

地震時応答記録に基づくコンクリートダムの動的応答特性の評価

柏柳 正之^{1*}・大西 豪昭¹・長田 直之²・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開発設計コンサルタント設備保全技術開発センター（〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88）

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

コンクリートダムの地震応答は、堤体および基礎岩盤の力学特性、堤体の横継目状況や貯水位に依存し、このため堤体の地震時の動的応答特性の監視は、堤体自体の健全性評価や劣化検知に有用と考えられる。本報告では、規模の異なる複数のコンクリート重力ダムおよびアーチダムにおいて計測された地震記録を用い、応答の増幅特性および卓越振動数について検討した。コンクリート重力ダムは堤頂付近での増幅が顕著であり、それより低い領域での増幅は小さく、アーチダムの増幅は、堤頂に向かって漸増する。コンクリートダムの卓越振動数への影響要因は、貯水位が顕著であり、温度変化に伴う継目の開閉の影響も認められる。しかしながら、評価された卓越振動数はこれら要因では説明できないばらつきが認められる。

Key Words : concrete gravity dams, arch dams, dynamic, response, frequency, monitoring data

1. はじめに

ダムにおける地震観測は、変位計測や漏水監視などと同様にダムの安全管理の一環として実施されている。コンクリートダムやフィルダムなどのダム形式に関わらず、地震計は、ダムの基礎あるいは底部および天端に配置することを基本として、地震時のダムの加速度応答が計測される。これは、地震時のダムの点検実施のための判断基準として用いられる。一方、個別の地震毎に得られた加速度応答記録に基づいて、その都度ダムの安全性や状態を判断することは、記録の扱いがやや煩雑となることや判断のための基準値がないことなどから、実務的には難しい点がある。このため、ダムの保守現場においては、ダムの地震記録は、最大値を確認する以上の分析はされずに、蓄積されていることが多い。

ダムの地震時挙動は、動的な荷重に対する応答であり、ダムの動的な力学特性に依存するが、さらに貯水や基礎および周辺岩盤との連成作用を含む。このため、ダムの地震時挙動の分析は、ダム-基礎岩盤-貯水池系の動的特性を理解する上での基礎資料となる。レベル2地震などの大規模地震に対するダムの安全性照査においては、解析手法を用いてダムの地震時挙動を精緻に再現することが必要とされる。このような解析手法や解析に用いるモデルの妥当性検証には、観測されたダムの地震時挙動が

有用となる。

筆者らは20年以上の地震観測が行われて、またその間ダムの近傍に規模の大きな地震が発生したコンクリートダムを対象として、地震時挙動の分析や変形、漏水計測に基づき、現時点でのダムの安全性評価を行い¹⁾、ダムの安全管理における地震記録の有用性を示した。ダムの健全性評価の手法として、佐々木ら²⁾は常時微動をコンクリート重力ダムの健全性評価に活用する方法を試みており、貯水深や気温がダムの卓越振動数に与える影響を実証的に示し、この結果は地震記録から得られる卓越振動数と整合することを示している。

本報告では、現場におけるダムの安全管理への地震記録の利用に着目し、複数のダムやダム形式としてコンクリート重力ダムおよびアーチダムを対象として、これらで観測された地震時応答加速度記録を用いて、2つの観点から詳細な分析を行う。まずダム現場の保守要員が、地震観測記録から簡易にその時点でのダムの状態を判断できるように、基礎と天端の応答倍率やその分布を整理して、基本的なダムの動的応答特性を明らかにする。また、より詳細な安全管理のための指標を得ること、および、解析検討のためのダムの動的特性を把握することを目的として、ダムの卓越振動数を整理し、影響する要因分析を行う。

2. ダムの諸元と地震観測の方法

本報告で対象とするコンクリートダムの位置および諸元・地震観測仕様をそれぞれ図-1および表-1に示す。地震観測は、基本的にはダムの最大高さの断面において基礎および天端に加速度計測のための地震計を設置して行っている。地震計配置の事例として、田子倉ダムにおける配置を図-2に示す。



図-1 地震観測を行っているコンクリートダムの位置

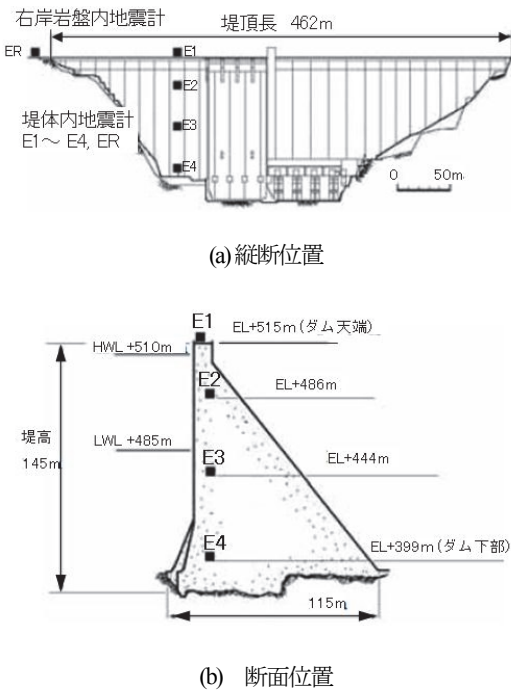


図-2 コンクリートダムの地震計の配置事例、田子倉ダムの事例（文献1）より引用、一部修正）

表-1 検討に用いるダムの諸元

ダム名	形式	完成年	堤高(m)	地震観測開始	地震観測仕様 (設置個所, 感震器)
糠平	G	1956	76	1987年	天端, 基礎および右岸基礎, 勝島製作所製 (SD-240G)
田子倉	G	1959	145	1994年	天端, 中間 (2点) および基礎, ミットヨ製 (JEP-4A3)
佐久間	G	1956	155.5	1981年	天端, 基礎および右岸アバット, アカシ製 (JEP-4E3)
風屋	G	1960	101	2007年	天端および基礎 応用地震計測製 (Epi Sensor)
池原	A	1964	111	1987年	天端および基礎, アカシ製 (JEP-4A1)
坂本	A	1962	103	2007年	天端および中間標高 応用地震計測製 (Epi Sensor)

ダム形式 G: コンクリート重力ダム, A: アーチダム

3. コンクリートダムの加速度応答

一般にコンクリートダムの地震時の天端加速度応答は、ダム底部に入射する地震動の特性にかかわらず、形状的な特徴からコンクリート重力ダムでは上下流方向、アーチダムでは上下流方向を含むダム軸法線方向が卓越する。ここで、ダムにおける地震時加速度記録を用い、ダム基礎あるいはダム底部および天端での最大応答値の比として応答倍率を定義する。それぞれの応答の最大値は、厳密には同時刻に発生するものではないが、ほぼ同時に発生してダムへの地震の入射に対する天端の応答とみなすことができる。コンクリート重力ダムおよびアーチダムにおける応答倍率の観測結果を、それぞれ図-3および図-4に示す。一部、ダム底部での観測がされていないダムでは、岩盤内の監査廊あるいは下流等の岩盤部のデータを代用した。いずれのダムおよびダム形式においても、天端応答加速度とダム基礎の加速度には線形関係が認められる。これに対してコンクリートダムの地震応答が非線形となる場合やある時点から顕著に異なる場合では、地震によってダムや基礎岩盤に損傷等の異常が発生している可能性が疑われるが、図-3あるいは図-4ではそのような兆候は認められない。

各ダムにおけるダム基礎と天端の応答倍率について、この2点間の標高差との関係を整理した。これを図-5に示す。コンクリートダムの応答倍率は、地震計の設置位置の標高差に対して線形関係が認められる。これから、高さの異なるダムの加速度応答が、ダム高さに比例するものとして、高さ100mのダムにおける応答に換算する。変換式を式(1)に示し、これをここでは等価応答加速度と定義する。

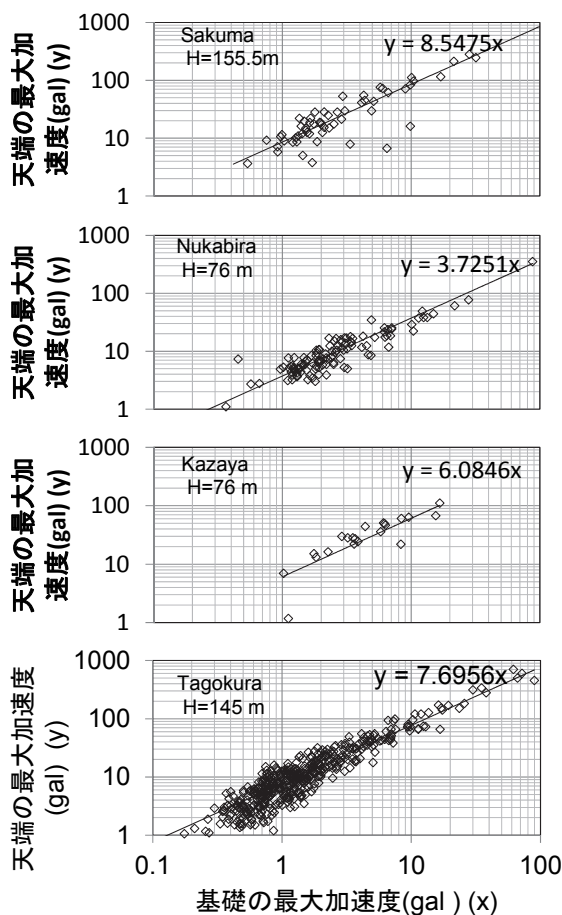


図-3 コンクリートダムの応答倍率

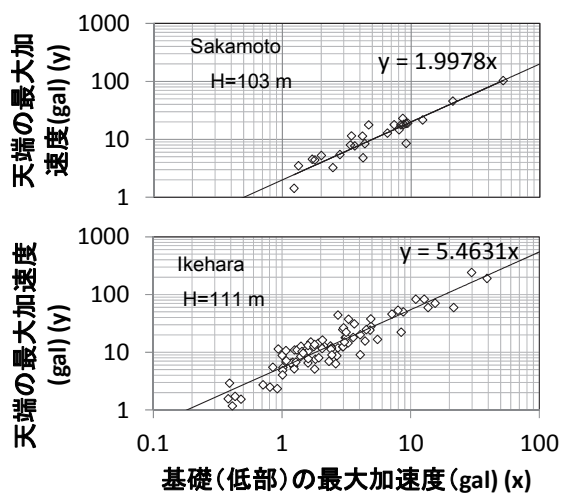


図-4 アーチダムの応答倍率

$$A_{Ni} = \alpha \cdot A_i \cdot 100/H' \quad (1)$$

ここに、 A_N ：100m当たりの標高差とした場合の等価応答加速度、 A_i ：観測加速度、 H' ：着目している応答値が得られる位置の標高差、 α ：定数である。

これを各ダムの天端加速度応答に適用し、ダム形式別

に重ね合わせて図-6 に示す。全体としてのデータのまとも性は良く、特に、ダムに入力する地震加速度が大きくなるにつれて良好となる。これは、コンクリートダムの加速度応答は、検討したダムの範囲では、ダム高さへの依存性が顕著であることを示している。

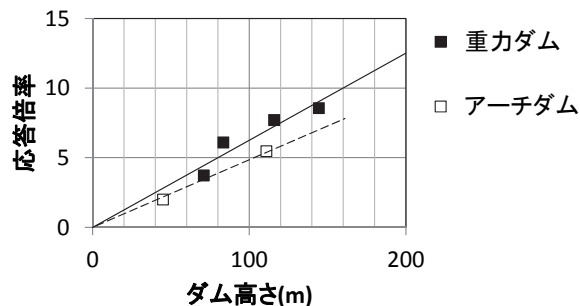
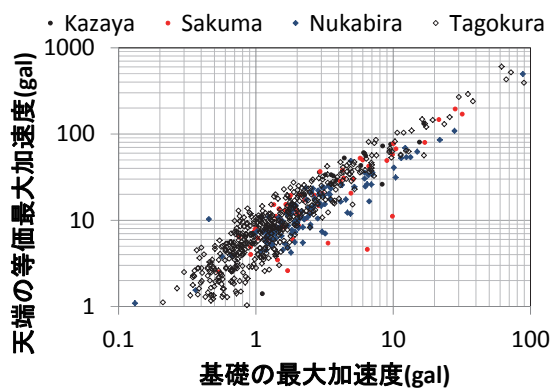
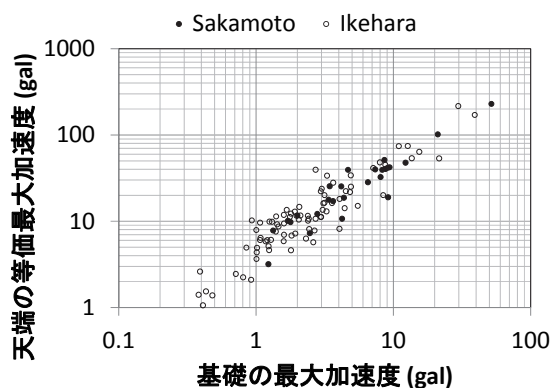


図-5 コンクリートダムの応答倍率



(b) コンクリート重力ダム



(a) アーチダム

図-6 コンクリートダムの等価加速度応答

次に、等価応答加速度に基づく応答倍率の断面分布をみる。ダム形式別に加速度応答倍率の断面内分布を図-7 に示す。コンクリート重力ダムの応答は、ダムの天端付近で大きく増幅し、それより低標高での応答倍率は大きくない。アーチダムについては観測データが十分ではな

いが、高さの中ほどから上部で平均的に応答が漸増するようである。コンクリートダム地震時挙動の解析検討事例は多くあるが、加速度応答の断面分布に言及している事例はほとんどなく、図-7 に示す観測結果の妥当性は、今後解析検討により明らかにしたい、現時点では、ダム形式による加速度応答分布の差は、ダム断面形状の高さ方向の変化に対応するものであり、コンクリート重力ダムでは断面幅の縮小傾向が顕著であり、アーチダムでは断面幅が比較的均一であるためと考えている。

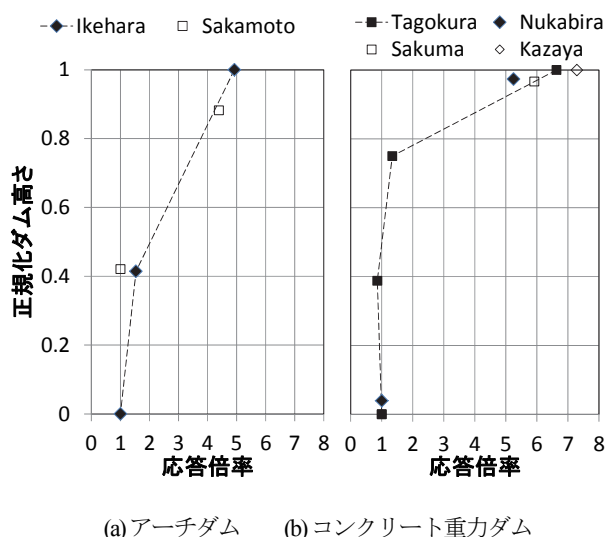


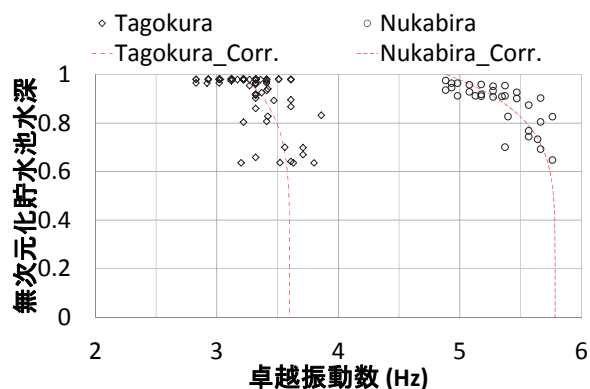
図-7 コンクリートダムの加速度応答分布

4. コンクリートダムの卓越振動数

ダムの卓越振動数の評価法として、地震応答の波形分析から求める方法および固有値解析や応答解析などの解析的方法がある。波形分析では、ダム基礎およびダム天端の2点間のスペクトル比により定義される伝達関数による方法が多く用いられる。また、解析的方法では、ダム地点の実態に適合する解析条件が必要とされるが、種々の理由により困難であり、定量的な評価を難しくしている。この理由としては、経年的に変化するコンクリートの力学特性を、評価しようとする時点で精度よく評価することが難しいこと、岩盤および貯水と堤体の連成作用を評価する手法に評価結果が依存することなどがある。ここでは、地震応答の波形分析から評価した卓越振動数を示し、卓越振動数の評価に与える要因として、応答加速度の大きさ、卓越振動数の算出方法、経年変化および季節変動について考察する。

ダムの地震時加速度応答記録を用い、ダム基礎とダム天端の伝達関数から評価したダムの卓越振動数の一例として、コンクリート重力ダムに関して、無次元化した貯水池水深との関係を図-8に示す。図には貯水池との連成作用による動水

圧の影響を考慮した回帰線³⁾を併記している。評価された卓越振動数は、貯水池水深の増大、すなわち連成する貯水のマスの増大に従って低下する傾向を示す。一方、同じ貯水深での卓越振動数は、比較的広い範囲に分布し、卓越振動数に与える要因として貯水以外の要因があることがうかがえる。このような要因分析として、地震観測結果から評価される卓越振動数に対して、天端応答加速度、解析的な評価方法との関係および経年変化について、整理する。これらを図-9および図-10に示す。解析による卓越振動数の評価では、解析モデルとして堤体、基礎岩盤および貯水を含む三次元モデルと用い、貯水と堤体の連成を考慮する方法として、Westergaard式により評価される付加質量を堤体に加える固有値解析(以下、固有値解析という)および貯水・堤体の連成解析による応答解析(以下、応答解析という)を適用する。また、卓越振動数の解析値は、解析に用いる堤体のせん断剛性などの解析物性に依存するが、ここでは一般に実施される実応答と解析の合わせ込みによる物性調整は行っていない。なお、応答解析では、堤体卓越振動数を含む広い周波数領域が卓越するパルス波を用いる。



注) 破線は文献3) を参照して算出した回帰線

図-8 コンクリート重力ダムの卓越振動数

卓越振動数の応答加速度の大きさへの依存性(図-9参照、図中○の大きさと天端応答加速度の大きさを示す)は明確ではない。既述のように、コンクリート重力ダムの地震時の天端応答加速度は、堤体基礎での地震動の大きさに応じた線形的な関係(図-3参照)を示す。両者をまとめれば、コンクリート重力ダムの卓越振動数のばらつきの原因は、観測された範囲では、地震動の大きさではないことを示している。

解析によって評価される卓越振動数は、貯水位の増加に伴い低下し、観測結果との整合性は、固有値解析、応答解析共に、貯水位全域に対して良好である。一方、固有値解析は、満水位付近での卓越振動数の低下傾向は応答解析に比べて大きく、観測結果からややかい離しているように見える。

卓越振動数の経年変化および季節変動(図-8参照)では、

明瞭な傾向は認められない。対象ダムにおける卓越振動数の評価期間は、ダム完成後35年経過後であり、特に試験結果はないが堤体コンクリートの物性はほぼ一定と推定され、ダムの卓越振動数に与える影響はないものと考えられる。コンクリート重力ダムでは、横継目が周辺の気温によって開閉し、そのためにダム全体の見かけの剛性が変化して、卓越振動数が冬季に比べて夏季に大きくなることが予想されるが、評価された卓越振動数にはややその傾向はあるものの明瞭ではない。そのような傾向を見出すためには、より詳細な検討が必要と考えられる。また、中越地震(2004年10月)およびその余震が震源距離20km程度の近傍で発生し、顕著な影響を受けているが卓越振動数にはその前後において明瞭な変動は認められない。

同様に、アーチダムについて、地震記録により評価された卓越振動数の特性、およびその経年・季節変化を、それぞれ図-11および図-12に示す。これらより、卓越振動数の貯水への依存性については解析により再現できること、固有値解析では満水位付近での卓越振動数の低下が相対的に大きいこと、卓越振動数の経年・季節変動は明瞭でないなど、コンクリート重力ダムの地震記録により評価された卓越振動数とはほぼ同様な特性を示す。

検討対象のアーチダムでは、ダム建設と同時に作成した堤体コンクリートの供試体による力学特性試験をダム完成後から継続して実施している³⁾。これによれば地震観測期間に相当する過去30年間では、試験数は多くないが弾性係数が5%程度増加する傾向を示している。弾性係数が卓越振動数に与える影響は、片持ち梁の固有振動数に対する式を流用⁴⁾すれば弾性係数の平方根に半比例であり、5%程度の変動は卓越振動数では2.5%程度の影響となるが、図-10に示される卓越振動数の状況では判読することは難しい。

5. まとめ

地震を受けたコンクリートダムの、その時点での安全状態や力学特性の把握を目的として、ダムにおいて観測された長期間の地震観測記録の分析を行った。得られた結論を以下に列記する。

- (1) コンクリート重力ダムおよびアーチダムの地震時の加速度応答は、ダム形式別にダム高さへの依存性が顕著であり、地震観測点である天端応答は、入力するダム基礎での大きさに対して線形関係を示す。この関係を利用すれば、既存の地震記録に基づく線形関係からの乖離としてダムの異常を検知することが可能と考えられる。
- (2) コンクリートダムの卓越振動数は、貯水深に対して明瞭な依存性を示し、その傾向は解析によっても明瞭に再現できる。一方、同じ条件でも卓越振動数のばらつきがあり、コンクリートダムの卓越振動数に与える要因へについて更

なる検討が必要である。

- (3) コンクリートダムの応答倍率や卓越振動数は、ダムの基本的な特性を示すものであり、ダムの安全性や健全性評価のための保守管理上の指標となりうる。

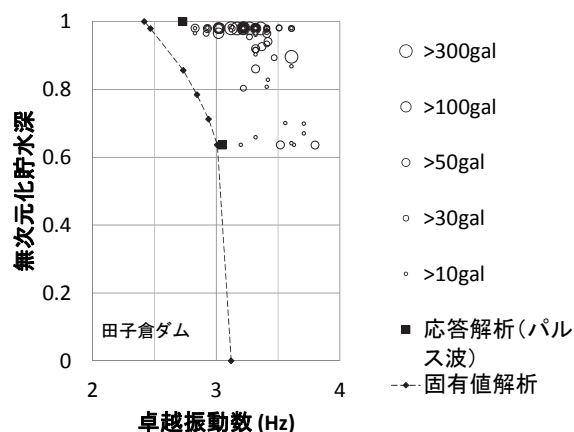


図-9 コンクリート重力ダムの卓越振動数と貯水位との関係

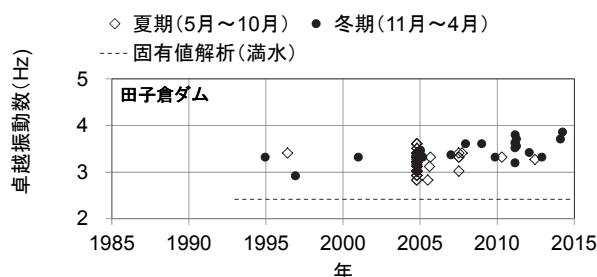


図-10 コンクリートダムの卓越振動数の経年変化

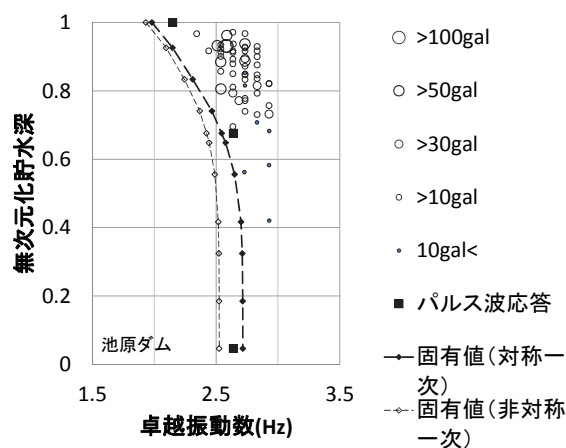


図-11 アーチダムの卓越振動数と貯水位との関係

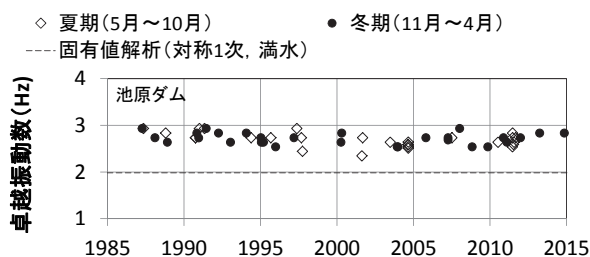


図-12 アーチダムの卓越振動数の経年変化

参考文献

- 1) 柏柳正之, 早川誠一: 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, 第 43 回岩盤力学シンポジウム講演集, pp.227-232, 2015.1
- 2) 佐々木隆, 金銅将史, 小堀俊秀, 加嶋武志, 大舘渉: 重力式コンクリートダム堤体の健全度診断における常時微動計測の活用に関する検討, ダム技術, No. 313, pp. 18-30, 2012.10
- 3) 金銅将史, 小堀俊秀, 加嶋武志, 佐々木隆: 重力式コンクリートダムの固有振動数変化とその重回帰分析, ダム工学, Vol.25, No.1, pp.16-28, 2015.1
- 4) 今岡知武, 鷲尾朝昭, 安田幸弘: 坂本ダム・池原ダムコンクリート供試体の材齢 50 年までの物性, 電力土木, No.374, pp.91-95, 2014.11

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONCRETE DAMS FOR SAFETY ASSESSMENT EVALUATED USING EARTHQUAKE MONITORING DATA

Masayuki KASHIWAYANAGI, Hideaki OHNISHI, Naoyuki OSADA and Seiichi HAYAKAWA

Response characteristics and predominant frequency of concrete dams are analyzed using acceleration data during earthquakes, which are obtained in a few decades. The vertical acceleration distributions are featured by the sharp amplification near the crest for gravity dams and the gradual increasing from the base to the crest for arch dams. The predominant frequencies clearly decrease with the mass effect of the reservoir water and are slightly affected by the transverse joints condition. The scattering of predominant frequency of concrete dams could be affected by other factors, which are future issues to be addressed. These behavior of dams during earthquakes could be an index of the real-time condition of dams.