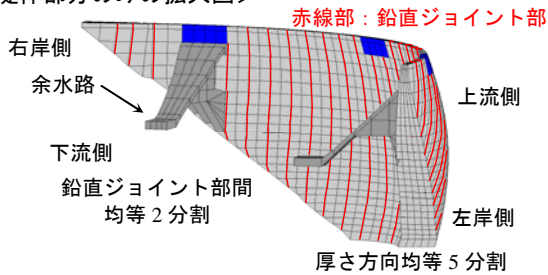


図-1 解析モデル図

#### 3.3 境界条件

境界条件は、左右岸方向の側方境界では左右岸方向の変位、上下流方向の側方境界では上下流方向の変位、底面境界では鉛直方向の変位をそれぞれ固定とし、それ以外の方向の変位および回転は全て自由とした。

#### 3.4 鉛直ジョイント部

鉛直ジョイント部は、薄層のボンド要素で構成し、非線形解析においては、筆者の1人を含む研究グループが提案する非線形力学モデル(すべり、剥離、および剥離

後の再接触を考慮する非線形接合要素)<sup>4)</sup>を用いた。本モデルの概要を図-2に示すが、すべり・剥離の判定基準をCoulomb則で定義し、判定基準を超えた鉛直ジョイント部は同方向応力を開放した。また再接触した場合は圧縮応力のみ完全に伝達させ、引張抵抗をゼロとした。

#### 3.5 物性値

非定常熱伝導解析に用いた熱的物性値と応力解析に用いた力学的物性値を、それぞれ表-1, 2に示す。堤体コンクリート自体は弾性要素で取り扱い、物性は建設当時の工事記録に基づき設定した。ゲート部は堤体スケールに比べ極めて小さいことから、堤体挙動への影響は小さいと判断し、堤体コンクリート要素の1%の剛性を有する弾性要素として与えた。鉛直ジョイントの物性値は、筆者の1人を含む研究グループのグラウト・シアキー実験結果に基づく値<sup>4)</sup>(図-2中の式参照)とした。

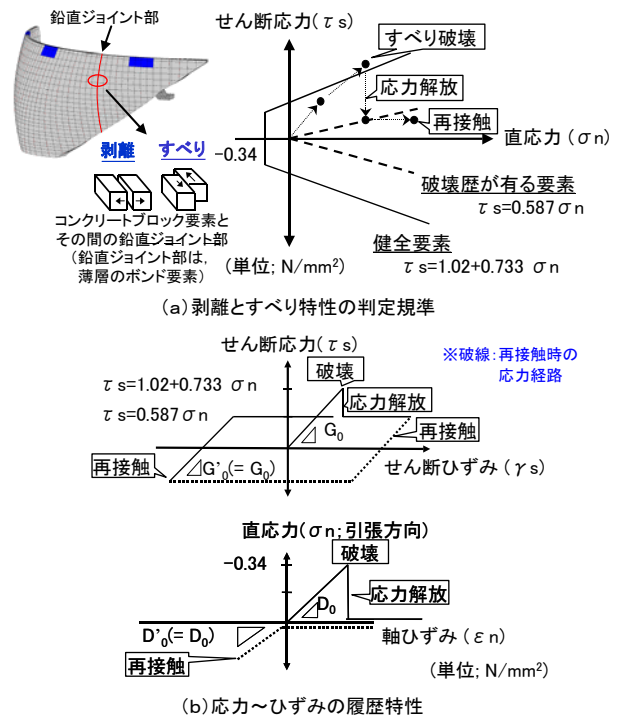


図-2 鉛直ジョイント部のモデル化

表-1 熱伝導解析に用いた物性値

	熱伝導率 (W/(m·K))	比熱 (kJ/(kg·K))	熱伝達率 (W/(m <sup>2</sup> ·K))
堤体・余水路・鉛直ジョイント	3.22	0.963	9.30
岩盤	2.78	0.796	

表-2 応力解析に用いた物性値

	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	熱膨張率 (°C)
堤体・余水路	23.95	30.0	0.167	8.9×10 <sup>-6</sup>
鉛直ジョイント	23.95	8.83	-	8.9×10 <sup>-6</sup>
岩盤	25.50	5.46	0.200	10.0×10 <sup>-6</sup>
ゲート部	1.71	0.30	0.167	8.9×10 <sup>-6</sup>

### 3.6 荷重条件

応力解析で考慮する作用荷重は、貯水池の水圧、気温・貯水池水温の年変化に伴う温度荷重、揚圧力、泥圧、および堤体自重である。

#### (1) 静水圧

貯水池の水圧は、静水圧分布で堤体上流面および貯水池岩盤部に作用させ、水位については、線形解析は以下の3ケースを、非線形解析は満水位で設定した。

- ・満水位 EL.200.00m
- ・平均水位 EL.185.00m
- ・最低水位 EL.170.00m

#### (2) 温度荷重

気温、および貯水池水温の年変動に伴う温度荷重は、まず非定常熱伝導解析により堤体全体の温度分布を把握し、その後応力解析により温度応力を算出した。熱伝導解析に用いる気温は、一ツ瀬ダムで観測された過去10年間の実測データから、最小二乗法を用いて1周期1年の正弦関数に回帰した。貯水池内の水温の深さ方向の分布も気温と同様に回帰曲線で与えた。

#### (3) 堤体自重

実際のアーチダム堤体の建設過程では、まずダム軸方向に不連続な柱状のコンクリートブロックが築造され、その後、鉛直ジョイントにグラウトが注入され、堤体がダム軸方向に一体の構造体となる。一方、アーチダムの自重によって発生する応力を算出する場合、堤体全体を構造体として取扱うことから、岩着部などでコンクリートと岩盤の剛性差などに起因した比較的大きなせん断応力が発生する場合がある。岩着部のコンクリートは打設直後の硬化過程において、せん断応力が緩和されるものと考えられることから、本解析では、堤体コンクリートブロック間、および岩着部分に3.4に準拠した非線形接合モデルを適用し、過大なせん断応力が発生した場合の緩和を考慮することとした。

#### (4) その他荷重

揚圧力、泥圧はダム設計基準<sup>5)</sup>に則って設定した。

#### (5) 解析手順

解析の実施手順を図-3に示す。まず、熱伝導解析を実施し、気温および貯水温の年変動による堤体および岩盤内部の温度分布が定常状態となるまで5ヵ年分実施し、6ヵ年目の温度分布から、温度ひずみを算出した。次に、堤体自重による発生応力および鉛直ジョイントで考慮する温度応力の初期値を求め、要素の先行応力として導入した。その後、応力解析を実施し、静水圧、温度応力、揚圧力、および泥圧を作用させ、全ての荷重が作用している状態での発生応力と堤体変位を求めた。

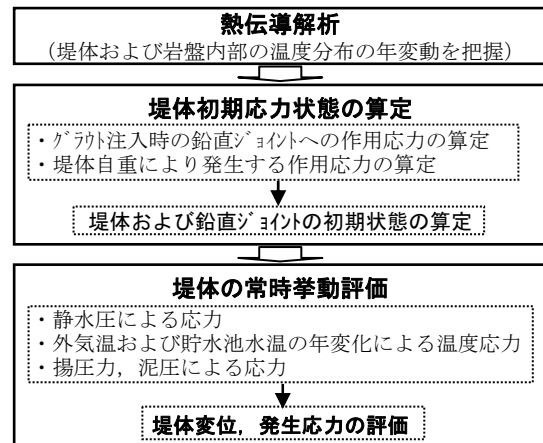


図-3 解析の手順

## 4. 常時挙動解析結果

### 4.1 堤体変位

#### (1) 線形解析結果の堤体変位

解析は、水位一定条件であり、温度荷重を算出する気温は回帰曲線で与えているため、堤体変位の解析値と実測値を比較するには、気温と水位条件を一致させる必要がある。よって、解析結果について水位と気温を説明変数とした回帰分析を実施し、得られた回帰式に1日毎の気温、水位の実測値を代入し1日毎の変位を算出した。一方、計測は、1995年から自動観測システムを導入しており、ダム下流左岸の観測局舎内の自動視準測距測角儀により、堤体に設置されたターゲットまでの距離を自動計測し、堤体変位を算出している。計測は1日3回(1,9,17時)実施しており、ここでは、9時のデータを参照した。

堤体頂部中央における1996~2006年の約10年間の実測値とその解析回帰値との比較を図-4に示す。アーチダムの堤体は、貯水位の変化に加え、気温の年変動に対し、夏季は温度膨張、冬季は温度収縮するが、この膨張と収縮変形を周辺岩盤が拘束することにより、一般的には夏季は上流側、冬季は下流側へそれぞれ変形することが知られている<sup>3)</sup>。一ツ瀬ダムも図-4の実測変位を見ると明らかのように、同様の挙動を示している。

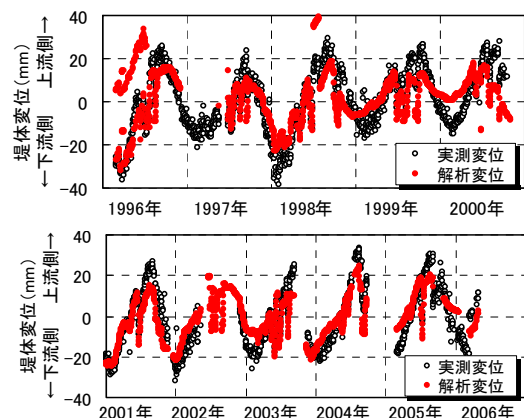


図-4 堤体頂部中央の実測変位と線形解析結果の比較

実測値と解析値を比較すると、解析変位は、実測値の位相や全体的なモードが良好に一致しており、ほぼ実構造物を再現できているといえる。しかしながら、解析変位は実測値に比べ、振幅がやや小さめに算出されているが、このことについては、次節(2)で述べる。

### (2) 非線形解析結果の堤体変位

鉛直ジョイント部の非線形性を考慮した非線形解析を実施した。図-5 に解析結果における、堤体頂部中央での高さ方向の変位分布を示す。なお、横軸は自重解析前における堤体底部岩着部（下流表層）の要素節点を原点とし、マイナス方向を下流方向としている。データは非線形解析結果に加え、線形解析結果、および実測値を季節毎（夏季：8月30日、冬季：2月28日）で比較して示している。実測値との比較から、線形・非線形解析結果ともに実測値を再現しており、解析モデルの妥当性を確認できた。また、各季節とも線形に比べ、非線形結果の方が下流側への変形がやや大きく、実測値に近い。したがって、実際の一ツ瀬ダムは、若干ではあるが、非線形挙動を示しているものの、ほぼ弾性体に近い挙動を示しており、鉛直ジョイントの状態変化は、それが堤体全体の応答に対する影響は小さいといえる。

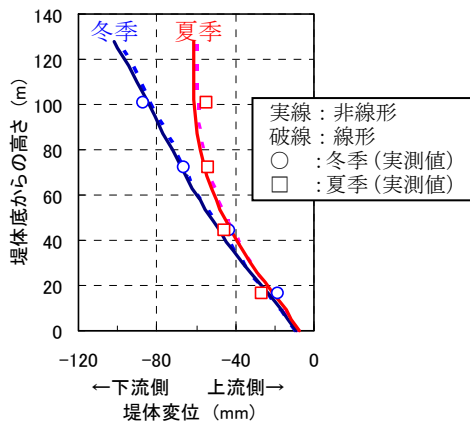
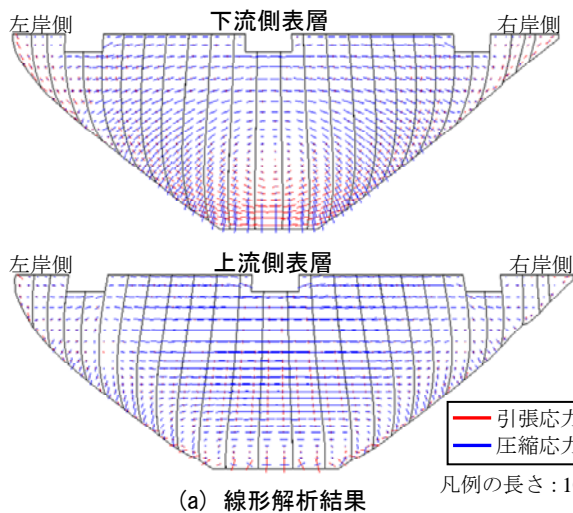


図-5 堤体頂部中央変位の高さ方向分布の比較



(a) 線形解析結果

## 4.2 堤体コンクリートの応力状態

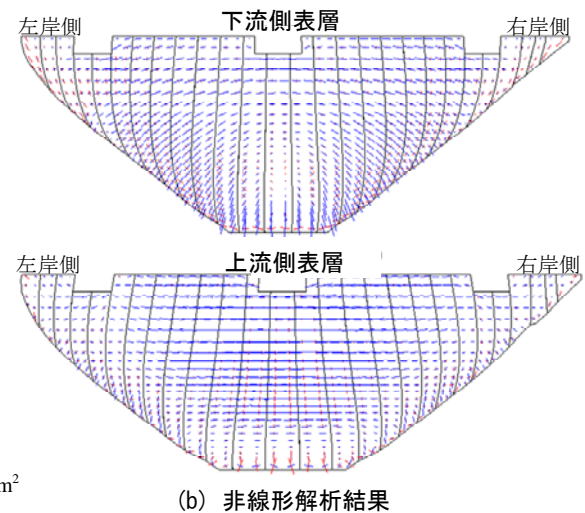
堤体コンクリート内部の応力状態は、アーチダムにおいて応力条件が一番厳しい冬季における線形・非線形解析結果を比較して考察を述べる。図-6 に冬季における、堤体を上下流方向に均等5等分した要素分割のうち、上・下流表層の主応力分布を示す。

### (1) 下流側表層の主応力分布について

圧縮応力については、線形・非線形解析結果での違いはなく、堤体中段標高以上ではアーチ推力に寄与する水平方向の圧縮応力が卓越し、中段標高以下では岩着部に対し垂直方向の圧縮力が卓越しているが、コンクリートの圧縮強度に比べるとはるかに小さい値である。

引張応力については、図-6(a)の線形解析結果を見ると、気温の影響により下流側表層の中段から岩着部にかけて高い引張応力が発生している。既往の強度試験結果から、ダムコンクリートの引張り許容応力を仮に $3.0\text{N/mm}^2$ とすると、この部分の引張応力は許容応力を超えており、ひび割れが発生する可能性のある領域となる。

一方、図-7 に非線形解析における冬季下流側表層の鉛直ジョイントの状態変化を示す。状態変化とは、3.4で述べたとおり、Coulomb 則で定義したすべりと剥離の判定基準（図-2 参照）のうち、鉛直ジョイント内応力がいずれかの破壊基準を超えた現象であり、同図ではすべり・剥離いずれの状態が発生したかを図示している。同図によると、非線形解析では、下流側表層の両岩着部と中段から岩着部にかけて鉛直ジョイント部に剥離・すべりが生じている。したがって、図-6(a)の線形解析で中段から岩着部にかけて発生する高引張応力は、鉛直ジョイントの剥離・すべりに伴う応力開放により、図-6(b)の非線形解析結果では許容応力以下となっている。実際のダムでもこの部位のひび割れは確認されておらず、実際の一ツ瀬ダムも鉛直ジョイントの剥離・すべりの影響を受けた非線形的な挙動を示しているといえる。



(b) 非線形解析結果

図-6 冬季の堤体主応力分布図

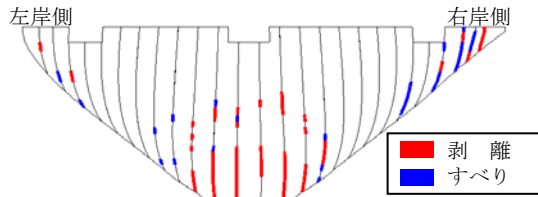


図-7 下流側表層の鉛直ジョイント状態分布

(2) 上流側表層の主応力分布について

圧縮応力については、下流側表層同様、線形・非線形解析結果での違いはなく、岩着部付近を除いてアーチ推力に寄与する水平方向の圧縮力が卓越しているが、この値も圧縮強度に比べ、はるかに小さい値である。

引張応力については、堤体中央部の岩着部付近では、主に静水圧の影響により、鉛直方向の引張応力が発生している。これは、堤体鉛直断面の下流方向への片持ち梁変形に起因した応力と考えられる。この方向の引張応力は堤体中央層では発生していないものの、線形・非線形解析結果とも、許容応力度を超えている。

以上を要約すると、一ツ瀬ダムは、堤体下流層は、鉛直ジョイントの一部が剥離・すべりを生じることにより、引張応力を許容応力以下に低減している。一方、上流側表層は、堤体中央岩着部に許容応力を超える引張応力が発生しているものの、この領域は堤体下流側表層まで達しておらず、堤体を貫通するひび割れも発生しないと考えられることから、ダムの基本性能である貯水機能は維持できている。以上の結果から、一ツ瀬ダムの常時健全性は保たれていると判断できる。しかしながら、上流側表層の堤体中央岩着部での高引張応力の発生には懸念が残り、この点の評価については、次章で述べる。

5. 上流側岩着部の剥離を想定したケース解析

線形・非線形解析結果とも、上流側岩着部付近において、主に水圧の影響により、高引張応力が発生している。この部位は、運用に伴うダム水位の変動により年間を通し、引張・圧縮作用を繰返し受ける部位であり、しかも、ダム湖底の堆積土砂以深であり、直接確認することは困難である。したがって、この部位の堤体と基礎岩盤が仮に剥離した場合、日常観測している堤体変位に変化が現れるかを把握するため、ケース解析を実施した。

5.1 解析ケース

表-3 に解析ケースを、図-8 に物性を変化させた岩盤要素図を示す。解析モデルは堤体を厚さ方向に均等に5分割で要素分割していることから、直下の岩盤要素に対して、堤体上流側から1層ずつ剛性を低下させた。なお、堤体最上流直下の岩盤要素に隣接する貯水池側の1要素も同様に低下させている。岩盤要素の剛性低下量については、初期時の剛性の1%とした。

表-3 解析ケース表

解析ケース	解析モデル	上流側岩盤物性
Case-1	線形	上流側 0,1 層の剛性低下
Case-2	線形	上流側 0,1,2 層の剛性低下
Case-3	非線形	上流側 0,1,2 層の剛性低下

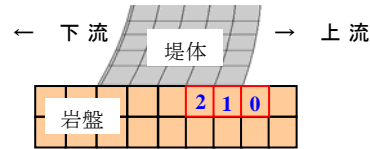


図-8 堤体と基礎岩盤の剥離を想定した岩盤要素

5.2 解析結果

(1) 冬季における堤体変位について

図-9 に冬季における解析結果を示す(同図の横軸は図-5 と同様)。冬季のアーチダムは堤体コンクリートの収縮作用により、下流側へ変形するが、健全(図-5の冬季における非線形解析結果と同一)ケースと比較して、堤体と基礎岩盤の剥離が進行するにつれ(Case-1 からCase-2), 下流側への変形が大きくなる傾向にある。しかしながら、健全ケースとCase-3の堤体頂部の変位(堤体底からの高さ130m)を比較しても、その差は10mm程度である。アーチダムの挙動は温度応力に大きく依存するため、このケース解析を実施するにあたり、事前に温度荷重を増加させた解析を実施している。具体的には、温度荷重を算出するために入力する気温の回帰曲線(3.6(2)に記載)の振幅を、回帰に使用した10年間のデータのうち、最高・最低気温で与えた解析を実施した。この結果、夏季・冬季とも、堤体底からの高さ130mの位置で約10mm程度変動する結果となっている。このため、10mm程度の変化では、外気温の変動に伴い変化する変位量と変わらないため、上流側岩着部の剥離を冬季の堤体変位で検知することは困難であると考えられる。

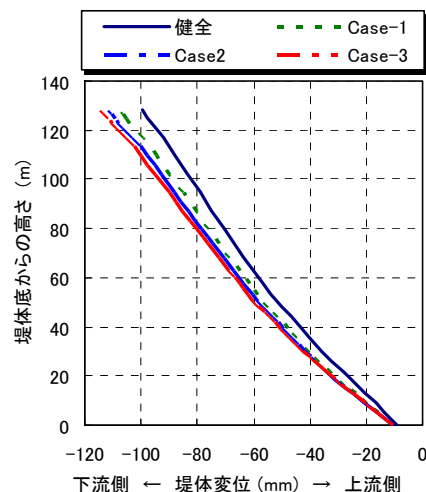


図-9 冬季における堤体変位分布

## (2) 夏季における堤体変位について

図-10に夏季における解析結果を示す(同図の横軸は図-5,9と同様)。夏季のアーチダムは堤体コンクリートの膨張作用により、上流側へ変形するが、健全ケースと比較すると、堤体と基礎岩盤の剥離が進行するにつれ、下流側へ変形している。前述のとおり、夏季においても温度振幅を変化させた場合には、約10mmの変動が確認されているが、下記の場合には、上流側へ約10mm変動するため、本ケースの解析結果とは逆方向への変位であり、上流側岩着部の剥離が進行すると夏季の変形モードが変化することを示している。

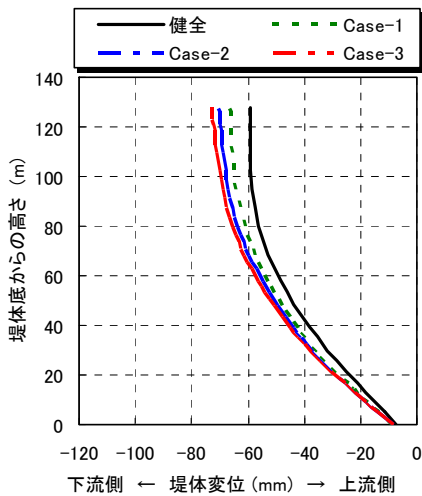


図-10 夏季における堤体変位分布

### 5.3 今後の維持管理について

これまでの堤体変位計測データの重回帰分析結果<sup>6)</sup>から、計測値の経年変化は定常化しており、現在はこの部位の剥離は生じていないと判断できる。しかしながら、今後も引張・圧縮作用を繰返し受ける部位であることから、今後剥離が生じる可能性は否めない。しかし、前章のケース解析結果により、この部位で懸念される上流側岩着部の剥離については、夏季の変形モードで検知可能であることが示唆された。このため今後の計測管理においては、堤体変位の絶対値に加え、夏季の変形モード(振幅、輝線の変化)を管理することで当該部位の剥離は検知でき、よりの確な維持管理に繋がると判断している。

## 6. 結論

約50年経過した一ツ瀬ダムの変位・主応力分布を検討し、線形解析結果も参照しながら、常時健全性評価を行った。この結果、一ツ瀬ダムは弾性挙動に近いながらも、非線形挙動を示し、局所的な鉛直ジョイント部が剥離・すべりを生じることにより、堤体内部の引張応力を低減し健全性を確保していることが明らかとなった。

また、年間を通して高い引張応力が発生している上流側堤体岩着部については、これまでの計測データから、現在は剥離が生じていないものの、今後の維持管理については、夏季の変形モードで検知可能であることを明らかにした。現在は、本解析モデルを動的解析用モデルに改良し、レベル2地震動による耐震性能照査を実施しており、今後の維持管理の高度化に寄与する所存である。

## 謝辞

本研究の実施にあたって、(財)電力中央研究所 地球工学研究所 松井淳主任研究員、ならびに西日本技術開発(株) 土木本部 江藤芳武部長には、多大なご指導を賜りましたことを、ここに記し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 西内達雄, 金津努: ジョイント部の特性を考慮した既設アーチダムの挙動評価, 電力中央研究所報告, U96049, 1997
- 2) 西内達雄, 豊田幸宏: 気温の年変化と鉛直ジョイント部の非線形特性を考慮したアーチダムの地震応答解析手法の開発: 電力中央研究所報告, U00070, 2001
- 3) 西内達雄, 豊田幸宏, 松尾豊史, 上田稔, 水野和彦: 三次元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
- 4) 西内達雄, 阪田憲次: 鉛直方向の施工ジョイント部での離接を考慮したアーチダムの常時挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.672-688, 2006.10
- 5) 日本大ダム会議, 第2次改定, ダム設計基準, 1978.8
- 6) 大熊信之, 江藤芳武, 金澤健司: アーチダムにおける常時変形挙動と振動特性の分析について, 土木学会第62回年次学術講演会, No.576, pp.1-576, 2007.9
- 7) 西内達雄, 阪田憲次: 既設アーチダムの常時挙動に及ぼす鉛直ジョイント部モデル化の影響, ダム工学, Vol.17, No.2, pp.106-115, 2007
- 8) 大熊信之, 江藤芳武, 西内達雄, 松井淳: 竣工後40年以上経過したアーチダムの常時健全性評価, 土木学会第63回年次学術講演会, No.43, pp.1-43, 2008.9
- 9) 西内達雄, 松井淳, 大熊信之, 江藤芳武: 既設アーチダム常時応力に及ぼす施工ジョイント部の非線形挙動の影響, 土木学会第63回年次学術講演会, No.44, pp.1-44, 2008.9
- 10) 松井淳, 大熊信之, 江藤芳武: 竣工後40年以上が経過したアーチダムの常時挙動評価: 電力土木技術協会誌, No.337, 2008.9