

重力式コンクリートダム of 強震記録に見られる 地震時卓越周期の可逆的変動について

片桐信幸¹・大町達夫²・井上修作³

¹東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 修士課程
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-G3-2)

E-mail:katagiri@enveng.titech.ac.jp

²東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 教授
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-G3-2)

E-mail:ohmachi@enveng.titech.ac.jp

³東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 教務職員
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259-G3-2)

E-mail:shusaku@enveng.titech.ac.jp

近年の複数の地震の際に、重力式コンクリートダムの天端において、1000galを超えるような大きな加速度が観測されている。これらのデータを調べると、重力式コンクリートダムの卓越周期が入力加速度の大きさによって変動すること、すなわち、1回の地震の最中でも当初の卓越周期が一旦長くなり、主要動の到達時刻辺りで最長となった後、地震が収まるにつれてまた短くなる傾向があることが確認された。本研究では賀祥ダム、田瀬ダムの2つのダムにおいて見られた卓越周期の変動の例を示し、これらが貯水の動水圧に起因するのではないかという推察のもとに、数値解析シミュレーションを用いて検討を試みた。

Key Words : gravity concrete dam, hydrodynamic pressure, FE-BE method

1. はじめに

近年、強い地震動を受けたダムの記録が多く得られている。一方、幸いなことに、我が国に建設されているダムに関しては、重大な被害の報告はされていない。しかし、ダムについてもより合理的な耐震設計が要望され、地震時にダム堤体と貯水との相互作用を考慮する必要性が指摘されている。

そこで、本研究では、ダムの合理的な耐震設計に少しでも貢献することを目指し、2000年鳥取県西部地震と2003年宮城県沖の地震の際に得られた強震記録から重力式コンクリートダムの振動特性について検討し、シミュレーションを用いて動水圧の効果の評価を試みた。

2. 2000年鳥取県西部地震における事例

(1) 2000年鳥取県西部地震と賀祥ダムの概要

2000年10月6日13時30分ごろ、鳥取県西部を震源

とするマグニチュード(M_j)7.3の地震が発生した¹⁾。この地震では、震源域に明瞭な地表地震断層が確認されなかったため、伏在断層による比較的大きな地震として注目された²⁾。また、震源断層のほぼ直上に位置した賀祥ダムでは、ダムの上部で2051gal、ダム下部で531galという非常に大きな加速度が観測されている。これだけの大きな加速度にもかかわらず賀祥ダムにおいて地震による損傷は特に確認されていない。図-1に賀祥ダムの位置および2000年鳥取県西部地震の本震と余震の震央位置を示す。

賀祥ダム³⁾は、鳥取県西部を北流する日野川の支流法勝寺川に建設された重力式コンクリートダムである。ダムサイト周辺はなだらかな山地であり、左岸はやや突出した尾根を形成し、右岸には小谷が発達している。本ダムは、堤高46.4m、堤頂長174.0m、堤体積86,600m³で、1989年3月に竣工した。常時満水位はEL. 118.0mであるが本震発生時の貯水位はEL. 112.2m、水深は34.2mであった。ダム下流面図を図-2に、標準断面図を図-3にそれぞれ示す。また、図-4に示すように、ダム軸中央の橋

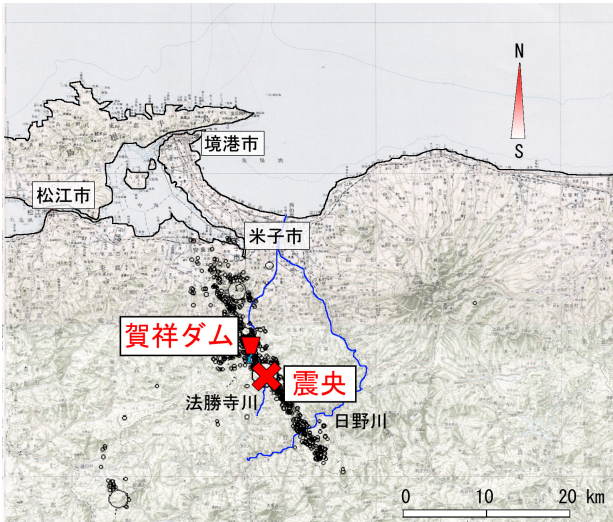


図-1 賀祥ダムおよび2000年鳥取県西部地震の本震と余震の位置図

脚に隣接してエレベータシャフトが設置され、ダム頂から底部監査廊までのエレベータが装備されている。

(2) 賀祥ダムで観測された加速度波形

賀祥ダムには、上下2ヶ所のコンクリート床に3成分強震計が設置されている。上部の設置位置はダム頂の上部エレベータ室 (EL. 124.4m) であり、下部は底部監査廊内 (EL. 87.0m) である (図-2参照)。ダム軸の右岸方向方位はN102° Eであるが、文献3) によれば強震計水平2成分の設置方向は、ダムの真北を基準にして、天端はN21° W、監査廊はN7° Wである⁴⁾。これらの2ヶ所で観測された本震の強震記録を図-5に示す。ただし、後述する解析の便宜のため、観測された水平2成分の加速度時刻歴を、ダム軸方向と上下流方向に回転して図示している。回転後の最大加速度値は、ダムの底部監査廊で558gal (ダム軸方向)、ダム天端で2110gal (上下流方向) である。

(3) 賀祥ダムの増幅特性と周期変動

賀祥ダムの地震応答特性を調べるために図-5 に示すように、各加速度時刻歴を 5.12sec ごとの 4 区間に区分し、順にセグメント①～セグメント④と呼ぶことにした。すなわち、セグメント①はP波初動を含み主要動に先行する部分、セグメント②はS波初動を含む主要動部分、セグメント③は主要動に後続する部分、セグメント④はコーダ部分であり、各セグメントのダム監査廊での上下流方向最大加速度は、順に 158gal, 524gal, 121gal, および 37gal である。

同一方向のセグメントごとに、ダム天端と底部監査廊の時刻歴のフーリエ振幅スペクトル比 (増幅率) を算定した。各セグメントはサンプリング周波数 100Hz、データ数 512 であり、スペクトルはバンド幅 0.5Hz の Parzen

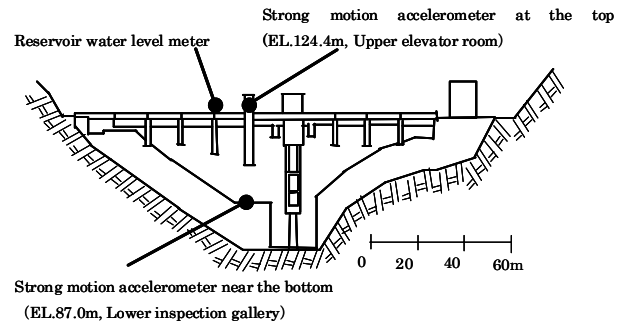


図-2 賀祥ダム下流面図

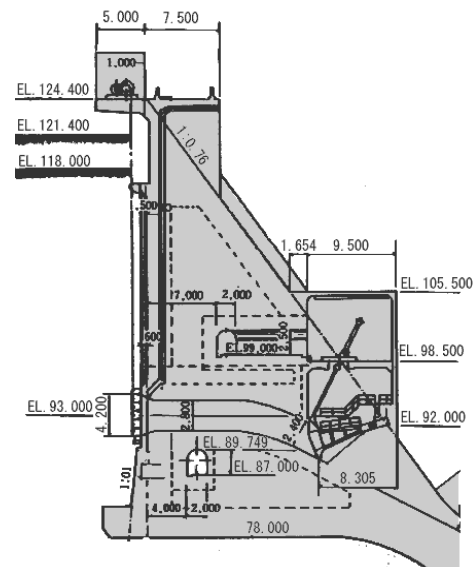
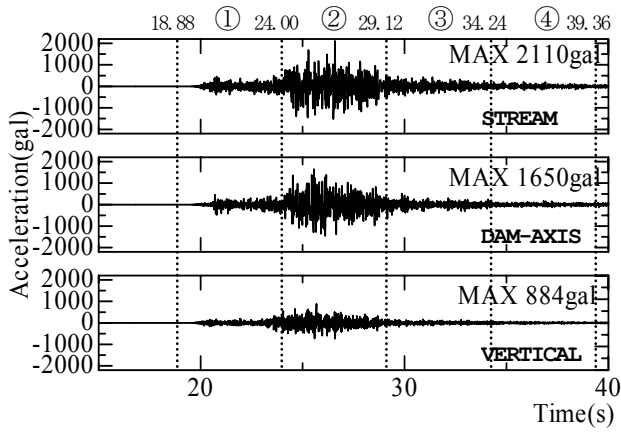


図-3 賀祥ダム標準断面図

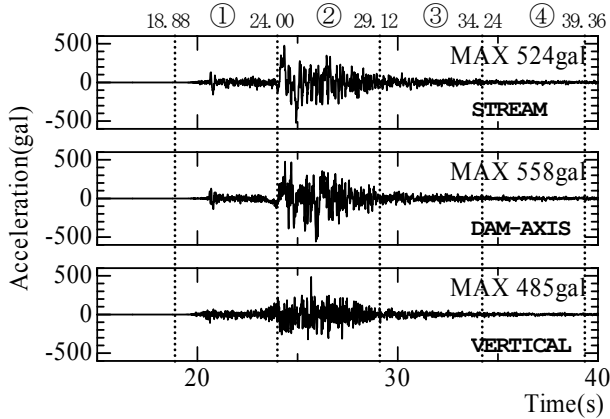


図-4 賀祥ダムエレベータシャフト

ウィンドウによって平滑化したものである。その結果を図-6 に示す。同図(a)上下流方向の増幅率は 0.1sec 付近に、明瞭で同程度の高さのピークが存在するが、これら 4 つのピークに対する周期 (以下、卓越周期と呼ぶ) に



(a) 天端加速度波形



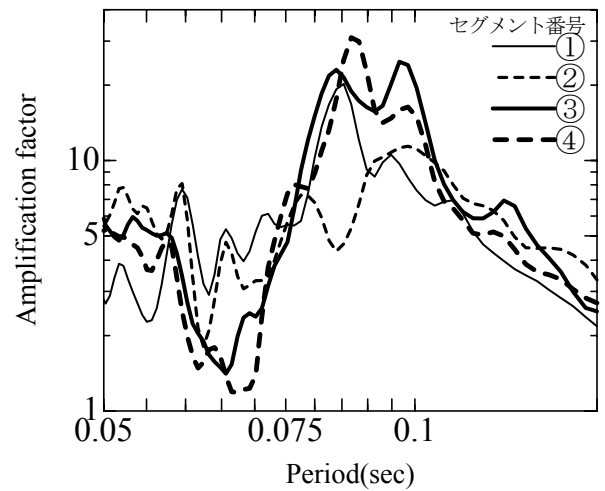
(b) 監査廊加速度波形

図-5 賀祥ダムで得られた2000年鳥取県西部地震の観測記録

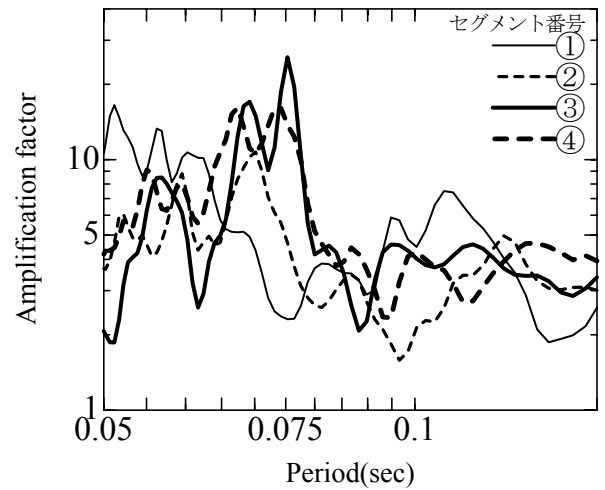
はそれぞれ微妙な違いがある。すなわち、ダムの上下流方向基本振動モードに対応すると思われる 0.1sec 付近のピーク周期は、セグメント①から順に、0.084sec, 0.096sec, 0.092sec, 0.087sec である。これら上下流方向の振動周期の変動量自体はごくわずかであるが、変動率は最大で 10%を超えること、周期変動はセグメント①→②でまず延伸し、次にセグメント②→③→④で短縮することなどが注目される。

一方、図-6(b)はダム軸方向の、同(c)は鉛直方向の増幅率を示しているが、これらの図には上述のピーク周期の変動傾向は明確でない。

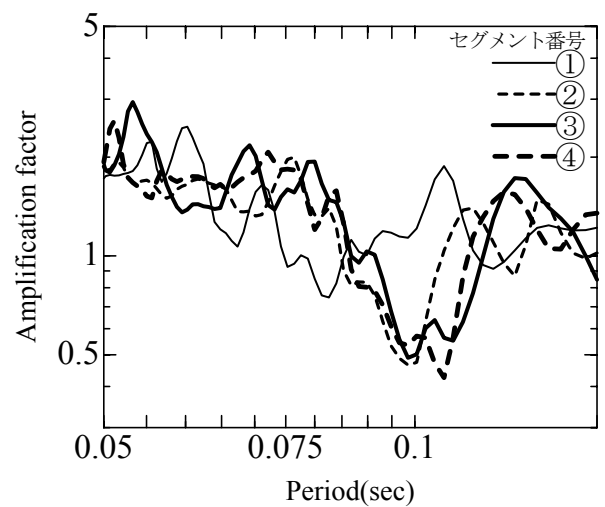
賀祥ダムでは、表-1 に示すように本震のほか、余震の観測記録も得られている。これらの余震観測記録は、いずれも本震に比較すると格段に最大加速度値は小さく記録長も短いことから、本震記録のようなセグメント化は行わず、全記録長に対して上下流方向の増幅率を算定した。また、本震時と余震時の貯水位を表-1 に示す。この表を見ると、本震時と余震時とで貯水位はほぼ同等で、その差異は高々1.27 m (水深の 3.7%) である。そこで貯水位の差異を無視して、上下流方向の卓越周期を、



(a) 上下流方向



(b) ダム軸方向



(c) 鉛直方向

図-6 同一方向セグメントごとの増幅率

表-1 地震発生時刻と最大加速度，および水位，水深

地震発生日	上下流方向最大加速度(gal)		貯水位 EL(m)	貯水深 (m)
	天端	監査廊		
2000.10.06 13:30	2110	524	112.2	34.2
2000.10.07 12:14	332	48	112.18	34.18
2000.10.07 18:32	410	73	112.18	34.18
2000.10.09 19:49	212	33	111.95	33.95
2000.10.10 21:57	247	57	111.73	33.73
2000.10.12 03:53	52	7	111.33	33.33
2000.10.12 08:41	45	6	111.28	33.28
2000.10.13 10:44	91	16	110.93	32.93

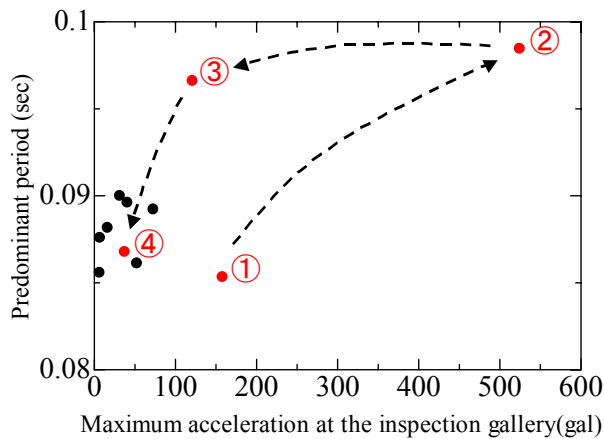


図-7 監査廊での最大加速度と卓越周期の関係

ダム天端の最大加速度に対してプロットして図-7 を得た。同図中，①～④は本震の各セグメントの卓越周期と最大加速度の関係を示し，②のプロットだけが他のプロットから大きく離れているのが特に注目される。また，卓越周期と最大加速度の間には，破線で示すような傾向，すなわち加速度値が増加すると卓越周期は延伸し，加速度値の低下とともに復元する可逆的傾向が認められる。

3. 2003年宮城県沖の地震における事例

(1) 2003年宮城県沖の地震と田瀬ダムの概要

2003年5月26日18時24分頃に発生した宮城県沖の地震は，マグニチュード (M_j) は7.1であった⁵⁾。東北新幹線の橋脚や宮城県築館町で目立った構造物被害があり，東北6県において負傷者174人，住宅被害2366棟（2003年7月2日現在）が報告されている。全体的に見ると，この地震では地震の規模の割に各種施設の被害は比較的軽微であった。

田瀬ダムは岩手県と賀郡東和町にあり，北上川総合開発計画に基づいて建設された5大ダムの一つである。北上川最大の支川である猿ヶ石川中流部に位置していて，堤高は81.5m，堤頂高320m，堤体積42万 m^3 の重力式コンクリートダムである。本ダムは1941年に着工し



図-8 田瀬ダムおよび2003年宮城県沖の地震の震源位置

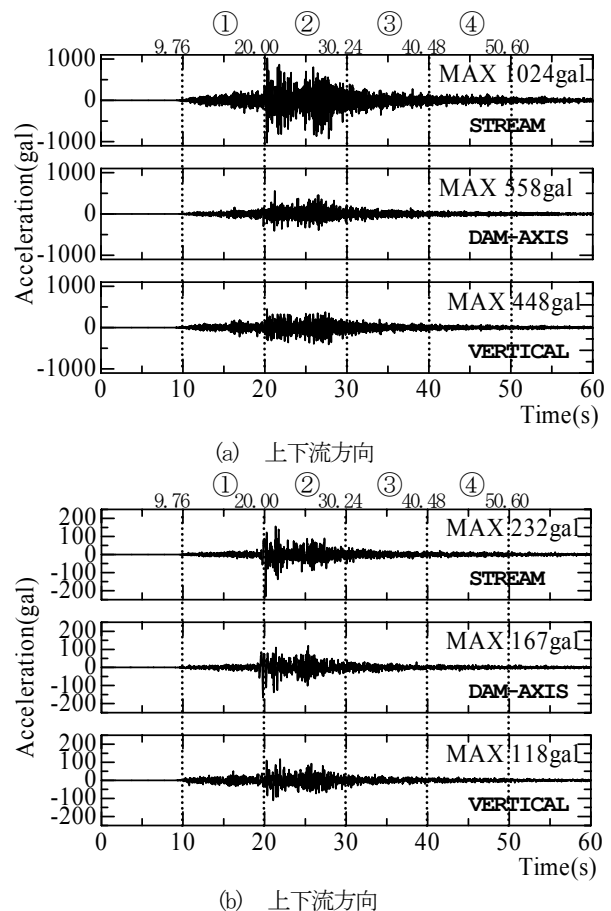


図-9 田瀬ダムで得られた2003年宮城県沖の地震の観測記録

たが，太平洋戦争激化のため工事は一時中断され，その後1954年竣工した⁶⁾。2003年宮城県沖の地震の震央，および田瀬ダムの位置を図-8に示す。このときの震源と田瀬ダムの距離はおおよそ100kmであり，また常時満水位がEL. 215.0mであるのに対して地震発生時の貯水位は，EL. 202.33mであった。この地震により田瀬ダムで

は天端照明器具に転倒などの変状が見られ、下流面監査廊出口部分において堤体断面に至らない亀裂が認められた。しかし、これらはいずれも堤体の安全性に影響を与えるものではなかった。

(2) 田瀬ダムで観測された加速度波形

田瀬ダムではダムの上下の2ヶ所に地震計が設置されており、ここで強震記録がとられている。

宮城県沖の地震のときには上下流方向において、下部で 232.1gal、上部で 1023.7gal の大きな最大加速度が観測された。そのときの加速度波形を図-9 に示す。この図において(a)の3つは上部の記録、(b)の3つは下部の記録で、上から順に上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向であり、サンプリング周波数は100Hzである。

(3) 田瀬ダムの増幅特性と周期変動

最大加速度と振動周期の関係を調べるために、図-9 のように宮城県沖の地震のデータを、加速度の大きさがほぼ一定になるように、時間間隔 10.24sec の①～④までの4つのセグメントに区切り、これらをそれぞれセグメント①～④とした。各セグメントでのダム下部での最大加速度はセグメント①から順に 88.0gal, 232.1gal, 51.1gal, 20.7gal である。この地震の観測時間内の貯水位変動は十分小さく、貯水位の違いは無視できる。

セグメント①～④のダム下部に対するダム天端の増幅率を図-10 に示す。ここで、スペクトルはバンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化されている。図-10 でも上下流方向のみ明瞭なピークが見られ、その周期はおおよそ 0.15sec であるが、その周期には若干の違いがあることがわかる。1次モードに対応すると思われるこの周期は、セグメント①から順に 0.153sec, 0.160sec, 0.151sec, 0.148sec となっている。これらの周期変動量はわずかではあるが、最長の周期と最短のそれとでは割合にしておよそ 8%の違いが見られる。また、

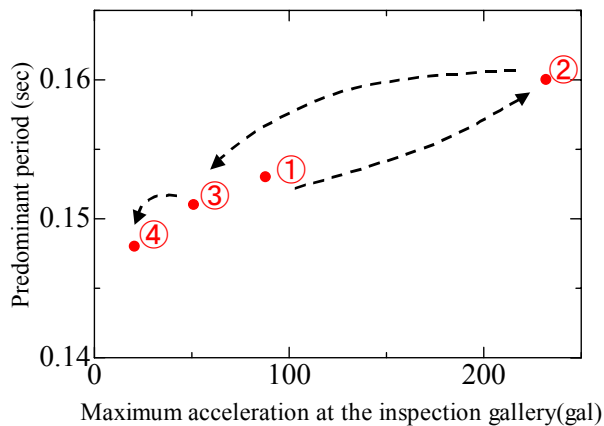
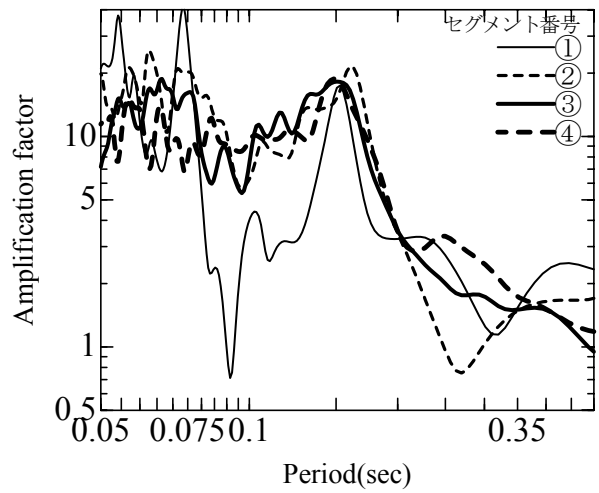
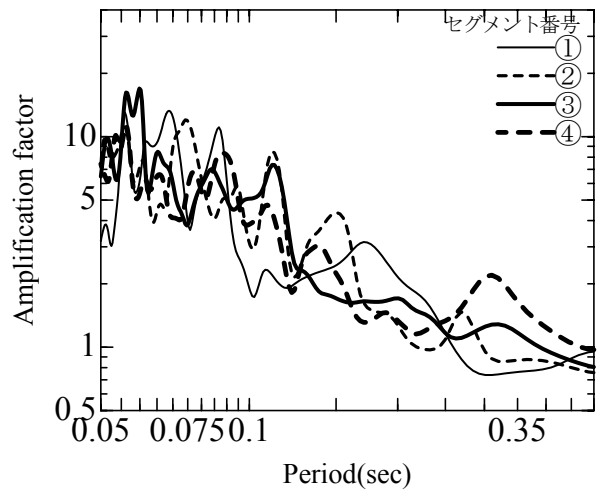


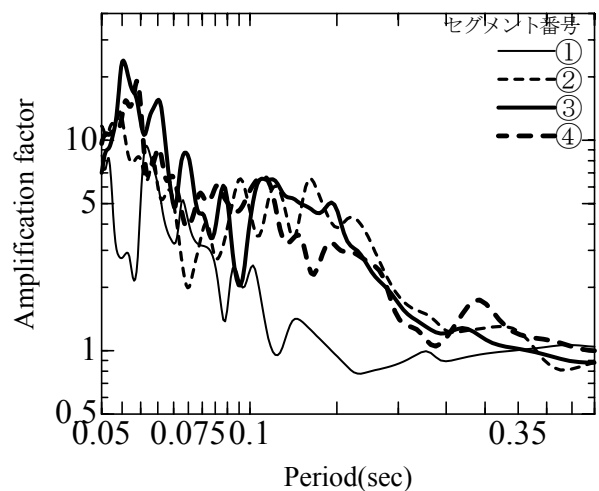
図-11 監査廊での最大加速度と卓越周期の関係



(a) 上下流方向



(b) ダム軸方向



(c) 鉛直方向

図-10 同一方向セグメントごとの増幅率

セグメント①→②にかけて周期が長くなり、その後セグメント②→③→④の順に短くなっており、主要動で一旦周期が最大となり、その後短くなっていく傾向は前述の賀祥ダムと同様である。また、図-10(b), (c)には明瞭なピークはなく、上下流方向のみで周期の変動が見られることもまた賀祥ダムと同様である。

田瀬ダムでの下部最大加速度と卓越周期、増幅率の関係を示したのが図-11である。この図においては、下部最大加速度が増加すると卓越周期が長くなる傾向が見られる。

ダムの卓越周期は地震開始のときから一旦長くなり、地震動が最大のときに最も長くなり、地震動が収まるにつれて短くなっている。ダムに地震によって非可逆的なクラックが入り非線形応答をしたならば、一度長くなった卓越周期は戻ることはないと思われるので、卓越周期の変動原因をひとまず動水圧と推察し、数値シミュレーションによって検討を行った。

4. 数値シミュレーションに基づく検討

(1) 解析手法の概要および解析モデル

ここでは、ダムー貯水系の動的応答シミュレーションを行うに当たり、時間領域 FE-BE 手法を用いることとした。この手法の大きな特徴は有限要素法と境界要素法を結合していることである。これにより有限要素法で不均質領域のモデル化ができ、境界要素法で無限均質領域をモデル化することができる。

本解析ではダム堤体を弾性体として有限要素法でモデル化し、貯水に関しては、非粘性・非回転・流速が小さいという条件の下に、ダム近傍ではダム上流面に作用する動水圧を評価するために有限要素法、遠方では貯水中の波動の放射条件を考慮するために境界要素法を用いて計算している。また、このとき基礎は剛体であると仮定している。この仮定を行うことで、基礎はダム堤体や貯水との境界において動的相互作用を受けず、基礎の状態量は既知の入力地震動として考えることができる。現行の重力式コンクリートダムの耐震設計では、上下流方向断面に関する二次元的取り扱いが一般的であることから、本研究でもダムを二次元体であると見なしシミュレーションを行った。表-2 にダムコンクリートの物性値を、図-12 に本解析で使用したダムー貯水系モデルの概略図を示す。ここでは簡単のためにダムは堤高 50 m、底面幅 50 m の三角形断面を持つものとした。

また、ここで用いた手法では、ダムの動水圧に関連する固体と流体の連成振動方程式は以下のように定式化されている⁹⁾。

表-2 ダムコンクリート物性値

弾性係数	36000N/mm ²
ポアソン比	0.2
密度	2400kg/m ³
圧縮強度	28.8N/mm ²
引張強度	2.88N/mm ²
引張破壊エネルギー	300N/m

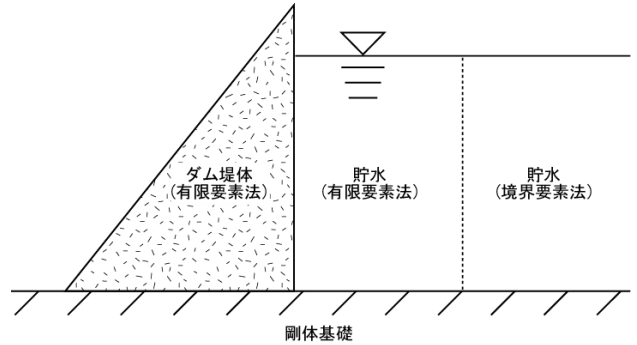


図-12 ダムー貯水系モデル概略図

ダム上流面と貯水の境界面において、非粘性流体に関する Euler の方程式から

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_f + (\mathbf{v}_f \cdot \nabla) \mathbf{v}_f + \frac{1}{\rho_w} \nabla p = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{v}_f$ は流体の速度、 ρ_w は流体の質量密度、 p は流体圧力である。この式を書き換えると次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_f + \nabla \left(\frac{1}{2} |\mathbf{v}_f|^2 \right) - \mathbf{v}_f \times \text{rot } \mathbf{v}_f + \frac{1}{\rho_w} \nabla p = 0 \quad (2)$$

流れが非回転で、流速が小さい場合には次式が成立する。

$$\text{rot } \mathbf{v}_f = 0, \quad |\mathbf{v}_f|^2 \approx 0 \quad (3)$$

よって、非粘性、非回転、流速小の条件のもとに、流体の方程式として次式が得られる。

$$\rho_w \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_f = -\nabla p \quad (4)$$

この式は流体の加速度と圧力勾配を線形関係で近似したものである。

(2) 解析結果および考察

入力加速度の強弱による振動特性の変動を検証するた

めに、ここでは同じ条件のダム基礎に対して最大値 10gal と 100gal の 2 つのパルス波形加速度を入力し、水深 45m で解析を行った。このとき、解析方法が実現象をよくシミュレートしているならば、卓越周期の変動傾向が見られるはずであるが、この 2 つの解析においては、全く同形のスペクトルが得られ、卓越周期の変動は見られなかった。

この解析ではダム堤体、貯水とそれらの動的相互作用を線形で表現しているため卓越周期の変動がシミュレートできなかったものと考えられる。実測されたような周期変動を再現するためには、式(2)の左辺第 2 項で表される非線形項の影響を加味する必要があると思われる。

式(2)において流速が小さいという条件をはずし、式(3)で $|v_f|^2 \approx 0$ としない場合、加速度と圧力勾配は線形関係にはならない。流速に関係する項が影響してくるので、入力加速度の大きさと動水圧とが非線形関係になる。この項を考慮すれば、より精度の高い動水圧の評価が可能と考えられるが、定式化は極めて煩雑になるため、今後更なる検討の必要がある。

5. 結論

本研究では、鳥取県西部地震および宮城県沖の地震で強い加速度が観測された賀祥ダムと田瀬ダムの強震記録をもとに地震応答特性を検討するとともに、数値シミュレーションを用いて地震時動水圧の効果の評価を試みた。その結果得られた結論は以下の通りである。

賀祥ダムおよび田瀬ダムで観測された記録から、下部に対する上部の増幅スペクトルを描くと、上下流方向のみでそれらの卓越周期に可逆的な変動が見られた。地震によってダムに構造的な被害が出ていないことを考えると、この卓越周期の変動は動水圧の働きによるものと推察した。

そこで FE-BE 手法を用いた数値解析シミュレーションで入力加速度の大きさのみ異なる条件でシミュレーショ

ンを行った結果、入力波の強弱による卓越周期の変動は確認できなかった。この原因は、定式化の段階で動水圧と加速度を線形関係で近似しているためと推測されるので、今後非線形関係を導入してシミュレーションを行うなどの必要がある。

謝辞：本研究に際し、鳥取県米子土木事務所および東北地方整備局北上川ダム統合管理事務所田瀬ダム管理支所には貯水位記録等のデータ提供に種々のご厚誼をいただいた。記して深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 土木学会鳥取県西部地震調査団：2000 年 10 月 6 日鳥取県西部地震被害調査報告，土木学会誌 Vol. 85，pp. 80 - 83，2000.
- 2) 岡田篤正，堤浩之：鳥取県西部地震の地震断層と周辺の活断層，2000 年 10 月鳥取県西部地震による災害に関する調査研究，pp. 96 - 103，2001.
- 3) 鳥取県米子土木事務所・賀祥ダム管理事務所：賀祥ダムパンフレット.
- 4) 佐々木隆氏，佐野貴之氏との私信.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立法人土木研究所・独立行政法人建築研究所・独立行政法人港湾空港技術研究所：平成 15 年 5 月 26 日宮城県沖地震に係わる現地調査報告書，2003 年 9 月.
- 6) 北上川水系猿ヶ石川田瀬ダムパンフレット.
- 7) 張宏遠，大町達夫：重力式コンクリートダム - 貯水系の地震時クラック解析のための FE-BE 手法，ダム工学，vol. 11，No. 4，266-274，2001.
- 8) 東平光生，大町達夫：時間領域 FE-BE 法を用いたダム-基礎-貯水系の振動解析手法，土木学会論文集，No422/I-14，381-390，1990.

(2005.?? 受付)

REVERSIBLE SHIFT OF PREDOMINANT PERIOD OF GRAVITY CONCRETE DAM ON STRONG MOTION

Nobuyuki KATAGIRI, Tatsuo OHMACHI, Shusaku INOUE

Lengthening of the vibration period of dams during strong earthquake shaking often due to the non-linearity of material properties. However, when we analyze strong motion records recently observed on two dams in Japan; Kasho Dam and Tase Dam, the lengthening is seen only in the upstream-downstream direction, and thereafter the periods soon shortened. Based on numerical simulation using the FE-BE method, discussion is made on one probable factor; that is, hydrodynamic pressure acting on the upstream face of the dams.