

鉛直ジョイント部の剥離・滑動を考慮した アーチダム堤体の応力状態および動的特性評価

松田泰治¹・大熊信之²・遠藤洋平³

¹熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻教授
(〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2丁目39番地1号)

E-mail:mazda@kumamoto-u.ac.jp

²九州電力株式会社 総合研究所 土木グループ研究員
(〒815-8520 福岡県福岡市南区塩原2丁目1番地47号)

E-mail:Nobuyuki_Ookuma@kyuden.co.jp

³熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻
(〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2丁目39番地1号)

E-mail:104d8805 @st.kumamoto-u.ac.jp

アーチダムは薄肉な三次元構造物であり、基礎岩盤および貯水との相互作用に大きく影響される¹⁾。施工時に設けられる鉛直ジョイント部は、剥離・滑動挙動が確認されており、解析モデルにおける鉛直ジョイント部を適切に評価する必要がある。また、アーチダムの堤体形状はダムサイト毎に多種多様であるにもかかわらず、堤体形状が応力状態に及ぼす影響については十分に検討されていない。そこで本研究では、鉛直ジョイント部の非線形特性を考慮できる解析モデルを構築し、堤体形状として左右対称性および非対称性に着目した。実在するアーチダムから作成したダム-基礎-貯水連成系の三次元モデルを非対称モデルと位置づけ、非対称モデルをもとに左右対称的な堤体を有するモデルを2ケース構築した。さらにそれぞれの解析モデルを対象として固有値解析、常時挙動解析を実施し、アーチダムの基本的な振動特性および耐荷機構について示し、鉛直ジョイント部の非線形特性および堤体形状がこれらに及ぼす影響について検討した。

Key Words : Arch dam, Transverse joints, Mode shape, Static behavior

1. はじめに

我が国のコンクリートダムは現行の耐震設計法である震度法により設計されている²⁾。震度法で設計されたダムは、1995年の兵庫県南部地震やそれ以降に発生した大規模地震に対しても大きな被害を受けた事例はないことから、十分な耐震性を有していることが確認されている。しかしながら、震度法による設計は必ずしも堤体挙動の実態に即したのではなく、種々の不確実性を高い安全率でカバーしてきたのが実情であり、想定以上の大規模地震動に対するダムの健全性については適切に評価できていないことが指摘されている³⁾。

アーチダムの堤体コンクリートを打設する際、冷却収縮に伴うひび割れを防止するため、ダム軸方向に15~20m間隔で鉛直ジョイントが設けられる。鉛直ジョイント部は堤体全体の剛性から考えれば弱部であり、最も変形が生じやすい箇所と考えられる。鉛直ジョイント部の変位計測データや地震時挙動シミュレーション解析結果から、温度変化、

貯水位変動、地震動により鉛直ジョイント部は剥離・滑動挙動を示すことが報告されている⁴⁾。さらにアーチダムは、貯水の水圧等の荷重を基礎岩盤に伝達させる構造物であり、コンクリートの持つ圧縮強度を最大限に利用できる薄さまで堤体断面を小さくすることができる。そのため、ダムサイトの地形・地質を踏まえた上で安全性・経済性といった二律背反する要求を確保するための堤体設計は設計者に委ねられ、その結果として堤体形状はダム毎に多様となる。しかしながら、堤体形状がダムの耐荷機構に及ぼす影響は十分に解明されていない。

本研究の目的は、鉛直ジョイント部の非線形特性および堤体形状として左右対称性・非対称性に着目し、これらが振動モードに対して及ぼす影響や大規模地震に対する応答および堤体内部の応力状態に与える影響を把握することである。

本論文では、鉛直ジョイント部の非線形特性を考慮した解析モデルを構築した。また、実在するアーチダムをもとに精緻に作成された解析モデルを左右非対称モデルと位

置づけ、非対称モデルをもとに2ケースの左右対称モデルを構築した。これらの解析モデルに対して固有値解析を実施し、それぞれの振動特性を把握した。また、アーチダムの地震時応答には常時における応力状態の与える影響が大きいことから、地震応答解析の事前検討として、常時挙動解析を実施することにより、常時の応力状態に対して堤体の対称性・非対称性が及ぼす影響について検討した。

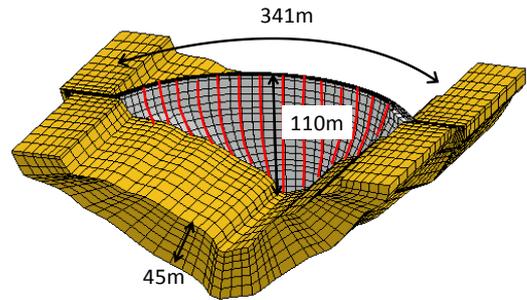


図-1 非対称モデル鳥瞰図

2. 解析モデル

(1) 非対称モデル

本解析では、実在する一基のアーチダムをもとに、精緻に再現した解析モデルを作成した。この解析モデルを非対称モデルと定義する。図-1に示すように、ダム-岩盤-貯水連成系の三次元モデルであり、堤高・堤頂長はそれぞれ110m, 341m, 岩盤幅は45mの等厚としている。特徴として、左岸側にダム堤体に発生するアーチ推力を基礎岩盤に伝達させる役割を持つスラストブロックを有する。堤体並びに岩盤部は等方弾性体として8節点6面体要素を用い、堤体は鉛直ジョイント（図-1の赤線部）間を均等2分割、厚さ方向に均等5分割している。貯水は流体要素とはせず、地震時に堤体上流面に作用する動水圧の影響は付加質量により与えた。表-1に固有値解析および常時挙動解析に用いた物性値をそれぞれ示す。これらの物性値は実ダム設計値を参考にして設定した。

表-1 解析モデルの物性値

(a) 固有値解析で用いた物性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
堤体コンクリート	23.95	44.1	0.167
鉛直ジョイント	23.95	8.83	0.167
岩盤	25.50	19.6	0.200
ゲート	1.71	0.44	0.167

(b) 常時挙動解析で用いた物性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
堤体コンクリート	23.95	36.0	0.167
鉛直ジョイント	23.95	8.83	0.167
岩盤	25.50	4.00	0.167
ゲート	2.40	0.30	0.167

(2) 鉛直ジョイント

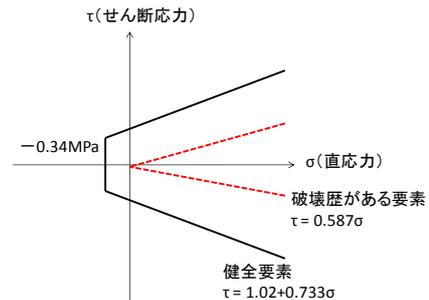
鉛直ジョイント部は、節点ばね要素で構成し、非線形解析においては既往の研究⁴⁾で提案された力学モデルを用いた。図-2に本モデルの概要を示す。滑動・剥離の判定基準をCoulomb則で定義し、判定基準を超えた鉛直ジョイント部は同方向応力を開放した。また再接触した場合は圧縮応力のみを完全に伝達させ、引張抵抗をゼロとした。

(3) 対称モデルの構築

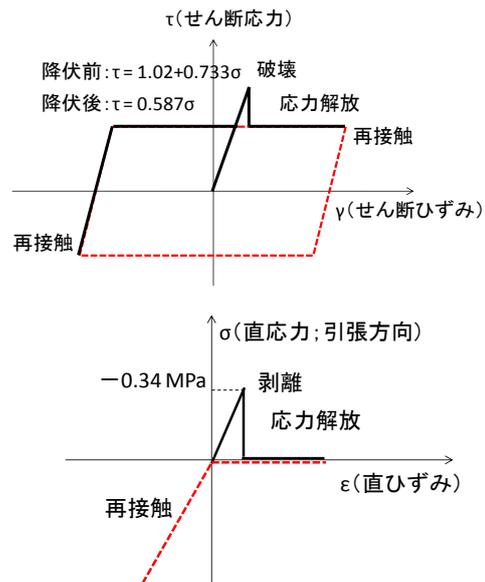
非対称モデルの左右岸中央断面を対称面として折り返すことで、2ケースの対称モデルを構築した。図-3に対称モデル構築の概略図を示す。非対称モデルの右岸側を折り返したものを右対称モデル、左岸側を折り返したものを左対称モデルと定義した。図-4に各モデルの正面図、上面図を示す。

(4) 付加質量法による動水圧の考慮

地震時には、ダム堤体に常時作用している静水圧に加えて動水圧が作用する。堤体上流側表面に質量を付加し、質量の慣性力をもって近似的に動水圧を考慮した。付加質量の算定式には、「建設省河川砂防技術基準（案）解説」⁵⁾



(a) 剥離と滑動特性の判定基準



(b) 応力-ひずみの履歴特性

図-2 鉛直ジョイント部のモデル化

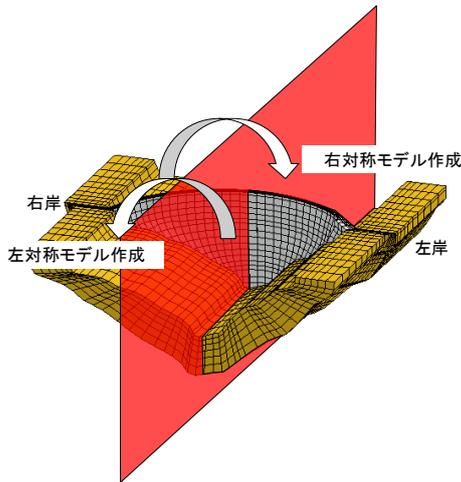


図-3 対称モデル構築の概略図

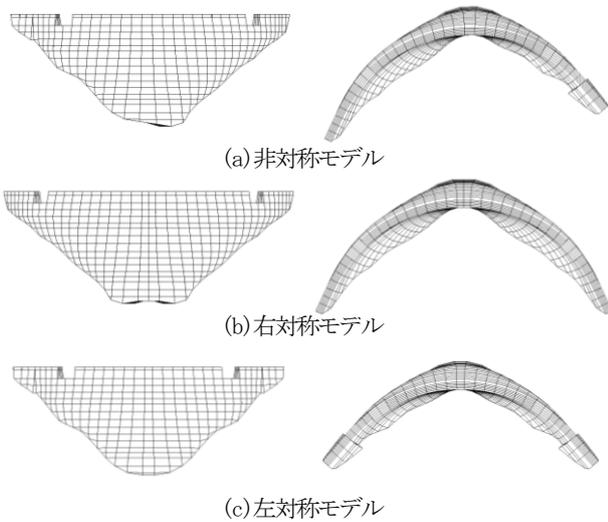


図-4 解析モデル（堤体のみ）の正面図と上面図

に従い、堤体上流面勾配の影響を考慮できるZangerの式(式(1), (2), (3))を採用し、付加質量は上下流方向のみ与えた。図-5にZangerの式の堤体勾配 θ と補正係数 C_m の関係を示す。

$$M = C \cdot W_0 \cdot H \quad (1)$$

$$C = \frac{C_m}{2} \left[\frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \right) + \sqrt{\frac{h}{H} \left(2 - \frac{h}{H} \right)} \right] \quad (2)$$

$$C_m = 0.773 - 0.005752 \cdot \theta - 0.000026 \cdot \theta^2 \quad (3)$$

ここで、 M ：単位面積当たりの付加質量、 C ：圧力係数、 W_0 ：貯水の単位体積重量、 H ：貯水池水面から基礎地盤までの水深、 h ：貯水池水面から動水圧が作用する点までの水深、 C_m ：堤体上流面勾配を考慮した補正係数、 θ ：堤体上流面勾配である。

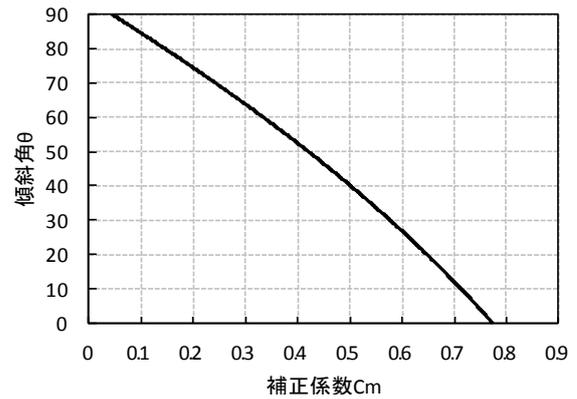


図-5 補正係数 C_m と傾斜角 θ の関係

3. 固有値解析

(1) 高水位時の固有値解析結果

貯水条件を高水位（貯水位100m）として、各モデルに対して固有値解析を実施した。各モデルの低次4次の振動モード形状を図-6, 7, 8に、固有振動数、各方向（上下流方向、左右岸方向）の刺激係数および振動の特徴を表-2, 3, 4に示す。図-6より非対称モデルは堤体の非対称性の影響を受け、固有振動モードの形状がやや不規則になっているものの、基本的には堤体中央断面を対称軸として、対称モードまたは逆対称モードがあらわれていることが分かる。図-7, 8より右対称モデルおよび左対称モデルでは堤体中央断面を対称軸として明瞭に対称モードまたは逆対称モードがあらわれていることが確認された。表-2, 3, 4より、逆対称モードにおける上下流方向の刺激係数、および対称モードにおける左右岸方向の刺激係数を各モデルで比較すると、非対称モデルに比べ右対称モデルおよび左対称モデルの場合ではゼロを示している。したがって、地震時において非対称モデルは振動方向のモードが励起されるだけでなく、振動方向に対して直交する方向のモードも励起されることが推測される。また、表-2, 3, 4より非対称モデルと左対称モデルは上下流モードがより低次に出現しているのに対して、右対称モデルは左右岸モードがより低次に出現しており、解析モデルの差異によって出現する振動モードに入れ替わりが生じていることが確認できた。

(2) 貯水位が固有振動数に及ぼす影響

貯水条件を空虚時（貯水位0m）から100mまで10m刻みで11ケースの固有値解析を実施した。また、鉛直ジョイント部の剥離・滑動挙動が振動特性に及ぼす影響を検討するため、剥離・滑動を考慮しない場合の解析結果と剥離・滑動を考慮した場合の解析結果を比較した。剥離・滑動を考慮する際には、状態変化を生じた要素に対して、健全時の $1/1000000$ の値を用いて解析を実施した。図-9には各貯水位に対する各モデルの1次固有振動数を示している。貯水

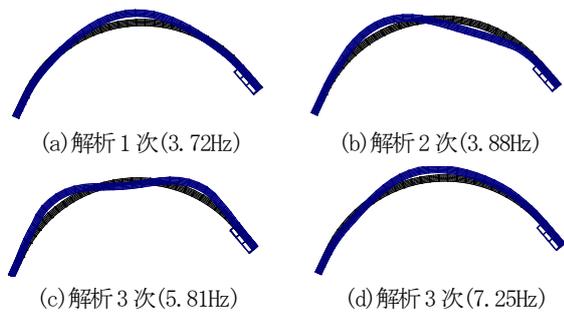


図-6 高水位時の非対称モデルの振動モード

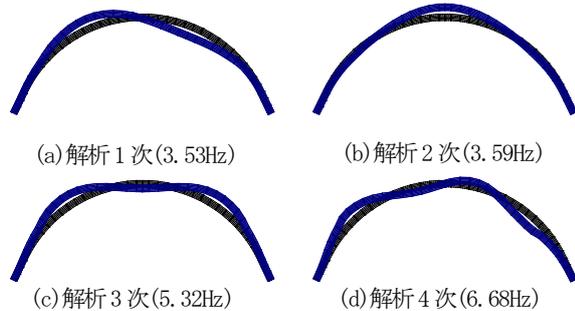


図-7 高水位時の右対称モデルの振動モード

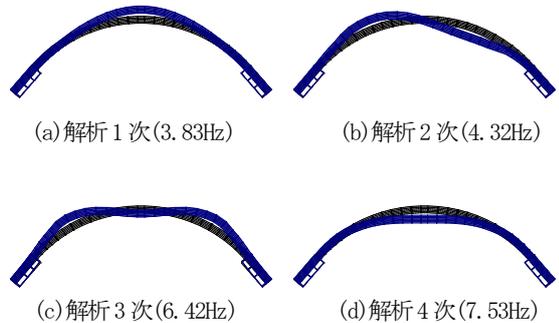


図-8 高水位時の左対称モデルの振動モード

位が概ね80m以上の範囲では、堤体全体が一体構造として挙動し、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、いずれの解析結果とも、固有振動数の増加が認められる。しかし、貯水位が低下するに従い、剥離・滑動を考慮しない場合の解析では一定値に収束する傾向が確認できるのに対して、剥離・滑動を考慮した場合の解析では、貯水位80mから40mの範囲で鉛直ジョイント部が剥離や滑動を生じることにより堤体の全体剛性が低下し、固有振動数が減少することが推測できる。さらに貯水位が低下すると、堤体の全体剛性の低下と付加質量の減少が重畳し、固有振動数はほとんど変化しなくなる傾向が認められる。このような貯水位変動に伴う振動数特性は、実際のアーチダムの常時微動計測を適用した事例⁶⁾でも報告されており、アーチダムの基本的な振動特性における一般的な特徴と考えられる。また、非対称モデル、右対称モデル、左対称モデルの固有振動数に差異が認められるが、これは各モデルの堤体積の差異に起因していると考えられる。線形解析において、貯水位0mの場合の非対称モデルの固有振動数に対する各モデルの固有振動数の比を計算すると、右対

表-2 非対称モデルの固有値解析結果

次数	固有振動数 [Hz]	刺激係数		振動の特徴
		左右岸方向	上下流方向	
1	3.72	-0.16	2.93	上下流1次(対称)
2	3.88	-1.03	-0.15	左右岸1次(逆対称)
3	5.81	-0.07	1.89	上下流2次
4	7.25	0.24	-3.59	上下流3次

表-3 右対称モデルの固有値解析結果

次数	固有振動数 [Hz]	刺激係数		振動の特徴
		左右岸方向	上下流方向	
1	3.53	-1.01	0.00	左右岸1次(逆対称)
2	3.59	0.00	2.98	上下流1次(対称)
3	5.32	0.00	1.96	上下流2次
4	6.68	-1.04	0.00	左右岸2次

表-4 左対称モデルの固有値解析結果

次数	固有振動数 [Hz]	刺激係数		振動の特徴
		左右岸方向	上下流方向	
1	3.83	0.00	2.96	上下流1次(対称)
2	4.32	-0.98	0.00	左右岸1次(逆対称)
3	6.42	0.00	1.98	上下流2次
4	7.53	0.00	4.25	上下流3次

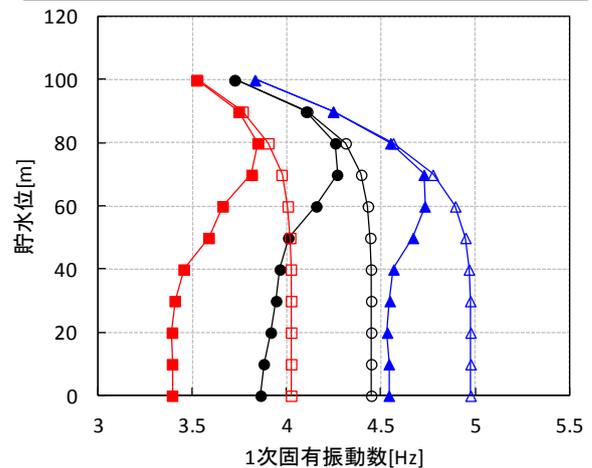
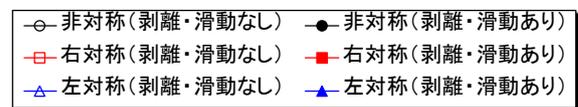


図-9 貯水位と1次固有振動数の関係

称モデルは0.90、左対称モデルは1.12である。一方、非対称モデルの堤体積に対する各モデルの堤体積の比を計算すると、右対称モデルは1.12、左対称モデルは0.93である。一般的に固有振動数は質量に逆比例するという関係から、本解析における各モデルの固有振動数の差異は堤体積の差異に起因していることが推測できる。

4. 常時挙動解析

アーチダムの地震時応答には常時における応力状態の与える影響が大きいことから、地震応答解析の事前検討として常時挙動解析を実施した。

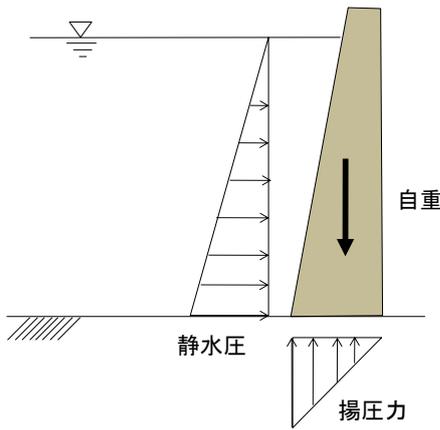


図-10 荷重条件の概略図

(1) 荷重条件

本解析で考慮する作用荷重は、貯水池の静水圧、揚圧力、堤体の自重である。これらは「建設省河川砂防技術基準(案同解説)」⁹⁾に従い設定した。図-10に荷重条件の概略を示す。揚圧力は上下流方向断面内において鉛直上向きの作用力として付加し、堤体上流端で全貯水圧を、堤体下流端でゼロとする三角形分布とした。また、揚圧力係数は1/3として算出した。ここでは、固有値解析の結果を踏まえて、現象の境界値として貯水水位を0m(空虚)、40m(低水位)、80m(中間水位)、100m(高水位)の4ケースで常時挙動解析を実施した。

(2) 非対称モデルの堤体変形

非対称モデルの堤体中央断面の上下流方向変位を図-11に、堤体天端の上下流方向変位を図-12に示す。図-11, 12より、空虚から中間水位の貯水条件では、非線形解析の方が線形解析よりも堤体の上流側への変形がやや大きい結果となった。上流側の変形に伴い、堤体のアーチ作用が低減し、鉛直ジョイント部において剥離や滑動が生じたことが両解析結果に差異をもたらしたと考えられる。一方、高水位時は線形解析結果と非線形解析結果は概ね一致しており、静水圧の作用により、堤体が下流側へ変形し、アーチ推力に寄与するアーチ方向圧縮力が増大したことで、鉛直ジョイント部に剥離や滑動が生じなかったことが推測される。また、空虚から中間水位までは貯水水位の上昇に伴い、堤体の変位は徐々に増加するが、中間水位から高水位では変位が急増し、2次曲線的な変動を示している。これは堤体がV字型であるため貯水水位の増加に伴い静水圧が作用する堤体上流面の面積が急増するのに加え、堤体高位が高くなるに従い、堤体断面厚さが薄くなるのが起因しており、高水位では水位の増加に対してより敏感に挙動することが推測される。

(3) 非対称モデルの堤体応力

空虚時と高水位時の非対称モデルの最大主応力分布を

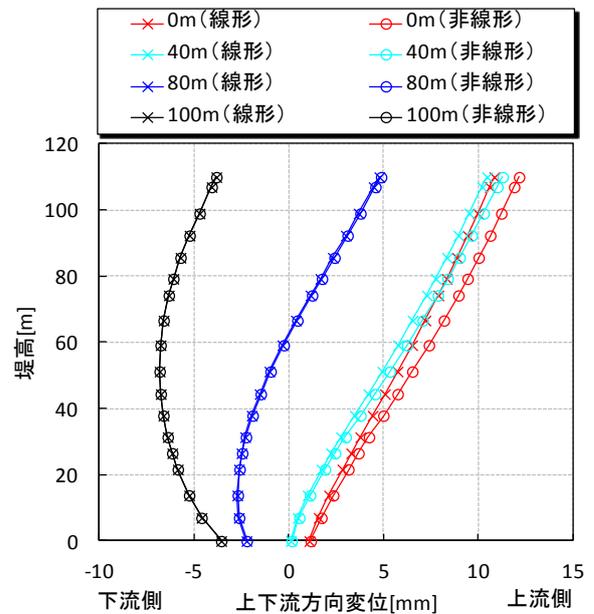


図-11 非対称モデルにおける堤体中央断面の変位

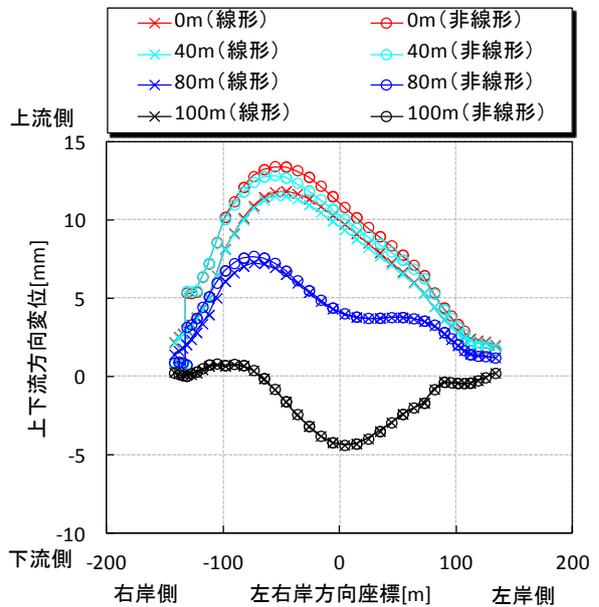


図-12 非対称モデルにおける堤体天端の変位

線形解析と非線形解析で比較検討する。空虚時および高水位時における最大主応力分布図を図-13に示す。既往の研究⁷⁾によるとダムコンクリートの圧縮強度は約30MPa、引張強度は3~5MPaとされており、今回の常時挙動解析条件下においては圧縮応力および引張応力ともに許容値より小さい結果となった。

図-13より、空虚時は線形解析と非線形解析で応力分布に差異が認められる。前述したように、空虚時は堤体が上流側へ変形することにより、アーチ方向圧縮力が低減し、鉛直ジョイント部において剥離や滑動が生じることが推測できる。線形解析では、鉛直ジョイント部の非線形挙動を考慮していないため、堤体が一体となって変形し、図

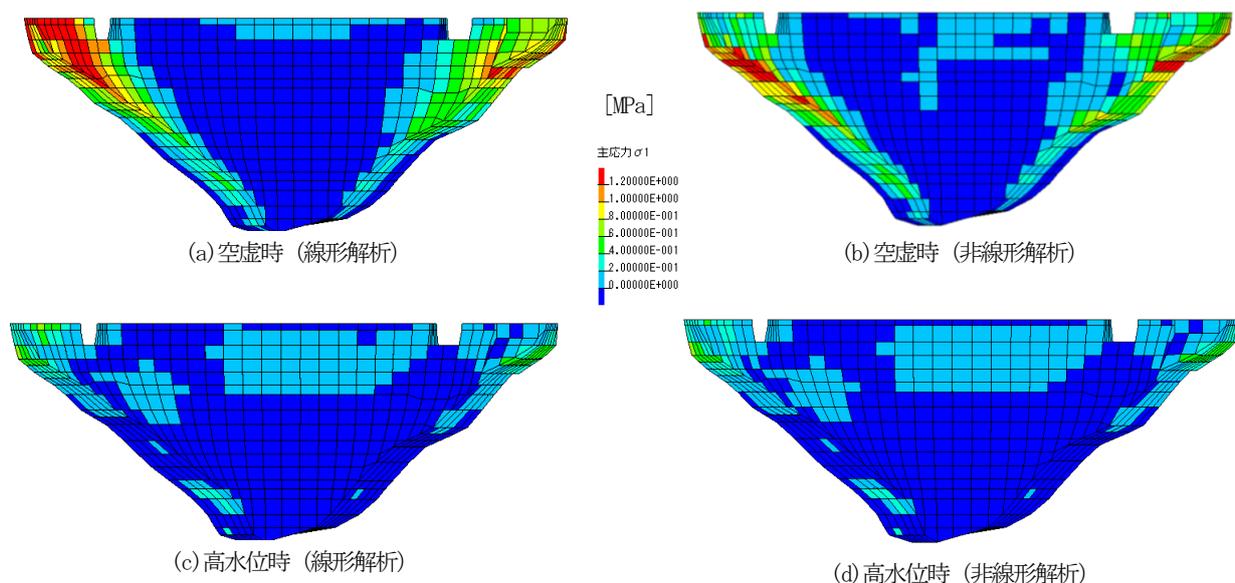


図-13 非対称モデルの最大主応力分布図

図-13(a)のように右岸側堤体天端にやや大きな引張応力が生じている。図-13(b)より非線形解析では、線形解析で強い引張応力が発生した部分において鉛直ジョイント部が剥離または滑動し、水平アーチ方向の引張応力が解放され、鉛直片持ち梁的な曲げ変形に伴う引張応力が岩着部付近で生じたと考えられる。高水位時は、両解析結果が概ね一致しており、貯水位の増加に伴う静水圧の影響によりアーチ推力に寄与するアーチ方向圧縮力が発生し、鉛直ジョイント部において剥離や滑動が生じなかったことが推測できる。前述した貯水位変動に伴うダム堤体の変形特性と併せると、貯水の存在がアーチダムの安定性に対し有利に作用していることが確認された。既往の研究⁸⁾によって本解析で用いている解析モデルのように堤体下流面にオーバーハングがない、あるいは小さいアーチダムでは空虚時にダム堤体の安定性に重大な影響を及ぼす可能性があることが指摘されており、現行の耐震設計法では堤体下流面にオーバーハングを設けることが義務付けられている。

(4) 対称モデルと非対称モデルの比較

ここではダム堤体の左右対称性および非対称性が常時挙動に及ぼす影響について検討する。解析結果の一例として、空虚時に各モデルに対して線形常時挙動解析を実施した場合の最大主応力分布図を図-14に示す。図-14より、非対称モデルの右岸側の応力分布図は右対称モデルの応力分布と概ね一致しており、非対称モデルの左岸側の応力分布図も左対称モデルの応力分布と概ね一致していることが確認できる。この解析ケースに限らず、他の解析ケースにおいても同様の結果が得られている。したがって、堤体の非対称的な形状特性が常時挙動に対して及ぼす影響は小さいことが確認された。

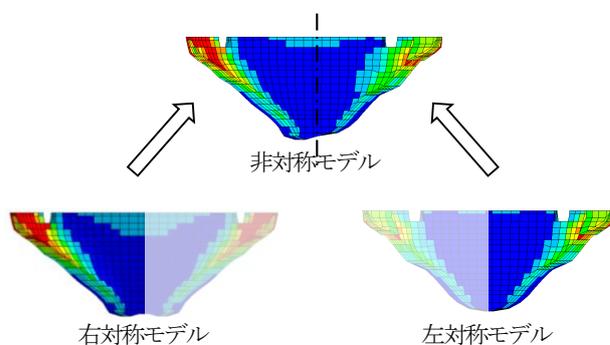


図-14 対称モデルと非対称モデルの比較

5. 結論

本検討では、鉛直ジョイント部の剥離・滑動挙動を考慮した非線形解析を実施した。さらに、アーチダムの形状に着目し、実在するアーチダムから作成した三次元有限要素解析モデルを非対称モデルと位置づけた。非対称モデルをもとに左右対称的な堤体を有する解析モデルを2ケース構築し、計3ケースの解析モデルに対して、固有値解析および常時挙動解析を実施した。その結果、それぞれの解析モデルの振動特性および常時挙動について検討した。以下に得られた主な結論を示す。

- (1) 地震時において、非対称モデルは振動方向のモードが励起されるだけではなく、振動方向に直交する方向のモードも励起されることが推測される。
- (2) アーチダムの固有振動数と貯水位の関係性を把握した。高水位では、貯水位が低下するに従い付加質量効果が支配的となり、固有振動数は増加する。しかし、ある貯水位以下になると、付加質量効果よりも鉛直ジョイント部の剥離・滑動に伴う堤体の全体剛性低下の影響が優位となり、固有振動数は低減する。さらに貯水位が低下すると概ね一定の固有振動数に収束する。

- (3) 常時挙動解析により、空虚時には堤体が全体的に上流側へ変形し、アーチ作用が低減することで鉛直ジョイント部において剥離や滑動が認められた。一方、高水位時は貯水池の静水圧増加に伴い、下流側へ堤体に変形し、アーチ推力に寄与するアーチ方向圧縮力を増大させ、鉛直ジョイント部で剥離・滑動が生じることなく一体構造として応答した。このことから、貯水の存在はアーチダムの安定性に有利に作用したことが確認された。
- (4) 常時挙動解析によって対称モデルおよび非対称モデルの最大主応力分布の比較を行った。解析結果より、非対称モデルの左右の応力分布は対称モデルの応力分布と概ね一致することが確認され、常時挙動に関して堤体の左右対称性が及ぼす影響は小さいことが示唆された。

参考文献

- 1) 豊田幸宏, 上田稔: 現場計測データに基づくアーチダム-岩盤-貯水系の3次元時刻歴応答解析法の適用性検討, 電力中央研究所報告(U00025), 2000. 12
- 2) 日本大ダム会議: ダム設計基準(第2次改訂), 1978. 8
- 3) 西内達雄, 松井淳, 大熊信之: 三次元非線形有限要素解析を用いたアーチダム耐荷機構の解明, 電力中央研究所報告(N09018), 2010. 5
- 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.4 672-688, 2006.10
- 5) 建設省, 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説, 1985. 10
- 6) Nobuyuki Okuma, Yoshitake Etou, Kenji Kanazawa and Kazuta Hirata: DYNAMIC PROPERTIES OF A LARGE ARCH DAM AFTER FORTY-FOUR YEARS OF COMPLETION, World Conference on Earthquake Engineering, 2008. 12
- 7) 畑野正: コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論, 土木学会論文集(No. 153), 1968. 5
- 8) 渡辺哲行, 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, ダム工学会, Vol. 9, No. 2, 1999. 6

EFFECTS OF ARCH DAMS CONSIDERING NONLINEAR BEHAVIOR OF TRANSVERSE JOINTS ON STRESS DISTRIBUTION AND DYNAMIC PROPERTIES

Taiji MAZDA, Nobuyuki OKUMA and Yohei ENDO

Thin structures of the arch dams are influenced by the interaction of foundational rock and reservoir. In this research, transverse joints have been confirmed to open and slip. In each dam site, a dam body shape has wide variety shape, however the has that dam body shape effect on static behavior has not been clarified. In this paper, an analytical model considering the nonlinear characteristics of the transverse joints is built, and a symmetric and asymmetric model is modeled as the three dimensional models which have a dam body - foundational rock - reservoir system. In order to find out a vibration characteristics and resistance mechanism, each model is analyzed by the eigenvalue analysis and static behavior analysis.