

ジョイント要素を考慮した重力式ダム地震時特性に関する数値解析的検討

Numerical analysis on dynamic characteristics of gravity dam in case using joint element

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
北海道電力株式会社

○ 学生員
フェロー
正 員
正 員

桑原 知也
岸 徳光
小室 雅人
当麻 誠司

(Tomoya Kuwahara)
(Norimitsu Kishi)
(Masato Komuro)
(Seiji Toma)

1. はじめに

我が国には、これまで数多くのダムが建設されている。建設中のものも含めると現在約3,000基が存在しており¹⁾、その中でも重力式ダムはその大半を占めている。ダムは、洪水調節や電力供給、飲料水の確保等の観点から重要な社会基盤施設の一つである。また、規模が大きいことより、地震による破損や洪水などにより決壊した場合には、その下流域に多大な被害を与える可能性がある。1995年に発生した阪神・淡路大震災を教訓とし、山岳部に建設されるダムに対しても限界状態時の耐震性にかかる性能を照査することが重要視されている²⁾。

本研究では、コンクリート重力式ダムの耐震性を検討するための基礎資料を得ることを目的に、ダム堤体にジョイント要素を配置する場合の地震時挙動特性に関する数値解析を実施した。ここでは、ダム堤体の他、周辺地盤を考慮して実構造と同様に三次元的にモデル化している。なお、本研究ではダムの動特性に主眼をおいていることより、固有振動性状や地震時応答性状について検討を行うこととし、自重や静水圧に関しては考慮しないこととした。数値解析には構造解析用汎用プログラムABAQUS³⁾を使用した。

2. 数値解析用ダムモデルの概要

数値解析用のダムモデルとして、既設のダムを参考に、以下のように設定した。すなわち、堤高70m、堤頂長140m、堤体積130,000m³程度の重力式コンクリートダムである。また、洪水吐きゲートが存在しない自然越流方式とした。

3. ジョイント要素を考慮した地震応答解析

3.1 数値解析概要

本数値解析では、重力式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、ダム堤体を中心に基礎地盤を含め上下流方向に283m、ダム軸方向に420m、高さ方向に210mとした。また、より詳細なモデル化を行うために、ダム堤体のほか、水叩部も考慮している。境界条件は周辺地盤の側面を鉛直方向固定とし、その境界部には無限要素を導入した。なお、総要素数および総節点数は、それぞれ58,829、66,404である。材料物性値は、既設のダムを参考に表-1のように設定した。

表-1 使用物性値一覧

使用材料	弾性係数 E_g/E_c (GPa)	密度 ρ (t/m ³)	ポアソン比 ν
基礎地盤	9.0	2.55	0.25
堤体コンクリート	30.75	2.35	0.20

表-2 解析ケース一覧

解析ケース	ジョイント要素の有無	ジョイント部の弾性係数 (GPa)
case1	無	E_c
case2	有	$E_c/60$
case3		$E_c/600$
case4		$E_c/6000$

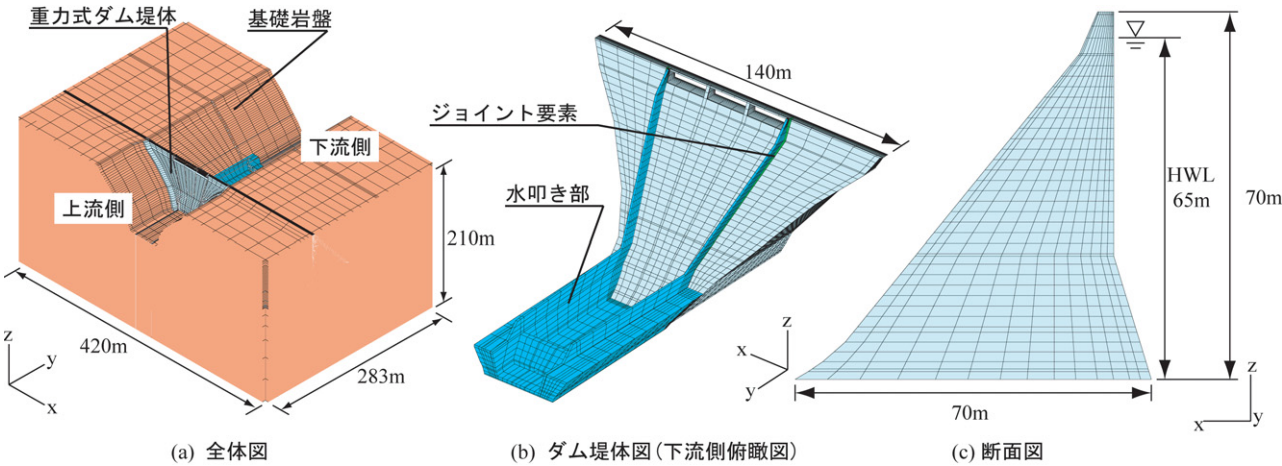


図-1 要素分割状況

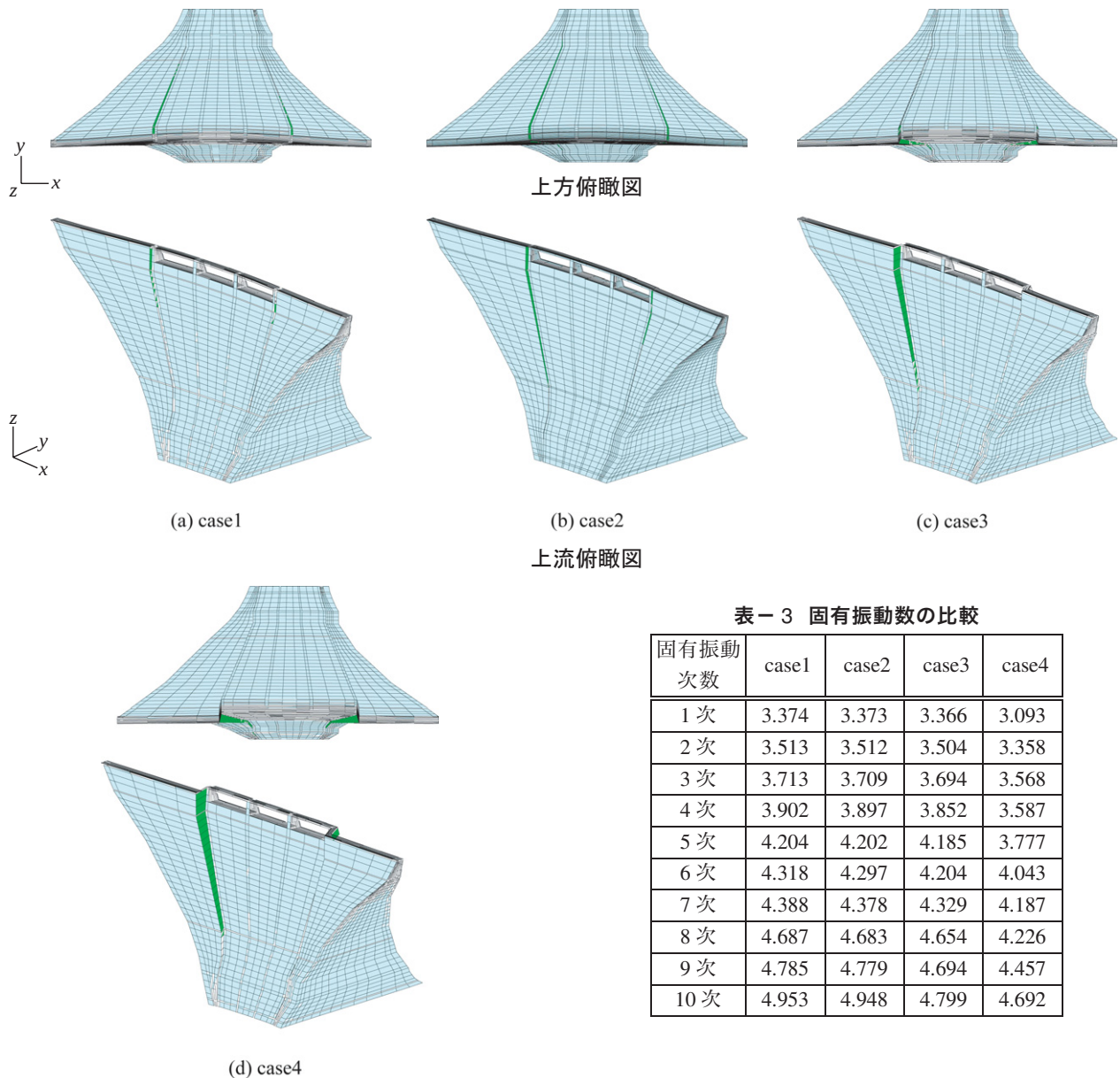


図-2 4次振動モード (上:上方俯瞰図 下:上流俯瞰)

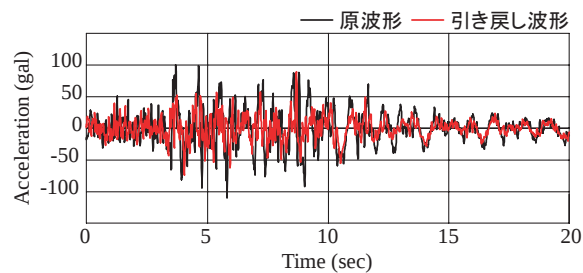


図-3 入力地震波形

本研究では、1)ダム堤体の地震時挙動特性の基礎的評価を目的とした固有振動解析、2)地震波を入力した地震応答解析の二つを実施している。なお、ダム堤体にジョイント要素を導入し、その弾性係数を変動させることにより、それらがダム堤体の動特性に与える影響についても検討を行うこととした。また、解析ケースは表-2に示している全4ケースである。

表-3 固有振動数の比較

固有振動 次数	case1	case2	case3	case4
1次	3.374	3.373	3.366	3.093
2次	3.513	3.512	3.504	3.358
3次	3.713	3.709	3.694	3.568
4次	3.902	3.897	3.852	3.587
5次	4.204	4.202	4.185	3.777
6次	4.318	4.297	4.204	4.043
7次	4.388	4.378	4.329	4.187
8次	4.687	4.683	4.654	4.226
9次	4.785	4.779	4.694	4.457
10次	4.953	4.948	4.799	4.692

3.2 Westergaard 式による動水圧の導入

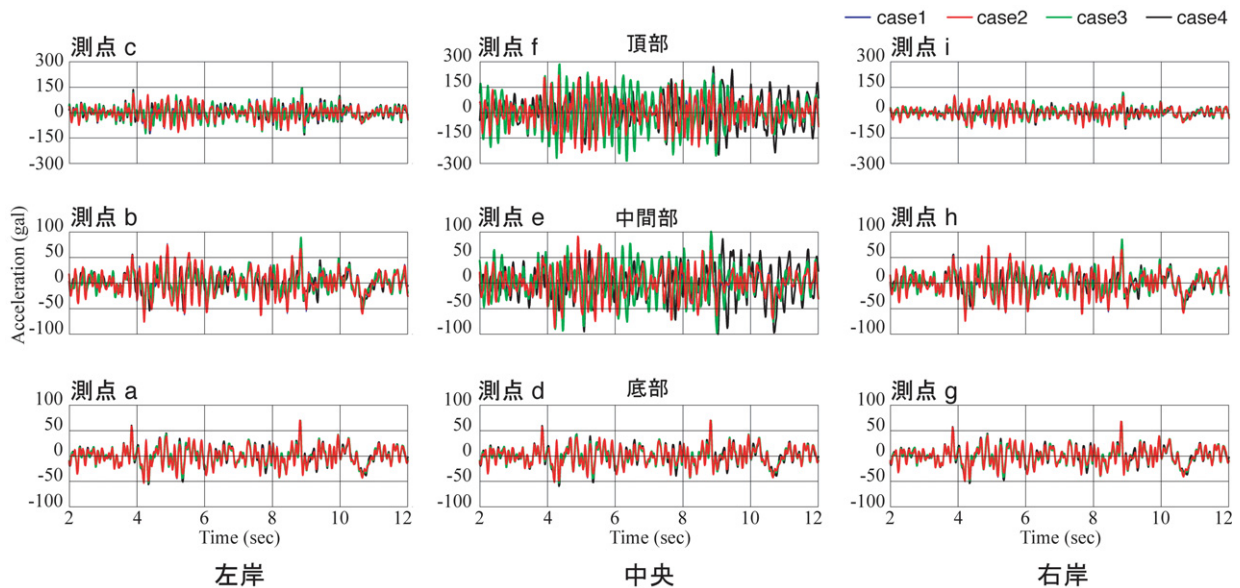
ダム堤体の固有振動特性あるいは動特性を適切に評価するためには、ダム堤体に作用する動水圧の考慮が不可欠である。本研究では、式(1)に示す Westergaard⁴⁾によって提案された動水圧算定式を用いて仮想質量として評価し、ダム堤体上流側の各節点に付加した。

$$p = \frac{7}{8} p_w \sqrt{H \cdot h} \quad (1)$$

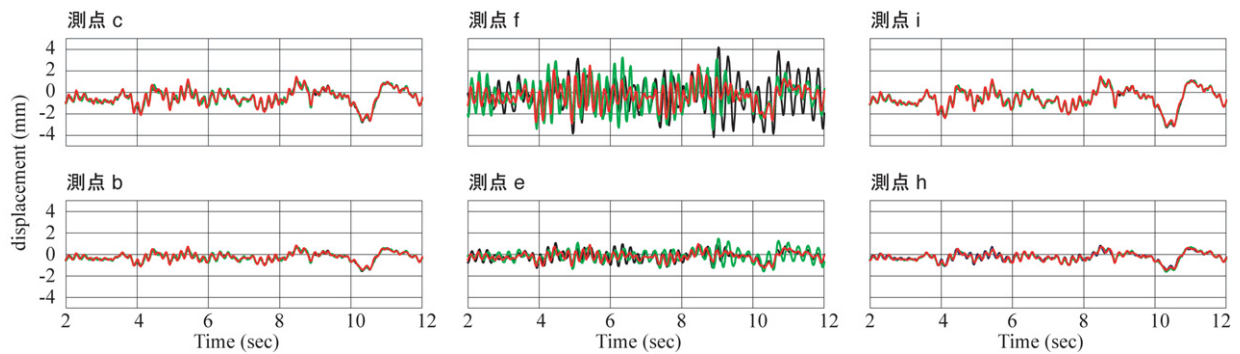
ここに、 p :単位長さ当たりの付加質量 (kg/m^2)、 p_w :水の単位体積質量 (kg/m^3)、 H :水深 (m)、 h :水面から地震時動水圧が作用する点までの水深 (m)である。

3.3 固有振動特性の検討

本研究では、まずジョイント要素がダム堤体の動特性に与える影響を検討するため、ジョイント要素を考慮した固有振動解析を実施した。表-3には、各解析ケースでの固有振動数を、図-2には各解析ケースにおけるダム堤体が上下流方向に振動するモードが卓越する4次振動モードを示している。まず、図-2に着目すると、ジョイント要素の弾性係数が小さいほど、ダム堤体中央部の上下流方向



(a) 加速度応答波形



(b) 相対変位波形

図-4 各出力点における絶対加速度および相対変位波形

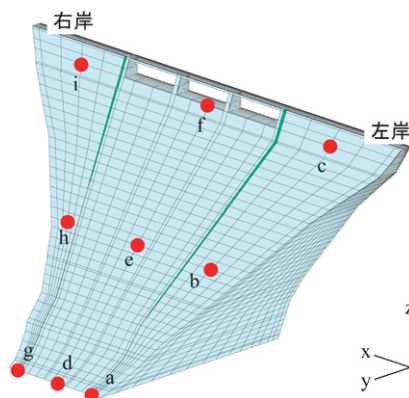


図-7 出力点位置

の変形が大きくなる傾向にあることが確認できる。一方、表-3に示す固有振動数に着目すると、case1とcase2では大きな差は見られないものの、ジョイント要素の弾性係数が小さくなるとともに、固有振動数が小さくなっていることがわかる。なお、case4における固有振動数はcase1の約92%となっている。

3.4 入力地震波形

入力地震波形として図-3に示す人工地震波形を用いる

こととした。本数値解析では、ダム堤体底部に所定の地震波が入力されるように、岩盤基部まで地震波形の引き戻しを行っている。地震波の引き戻しは、周辺岩盤を一次元単純せん断層と仮定して行った。図-3には、引き戻し解析後の加速度波形を原波形と併せて示している。地震時応答解析には、図の赤線で示されている引き戻し波形を岩盤底部に入力している。

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、積分間隔を1/100秒と設定し、地震波入力時間を20秒間とした。

3.5 数値解析結果および考察

図-4(a)には、各解析ケースにおける絶対加速度応答波形を比較して示している。また、図-4(b)には、ダム堤体底部を基準とした各点の相対変位を時系列で示している。出力点は図-7に示す全9点である。なお、全ての時系列波形は最大応答を示す2～12秒の区間を抜粋している。

まず、図-4(a)の加速度応答波形に着目すると、左岸の測点a～c及び右岸の測点g～iでは、高さ方向に関係なく全解析ケースにおいて比較的相似な波形が見られ、またその値もほぼ同程度であることが確認できる。一方、中央部の測点d～fの応答波形に着目すると、基部である測点dでは全解析ケースにおいて同程度の波形を示しているが、測

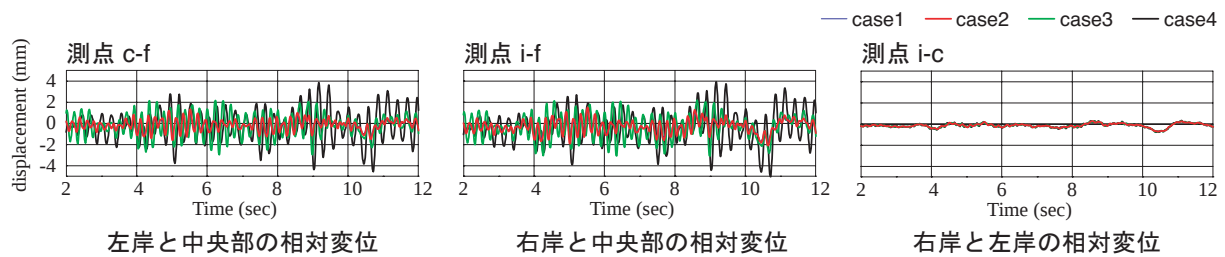


図-5 ジョイント要素の影響による相対変位波形

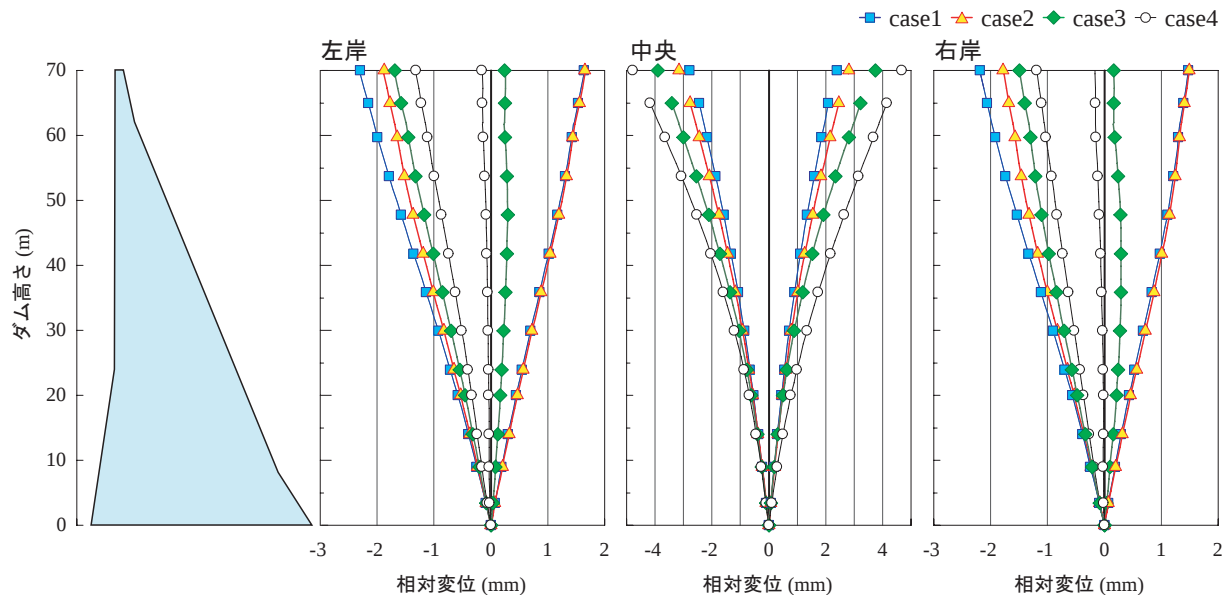


図-6 最大および最小応答時における相対変位分布図(ダム堤体底面基準)

点e及びfにおいて、弾性係数が小さくなるほど、振幅が大きくなっていることがわかる。

次に、図-4(b)の相対変位波形に着目すると、左岸の測点b、cおよび右岸の測点h、iにおいて、変位応答波形はほぼ一致している。一方、中央部の測点e、fでは、加速度応答波形と同様にcase3、case4において、case1よりも大きな応答を示していることが確認できる。また、中央部における相対変位応答の最大値に着目すると、ジョイント要素の弾性係数が小さいほど大きな値を示しており、弾性係数の最も小さいcase4ではcase1の約1.9倍となっている。これは、ダム堤体にジョイント要素を導入したことにより、ダム堤体の剛性が低下し、その中央部が変位しやすくなったことによるものと推察される。

図-5には、ダム堤体頂部(c, f, i点)におけるジョイント要素間の相対変位波形を示している。図より、case1とcase2における応答波形はほぼ一致している。一方、case3およびcase4においては振幅が大きくなる傾向にあることが確認できる。

図-6には、解析結果から得られた最大および最小相対変位時のダム堤体の変形状況を示している。図より、ダム堤体中央部では、最大変位応答と最小変位応答がほぼ対称的な分布を示しているのに対し、左岸および右岸では、変位分布が非対称であることが確認できる。また、ジョイント要素の弾性係数が小さいほど、両岸部の最大変位振幅が小さくなるとともに、下流側への変形量が小さくなる傾向が見られる。さらに、堤体両岸側ではほぼ線形的

な変位分布であるのに対し、中央部では曲線的な変位分布であることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、コンクリート重力式ダムの耐震性を検討するための基礎資料を得ることを目的に、ダム堤体にジョイント要素を配置する場合の地震挙動特性に関する数値解析を実施し、それらがダム堤体に及ぼす影響について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のようである。

- 1) ジョイント要素の弾性係数はダムの固有振動数や動的応答特性に大きく影響を与えること、
 - 2) しかしながら、ジョイント要素の弾性係数がダム堤体の1/60程度の場合には、その影響は小さいこと、
- が明らかとなった。

参考文献

- 1) 財団法人日本ダム協会, ダム便覧 2009, <http://www.soc.nii.ac.jp/jdf/Dambinran/binran/TopIndex.html>
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料, 2005.3
- 3) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 6.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 2009.
- 4) Westergaard, H. M. (1933): Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418-432