

常時微動・地震動の長期継続観測による高経年 化したアーチダムの振動特性同定と2011年東北 地方太平洋沖地震時のダムの振動挙動

上島照幸¹・金澤健司²・村上弘太³・仲村成貴⁴・塩尻弘雄⁵・有賀義明⁶

¹宮城大学環境システム学科教授 (〒982-0215 仙台市太白区旗立2-2-1)

E-mail:ueshima@myu.ac.jp

²電力中央研究所地震工学領域主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:kanazawa@criepi.denken.or.jp

³セキスイハイム東北株式会社 宮城支社 (〒980-0014 仙台市青葉区本町3-4-18)

E-mail:murakami127@sekisui.jp

⁴日本大学理工学部講師 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

E-mail:masa@civil.cst.nihon-u.ac.jp

⁵日本大学理工学部教授 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

E-mail:shiojiri@civil.cst.nihon-u.ac.jp

⁶弘前大学大学院理工学研究科教授 (〒036-8561 弘前市文京町3)

E-mail:y-a-arig@cc.hirosaki-u.ac.jp

高経年化したアーチダムを観測対象とし、固有振動数とその経時変動・地震時変動を把握することを目的として、微動・地震動の長期継続観測を実施中である。2011年東北地方太平洋沖地震時にも観測を継続実施中であり、本震記録の他、前震、多くの余震群の観測記録が、その前後での微動記録とともに得られた。これら観測データを分析して以下の知見を得た；1) 観測開始時期（2010年6月）での微動記録から観測対象ダムの固有振動数、および減衰定数を同定した。固有振動数としては、7.3Hz、11.4Hzなどの値を得た。2) 約半年間での固有振動数の変動をみてみると、夏期から冬期にかけて固有振動数はダム堤体温度と相伴って低下しており、両者には正の相関があることが示唆された。一方、今回例示した範囲では、ダム貯水位の経時変動が固有振動数の経時変動に与えた影響は大きくはなかったものと推察される。3) 2011年東北地方太平洋沖地震時には、ダム天端において、極めて大きい最大加速度を持つ観測記録（約630gal）が収録された。その際の地震動継続時間は3分程にも及ぶものであった。4) 本震およびその前後での微動のスペクトル解析から、本震時には微動時に比して、卓越振動数が著しく低下したことが、本震後微動の卓越振動数、および振幅レベルは本震前微動のそれに概ね復していること、などが分かった。

Key Words : *proper frequency, ambient vibration, seismic motion, aged arch dam, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, long term continuous observation*

1. はじめに

国内のダムは、建設後 50 年近く経過したものが増えてきており、維持管理の重要性が高まっている。そのため、ダムの構造健全性を効率的に評価できる手法が望まれている。振動計測を利用した構造健全性評価手法は、構造物に損傷が生じる前後における振動特性の変化を利用する手法であり、土木・建築構造物を対象として近年活発に研究されている¹⁾も

の、文献 2)を除けば、ダム構造物での検討例は多くない。そこで、本研究全体では、ダムの構造健全性評価手法を開発するための基礎資料を得ることを目的として、大倉ダム（仙台環境開発大倉ダム）にて常時微動の高密度観測³⁾、微動・地震動の長期継続観測⁴⁾を実施し、観測記録から推定された振動特性を検討し、またその経時変動・地震時変動を検討している。微動の長期継続観測では、観測対象構造物の動特性を把握するとともに、通常使用状態にお

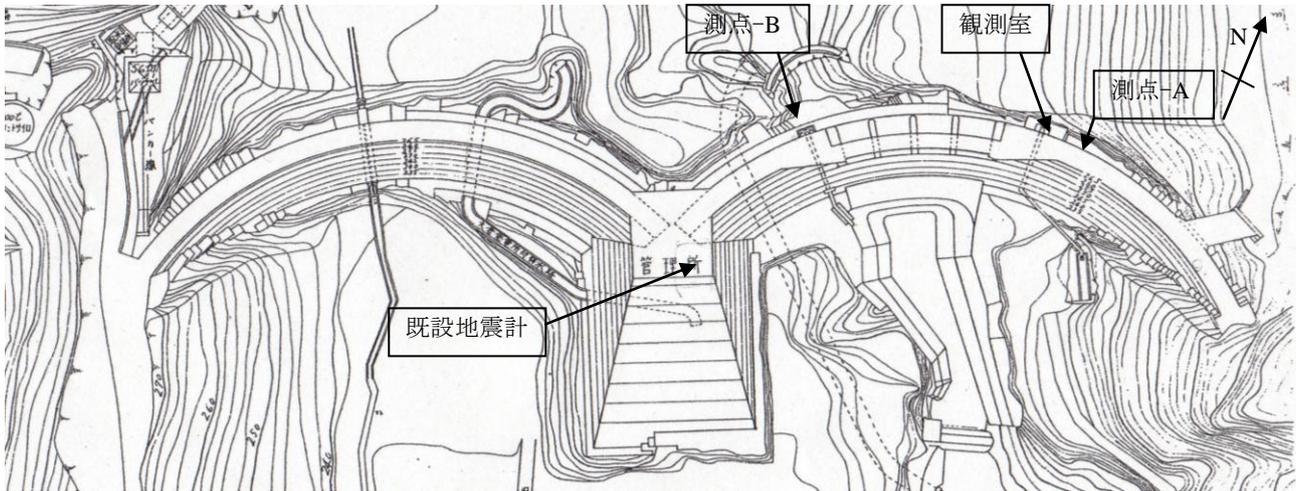


図-1 観測対象ダム平面図と常設観測点位置図

(大気温およびダム表面温度観測点は、上流側：常設測点-B 位置付近（日陰）、下流側：既設地震計位置付近、である。なお、ここでいう「常設観測点」とは本研究で天端に設置した長期継続観測点を指し、「既設地震計」とは本ダムの設備の一部として以前から設置されている地震計を指す。既設地震計は、天端に加え、天端レベルより 40.5m 下がったレベルの岩盤上にも設置されている。)

けるその経時変動を把握し、構造健全性診断、或いはヘルスマonitoringの基礎資料を得ることができると考えられる。また、FEM によるダムの振動特性解析・構造健全性評価や、地震時の逆解析による損傷評価なども行っていく予定としている。

本報告では、微動・地震動の長期継続観測を通じてダムの動特性を同定した結果について、また観測開始後約半年間にわたる固有振動数の経時変動について、検討した結果を報告する。加えて、先の2011年東北地方太平洋沖地震時に本ダムにて観測された記録や、本震前後での微動記録を用いて若干の解析を行った結果を報告する。特に本震加速度記録は最大加速度が大きく、継続時間も非常に長いことから、極めて貴重な記録と考えられるため、速報として報告する。

2. 観測対象ダム概要、解析法と固有振動数同定例

観測対象ダムは堤高 82.0 m、堤頂長 323.0m、総貯水容量 28,000,000 m³、堤体積 226,000 m³の規模を持ち、2つのアーチが連なる日本で唯一のダブルアーチ式コンクリートダムである。左岸側アーチ部のほぼ中央に放水用ゲートがあり、天端は幅員 4.4 m の一般道になっている。

図-1 にダム平面図⁵⁾と常設観測点位置図を示す。2点の常設観測点はいずれも天端上に設置されている。長期継続観測における観測量は、地震動から常時微動レベルまでのそれぞれ水平2方向の加速度と上下方向加速度である。全観測記録を重複しないように5分ごとの小サンプルデータに分割した後、各小サンプルデータに対して、ARMAモデルによる振動モード同定法⁶⁾(以下 ARMA法)を適用して、対象構造物の振動特性を同定した。

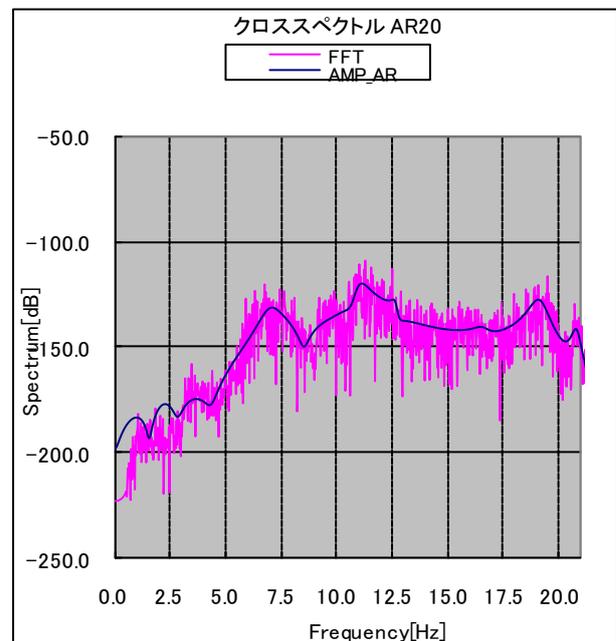


図-2 微動長期継続観測における振動特性同定例
クロススペクトル：AR20、2010年6月3日
(AMP_AR=Identified) (観測開始時期)

表-1 微動長期継続観測における振動特性同定例
クロススペクトル：2010年6月3日深夜0時～1時における観測データから同定された値の平均

No.	固有振動数[Hz]	減衰定数[%]
1	7.32	6.48
2	11.4	3.61
3	19.3	2.53

ARMA法適用に当たっては、観測記録の0.0～21.0Hzの成分を台形型のバンドパスフィルタで抽出

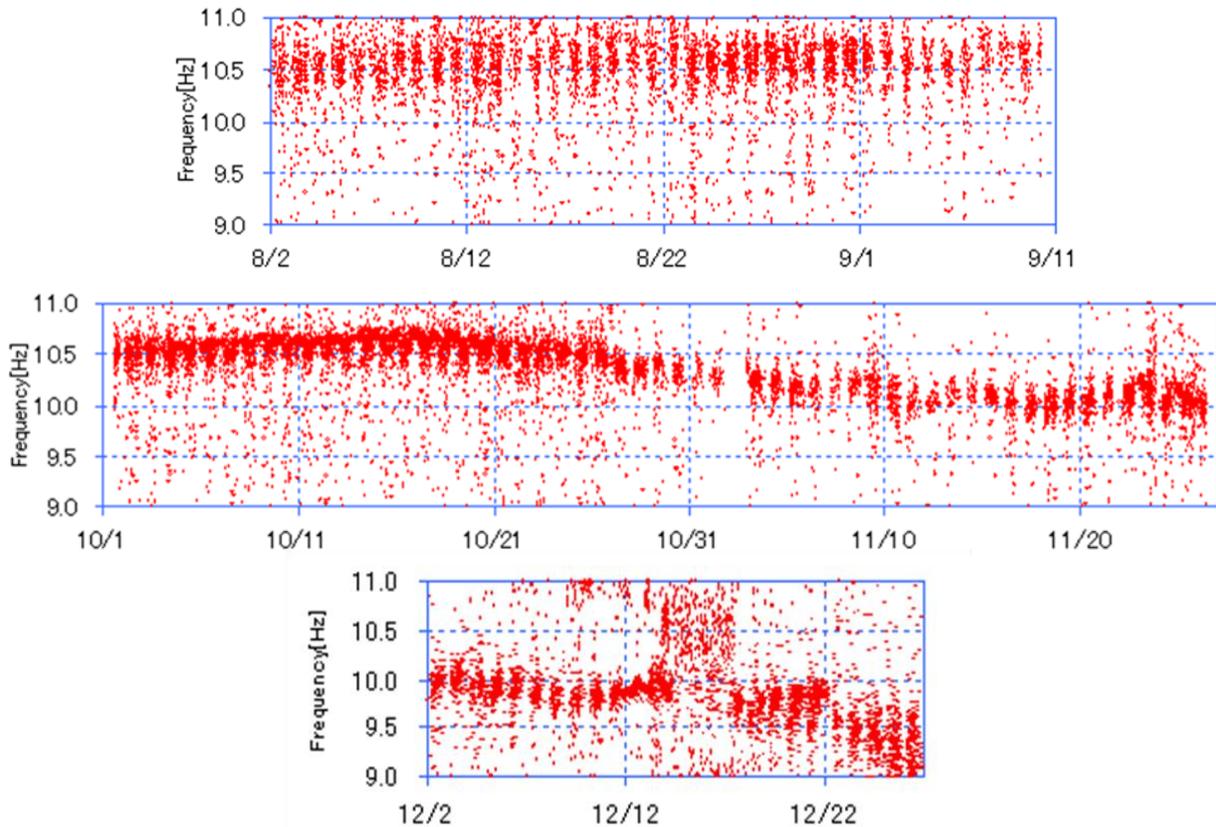


図-3 測点-A、-Bのクロススペクトルから同定した固有振動数の経時変動例（振動数範囲：9-11Hz）
 期間 上段図：2010年8月2日～9月11日，中段図：2010年10月1日～11月26日（+ α ），
 下段図：2010年12月2日～12月27日
 （振動数範囲として、9-11Hz間に入る固有振動数を取り出している。）

した。ダム軸に直交する方向をNS方向とし、測点-A、-Bのクロススペクトルを用い振動特性を同定した。また、ARMAモデルの次数は、10～50次の間の10次刻みで試算を行い、ピークが比較的安定した20次を最終的な同定結果とした。同定例を図-2、表-1に例示する。

3. 観測対象ダムの固有振動数の経時変動例

ARMA法の適用により、5分ごとに同定された対象構造物の振動特性は、個々には、ある時間断面における同定値である。長期継続観測とは、そのように同定された振動特性が経時的にはどのような変動をしているかを検討することを目的として行われているものである。この過程は、まずは同定された個々の時間断面での振動特性値を時間軸方向に並べて表示し、その上で振動特性の経時変動を検討・評価することである。

こうして固有振動数の経時変動を表示した例を図-3に示す。図-3では、9-11Hzの範囲に入る固有振動数の経時変動を示している。期間としては、夏期（上段図）、秋期（中段図）、冬期（下段図）の、1ヶ月程度～2ヶ月程度の期間を取り出して表示している。図-3には、夏期から冬期に向かうにつれて、固有振

動数が低下している様子が示されている。

一方、図-4には、2010年8月～12月におけるダム表面温度（上流側）とダム貯水位の経時変動を示している。固有振動数とダム表面温度との経時変動を比較すると、両者が相伴って低下している様子が示されており、固有振動数とダム表面温度とは正の相関があることが示されているものと受け取ることができよう。

堤体温度の低下に伴い、ダムが収縮することでアーチ効果が失われ、堤体コンクリートの圧縮応力が減少することで、ヤング係数が低下すること、あるいは、圧縮応力が減少することに伴うジョイントの剛性低下の影響で固有振動数の低下が引き起こされるものと推察される。

貯水位に関しては、減少から増加へと急激に転ずる区間がある（図-4）一方で、区間全体でみて固有振動数は緩やかに減少している（図-3）。固有振動数～貯水位関係についてのこれまでの観測事例によれば、貯水位が高い範囲では、貯水位が満水位から低下するに従い、固有振動数は大きくなるが、ある貯水位以下になると逆に貯水位の低下に伴って固有振動数は減少する^{2),7)}と報告されているが、図-3に例示した範囲で見ると、貯水位の経時変動が固有振動数の経時変動に与えた影響は大きくはなかったものと推察される。

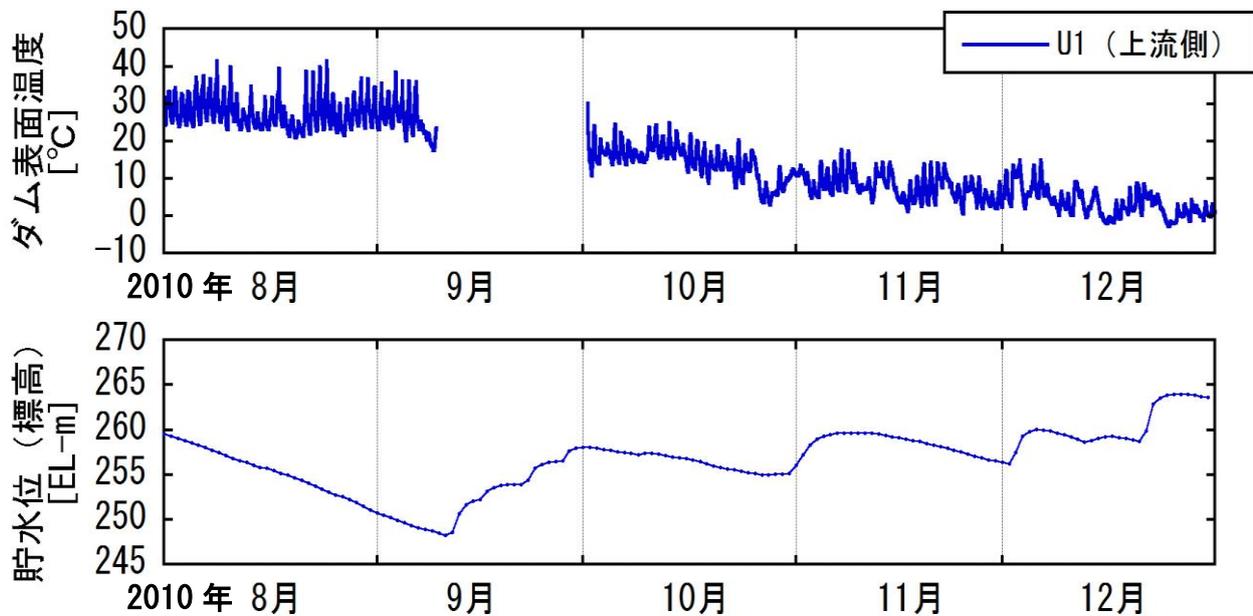


図-4 2010年8月～12月におけるダム表面温度（上流側）とダム貯水位の経時変動

4. 2011年東北地方太平洋沖地震時の観測対象ダムの振動挙動

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震時、当該ダム天端に設置された常設観測点(図-1)では、微動・地震動を継続観測中であり、図-5に示すような加速度時刻歴波形記録が収録された。同図中には、測点-A、-B、それぞれの、上下方向成分(UD)、ダム軸直交方向成分(NS)、ダム軸接線方向成分(EW)、計6成分の加速度時刻歴波形記録が同スケール(gal/plot mm)で表示されている。各観測点・各成分の最大加速度とその発生時刻は表-2に示されるとおりである(なお、観測に使用しているPCに時刻のズレがあり、表示時刻はそれに伴う誤差を含む)。本震前後における微動記録も収録されており、それらを併せスペクトル解析を実施して以下の諸点が明らかとなった；

1). 収録された2011年東北地方太平洋沖地震本震の加速度記録では、地震動継続時間は3分程にも及ぶものであった。測点-A、-Bとも、3成分の中では、NS成分(ダム軸直交方向成分)の加速度振幅が大きく、記録された最大加速度は、測点-B(NS)において、約630galに及んだ。

また、既設地震計については、天端における最大加速度：176gal、天端より40.5m下がったレベルにおける最大加速度：88gal(いずれも本報告と同じ表現をすれば、ダム軸直交方向成分での値。最大加速度発生時刻は、14:47:40:00^{*1)})であった⁵⁾。

*1) 既設地震計記録収録は、本論文にいう長期継続観測とは別系統でなされており、時刻についても、例えば表-2脚注にあるような記載は当てはまらない。

2). 収録された加速度時刻歴波形記録を観察すると、第1波より、40-50秒程度後の第2波において最大加速度が記録されている。これは、例えば、K-NET 築館(MYG004)観測点(栗原市築館)の強震波形⁸⁾と

表-2 各観測点・各成分の最大加速度とその発生時刻

観測点	最大加速度 (gal)	最大加速度発生時刻 (h:mm:ss)
A-UD	121.842	14:46:25.575
A-NS	395.789	14:46:24.130
A-EW	112.957	14:46:23.570
B-UD	125.565	14:46:23.475
B-NS	626.2069	14:46:23.480
B-EW	135.1724	14:46:25.200

(注) 観測に使用している PC に時刻のズレがあり、表示時刻はそれに伴う誤差を含む。

共通の特徴である。

- 3). 本震のスペクトル解析によれば、測点-A(NS)では5.7Hzに、測点-B(NS)では5.9Hzに、それぞれ卓越振動数があることが示されているが、一方、本震前後での微動記録のスペクトル解析からは、測点-A、-BでのNS成分の卓越振動数は、6.6-7.0Hzにあり、本震時には、微動時に比して、卓越振動数が著しく低下していることが分かった(図-6～8)。
- 4). 深夜の微動記録に着目して、本震前後での卓越振動数の変化を分析すると、図-7、-8に示した範囲では、殆ど変化がないか、若干ながら(0.2Hz程度)、本震前微動におけるそれが本震後におけるそれを上回っていることになるが、これは常時変動の範囲内にあると考えられる。本震時卓越振動数の著しい低下を考慮に入れば、本震後微動における卓越振動数は、本震前微動における卓越振動数に概ね復したものと見ることができよう。ただ、ここでは、本震前後の微動とも、それぞれ一時間断面でのスペクトル解析からの推論であり、微動解析から得られる本震前後での卓越振動数の経時変動を詳細に明らかにするには、対応する詳細な解析を必要とすると思われる。

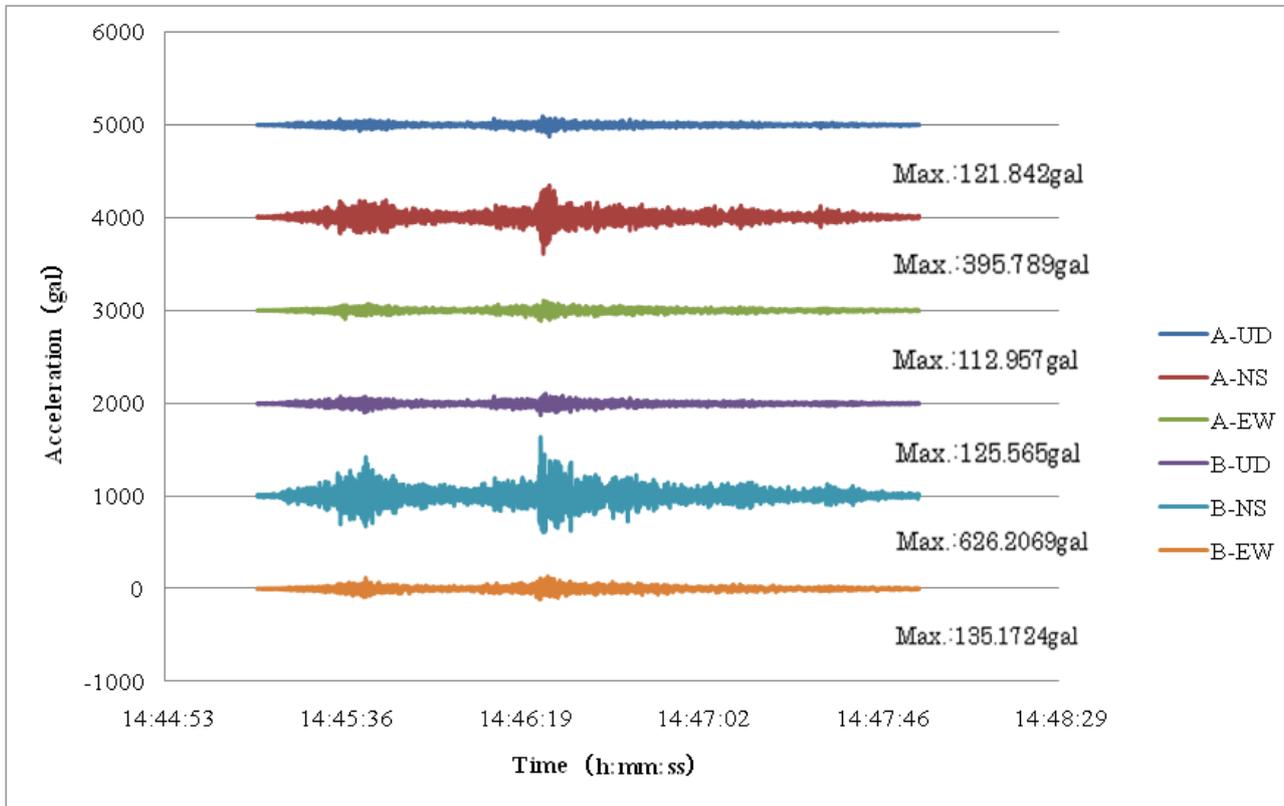


図-5 2011年東北地方太平洋沖地震（本震）時に当該ダムで観測された加速度時刻歴波形記録
 上段より，測点-A(UD), -A(NS), -A(EW), -B(UD), -B(NS), -B(EW)
 （ここで，UD：上下方向成分，NS：ダム軸直交方向成分，EW：ダム軸接線方向成分）
 （注）観測に使用しているPCに時刻のズレがあり，表示時刻はそれに伴う誤差を含む。

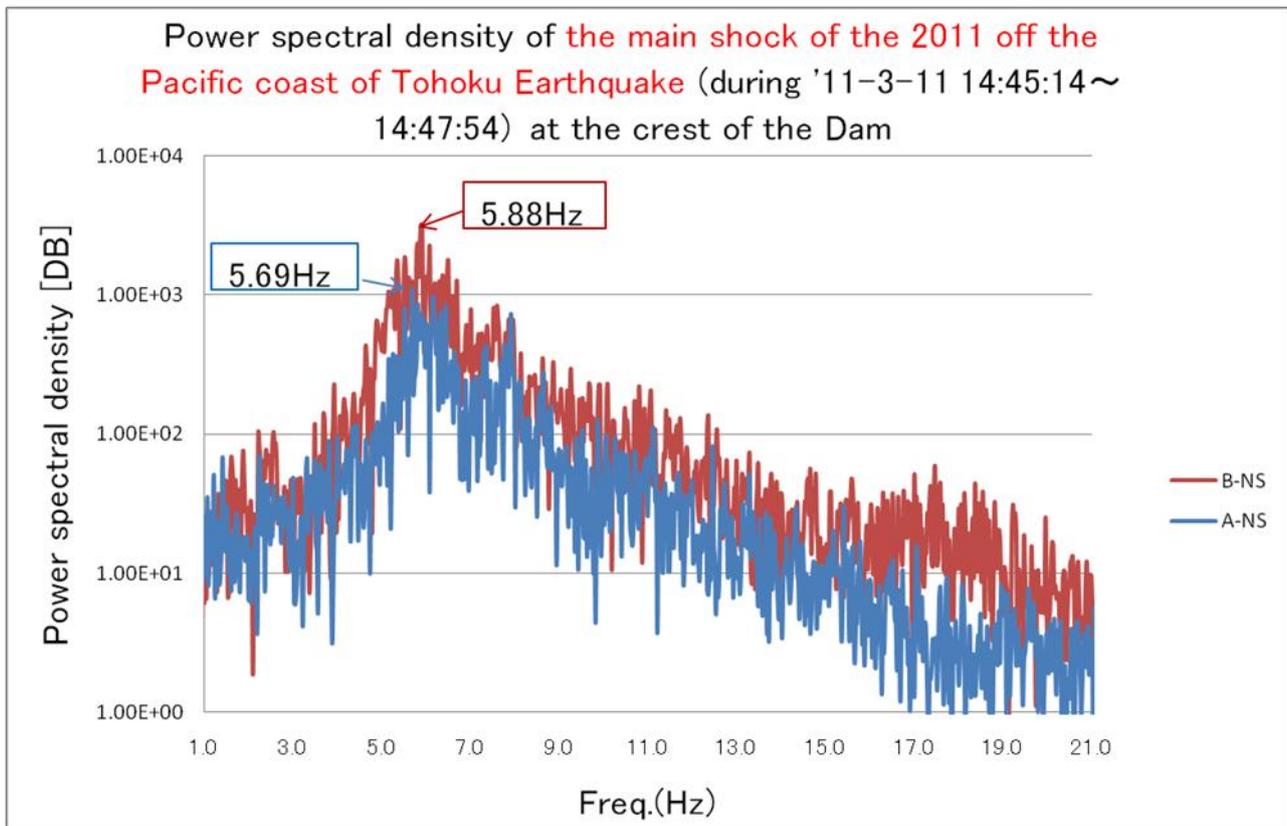


図-6 東北地方太平洋沖地震・本震時，ダム天端での加速度記録のスペクトル：測点-A(NS), -B(NS)
 （注）観測に使用しているPCに時刻のズレがあり，表示時刻はそれに伴う誤差を含む。

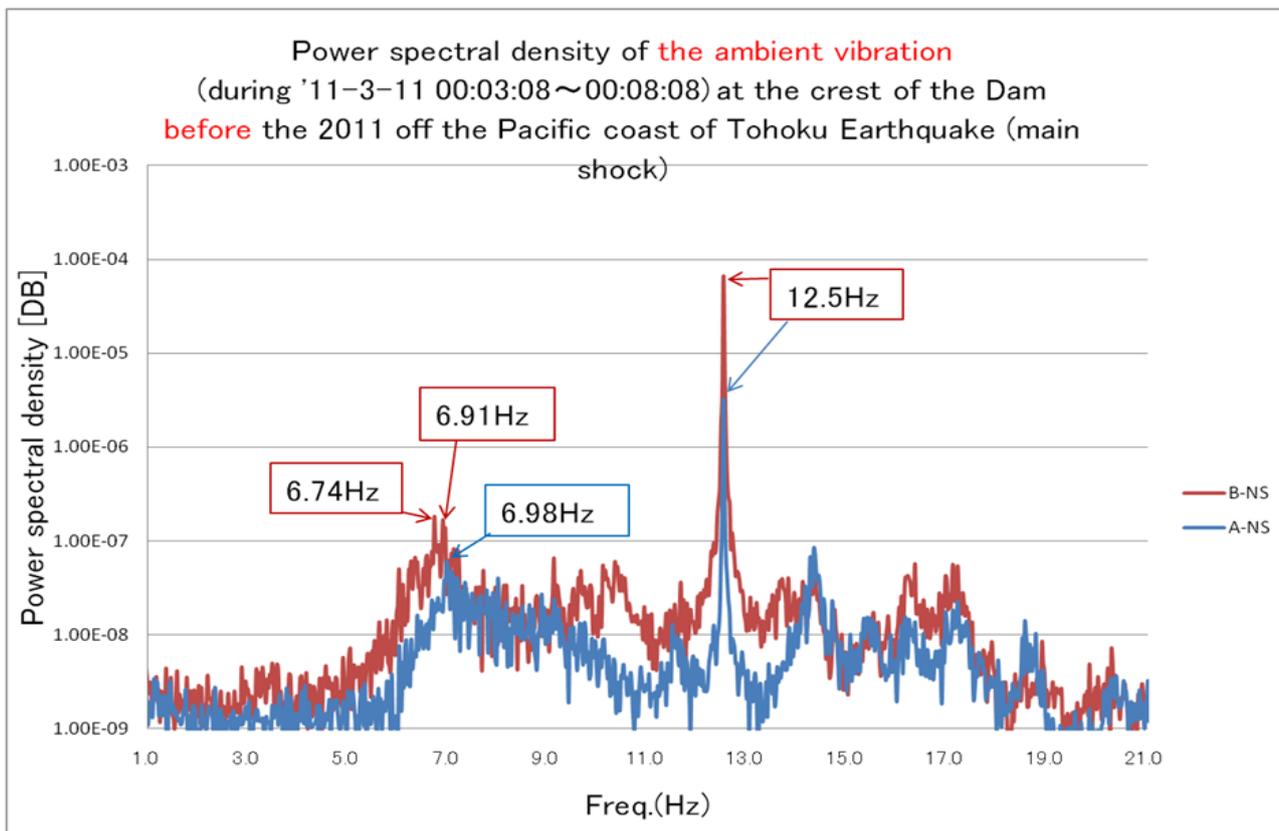


図-7 東北地方太平洋沖地震，ダム天端での本震前微動・加速度記録のスペクトル：測点-A(NS)，-B(NS)
(注)観測に使用しているPCに時刻のズレがあり，表示時刻はそれに伴う誤差を含む。

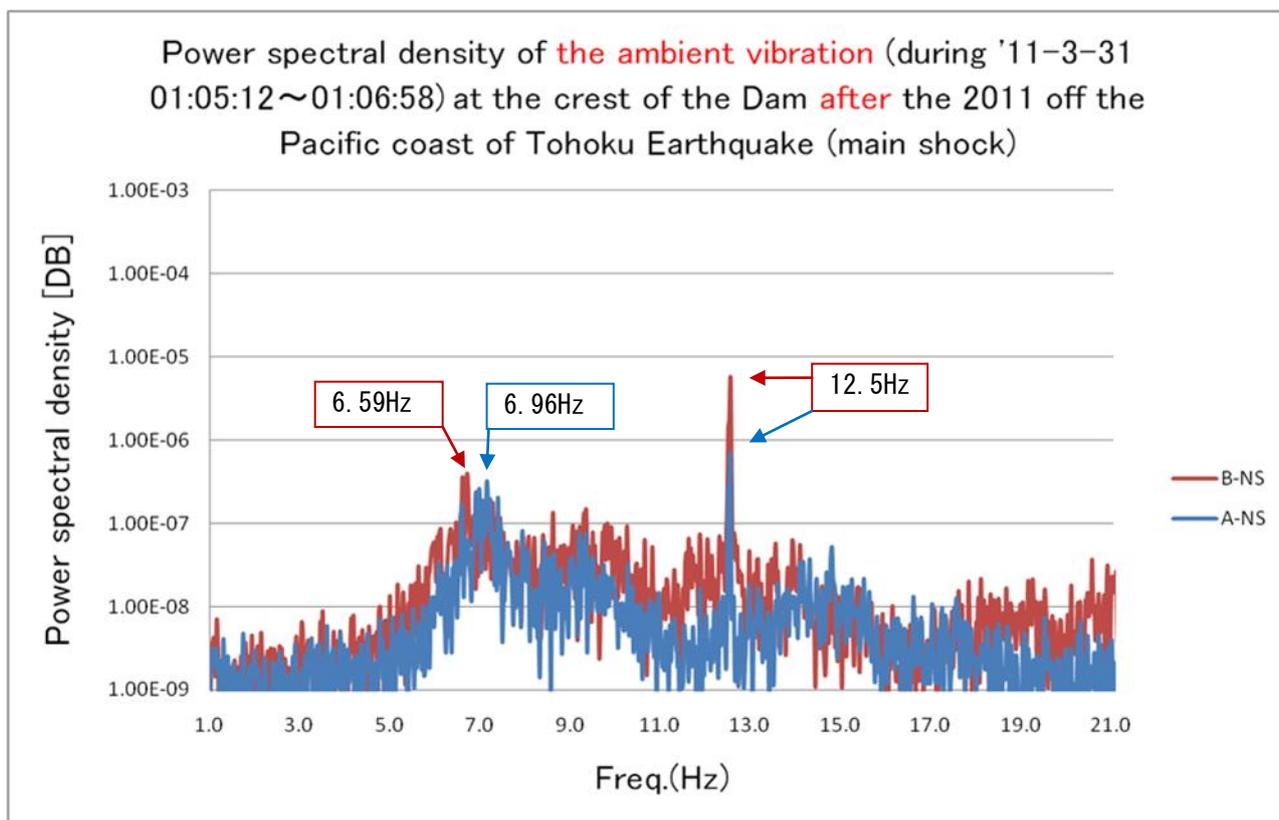


図-8 東北地方太平洋沖地震，ダム天端での本震後微動・加速度記録のスペクトル：測点-A(NS)，-B(NS)
(注)観測に使用しているPCに時刻のズレがあり，表示時刻はそれに伴う誤差を含む。また，本震に伴う停電後，観測システムを再起動し，出来るだけ早い機会での深夜の微動記録を選ぶようにした。その際，微小地震を含まないように配慮したため，微動継続時間を短めに採る結果となった。

5). 本震前後での微動の加速度振幅レベルの変化については、図-7、-8に示した範囲では、主要なピークである7Hz近辺では、若干ながら本震後微動における振幅レベルが本震前微動におけるそれを上回っており、一方、周辺の機械振動などからきていると思われる12.5Hzのピークについては、逆になっているが、総じて言えば、本震前後における微動の卓越振動数付近における振幅レベルは互いに大差ないものとみることができよう。本件についても同様で、本震前後での微動の振幅レベルの経時変動を詳細に明らかにするには、対応する詳細な解析を必要とすると考えらる。

5. まとめ

高経年化したアーチダムを観測対象とし、固有振動数とその経時変動・地震時変動を把握することを目的として、微動・地震動の長期継続観測を実施中である。2011年東北地方太平洋沖地震時にも観測を継続実施中であり、本震記録の他、前震、多くの余震群の観測記録が、その前後での微動記録とともに得られた。これら観測データを分析して以下の知見を得た；

- 1) 観測開始時期（2010年6月）での微動記録から観測対象ダムの固有振動数、および減衰定数を同定した。固有振動数としては、7.3Hz、11.4Hzなどの値を得た。
- 2) 約半年間での固有振動数の変動をみると、夏期から冬期にかけて固有振動数はダム表面温度と相伴って低下しており、両者には正の相関があることが示唆された。
一方、今回例示した夏期から冬期にかけての固有振動数の低下に対して、ダム貯水位の変動が与えた影響は大きくはなかったものと推察される。
- 3). 2011年東北地方太平洋沖地震時には、ダム天端において、極めて大きい最大加速度を持つ観測記録（約630gal）が収録された。その際の地震動継続時間は3分程にも及んだ。
- 4). 収録された加速度時刻歴波形記録を観察すると、第1波より、40-50秒程度後の第2波において最大加速度が記録されている。これは、例えば、K-NET 築館(MYG004)観測点(栗原市築館)の強震波形と共通の特徴である。
- 5). 本震およびその前後での微動のスペクトル解析によれば；
 - a). 本震時には、微動時に比して、卓越振動数が著しく低下していることが分かった。
 - b). 微動記録における本震前後での卓越振動数の変化はあるとしても極めて微小で、常時変動の範囲内にあると思われる。本震時卓越振動数の著しい低下を考慮に入れば、本震後微動における卓越振動数は、本震前微動における卓越振動数に概ね復したものと見ることができようが、

より詳細には今後の詳細解析により明らかにしていきたい。

- c). 微動記録における本震前後での卓越振動数付近における加速度振幅レベルの変化についても、総じて言えば、互いに大差ないものとみることができようが、より詳細には、今後の詳細解析により明らかにしていきたい。

当該ダムにおいては、上記本震記録に加え、4月7日深夜の大規模余震（4月7日23時32分頃発震、M7.1、震源：宮城県沖、最大震度：6強、当該ダムにおける最大加速度：測点-B(NS)において約470gal）を含む多くの余震群、前震、などの諸記録が、その前後での微動記録とともに得られた。今後、これらの記録に加え、既設地震計記録（天端に加え、天端のレベルより40.5m下がったレベルの記録を含む）を入手し、FEM解析を含め、アーチダムの耐震安全性、構造健全性などに係わる検討を深めていきたいと考える。

謝辞：本振動観測の実施にあたっては、（社）東北建設協会・技術開発支援制度より支援を受けていること、宮城県仙台地方ダム総合事務所からはフィールドの提供を受けていること、また研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究C（課題番号：23560576）によっていることを付記し、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山本鎮男：ヘルスマニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視，共立出版，1999.
- 2) 大熊信之，金澤健司，畑元浩樹：常時微動計測データから明らかとなった高経年大規模アーチダムの動的特性、電力土木 No.341，2009年5月，pp.9-17
- 3) 仲村成貴，上島照幸，塩尻弘雄：常時微動・地震動観測による高経年化したアーチダムの動特性（その1）－高密度観測に基づく動特性の同定結果－，土木学会第66回年次学術講演会，2011年9月，I-661.
- 4) 上島照幸，村上弘太，仲村成貴，金澤健司，塩尻弘雄：常時微動・地震動観測による高経年化したアーチダムの動特性（その2）－長期継続観測を通じたダムの振動特性変動の検出－，土木学会第66回年次学術講演会，2011年9月，I-662.
- 5) 宮城県仙台地方ダム総合事務所資料より.
- 6) 金澤健司，平田和太：クロススペクトル推定法による多自由度系構造物の振動モード同定，日本建築学会構造系論文集，第529号，2000年3月，pp.89-96.
- 7) 例えば，上田稔，豊田幸宏，塩尻弘雄，佐藤正俊：アーチダムの観測記録から求めた固有振動数とブロックジョイントの影響，土木学会論文集，No.654，I-52，2000年7月，pp.207-221
- 8) http://www.bosai.go.jp/news/oshirase/20110315_0

1

SYSTEM IDENTIFICATION, DETECTION OF PROPER FREQUENCY
VARIATION OF AGED ARCH DAM AND VIBRATIONAL BEHAVIOR DURING
THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE BY MEANS
OF LONG-TERM CONTINUOUS OBSERVATION OF AMBIENT
VIBRATION/SEISMIC MOTION

Teruyuki UESHIMA, Kenji KANAZAWA, Kohta MURAKAMI, Masataka
NAKAMURA, Hiroo SHIOJIRI and Yoshiaki ARIGA

Long-term continuous observation of ambient vibration/seismic motion is underway at the crest of an aged arch dam for the purpose of grasping proper frequencies and their variation along time passing, and the one during and/or before/after seismic events. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake occurred in the course of this long-term continuous observation, and the records of main shock, preshocks, lots of aftershocks were obtained, together with ambient vibration records before/after such events. Analyses of such observed data revealed the following;

- 1) Proper frequencies and damping constants were identified, using ambient vibration data just after the long-term continuous observation started in June, 2010, which brought the proper frequencies of 7.3Hz, 11.4Hz and so on.
- 2) The proper frequency of the dam during about half a year from summer to winter became lower together with the dam surface temperature, suggesting that the both parameters are correlated positively with each other. On the other hand, it is inferred that the level change of water in the dam reservoir did not affect so much on the above-mentioned proper frequency variation as far as the example shown in this paper was concerned.
- 3) During the main shock of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, observed record with very large maximum acceleration of about 630gal was obtained at the crest of the dam. The duration of the seismic motion of the main shock ranged about three minutes. Lots of aftershock records were also obtained. In addition, ambient vibration records were continuously obtained, including before/after the main shock and lots of aftershocks, though there were some periods where continuous observation was not successful. So, further research will be possible, using such data sets.
- 4) Spectral analyses of the main shock of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and of ambient vibrations before/after the main shock revealed that the predominant frequency during the main shock became remarkably lower than the ones from the ambient vibrations before/after the main shock, and that both the predominant frequency and the amplitude level from the ambient vibration after the main shock returned back to the ones before the main shock on the whole.