

アーチダムの地震時挙動におよぼす境界条件の影響

Effects of boundary conditions on dynamic response analysis of arch dam

室蘭工業大学
室蘭工業大学
北海道電力株式会社
室蘭工業大学大学院

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
正 員 当麻 誠司 (Seiji Toma)
○ 学生員 米坂 俊介 (Syunsuke Yonesaka)

1. はじめに

我が国には、社会的・経済的活動を支える重要な社会基盤施設の一つとして多くのダムが建設されている。ダム施設の場合には、その貯水量が巨大であることより災害時に下流地域へ多大な被害を与える可能性があるため、地震時も含めて、安定性を確保することが非常に重要である。

ダムの中でもアーチダムは、その構造上、三次元的な挙動を示すことから、堤体および基礎地盤を含めた三次元モデルを用いて、地震時の応答解析を行うことが適切である。特に近年は、コンピュータ性能の飛躍的な向上によって、ダムの三次元的な効果を含めたダム堤体の地震時挙動特性を比較的容易に検討可能になってきたことから、様々な地震応答解析手法が確立されている。しかしながら、現存するアーチダムの総数が非常に少ないこともあり、周辺地盤の境界条件などを含めて不明な点も多く、それらがダム堤体の地震時挙動に与える影響を明らかにすることは重要である。

周辺地盤の境界条件に限定して考えると、以下のような設定が想定される。すなわち、(1)地震時に周辺地盤がせん断振動モードを呈するものと仮定し、その外側境界の各節点における上下方向変位を固定するのみにし、地震波を基礎岩盤基部に入力して解析を行う。この場合には、ダム本体からの応答波動は自由境界に基づいて反射し再度ダム本体に入力することになる。(2)周辺地盤の外側境界を全て固定させ、地震波動の伝播特性や位相特性を無視した形で解析を行う。この場合には、周辺地盤を固定しているこ

とにより、ダム本体からの応答波動は固定境界の基で反射し再度ダム本体に入力することになる。(3)地震波を岩盤基部入力とし、周辺地盤に無限要素を付加してダム本体からの応答波が境界で反射することなく透過する状態を再現して解析を行う。

本論文では、アーチダムの適切な地震応答解析手法を確立することを目的に、周辺地盤の境界条件がアーチダムの地震応答特性に与える影響について数値解析的に検討を行うこととした。本研究では、上述の解析方法のうちで、(1)周辺地盤がせん断振動モードを呈するものと仮定し、その外側境界の各接点における上下方向変位を固定するのみにし、無反射境界を考慮しない場合(以後、無反射境界考慮せず)と(3)の無限要素を配置して無反射境界を考慮する解析方法、に限定して地震応答解析を行い、応答結果を比較することにより境界条件の影響について検討を行った。なお、本数値解析には構造解析汎用プログラムABAQUSを使用した¹⁾。

2. 数値解析概要
2.1 数値解析モデル

本数値解析では、アーチダムの三次元的な挙動を適切に評価するために、堤体および周辺地盤を含めた三次元有限

表-1 使用物性値一覧

使用材料	弾性係数 E (GPa)	密度 ρ (g/cm ³)	ポアソン比 ν
堤体コンクリート	35.4	2.50	0.20
基礎地盤	21.6	2.65	0.20

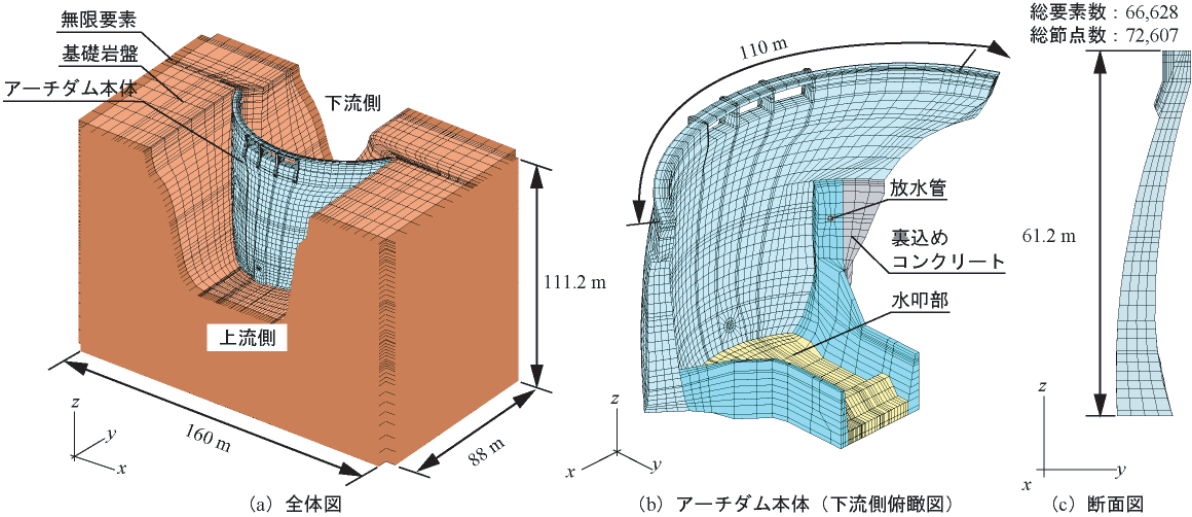
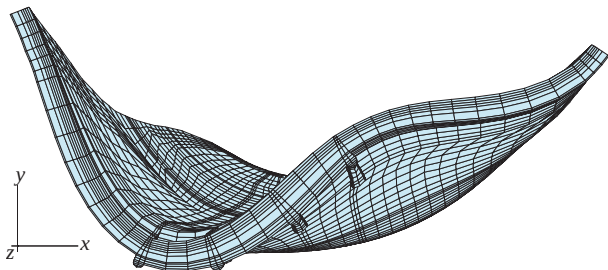


図-1 要素分割状況

図-2 1次振動モード ($f_1 = 4.36 \text{ Hz}$)

要素モデルを作成した。図-1には、本解析に用いた有限要素モデルを示している。解析対象範囲は、アーチダムを中心に基礎地盤を含め上下流方向に 88 m、ダム軸方向に 160 m、高さ方向に 111.2 m とした。また、より詳細な解析を行うために、ダム本体のほか、水叩部、放水管、裏込めコンクリートも考慮している。なお、総要素数および総節点数は、それぞれ約 65,000、70,000 である。

表-1には、本数値解析にて使用した材料物性値を示している。なお、本解析では、コンクリートの弾性係数に動弾性係数を用いている。

2.2 地震時動水圧および減衰定数の設定

ダムの地震時挙動特性を検討するためには、堤体に作用する動水圧の考慮が不可欠である。本数値解析では、簡略化のために、仮想質量を Westergaard 式²⁾を用いて評価することとし、解析ではこれらを節点間で線形変化に仮定し、各節点に付加した。

水位は常時満水位(水深 56 m)を設定した。堆砂高は設計堆砂面とし、底面から 30 m の位置まで考慮し、水中単位体積質量を 1.0 g/cm^3 と仮定した。また、泥圧係数は 0.5 に設定している。なお、堤体に作用する泥圧に関しては、静水圧の分布と同様に線形に作用するものとし、動水圧同様、仮想質量として各節点に付加することとした。

図-2には事前の固有振動解析³⁾の結果より得られたダム堤体の逆対称 1 次振動モードを示している。減衰定数は、質量比例型減衰を仮定し、上述の 1 次固有振動モード(固有振動数 $f_1 = 4.36 \text{ Hz}$)に対して 5% とした。

2.3 エネルギーの散逸を考慮した境界条件

構造物と地盤を考慮した地震応答解析を行う場合には、その波動エネルギーを地盤で効率的に散逸できる境界条件が重要である。本数値解析では、図-1に示すように、ダム周辺地盤に対する有限要素モデルの側面に無限要素を配置することにより無反射境界を考慮することとした。

本数値解析では、上述の無反射境界を考慮した場合と、無反射境界を考慮せずに周辺地盤がせん断振動モードを呈するものと仮定した場合の 2 種類の境界条件について解析を行った。なお、解析における境界条件は、無反射境界の考慮の有無にかかわらず、地盤側面の節点の上下方向変位を固定している。

2.4 引き戻し解析による入力波形

本研究では、観測波を用いた解析を行うこととしている。ただし、地震波を岩盤基部に入力しなければならないことより、観測波を基礎岩盤基部に引き戻すことが必要である。本研究では、基礎岩盤を一次元単純せん断層に仮定して算定している⁴⁾。図-3には、最大加速度 50 gal に振幅調整した引き戻し解析前後の加速度波形を示している。

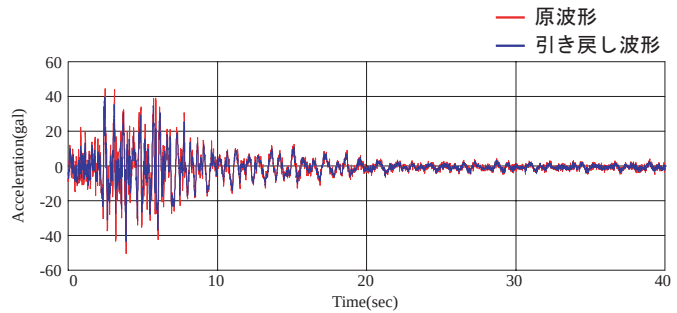


図-3 引き戻し解析前後の加速度波形

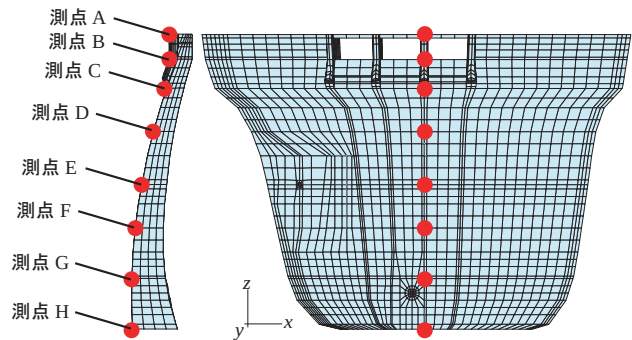


図-4 波形出力箇所

本数値解析では図-3の原波形の引き戻し解析を行い、その結果得られた波形を解析モデルの底面に入力している。本解析では、上下流方向に限定して地震波形を入力し、直接積分法による時刻歴応答解析を行った。なお、積分間隔は 1/100 秒と設定し、地震波入力時間は 30 秒間としている。

3. 数値解析結果および考察

3.1 各種応答波形の比較

図-4には、ダム堤体の各種応答波形の出力点を示している。出力点は、ダム中央付近の高さ方向に、天端付近から底部までの A～H の 8 箇所とした。

図-5には、数値解析結果より得られた各測点に関する各種応答波形について、無反射境界ありの場合と無反射境界なしの場合を比較して示している。なお、加速度および速度波形に関しては、絶対加速度(以後、加速度)および絶対速度(以後、速度)を、また変位波形に関しては、地震波入力地点である解析モデル底面の変位との相対変位(以後、変位)を示している。なお、紙面の都合により、各種応答波形は 4 箇所の測点のみを掲載している。

まず、図-5(a)の加速度応答波形に着目すると、いずれの測点においても、無反射境界を考慮する場合の波形は無反射境界を考慮しない場合と比較して、振幅が大きく減少していることがわかる。また、図-5(b)の速度応答波形に着目すると、加速度波形と同様に振幅が小さく、高周波成分が消失する傾向にあることが分かる。これは、無反射境界を考慮する場合には、ダム本体の応答波形による振動エネルギーが境界部を介して無限要素に透過していることを意味している。しかしながら、ダム底部に近づくにつれて、境界条件の差異の影響が小さく、底部では振幅が無反射境界を考慮しない場合の波形と類似の性状を示している。図-5(c)の変位応答波形に着目すると、上記の 2 つの

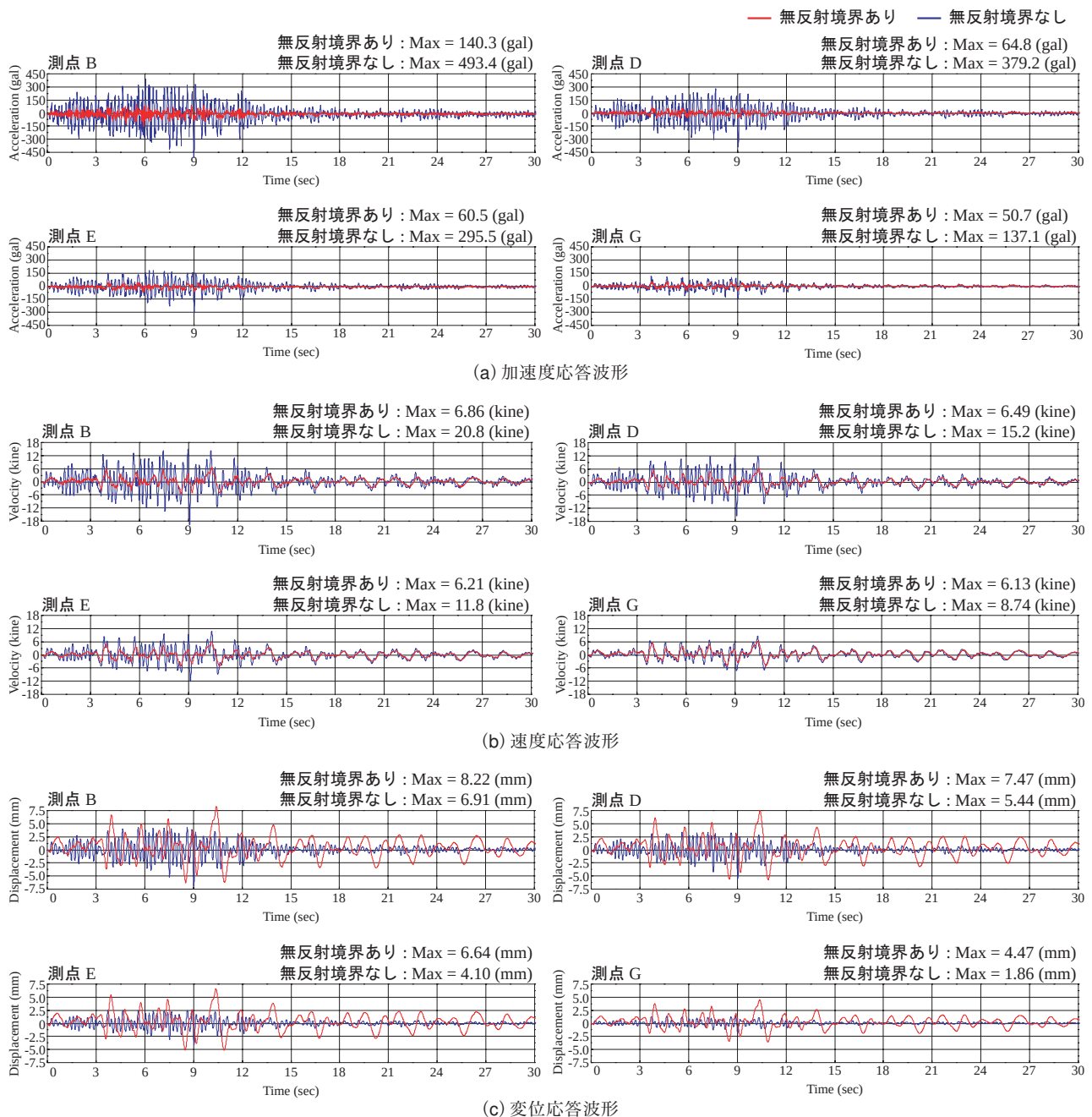


図-5 各種応答波形の比較

波形と異なり，無反射境界を考慮する場合には無反射境界を考慮しない場合と比較して，振幅が大きく，かつ周期が長いことが分かる。これは，無反射境界を考慮することにより，周辺地盤の影響が小さいこと，また，見かけ上，考慮される地盤範囲が広いことなどによるものと推察される。

以上より，無反射境界を考慮する場合における各種応答波形は，無反射境界を考慮しない場合と比べてその応答性状が大きく異なることより，境界条件は，ダム堤体の応答性状に大きく影響を与えることが明らかとなった。

3.2 各種最大応答時におけるダム堤体の変形分布図

図-6 には，測点 B の応答波形から得られた加速度および変位の最大応答時と最小応答時における加速度，速度，変位のダム高さ方向の分布図を示している。図には，無反射境界を考慮する場合と考慮しない場合の結果を比較して

整理している。また，変位分布は，ダム堤体の底部（測点 H）を基準に整理している。

まず，図-6 (a) の最大および最小加速度時の変形分布に着目すると，無反射境界を考慮する場合における加速度分布は，断面厚が小さいために応答が大きくなる天端付近を除いて，ほぼ 0 近傍に分布していることがわかる。一方，無反射境界を考慮しない場合には，天端の加速度も大きく，かつ，上部へ向かうほど加速度が増大する傾向を示している。また，速度分布に関しては，無反射境界を考慮する場合にはほぼ直線的な分布を示しているのに対して，考慮しない場合には，特に下流側において，底部と天端で符号が逆転する分布となっている。

また，変位分布に関しては，無反射境界を考慮する場合としない場合を比較すると前者による解析結果が小さくな

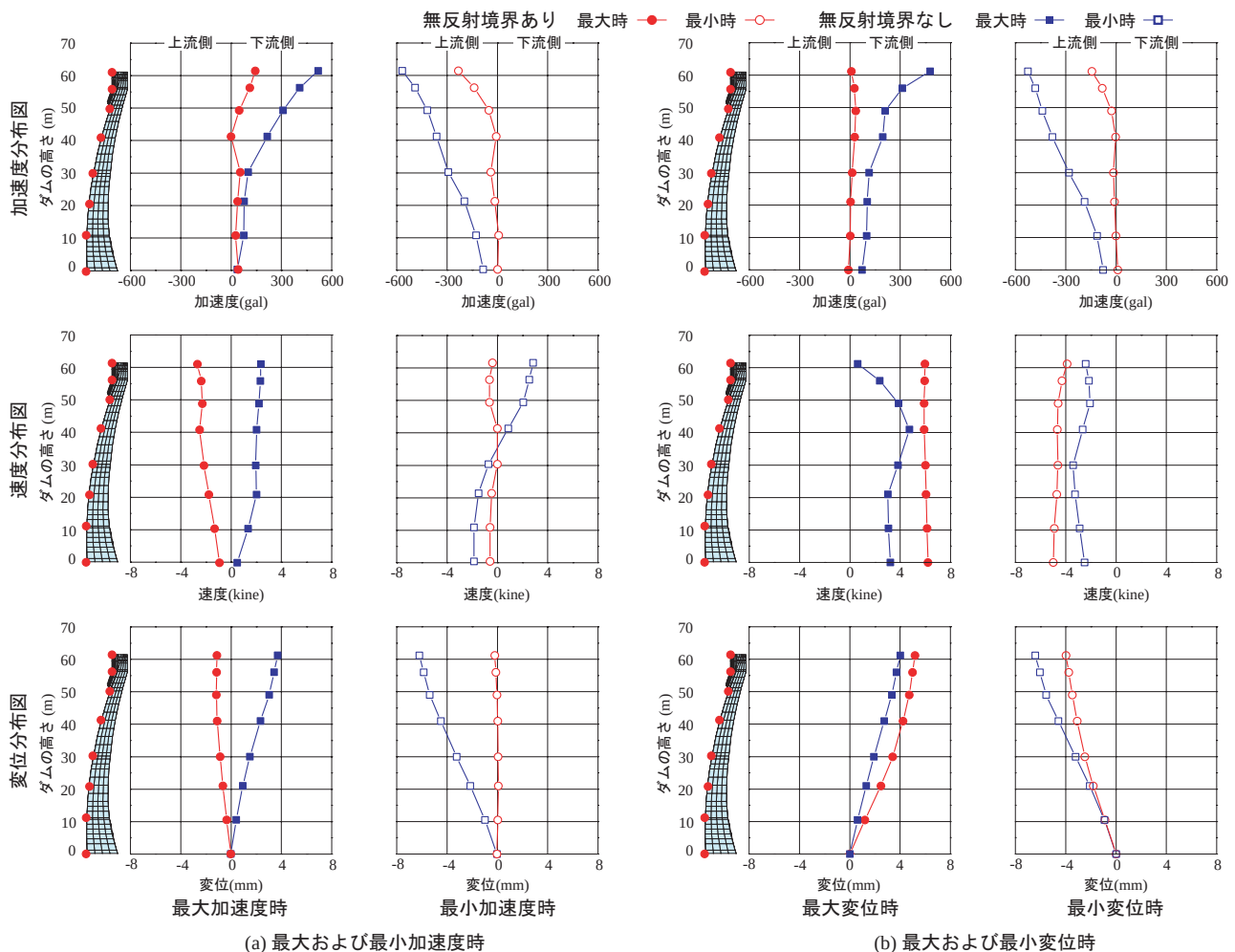


図-6 測点Bにおける最大応答時のモード分布図

る傾向を示している。これは、無反射境界を考慮しない場合には、ダム応答波形が境界部で反射することにより、入力地震波による応答波形と反射による波が合成されて出力されるのに対して、無反射境界を考慮する場合には、応答波形が境界部を介して無限地盤に透過することにより、入力地震波による応答波形のみが出力するためと推察される。次に、図-6(b)の最大および最小変位時の変形分布に着目すると、無反射境界を考慮する場合の加速度および速度分布は、前述の最大および最小加速度時の分布と同様な傾向にあることがわかる。特に、最大変位時における無反射境界を考慮しない場合の加速度および速度分布は、天端付近の応答がより顕著になっていることが分かる。また、変位分布図を見ると、無反射境界を考慮する場合には下流側の変形が大きいのに対して、無反射境界を考慮しない場合は上流側の変形が大きい。

以上より、無反射境界を考慮しない場合には、ダム本体の応答波形の波動エネルギーが地盤境界部で散逸されずにダム本体側に反射し、地震波入力による応答との合成波が応答波として評価される。一方、無反射境界を考慮する場合には、ダム本体からの応答波形が境界部を介して無限地盤に透過することで、実現に近い形で応答解析が可能になることが明らかとなった。このことから、周辺地盤に無反射境界を設定することは地震応答解析において重要な役割を果たすことが明らかとなった。

4. まとめ

- 1) 各種応答波形の比較から、無反射境界を考慮する場合における各種応答波形は、無反射境界を考慮しない場合と比べてその応答性状が大きく異なることが明らかとなった。
- 2) 各種最大応答時における変形モード分布図から、無反射境界を考慮しない場合には、ダム本体の応答波形の波動エネルギーが地盤境界部で散逸されずにダム本体側に反射し、地震波入力による応答との合成波が応答波として評価されることが明らかとなった。
- 3) エネルギーの散逸を考慮した境界条件の適用は、地盤-構造物の連成問題を取り扱う場合において非常に重要であり、実現に近い形で応答解析を行うには必要不可欠なものであると考えられる。

参考文献

- 1) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.8, Hibbitt Kalsen & Sorensen Inc., 1998.
- 2) Westergaard, H. M. (1933) : Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418-432
- 3) 岸 徳光, 小室雅人, 米坂俊介, 世戸洋行: 既設アーチダムの固有振動特性に関する動的応答解析, 土木学会第63回学術講演会概要集報告書, (CD-ROM), 2008.9
- 4) 財団法人電力中央研究所, 重力式ダムの耐震性に関する検討-動的応答解析法による検討-, 1982.