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：常時変動と地震時変動—

上島照幸¹⁾、塩尻弘雄²⁾、金澤健司³⁾

1) 正会員 日本大学理工学部理工学研究所、上席研究員 博(工学)

e-mail : ueshima@civil.cst.nihon-u.ac.jp

2) 正会員 日本大学理工学部土木工学科、教授 工博

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

3) 正会員 電力中央研究所地球工学研究所地震工学領域、上席研究員 博(工学)

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

要 約

高経年化したアーチダムを観測対象とし、卓越振動数とその経時変動・地震時変動を把握することを通じて構造健全性モニタリングに資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した。3年半に亘る微動・地震動の継続観測データの分析から；1) 常時微動による卓越振動数のモニタリングによってアーチダムの構造健全性を評価できること、2) 東北地方太平洋沖地震、およびその後の数々の大規模余震後においても観測対象ダムの構造健全性が維持されていたことを卓越振動数という数値によって客観的に提示できたこと、3) 卓越振動数が変化していないことは構造健全性の維持確認に加えて地震荷重が不変である確認にもなっており、地震後における耐震性検討が不要であることを示していること、など、重要な諸点が明らかになった。

キーワード： 微動・地震動長期継続観測、ダム、卓越振動数、構造健全性モニタリング

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。振動観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、1961年竣工。以下、「大倉ダム」と略称する）にて常時微動の高密度観測³⁾（観測器を高密度に配置して行う微動観測）、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きた。微動・地震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、通常使用状態における、あるいは地震時にお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。

論文 4)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卓越振動数の経時変動について検討した結果を報告した。加えて先の 2011 年東北地方太平洋沖地震時、或いは大規模余震時に本ダムにて観測された記録や、本震・大規模余震のそれぞれ前後で得られた微動記録を用いて若干の解析を行った結果を報告した。

本研究における大倉ダム天端での微動・地震動の長期継続観測については、(全体で 2010 年 6 月～2013 年 11 月までの) 計約 3 年半にわたり、実施された。

本論文では、観測対象とした高経年化したアーチダムについて、微動・地震動の長期継続観測の全期間に亘るデータ解析から得られる卓越振動数の常時変動・地震時変動を把握するとともに、それらの変動をもたらす要因分析を行い、微動・地震動の長期継続観測を通じてその構造健全性をモニタリングする、との観点をより強め、検討した結果を報告する。なお、本論文にいう「構造健全性」とは構造物全体の剛性に影響を及ぼすような損傷や劣化が生じていない状態を指すものとする。「構造健全性に影響するような損傷や劣化が生ずると卓越振動数が変化する」ことを示した論文事例を文献5) に挙げる。

2. 観測対象ダムと観測・解析の概要

観測対象ダムは堤高 82.0m、堤頂長 323.0m、総貯水容量 28,000,000m³、堤体積 226,000m³ 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 (同ダムの常時満水位は EL.270.60m)。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 4.4m の一般道になった

図 1 観測対象ダム平面図と加速度長期継続観測点および温度観測点位置図

〔「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で、天端、およびそれから 40.5m 下の岩盤上に設置されている。「観測対象ダム平面図」については「宮城県仙台地方ダム総合事務所資料」⁶⁾ によった。温度観測では、上流側、下流側それぞれについて、堤体温度、気温を観測した。〕

ている。図 1 にダム平面図と加速度長期継続観測点および温度観測点位置図を示す。3 点の加速度長期継続観測点-A、-B、-C 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⁷⁾(以下 ARMA 法)を適用して、対象構造物の振動特性を同定した。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した。本論文では、簡単のためにダム軸直交方向を NS 方向、ダム軸方向を EW 方向と表記することとし、測点-A、-B の NS 方向成分のクロススペクトルを用い振動特性を同定した。ARMA モデルの次数は 10~50 次の間の 10 次刻みで試計算を行った。同定例を図 2 に例示¹⁾する。図 2 では、8Hz 近辺、および 11.5Hz 近辺に顕著なピークが現れていることが分かる。微動の高密度観測³⁾から得られた、これらの振動数に対応するモード形状は、左岸側アーチのみに着目すれば、前者は逆対称 1 次モード、後者は対称 2 次モードにそれぞれ相当しており、ダムの構造健全性評価に当たり、いずれも主要なモードであることが分かる。そこで、本論文では、前者を”mode-1”、後者を”mode-2”とし考察を進める。なお図 2 中、12.5Hz に鋭いピークが見られるが、減衰が 0.01% 程度と極めて小さく、堤体の振動モードとは考えられないため、ここでは考慮の対象から除外した。

図 2 微動長期継続観測における振動特性同定例
(FFT：観測記録の FFT Identified：同定結果)

3. 観測ダムの微動時卓越振動数の経時変動と堤体温度、貯水位との相関

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。本章では微動時卓越振動数の経時変動と堤体温度との相関について、また卓越振動数～貯水位関係について記す。

3.1 微動時卓越振動数の経時変動と堤体温度との相関

図3(1)、(2) には、それぞれmode-1、-2 に相当する卓越振動数 (mode-1：青、mode-2：茶) の 3年半に亘る経時変動を、堤体温度（緑）とともに示している。長期間に亘る卓越振動数の経時変動の表示にあたっては、日変動を除去するため、5分ごとに得られている卓越振動数を（また1時間毎に得られている堤体温度をそれぞれ） 1日平均して表示している。常時微動の長期継続観測から得られた卓越振動数の経時変動や堤体温度との相関について以下の事項が判明した；

- (1) 卓越振動数は堤体温度との相関性が高く、mode-1、-2 とともに、夏期に高く冬期に低くなる周期性が

¹⁾ 図 2 では、ARMA モデルの次数が 50 次のケースを例示しているが、微動長期継続観測の全期間に亘る試行を考慮し、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。

ある(周期は1年)。夏期と冬期での変動幅は、mode-1 で 2Hz 弱、mode-2 では 3Hz にも上っている。卓越振動数の地震時変動幅が東北地方太平洋沖地震本震時で約 1Hz 程度であった⁴⁾ことを考えると、微動の長期継続観測から得た夏期と冬期での卓越振動数の変動幅は相当に大きいものであることが分かる。卓越振動数の経時変動のこうした特徴は、ダムの堤体温度の低下に伴い、ダムが収縮することで堤体コンクリートの圧縮応力が低下すると、継ぎ目部の影響によりアーチ作用が失われてダムの等価剛性が低下し、堤体の卓越振動数の低下が引き起こされるものと推察される。

- (2) mode-1では卓越振動数と堤体温度ないし気温の経時変動には位相差があり、卓越振動数の位相が温度の位相に比して1～3ヶ月程度遅れている。一方、mode-2 では卓越振動数と堤体温度ないし気温の経時変動には位相差が殆どなく、したがって相関係数も mode-2 の方がより高い。mode-1とmode-2 に

図3 微動時卓越振動数の3年半に亘る経時変動と堤体温度との相関

- 注) 1) 卓越振動数、堤体温度とも1日平均をとった。堤体温度については上流側第1chのデータを使用した。
2) (mode-1、-2とも)卓越振動数の経時変動曲線が東北地方太平洋沖地震(本震)直後の3週間程度途切れているのは、停電などのため欠測したことを示している。

おけるこの差異が生じた原因については、貯水位が影響している可能性があると思われる。この点については次節で再度考察する。

- (3) 卓越振動数と温度の長期間に亘る経時変動を1日平均で見る範囲では、温度として堤体温度を採る場合と気温を採る場合とで、有意な差は見られない。また対象構造物の表面温度差の発生に伴ってコンクリート部材の剛性が増加し、構造物全体の固有振動数が増加するとの研究結果が示されている⁸⁾が、本研究でも、上・下流それぞれで温度(堤体温度、気温)観測を行っており、表面温度差が卓越振動数の変動にどの程度の影響を及ぼしているかについても、今後検討する必要があると考える。

3.2 堤体温度と貯水位が微動時ダムの卓越振動数に与える影響について

本節では、微動時卓越振動数の3年半に亘る経時変動と貯水位との相関を示す図4、貯水位～微動時

図4 微動時卓越振動数の3年半に亘る経時変動と貯水位との相関

注) 1) 卓越振動数は1日平均をとった。(貯水位については、元データが1日1回のサンプリングである。)

- 2) (mode-1、-2とも)卓越振動数の経時変動曲線が東北地方太平洋沖地震(本震)直後の3週間程度途切れているのは、停電などのため欠測したことを示している。

卓越振動数関係を示す図5 について述べた後、貯水位が微動時卓越振動数に与える影響についての考察を中心としながらも、本章全体を総括的に見て、堤体温度と貯水位が微動時ダムの卓越振動数に与える影響について考察する。

図 4(1)、(2) には mode-1、-2 に相当する卓越振動数 (mode-1：青実線、mode-2：茶実線) の 3 年半に亘る経時変動を貯水位 (青破線) とともに示している。前節同様、長期間に亘る卓越振動数の経時変動の表示にあたっては日変動を除去するため 5 分ごとに得られている卓越振動数を 1 日平均して表示している (貯水位については元データが 1 日 1 回のサンプリングである)。また図 5 には貯水位～微動時卓越振動数関係をモード別に示す。

固有 (または卓越) 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高くなる (=水位上昇に伴う貯水の付加質量増加による卓越振動数低減効果) 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低下する場合がある(=水圧増加に伴ってジョイントの閉塞度が上昇することによる卓越振動数増加効果。なお堤体温度についてもその上昇に伴うジョイント閉塞度上昇により卓越振動数増加効果を持つ) と報告されている²⁾⁹⁾。それらの効果はモード形状により異なることも報告されている。

今回対象としたアーチは国内唯一のダブルアーチであるなど、谷形状も構造形式も複雑であり、それらの影響の現れ方も独特と思われる。堤体温度と貯水位が微動時ダムの卓越振動数に与える影響について、本章全体を総括的にみれば、以下の諸事項を指摘できよう；

- (1) mode-1 では、卓越振動数と水位の関係に関して従来の研究が示すところと類似した形状を呈した(図 5)。また、温度変化と卓越振動数の変化の位相が異なる一方で、低水位、高水位のピークで、それぞれ卓越振動数高位、低位のピークを迎えるなど、ジョイント閉塞効果より、付加質量の効果が卓越しているとみることができる。
- (2) 一方、mode-2 に関しては、温度変化と卓越振動数の変化の位相がほぼ一致する一方、水位が上がっても卓越振動数の顕著な低下が認められないなど、付加質量の効果よりもジョイント閉塞の効果が卓越しているとみることができる。

図 5 貯水位～微動時卓越振動数関係

- (3) 卓越振動数に対して堤体温度、貯水位、両者の影響が混在した状態であることを踏まえ、重回帰分析を行った。
mode-1 における卓越振動数に対する温度の相関係数は 0.541、水位の相関係数は 0.201、卓越振動数に対する温度と水位との重相関係数は 0.736 であった。水位との相関係数が低いのは、ジョイントの閉塞効果と付加質量効果という相異なる効果が互いに相殺しているためと考えられる。一方、mode-2 における卓越振動数に対する温度の相関係数は 0.863、水位の相関係数は 0.605、卓越振動数に対する温度と水位との重相関係数は 0.917 との結果が得られ、mode-1、-2 いずれのモードにおいても、卓越振動数～温度・水位間には、強い、ないし極めて強い相関があることが判明した。
- (4) ダム堤体の卓越振動数に対しては、堤体温度、貯水位の両者が複雑に絡み合って影響を与えていることが本章で示された。温度、水位、それぞれからの影響を分離することは、構造健全性モニタリングの観点からも重要であり、今後の課題である。

4. 2011年東北地方太平洋沖地震時、およびその余震時の観測対象ダムの振動挙動

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃に発生した東北地方太平洋沖地震 (マグニチュード：9.0、震源：三陸沖、最大震度：7) 時、当該ダム (震央距離：約 189km) 天端に設置された長期継続観測点(図 1)中、測点-A、-B では、微動・地震動を継続観測中であり、図 6 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。また

その後の余震群についても観測記録が収録された。さらに本震・余震群のそれぞれ前後における微動記録も収録されており、それらを併せ加速度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：185gal、天端より40.5m 下の岩盤上における最大加速度：87gal（いずれも本論文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）であった²。
- (2) 収録された加速度時刻歴波形記録を観察すると、複数の波群から構成されており、第1波群より40-50秒程度後の第2波群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 築館観測点（MYG004、栗原市築館）など、宮城県内の他の観測点における強震波形¹⁰⁾と共通の特徴であり、今回の地震の特徴の本観測対象ダムでの記録への現れと考えられる。
- (3) 本震加速度記録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。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 方向成分の卓越振動数は 6.6~7.1Hz 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たことが明らかとなった（図7）。
- (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 に示した範囲では殆ど変化がないか、若干ながら（0.1Hz 未満程度）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

図6 2011年東北地方太平洋沖地震時に当該ダム天端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)。（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 2011年東北地方太平洋沖地震・本震時、及びその前後での微動のダム天端での加速度記録のスペクトル：測点-B(NS)

² 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いるものである。なお既設地震計記録については「宮城県仙台地方ダム総合事務所資料」⁶⁾ によった。

- たものと見る事ができよう。
- (5) 本震前微動時に比し本震時卓越振動数は著しく低下し、本震後微動では本震前微動時の卓越振動数に復するとの現象が、大規模余震時にも再現するかを検討した。ここで取り上げた大規模余震は宮城県沖を震源とし、2011年4月7日23時32分頃に発生したマグニチュード7.2、最大震度6強の余震であり、観測対象ダム（震央距離：約113km）天端での最大加速度は約430gal（測点-B(NS)にて記録）であった。スペクトル解析の結果、図8に示されるとおり余震前微動時に比して余震時卓越振動数は大きく低下し、余震後微動では余震前微動時³の卓越振動数に復するとの現象が再現していることを確認した。

- (6) 2011年3月から2012年12月までの地震記録・常時微動記録に関して、(4)、(5)で述べたと同様な解析を実施した。地震時と地震前後の微動時と比較すると卓越振動数の低下を見て取ることができたケースが多かったが、地震時の卓越振動数の低下がみられない地震も少なからず存在した。2012年12月までの地震において基本的に卓越振動数は地震時に低下しているが、地震後微動時の卓越振動数は地震前のレベルまで回復していることが分かった。

- (7) 構造健全性モニタリングの観点からは卓越振動数の振動振幅依存性に係わる検討も意義あることと考え、また2011年3月から2012年12月までに数gal程度～約630galの最大加速度を持つ地震記録が数多く得られたことに鑑みて地震時卓越振動数～最大加速度関係をプロットした（図9）。その際、卓越振動数に対する堤体温度・貯水位の影響をあえて無視したが、図9中では満水位に近い状態で発生した地震についてのプロット点を識別できるようにしてあり、また微動時卓越振動数の変動範囲、満水位に近い状態での微動時卓越振動数変動範囲をも明示している。図から、温度・水位の影響を無視し

図8 2011年東北地方太平洋沖地震・余震（'11-4-7 23:32 発震、M7.2、震源：宮城県沖）時、及びその前後での微動のダム天端での加速度記録のスペクトル：測点-B(NS)

図9 卓越振動数 vs. 最大加速度：2011年東北地方太平洋沖地震・本震とその余震群から：測点-A(NS)

(注) 観測対象ダム天端における深夜微動の振幅レベルは30mgal程度である。上図での微動時卓越振動数のplot位置については、その振幅レベルを正確に表したものではない。

³ 第(3)～(6)項中に記載されている「本震（ないし余震）前後の微動」の観測時期については、ノイズを避ける意味で原則として本震（ないし余震）発生時刻の1日以内の深夜の記録から採り、微小地震を避けるよう工夫した。ただし本震後微動については事後の停電などから来る観測体制復旧に手間取り、およそ20日後の深夜微動観測記録から採らざるを得ないこととなった。

た故か、バラツキは大きいものの最大加速度が大きくなるにつれて卓越振動数が低下する傾向を読み取りうるとみられること、満水位に近い状態で発生した地震動・微動に関しては、振動数低減効果により卓越振動数が他に比して低く、微動～地震動の範囲で、振幅が大きくなるに伴い卓越振動数が些かながら低下する傾向を示していること、などが分かった。

- (8) 微動・地震動の長期継続観測実施中に2011年東北地方太平洋沖地震とそれに続く大規模な数々の余震群が発生したが、卓越振動数の長期間にわたる経時変動図を参照すると、本震をはじめ数々の大規模余震時にも、地震前後での微動の卓越振動数の顕著な変動は見られないことが分かる。このことからダムには顕著な損傷は発生していないと考えられる。
- (9) このように；1) 常時微動による卓越振動数のモニタリングによってダムの構造健全性を評価できること、2) 2011年東北地方太平洋沖地震、およびその後の数々の大規模余震後においても観測対象ダムの構造健全性が維持されていたことを、卓越振動数という数値によって客観的に提示できたこと、3) 卓越振動数が変化していないことは、構造健全性の維持確認に加えて、地震荷重が不変である確認にもなっており、地震後における耐震性検討（バックチェック）が不要であることを示していること、など、重要な諸点が明らかにされた意義は大きいものとする。

5. まとめ

高経年化したアーチダムを観測対象とし、卓越振動数とその経時変動・地震時変動を把握することを通じて構造健全性モニタリングに資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した。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) 観測開始初期での微動記録から観測対象ダムの卓越振動数、および減衰定数を同定した。観測対象ダムは 8Hz 近辺(以下mode-1)、11.5Hz 近辺(以下mode-2)などに卓越振動数を持つことが分かった。
- (2) アーチダム堤体の上下流方向の卓越振動数は、基本的に夏期に高く冬期に低いほぼ 1年周期の経時変動を示しており、堤体温度ないし気温との相関が極めて高いことが示された。また年間での卓越振動数の最大値と最小値の差は、2Hz 弱～3Hz にも上っていることが明らかとなった。この卓越振動数の変動幅は、後述する強震動を受けた際の変動幅をも上回るものである。ダム表面温度の低下に伴い、ダムが収縮することで堤体コンクリートの圧縮応力が低下すると、継ぎ目部の影響によりアーチ作用が失われてダムの等価剛性が低下し、堤体の卓越振動数の低下が引き起こされるものと推察される。
- (3) 水位と温度がダムの卓越振動数に与える影響を全体として考察すると、mode-1 に関しては、温度変化と卓越振動数の変化の位相が異なる一方で、低水位、高水位のピークで、それぞれ卓越振動数高位、低位のピークを迎えるなど、ジョイント閉塞効果より、付加質量の効果が卓越しているとみることができよう。一方 mode-2 に関しては、温度変化と卓越振動数の変化の位相がほぼ一致する一方、水位が上がっても卓越振動数の顕著な低下が認められないなど、付加質量の効果よりもジョイント閉塞の効果が卓越していると考えられる。卓越振動数に対して堤体温度、貯水位、両者の影響が混在した状態であることを踏まえ、重回帰分析を行ったところ、mode-1 における卓越振動数に対する温度と水位との重回帰係数は 0.736、mode-2 における卓越振動数に対するそれは 0.917 との結果が得られ、mode-1、-2 いずれのモードにおいても、卓越振動数～温度・水位間には、強い、ないし極めて強い相関があることが判明した。卓越振動数に対する温度、水位、それぞれからの影響を分離することは、構造健全性モニタリングの観点からも重要であり、今後の課題である。
- (4) 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。収録された加速度時刻歴波形記録を観察すると、複数の波群から構成されており、第1波群より40-50秒程度後の第2波群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 築館観測点（MYG004、栗原市築館）など、宮城県内の殆どの観測点における強震波形と共通の特徴であり、今回の地震の特徴の本観測対象ダムでの記録への現れと考えられる。
- (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、1) 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たこと、2) 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

て微小であり、本震時卓越振動数の著しい低下を考慮に入れれば、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られること、などが分かった。

- (6) 本震前微動時に比し本震時卓越振動数は低下し、本震後微動時は本震前微動時卓越振動数に概ね復するとの、上記(5) で述べた現象は、大規模余震時にも再現していることを確認した。
- (7) 2011年3月から2012年12月までの地震記録・常時微動記録に関して、(5)、(6) で述べたと同様な解析を実施した。地震時と地震前後の微動時を比較すると卓越振動数の低下を見て取ることができたケースが多かったが、地震時の卓越振動数の低下がみられない地震も少なからず存在した。2012年12月までの地震において基本的に卓越振動数は地震時に低下しているが、地震後微動時の卓越振動数は地震前のレベルまで回復しており、この点から判断すると堤体への大きな損傷はないと思われる。
- (8) 構造健全性モニタリングの観点からは、卓越振動数の振動振幅依存性に係わる検討も意義あることと考え、2011年3月から2012年12月までの地震記録に関するダム天端での上下流方向最大加速度～卓越振動数関係を、地震時卓越振動数に対する温度・水位の影響を無視して求めたところ、バラツキは大きいものの、最大加速度が大きくなるにつれて卓越振動数が低下する傾向を読み取りうるとみられること、満水位に近い状態で発生した地震・微動に関しては振動数低減効果により卓越振動数が他より低く、微動～地震動の範囲で、振幅が大きくなるに伴い卓越振動数が些かながら低下する傾向を示していること、などが分かった。
- (9) このように、1) 常時微動による卓越振動数のモニタリングによってアーチダムの構造健全性を評価できること、2) 2011年東北地方太平洋沖地震、およびその後の数々の大規模余震後においても観測対象ダムの構造健全性が維持されていたことを、卓越振動数という数値によって客観的に提示できたこと、3) 卓越振動数が変化していないことは、構造健全性の維持確認に加えて、地震荷重が不変である確認にもなっており、地震後における耐震性検討（バックチェック）が不要であることを示していること、など、重要な諸点が明らかにされた意義は大きいものとする。

観測対象ダムにおいては、上記のとおり、2011年東北地方太平洋沖地震本震記録に加え、同年4月7日深夜の大規模余震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、およびそれから 40.5m 下の岩盤上での記録を含む）の解析、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さらに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、および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）より支援を受けたこと、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たこと、大倉ダム管理事務所の各位には、現場における様々な点での便宜を図って頂いたこと、仙台市大倉川土地改良区管理下にある建物の一角を借用して観測機器を設置させて頂いてきたこと、本報告におけるデータ処理について、元宮城大学学生の高嶋佑典氏、千葉奈央氏にご協力いただいたこと、を記し、関係各位に 深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山本鎮男：ヘルスモニタリング機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視、共立出版、1999年、pp. 201-240.
- 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、pp. 9-17.
- 3) 仲村成貴、塩尻弘雄、上島照幸、有賀義明、大湊周作：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、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.69、No.4(地震工学論文集第32巻)、2013年、I_742-I_749.
- 4) 上島照幸、金澤健司、村上弘太、仲村成貴、塩尻弘雄、有賀義明：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、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.68、No.4(地震工学論文集第31-b巻)、2012年、I_186-I_194.

- 5) 大場新太郎、濱川尚子：1995年兵庫県南部地震における杭の損傷による建物固有周期の変化、日本建築学会構造系論文集、第495号、1997年5月、pp. 63-70.
- 6) 宮城県仙台地方ダム総合事務所 大倉ダム管理事務所：大倉ダム図面集、貯水位記録、など、2010-2012年.
- 7) 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、pp. 89-96.
- 8) 金澤健司：コンクリート系建物の固有振動数の日変動メカニズムの解明、日本建築学会構造系論文集、第612号、2007年2月、pp. 63-71.
- 9) 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、pp. 207-221.
- 10) 防災科学技術研究所：2011年東北地方太平洋沖地震、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」(<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-tohoku110311/>)、2011年.

(受理：2015年 3月29日)

(掲載決定：2015年10月 7日)

Application of Structural Health Monitoring Technique to an Aged Arch Dam by Means of Long-Term Continuous Observation of Ambient Vibration/Seismic Motion-Detection of Predominant Frequency Variation along Time : Variation during Ambient Vibration/Seismic Motion

UESHIMA Teruyuki¹⁾, SHIOJIRI Hiroo²⁾ and KANAZAWA Kenji³⁾

- 1) Member, Research Institute of Science and Technology, Nihon University, Dr. Eng.
- 2) Member, Professor, Nihon University, Dr. Eng.
- 3) Member, Senior Research Engineer, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

ABSTRACT

Structural health monitoring technique was applied to an aged arch dam, where long-term continuous observation of ambient vibration /seismic motion was performed over a span of three and a half years and where predominant frequency variation along time was detected, variation during ambient vibration/seismic motion. As the result, the following important matters were made clear; 1) Structural health of an aged arch dam can be evaluated through the monitoring of the predominant frequency variation which are detected as the result of the long-term continuous observation of ambient vibration/seismic motion and its data analysis. 2) It was shown objectively by the numerical value of the predominant frequency that the structural health of the observed aged arch dam was maintained even after the main shock of 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, and also lots of its large-scale aftershocks. 3) It was confirmed that the structural health of the observed arch dam was maintained and also that the seismic load unchanges through the fact that the predominant frequency of the observed arch dam unchanged before and after the large-scale earthquakes, which shows that the seismic back-check on the observed aged arch dam is unnecessary even after suffering from large-scale earthquakes.

Keywords : Long-term continuous observation, Arch dam, Predominant frequency, Structural health monitoring