三次元FEM解析に基づく大倉ダム（ダブルアーチ式コンクリートダム）の堤体安定性評価

STABILITY EVALUATION OF OHKURA DAM (A MULTIPLE-ARCH DAM) BASED ON 3-D FEM ANALYSIS

中野雅章*・師　自海*・小林　孝**

Masaaki NAKANO, Zihai SHI and Takashi KOBAYASHI

Ohkura dam is the only double-arched concrete dam constructed in Japan. Because of its structural complexity, it was deemed appropriate to evaluate its structural stability using numerical analysis and measured deformation data. The intake tower for irrigation water, which is located near the left bank of the dam, is being renovated. Renovation of the tower will increase the dead load on the dam. A study of the impact of the increased dead load on the dam was accompanied by a stability evaluation of the dam based on 3-D FEM analysis..

***Key Words*：**　*3D FEM analysis, multiple-arch dam, stability evaluation*

1. はじめに

宮城県仙台市青葉区内に建設された大倉ダムは、堤高83m、堤頂長323m、堤体積約23万m^{3}の我が国で唯一のダブルアーチ式コンクリートダムであり、建設省直轄事業として昭和36年6月に竣工した多目的ダムである。本ダムの設計においては、荷重分割法（半径方向調整計算）による応力評価と構造模型実験による検証が実施され、建設後も設計震度や材料値の見直しなどを行い、荷重分割法（半径方向調整ならびに完全調整）による簡便な応力評価に基づいて安全性が確認されてきた。しかし、実構造は中央にスラストブロックを有するダブルアーチという複雑な構造形式であるために、過去の総合点検報告書[1)]においては、変位計測と数値解析に基づく安定性評価の必要が示されていた。そのような中、昨年度、本ダム左岸側農業取水塔設備の補修計画が具体化され、自重増加（約200tf）による堤体への影響評価ならびに補修後の取水塔の変形についての確認を実施することとなった。そこで、それに併せて、堤体の変位計測結果に基づくモデルの検証を経て、三次元FEM解析による堤体の安定性評価を実施した（【業務名】H15大倉地区（施設補修）201号大倉ダム取水塔補修設計及び堤体影響評価解析業務、【発注者】宮城県仙台産業振興事務所）。

本稿では、今後既設構造物の健全性や耐震性能などに関する照査が増加する傾向にある中、構造解析を用いた照査業務の一例として上記解析内容を紹介するものである。

2. 大倉ダムの概要

大倉ダムの諸元を表−1に示す。また、ダム堤体の概観と断面図を図−1、2に示す。

表−1　ダム・貯水池緒元

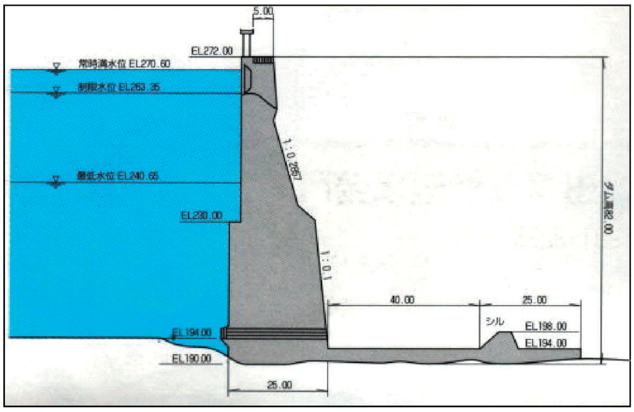
[illegible]		[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	82m	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	[illegible]		
[illegible]	[illegible]		
[illegible]	[illegible]		
[illegible]	[illegible]		
[illegible]	[illegible]		
[illegible]	[illegible]		
	[illegible]		

---

*　中央研究所 総合技術開発部

**　仙台支店　技術部

図ー1　ダム堤体



図ー2　断面図

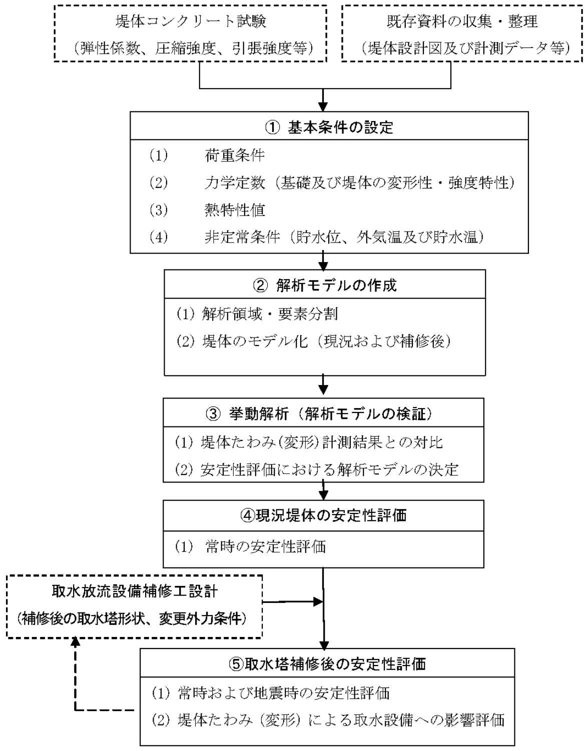
3. 検討概要

大倉ダム左岸取水塔設備の補修に伴う外力変更による堤体への影響評価ならびに補修後の堤体の構造安定性について確認するために、三次元弾性FEM解析を実施した。図ー3に検討フローを示す。

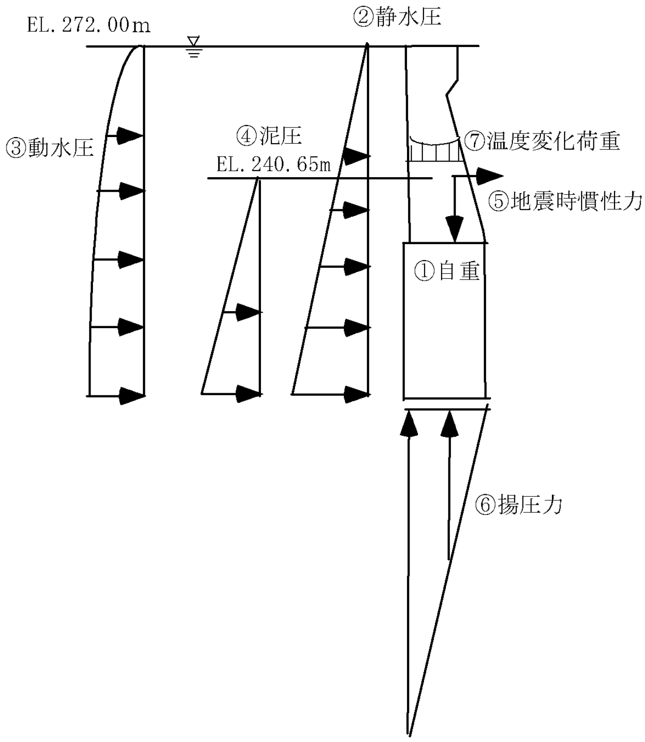
4. 基本条件の設定

(1)　荷重条件

考慮する荷重条件は「建設省河川砂防技術基準（案）」(1998)（以下、現行基準）[2] を基本として図ー4に示す7種類を設定した。なお既存資料[1] から、設計震度は0.24とした。スラストブロックに作用する揚圧力はアーチ部の基礎排水孔の堤敷設置位置が不明なことから、同資料[1] を参考に、左右岸方向の分布で19.58m、上下流方向はアーチ基礎幅として作用させた（図ー5）。温度荷重は非定常熱伝導解析を実施して得られた温度履歴から算出した。堤体上流面側に敷設されている取水塔設備はコンクリートブロックとしてモデル化し、自重を等価換算してモデルに反映させた。また、取水塔建屋、橋梁部、鋼製ゲート部についても自重を考慮して当該位置に荷重として与えた。



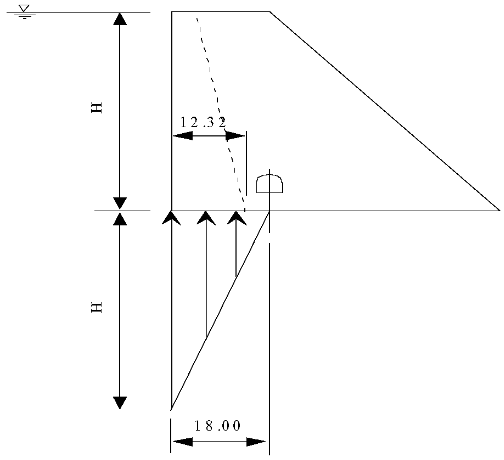
図ー3　検討フロー



図ー4　荷重条件概略

(2)　物性値

解析に必要な基礎岩盤および堤体コンクリートに関する力学物性値（弾性係数、ポアソン比、圧縮強度、引張強度、熱特性値など）は既存資料[1]、[3] および採取したコアの強度



図－5　スラストブロックの揚圧力

表－2　材料条件

材料	項目	数値
コンクリート	単位体積重量(kN/m^3)	24.0
	一軸圧縮強度 (N/mm^2)	27.5
	静的弾性係数 (kN/mm^2)	24.9
	静的ポアソン比	0.19
	割裂引張強度 (N/mm^2)	2.45
	熱伝導率(kJ/mh℃)	9.20
	比熱(kJ/kg℃)	1.05
	熱膨張係数(×10^{-6}/℃)	10.00
基礎岩盤	せん断強度(N/mm^2)	2.0
	内部摩擦係数	0.80
	静的弾性係数 (kN/mm^2)	4.9
	静的ポアソン比	0.20
	熱伝導率(kJ/mh℃)	6.28
	比熱(kJ/kg℃)	0.80
	熱膨張係数(×10^{-6}/℃)	7.00
	熱伝達率－外気温(W/m^2･K)	14
	熱伝達率－貯水温(W/m^2･K)	51

試験に基づいて設定した。地震時における検討の場合は、現行規準に準じて常時の強度に30%増加した値を基準として評価した。コンクリートと基礎岩盤の材料条件を表－2に示す。

(3)　気温および水温に関する条件

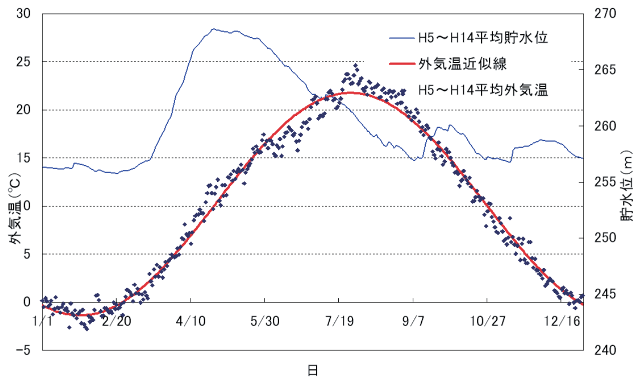
非定常熱伝導解析における非定常条件は過去の計測記録から、貯水位、外気温、貯水温データに関して設定した。

1)　貯水位

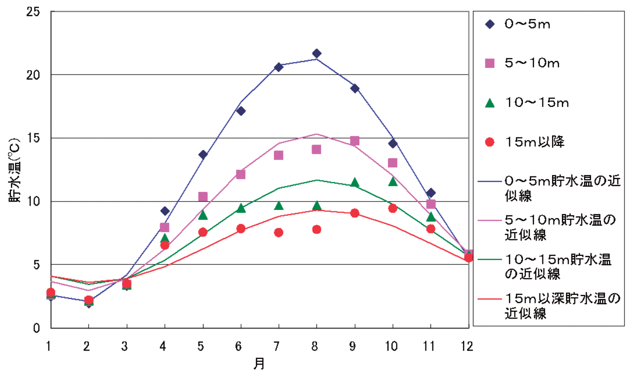
平成5年から平成14年までの日ごとの貯水位の平均を用いた（図－6）。

2)　外気温

平成5年から平成14年までの日平均気温の平均値から、1年間で1周期となる正弦関数を用いて以下のような回帰式を設定した。



図－6　外気温と貯水位のモデル



図－7　貯水温のモデル

<外気温の近似式>

T=11.572×sin（2π/365×（t-116.33））+10.191（図－6）

3)　貯水温

貯水池深さ方向の温度分布は昭和37年から平成14年までの原則各月一度の計測値に基づき、外気温と同様に正弦関数として以下のように回帰式を定め、貯水池水位実績と合わせて入力温度に反映させることとした（図－7）。

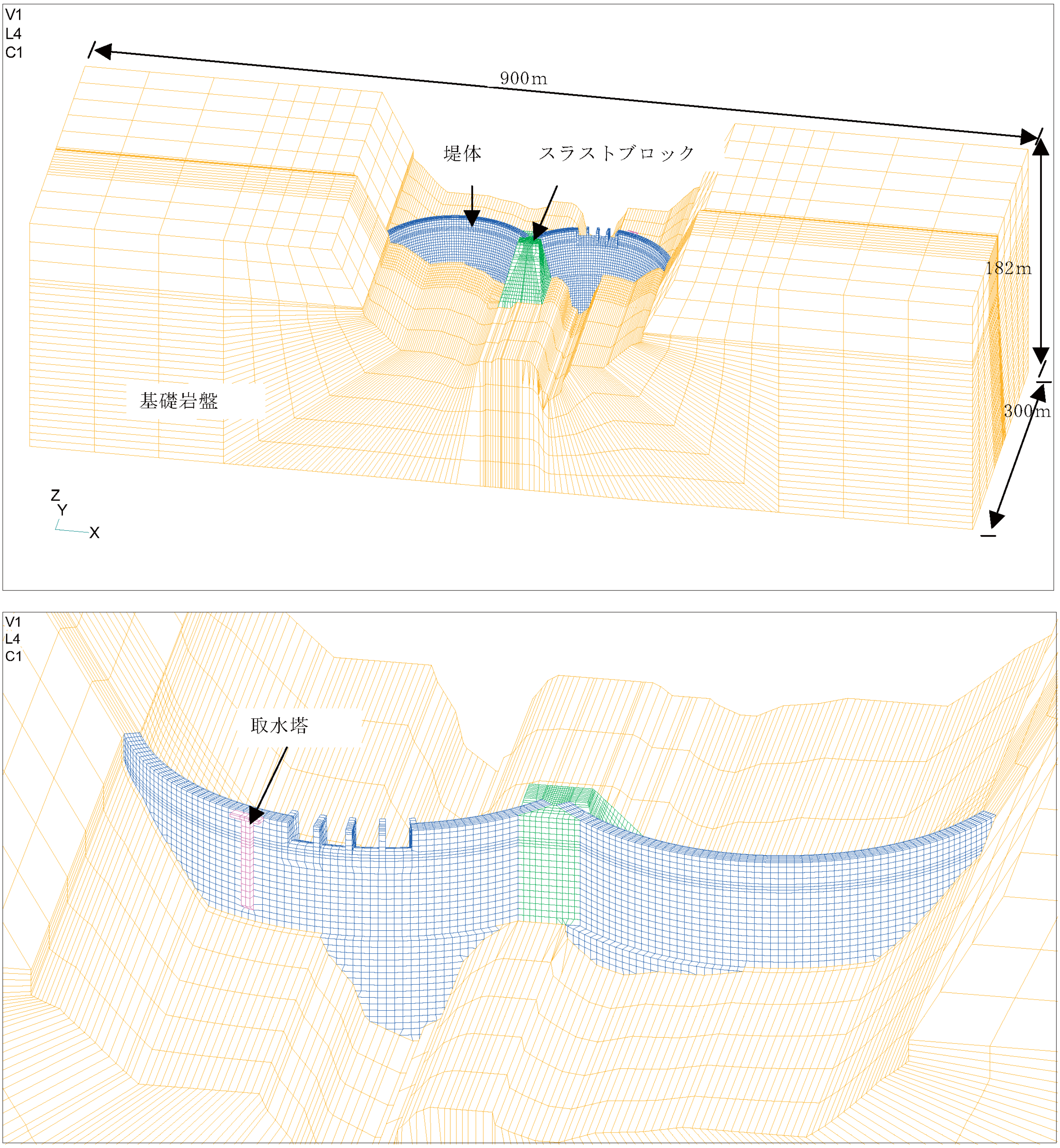
水深0～5m：T=9.682×sin（2π/12×（t+451.32））+11.662

水深5～10m：T=6.1723×sin（2π/12×（t+451.07）+9.138

水深10～15m：T=4.110×sin（2π/12×（t+450.92））+7.571

水深15m～：T=2.858×sin（2π/12×（t+450.86））+6.468

解析領域のうち、堤体が外気および水に接する要素は熱伝達境界とし、堤体の経年的な温度分布が定常となったときの温度分布値を、温度応力解析における入力値とした。



図−8　大倉ダム三次元FEM解析モデル図

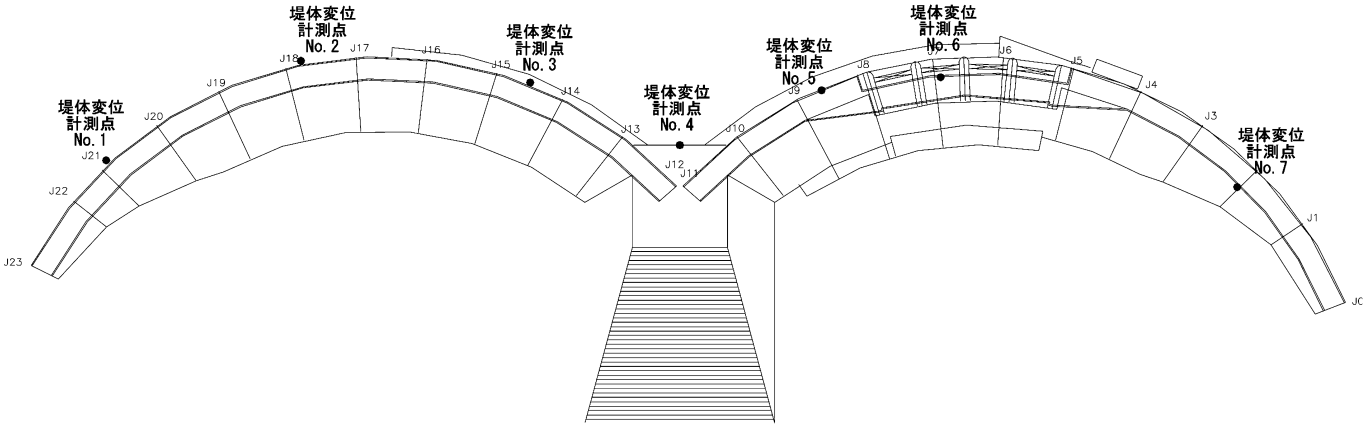
5. 三次元FEM解析

(1) 解析モデル

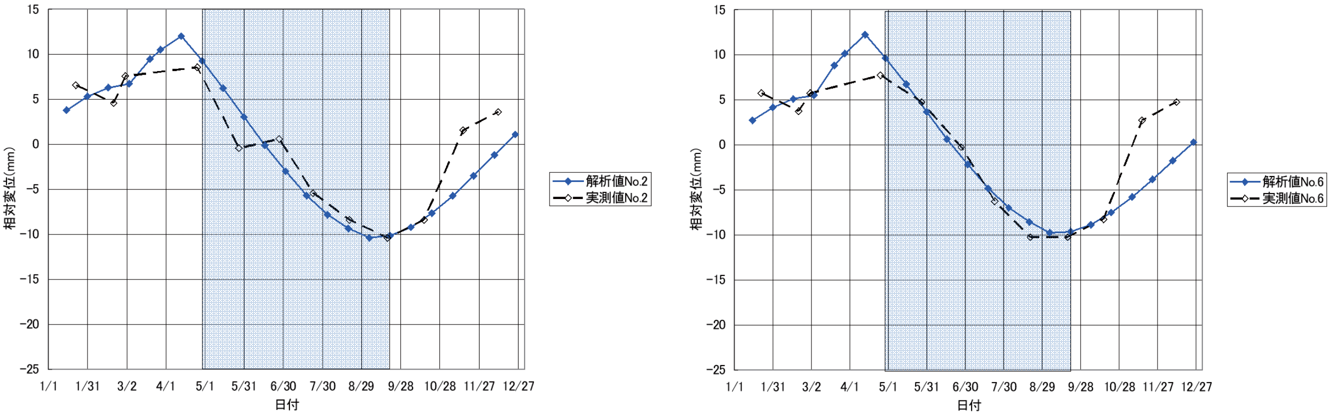
解析モデルは、堤体と基礎地盤を含めたダブルアーチダム全体モデルとした。解析領域は、岩盤部分の大きさが堤体挙動に影響を及ぼさない範囲とし、図−8に示すように、堤体を中心として、左右岸ダム軸方向：堤頂長の約3倍、上下流方向：堤高の約2.5倍、高さ方向：堤高の約2.5倍とした[4)]。

既設堤体の構造モデルでは、堤体上流面側に敷設されている既設の取水塔設備をコンクリートブロックとしてモデル化し、自重を等価換算してモデルに反映させた。また、取水塔建屋、橋梁部、鋼製ゲート部についても自重を考慮して当該位置に荷重として与えた。

補修後のモデルでは、補修後の取水塔設備の既設設備からの自重増加分を考慮し、コンクリートブロック部に等価換算して反映させた。



図ー9　堤体変位計測点



図ー10　変位計測点における上下流方向の変位量の推移
（実測値vs解析値）

境界条件は岩盤境界を固定とし、基礎岩盤と堤体、堤体全体は一体構造としてモデル化した。

(2)　挙動解析（解析モデルの検証）

解析モデルの検証を行うために、平成14年度に実施された計測の全7点（図ー9）について、堤体変位の実測値と解析値との比較を行った。比較対象期間は、実測値の最大変位および最小変位を計測した4月25日から9月18日とした。考慮する荷重は自重、静水圧、泥圧、温度荷重とし、特に堤体に与える影響が大きいと思われる温度荷重は、非定常熱伝導解析結果に基づき温度応力解析を行って考慮し、対象期間における堤体の変位状況を確認した。

図ー10に代表2点の実測変位と解析結果との比較図を示す。実測値、解析値ともに建設当初からの絶対変位量ではないため、それぞれの変位値の年間平均値を基準にした相対変位をもって比較した。なお、色付けした期間が比較対象期間である（4月25日～9月18日）。また表ー3に全計測点における対象期間の相対変位量について実測値と解析結果を比較する。

表ー3　相対変位比較（実測値vs解析値）

計測点	対象期間の相対たわみ(mm)		解析値/実測値
	実測値	解析値	
No. 1	9	8	86%
No. 2	19	19	102%
No. 3	16	13	79%
No. 4	10	4	41%
No. 5	18	15	82%
No. 6	18	19	107%
No. 7	10	6	62%

図ー10から、各計測点の季節変動を含めた堤体変位の年間推移については、本解析モデルによりおおむね良い精度で再現できていることが分かる。また、表ー3より、対象期間の相対変位量は、計測点No.4（スラストブロック頂）およびNo.7（左岸側アバットメント付近）を除いては、実測値と解析結果はほぼ同等の値となっている。特に、計測上で最も大きな変位を生じているNo.2およびNo.6（左右アーチクラウン）においては、対象期間の相対変位量は解析

表－4　補修後の堤体モデルに関する解析ケース

解析ケース	貯水池の水位状態	考慮する荷重							備考
		自重	静水圧	地震時動水圧	泥圧	地震時慣性力	揚圧力	温度荷重	
補修後1	常時満水位	○	○		○		○	○	常時
補修後2	常時満水位	○	○	○	○	○	○	○	地震時
補修後3	最低水位	○	○	○		○（上流向き）	○	○	地震時

結果と実測値がほぼ一致している。計測点No.4およびNo.7については、解析結果は実測値に対して数ミリ程度小さかった。この原因としては、数値解析上の固定境界の影響を受けたことや計測上の誤差などが考えられる。ただし、これらの箇所が実測値においても他の箇所と比較して変位が小さい傾向にあることから、解析結果はその構造挙動の特徴を定性的には再現できていると言える。

以上の結果から、本解析モデルは実構造物を適切にモデル化できているものと判断した。

(3) 安定性評価法

安定性評価においては、以下の指標を用いることとした。

a.コンクリートの許容圧縮応力

b.コンクリートの引張応力

c.基礎地盤内のせん断摩擦安全率

コンクリートの許容圧縮応力に関しては強度安全率4を見込んだ。

コンクリートの引張応力に関する検討では、コンクリートの引張応力が引張強度に達しないことを照査することとした。アーチダムの引張応力に対する評価に関して、現行基準では“アーチ式コンクリートダムの場合、引張応力の許容値はその応力の生じる箇所、応力解析法の精度によって異なるものであるから、これらの点を考慮して定めるものとする”とあり、明確な許容値は示されていない。アーチダムにおいては、引張応力を許容するため、クラックの影響が懸念されるが、主なクラックは片持梁のベースの鉛直引張応力、アーチクラウンやアーチアバットメントの水平引張応力に起因するものであり、いずれも通常収束性のあるクラックとされている。これらについては、二次的な安定が得られた時の応力状態を照査して許容値内であることを確認すればよいと考えられている[5)]。実構造では応力継目が堤体に15m間隔で設けられているため応力集中が緩和されることや、長期荷重下におけるクリープひずみによる引張応力の解放やアーチダム構造の特性を考慮すれば、引張応力が問題となることは少ないものと考えられるが、参考として、引張応力が引張強度を超過した場合、その場所にクラックが発生し、引張力に抵抗しなくなることをモデル化するために、当該コンクリート要素の剛性を地盤の1/100に低減し、二次的な安定が得られた時の応力状態を確認することとした。

せん断に対する安定については、現行基準に基づき、基礎地盤のせん断摩擦安全率が4以上、局所せん断摩擦安全率が2以上を有することを確認することとし、それぞれの安全率は以下のHennyの式により算出することとした。

せん断摩擦安全率：$n = \dfrac{\tau_0 l + fV}{H}$　　(1)

n：せん断摩擦安全率、H：単位幅あたりのせん断面に作用するせん断力、V：単位幅あたりのせん断面に作用する全垂直力、τ_0：基礎岩盤のせん断強度、f：基礎岩盤の内部摩擦係数、l：せん断面長さ

局所せん断摩擦安全率：$n_0 = \dfrac{\tau_0 + f(\sigma - u)}{\tau}$　　(2)

n_0：局所せん断摩擦安全率、τ_0：局所せん断強度、f：局所の内部摩擦係数、σ：局所せん断面沿いの垂直応力度、τ：局所せん断面沿いのせん断応力度、u：局所せん断面沿いの間隙圧

(4) 堤体の安定性評価

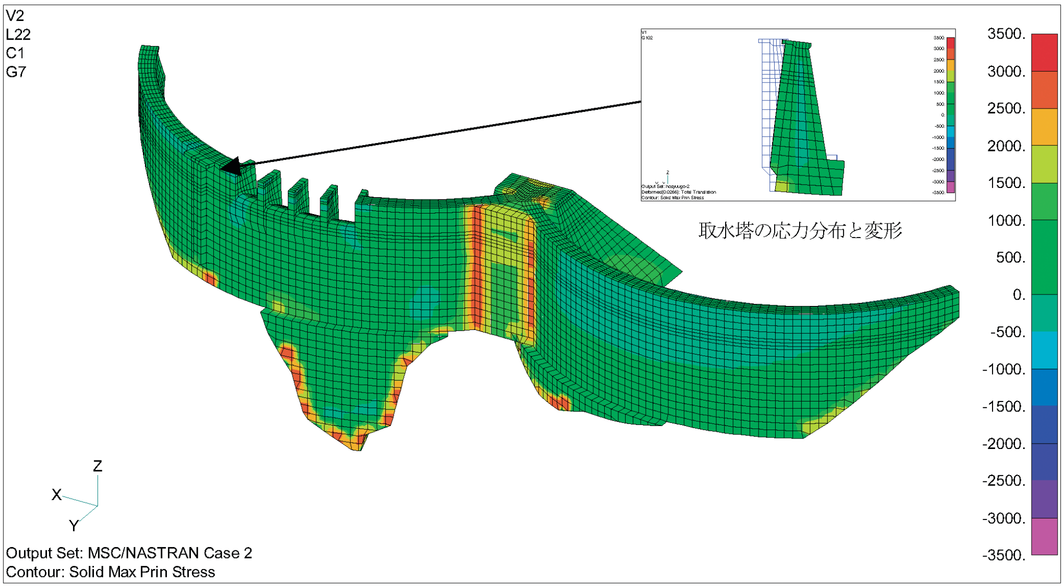
取水塔補修による堤体への影響評価を行うため、表－4に示す3ケースについて検討した。

① 補修後1は補修後の常時条件下の堤体の安定性を確認するものであり、現況の堤体の安定性解析結果と比較することで、補修の影響について検討した。

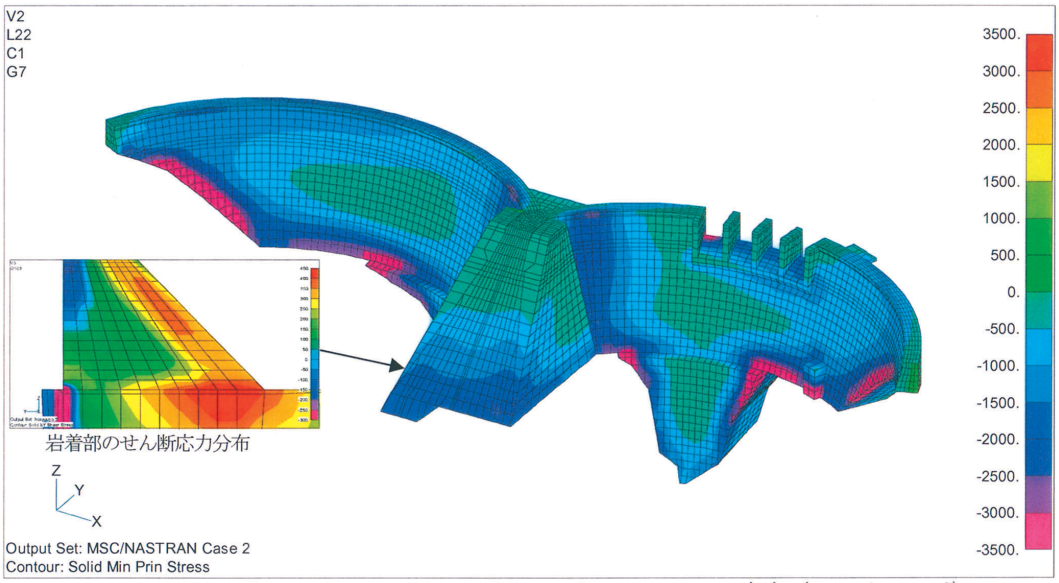
② 補修後2は地震時の堤体の影響について検討するものであり、堤体が下流側に最もたわむ時についての評価である。

③ 補修後3も地震時の堤体の影響について検討するものであるが、貯水位が低い場合に慣性力が上流向きに作用する場合の評価である。(堤体が上流側に最もたわむ時の評価)

温度荷重は、挙動解析おいて実施したものと同様な解析を実施し、現況の堤体、補修後の堤体ともに、3月4日（下流側にたわむ時）および9月4日（上流側にたわむ時）に温度応力上最も厳しい条件となったため、それらの時点における温度荷重条件を用いた。



二次安定後の最大主応力（引張側）　応力（$\times 10^{-3}$N/mm^2）



二次安定後の最小主応力（圧縮側）　応力（$\times 10^{-3}$N/mm^2）

図ー11　堤体の主応力分布（補修後ケース2ー地震時荷重条件下）

表ー5　解析結果（補修後ケース2）

コンクリートの圧縮応力

	最大圧縮応力 σ_c (N/mm^2)	評価
堤体	4.6	問題無 (σ_c < 8.9)
スラストブロック	2.3	問題無 (σ_c < 8.9)

コンクリートの引張応力

	最大引張応力 σ_t (N/mm^2)	評価
堤体	2.94	問題無 (σt < 3.19)
スラストブロック	2.91	問題無 (σt < 3.19)

基礎地盤内のせん断摩擦安全率

せん断摩擦安全率 n	評価
7.9	問題無 (n > 4)

局所せん断摩擦安全率 n_0	評価
4.3	問題無 (n_0 > 2)

図ー11および表ー5に堤体にとって最も厳しい条件となった補修後ケース2に関する結果を示す。基礎岩盤と堤体を一体化としてモデル化した影響で、コンクリートの引張応力が岩着部付近などで局部的に大きくなったため、当該コンクリート要素の剛性を地盤の1/100に低減し、二次的な安定が得られた時の応力状態を確認した。解析結果から得られた堤体およびスラストブロックに発生する応力は、コンクリートの許容圧縮応力、コンクリートの引張応力、基礎地盤内のせん断摩擦安全率についてすべて許容値以下となり、堤体の安全性に関して問題無いことを確認した。

また、補修後の取水塔の単段式円形シリンダーゲートの構造は可動部と固定部から成り、上下端の相対変位の許容限界値は20mm程度であったが、解析結果では上下端の相対変位が下流側に最もたわむ時で12.6mm、上流側にたわむ時で11.4mmとなり、現設計で操作性上問題とならないことを確認した。

なお、補修工事による堤体安定性への影響については、現行貯水池運用下での水中施工を主体する取水設備補修工事であり、取水設備の自重以外に大きな荷重の変化は無いことから、問題無いものと判断した。

6. まとめ

本業務は既設ダブルアーチ式コンクリートダムの三次元FEM解析を実施したものであり、設計時には直接的に考慮されていなかった三次元アーチ構造とスラストブロックを含む堤体全体の挙動を踏まえた応力照査から安定性について検討したものである。

今後既設構造物の健全性や耐震性能などに関する照査が増加する傾向にある中、その定量的な照査方法の一つとして、構造解析の果たす役割はますます重要となってくるものと思われる。実験においては、コスト面や実験装置などの制限は避けられないことから、適切なモデル化による数値解析を用いた“数値実験”への期待も大きい。今後はさらに構造解析技術の付加価値を高め、幅広い適用を図っていきたい。

謝辞：本検討の実施にあたり、宮城県仙台地方振興事務所、宮城県仙台地方ダム総合事務所、ダム技術センターの関係各位には、多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 財団法人ダム技術センター、大倉ダム総合点検評価業務委託報告書、1988
2) 建設省、建設省河川砂防技術基準（案）、1998
3) 八千代エンジニアリング株式会社、大倉ダム堤体解析調査報告書、1981
4) 例えば、西内、豊田、水野、既設アーチダムの常時挙動評価手法の開発とその適用性検討、電力土木、1998
5) 飯田隆一、コンクリートダムの設計法、技報堂、1992