

# アーチダムの固有モード抽出と地震時の境界条件に関する検討

松田泰治<sup>1</sup>・大熊信之<sup>2</sup>・秋永裕貴<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻教授  
(〒860-0855 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番地1号)

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

<sup>2</sup>正会員 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

<sup>3</sup>学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻  
(〒860-0855 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番地1号)

E-mail:125d8802@st.kumamoto-u.ac.jp

コンクリートアーチダムの中には、建設後50年近く経過するものも多く、大規模地震時の安定性への社会的関心の高まりもあり、より合理的な耐震性能照査が必要となっている。アーチダムの耐震性能照査に於いては基礎岩盤を考慮したモデル化が行われるが、基礎岩盤の質量を考慮すると堤体の振動モードの抽出が困難になることが指摘されている。また、アーチダムのように半無限的に広がる基礎岩盤の上に建設される土木構造物の地震応答解析を行う際には、解析領域と自由地盤との間の境界条件を適切に設定しなければならない。以上より、本研究では、固有値解析を実施する際の岩盤質量の与え方に関する検討と地震応答解析を行う際に実現象を精度よく再現するための境界条件の与え方について検討を行った。

**Key Words :** arch dam, natural frequency, vibration mode, boundary condition

## 1. はじめに

現在、わが国のコンクリートアーチダムの耐震設計は、「河川管理施設等構造令」<sup>1)</sup>や「第2次改訂ダム設計基準」<sup>2)</sup>に基づき、ダムの自重に地域ごとに定められた一定の設計震度を乗じて算定される慣性力等を水平地震力として考慮する震度法により行われている。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<sup>3)</sup>。

基礎岩盤を考慮したアーチダムの固有値解析を実施する際には、基礎岩盤の質量を考慮すると堤体の振動モードを抽出できないことが指摘されている<sup>4)</sup>。対象としている構造物であるアーチダム堤体の体積に対して、基礎岩盤の占める体積が著しく大きく、さらに剛性お

よび単位体積重量に関して堤体と岩盤との間に大きな差がないような場合には、堤体の振動モードが岩盤の振動モードに埋没してしまうため、着目している堤体の振動モードを抽出するのは困難である。そのため、岩盤質量をゼロと仮定して固有値解析が行われている。本研究では、岩盤質量ゼロと岩盤質量考慮の2ケースを用いて固有値解析を行い、それぞれのケースでの堤体の振動モードを比較した。このことより、堤体の振動モードを抽出するために、岩盤質量をゼロと仮定して固有値解析を実施することの妥当性について検討を行った。

また、本研究では基礎岩盤を含む解析モデルを構築している。このとき、有限要素法を用いて岩盤等の広範な広がりを持つ系を解析の対象とする場合には、解析上の制約により、ある有限な領域でモデルを構築しなければならない。このことによって、構造物の振動あるいは地盤の不規則構造によって生じる散乱波のエネルギーはそのモデル内に閉じ込められてしまう<sup>5)</sup>。そのため、この人為的に設けられた仮想境界で波動エネルギーを吸収するような境界条件の設定が必要となる。そこで、本研究では、複数の境界条件を設定して地震

応答解析を行い、適切な境界条件について検討を行った。

## 2. 解析モデル

### (1) 解析モデル概要

本研究では、実在する円筒形コンクリートダムを対象として精緻に作成した解析モデルを用いた。解析モデルを図-1に示す。解析モデルは、ダム堤体ー基礎岩盤連成系の三次元モデルである。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。堤体コンクリート並びに基礎岩盤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間を2分割、厚さ方向に均等5分割している。ダム堤体の堤高・堤頂長はそれぞれ110m、341mである。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に解析に用いた物性値を示す。これらの物性値は実ダム設計値を参考にして設定した。

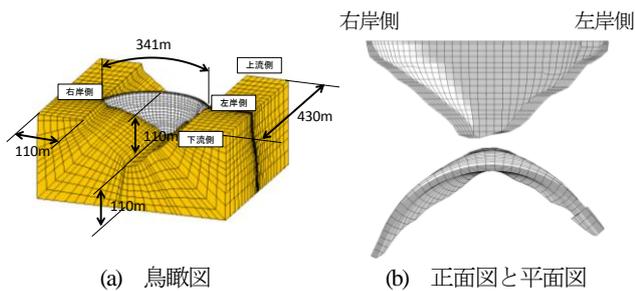


図-1 解析モデル

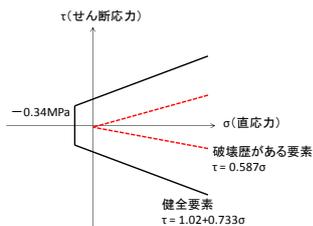
表-1 解析に用いた物性値

	弾性係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	単位体積重量 [kNm <sup>3</sup> ]
堤体コンクリート	44100	0.167	23.95
鉛直ジョイント	8830	—	23.95
岩盤	19600	0.200	25.50*
ゲート部	441	0.167	2.40

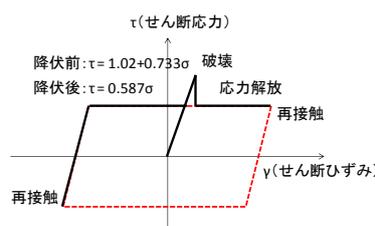
\*固有値解析における岩盤質量については3章を参照

### (2) 岩盤部の解析領域および要素分割

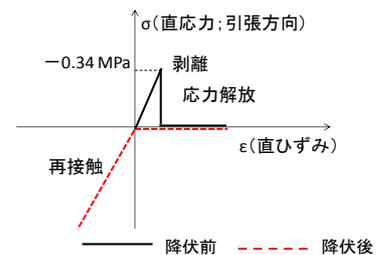
基礎岩盤の解析領域の広さは、既往の検討によりほ



(a) 剥離と滑動特性の判定基準



(b) 剥離方向の応力ーひずみ関係  
図-2 鉛直ジョイントの非線形特性



(c) 滑動方向の応力ーひずみ関係

ぼダム堤高に相当する領域を考慮し、かつ適切な境界条件を設定すれば有限に解析領域を切り取ることへの影響は小さくなるという知見が得られている<sup>4)</sup>。本解析モデルは、図-1のように堤体底部から下方に110m、堤体天端岩着部から左右岸方向に110mおよび上下流方向に430mの領域を解析モデルとして考慮した。

地震応答解析に用いる有限要素分割は、一般に式(1)を目安に定めることが多い。地震応答解析では15~20Hzの周波数を適切に評価する必要があるため、本解析モデルは、堤体要素および岩盤要素が式(1)を満足するように分割している。また、岩盤部の要素分割に関しては、堤体挙動に着目するという考えから、堤体から遠ざかるに従い要素サイズが大きくなるように設定している。なお、図-1に示すように岩盤の隅角部の要素サイズがやや大きくなっているが、岩盤部をダムの岩着部沿いに丸くとしたモデルとの応答比較を行った既往の検討<sup>4)</sup>によると、隅角部の影響はほとんどないことが確認されている。

$$h \leq \frac{V_s}{5 \cdot f_{max}} \quad (1)$$

ここで、 $h$ ：要素サイズ[m]、 $V_s$ ：せん断波速度[m/s]、 $f_{max}$ ：解析で考慮する上限周波数[Hz]である。

### (3) 鉛直ジョイント

ダムコンクリートはある程度以下の大きさのブロックに分けて打設され、コンクリートブロック間にグラウトを注入し、ダム堤体の一体化が図られている。このコンクリートブロックとの横継目を鉛直ジョイントと呼ぶ。

この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<sup>6)</sup>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。剥離・滑動の判定基準を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、引張応力をゼロとした。

#### (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、動水圧が作用する。本研究では、動水圧による影響を考慮するために、堤体上流面に質量を付加し、その質量に作用する慣性力をもって近似的に考慮した。付加質量の算定式(式(2), (3), (4))は「建設省河川防砂技術基準(案)同解説」<sup>7)</sup>に従い、堤体上流面勾配の影響を考慮できるZangarの式を採用した。付加質量は上下流方向のみに与えた。図-3にZangarの式の堤体勾配 $\theta$ と補正係数 $C_m$ の関係を示す。

$$M = C \cdot W_0 \cdot H \quad (2)$$

$$C = \frac{C_m}{2} \left[ \frac{h}{H} \left( 2 - \frac{h}{H} \right) + \sqrt{\frac{h}{H} \left( 2 - \frac{h}{H} \right)} \right] \quad (3)$$

$$C_m = 0.733 - 0.005752 \cdot \theta - 0.000026 \cdot \theta^2 \quad (4)$$

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岩盤までの水深、 $h$ ：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、 $\theta$ ：ダム上流面の鉛直に対する傾斜角である。

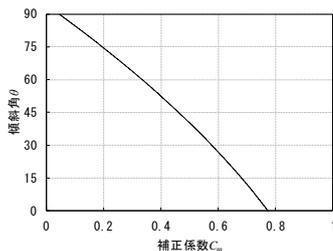


図-3 補正係数と傾斜角の関係

### 3. 固有値解析時の岩盤質量の検討

#### (1) 解析概要

図-1に示すような基礎岩盤を考慮した解析モデルにおいて固有値解析を行う際、基礎岩盤の質量を考慮すると堤体の振動モードが岩盤の振動モードに埋没してしまい、堤体の振動モードを抽出することは困難である。本研究では、岩盤質量をゼロと仮定した「岩盤質量ゼロ」と表-1に示す岩盤質量を考慮する「岩盤質量考慮」の2つのケースについて固有値解析を実施した。水位はそれぞれ満水位時(107m)、中間水位時(50m)、空虚時(0m)の3つの水位について検討している。その結果から、3つの水位について「岩盤質量ゼロ」の振動モードが「岩盤質量考慮」の振動モードが埋没していることを確認し、岩盤質量をゼロと仮定することの妥当性について

検討を行った。

また、このとき、事前に常時挙動解析を行い、鉛直ジョイント部において剥離・滑動が確認された箇所については、剛性を健全時の剛性の1/10<sup>6</sup>としている。境界条件は、境界面の自由度を全て固定としている。

#### (2) 固有値解析結果

図-4(a)には、満水位時(107m)における「岩盤質量ゼロ」での低次5次の振動モードおよび固有振動数を示す。図-4(b)には、「岩盤質量ゼロ」の固有振動数と同程度の振動数での「岩盤質量考慮」の振動モードと固有振動数を示す。図-5、6では、中間水位時(50m)および空虚時(0m)のときの固有モードと固有振動数を図-4と同様に示す。図-4、5、6より、全ての水位において「岩盤質量考慮」では、「岩盤質量ゼロ」の固有振動数と同程度の固有振動数において、「岩盤質量ゼロ」の振動モードと同様の振動モードが現れていることが確認される。

このことより、「岩盤質量ゼロ」の振動モードが、「岩盤質量考慮」の振動モードの中に埋没してしまっていることが確認される。したがって、本研究のように基礎岩盤を含んだ解析モデルを用いる場合、堤体の振動モードの抽出に対して、固有値解析において岩盤質量をゼロと仮定して抽出を行うことの必要性が確認された。

また、一般に水位の上昇に伴い、固有振動数が低下することが確認されている。図-4、5、6より各水位での「岩盤質量ゼロ」の固有振動数を比較する。すると、概ね水位が上昇すると固有振動数が低下することが確認できる。このことより、岩盤質量をゼロと仮定した固有値解析が正しく行われていることが確認される。

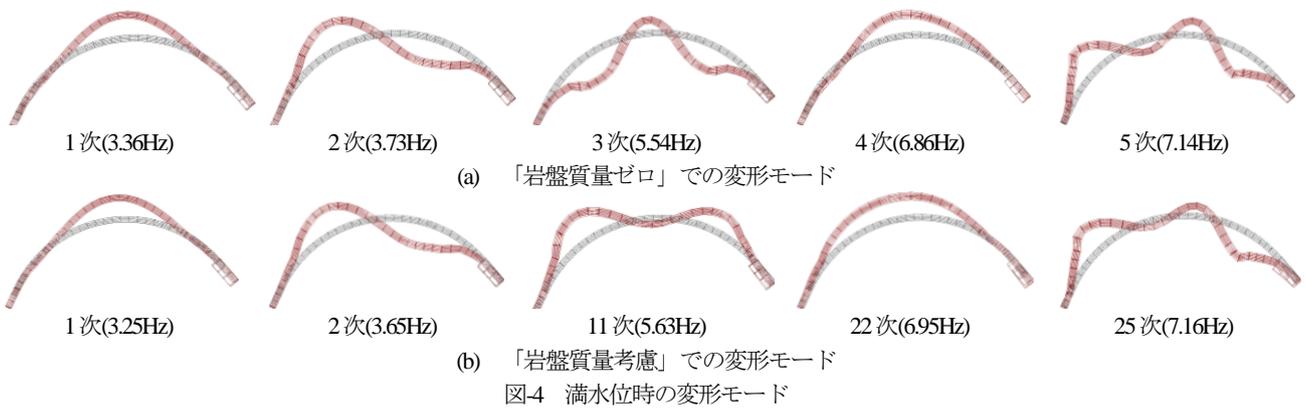


図4 満水位時の変形モード

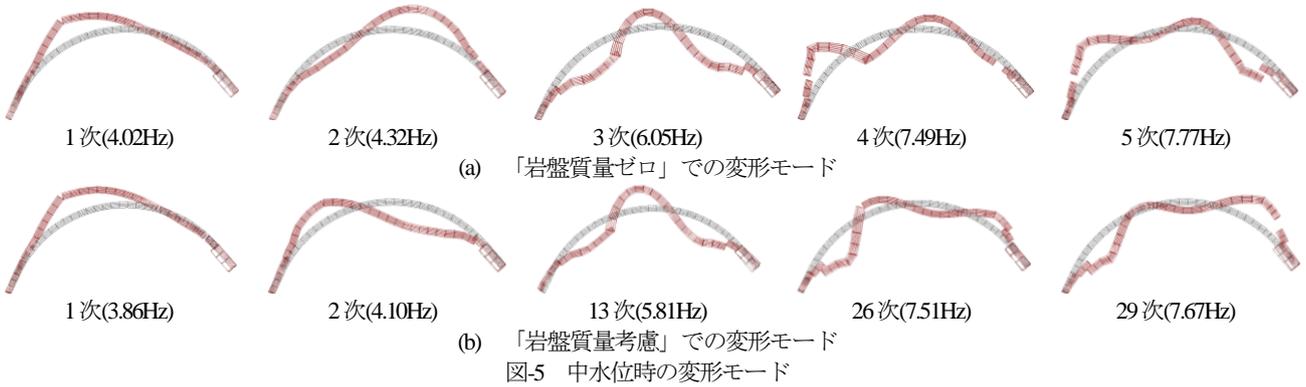


図5 中水位時の変形モード

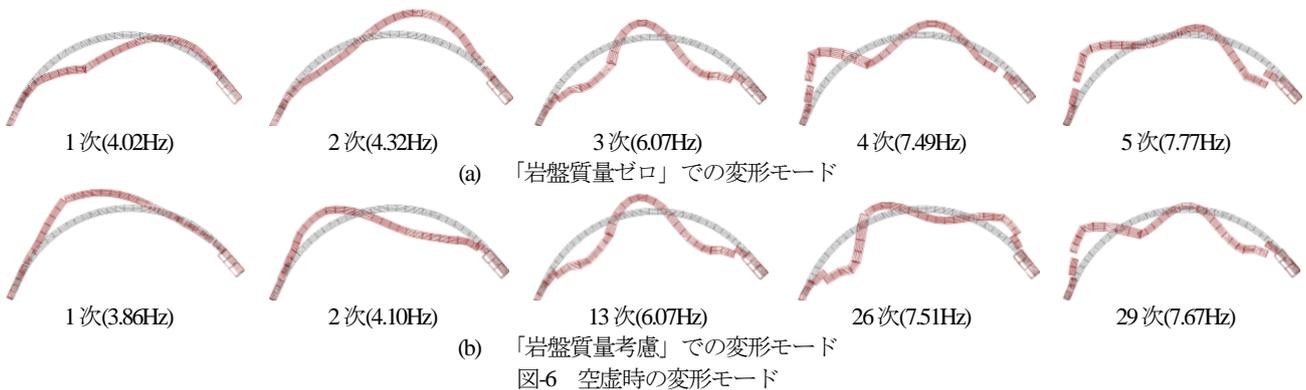


図6 空虚時の変形モード

#### 4. 地震応答解析時の境界条件の検討

##### (1) 解析概要

地震応答解析を行うあたり、解析モデルの側方境界および底面境界の境界条件を適切に定める必要がある。本研究では、境界条件は固定境界、自由境界および粘性境界を考える。本研究において、地震応答解析を行う際の適切な適切な境界条件について検討を行うために、表-2に示す4ケースの境界条件のもと地震応答解析を実施した。解析方法はNewmark  $\beta$ 法( $\beta=0.25$ )による直接積分法を適用し、積分時間は0.01秒とした。地震動の入力方向は上下流方向の一様入力である。減衰行列は、レーリー減衰で定義した。第1基準振動数を上下流1次モードの固有振動数に、第2次基準振動数を30Hzとし、対

応する減衰行列はそれぞれ2%とした。

表-2 検討を行った境界条件

	底面境界	側方境界
case1	固定境界	自由境界
case2	固定境界	固定境界
case3	粘性境界	自由境界
case4	粘性境界	固定境界

##### (2) 境界条件の詳細

###### a) 粘性境界

粘性境界では、対象とする境界面の各節点に対して、3方向のダッシュポットを設けることで模擬するものとする。その概略を図-7に示す。境界面に垂直な方向には1方向、境界面と並行な方向には2方向のダッシュポット

を設ける。また、各節点に働く減衰力は式(5)で定義される。式(5)における粘性境界は、そのダッシュポットの境界面に対する向きにより異なる。境界面に対して垂直な方向のダッシュポットでの粘性係数と境界面に対して平行な方向のダッシュポットでの粘性係数をそれぞれ、式(6)、式(7)に示す。式(6)、式(7)における各節点の負担面積は図-14で色分けされた通りとなる。式(8)はP波速度、式(9)はS波速度を示したものである。

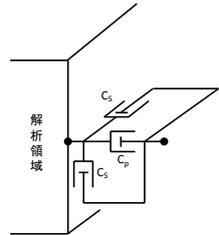


図-7 粘性境界の概略図

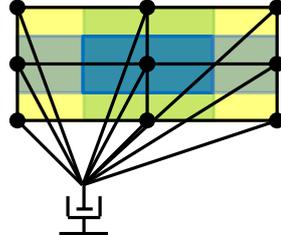


図-8 各節点の負担面積

$$F = C \cdot \dot{y} \quad (5)$$

$$C_p = A\rho V_p \quad (6)$$

$$C_s = A\rho V_s \quad (7)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (8)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

ここで、 $F$ ：減衰力、 $\dot{y}$ ：相対速度、 $C_s$ ：せん断方向粘性係数、 $C_p$ ：縦方向粘性係数、 $A$ ：各節点の負担面積、 $\rho$ ：単位体積質量、 $V_p$ ：P波速度、 $V_s$ ：S波速度、 $E$ ：ヤング率、 $\nu$ ：ポアソン比、 $G$ ：せん断弾性係数である。

### b) 固定境界および自由境界

固定境界では、対象とする境界面の各節点の回転運動に加えて、並進運動の全ての自由度を拘束としている。

自由境界では、対象とする境界面の各節点の回転運動の自由度を全て拘束し、並進運動の自由度を全て自由としている。

### (3) 入力地震動

1995年の兵庫県南部地震を契機に、国土交通省河川局は、「大規模地震動に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」<sup>8)</sup>を策定し、現在直轄ダムにおいて試行運用が実施されつつある。同指針は、土木学会の耐震基準に関する3次にわたる提言を踏襲しており、レベル2地震動の設定について記述されている。レベル2地震動は、「当該地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の地震動」と定義されており、ダム地点における過去の地震や周辺の活断層およびプレート

境界などの情報を調査し、当該ダムに対して最も大きな影響を及ぼす可能性のある地震を「想定地震」として選定することが記載されている。既往の研究<sup>9)</sup>において解析モデル作成の際に参考としたダムサイトを対象としたレベル2地震動が検討されている。本研究では、このレベル2地震動を用いて地震応答解析を行う。

このレベル2地震動は地表面での加速度波形であるため、既にダムと基礎岩盤の動的相互作用の影響が含まれていると考えられる。したがって、そのまま解析モデルの下方基盤から、入力地震動として用いた場合は、ダムや基礎岩盤等の動的相互作用の二重に作用することが懸念される<sup>3)</sup>。そのため、地表面での地震動を解析モデルの下方基盤まで引き戻した地震動を入力する必要がある。地震動の引き戻しのイメージを図-9に示す。地震動の引き戻しには、重複反射理論に基づく一次元地震応答解析プログラムSHAKEを、解析モデルの底面境界の境界条件に応じて用いた。解析モデル底面が固定境界では観測波(E+F)、粘性境界では入力波(2E)をそれぞれ入力地震動とした。図-10には既往の研究で検討された地表面での地震動の加速度波形とフーリエスペクトルを示す。図-11には固定境界への入力地震動、図-12には粘性境界への入力地震動を示す。本研究では、地震動の入力方向は上下流方向とし、上流側を正方向としている。

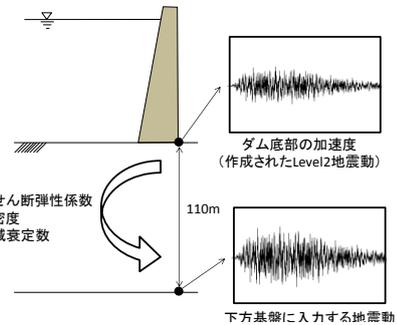


図-9 地震動の引き戻しのイメージ

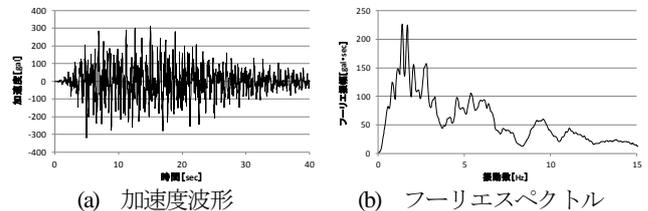


図-10 地表面での地震動

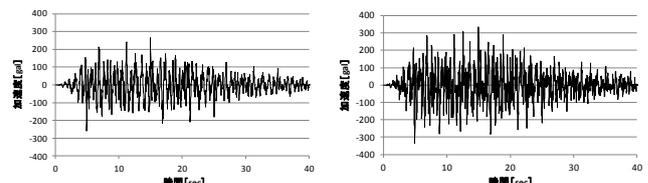


図-11 固定境界への入力地震動

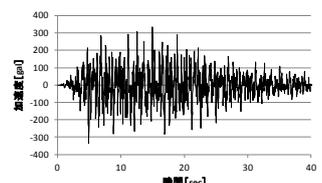


図-12 粘性境界への入力地震動

#### (4) 堤体底部における地震時応答

本研究では、前節に示したように地表面の地震動に対して、重複反射理論に基づく一次元地震応答プログラムを用いて引き戻しを行い、解析モデル底面への入力地震動を導出した。地震応答解析を行うにあたり、入力地震動によりダム底部の応答が解析の過程において再現されている必要がある。したがって、図-10に示した地表面の地震動の加速度波形とフーリエスペクトルとダム底部の加速度応答とそのフーリエスペクトルを比較することで、地表面の地震動をダム底部において最も再現できているケースを本研究のうちで適切な境界条件とする。本研究で用いた解析モデルは、基礎岩盤の上に肉薄のダム堤体に乗っているような構造であり、堤体積に対して基礎岩盤の体積が著しく大きくなっている。そのため、地震動の伝達についてはダム堤体よりも基礎岩盤の影響が支配的となり、このような検討が可能だと考えられる。

図-13に、地表面での地震動と各ケースにおけるダム底部での上下流方向加速度応答の比較を示す。地表面での地震動の上流側最大加速度は313galであり、各ケースでのダム底部での上流側最大加速度応答は、case1~4でそれぞれ581gal, 744gal, 269gal, 778galとなっている。また、地表面での地震動の下流側最大加速度は320galであり、各ケースでのダム底部での下流側最大加速度応答は、case1~4でそれぞれ596gal, 751gal, 221gal, 834galである。図-13より、case1, case2, case4では地表面での地震動に対して、ダム底部での加速度応答が著しく大きくなっている。一方、case3でのダム底部の加速度応

答では上流側、下流側ともに地表面での地震動との誤差が本研究で検討した4ケースの内では最も小さくなっている。

また、図-14には、地表面での地震動と各ケースにおけるダム底部での上下流方向加速度応答のフーリエスペクトルにおける比較を示す。ここで、フーリエスペクトルは全てHanningウインドウによる平滑化を10回行っている。case1では、地表面の地震動のフーリエ振幅に対して、case1のフーリエ振幅が著しく大きくなっている。また、case2ではcase1と同様に地表面での地震動に比べフーリエ振幅が著しく大きくなっていることに加え、卓越振動数が講振動数域へ推移していることも確認される。case3についても同様に、地表面の地震動とは、フーリエ振幅、卓越振動数において大きな差異が確認される。その一方、case3では、6Hz付近でのフーリエ振幅に差異が見られるものの、概ね地表面での地震動のフーリエスペクトルをダム底部の加速度応答のフーリエスペクトルにおいて再現できていると考えられる。

以上のように、ダム底部の加速度応答およびそのフーリエスペクトルより検討を行った。その結果、ダム底部の加速度応答およびフーリエスペクトルのどちらの検討においても、本研究で検討した4ケースの境界条件の内では、底面境界を粘性境界、側方境界を自由境界とするcase3が最も地表面の地震動をダム底部において再現できていると考えられる。

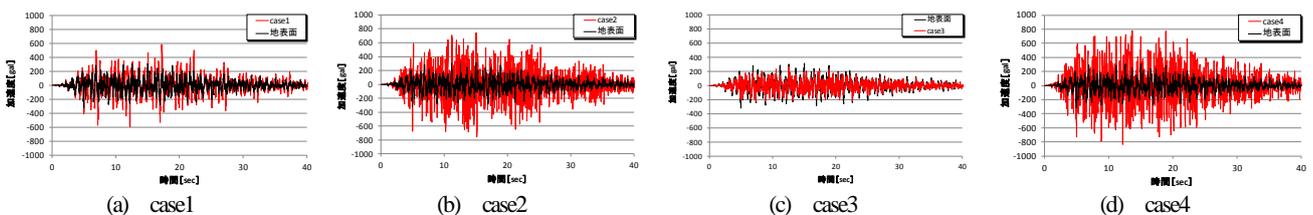


図-13 地表面での地震動と堤体底部での上下流方向加速度応答の比較

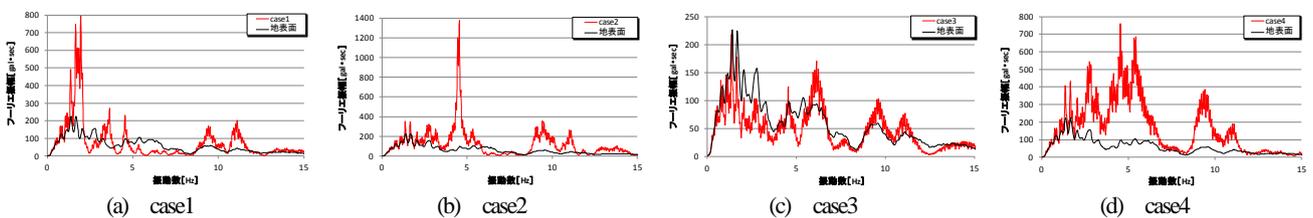


図-14 地表面での地震動と堤体底部での上下流方向加速度応答のフーリエスペクトルにおける比較

#### (4) 堤体天端中央部における地震時応答

表-15には、各ケースでの堤体天端での上下流方向加速度応答のフーリエスペクトルを示す。ここで、フーリエスペクトルは全てHanningウインドウによる平滑化

を10回行っている。いずれのケースにおいても3章において検討を行った満水位時の1次固有振動数である3.36Hz付近で卓越する箇所が見られる。

また、底面境界を固定境界で共通であるが、側方境

界の境界条件の異なるcase1およびcase2では、複数の振動数のみが著しく卓越している。しかし、底面境界は粘性境界で共通であるが、側方境界の境界条件の異なるcase3およびcase4では、より多くの振動数での卓越が

見られる。このことから、底面境界の境界条件の違いにより、堤体天端での応答の周波数特性に影響が出ることが考えられる。

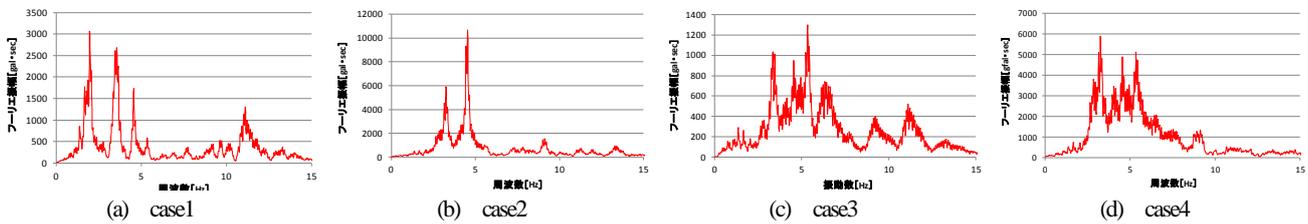


図-15 堤体天端中央部での上下流方向加速度応答のフーリエスペクトル

## 5. 結論

本研究では、基礎岩盤を含む解析モデルを用いて固有値解析際の岩盤質量の与え方について検討を行うために、「岩盤質量ゼロ」と「岩盤質量考慮」の2ケースで固有値解析を実施した。また、地震応答解析時の境界条件の検討を行うために、本研究では異なる4ケースのもとで地震応答解析を行い、この4ケースのうち、地表面での地震動がダム底部において最も再現される境界条件について検討を行った。以下に、得られた主な結論を示す。

- (1) 固有値解析結果より、「岩盤質量ゼロ」の振動モードが「岩盤質量考慮」の振動モードの中に埋没してしまっていることが確認された。したがって、基礎岩盤を含む解析モデルを用いた固有値解析において、堤体の振動モードのみを抽出するためには、岩盤質量をゼロと仮定して評価することの有効性が確認された。
- (2) 地震応答解析結果より、地表面での地震動と各境界条件での堤体底部の応答を加速度波形とフーリエスペクトルについて比較した。その結果、本研究で検討した4ケースの境界条件内では、底面境界を粘性境界、側面境界を自由境界とする境界条

件が地表面での地震動をダム底部において最も再現できていると考えられる。

## 参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：解説・河川管理施設等構造令 改正版，日本河川協会，2000.1.
- 2) 社団法人日本ダム会議：第2次改訂 ダム設計基準，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(N09018)，2010.5.
- 4) 上田稔，奥田宏明，塩尻弘雄，田村重四郎：アーチダムの起振実験シミュレーション，土木学会論文集，No.501，I-29，pp.203-212，1994.10p
- 5) 三浦房紀，沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法，土木学会論文集，No.404/I-11，pp.395-401，1989.4.
- 6) 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.
- 7) 建設省河川局：建設省河川局砂防技術基準（案）同解説 設計編[I]，1985.10.
- 8) 国土交通省河川局：大規模地震動に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説，2005.3.
- 9) 芝良昭，中島正人：断層モデルを用いた手法による既設アーチダムの耐震性能照査用レベル2地震動の評価，電力中央研究所報告(N08041)，2009.7.

## Examination for extract vibration modes of arch dam and boundary conditions at the time of earthquake

Taiji MATSUDA, Nobuyuki OKUMA and Hiroki AKINAGA

Many concrete arch dams passed nearly 50 years after construction. Because of growing public concern with stability at the time of a large earthquake, it is necessary to more rational seismic performance verification. Although model considering the bedrock is made in seismic performance verification, what it becomes difficult to extract vibration modes of the dam body in

case of considering the mass of the bedrock has been pointed out. And when carrying out seismic response analysis of civil engineering structures built on bedrock spreading in semi-infinite like arch dam, I must set the appropriate boundary conditions between analysis domain and free field. From the above, in this study, I have examined how to give the mass of rock when carrying out eigenvalue analysis and how to give boundary conditions to reproduce the actual phenomenon accurately when carrying out seismic response analysis.