

長期的な地震観測記録に基づく コンクリート重力ダムの振動特性評価

柏柳 正之^{1*}・早川 誠一²

¹電源開発株式会社 技術開発部 茅ヶ崎研究所（〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88）

²有限会社湘南計測（〒252-0813 神奈川県藤沢市亀井野671-11）

*E-mail: masayuki_kashiwayanagi@jpower.co.jp

コンクリート重力ダムの振動特性は、基礎岩盤や堤体コンクリートの力学特性の影響を受け、仮にこれらの経年劣化や地震などの大きな外力による損傷が発生すると、振動特性が変化する可能性がある。完成後50年以上を経過した堤高145mのコンクリート重力ダムは、中越地震（2004年）や東日本太平洋沖地震（2011年）などの地震影響を受けた。本ダムでは1994年以降地震観測を継続しており、最も大きな地震応答が発生した中越地震時の前後では、漏水の一時的増加などが見られたが、特に堤体損傷は認められず、また振動特性の変化は認められなかった。本報告では、堤体振動特性に基づく堤体健全性評価法の検討として、堤体地震特性の経年変化やその他の計測結果から地震影響の有無について検討する。

Key Words : concrete dam, earthquake, monitoring, predominant frequency, soundness

1. ダムにおける地震観測の概要

長期にわたって使用されるダムには、耐久性と想定される荷重に対する強度が求められ、これらは設計・建設によって実現される。わが国では、近年多くの巨大な地震が発生し、種々の構造物に生じた損傷・被害は、設計時に想定した以上の荷重が構造物に作用する可能性があることを示唆した。このようなことから、ダムの安全性は、その時々最新の知見に基づき、継続的に検証することが重要である。ダム設計における支配的荷重は地震力である。このため地震観測によって地震時のダム応答を計測し、これに基づきその時点でのダムの構造特性を評価して、設計時に想定した状態と比較してその健全性を評価することが考えられる。本報告では、既存のコンクリート重力ダムの健全性を、多くの地震観測記録から検討した事例を示すこととする。

対象とするダムは阿賀野水系の上流部只見川に位置する田子倉ダム（電源開発株、1959年完成、以下単にダムという）である。ダムは、発電専用ダムとして田子倉発電所（最大出力380MW）のために設けられた。外観と基本諸元を、それぞれ図-1および表-1に示す。ダムの地震観測は完成直後から行われてきたが、現行の加速度計による地震観測は1994年から開始された。ダムにおける地震観測位置は、ダム中央部に洪水吐および発電所があり、これらに関わる水流を避けて、やや右岸側の22BL（最大高さ140m）の4標高および天端右岸部の岩盤上の合計5

箇所にて行っている。それぞれの観測位置での地震計配置は、ダム軸方向、ダム軸直交方向（上下流方向）および鉛直方向の3成分である。22BLではプラムラインによるダム変形測定も併せて実施されている。地震計の配置および状況を図-2に示す。

ダムの地震観測は、底部観測位置（E4）において2 galをトリガー信号として観測することとしており、1994年以降、これまで約470個のデータを得ている。地震によるダムの最大応答は、中越地震（2004年、M6.8）時に発生した。詳細は後述する。また、東北地方太平洋沖地震（2011年）では、震源距離が400km以上と大きく、その影響は小さかった。

2. 観測されたダムの地震応答

田子倉貯水池（表-1参照）は大規模貯水池であり、1年間をサイクルとして運用されている。主要な流入は、雪解け水、梅雨や台風による降雨であり、このため春から秋にかけては満水位（EL 510m）に近い状態にあり、冬期に徐々に低下して3月頃にはほぼ低水位（EL 458m）となる。貯水位状況および1994年以降に観測された地震記録のうちE4の上下流方向成分を図-3に示す。観測された地震記録は、比較的高い水位の期間が多かった。

ダム天端（E1）およびダム底部（E4）の観測記録を用い、ダムに入力する地震動の特性として、水平動と鉛直動の比（水平動/鉛直動、応答比とい

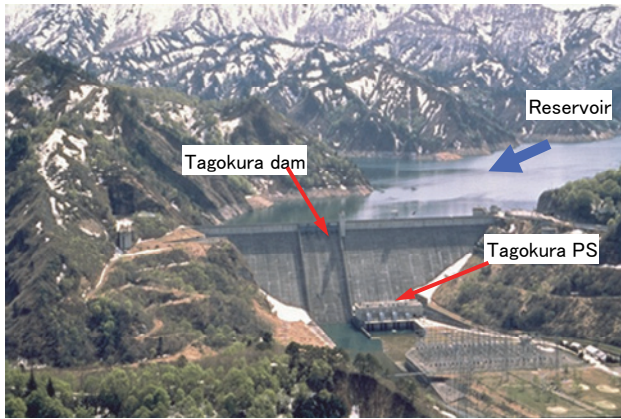


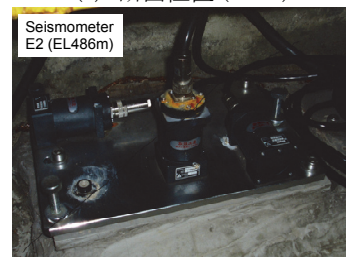
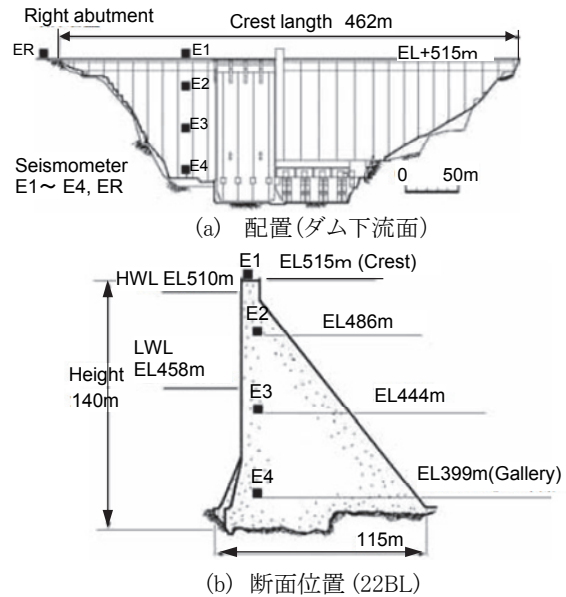
図-1 田子倉ダム（電源開発株）

表-1 田子倉ダムの基本諸元

項 目	内 容
堤高	145 m (22BL 140m)
堤頂長	462 m
堤体積	$1950 \times 10^3 \text{ m}^3$
天端標高	515m
勾配	上流側: 鉛直, 下流側: 1 : 0.82
貯水池 (田子倉貯水池)	総貯水容量 $494 \times 10^6 \text{ m}^3$ 有効貯水容量 $370 \times 10^6 \text{ m}^3$ 満水位 EL 510m, 低水位 EL 458m

う)を求めた。これを図-4に示す。応答比は、E4ではほぼ1であり、E1では上下流方向では約2.3、ダム軸方向ではほぼ1である。ダムの応答特性はダムの高さ方向に変化し、最も応答の大きい天端では上下流方向の揺れが卓越する。このような特性は一般的なコンクリート重力ダムの応答特性と一致する。ダムの応答解析においては、ダムの応答が水平方向に卓越することから、入力条件として水平動のみを考慮することがある、しかしながら、計測結果は、ダムの底部では水平動と鉛直動が同程度に発生することがあることを示しており、鉛直動がダム応答に与える影響の検討が必要である。

観測された加速度応答に関して、E4位置における観測値とそれぞれの観測位置での倍率を加速度応答倍率と定義する。応答の大きい上下流方向の水平加速度応答倍率に関して、ダム天端の応答倍率およびこれと応答の大きさとの関係、さらに観測断面内での分布を図-5に示す。ダム天端（E1）の応答倍率は、3.5から14程度まで分布し、平均的には7.7であった。応答値が小さな場合では応答倍率は前記の範囲ばらつくが、応答値が大きくなるにつれて収束する傾向（図-5b参照）がある。またダムの応答は特にダム天端付近で顕著であり、E4からE2まではほとんど剛体的に挙動（図-5c参照）する。これはダム断面形状に起因するものであり、さらにダムの耐震性能を向上させる手段として、ダム天端付近の



右: 上下流方向, 中央: 鉛直方向, 左, ダム軸方向
(c) 設置状況

図-2 地震計配置および設置状況

剛性を高める方法が有効であることを示していると考えられる。

次に、ダムの動的特性を定量的に評価するために、観測記録から応答の卓越振動数を求める。卓越振動数の算出方法としては、応答加速度のスペクトルから求める方法と伝達関数により求める方法がある。本報告では、地震動そのものの影響が緩和されてダムの応答特性が現れやすい後者の方法を用いる。すなわち、ダム底部およびダム天端の上下流方向加速度を用いて、それぞれのスペクトルの比として伝達関数を定義した。これを式(1)に示す。伝達関数から卓越振動数を求めた事例を図-6に示す。伝達関数にはいくつかのピークが認められ、必ずしも最大ピークが低次に出現するとは限らないが、ここでは低次の主要ピークをダムの卓越振動数として採用した。

$$H(f) = \frac{P_{E1}(f)}{P_{E4}(f)} \quad (1)$$

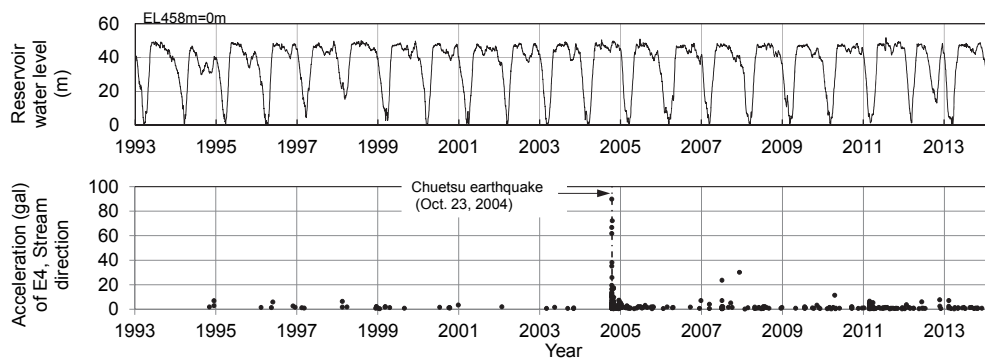
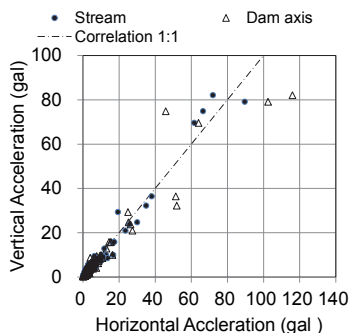
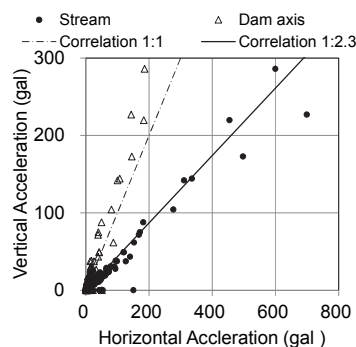


図-3 貯水位水位および地震観測結果 (E4) (貯水位は EL458m を 0 とした)

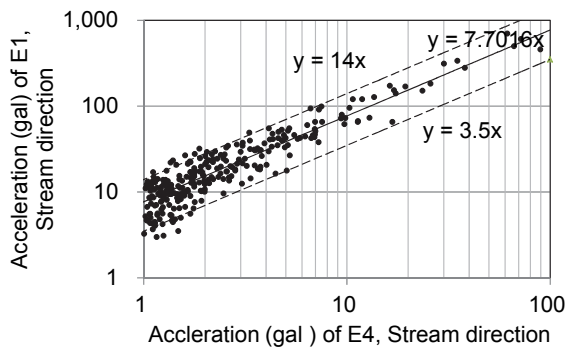


(a) ダム底部 (E4観測点)

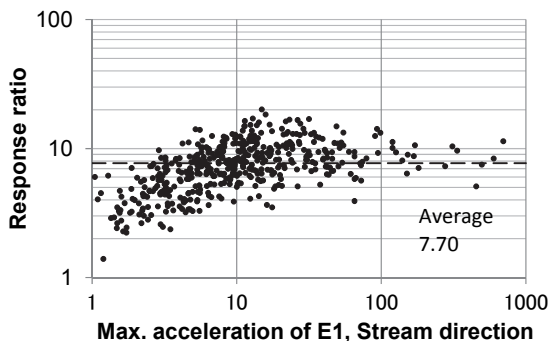


(b) ダム天端 (E1観測点)

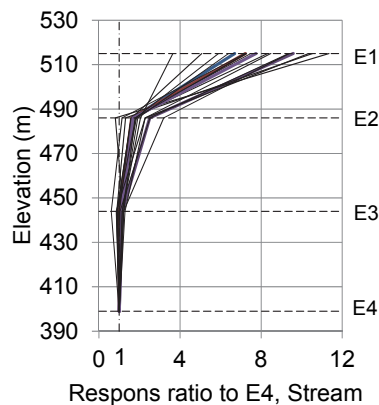
図-4 水平動と鉛直動



(a) ダム天端の加速度応答倍率



(b) ダム天端の加速度応答と倍率



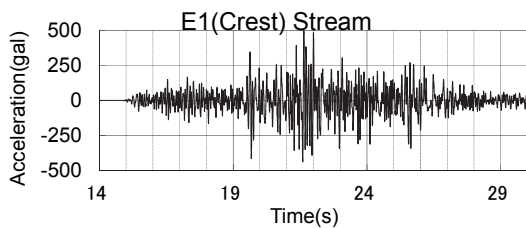
(c) ダムの加速度応答分布 (22BL)

図-5 ダムの加速度応答

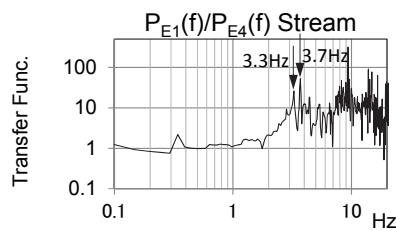
ここに、 $H(f)$: 伝達関数、 $P_{Ei}(f)$: Ei ($i=1,2,3$) 位置における加速度応答のフーリエスペクトル、 $P_{E4}(f)$: ダム底部 (E4) における加速度応答のフーリエスペクトル

観測記録のうち、天端応答が40galを越える主要

なデータから求めた卓越振動数を図-7に示す。同図にはダム-貯水池-岩盤モデルを用いるFEM¹⁾により求められた1次および2次固有振動数を合わせて示した。またダムの動的挙動に与える温度の影響をみるために、気温10℃程度を境として夏期 (5月~10月)



(a) 加速度応答の例



(b) 伝達関数の例

図-6 卓越振動数の算定方法

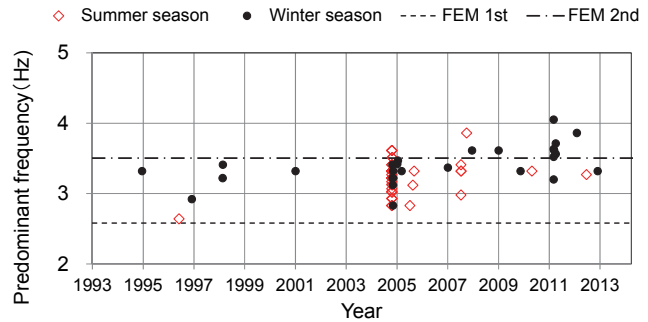
および冬期（11月～4月）別に結果を示した。

これより卓越振動数は、概ね1次および2次固有振動数の周辺に分布する。分布の傾向は、天端応答加速度との関係では、応答が小さい場合はややばらつきが大きく、応答が大きくなるにつれて収束傾向を示す。同様に、時間的な関係は、2004年10月の中越地震時に多くの余震による影響を受けたためデータが集中しているが、中越地震の前後において顕著な変動傾向はみられない。季節による分布性状に関しても、特に顕著な傾向は認められない。

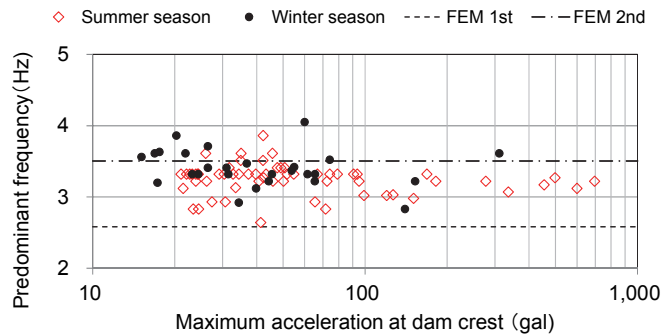
なお、貯水によるダムの固有振動数に与える影響はあるが、本ダムでは比較的高水位での貯水池運用期間が長く、また運用水位幅はダム高さの1/2以下であることから、貯水位による補正を行ったとしても図-7の結果に与える影響は大きくないと考えられる。

3. 中越地震時によるダムへの影響

2004年10月23日に発生した中越地震（マグニチュード6.8）は、多数発生した余震を含めてダムとの震源距離が20km～40km程度、最小13kmと小さく、ダムには大きな加速度応答が生じ、200回を超える地震が記録された。このうち天端での応答加速度が300galを越える地震が5回あった。主要な余震を含めて、中越地震の震源とダムの位置関係および地震観測記録を、それぞれ図-8²⁾および図-9に示す。発電所では本震直後に送電設備が揺れによって緊急停止して、一時発電不能となったが、地震後の目視点検では、ダムやダム付属設備に



(a) 卓越振動数の履歴



(b) 卓越振動数と最大応答加速度の関係

図-7 ダムの卓越振動数

ならんら損傷は発見されなかった。

中越地震時のダム天端応答倍率（図-9b参照）について、中越地震およびその余震（2004年10月23日～2004年12月31日）と観測記録全体および中越地震前の観測記録と比較した。これより、中越地震時の記録は、他とほぼ同等であることがわかる。また、ダムの卓越振動数も、中越地震によって顕著に変化した様子はうかがえない（図-7a参照）。

ダムの漏水と変形に着目して図-10に示す。ダムの漏水量には貯水位および気温の変動に対応する年間変動が認められ、貯水位の低い冬期および気温の上昇する夏期に低下する傾向がある。中越地震後の漏水量変動は、傾向は同じであるが変動幅が徐々に大きくなった。これに関して詳細調査を行った結果、ダム上流面の一部継ぎ目からの漏水が主要な原因であることがわかった。これは地震により何らかの継ぎ目損傷が発生し、これを通じて監査廊に漏水として発生したものと考えられる。このような漏水は、適切に排水処理されており、2次元断面で設計されているダムの安全性への影響はないものと考えられる。ダムの変形はブラムラインにより計測されており、ダム底部のEL390m位置を不動点として各測定点の変位として整理（図-10b参照）した。これよりもっとも変位の大きいダム天端での変動は、最大15mm程度下流側で完成直後から推移し、中越地震後も同様な傾向を示した。これより中越地震を原因とするダムの変形は発生しなかったものと考えられる。

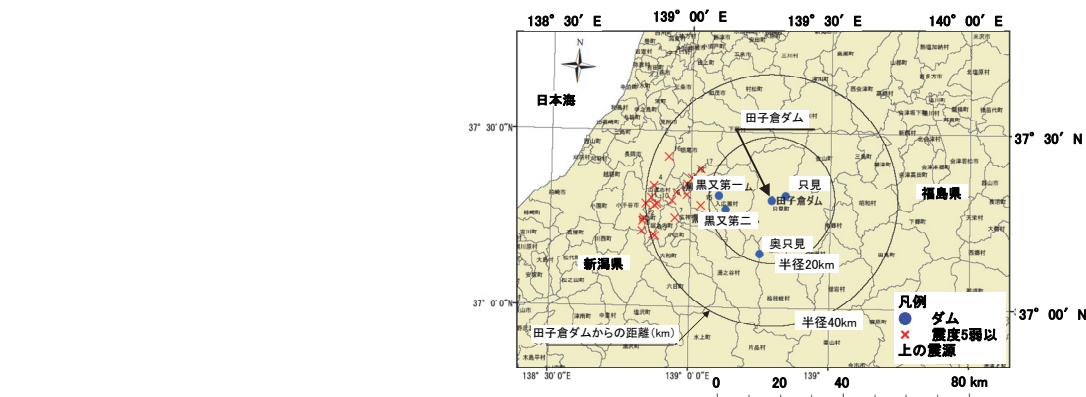
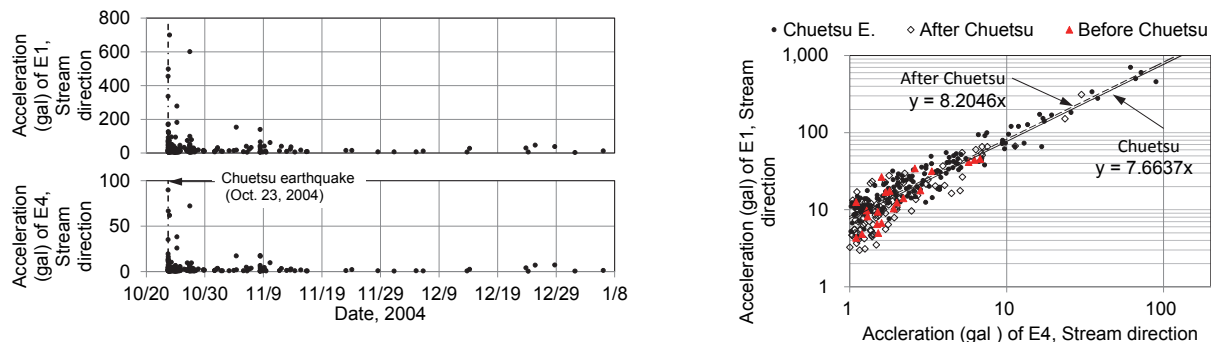


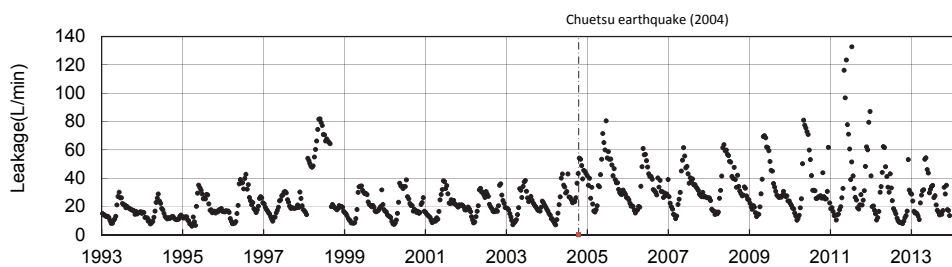
図-8 中越地震の震源とダム位置



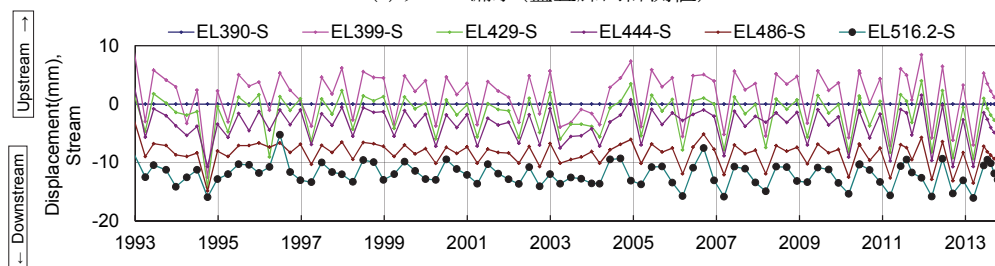
(a) 中越地震の地震観測結果, 最大加速度

(b) 加速度応答倍率

図-9 ダムにおける中越地震の観測



(a) ダムの漏水(監査廊内計測値)



(b) ダムの変位(22BL)

図-10 地震によるダムへの影響

4. ダムの健全性評価とまとめ

2章および3章で示した地震時のダム応答観測記録から、以下がまとめられる。

- (1) ダム底部, すなわちダムに入力する地震動は, 水平方向成分と鉛直方向成分が同程度であることが多くある。これはダムに関する地震応答解析における留意点であるとともに, 鉛直動によるダム応答への影響について, 定量的な評価が必要である。
- (2) 水平および鉛直方向に同程度の入力地震動の

場合でも, コンクリート重力ダムの天端加速度応答は, 上下流方向成分が卓越する。

- (3) ダムの天端では地震応答は増幅し, 本ダムでの応答倍率は平均的には7.7倍程度であった。増幅は特にダムの上下流方向の厚さがうすくなる天端付近で顕著となる。ダム附属構造物は通常天端付近に設置されることから, ダム応答に起因する入力地震動よりも格段に大きな加速度が作用して, その耐震性能に影響を与える。さらに, 水と接するゲートなどでは応答加速度に比例する動水圧が作用する。従

って、ダム天端付近の耐震性能やダム付属構造物の耐震性能の確保のための一手段として、ダム天端応答の増幅を緩和する補強方法が考えられる。

(3) 地震観測記録に基づき評価されたダムの卓越振動数は、FEMによる低次の固有振動数とほぼ一致するものの、応答が小さい範囲ではややばらつきが大きく、大きな応答になるとばらつきは小さくなる傾向があった。地震観測断面がダム中央部ではなく右岸側にあり、2次モードが出現しやすい傾向があり、ばらつきの一要因となったと考えられる。また、入力動の特性はダム応答にも影響するが、ダム応答が大きくなるにつれて入力動の特性よりはダムの動的特性が判別しやすくなるものと考えられる。

(4) 金銅ら³⁾は堤体に亀裂が生じたコンクリート重力ダムの固有振動数の変化を数値解析により評価し、水平亀裂によって明瞭に固有振動数が変化することを示している。本ダムの卓越振動数は、完成後から現在に至るまでほぼ同程度の値を示しており、これは、動的挙動に影響を与えるような地震損傷や経年劣化などが発生していないことを示しているものと考えられる。すなわちダムの動的挙動に影響を与えるような損傷は発生していないものと考えられる。

(5) 本ダムでは季節的な温度変化による卓越振動数への影響も明瞭ではない。コンクリート重力ダムは、通常15m間隔の横継ぎ目で分離された複数のブロックによって構成される。本ダムでは、横継ぎ目には上下流方向の力を隣接するブロックに伝達するためのキー（凹凸）が設けられ、さらに継ぎ目を一体化するためのグラウトが施工されている。このため気温が低下してコンクリートに収縮が発生した際にも継ぎ目は一体化して、地震に対しては一体化した3次元的な挙動を示したものと考えられる。

(6) このようなダム挙動は、大きさの異なる地震や貯水位の変動に対してダムは線形的に応答し、地震による損傷や経年劣化の影響も認められず、季節的な温度変化があったとしてもダム全体が一体化して応答している状態を示しているものと考えられる。また、地震に起因して継ぎ目構造の一部の損傷等によって漏水が増大したものの、安全に排水処理されてダムの安定性には影響を与えていないものと考えられる。ダムの変形は、一年を周期とする一定の変動パターンを示し、特異な挙動は見当たらない。これより現状におけるダムの健全性が評価された。

(7) 以上のような長期的な地震観測に基づく卓越振動数の評価・分析は、既設ダムの健全性評価の一手法として有効な手段であると考えられる。地震観測と同じようにその時点でのダムの卓越振動数を評価できる常時微動計測は同様な手法となりうるが、継続的な計測と数値解析などによる検証が不可欠である。また、貯水位の変動がダム挙動に与える影響については、今後検討する予定としている。

参考文献

- 1) 有賀義明：地震観測記録に基づく既設ダムの地震時挙動の三次元再現解析，日本地震工学会，第7巻，第2号(特集号)，pp.130-143，2007.
- 2) 柏柳正之，池口幸宏，中山義紀，浅賀裕之：中越地震時の観測記録に基づくコンクリート重力ダムの健全性評価，電力土木，No.319，pp.65-71，2005.
- 3) 金銅将史，佐々木隆，小堀俊秀，加嶋武志：振動特性の変化に着目した既設重力式コンクリートダムの健全性評価，大ダム，No.227，pp.112-118，2014.

VERIFICATION OF SOUNDNESS OF A HIGH CONCRETE GRAVITY DAM USING SEISMIC MONITORING DATA

Masayuki KASHIWAYANAGI, Seiichi HAYAKAWA

A concrete gravity dam 145m high, located in central Japan, has been in operation for over 50 years. The seismic response has been monitored since 1994 in the major section of the dam. Several severe earthquakes have affected the dam stability several times, resulting in the maximum crest acceleration response of 700 gal. Such severe response of the dam to earthquakes may cause certain defects and accelerate the aging of the dam. In this paper the soundness of the dam against the seismic impacts and/or the aging of the dam is studied using seismic response data. The typical responses of the dam against a significant earthquake are also introduced in terms of the verification of the dam's soundness.