

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

松本 徳久¹・安田 成夫²・曹 増延³

¹正会員 工博 (一財)ダム技術センター (〒110-0008 東京都台東区池之端2-9-7)

E-mail:matsumoto@jdec.or.jp

²正会員 工博 (一財)ダム技術センター ダム技術研究所 (〒110-0008 東京都台東区池之端2-9-7)

E-mail:yasuda@jdec.or.jp

³正会員 Ph.D. (株)JPビジネスサービス 社会環境部 (〒135-8451 東京都江東区深川2-2-18)

E-mail:sou@jpbs.co.jp

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。

Key Words: rockfill dam, earthquake record, dynamic characteristics, propagating behavior, cross spectrum, coherence function

1. 序言

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、ダム堤体の固有振動数や加速度増幅率や減衰特性などの振動特性の評価、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ダム堤体の固有振動数を求め、これをダムタイプ、堤高及び基礎岩盤の最大加速度値との関係として示した。大町ら²⁾は、ダムの地震記録を基にダム堤体のせん断波速度及びせん断弾性係数の変化、地震中及び地震後の過剰間隙水圧の変化などを考察し、ダム堤体材料の非線形動的特性を検討した。茂木ら³⁾はダムの地震記録に対して NIOM 解析 (Normalized Input-Output Minimization) を行い、ダム堤体におけるせん断波の伝播時間が急激に増大すること、主要動の後に振幅が小さくなるに従って伝播時間も減少することを明らかにした。佐藤ら⁴⁾は地震記録の分

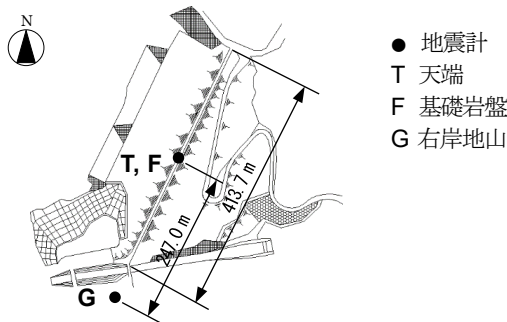
析によりロックフィルダムの動的変形特性を評価し、その結果を用いてダム堤体の地震時挙動を再現解析した。金銅ら⁵⁾は重力式コンクリートダムの固有振動数と基礎岩盤の最大加速度値や水位などの関係を近似式で示した。上島ら⁶⁾はアーチダムを対象として3年半に亘る微動・地震動の継続観測データの分析からダムの卓越振動数に対する気温・貯水位の影響を明らかにし、このような観測によりダムの健全性評価が可能であることを示した。

これまでダム堤体の地震時挙動の観測及び関連した分析の多く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の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、ダム堤体の長期的な振動特性（固有振動数、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。

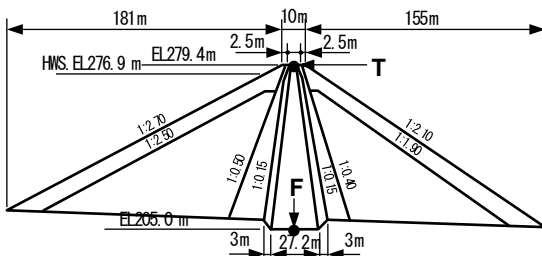
一方、従来のダムの耐震設計では、地震動がダム堤体の下方岩盤から垂直に入射することを前提としており、アバットメントにおいて標高ごとに地震動が位相をずらせながら伝播すること及びそれによるダム堤体の地震応

表-1 荒砥沢ダム諸元

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	3,048,000 m ³
流域面積	20.4 km ²
総貯水量	13,850,000 m ³
設計震度	0.15G(ダム本体), 0.18G(取水塔, 橋梁), 0.16G(洪水吐)



(a) 平面図



(b) 標準断面図

図-1 荒砥沢ダム及び地震計位置

答への影響は考慮されていない。

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、ダム天端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た。

2. 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)、ダム天端(T)および右岸地山(G)の各観測点で三方向(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。

(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10 cm/s²程度以上の地震が約500回、100 cm/s²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, 以下“本震”と呼ぶ)が発生し、基礎岩盤で上下流方向の最大加速度値が1024 cm/s²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。

3. 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堤体の振動特性(固有振動数、加速度増幅率)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について考察した。

(1) 固有振動数の変化

ダムの基礎岩盤(F)と天端(T)の加速度記録を基に、堤体の伝達関数を求め、地震毎のダム堤体の固有振動数の変化の有無及びその変化傾向について考察した。伝達関数を求める際に用いる地震記録を適切に選択することは重要である。常時微動(最大1 cm/s²程度想定)及び計測装置の分解能(0.01 cm/s²)を考慮すると、使用する加速度記録の振幅が十分な大きさでないと分析結果の誤差が比較的大きくなると考えられる。一方、加速度の振幅が大きくなると土質材料の非線形性により剛性の低下が生じて、ダム堤体の固有振動数は小さくなる。よって、本研究では多数の地震記録から、計測の精度もありかつ非線形性の生じない範囲と考えられる天端の上下流方向の最大加速度が10~20 cm/s²のものを選んだ上で、時間的な分布を考慮して、23年間の地震記録から計38地震を抽出した。一方、本震直後の二日間に上記基準に満たす観測データはないので、例外として、本震直後の二日間については天端上下流方向の最大加速度が123 cm/s²と139 cm/s²である二つの地震記録も分析対象とした。

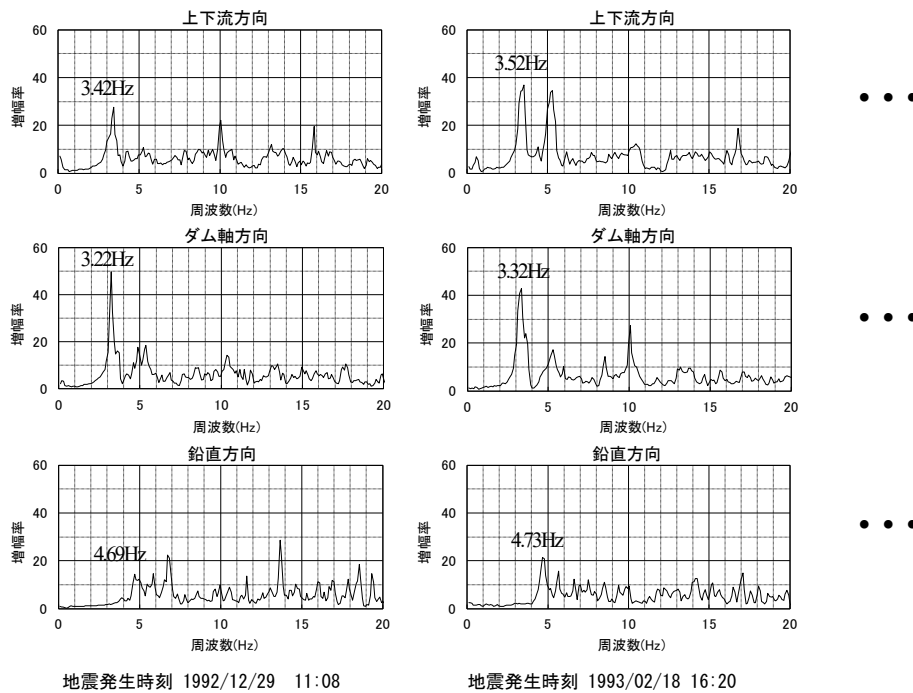


図-2 地震記録から求めた伝達関数の例

抽出し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（図-2に伝達関数の例を示す）における振動数の低い側より一つ目のピークに対応する振動数をダム堤体の1次固有振動数と見做し、各方向毎に地震の発生時刻順で整理した（図-3）。

- ① 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：図-3において、本震は2008年6月14日8時43分の発生であるが、同日の9時20分の余震により上下流方向の1次固有振動数で見ると本震前の3.2Hzから2.2Hzと大きく低下している。この低下傾向は3方向とも同様である。次の10時40分の余震では1次固有振動数はやや回復しているものの、上下流方向で2.8Hzと地震前よりかなり小さい。ただし、この二つの余震の加速度振幅は他の地震よりやや大きく(123 cm/s²と139 cm/s²)、盛土材料のひずみ依存性による剛性低下の影響も含まれている点は留意しておくべきである。本震の直後の二日間に基礎岩盤位置で200 cm/s²を超える余震が数回発生しているが、同年6月20日までの約1週間は3方向の1次固有振動数がバラツキがあるものの、本震前に比べ有意に低下している。以上から本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。

- ② 低下したダム堤体の固有振動数の回復：その後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る。本震及びその余震を境界に、その前後の平均値（表-2にまとめる）を取ると、図-3の実線で示す結果になる。6月21日以降は上下流方向では3.0Hz、ダム軸方向では2.8Hz、それぞれ本震前に比べ0.2Hz、0.3Hz小さいものの比較的安定的な状態になった。
- ③ 鉛直方向の固有振動数の変化：一方、鉛直方向の1次固有振動数も一時的に下がっていたが、本震の約1週間後回復し、本震の前よりもその平均値が4.3%高くなっている。強い地震動により材料の剛性が低下しその後エイジング効果で回復したと考えられる。ただし、エイジング効果による剛性の回復は水平方向と鉛直方向では異なり鉛直方向が著しい。大きな地震動は方向によって異なる影響を与えていることがわかる。

以上から、荒砥沢ダムが本震を受けて、ダム堤体の各方向の1次固有振動数すなわち剛性は一時的にかなり低下していたこと、本震の約1週間後にはこれらの固有振動数は本震前に近い状態に回復したこと、一方、エイジング効果には異方性があり鉛直方向の1次固有振動数は本震の約1週間後には以前の値以上に回復していることが分かった。

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

凡例： ■ ダム堤体の1次固有振動数
— 1次固有振動数の平均値

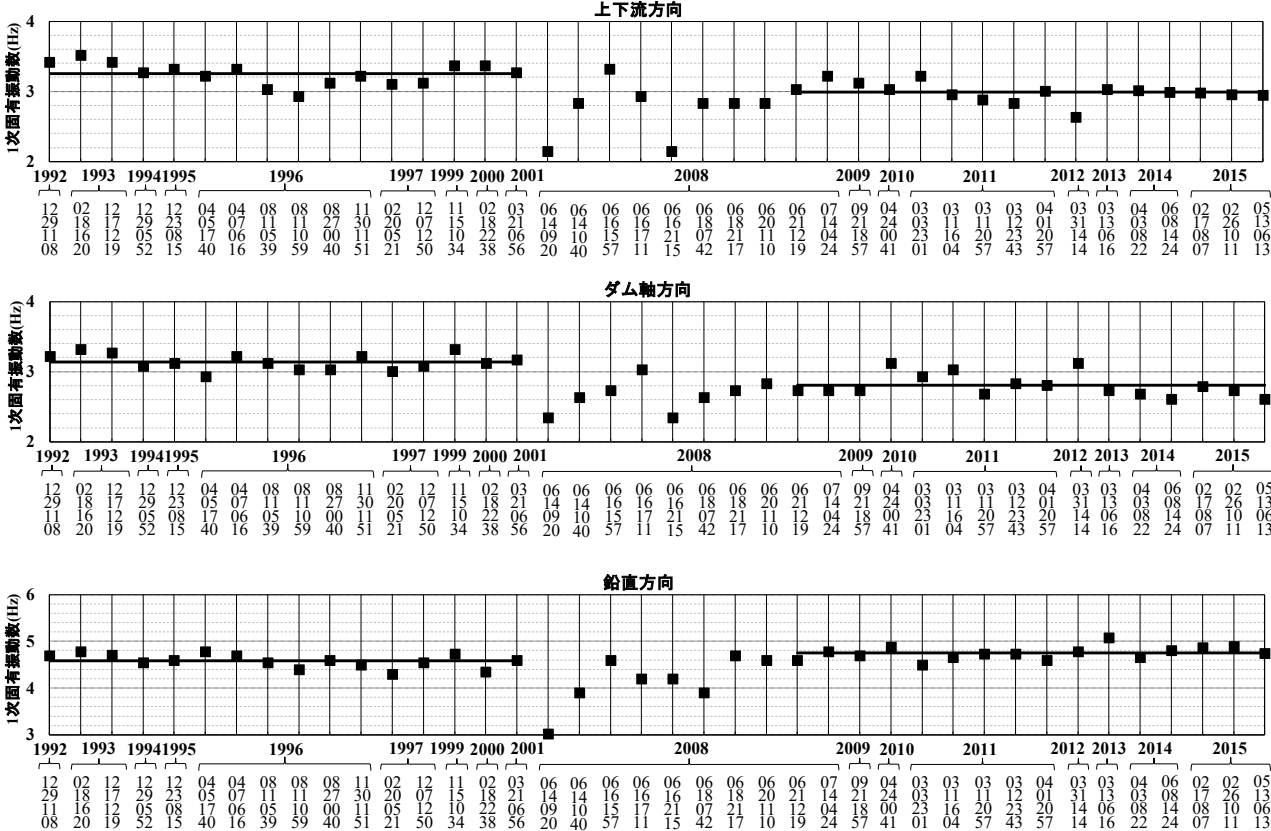


図-3 ダム堤体の1次固有振動数の変化

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 (Hz)	地震後 ^{※1} (Hz)	相対変化 ^{※2} (%)
上下流	3.2	3.0	-6.2
ダム軸	3.1	2.8	-9.7
鉛直	4.6	4.8	+4.3

注：^{※1}本震の約1週間後

^{※2}相対変化=(地震後-地震前)÷地震前

(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加速度記録を抽出して、ダム堤体の加速度増幅率の変化の有無及びその変化過程について考察した。表-3に分析対象とした地震の一覧を示し、図-4に各地震の震央位置及び荒砥沢ダムの位置を示す。

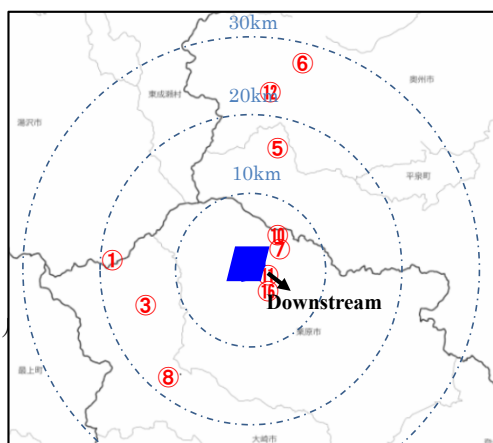
方向毎に天端(T)の最大加速度値と基礎岩盤(F)の最大加速度値の比を増幅率として求め、その時間的な変化を

図-5に示す。この図におけるダムの1次固有振動数は、2003年5月26日までは表-2の地震前の値、2008年7月24日以降は表-2の地震後の値である。本震及びその後の約1週間間は図-3に示すこの時期の小地震の記録から得られたダムの1次固有振動数の平均値を用いる。図-5より以下のことが言える。

- ① 強い地震動によるダム堤体の加速度増幅率の一時的な低下：6月14日8時43分の本震から6月16日までの地震動に対しては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、基礎岩盤の地震動の最大加速度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全体として低下したままであった。地震毎にバラツキがあるものの、この間の水平2方向の加速度増幅率の平均値は本震前の値と比べ半分以下になっており、鉛直方向にも本震前より低い。低下の原因の一つは図-

5に示してあるようにこの期間の地震の卓越振動数（基礎岩盤(F)の加速度記録のフーリエスペ

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-5の一点鎖線で示す結果になり、



ダム近傍域の拡大図

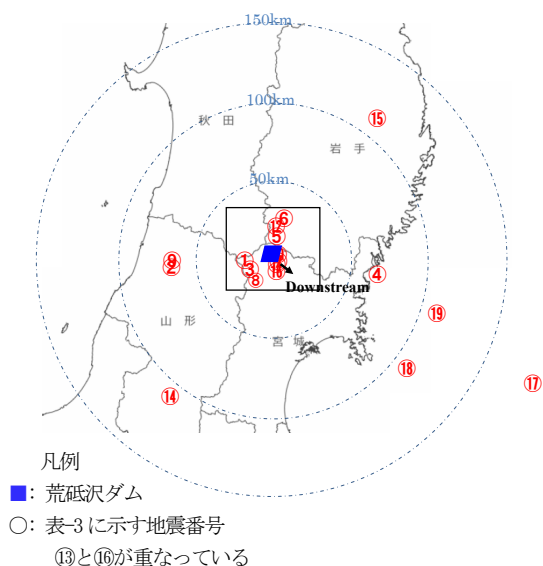


図-4 分析対象地震の震央位置とダムの位置

クトルのピークに対応する振動数)は他の期間に比べて高周波であり、また堤体の一次固有振動数(図中有、破線と数値で示す)は前述のように低かったため応答倍率が下がったためである。もう一つの原因はこの期間の地震動が大きく、材料が大きなひずみに対して剛性が低下し減衰が増加する非線形性によるものである。

加速度増幅率と基礎岩盤(F)の最大加速度(3方向成分のうち最大値)の関係を整理すると図-6となる。この図から材料の非線形性(ひずみの増大に伴う剛性の低下と減衰の増加)により基礎岩盤の最大加速度が大きいほどダム堤体の加速度増幅率が小さくなっていることがわかる。

② 低下した加速度増幅率の回復: 本震・余震及び

表-3 分析対象地震の諸元

No.	発生時刻	M	震源深 (km)	基礎の最大加速度 ^{※1} (cm/s ²)
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

注: ^{※1} 基礎岩盤(F)の3方向成分のうち最大値

表-4 増幅率の平均値

方向	地震前	本震と余震	地震後 ^{※1}
上下流	3.33	1.29 (-61.3%) ^{※2}	3.36 (0.9%)
ダム軸	4.89	1.85 (-62.2%)	4.30 (-12.1%)
鉛直	2.85	2.11 (-26.0%)	3.23 (13.3%)

注: ^{※1} 本震の約1週間後

^{※2} 括弧内は地震前との相対差、=(現在値-地震前)/地震前

その平均値を表-4にまとめる。地震後、水平2方向の加速度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となった。

③ 水平方向と鉛直方向での異なる増幅率: 表-4と図-5に示す通り、本震及びその直後の余震において、ダム堤体の加速度増幅率は水平2方向には約61%低下したのに対して、鉛直方向にはわずか26%低下していた。また、地震後の水平2方向の加速度増幅率の回復具合に比べ、鉛直方向の増幅率は本震前の増幅率に戻っている。前述したダム堤体の鉛直方向の1次固有振動数と同じ変化傾向である。

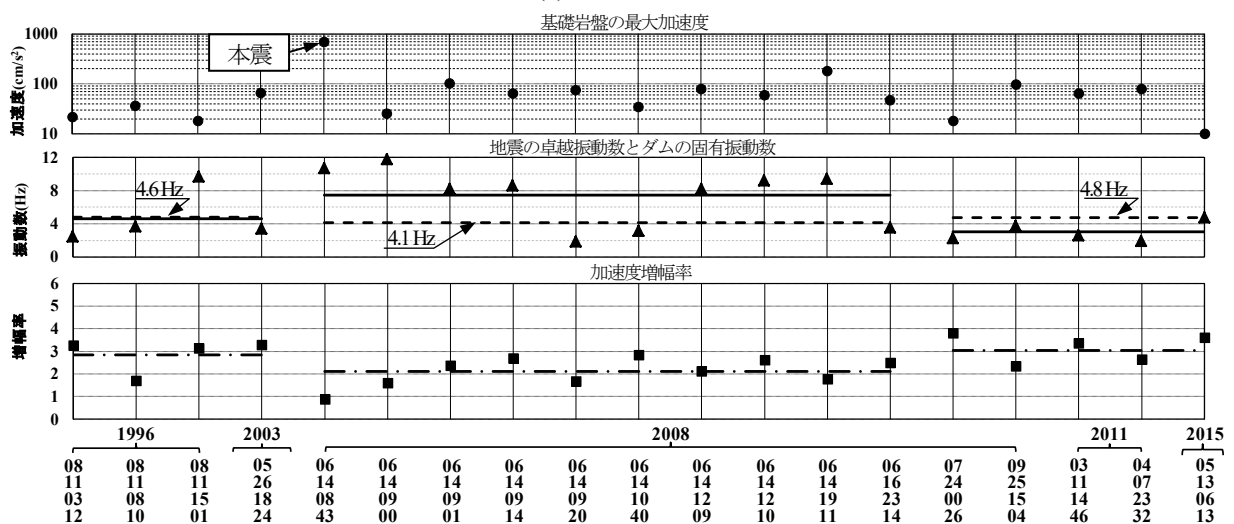
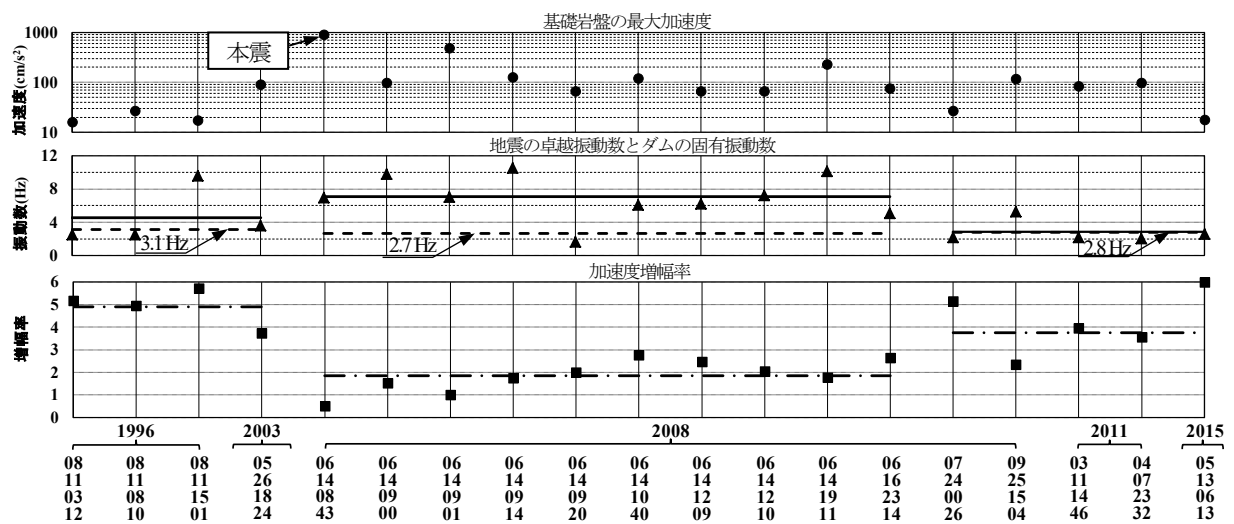
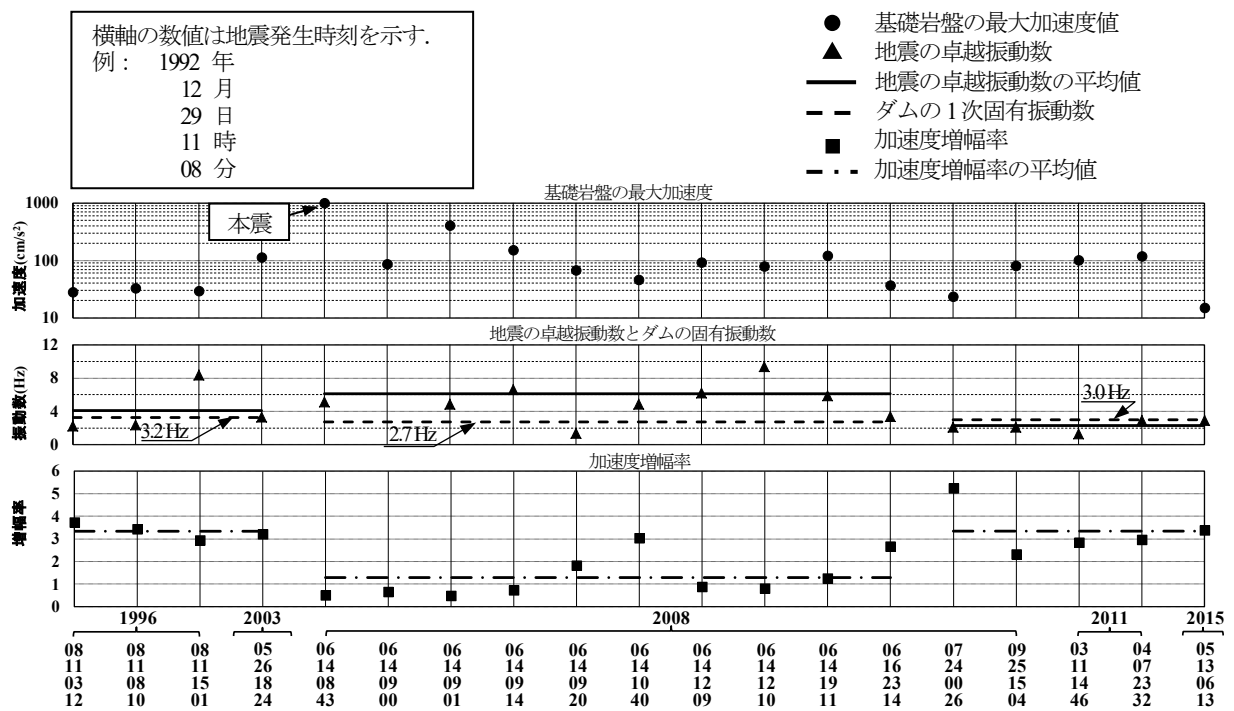


図-5 ダム堤体の加速度増幅率の変化

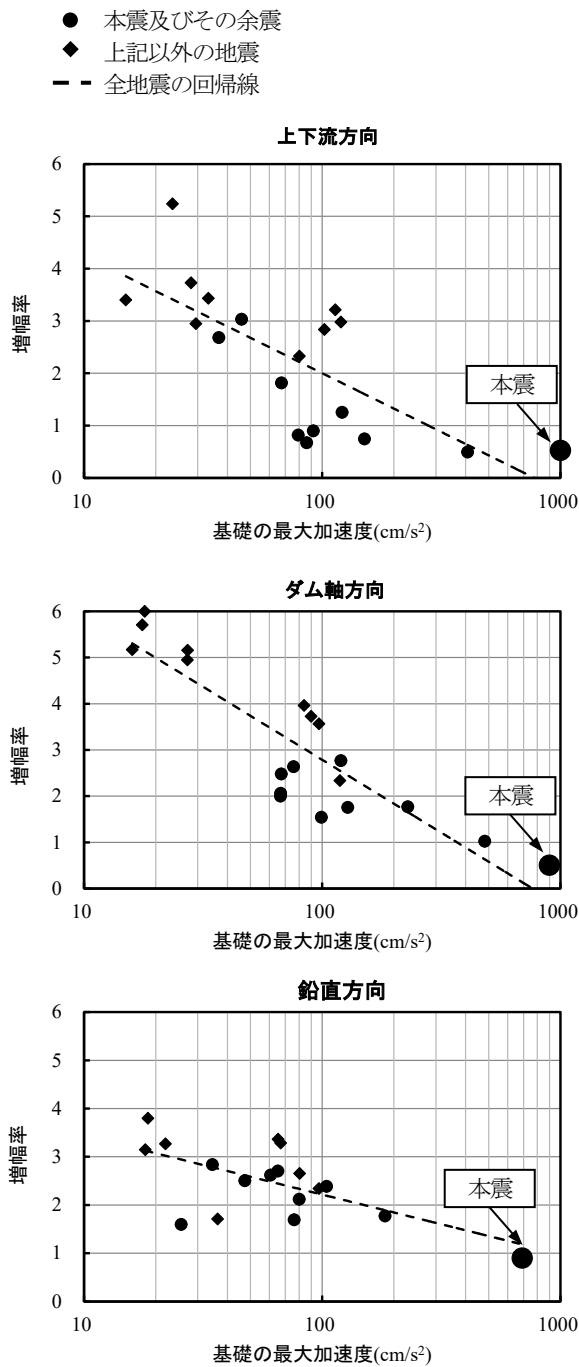


図6 ダム堤体の加速度増幅率と基礎の最大加速度の関係

4. ダム一基礎岩盤系における地震動の伝播挙動に関する考察

従来のダムの動的解析では、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、アバットメントにおいて地震動が位相を変えながら伝播すること及びそれによるダム堤体の地震応答への影響は通常考慮されていない。ここでは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両岸地山を通して伝播して来た地震動の寄与の程度について考察する。そこで、本研究にお

いて、前出の図-4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⁷⁾を行い、ダム一基礎岩盤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整理検討した。

(1) 検討方法

ダム一基礎岩盤系において、自然地形及び岩質の複雑な分布、ダム堤体の形状及びゾーニングされた様でない盛土材料などにより、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ることにより、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。クロススペクトルは振動数毎の二つの信号の相関性を示している。コヒーレンス関数は振動数毎の二つの波形の相関性をより明確に定量的に示すもので、0から1の間の値を取り1である場合、その振動数において出力信号が全て入力信号によるものであると意味する。本研究は、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に対する下方岩盤から入射した地震動と両岸地山を通して伝播して来た地震動の影響度を分析した。また、この分析結果を2点間の伝達関数分析結果と合わせて、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-7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、経路“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、経路“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。

$$\textcircled{1} \text{ 伝達関数 } D_{Ti} = S_T / S_i \quad (i = F, G)$$

$$\textcircled{2} \text{ クロススペクトル } W_{Ti} = S_T \cdot S_i \quad (i = F, G)$$

$$\textcircled{3} \text{ コヒーレンス関数 } C_{Ti}^2 = |W_{Ti}|^2 / (W_{TT} \cdot W_{ii})$$

$$(i = F, G)$$

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^2 はクロススペクトルとコヒーレンス関数である。 T, F, G は順に天端(T)、基礎岩盤(F)及び右岸(G)の観測点を指す。

前節の検討により、ダム堤体が本震の前、本震及びその直後の約1週間、さらにその後2015年までの三つの時期に異なる振動特性を示していることがわかる。従って、ここでは表-3に示す19回の地震の記録に対して分析し、その結果をダムの振動特性の変化時期により以下の通りにグループ化して考察した。

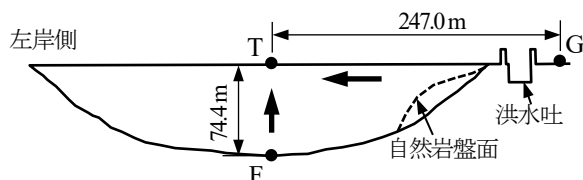


図-7 ダム軸方向断面及び波の伝播経路の模式化

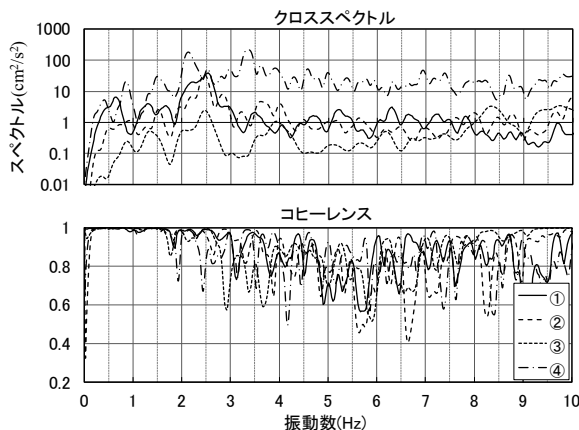


図-8 クロススペクトルとコヒーレンス関数の例
(グループA, 経路“F-T”, 上下流方向)

表-5 考察対象地震一覧

番号	地震発生時刻	代表するダム堤体の状態	選択理由
①	1996/08/11 03:12	ダム建設完了から本震直前まで	ダムの最初の状態を示す記録
⑪	2008/06/14 12:09	本震からその約1週間後まで	本震当日の余震、継続時間が長い
⑲	2015/05/13 06:13	本震の約1週間後から2015年まで	ダムの現状を示す最新記録

グループA: ダム建設完了から本震直前まで

グループB: 本震からその約1週間後まで

グループC: 本震の1週間後から2015年まで

(2) 検討結果

一例として、図-8に本震前グループの経路“F-T”における上下流方向のクロススペクトル及びコヒーレンス関数の結果を示す。このグループの中で地震④の基礎岩盤での加速度が最も大きいため、クロススペクトルも比較的大きな値を示している。しかし、四つの地震で概ね共通な特徴がある。例えば、振動数2.1～2.6Hzの間いづれの地震も大きなスペクトル値を示している。コヒーレンス関数には共通の特徴がより明瞭である。例えば0.2～1.6Hzの間に全ての地震によるコヒーレンス関数がほぼ1になっており、振動数2.6Hzまで個別の振動数を除けば0.9以上の値を示している。結果を明晰に示すために、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。ここで、地震の発生時刻及び記録のデータ数(できるだけ地震の継続時間が長いもの)を考慮して、グル

ープAではダムの最初の地震記録①、グループBでは本震当日の余震記録⑪、グループCでは最新の地震記録⑲の分析結果を抽出する。表-5に考察対象地震の一覧及び選択理由をまとめる。

図-9に各グループの代表地震の分析結果を示す。

クロススペクトル及びコヒーレンス関数の結果について、グループAとグループCはそれぞれ概ね共通の特徴があるが、グループB、つまり本震及びその直後の約一週間の余震による結果はバラツキが比較的大きい。

a) ダム建設完了から本震直前まで

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-9(A)に示す。上下流方向には、伝達関数の1次卓越振動数(2.93Hz)まで、経路“F-T”のクロススペクトルは経路“G-T”のそのものよりやや大きく、コヒーレンス関数も経路“F-T”の方が経路“G-T”より大きいから、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”の方が常により高い数値を示している。これは増幅により兩岸上部地山の地震動は下方岩盤の地震動より大きいため、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。

上記現象の発生メカニズムについて、以下の通りに考える。地山を含むダム堤体の3次元固有値解析によれば図-10に示すようにダム堤体の各方向の1次固有振動モードはダム堤体が全体として振動し、二次元的にも表現できる。即ち、両側のアバットメントの拘束効果は比較的弱い。経路“F-T”の距離も短く、1次固有振動数までは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。一方、2次以上の振動に対しては両側のアバットメントの拘束の影響が大きなモードとなり、GからTへの兩岸地山の経路が下方岩盤からよりも伝播しやすい場合がある。また、図-1及び図-7に示す通り、右岸側に洪水吐が設けられており、ダム堤体の右岸側の一部は元の地山である。そのため、右岸からダム天端中央までの地震動の伝播距離は経路“G-T”より大分短いと考えられる。

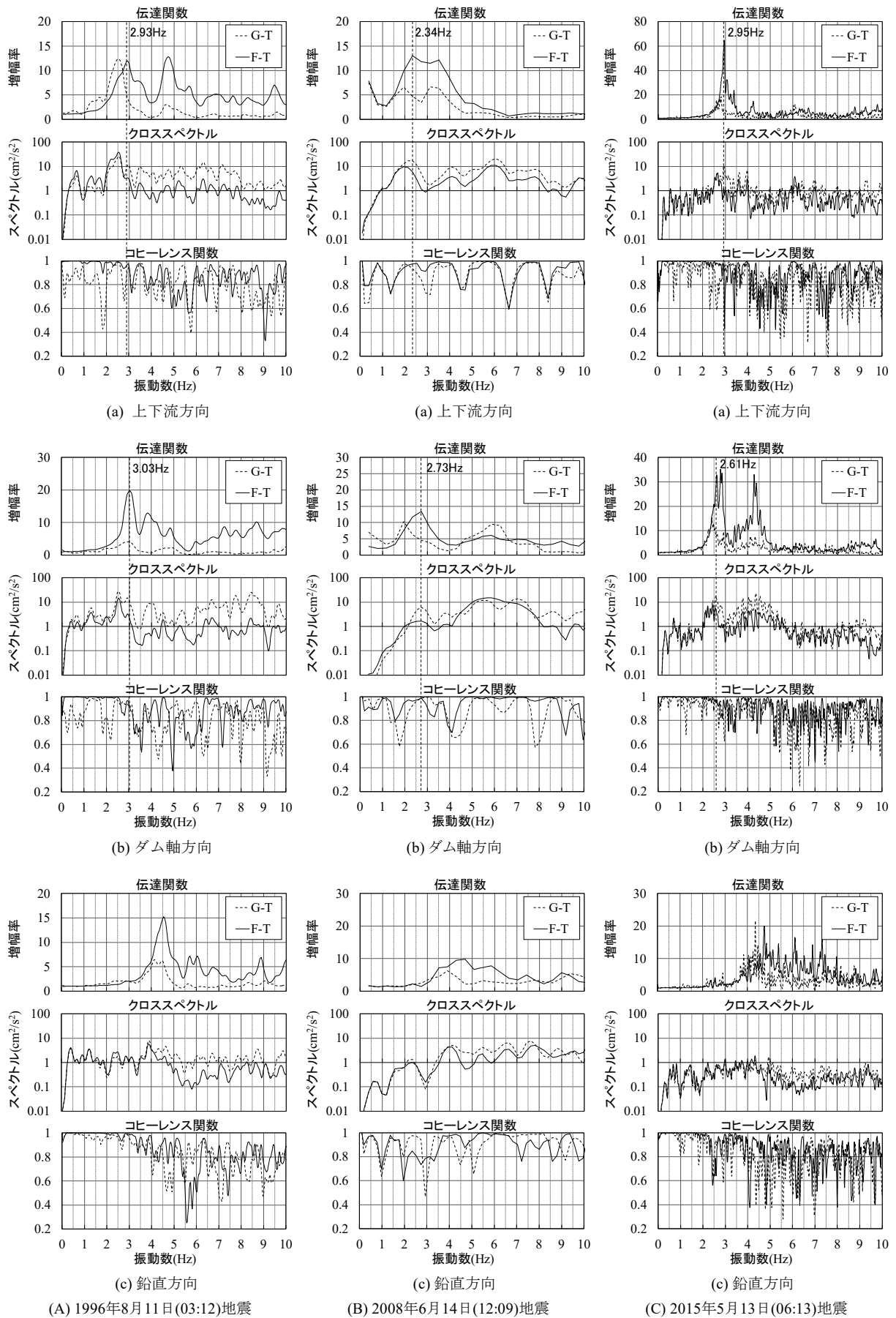


図-9 岩手・宮城内陸地震の前、直後及び現状における伝達関数、クロススペクトル及びコヒーレンスの分析結果

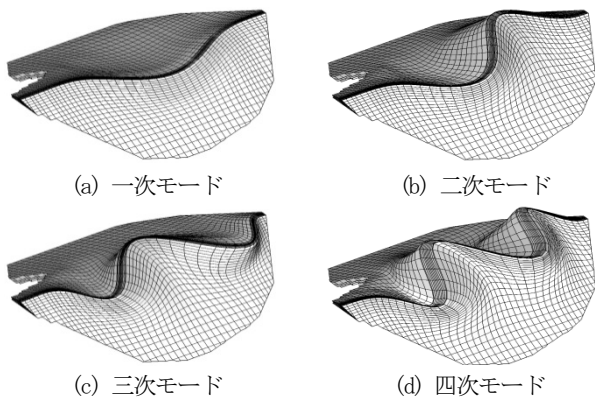


図-10 3次元固有値解析による
荒砥沢ダムの上流方向の固有振動モード

ダム軸方向では、2.5Hz までの低振動数範囲において経路“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を示している。ダム軸方向の 1 次卓越振動数(3.0Hz)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 次固有振動数の近傍では、天端のダム軸方向の地震応答に対する両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クロススペクトル及びコヒーレンス関数は上下流方向のそれと同じ傾向を有しており、天端のダム軸方向の地震応答に対する下方岩盤と両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。

鉛直方向では、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はほぼ同じ、コヒーレンス関数は経路“F-T”の方はやや高いから、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して下方岩盤の地震動の寄与は経路“G-T”よりやや大きいと考える。この振動数より高い振動数範囲では両経路のクロススペクトル及びコヒーレンス関数は前述した上下流方向及びダム軸方向の結果と概ね同じ傾向を有している。

以上により、ダム天端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について、振動方向によって多少寄与の具合が異なるが、概してダムの 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両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。

b) 本震からその約一週間後まで

図-9(B)に本震直後の12時9分の余震の分析結果を示す。上下流方向の伝達関数の1次卓越振動数(2.34Hz)まで、経路“F-T”のコヒーレンス関数が本震前と比べ明らかに低くなっており、クロススペクトルも非常に小さい値

から振動数にほぼ比例して大きくなっていく。このことから、低振動数範囲ではダム天端の上下流方向の地震応答に対して下方岩盤の地震動の寄与が本震前と比べ小さくなっていったと推測する。伝達関数の1次卓越振動数より高い振動数範囲では、3Hz付近(2.2~3.5Hz)を除けば両経路のコヒーレンス関数はほぼ同じ、クロススペクトルは経路“G-T”の方はやや大きいから、3.5Hz以上の振動数範囲では両岸地山の地震動の寄与がやや大きいと見られる。

ダム軸方向には、伝達関数の1次卓越振動数までクロススペクトル及びコヒーレンス関数が上下流方向の変化傾向と同じ、本震によるダム天端の地震応答に対する下方岩盤の地震動の寄与度合が変わったことが分かる。この振動数より高い振動数範囲では、両経路のクロススペクトルが同じ程度、コヒーレンス関数が振動数によって両経路の大小関係が変わっている。

鉛直方向にも、ダム軸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、低い振動数範囲で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っている。

c) 本震の一週間後から2015年まで

最新の地震記録(2015年5月13日06:13)の分析結果を図-9(C)に示す。図-9(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)を示し、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概ね同じ変化傾向を示している。

5. まとめ

本研究をまとめると以下ようになる。

- 1) 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について考察した。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に一時的に下がっていたが、その後本震前より4%ほど増加した。つまり大きな地震動により剛性が低下したがその後時間とともに剛性はエイジング効果により回復した。ただし回復の状況は水平方向より鉛直方向

が著しい。

- 2) 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はそれ以前にくらべ小さかった。これは本震と余震の地震動が高周波側であったことと材料が大きなひずみで剛性が低下し減衰が増加した非線形性による。
- 3) 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傾向が見られた。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った。2015年の地震記録の分析によれば、現状のダム基礎岩盤系における地震動の伝播特性が本震前の状態に回復したと判断できる。

今後の課題として、材料試験により振動の強さと盛土材料の締固め効果の関係を明らかにし、波動論に基づき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影響に関して検討する必要がある。

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。ここに記して深謝の意を表します。

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) 茂木秀則, 川上英二, 小田優介, 大町達夫: ロックフィルダムにおける長期間にわたる地震観測記録から推定した地震波伝播時間の経時変化, ダム工学, 25 巻, 4 号, pp.218-229, 2015
- 4) 佐藤信光, 曾田英揮, 斎秋夫: ロックフィルダムの地震記録による実測動的変形特性の推定と適用性, ダム工学, 25 巻, 4 号, pp.230-239, 2015
- 5) 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
- 6) 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—, 日本地震工学会論文集 第 15 巻, 第 7 号 (特集号), 2015
- 7) 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

(2017.〇〇受付)

INVESTIGATION ON THE LONG-TERM FLUCTUATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS AND TRANSMITTING BEHAVIORS OF SEISMIC WAVES IN A ROCKFILL DAM - FOUNDATION SYSTEM

Norihisa MATSUMOTO, Nario YASUDA and Zengyan CAO

With the earthquake records obtained during the last 23 years, analyses of the transfer function, the cross spectrum and the coherence function have been carried out for a rockfill dam, called Aratozawa dam (74.4m high and with central clay core). Based on analysis results the fundamental frequencies and acceleration amplification factors of the dam body are investigated. It is found that the fundamental frequencies and the acceleration amplification factors of the dam body sharply declined temporarily, shuck by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, June 14, 2008. However, these characteristics almost recovered to their original status about a week after the main shock. As for the propagating behavior of the seismic waves in the dam-foundation system, it has been pointed out that in the low frequency domain upto the fundamental frequency of the dam, the response of the dam crest mainly depends on the seismic motions of the lower bedrock. On the other hand, in the higher frequency domain, the contribution from the seismic motions of both banks may become dominant at some frequencies. It has been also found that such features temporarily changed due to the mentioned strong earthquake.