

3.3 フィルダムの長期的な振動特性の変化及び ダム-岩盤系における波の伝播挙動に関する一考察

研究年度：平成28年度～平成30年度

研究分野：ダム構造・設計に関する調査研究

調査研究名：フィルダムの長期的な振動特性の変化及びダム-岩盤系における波の伝播挙動に関する一考察

研究者：松本徳久、安田成夫*、小林憂三

【要約】

本研究において、ダムサイトの地震記録の分析などにより荒砥沢ダムの約23年間にわたる振動特性（固有振動数、加速度増幅率）の変化について考察した。2008年の岩手・宮城内陸地震を受けて、一時的にダム堤体の水平方向の固有振動数及び加速度増幅率は大幅に低下したが、本震の約一週間後にこれらの振動特性が地震前の状態にほぼ回復した。また、地震記録のクロススペクトル及びコヒーレンス関数分析により天端中央の地震応答に対する下方岩盤並びに両岸地山の地震動の寄与度合について考察した。ダム堤体の1次固有振動数までの低振動数範囲ではダム堤体の地震応答に対して下方岩盤の地震動の寄与が大きいこと、それ以上の振動数範囲では両岸地山の地震動の寄与は卓越する場合もあることを指摘している。

【キーワード】

ロックフィルダム・地震記録・動的特性・伝播挙動、クロススペクトル、コヒーレンス関数

【背景・目的】

重要な社会基盤施設であるダムのメンテナンス、安定的な運用及び地震時安全性を確保するために、実地震時のダム堤体挙動のモニタリング及びその観測結果を利用した関連研究が益々重視されてきている。地震観測記録を用いたスペクトル分析や統計処理により、ダムの固有振動数や加速度増幅率や減衰特性などの動的特性の評価、ないしダム堤体の健全性の評価が行われている。松本ら¹⁾は多くのダムにおける地震観測記録から堤体の固有振動数を求め、これをダムタイプ、堤高及び地震動強さの関係として示した。大町ら²⁾は、ロックフィルダムの地震観測記録を詳細に分析し、強い地震動を受けて堤体材料の物性値が大きく変化することを明らかにした。金銅ら³⁾はコンクリート重力ダムの固有振動数と地震動強さや水位などとの関係を近似式で示した。

これまでダム堤体の地震時挙動の観測及び関連分析は個別の地震時現象、または不特定の多数ダムの地震時現象を統計的に整理したものである。本研究では、フィルダムの振動特性をより的確に把握するために、荒砥沢ダムを考察対象として、23年間の観測記録を分析することにより、ダムの長期的な振動特性（固有振動数と加速度増幅率）の変化並びに2008年の岩手・宮城内陸地震の影響を明らかにした。

一方、従来のダムの耐震設計では、地震動が堤体の下方岩盤から垂直に入射することを前提としており、アバウトメントの任意位置の地震動の変化及びそれによる堤体の地震応答への影響は考慮されていない。堤体の地震応答に対する下方岩盤並びに両岸地山の地震動の寄与を明らかにすることは、ダムの耐震設計及び耐震性能照査における地震動条件の設定に対して資することができると考えられる。

そこで、本研究において、荒砥沢ダムでの多数の地震記録を基に、地震観測点間の伝達関数分析、クロススペクトル分析及びコヒーレンス関数分析を行い、ダム天端の地震応答と下方岩盤並びに両岸地山の地震動との相関性を調べた。これにより、ダムの地震応答に対する下方岩盤及び両岸地山の地震動の寄与度合を明らかにし、これに対する岩手・宮城内陸地震（以降“本震”と呼ぶ）の影響及び地震後の回復状況を考察した。

【研究内容】

(1) 検討対象

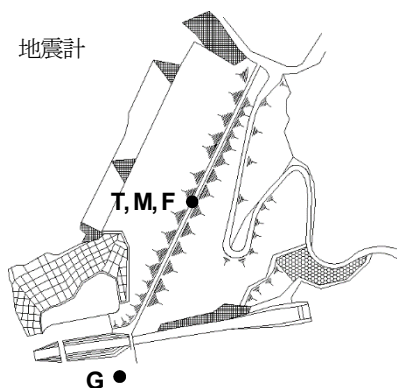
① ダム諸元

荒砥沢ダムは、1998年に完成した堤高74.4mの中央コア型ロックフィルダムである。表-1にダムの諸元を示す。図-1にダム堤体の平面図および標準断面図並びに地震計の設置位置を示す。ダムの基礎岩盤(F)、コア中央(M)、ダム天端(T)および右岸地山(G)の各計測点で三方向(上下流方向、ダム軸方向および鉛直方向)に地震計が設置されている。

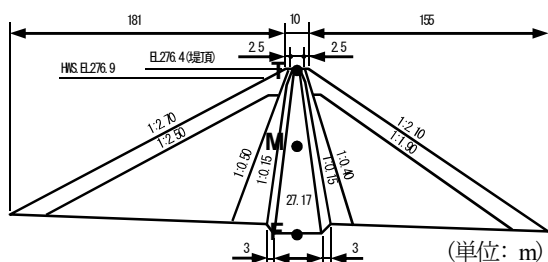
表-1 荒砥沢ダムの諸元

| | |
|--------|---|
| ダム所在地 | 宮城県栗原郡栗駒町文字荒砥沢 |
| ダム形式 | 中央遮水型ロックフィルダム |
| 堤高 | 74.4m(最低地盤標高 EL205.0m) |
| 堤頂長 | 413.7m |
| 堤頂幅 | 10.0m |
| 天端標高 | EL.279.4m |
| 非越流部標高 | EL.278.9m |
| 法面勾配 | 上流側：1:2.7 下流側：1:2.1 |
| 堤体積 | 3,048km ³ |
| 流域面積 | 20.4km ² |
| 総貯水量 | 13,850,000m ³ |
| 設計震度 | 0.15G(ダム本体), 0.18G(取水塔, 橋梁), 0.16G(洪水吐) |

凡例：● 地震計



(a) 平面図



(b) 標準断面図

図-1 荒砥沢ダム及び地震計位置

② 地震観測概要

堤体盛土の完成直後の1992年から2015年まで総計約1700回の地震を記録した。このうち、基礎岩盤で10gal程度以上の地震が約500回、100gal程度以上の地震が37回であった。特に2008年6月14日に岩手・宮城内陸地震(M7.2)が発生し、基礎岩盤で上下流方向の最大加速度値が1024galと記録された。この値は、ダムの基礎岩盤の地震記録としては国内で最大であった。

(2) ダム堤体の長期的な振動特性の変化

ダムの地震記録にはダムの振動特性（固有振動数、加速度増幅率、減衰特性など）が反映されているから、前述した約23年間の地震記録を分析することにより、ダム堤体の長期的な振動特性の変化を把握することが可能であると考えられる。本研究では、地震記録を基に、ダム堤体の各方向の1次固有振動数及び加速度増幅率の長期的な変化を考察した。

① 固有振動数の変化

ダム堤体の基本的な振動特性を調べるために、微小地震の場合における計測誤差の影響及び強い地震動を受けた場合における土質材料の非線形性の影響を取り除く必

要がある。ここで、多数の地震記録から、天端の上下流方向の最大加速度が10～20gal範囲のものを選んだ上で、時間的な分布を考慮して本分析に使用する地震記録を抽出した（計38地震）

抽出された地震記録に対して、加速度応答のフーリエスペクトルを求め、ダム堤体における伝達関数（天端(T)と基礎岩盤(F)のフーリエスペクトル比)を求めた。各方向（上下流方向、ダム軸方向及び鉛直方向）の伝達関数の1次ピークに対応する卓越振動数をダム堤体の1次固有振動数と見做し、地震の発生時刻順で整理した。

1992年から2015年までの23年間の地震記録から求められたダム堤体の各方向の1次固有振動数の履歴を図-2に示す。この図より以下のことが言える。

i 強い地震動によるダム堤体の固有振動数の一時的な低下

2008年6月14日の本震の直後から同年6月18日までダム堤体の各方向の1次固有振動数が地震によってバラツキがあるものの、著しく下っていた。また、同6月18日から6月20までの間に水平方向の1次固有振動数に回復傾向が見られ、6月21日以降は比較的安定的な状態になっていると見受けられる。この結果により当該地震を受けてダム堤体の固有振動数が一時的に低下していたことがわかる。

ii 低下した堤体の固有振動数の回復

各方向の1次固有振動数が地震毎に変動しているが、本震及びその余震を境界に、その前後の平均値を取ると、図-2の実線で示す結果になり、その値を表-2にまとめる。本震を受けて、ダム堤体の上下流方向及びダム軸方向の1次固有振動数がほぼ同じ程度（約9%）で低くなっており、当該本震の数日後にダム堤体の水平方向の1次固有振動数がほぼ回復され、やや低くなっているが、安定な状態になっていると見られる。

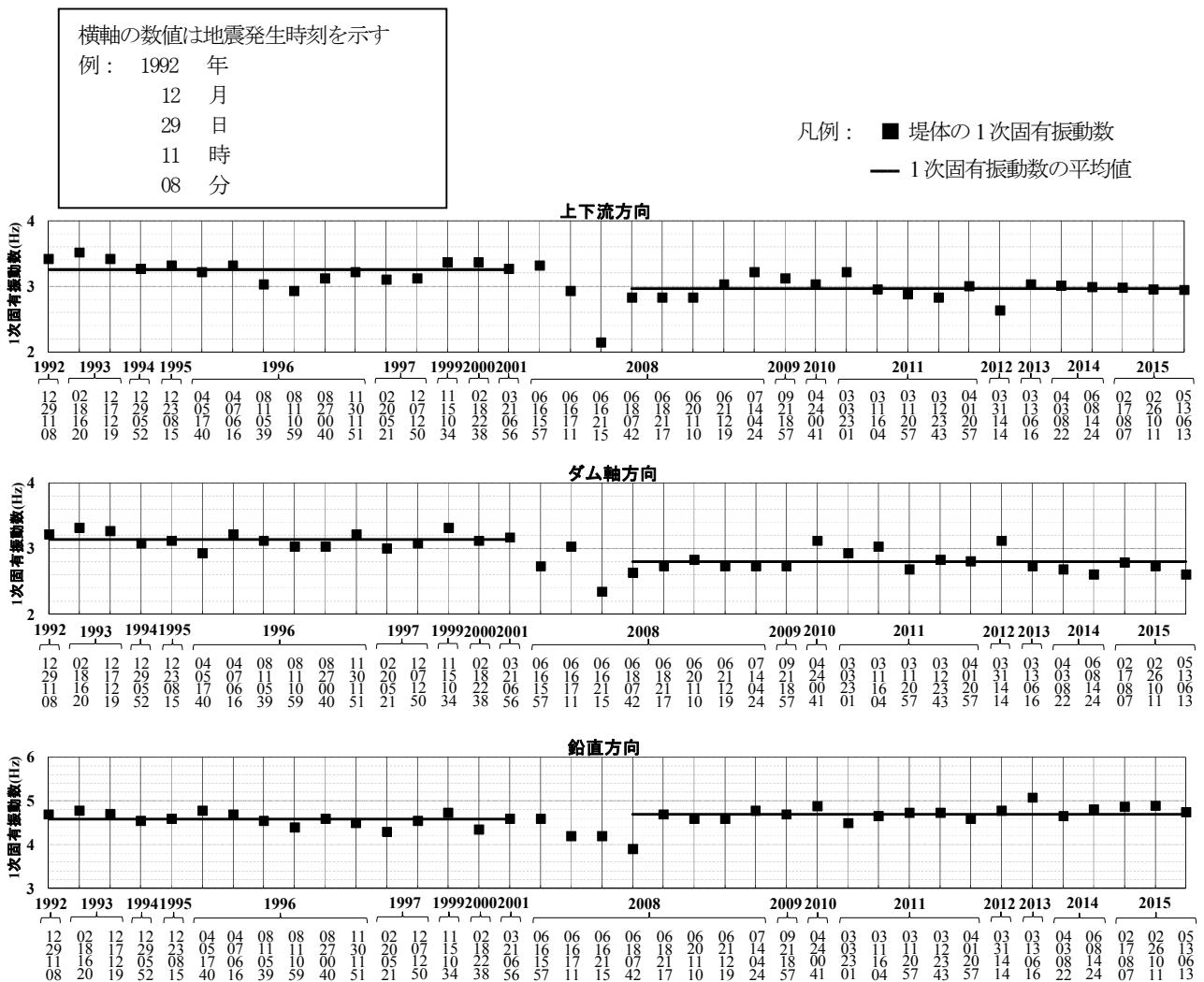


図-2 ダム堤体の1次固有振動数の変化

表-2 ダム堤体の1次固有振動数の平均値の変化

| 方向 | 地震前 ^{*1} (Hz) | 地震後 ^{*1} (Hz) | 相対変化 ^{*2} (%) |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 上下流 | 3.25 | 2.96 | -8.92 |
| ダム軸 | 3.14 | 2.83 | -9.87 |
| 鉛直 | 4.58 | 4.66 | +1.75 |

注：*1 岩手・宮城内陸地震及びその余震を指す

*2 相対変化=(地震後-地震前)÷地震前

iii 強い地震動により生じた盛土材料の異方性

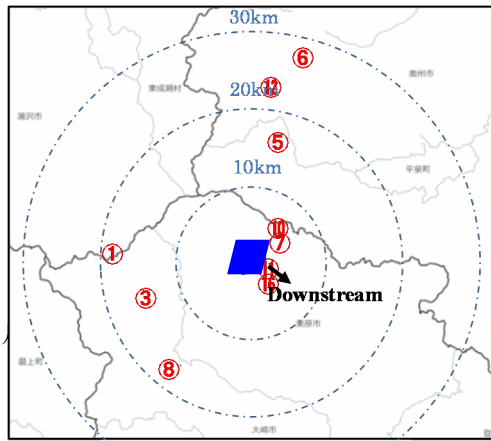
本震を受けて、ダム堤体の鉛直方向の1次固有振動数も一時的に下っていたが、その後回復し、当該地震の前よりもその平均値が1.75%高くなっている。この程度の変動が計測の誤差によるバラツキ範囲内のものであると考えると、水平2方向の低下傾向と比べれば、堤体盛土に異方性が生じていたと連想させる。

総じて、荒砥沢ダムが本震を受けて、堤体の水平2方向の1次固有振動数は共に大幅に低下していた。本震の数日後にこれらの固有振動数は本震前の状態にほぼ回復

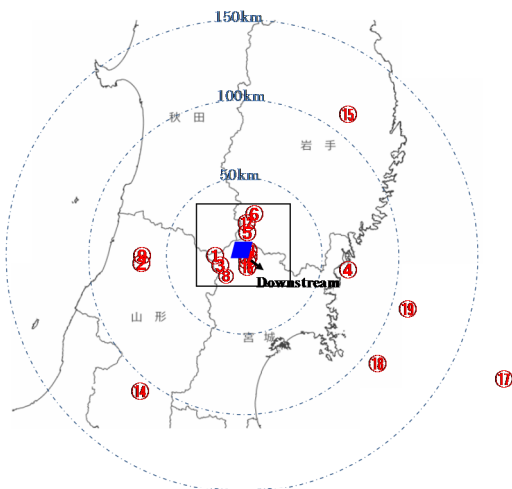
し、やや低い数値となっているが、安定的な状態になっている。また、本震の強い地震動を受けてからわずか1週間で堤体の振動特性が回復したのは、その間に多数の余震の微小振動を受けて、本震の強い振動により緩めた盛土材料が再び締め固めたのではないかと推測する。一方、鉛直方向の1次固有振動数は地震直後に低下したが、その後完全に回復し、堤体盛土に異方性が生じていたのではないかと推測する。

② 加速度増幅率の変化

2008年6月14日の本震及びその余震を中心に、加速度の振幅が比較的大きい地震の観測結果を抽出して、ダム堤体の加速度増幅率の変化を考察した。表-3に考察の対象地震の一覧を示し、図-3に各地震の震央位置を示す。



ダム近傍域の拡大図



凡例

- : 荒砥沢ダム
- : 表-3に示す地震番号
- ⑬と⑯が重なっている

図-3 考察対象地震の震源位置

方向毎に天端(T)の最大加速度と基礎(F)の最大加速度の比を増幅率として求め、その時間的な変化を図-4に示す。この図より以下のことが言える。

i 強い地震動による堤体の加速度増幅率の低下

本震を受けて、ダム堤体の各方向の加速度増幅率が大幅に下った。その後の数日の余震においても、地震動の強さが本震と比べ遥かに小さくなったにも関わらず、各方向の加速度増幅率が、地震毎にバラツキがあるものの、全体として低下したままであった。この現象は前述したダム堤体の固有振動数の低下現象と合致しており、本震による影響が非常に大きいことが改めて示された。しかし、文献1)で指摘されている通り、ダム堤体の増幅率が地震の卓越振動数と堤体の固有振動数の相対的な関係並びに地震動の強さに依存しているから、図-4にこれらの影響要素を参照できるようにプロットしている。

表-3 考察対象地震の諸元

| No. | 発生時刻 | M | 震源深 (km) | 基礎の最大 加速度(gal) |
|-----|------------------|-----|-------------|-------------------|
| ① | 1996/08/11 03:12 | 6.1 | 9 | 28 |
| ② | 1996/08/11 08:10 | 5.8 | 10 | 36 |
| ③ | 1996/08/11 15:01 | 4.9 | 10 | 30 |
| ④ | 2003/05/26 18:24 | 7.1 | 72 | 114 |
| ⑤ | 2008/06/14 08:43 | 7.2 | 8 | 1024 |
| ⑥ | 2008/06/14 09:00 | 4.2 | 11 | 99 |
| ⑦ | 2008/06/14 09:01 | 4.0 | 7 | 482 |
| ⑧ | 2008/06/14 09:14 | 3.6 | 4 | 151 |
| ⑨ | 2008/06/14 09:20 | 5.7 | 7 | 76 |
| ⑩ | 2008/06/14 10:40 | 4.8 | 7 | 120 |
| ⑪ | 2008/06/14 12:09 | 4.1 | 8 | 92 |
| ⑫ | 2008/06/14 12:10 | 4.8 | 9 | 79 |
| ⑬ | 2008/06/14 19:11 | 4.1 | 8 | 229 |
| ⑭ | 2008/06/16 23:14 | 5.3 | 7 | 76 |
| ⑮ | 2008/07/24 00:26 | 6.8 | 108 | 27 |
| ⑯ | 2008/09/25 15:04 | 4.1 | 6 | 119 |
| ⑰ | 2011/03/11 14:46 | 9.0 | 24 | 102 |
| ⑱ | 2011/04/07 23:32 | 7.2 | 66 | 120 |
| ⑲ | 2015/05/13 06:13 | 6.8 | 46 | 18 |

表-4 増幅率の平均値

| 方向 | 地震前 ^{*1} (Hz) | 本震と余震 (Hz) | 地震後 ^{*1} (Hz) |
|-----|---------------------------|---------------|---------------------------|
| 上下流 | 3.33 | 1.29 | 3.36 |
| ダム軸 | 4.89 | 1.85 | 4.30 |
| 鉛直 | 2.85 | 2.11 | 3.23 |

注：*1 岩手・宮城内陸地震及びその余震を指す。

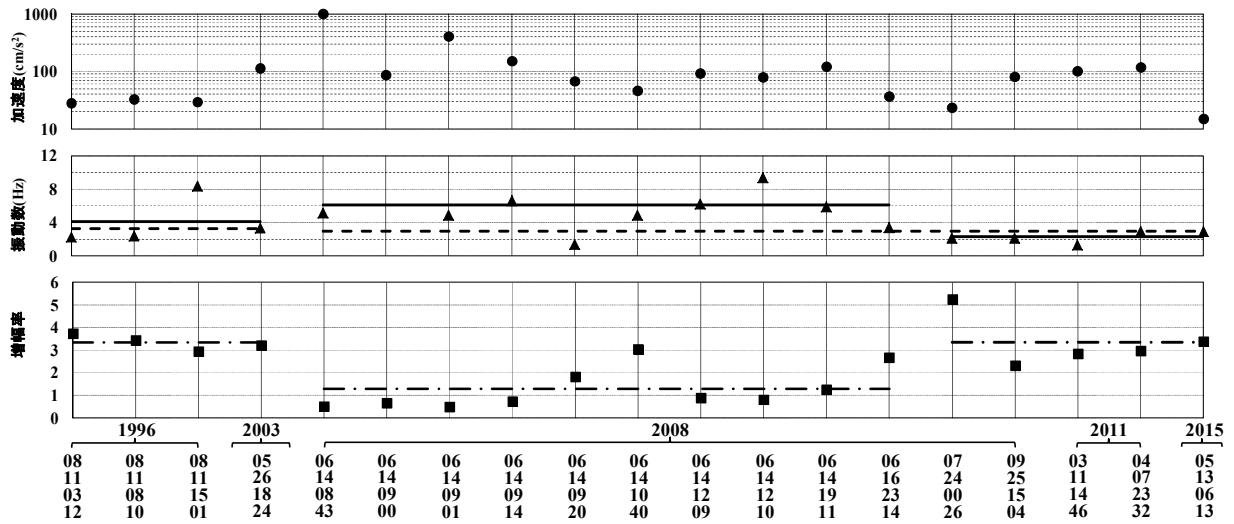
図-4からわかるように、当該地震の本震及びその後の余震において、堤体の増幅率の低下は部分的に地震動の卓越振動数と堤体の固有振動数が通常状態よりも離れていることに起因していると推測する。一方、図-4における地震動の強さによる増幅率への影響は明瞭ではないので、増幅率と基礎岩盤の最大加速度の関係を図-5の通りに整理した。この図において、分析対象地震の回帰結果(破線)と比べ、当該地震及びその余震時のダム堤体の加速度増幅率が概して低いことが分かる。

ii 低下した加速度増幅率の回復

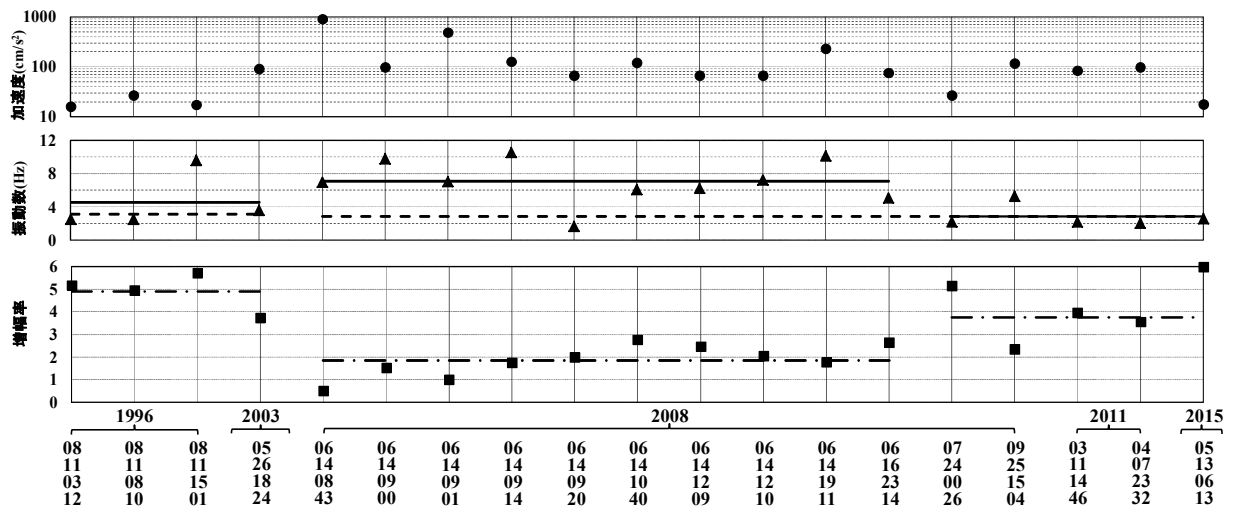
本震・余震及びその前後における各方向の加速度増幅率の平均値を取ると、図-4の点線で示す結果になり、その平均値を表-4にまとめる。当該地震の本震の数日後に、水平2方向の増幅率がバラツキがあるものの、平均値としてはほぼ地震前のレベルに回復した。鉛直方向には、地震によるバラツキが小さく、完全に地震前のレベルに回復したと見られる。この変化は、前述した固有振動数の回復傾向とほぼ同じである。

横軸の数値は地震発生時刻を示す。
 例： 1992 年
 12 月
 29 日
 11 時
 08 分

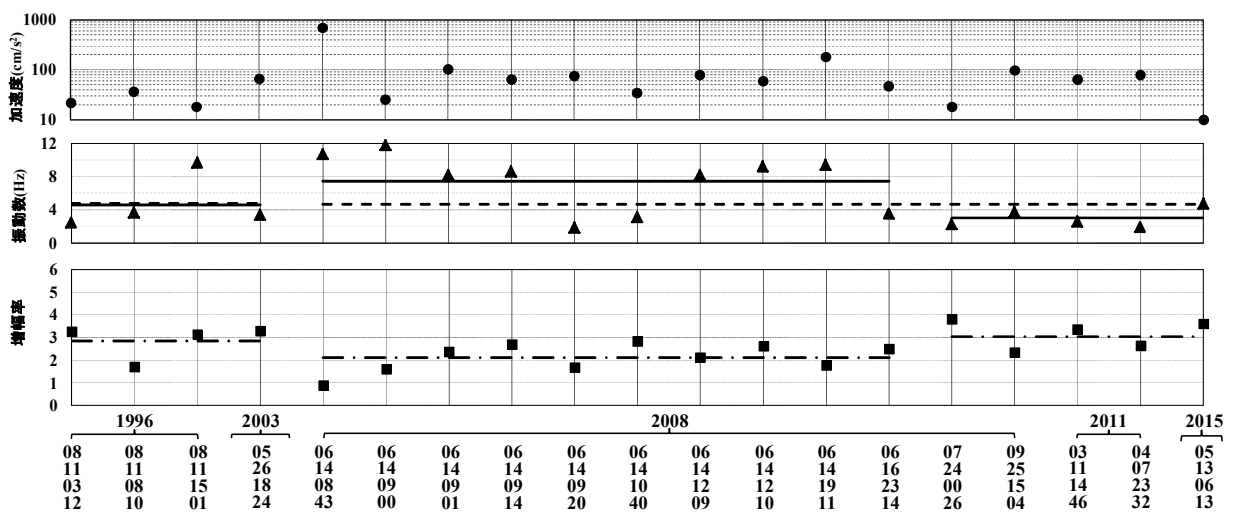
- 基礎の最大加速度値
- ▲ 地震の卓越振動数
- 地震の卓越振動数の平均値
- - - ダムの1次固有振動数
- 増幅率
- . - 増幅率の平均値



(a) 上下流方向



(b) ダム軸方向



(c) 鉛直方向

図-4 堤体の加速度増幅率の変化

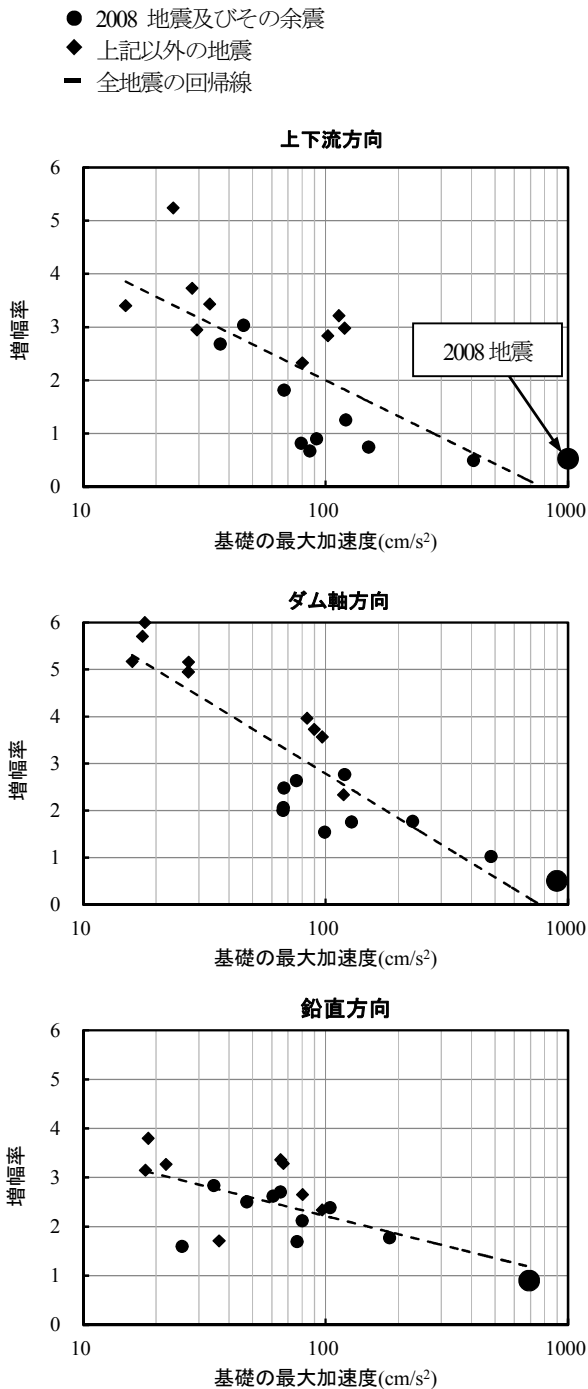


図-5 堤体の増幅率と基礎の最大加速度の関係

iii 異方性の再確認

表-4と図-4からわかるように、鉛直方向の加速度増幅率は、本震の数日後に完全に回復したと見られる。水平2方向の増幅率の回復具合を比べ、前述した堤体の鉛直方向の1次固有振動数と同じ変化傾向があり、堤体盛土材料の異方性が再確認できる。

以上を総じて、加速度増幅率からも、ダム堤体に対する本震の影響、その後の回復状況及び異方性の発生が明らかになっている。

(3) 岩盤—ダム系における地震動の伝播挙動に関する考察

従来のダムの耐震設計では、地震動が下方岩盤から垂直に入射することを前提としており、アバットメントの任意位置の地震動の差異及びそれによる堤体の地震応答への影響は考慮されていない。ダム天端の地震応答に対する下方岩盤からの地震動の寄与と兩岸地山を通過して伝播して来た地震動の寄与のどちらが卓越するかを考察することは、ダムの耐震設計及び地震応答解析における地震動条件の設定に大変有益な情報を提供することができる。また、ダム堤体に対する強い地震の影響を把握するために、このような地震動の伝播挙動の変化を考察することは一つの有効な方法であると考えられる。そこで、本研究において、前出の図-3及び表-3に示す荒砥沢ダムの地震記録に対して、従来の伝達関数分析とともに、クロススペクトル分析及びコヒーレンス関数分析⁴⁾を行い、岩盤—ダム系における地震動の伝播挙動並びにそれに対する本震の影響を考察した。

① 検討方法

岩盤—ダム系において、自然地形及び岩質の複雑性、堤体形状及び盛土材料の不均一性などにより、地震動の伝播が散乱波の攪乱と重なり非常に複雑なものとなっている。しかし、任意の二つの観測点の間における地震波形の相関性を調べれば、その2点間の地震応答の因果関係、或いは相互の影響度を把握することが可能であると考えられる。周知の通り、クロススペクトルは二つの波形の振動数成分の相関性及びその振動数成分の強さを表すものであり、コヒーレンス関数は二つの波形の合致度合を示すものである。本検討は、クロススペクトル及びコヒーレンス関数のそういう特性を利用して、観測点の間の地震動の相関性及びその影響度を分析することにより、ダム天端の地震応答に対する下方岩盤から入射した地震動と兩岸地山を通過して伝播して来た地震動の影響度を分析した。また、この分析において2点間の加速度伝達関数解析結果と合わせて、総合的に考察した。

地震時、着岩面の任意位置からダム堤体に地震動が伝播するが、図-6に示す基礎岩盤の観測点(F)からダム天端の観測点(T)への伝播経路(以下、“F-T”と呼ぶ)、並びに右岸地山の観測点(G)からダム天端の観測点(T)への伝播経路(以下、“G-T”と呼ぶ)を模式化し、各観測点の地震記録を用いて以下の分析を行った(経路“F-T”を例とする)

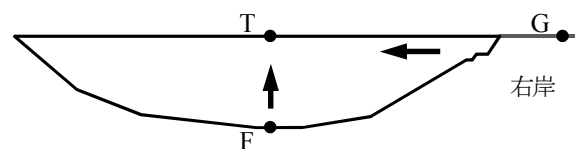


図-6 ダムの軸方向断面及び波の伝播経路の模式化

表-5 考察対象地震一覧

| 番号 | 地震発生時刻 | 代表する堤体の状態 |
|----|---------------------|----------------------------|
| ① | 1996/08/11 03:12 | ダム建設完了から本震(2008年6月14日)直前まで |
| ⑧ | 2008/06/14 09:14 | 本震からその一週間後(同6月20日)まで |
| ⑱ | 2015/05/13 06:13 | 本震の一週間後から現在まで |

① 伝達関数 $D_{TF} = S_T / S_F$

② クロススペクトル $W_{TF} = S_T \cdot S_F$

③ コヒーレンス関数 $C_{TF}^2 = |W_{TF}|^2 / (W_{TT} \cdot W_{FF})$

ここに、 S と D はそれぞれ観測点の加速度記録のフーリエスペクトルと伝達関数であり、 W と C はクロススペクトルとコヒーレンス関数である。 T と F は天端と基礎の観測点を指す。

本文では、図-3及び表-3に示す19回の地震に対して、二つの伝播経路“F-T”と“G-T”の伝達関数、クロススペクトル及びコヒーレンス関数を分析した。

② 検討結果

表-3に示す19回の地震観測データに対して上述した諸分析を行った。分析結果に共通の特徴を有するものをグループ化すると、これらの約23年間の観測データが以下の三つのグループに分けられる。

- ① ダム建設完了から本震(2008年6月14日)直前まで
- ② 本震からその一週間後(同6月20日)まで
- ③ 本震の一週間後から現在まで

これらのデータグループから各々の類似な傾向を示す分析結果が得られているから、結果を簡潔に述べるために、各グループからそれぞれ1地震のみを抽出して考察する。表-5に考察対象地震の一覧を示す。

図-7に各グループ(時期)の代表地震の分析結果を示す。

a) ダム建設完了から本震(2008年6月14日)直前まで

ダム建設完了直後の1996年8月11日の地震に対する分析結果を図-7(A)に示す。上下流方向の伝達関数の1次卓越振動数(2.93Hz)まで、経路“F-T”は経路“G-T”よりクロススペクトル及びコヒーレンス関数の値がともに大きいことから、この振動数までの低振動数範囲ではダム天端の地震応答に対する下方岩盤の地震動の寄与が兩岸地山の地震動の寄与より大きいと考えられる。1次卓越振動数より高い振動数範囲では、振動数によって二つの経路のコヒーレンス関数の大小関係が交互に変わっているが、クロススペクトルは、経路“G-T”の方が常に高い数値を示している。これは兩岸地山の地震動が

一般に下方岩盤の地震動より強い為、振動数によって(コヒーレンス関数とクロススペクトルが共に大きい振動数で)兩岸地山の寄与が相対的に大きいことを示唆していると考えられる。即ち、ダム堤体の上下流方向の地震応答に対しては、ダム堤体の1次固有振動数までの低振動数範囲では下方岩盤の地震動の寄与が大きいものに対して、それ以上の高振動数範囲では下方岩盤と兩岸地山の地震動の影響度合いが振動数によって変わり、兩岸地山の地震動の寄与が下方岩盤のそれよりも相対的に大きい場合もあると言える。

ダム軸方向では、2.5Hzまでの低振動数領域において経路“F-T”のコヒーレンス関数が高い値(ほぼ1)であり、天端の地震応答と下方岩盤の地震動の間に高い合致度合いを示している。ダム軸方向の1次卓越振動数(3.03Hz)近傍では、両経路のコヒーレンス関数が同程度の値を示しているが、クロススペクトルでは経路“G-T”の方がより大きめの値となっている。これにより、ダム堤体の軸方向の1次固有振動数(伝達関数の一次ピークに対応する振動数)の近傍では、天端のダム軸方向の地震応答に対する兩岸地山の地震動の寄与は下方岩盤のそれよりも大きいのではないかと推測する。1次固有振動数より高い振動数範囲では両経路のコヒーレンス関数の大小関係が振動数によって交互に変わり、天端のダム軸方向の地震応答に対する下方岩盤と兩岸地山の地震動の寄与が振動数によって交互に卓越していると言える。また、振動数が高いほど経路“G-T”のクロススペクトルが相対的に大きくなり、高い振動数領域では兩岸地山の寄与が相対的に大きいことを示唆している。

一方、鉛直方向には、伝達関数の1次卓越振動数付近まで両経路のクロススペクトル及びコヒーレンス関数がほぼ同じであるから、この振動数までの低振動数範囲ではダム天端と下方岩盤及び兩岸地山の鉛直方向の地震動に大きな差異はないことと理解できる。この振動数より高い振動数範囲では両経路のコヒーレンス関数の大小関係は振動数によって交互に変わり、上下流方向の分析結果と同じ傾向が示されている。

ダム天端の地震応答に対する下方岩盤及び兩岸地山の地震動の寄与について、振動方向によって多少異なる傾向が示されているが、概して水平方向にはダムの1次固有振動数までの低振動数範囲では下方岩盤の寄与は大きいこと、より高振動数範囲では振動数によって兩岸地山の地震動の寄与は卓越する場合があることが分かる。

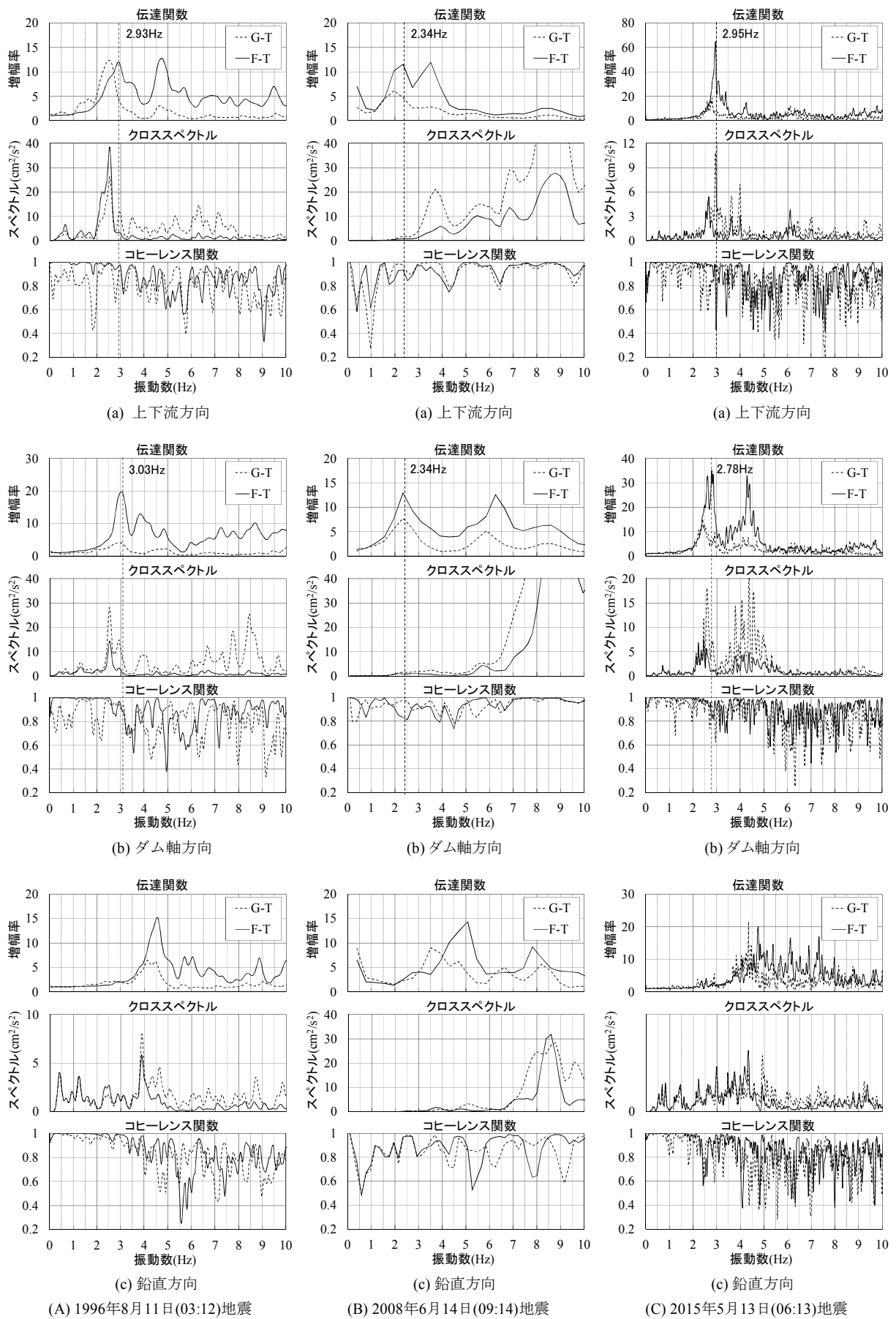


図-7 岩手・宮城内陸地震の前、直後及び現状における
伝達関数、クロススペクトル及びコヒーレンスの分析結果

b) 本震からその一週間後(同6月20日)まで

3節の検討により、本震を受けて、ダム堤体の振動特性が一時変わったことが指摘されている。そこで、当該地震の直後の余震(2008年6月14日09:14)の記録に対して、上記分析を行い、ダム堤体の振動特性の変化による地震動の伝播挙動への影響を考察した。

この余震の記録から得られた結果を図-7(B)に示す。上下流方向の伝達関数の1次卓越振動数(2.34Hz)まで、両経路のクロススペクトルは極めて低い値を示し、コヒーレンス関数の値もかなり小さい。このことから、低い振動数範囲ではダム天端の上下流方向の地震応答が基礎(F)及び右岸地山(G)の地震動との相関性が弱く、これらの観測点の地震動に対して応答しにくいと考えられる。本震前の状態と比べると、ダム基礎岩盤系における地震動の伝播挙動が大きく変わることが分かる。伝達関数の1次卓越振動数より高い振動数範囲では、両経路のコヒーレンス関数は同程度の値を示しているが、クロススペクトルは経路“G-T”の方がより大きく、ダム天端の地震応答に対して地山の地震動の寄与が下方岩盤のそれより大きくなる傾向が認められる。

一方、ダム軸方向にも鉛直方向にも、上下流方向と大よそ同じ傾向を示す結果が得られている。本震前の健全状態の分析結果と比べ、天端の地震応答と下方岩盤及び両岸地山の地震動の依存性が明らかに弱くなり、ダム堤体の振動特性の変化が地震動の伝播挙動に対して大きく影響していることが明らかである。

c) 本震の一週間後から現在まで

現状のダムにおける地震動の伝播特性を調べるために、最新の地震記録(2015年5月13日06:13)に対して同様な分析を行った。その結果を図-7(C)に示す。同一構造物においても地震特性及び地震記録のデータ数などにより得られたクロススペクトル及びコヒーレンス関数の形がある程度変わることもあるが、図-7(A)と比べて現状のダム堤体における地震動の伝播特性は、いずれの方向にも、本震前の状態と同様な傾向を示していることが分かる。例えば、伝達関数の1次卓越振動数までの低振動数範囲では経路“F-T”のコヒーレンス関数は高い値(ほぼ1)であり、それ以上の高振動数範囲では経路“G-T”との大小関係は振動数によって交互に変化している。クロススペクトルも本震前の結果と同じ変化傾向を示している。

一方、以上の通りに三つの時期の代表的な地震記録を抽出して、ダム基礎岩盤系における地震動の伝播特性を考察しているが、地震特性の影響、地震動の強さによる盛土材料の非線形性の影響、貯水の影響、地震記録のデータ数などの影響があるから、上記評価は定性的なものであると考えるべきである。

(4)まとめ

本研究により以下のことを明らかにした。

●23年間の微小地震の観測結果を基に、ダム堤体の固有振動数の長期的な変化を考察した。2008年6月14日の岩手・宮城内陸地震を受けてダム堤体の一次固有振動数が著しく下がった。本震の約1週間後より、ダム堤体の水平方向の固有振動数が地震前と比べて平均値としてやや低くなっているが、安定した状態に回復した。一方、鉛直方向の1次固有振動数が本震の直後一時的に下っていたが、その後完全に回復した。

●岩手・宮城内陸地震の本震を受けて、ダム堤体の各方向の加速度増幅率も一時的に大幅に下がった。前述したダム堤体の固有振動数の回復傾向と同じ、本震の約1週間後に水平方向の加速度増幅率は当該地震前の健全な状態にほぼ回復した。一方、鉛直方向の加速度増幅率は完全に回復し、水平方向の増幅率の回復具合と比べて、堤体盛土材料に見かけ上の異方性が生じていたと認められる。

●ダム基礎岩盤系における地震動の伝播特性について、ダム堤体の各方向の1次固有振動数近傍までの低振動数範囲では、天端の地震応答に対して下方岩盤の地震動の寄与は両岸地山のそれよりも大きい、それより高い振動数範囲では振動数によって両岸地山の地震動の寄与が下方岩盤の地震動の寄与よりも大きくなる場合がある。また、岩手・宮城内陸地震を受けて、ダム天端の地震応答と下方岩盤及び両岸地山の地震動の間の相関性が一時的に弱くなり、改めて当該地震の影響が非常に大きいことは示されている。最新の地震記録の分析により、現状のダム基礎岩盤系における地震動の伝播特性が当該地震前の状態に回復したと判断できる。

●岩手・宮城内陸地震の本震後のわずか1週間で、ダム堤体の振動特性(固有振動数及び加速度増幅率)がほぼ本震前の状態に回復したのは、本震の強い振動により緩んだ盛土材料が多数の余震の微小振動を受けて、再び締め固めたからではないかと推測する。

【謝辞】

本研究に関して、宮城県栗原地方ダム総合事務所及び日本大ダム会議より貴重な地震観測データ並びにダムに関する情報を頂いた。また、地震記録の分析について、(株)JPビジネスサービス社会環境部の佐藤氏と浅賀氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 松本徳久, 大町達夫, 安田成夫, 山口嘉一, 佐々木隆, 倉橋宏: ダムで観測された強震記録の解析, 大ダム, 193, pp.88-94, 2005
- 2) Ohmachi, T. and Tahara, T.: Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay rockfill dam, Soils and Foundations, 51(2), pp.227-238, 2011
- 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, 25(1), pp.16-28, 2015
- 4) 理論地震動研究会: 「地震動」, その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994年2月28日