

常時微動計測による重力式コンクリートダムの振動特性把握に関する検討

栗田 哲史¹・松本 陽介²・中野 靖³・恒川 明伸⁴・黒瀬 高秀⁴

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)
E-mail: kurita@tepsco.co.jp

²正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)
E-mail: y.matsumoto@tepsco.co.jp

³正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)

⁴正会員 東京電力ホールディングス株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

重力式コンクリートダムの健全性評価を目的として、地震観測による振動特性把握が行われている。しかし、地震観測記録の取得には長期の時間を要する。また、地震計が設置されているダムの数も限定的である。そこで、常時微動計測によるダムの振動特性把握が試みられている。しかし、地震記録から得られた振動特性と常時微動計測より得られた振動特性との関係性について、十分な検討が行われているとは言い難い。特に、ダムが位置する山間部では人工的な振動源が殆ど存在しないことから常時微動のレベルが非常に微小であり、構造物が十分に励起されているか明らかでない。そこで、本研究では地震計が設置された重力式コンクリートダムを対象として常時微動計測を実施して振動特性の評価を行い、地震観測記録から得られている結果との比較を行った。

Key Words : *microtremor measurement, seismic observation record, concrete gravity dam, dynamic characteristics, source of vibration*

1. はじめに

我が国において、大規模な重力式コンクリートダムが地震により重大な損傷を蒙った事例は幸いとして無い。しかし、ダムは供用期間が非常に長い土木構造物であり、また、被災した場合には公衆災害に至る可能性もあることから、その健全性を継続的にモニタリングしていくことは重要である。このような観点から、堤体に地震計を設置してダムの振動特性を把握することが行われてきている^{例えぱ}。しかし、地震計設置のための設備投資および保守費用が少なからず必要となる。更に、地震観測記録の取得は周辺の地震活動に依存するため、十分なデータを得るためには長期の時間を必要とすることが稀でない。また、地震計が設置されているダムの数も限定的である²。そこで、常時微動計測によってダムの振動特性を得ようとする試みが行われてきている。しかし、地震記録から得られた振動特性と常時微動計測より得られた

振動特性とが同様のものであるかどうかを確認しておく必要がある。特に、ダムが位置する山間部では人工的な振動源が殆ど存在しないことから常時微動のレベルが非常に微小であり、構造物が十分に励起されているかどうかとの疑問が残る。

常時微動計測による重力式コンクリートダムの振動特性把握に関する既往の研究として、宮沢・大町³による先駆的な取り組みでは、重力式コンクリートダムの天端で常時微動計測を行い、ダムの振動性状の把握に常時微動測定は有効であると結論付けている。また、金銅他⁴は常時微動計測や地震観測記録の分析結果より、ダム堤体の1次固有振動数が貯水深および外気温の変化の影響を受け、前者の増加および後者の低下に伴って減少するとしている。また、これらの物理特性を考慮できる1次固有振動数の重回帰モデルを提案している。以上の通り重力式コンクリートダムに対する常時微動計測による振動特性把握に関する検討は数が多くないが、同じコンク

リートダムの中でアーチダムに対しては幾つかの検討⁹⁾が行われている。

一方、地震観測記録に基づく検討として、片桐他⁸⁾は、賀祥ダムおよび田瀬ダムで観測された強震記録から、上下流方向の卓越周期が一時的に長周期化し、また元に戻るという可逆的な変動が見られたと報告している。この原因を動水圧の動きによるものと推察し、数値シミュレーションによる再現を試みている。加嶋他⁹⁾は、9ダムの地震記録の分析より、ダム堤体の固有振動数が貯水位と気温の両方の影響を受けて変化する可能性が高いと指摘している。柏柳他¹⁰⁾は、重力式コンクリートダムとアーチダムの地震観測記録の分析より、地震時加速度応答はダム高さへの依存性が顕著であり、天端の応答はダム基礎での入力に対して線形関係を示すとしている。また、堤体の卓越振動数は貯水深に対して明瞭な依存性を示すとしている。一方、卓越振動数の経年・季節変動は明瞭でないとしている。金銅他¹¹⁾は、重力式コンクリートダムの強震観測記録の分析より、堤体に構造的損傷が生じていなくてもダム軸方向で比較的顕著に固有振動数の一時的な低下が認められたとしている。数値モデルによる検討結果より、この現象は地震動の作用によって一時的に横継目部の拘束条件の変化（密着性の低下）が生じていることが原因と考えられるとしている。

以上の通り既往検討を概観すると、重力式コンクリートダムの振動特性を把握するための地震記録の分析はある程度行われているものの、常時微動計測記録から得られた結果と地震観測記録の分析結果との関係について十分な検討が行われているとは言えない。そこで本研究では、常時微動計測によって重力式コンクリートダムの振動特性を把握することを目的として、地震観測記録との比較による検討を行った。

2. 検討対象ダムと地震観測記録の概要

本研究で対象としたのは地震観測を行っている重力式コンクリートダムである。以下に検討対象ダムとこれまでに得られている地震観測記録の概要を述べる。

(1) 検討対象ダムの概要

本研究で検討対象としたダムの諸元を表-1に示す。Bダムの規模が若干小さいものの、その他は堤高100m超級のダムである。

表-1 検討対象ダムの諸元

no.	name of dam	height of dam (100 m)	length of crest (100 m)
1	A dam	1.2	3.5
2	B dam	0.8	1.8
3	C dam	1.1	2.6
4	D dam	1.0	2.7

(2) 地震観測記録の概要

いずれのダムも、天端、リムトンネル内、基部監査廊に地震計が設置されている。各地震計は、上下流、ダム軸、鉛直の3成分を有している。

本研究で使用した地震記録の監査廊と天端との最大加速度分布の関係を図-1に示す。なお、図中のnはデータ数を表す。いずれも天端で100cm/s²以下の記録であり、十分に線形挙動の範囲内と考えられる記録である。いずれのダムについても、基部に対する天端の応答は増幅している様子が見られる。上下流方向の増幅率が最も大きく、ダム軸方向と鉛直方向は同程度で、それに次いでい

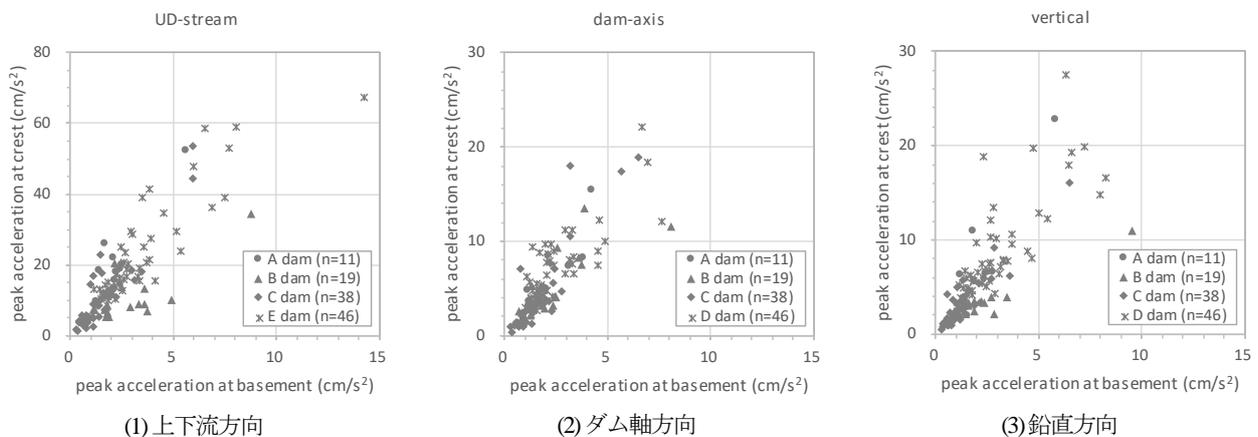


図-1 各ダムにおける地震観測記録の最大値分布



(1) 天端



(2) リムトンネル内



(3) 監査廊

注) 写真撮影用に微動計の風よけは外している。

図-2 Cダムにおける地震計設置位置での常時微動計測の設置状況

3. 常時微動計測

(1) 常時微動計測の概要

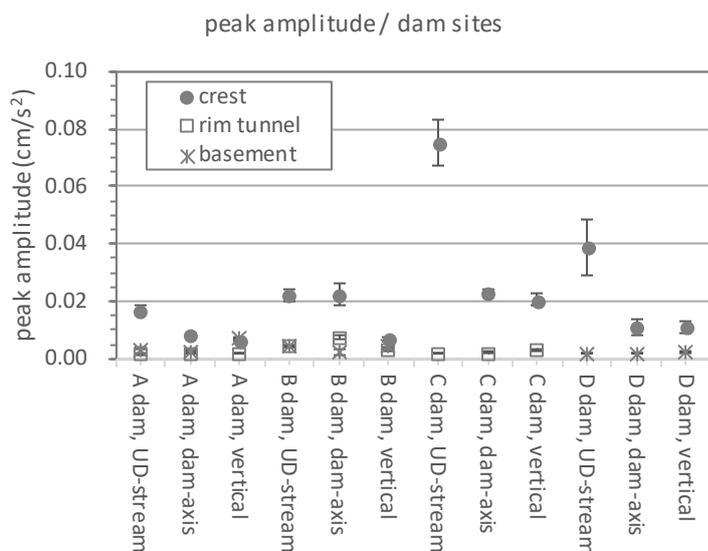
常時微動の計測器には、白山工業社製のJU410を使用した。図-2に示すように、既設の地震計設置位置近傍に微動計を設置した。微動計3台による3箇所の同時計測を行い、計測時間は概ね30分とした。計測器はプラスチック製コンテナの風よけで覆い、計測記録が風の影響を受けないように配慮した。加速度データ収録のサンプリング周波数は100Hzとした。なお、内蔵のデジタルフィルタにより、40Hz以上の高周波成分が自動的に遮断されている。

(2) 常時微動計測記録の分析

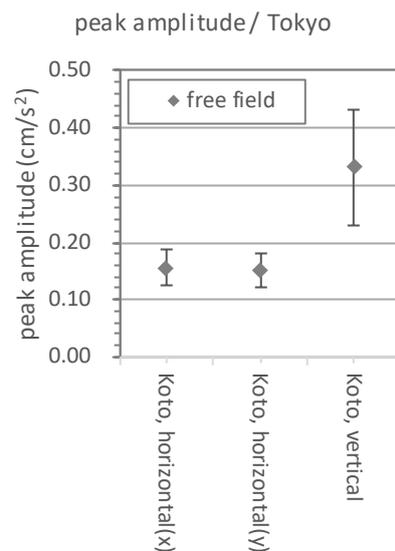
各計測記録は交通振動などの雑振動部分为避免、重複を許して継続時間60秒の区間を10セット抽出した。な

お、各抽出区間の前後1秒をcos関数でテーパ処理している。

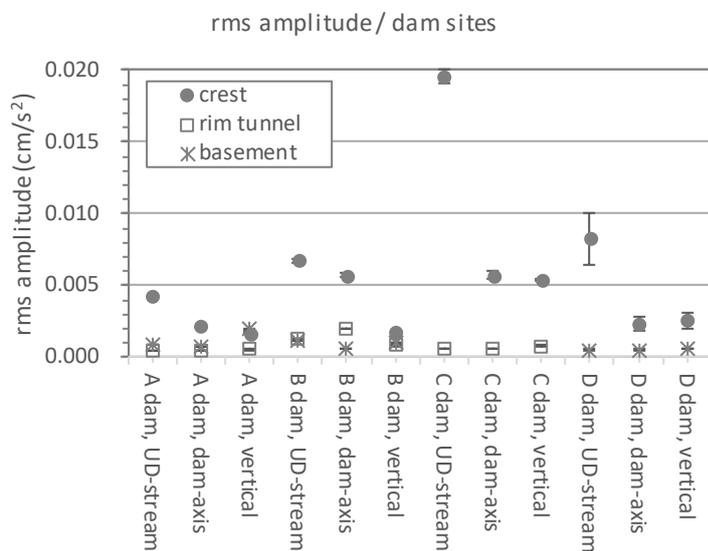
各ダムで得られた常時微動の加速度時刻歴データの振幅レベルの比較を図-3に示す。振幅レベルとしては最大振幅とms振幅の2種類を考え、上記10セットのデータの平均値を求めた。エラーバーは標準偏差を表している。また、図にはダム地点との比較のために東京都江東区内の自由地盤で日中計測した常時微動計測記録を同様に処理した事例も示している。ダム地点の地山における常時微動の振幅は、都内の自由地盤と比較して1~2桁小さい。全ダム地点のデータは、天端の振幅が最も大きく、リムトンネル内および監査廊は明確に小さい。また、天端の記録は上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向の順で大きい。リムトンネル内や監査廊では方向による差異は小さい。このような特性は地震記録に見られるものと同様である。



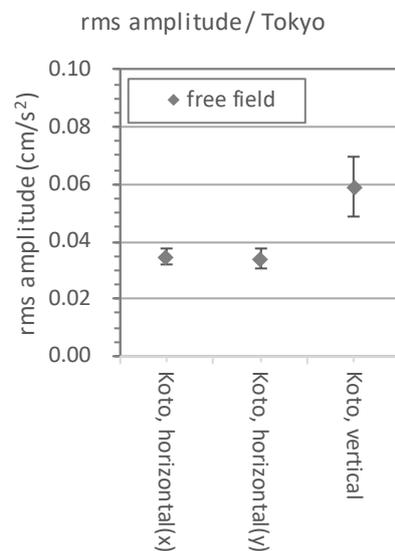
(1) ダム地点の平均最大振幅



(2) 都内自由地盤の平均最大振幅例



(3) ダム地点の平均 rms 振幅



(4) 都内自由地盤の平均 rms 振幅例

図-3 各ダムにおける常時微動の振幅レベル比較

各計測点ごとに得られた継続時間 60 秒の時刻歴データ 10 セットのフーリエスペクトルのアンサンブル平均を図-4 に示す。なお、平均化処理前の各フーリエスペクトルには 0.2Hz の Parzen window で平滑化処理を施している。図-4 の(1)~(3)は A ダムの天端、左岸リムトンネル内、監査廊の同時計測、(4)~(6)は B ダムの天端、左岸リムトンネル内、監査廊の同時計測、(7)~(9)は B ダムの天端、左岸リムトンネル内、堤敷の同時計測、(10)~(12)は C ダムの天端、右岸リムトンネル内、右岸アバットメントの同時計測、(13)~(15)は C ダムの天端、左岸リムトンネル内、左岸アバットメントの同時計測、

(16)~(18)は D ダムの天端、監査廊の同時計測、をそれぞれ表している。なお、C ダムでは天端、左岸リムトンネル内、監査廊の同時計測を実施しているが、この時の天端の記録に異常が見られたため、本検討からは除外した。また、D ダムについては、計測作業のスケジュールの都合により、天端および監査廊とリムトンネル内との同時計測を行えなかった。

図より、フーリエスペクトルに見られる顕著な特徴は、1Hz 以下と 10Hz 以上の振幅が大きく全体として凹形状を示すことである。比較のために、前述の都内の自由地盤で計測した常時微動記録のアンサンブル平均フーリエ

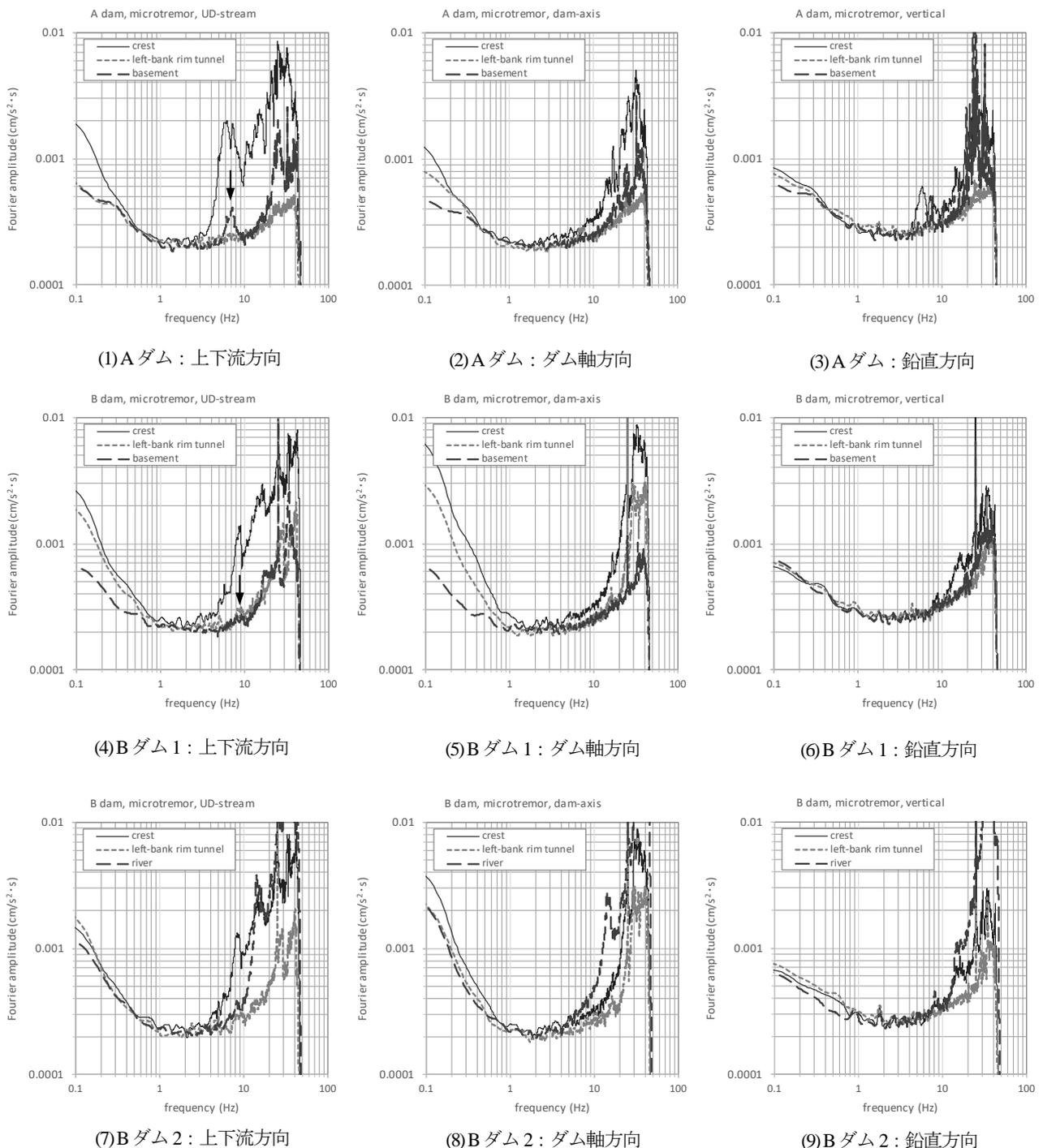


図4 各ダムにおける常時微動計測記録のアンサンブル平均フーリエスペクトル(1)

スペクトルを図5に示す。1~10Hz間に十分なパワーを有し、堆積平野の計測で一般的に見られる凸型のスペクトル形状を示している。一方、ダム地点で得られたデータでは、主に1~10Hzの周波数帯の振幅が最も小さくなる傾向を示している。特に、リムトンネル内や監査廊など地山の記録では、顕著にその傾向が見られる。これは、ダム地点における地山の常時微動が、ダムの1次固有振動数の存在する1~10Hzの周波数帯でパワーが小さいこ

とを示しており、ダム構造物が励起され難い環境にあることを示している。一般に、常時微動のうち、1Hz以下の周波数帯のものは低気圧や波浪などの自然由来のものであり、1Hz以上の周波数帯のものは人間の活動に起因するものと言われている¹²⁾。計測結果は、ダムが立地するような山間部で後者が殆ど存在していないことを如実に表している。

図4の(7)~(9)に示したBダム2では、堤敷(図中 river

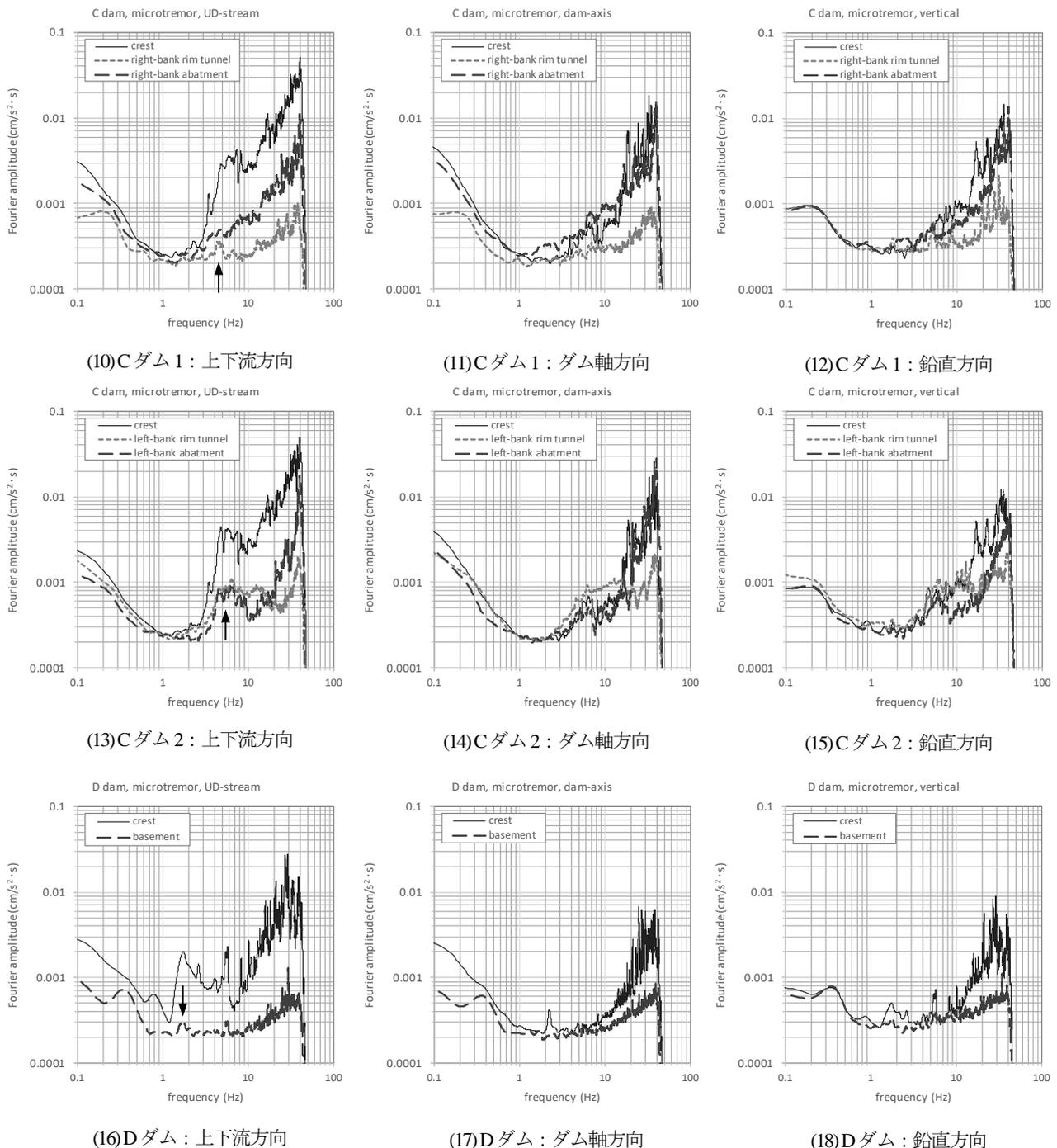


図4 各ダムにおける常時微動計測記録のアンサンブル平均フーリエスペクトル(2)

と表記) で計測を行っている。この計測点はダムの維持放流のための放水口付近の地盤上に位置する。堤敷の計測記録に着目すると、同ダム地点における全計測点中で最大の振幅を示している。また、高周波数側スペクトルの 30Hz 付近にピークを生じる特徴は全計測点で一致している。以上より、地山で計測される 10Hz 以上の高周波数側の常時微動は、維持放流に起因するものであり、それによって堤体が励起されている可能性が高いと考えられる。

次に C ダムに着目すると、坑口から 40m の位置に地震計が設置されている右岸リムトンネル内で若干 1 次ピーク付近の振動が見られる (図中の矢印) ものの堤体の振動の影響は極めて小さいといえる。一方、坑口から 25m の位置に地震計が設置されている左岸リムトンネル内では、堤体の振動の影響が明確に認められる (図中の矢印)。

C ダム以外の上下流方向に着目すると、後述するダムの 1 次固有振動数に該当する周波数で天端の記録にピー

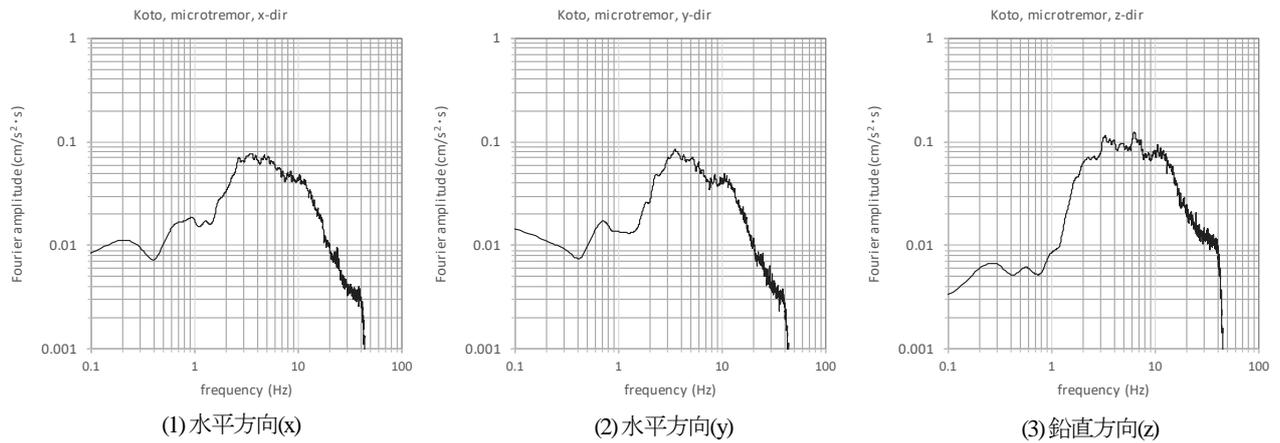


図-5 都内の自由地盤における常時微動計測記録のアンサンブル平均フーリエスペクトル

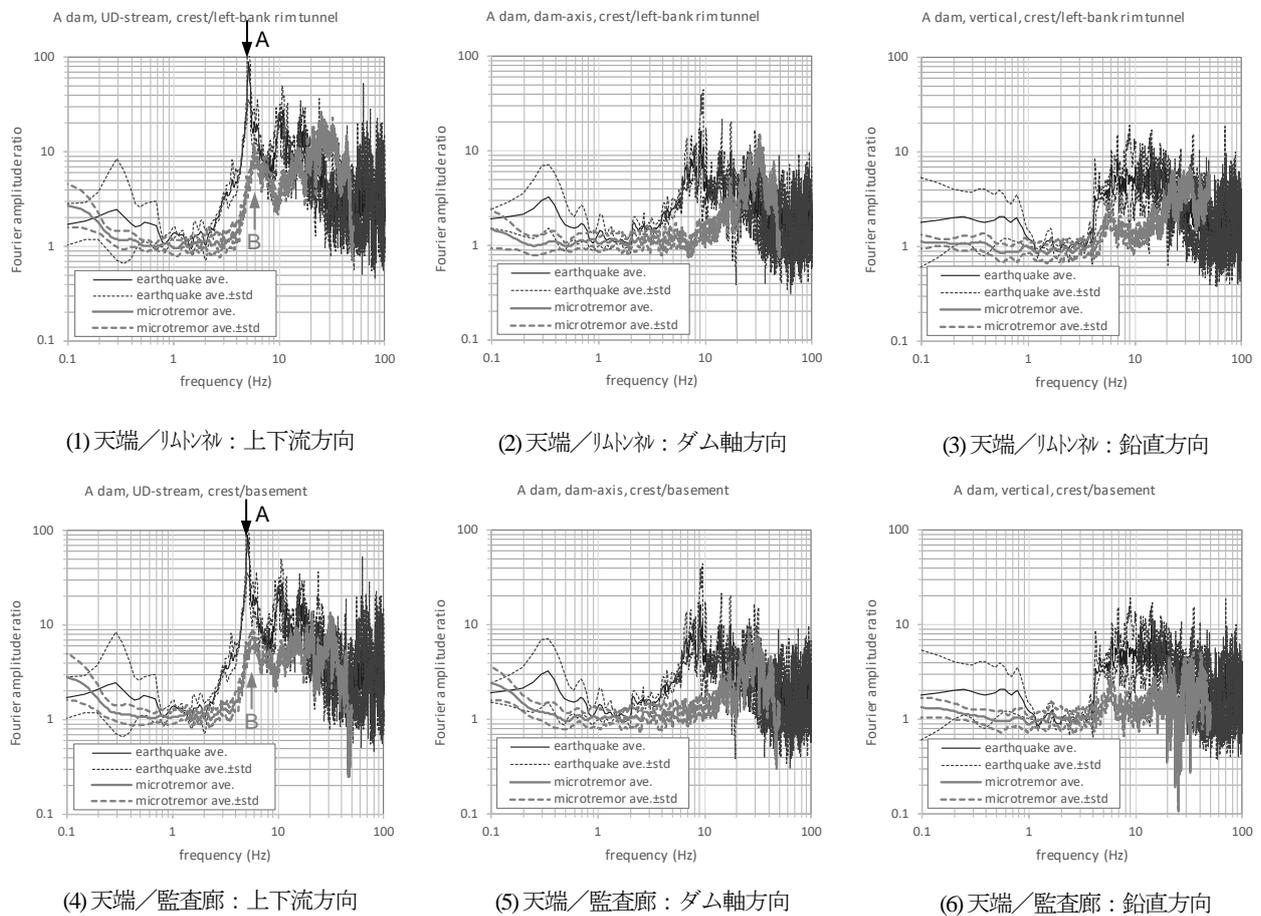


図-6 Aダムにおける地震記録と常時微動計測結果の平均フーリエスペクトル比の比較

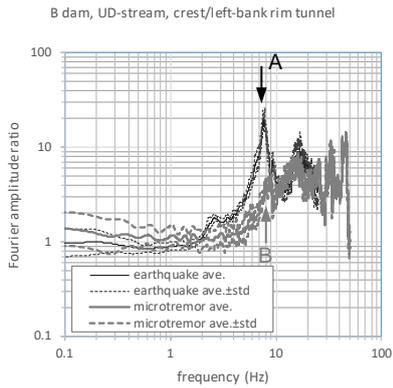
クが認められるが、同一の周波数で監査廊の記録にも大きさは僅かではあるもののピークが認められ（図中の矢印）、堤体の振動が多少含まれていることを窺わせる。

4. ダムの振動特性

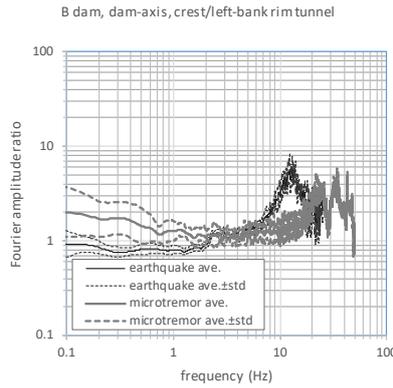
図-6～図-9には各ダムの地震観測記録から得られた幾何平均フーリエスペクトル比と常時微動計測記録から求めた幾何平均フーリエスペクトル比の比較を示す。ここで、地震観測記録については、全て天端のフーリエスペクトルを監査廊のフーリエスペクトルで除したものであり、これをダムの振動特性の基準とする。既往の検討⁴⁾

表-2 各ダムの検討用地震記録観測時の平均貯水位および平均外気温

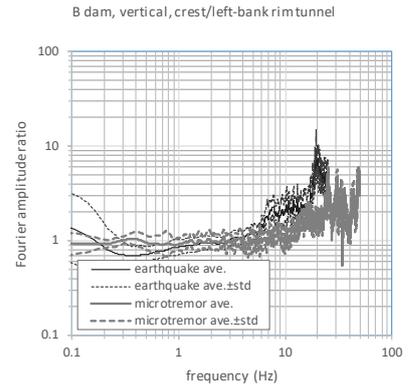
no.	name of dam	conditions at earthquake measurement			conditions at microtremor measurement	
		averaged waterhead (m)	averaged daily mean air temperature (°C)	number of earthquakes	waterhead (m)	daily mean air temperature (°C)
1	A dam	816.7	13.4	3	815.5	13.4
2	B dam	535.9	17.0	6	528.5	17.8
3	C dam	724.5	16.8	7	725.5	16.8
4	D dam	692.0	12.4	8	692.0	13.6



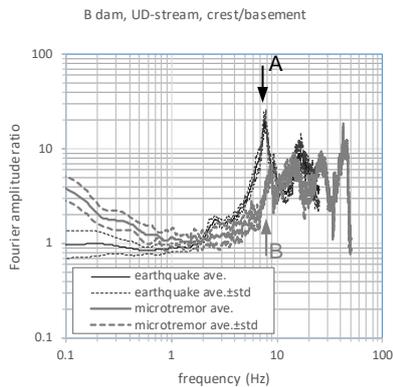
(1) 天端/リムトンネル：上下流方向



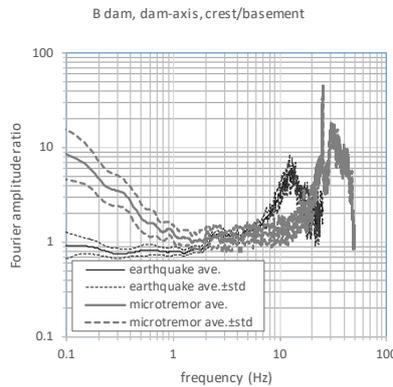
(2) 天端/リムトンネル：ダム軸方向



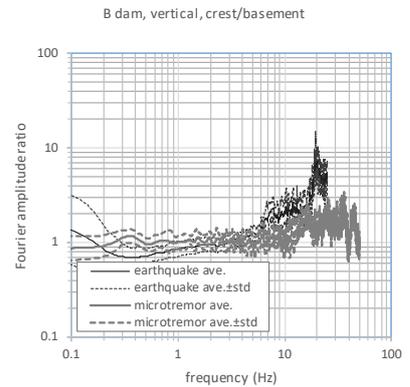
(3) 天端/リムトンネル：鉛直方向



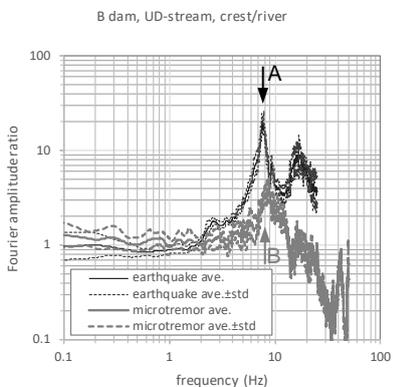
(4) 天端/監査廊：上下流方向



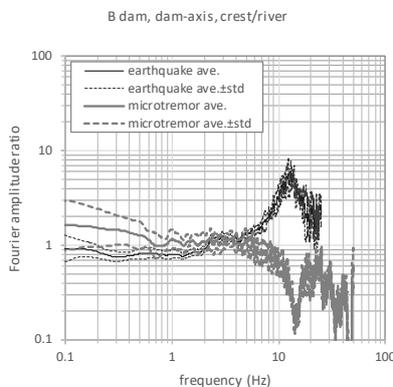
(5) 天端/監査廊：ダム軸方向



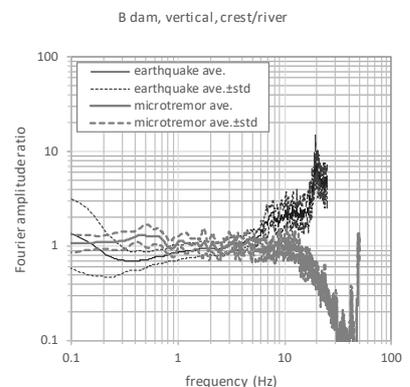
(6) 天端/監査廊：鉛直方向



(7) 天端/堤敷：上下流方向



(8) 天端/堤敷：ダム軸方向



(9) 天端/堤敷：鉛直方向

図-7 Bダムにおける地震記録と常時微動計測結果の平均フーリエスペクトル比の比較

9, 10より、重力式コンクリートダム固有振動数が貯水位および外気温の影響を受けるとの指摘があることから、ここで検討に使用する地震観測記録については、表-2に示す通り、これらの条件が常時微動計測時と同程度になるものを図-1のデータセットの中から選択して使用した。貯水位については1時間刻みのデータの中から計測時のものを選択し、外気温については1時間刻みのデ

ータを24時間分平均して日平均気温とした。表-2の中の地震に対する値は、抽出したデータ分の算術平均値である。常時微動の計測結果については、ダム基部（監査廊もしくは堤敷）に対する天端のフーリエスペクトル比および地山（リムトンネル内およびアバットメント）に対する天端のフーリエスペクトル比を算定した。なお、全てのフーリエスペクトル比算定には、0.2HzのParzen

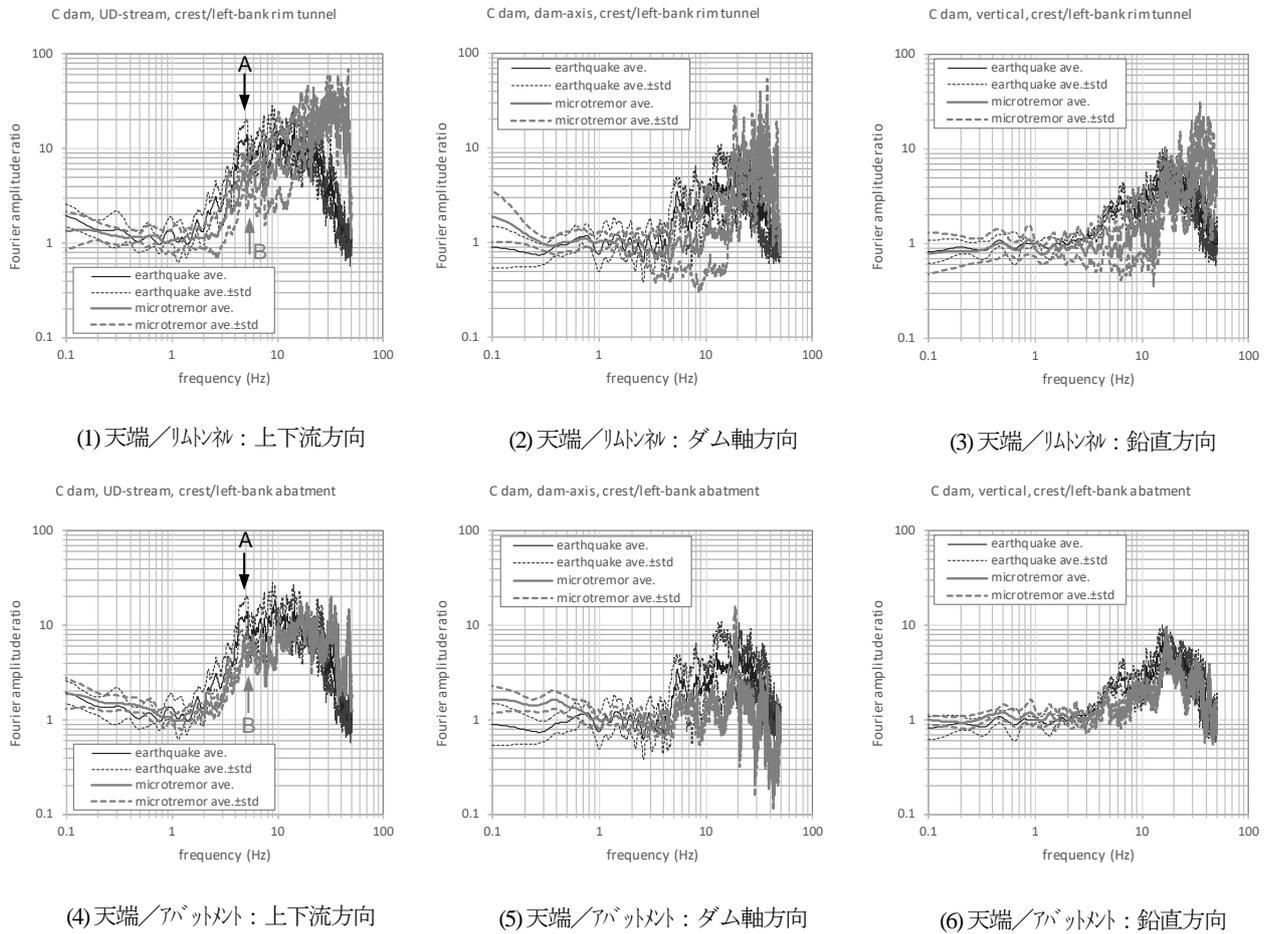


図-8 Cダムにおける地震記録と常時微動計測結果の平均フーリエスペクトル比の比較

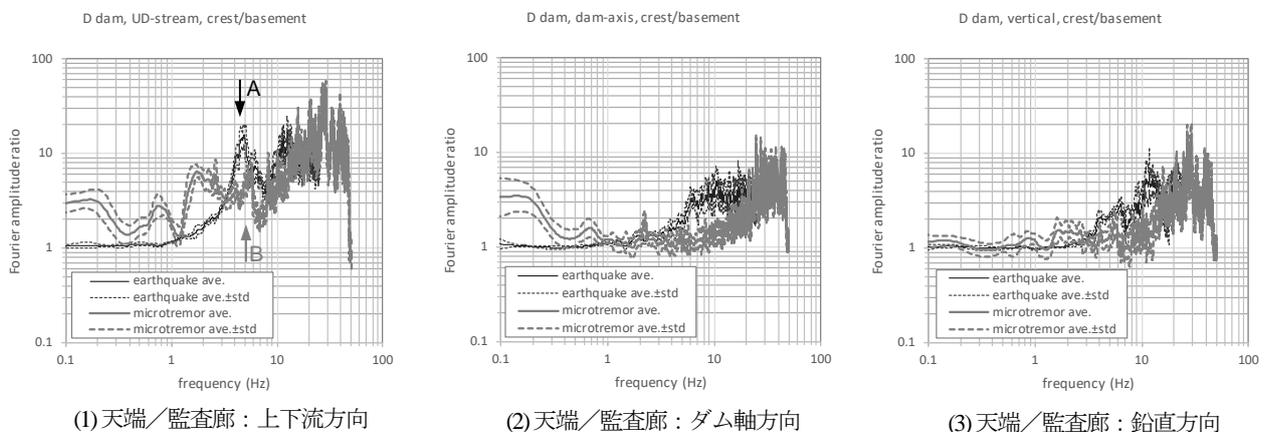


図-9 Dダムにおける地震記録と常時微動計測結果の平均フーリエスペクトル比の比較

window で平滑化したフーリエスペクトルを用いている。

図より、C ダムのアバットメントに対する天端のフーリエスペクトル比は、全方向で地震記録に見られるピークと常時微動のそれとの対応が良いものの、それ以外のダムでは、上下流方向については概ねピーク周波数が対応するものの、ダム軸方向および鉛直方向では常時微動計測記録にピークが表れていない。これは前述の通り、ダムサイトにおける地山の常時微動は1~10Hzのパワーが弱いことから、堤体が十分に励起されるに至っていないものと考えられる。ダムの構造上ダム軸方向の両岸および鉛直方向の下端は拘束されているため相対的に振動し難い傾向にあることから、このような現象が表れているものと思われる。

図-7(7)~(9)はBダムの堤敷に対する天端のフーリエスペクトル比であるが、ダム軸方向および鉛直方向ではスペクトル比が1.0倍以下となって、天端の振動が基部に対して減衰していることを示している。図-4で述べた通り、堤敷の計測点が放水口に近いため、同地点では振動源である維持放流の振動がほぼ直接的に計測されているため、そのパワーが卓越しているものと思われる。一方、天端ではその振動が減衰していることから、このような形状のフーリエスペクトル比になったと思われる。

各ダムの上下流方向の1次卓越周波数に着目すると、地震記録(図中の矢印A)に比べて、常時微動計測結果(図中の矢印B)は高周波数側に位置している。この現象は既往の研究⁸⁾¹⁰⁾で指摘されている強震時に固有周波数が低周波数側に変化することと整合している。また、その時の応答倍率については、常時微動の方が地震記録よりも小さい傾向にある。

5. まとめ

本研究では、常時微動計測によって重力式コンクリートダムの振動特性を把握することを目的として複数のダムを対象に計測データに基づく検討を行った。検討の結果、常時微動計測の有用性とともに関界も確認された。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 各ダム地点の地山の常時微動は1Hz以下の長周期帯と10Hz以上の短周期帯から構成されており、ダム堤体の1次固有振動数である1Hz~10Hz間のパワーを十分有していない。これにより、ダム堤体の1次固有振動数が励起され難い環境にある。
- Bダムの堤敷の計測結果より、常時微動の短周期側の振動源はダムの維持放流に起因するものと推察される。なお、全地点で計測されている1Hz以下の長周期側の微動は脈動(自然由来の振動)と思われる。
- 各ダム地点の常時微動計測記録のフーリエスペクトル

ルより、ダム監査廊の記録には堤体の振動が多少含まれていることが確認された。一方、Cダムを除く地点のリムトンネル内の記録には堤体の影響が殆ど認められない。C地点では、リムトンネルの坑口に近いほど堤体の振動の影響を受けている傾向が明確に認められた。アバットメントの常時微動記録の振動レベルは天端とリムトンネルの間にあり、堤体の振動の影響を多少含んでいる。

- 常時微動のフーリエスペクトル比より、上下流方向の1次ピークは明確に確認できるが、ダム軸方向および鉛直方向では地震記録の1次ピークに対応するものが殆ど確認できない。これは、上述の通り微動の起振源が1~10Hz間でパワーが非常に小さいことと関係しているものと思われる。
- 上下流方向の常時微動計測結果のフーリエスペクトル比の1次卓越周波数は、地震記録から求めたそれよりも若干高周波数側にある。この現象は、既往の研究で述べられた地震動の大きさに応じて固有周波数が変化すること(強震動ほど低周波数側になる)と調和的である。

参考文献

- 1) Japan Commission on Large Dams: *Acceleration Records on Dams and Foundations No.3*, 2014.
- 2) 経済産業省 第4回 産業構造審議会 保安分科会 電力安全小委員会 電気設備自然災害等対策ワーキンググループ: 高さ15m以上の発電専用ダムにおける地震計の設置状況, 別添資料2, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/denki_setsubi/pdf/004_10_02.pdf (2019.08.30 閲覧)
- 3) 宮沢直季, 大町達夫: 常時微動によるコンクリート重力ダムの動的挙動測定, 土木学会 年次学術講演会講演概要集 第1部, pp. 577-578, 1982.
- 4) 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重回帰分析, *ダム工学*, 25巻, 1号, pp.16-28, 2015.
- 5) 大熊信之, 松田泰治, 金澤健司, 池田浩一: 2基の大規模アーチダムでの常時微動計測に基づく動的特性の周期的変動評価, 土木学会 地震工学研究発表会講演論文集, 第31巻, p.3-040, 2011.
- 6) 仲村成貴, 塩尻弘雄, 上島照幸, 有賀義明: 常時微動観測と三次元有限要素解析に基づく実在アーチダムの振動特性把握, 土木学会 地震工学研究発表会講演論文集, 第32巻, 3-362, 2012.
- 7) 上島照幸, 塩尻弘雄, 金澤健司: 常時微動・地震動の長期継続観測によるアーチダムの構造健全性モニタリング技術の適用-ダムの振動特性変動の検出: 常時微動と地震時変動-, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第7号, pp.284-294, 2015.
- 8) 片桐信幸, 大町達夫, 井上修作: 重力式コンクリートダムの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, 土木学会 地震工学研究発表会講

演論文集, 第 28 卷, No.0106, 2005.

- 9) 加嶋武志, 小堀俊秀, 金銅将史: 地震動観測記録を用いた重力式コンクリートダム固有振動数の分析, 土木学会 年次学術講演会講演概要集 第 6 部, 第 69 卷, pp.931-932, 2014.
- 10) 柏柳正之, 大西豪昭, 長田直之, 早川誠一: 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, 土木学会 岩盤力学に関するシンポジウム 講演集, Vol.44, pp.166-171, 2016.
- 11) 金銅将史, 小堀俊秀, 佐々木隆: 地震動がコンクリートダムの振動特性に及ぼす影響, ダム工学, 27 卷, 4 号, pp.265-278, 2017.
- 12) 堀家正則: 微動研究について, 地震, 第 2 輯, 第 46 卷, pp.343-350, 1993.

STUDY ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONCRETE GRAVITY DAMS OBTAINED BY MICROTREMOR MEASUREMENT

Tetsushi KURITA, Yosuke MATSUMOTO, Yasushi NAKANO,
Akinobu TSUNEKAWA and Takahide KUROSE

In order to evaluate the soundness of gravity concrete dams, the dynamic characteristics are estimated by seismic observations. However, it takes a lot of time to acquire seismic observation records. There are also a limited number of dams where seismometers are installed. Therefore, the dynamic characteristics of dams are being estimated by microtremor measurement. However, it is hard to say that sufficient investigations have been made on the relationship between the dynamic characteristics obtained from earthquake records and those obtained from microtremor measurements. In particular, since there is almost no artificial vibration source in the mountainous area where the dams are located, the level of microtremor is very small, and there is a question as to whether the structures are sufficiently excited. Therefore, in this study, microtremor measurements were performed at the concrete gravity dams where seismometers are installed to evaluate the dynamic characteristics, and compared with the results obtained from seismic observation records.