

ダムサイトの地震記録の特性分析と入力地震動の作成への活用

安田成夫¹⁾, 曹増延²⁾, 小林憂三³⁾

- 1) 一般財団法人ダム技術センター, 部長 博士 (工学)
e-mail : yasuda@jdec.or.jp
- 2) (株)JPビジネスサービス社会環境部, 上級エンジニア Ph.D.
e-mail : sou@jpbs.co.jp
- 3) 電源開発(株)土木建築部 (元一般財団法人ダム技術センター)
e-mail : yuuzou_kobayashi@jpower.co.jp

要約

大規模地震に対する既設ダムの耐震性能照査に関わる地震応答解析は、一般的にダムサイトの地震記録を基に経験的な手法、または半経験的な手法により照査用入力地震動を作成して行われる。本研究は、入力地震動の設定に地震記録を適切に活用するために、札内川ダムサイトの各観測点（ダム堤体内4点、岩盤深部、左右岸地山内部及び下流側開放基盤の計8点）の地震記録について、特性を分析し、入力地震動の作成に関するそれらの適用性を検討した。結果として、ダム底部の地震記録にはダムの固有振動数に対応するスペクトル振幅の低下、地山内部の地震記録には地山の動的挙動の影響があること等を指摘し、入力地震動の作成にあたっては、ダム底部の地震記録もしくは岩盤深部及び開放基盤の地震記録を利用することが適当であるものの留意点を指摘した。

キーワード： ダム, 地震記録, 入力地震動, 地震応答解析

1. 序言

我が国では、地震応答解析によりレベル2地震動に対する既設ダムの耐震性能照査が行われている。ダムの地震応答解析における入力地震動は、ダム底部で記録された地震動を原種波形として、距離減衰式¹⁾から得られた加速度応答スペクトルに適合するよう作成するのが主な方法の一つである。また、ダム底部の地震記録を要素地震として経験的グリーン関数法²⁾により入力地震動を作成することや過去に実際に観測された強震動をそのまま入力地震動として定義することもある。ところで、ダム底部の地震記録は、ダムと基礎岩盤、さらに貯水池との相互作用、または地山の振動の影響を受けている。距離減衰式により入力地震動を作成する際においても、地震記録は原種波形として周波数特性に修正が施されるものの、その地震記録そのものの特性を理解しておくことは意義がある。

札内川ダムは建設時において、地震時におけるダム堤体はもちろんのことダム基礎及びダムサイト地山の振動特性を把握するために、図1に示す通りに地震計が8か所に設置されている。ダムが完成した1998年以来、これまで300回以上の地震記録が収集されている。特に、ダム底部より深さ57mの岩盤深部及び両岸地山内の地震計により、ダムの地震記録としては貴重な観測データが得られている。

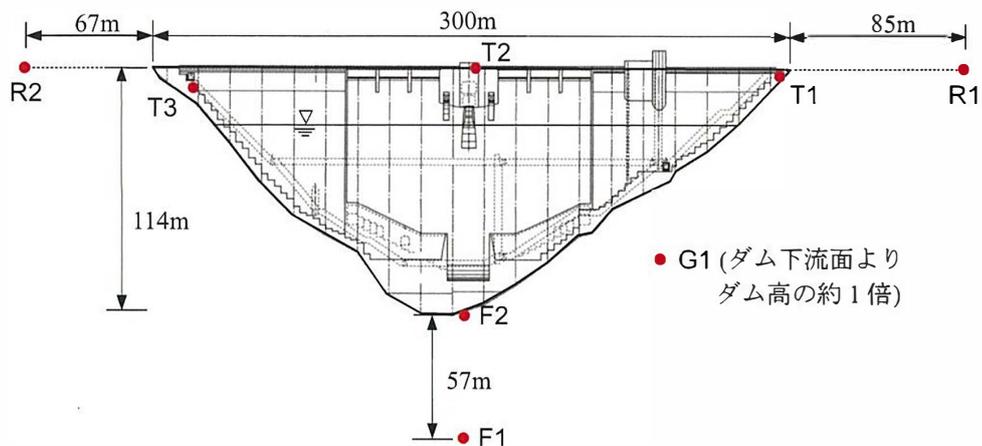


図1 札内川ダムにおける地震計の設置状況（下流面）

そこで、本研究は、札内川ダムサイトの地震記録に対してスペクトル分析を行い、観測点毎の各地震記録の共通点及び各観測点の地震記録の相違点を明らかにした。また、十勝沖地震（M8.0）時の異なる観測点の地震記録を用いて入力地震動を作成し、ダムの地震時挙動を再現解析した。さらに、異なる観測点の地震記録により作成した入力地震動の特性及びそれによるダムの地震応答解析結果を分析した。これらの解析によりダムの耐震性能照査に関わる地震応答解析の入力地震動の作成に際し、ダム底部の他、両岸地山内部、下流開放基盤等での記録地震を原種波形としての適用性を明らかにした。

2. 検討対象と検討方法

2.1 検討対象

札内川ダムサイトで2010年以降計188回の地震が観測されている。観測された地震動のうち、図1に示すダム底部(F2)の上下流方向の最大加速度が 15 cm/s^2 以上の6回の地震記録を本検討の対象とした。図2に抽出した地震の震央位置及び札内川ダムの位置を示す。またこれらの地震情報及びダムサイトの代表観測点（ダム天端中央、ダム底部及び岩盤深部）の最大加速度値を表1にまとめた。2003年9月26日に十勝沖地震（M8.0、震央は図2で③で示す）が発生し、札内川ダムの天端で上下流方向に最大加速度 677 cm/s^2 の地震動が観測されている。

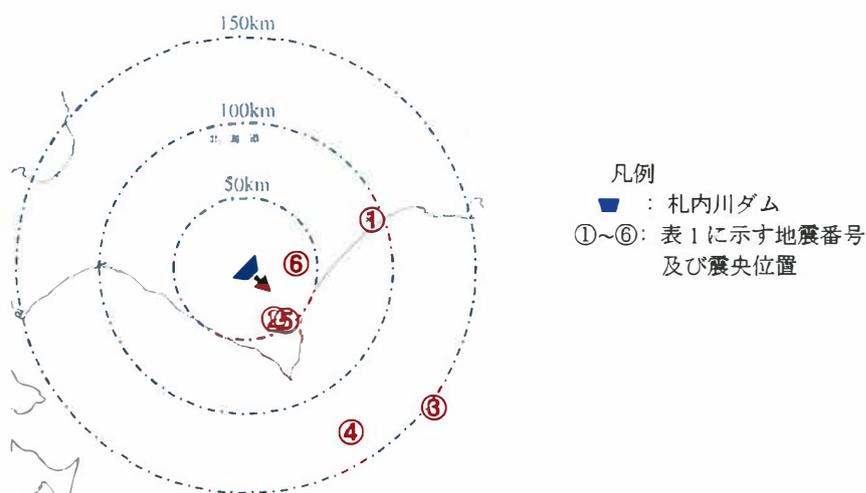


図2 抽出した地震の震央位置及び札内川ダムの位置

表1 観測された主な地震及びダムサイトの最大加速度値

(単位: cm/s²)

地震計位置	方向	地震 (震央地)					
		①釧路地方中南部	②十勝地方南部	③十勝沖	④十勝沖	⑤十勝地方南部	⑥十勝地方南部
		1999/05/13 02:59	2003/01/07 03:27	2003/09/26 04:50	2003/09/26 06:08	2012/08/25 23:16	2013/02/02 23:17
		M6.3	M4.7	M8.0	M7.1	M6.1	M6.5
		深 106km	深 53km	深 45km	深 21km	深 49km	深 102km
ダム天端中央(T2)	上下流	296.0	223.0	676.7	182.8	528.1	442.5
	ダム軸	246.2	48.5	303.5	81.3	199.3	358.9
	鉛直	98.8	30.9	206.8	40.9	120.3	158.0
ダム底部(F2)	上下流	37.9	15.0	61.5	22.8	35.5	46.2
	ダム軸	40.9	10.3	67.0	15.8	54.7	48.6
	鉛直	22.1	6.9	56.3	17.1	27.4	39.7
岩盤深部(F1)	上下流	23.6	12.1	51.0	18.6	28.8	50.9
	ダム軸	41.1	9.4	68.9	13.7	48.1	38.4
	鉛直	26.4	6.0	46.6	14.2	20.7	23.9

2.2 検討方法

地震記録のフーリエスペクトルによるダムサイトの地震動の特性分析および地震時挙動の再現解析に関わる工学基盤の入力地震動の特性分析を行う。

ダムサイトの地震記録のフーリエスペクトルによる地震動の特性分析は、以下に着目して行った。

① 観測点毎の地震記録の共通点

抽出した6回の地震はそれぞれ規模が異なり、各観測点の加速度フーリエスペクトルの振幅が大きく異なるため、フーリエスペクトルのそのものでなく、振幅の最大値を1として正規化したフーリエスペクトルの比較により分析する。

② 同一地震における異なる観測点の地震動の相違点

十勝沖地震の本震(2003年9月26日04:50)における異なる観測点間の地震加速度記録のフーリエスペクトルを比較することにより、異なる観測点間の地震動の相違点を明らかにする。

なお、上記分析に先立って、ダム天端中央とダム底部の地震記録によりダム堤体の伝達関数を調べた。

図3に各方向の伝達関数を示す。

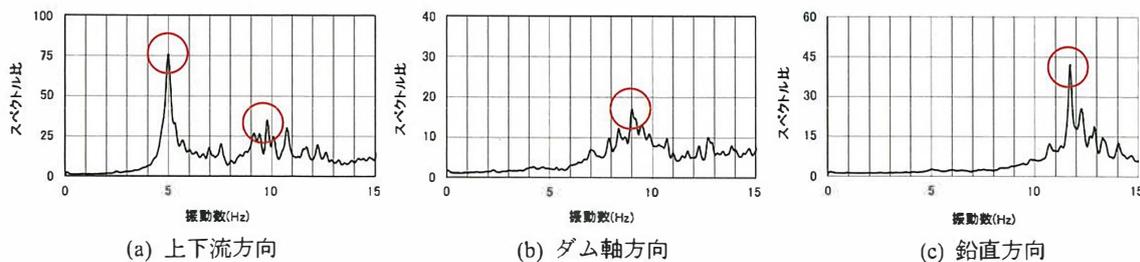


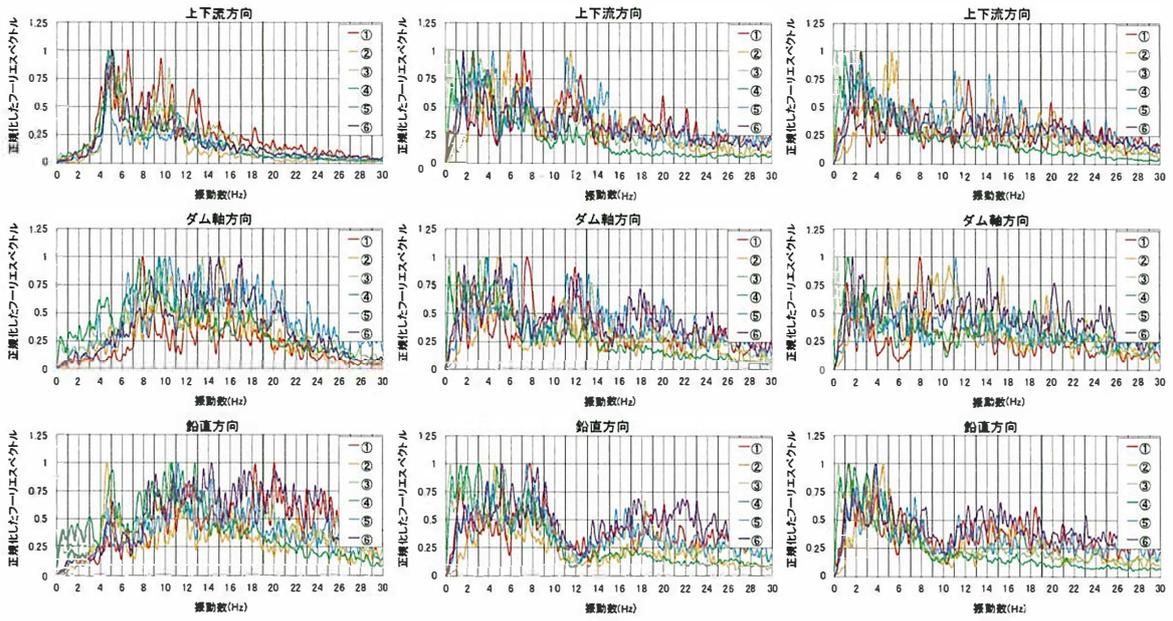
図3 地震記録によるダム堤体の伝達関数

ダムの地震時挙動の再現解析では、ダム底部(F2)及び岩盤深部(F1)の地震記録を基に工学基盤面の入力地震動を作成し、それぞれの入力地震動に対するダム堤体の地震応答スペクトルを求めた。ここで作成した二つの入力地震動の特性及びそれぞれの入力地震動に対するダム堤体の地震応答の特性を比較することにより、いわゆるダムサイトの地震記録から入力地震動を作成する際の留意点を明らかにした。

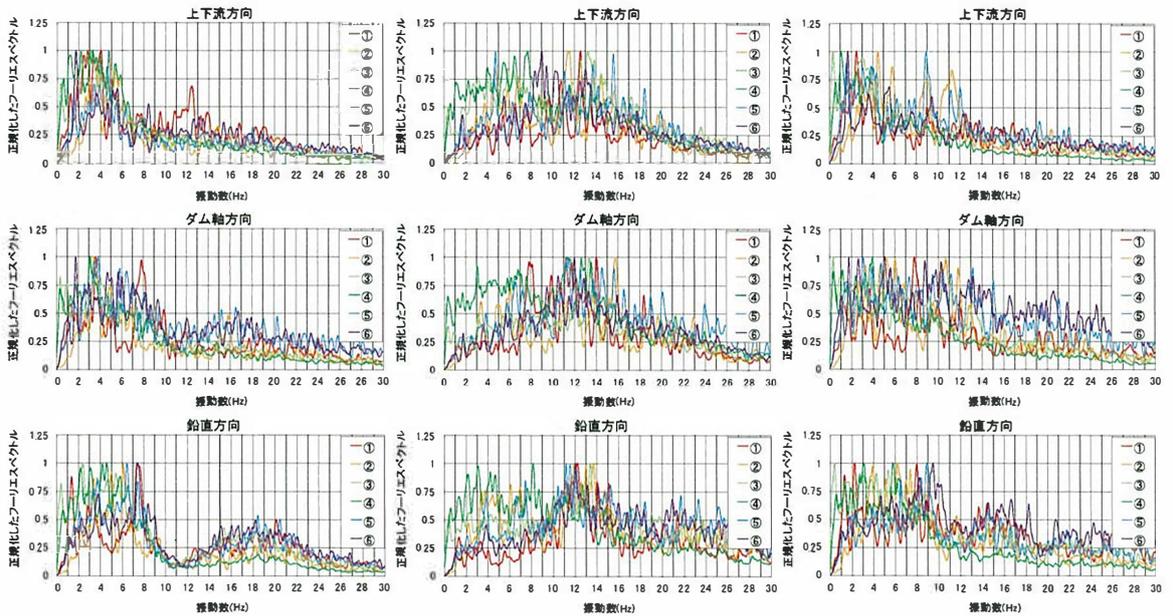
3. 観測点毎の地震記録の共通点の分析

図4に観測点毎の各地震記録の正規化したフーリエスペクトルを比較する。以下に、観測点毎の地震動の特性及び共通点について考察する。

- (1) ダム天端中央(T2) (図 4(a)) では、各方向、特に上下流方向のフーリエスペクトルはダムの固有振動数 (図 3 の伝達関数を参照) 付近で最大値となり、各地震の記録からほぼ同じ形を有するフーリエスペクトルが得られている。当然ながらこの位置の地震記録には地震の特性よりもダム堤体の振動特性が強く表れている。
- (2) ダム底部(F2) (図 4(b)) では、フーリエスペクトルに二つの特徴が見られる。一つ目は十勝沖地震 (地震③) 及びその余震 (地震④) において 1Hz 以下の範囲では各方向成分に大きなピークが表れている。これは十勝沖地震が海溝型地震であることによる長周期振動成分であると考えられる。二つ目は各地震記録のフーリエスペクトルに共通の凹みがあり、対応する振動数は上下流方向には 5Hz 付近及び 9.5Hz 付近、ダム軸方向には 9Hz 付近、鉛直方向には 12Hz 付近である。一方、ダムの天端中央とダム底部の間の各方向の伝達関数 (図 3 に示す) により 5Hz 及び 9.5Hz はダム堤体の上下流方向の固有振動数、9Hz はダム軸方向の固有振動数、12Hz は鉛直方向の固有振動数であることが分かる。上下流方向の 1 次固有振動数付近のフーリエスペクトルの詳細を図 5 に拡大して示す。ダムの固有振動モードの影響を受けて、ダム底部(F2)はこれらの振動数で振動モードの節点になり、揺れにくい状態となっていたと推測する。現在、ダムの耐震性能照査のためにダム底部の地震記録が入力地震動の原種波形として使用され、実際には地震波の周波数特性が修正されるものの、ここで述べた特性には留意する必要がある。原種波形をそのまま入力地震動とする際には尚更注意が必要である。
- (3) 岩盤深部(F1) (図 4(c)) では、鉛直方向には振動数 10Hz 付近でフーリエスペクトル振幅の低下が見られるものの、ダム底部(F2)のようにダム堤体の固有振動数付近でフーリエスペクトル振幅の急激な低下は見られない。これは岩盤深部(F1)の地震計がダム底部より 57m の深さにあり、受けるダムの振動の影響はダム底部(F2)ほど強くないからと考えられる。
- (4) 左岸地山内部(R1)と右岸地山内部(R2)では、正規化したフーリエスペクトルは共通の傾向があるので、ここで左岸地山内部(R1)を代表としてその正規化したフーリエスペクトルを図 4(d)に示す。上下流方向には約 6Hz 以下の範囲、ダム軸方向及び鉛直方向には約 8Hz 以下の範囲ではこれらより以上の振動数範囲と比べて明らかにスペクトル振幅が大きくなっている。これは上記 6~8Hz 以下の低振動数範囲については、地震計設置位置より上部地山の振動の影響あるいは地山自体による地震動の増幅効果によるものと推測する。結果として、地山内部の地震記録を入力地震動の作成に使用するには課題が多いと考えられる。また、地山内部では基本的に全ての地震記録の正規化したフーリエスペクトルの形が共通しているが、海溝型地震 (地震③と地震④) においては 1Hz 以下の振動数範囲では卓越する成分が確認される。
- (5) 同様に堤体左岸部(T1)と堤体右岸部(T3)では、正規化したフーリエスペクトルは共通の傾向があるので、ここで堤体左岸部(T1)を代表としてその正規化したフーリエスペクトルを図 4(e)に示す。約 8Hz 以下の振動数範囲では海溝型地震 (地震③と地震④) によるフーリエスペクトルはいずれの方向にも大きく表れている。また、各方向に比較的高い振動数 (12Hz 前後) でスペクトル振幅の最大値が表れている。これは、堤体左岸部及び堤体右岸部ではダム堤体及び地山の振動による散乱波の影響を大きく受けているからではないかと考える。従って、これらの位置の地震記録は入力地震動の作成には原種波形として不適と考える。
- (6) 下流開放基盤(G1)の地震計は、ダム下流面より下流方向へダム高の約 1 倍の距離、かつ地表より約 30m の深さに位置し、完全な開放基盤面にあるものではない。そのため、地震記録にダム堤体及び地山の振動の影響をある程度受けていると考えられる。図 4(f)にこの地震計の観測記録の正規化したフーリエスペクトルを示す。この図から下流開放基盤(G1)はダム底部(F2)ほどダムの振動の影響を受けていないことが分かる。よって、下流開放基盤(G1)の地震記録は入力地震動の作成に比較的適用できると考える。また、今後、開放基盤面で地震計を設置するにはダム堤体から最低でもダム高の 1 倍以上の距離を取ることを奨める。一方、海溝型地震 (地震③と地震④) によ



(a) ダム顶端中央(T2) (b) ダム底部(F2) (c) 岩盤深部(F1)



(d) 左岸地山内(R1) (e) 堤体左岸部(T1) (f) 下流開放基盤(G1)

図4 観測点毎の各地震記録の正規化したフーリエスペクトル

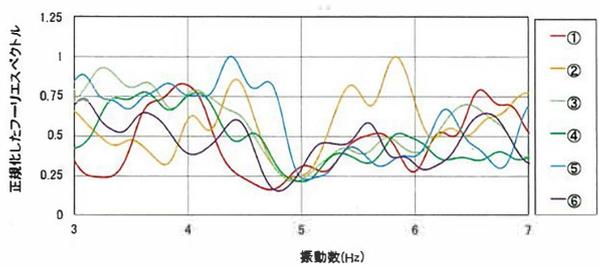


図5 上下流方向の伝達関数の拡大図 (1次固有振動数5Hz付近)

る1Hz以下の振動成分が非常に卓越していることが明瞭であり、長周期成分は減衰せずに伝達されることが理解される。

4. 同一地震における異なる観測点の地震動の相違点の分析

十勝沖地震における異なる観測点の地震動のフーリエスペクトルを比較し、その相違点を分析した。

前節の検討により、ダム天端中央(T2)は当然ながら、左右岸部(T1 と T3)はダム基礎岩盤近傍に地震計が設置されているものの、地震記録はダム堤体及び地山の振動の影響を強く受けており、入力地震動の作成に適用できないと判断された。ここでは、上記以外の観測点における地震記録を対象として分析を行う。岩盤深部(F1)を共通の比較対象として、以下のように観測点をグループ化し、各グループの地震記録のフーリエスペクトルを比較した。

- ① 地山内部（左岸(R1)及び右岸 (R2)) の地震動
- ② ダムサイト河床位置（ダム底部(F2)及び下流開放基盤(G1)) の地震動

4.1 地山内部（左岸 (R1) 及び右岸 (R2)) の地震動

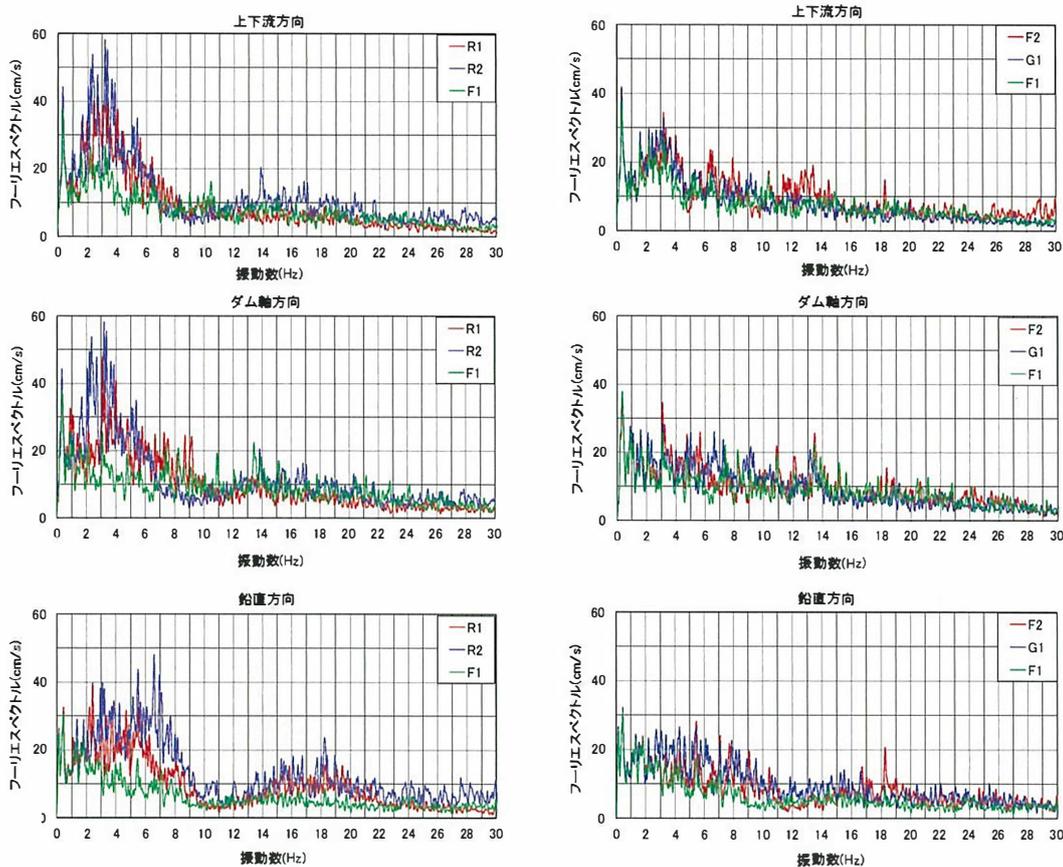
当初地震計設置時点において、札内川ダムの左岸及び右岸の地山内部の観測点(R1とR2)での地震動は、岩盤深部(F1)の地震動と類似な特性を有していると想定された。図6(a)には岩盤深部(F1)及び両岸の地山内部の観測点(R1とR2)の地震記録のフーリエスペクトルを示す。約10Hzまでの低振動数範囲では、いずれの方向においても両岸地山内部(R1とR2)の地震記録のフーリエスペクトルは岩盤深部(F1)のそれより大きい。10Hzより高い振動数範囲では、水平方向にはこれらの観測点の地震記録のフーリエスペクトルは同程度であるが、鉛直方向には13Hz～23Hz範囲で両岸地山内部(R1とR2)の方が大きくなっている。これは両岸地山内部(R1とR2)の地震記録は地山の地震時挙動の影響を受けているためと考えられる。少なくとも、これらの結果より地山内部の地震動の特性は岩盤深部の地震動のそれと異なることが明らかとなった。

4.2 ダムサイト河床位置（ダム底部 (F2) 及び下流開放基盤 (G1)) の地震動

図 6(b)にダム底部(F2)、下流開放基盤(G1)及び岩盤深部(F1)の地震記録のフーリエスペクトルを示す。いずれの方向においても、2Hz 以下の低振動数範囲では三つの観測点はほぼ同じフーリエスペクトルを示し、基礎岩盤がこの振動数範囲ではほぼ剛体的な運動をしていたと思われる。2Hz 以上約 15Hz 付近までの振動数範囲では個別の振動数を除いて、ダム底部(F2)と下流開放基盤(G1)は岩盤深部(F1)よりフーリエスペクトル振幅が大きくなっており、岩盤深部(F1)より浅い岩盤では地震動が増幅していたと考えられる。ただし、15Hz 以上の振動数範囲ではいずれの方向においても各観測点の間に大きな差はない。

一方、上下流方向ではダム底部(F2)は下流開放基盤(G1)と比べ、振動数 5Hz 付近及び 9.5Hz 付近でフーリエスペクトル振幅が明らかに小さくなっている。これは前節で述べた通り、ダム底部(F2)では振動数 5Hz 及び 9.5Hz の付近でダム堤体の固有振動モードの節点になり、開放基盤面より揺れにくくなっていると推測される。また、岩盤深部(F1)では 4.5Hz 付近でフーリエスペクトル振幅の低下が見られる。これは岩盤深部(F1)の地震計がダム底部よりダム高の 1/2 の深さにあり、ダムからはまだ十分に離れていないことから、地震時ダムの振動の影響をある程度受けていると推測される。

以上のことから、両岸地山内部の地震記録には地山の振動特性が強く反映されており、純粋に工学基盤からの地震動とは言い難い。また、ダム底部は地震時ダム堤体の固有振動モードの節点になり、この位置の地震記録にはダムの固有振動数に対応する振動数成分の低下が明らかとなった。従って、ダムの耐震安全性評価における入力地震動の作成ではダム底部位置の地震記録が原種波形として用いる場合、その特性に留意する必要がある。また、ダムの距離減衰式を求める際に、型式の異なるダム基礎の地震記録群を統計処理することになるが、各地震記録にはダム堤体の振動特性（特に固有振動数）が反映されていることを理解しておくことは意義がある。一方、岩盤深部及び下流開放基盤での地震記録にはダム堤体及び地山の地震時挙動の影響が少なく、入力地震動の作成にこれらの地震記録はある程度適用が可能であると考えられる。しかしながら、このような条件の地震記録は容易に得られる訳ではなく、現時点ではダム底部での地震記録の特性を把握した上で作業することが最善と思われる。



(a) 地山内部(R1, R2)及び岩盤深部(F1)

(b) 河床位置(F2, G1)及び岩盤深部(F1)

図 6 地震記録のフーリエスペクトルの比較

5. 地震記録より作成する工学基盤の地震動及びそれに対するダム地震応答

前節の検討により岩盤深部(F1)、ダム底部(F2)及び下流開放基盤(G1)の地震記録が入力地震動の作成に適切であることを明らかにした。本研究では、2003年9月26日に発生した十勝沖地震の際に収録された岩盤深部(F1)及びダム底部(F2)の地震記録を用いて、工学基盤面の入力地震動を作成した。さらに、異なる観測点の地震記録による入力地震動を作成し、それに対するダム堤体の地震応答の違いを考察した。一方、下流開放基盤(G1)の周辺の地質情報は十分に得られておらず、その地震記録により工学基盤面の入力地震動を作成するには精度の面で難しいため、本文は下流開放基盤(G1)の地震記録による入力地震動には論及しない。

5.1 工学基盤の地震動の作成方法

本研究では、工学基盤面の入力地震動は、ダムサイトの観測点の地震記録を工学基盤面に引き戻す方法により作成した。作成手順としては、まず、工学基盤面の任意の地震動に対する地震観測点の地震応答を求め、工学基盤面と観測点の間の伝達関数を求める。次に、ここで得た伝達関数と観測点の地震記録のフーリエスペクトルにより工学基盤面の地震動のフーリエスペクトルを求める。最後に、逆FFT変換により工学基盤面の入力地震動が得られる。この方法の詳細については文献³⁾を参照されたい。

5.2 検討条件

図 7(a)には検討用解析モデル、図 7(b)にはダム軸断面における地質状況を示す。工学基盤面（基礎岩

盤モデルの底面)は別途実施した検討の結果⁴⁾に基づき、ダム高の1.5倍の深さ(本研究では171m)に設定した。ダム堤体及び基礎岩盤を線形弾性材料とし、その物性値を表2に示す。このモデルは振動数20Hzまで解析精度を有している。基礎岩盤の側方及び底面で、三浦の粘性境界条件⁵⁾を用いた。

入力地震動の作成及びダムの地震応答解析においては、ダムと貯水池(十勝沖地震時の水位)との連成解析によりダムと貯水池の動的相互作用の影響を考慮した。

なお、解析にはダムの解析専用プログラムUNIVERSE⁶⁾を用いた。

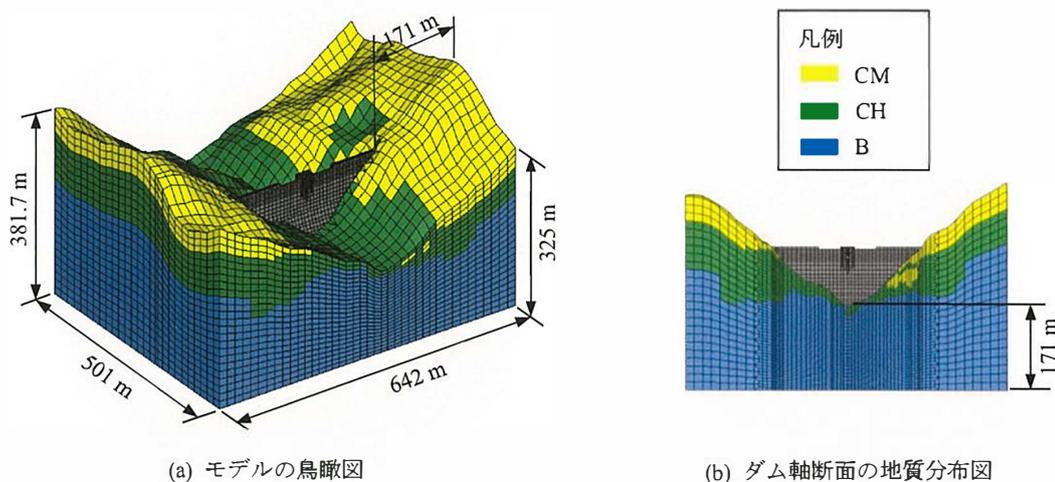


図7 検討用解析モデル

表2 ダム堤体及び基礎岩盤の物性値

区分	せん断弾性係数 ^{※1} (N/mm ²)	密度 ^{※2} (g/cm ³)	ポアソン比 ^{※3}	減衰定数 ^{※4}
ダムコンクリート	13000	2.44	0.20	2%
基礎岩盤	CM	2.74	0.28	5%
	CH			2%
	B			1%

注：※1 ダムは十勝沖地震(2003/09/26)の観測記録の再現解析により同定したもの、
岩盤はPS検層試験結果

※2 ダムの建設工事における品質管理結果

※3 コンクリート材料試験及び岩石のPS検層試験結果から換算したもの

※4 十勝沖地震の観測記録の再現解析により同定したもの

5.3 工学基盤面の入力地震動の比較

岩盤深部(F1)とダム底部(F2)の地震記録を基に作成した工学基盤面の入力地震動(以下では、岩盤深部(F1)の地震記録を用いて作成した工学基盤面の入力地震動を“波F1”,ダム底部(F2)の地震記録を用いて作成したものを“波F2”)を比較する。図8に、例として上下流方向の入力地震動のフーリエスペクトルを示す。このフーリエスペクトル図を四つの振動数帯に分けて考察することができる。①4.6Hz以下の振動数範囲では波F1と波F2のフーリエスペクトルは殆ど同じ、即ち、ダムの一次固有振動数以下の振動数範囲ではダム底部の地震記録と岩盤深部の地震記録による入力地震動は同じである。②振動数4.7Hz~9.5Hz範囲では、波F2のフーリエスペクトルは波F1のそれより小さくなっている。この振動数範囲にはダム堤体の1次を含む低次の固有振動モードの存在が影響していると考えられる。3節と4節で述べた通り、ダム底部(F2)はダムの固有振動数付近で揺れにくく、地震記録にその振動数成分が小さく(フーリエスペクトル値が小さい)なっているため、波F2にも同様の傾向が表れていると考えられ

る。③振動数 10Hz～15Hz 範囲では、波 F2 と波 F1 の大小関係は振動数によって変わる。④15Hz 以上の振動数範囲では波 F2 は波 F1 より一般にフーリエスペクトル値が大きくなっている。

ダム軸方向及び鉛直方向には上下流方向ほど上述した傾向が明瞭ではないものの、概ね同様なことが確認されている（関連記述はここでは省略する）。

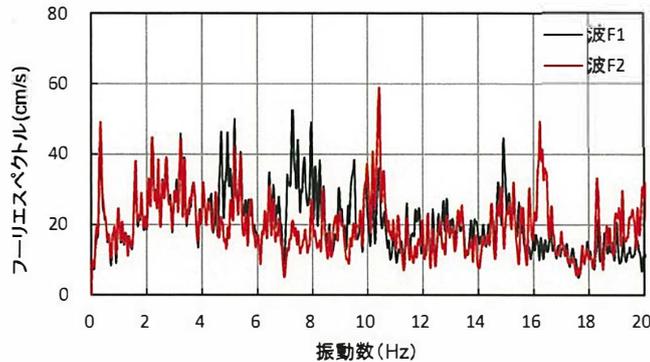


図 8 地震記録による入力地震動のフーリエスペクトルの比較（工学基盤，上下流方向成分）

5.4 ダム堤体の地震応答の比較

前節で作成した入力地震動（波 F1 と波 F2）に対するダム堤体及び基礎岩盤の地震応答を求めた。種々の解析結果のうち、例としてダム天端中央の上下流方向の応答加速度のフーリエスペクトルを図 9 に示す。図 9 において振動数 4.7Hz～9.5Hz 範囲では波 F2 による応答が波 F1 のそれより小さくなっている。また、他の振動数範囲においても 5.3 節で述べた工学基盤面の入力地震動と概ね同じ傾向の比較結果が見られる。ダム天端中央の地震応答には、図 8 で示した 4.7Hz～9.5Hz 範囲におけるスペクトルの違いが反映された状況となっている。

入力地震動の作成では、十勝沖地震を例に図 7 のモデルを用いている。今後は他の地震においても同様の確認を行う予定である。また、左右岸地山内観測点の地震動により、地山の振動の影響についても確認を行って参りたい。

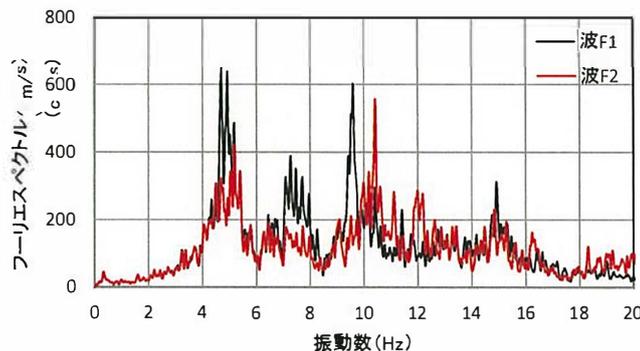


図 9 ダム天端中央における応答加速度のフーリエスペクトルの比較（上下流方向成分）

6. まとめ

本研究により以下のことが明らかになった。

- ① 地震動のフーリエスペクトル解析によれば、ダム底部観測点の地震記録はダムの固有振動モードに対応する振動数成分が小さくなっており、ダム堤体の振動の影響と考えられる。この現象は各方向の地震記録に現れている。ダム底部の地震記録が入力地震動の原種波形として使用される場合、上記の特性には留意する必要がある。
- ② 札内川ダムでは、岩盤深部の地震計はダム底部よりダム高の1/2倍の深さに、下流開放基盤の地震

計はダムからダム高の約1倍の距離に位置している。これらの位置の地震記録にはダムの地震時挙動の影響がわずかながら含まれていると見られるが、ダム底部と比べれば、その影響は遥かに小さいことが明らかとなった。

- ③ ダムの三次元モデルによる再現解析では、ダム底部(F2)から計算した工学基盤面の入力地震動は岩盤深部(F1)の計算結果と比較すると、4.7Hz～9.5Hzにおいてフーリエスペクトルの低下が確認された。これは、ダム堤体の振動の影響と考えられる。この傾向はダム天端中央の地震応答においても同様であった。

謝 辞

本研究の実施に当たっては、国土交通省国土技術総合研究所河川研究部及び北海道開発局帯広開発建設部札内川ダム管理支所のご協力のもと地震観測記録を利用させて頂いたことを深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Matsumoto, N., Yoshida, H., Sasaki, T. and Annaka, T.: Response Spectra of Earthquake Motion at Dam Foundation, Proc. 21st International Congress on Large Dams, 2003.
- 2) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, The Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.151-156, 1986.
- 3) N. Yasuda, N. Matsumoto, and Z. Cao.: Study on the Mechanism of the Peculiar Behaviors of the Aratozawa Dam During the 2008 Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.13 No.1, pp.205-315, 2018.
- 4) N. Yasuda, Z. Cao and Y. Kobayashi.: Prediction of Seismic Motion at Engineering Bedrock Based on Earthquake Records and Numerical Analysis, Dam Engineering, 2018.
- 5) 三浦 房紀, 沖中 宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集, 第 404 号/I-11, pp.395-404, 1989.
- 6) 有賀義明, 曹増延, 渡邊啓行: 強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.53-67, 2004.

Characteristic Analysis of Earthquake Records of Dam Site and Their Applicability for Setting Ground Motion

YASUDA Nario¹⁾, CAO Zengyan²⁾ and KOBAYASHI Yuzo³⁾

1) Director, Engineering Dept. 1, Dam Engineering Center, Dr. Eng.

2) Senior Engineer, JP Business Service Corporation, Ph.D.

3) Civil & Architectural Eng. Dept., Electric Power Development Co., Ltd.

ABSTRACT

In order to properly utilize the earthquake records for setting the ground motion in response analysis of dams, characteristics of the earthquake records of the different locations in the Satsunaigawa Dam site are analyzed. It is pointed out that the spectral amplitude of the earthquake record on the dam bottom reduces remarkably corresponding to the natural frequency of the dam. Earthquake records in the deep bedrock (with a depth of 1/2 dam height) and those on the open ground with a distance of about the dam height may be used for setting ground motion. The records of the dam bottom may be used with a comprehension of above characteristics. It is difficult to utilize the earthquake records of both banks because they include the influence of the mountain behaviors.

Keywords: Dam, Earthquake Record, Ground Motion, Response Analysis

ダムサイトの地震記録の特性分析 と入力地震動の作成への活用



安田 成夫

一般財団法人 ダム技術センター

曹 増延

(株)JPビジネスサービス

社会環境部

小林 憂三

電源開発(株) 土木建築部

第15回日本地震工学シンポジウム

仙台、日本

2018年12月8日

1

1. 背景と研究の目的

1) 背景

- A) 大規模地震に対する既設ダムの耐震性能照査は地震応答解析結果を用いて実施されている。
- B) 解析における入力地震動は、一般にダムサイトの地震記録を基に作成されている。
- C) 近年、ダムに設置される地震計は、天端と底部監査廊に設置される事例が多い。
- D) 入力地震動は、底部監査廊の地震計による記録を用いている。
- E) 過去には、堤体アバットメントあるいはリムトンネル内に設置された地震計の記録にも注目され、その記録の妥当性は明確ではなかった。

2) 研究の目的

→ ダムにおける適切な地震計配置

ダムサイト近傍の地震時の震動特性を明らかにする。

→ 筆者らの一人が25年前に建設中の北海道開発局札内川ダム建設所に依頼した。

2. 検討対象ダム諸元の諸元



ダム諸元

ダム地点	北海道河西郡中札内村
管理	国土交通省北海道開発局
型式	重力式コンクリートダム
堤高	114 m
堤頂長	300 m
堤体積	770,000 m ³
竣工年	1998年



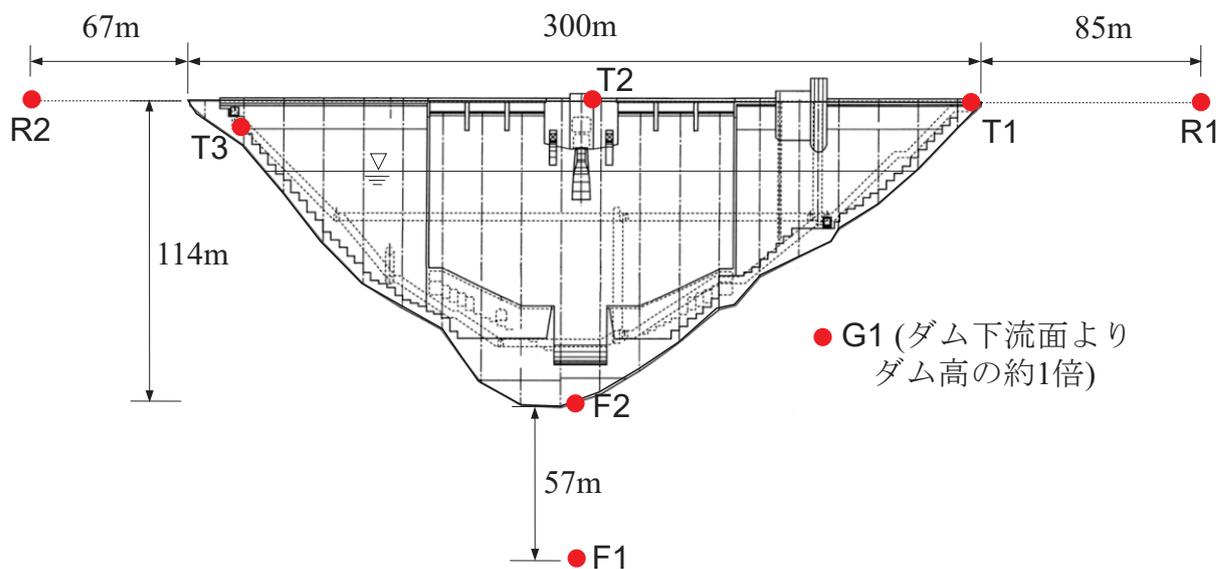
地震計

3

3. 地震観測の概要

3.1 地震計設置状況

(8ヶ所、3成分)

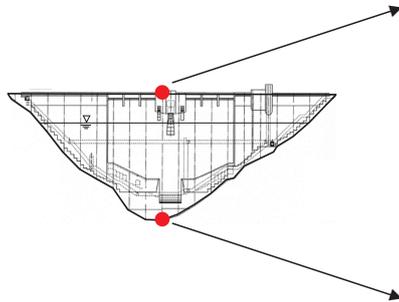


札内川ダムにおける地震計の設置状況(下流面)

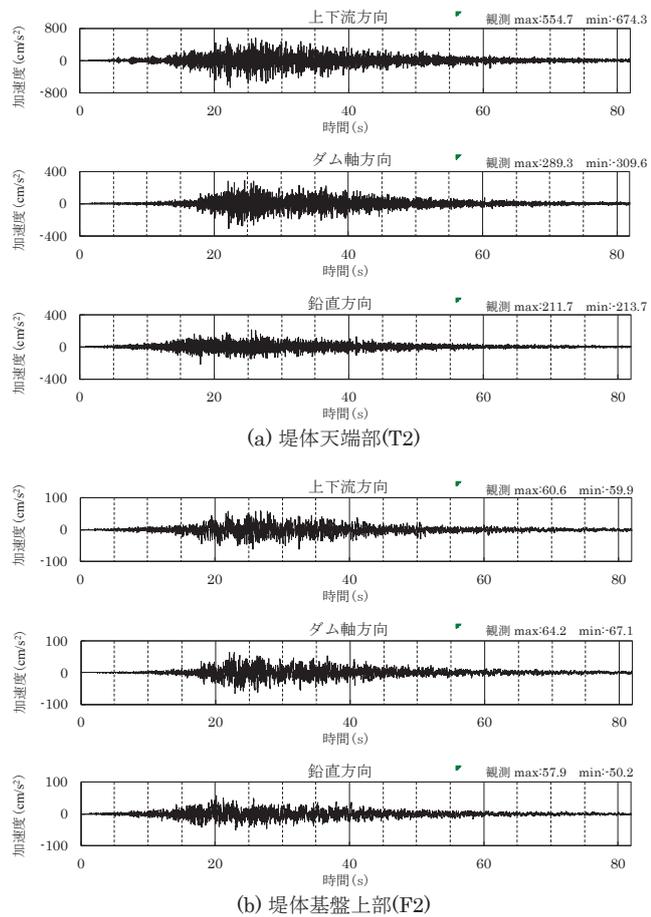
3. 地震観測の概要

3.2 地震記録の例

③十勝沖地震(M8.0)
2003/Sept./26

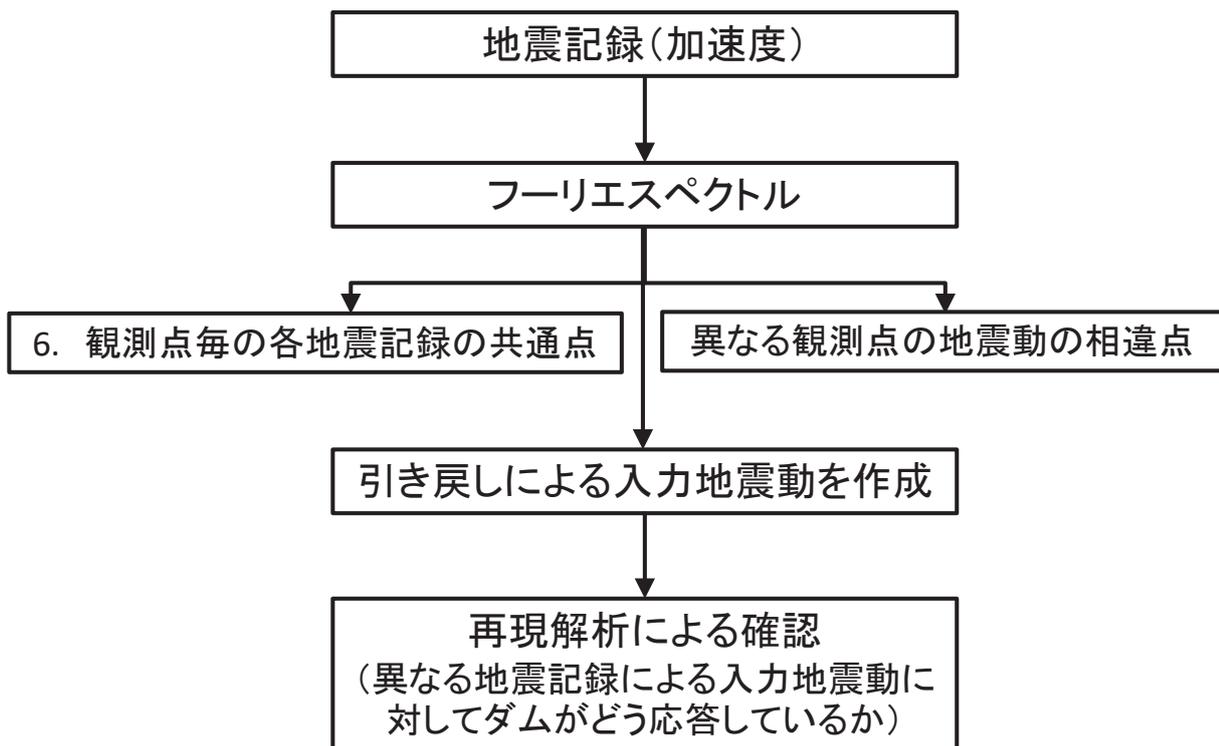


十勝沖地震時の天端と
基礎岩盤の加速度記録

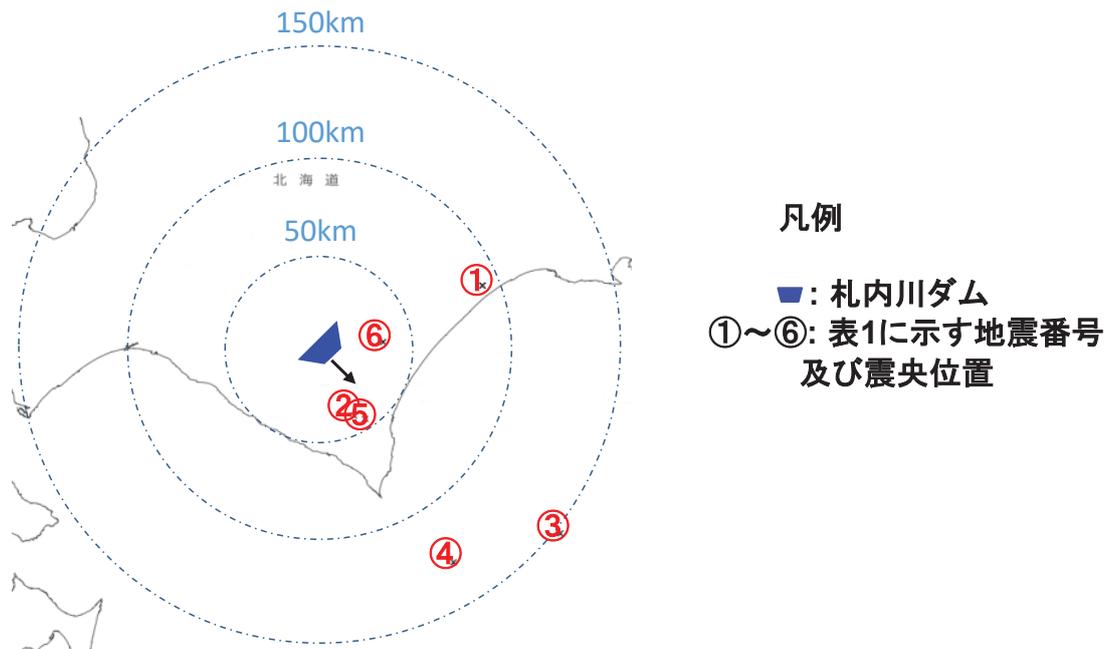


5

4. 検討方法の流れ



5. 分析対象とする地震



分析対象地震の震央位置及び札内川ダムの位置

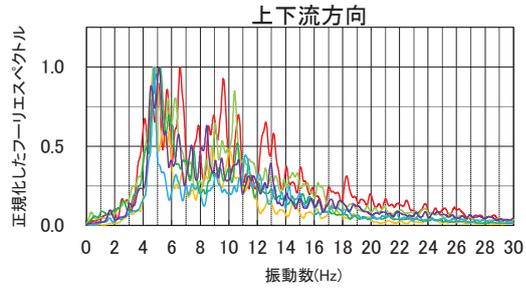
7

5. 分析対象とする地震

分析対象地震におけるダムサイトの最大加速度値 (単位: cm/s^2)

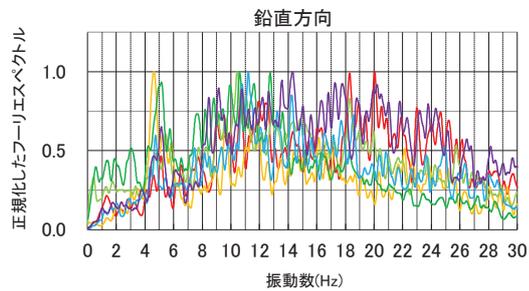
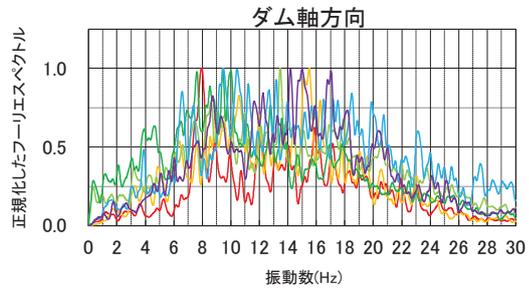
地震計位置	方向	地震(震央地)					
		①釧路地方中南部 1999/5/13 02:59 M6.3 深106km	②十勝地方南部 2003/1/7 03:27 M4.7 深53km	③十勝沖 2003/9/26 04:50 M8.0 深45km	④十勝沖 2003/9/26 06:08 M7.1 深21km	⑤十勝地方南部 2012/8/25 23:16 M6.1 深49km	⑥十勝地方南部 2013/2/2 23:17 M6.5 深102km
ダム天端中央(T2)	上下流	296.0	223.0	676.7	182.8	528.1	442.5
	ダム軸	246.2	48.5	303.5	81.3	199.3	358.9
	鉛直	98.8	30.9	206.8	40.9	120.3	158.0
ダム底部(F2)	上下流	37.9	15.0	61.5	22.8	35.5	46.2
	ダム軸	40.9	10.3	67.0	15.8	54.7	48.6
	鉛直	22.1	6.9	56.3	17.1	27.4	39.7
岩盤深部(F1)	上下流	23.6	12.1	51.0	18.6	28.8	50.9
	ダム軸	41.1	9.4	68.9	13.7	48.1	38.4
	鉛直	26.4	6.0	46.6	14.2	20.7	23.9

6. 観測点毎の各地震記録の共通点



- ・上下流方向のフーリエスペクトルは、ダム固有振動数付近で最大値となっている。

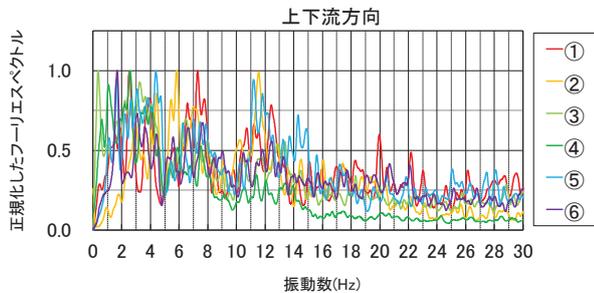
- ・各地震波から同じ形のスペクトルになっている。



ダム天端中央(T2)

9

6. 観測点毎の各地震記録の共通点



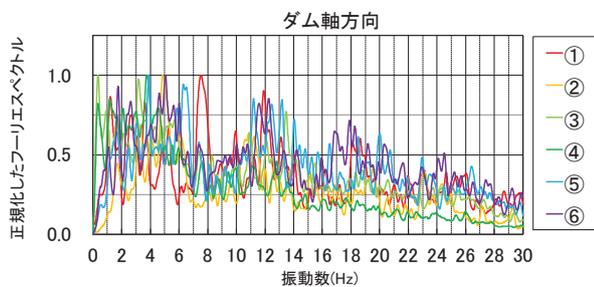
- ・地震動③、④の十勝沖地震は海溝型で、1 Hz以下の長周期成分が表れている。

- ・フーリエスペクトルに共通の凹がある。

5~9.5Hz: 上下流方向

9Hz: ダム軸方向

12Hz: 鉛直方向

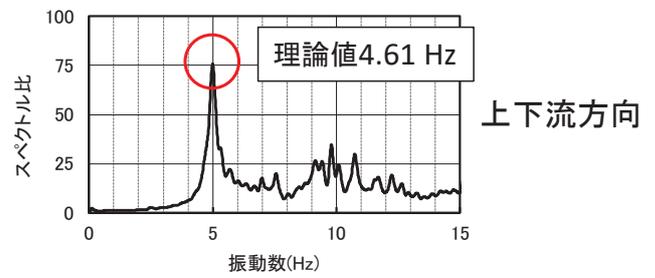
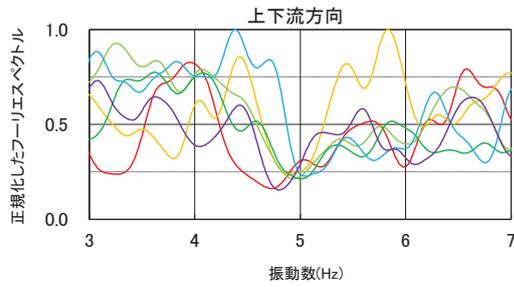


- ・原種波形をそのまま入力地震動とする場合、留意する必要がある。



ダム底部(F2)

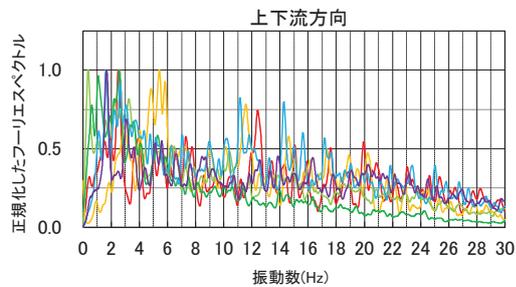
6. 観測点毎の各地震記録の共通点



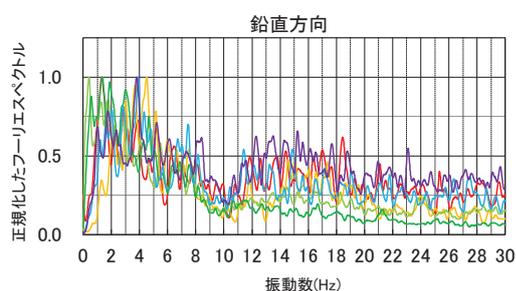
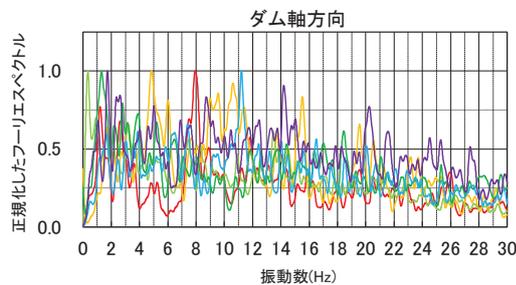
ダム底部のフーリエスペクトルの拡大図

ダム堤体の伝達関数

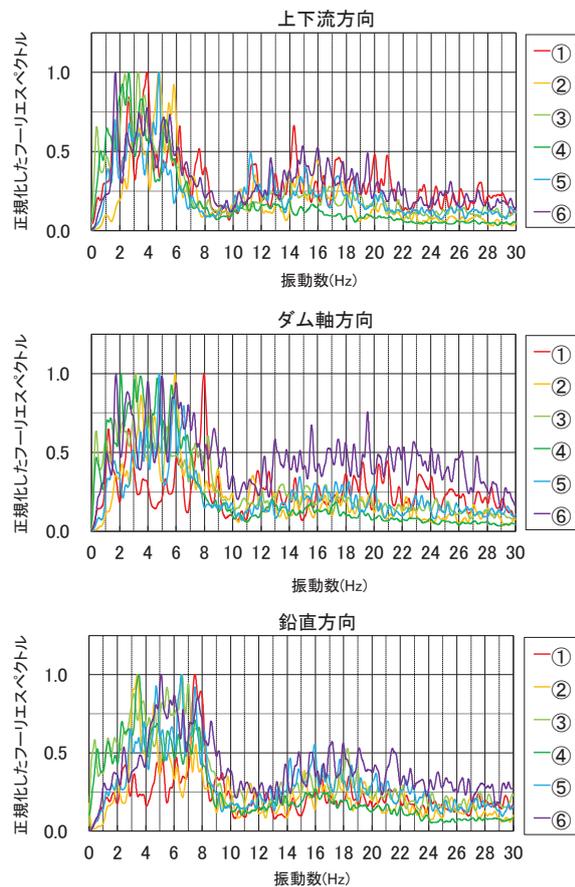
6. 観測点毎の各地震記録の共通点



- ・上下流方向のフーリエスペクトルは、10Hz付近で低下が見られるものの、ダム底部(F2)のようにダムの固有振動数付近で低下することはない。



6. 観測点毎の各地震記録の共通点

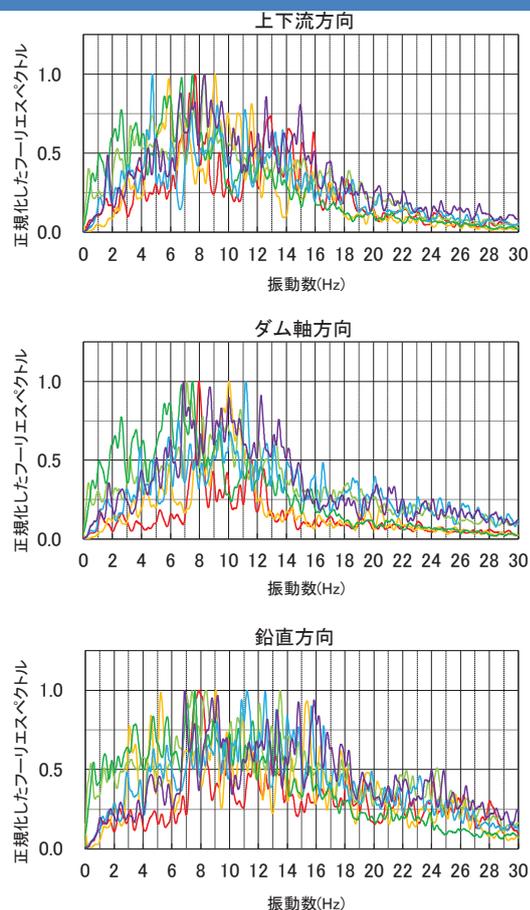


右岸地山内部(R1)

- ・上下流方向では6 Hz以下、ダム軸・鉛直方向では8 Hz以下の範囲は、それ以上の振動数範囲に比べて、振幅が大きくなっている。
- ・これは、上部地山あるいは地山自体の地震動の影響が反映されていると考えられる。
- ・結果として、入力地震動としては適当ではない。
- ・また、地震動③、④においては1 Hz以下の低振動数成分が見られる。

13

6. 観測点毎の各地震記録の共通点



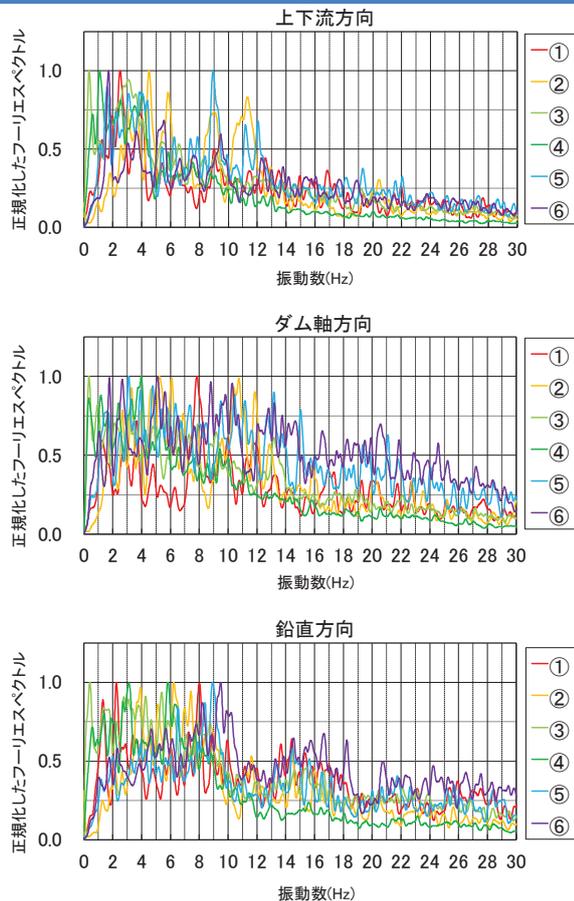
ダムの右岸アバット (T3)

- ・上下流方向・ダム軸・鉛直方向とも、高い震動数(12Hz前後)で最大値が表れている。
- ・結果として、入力地震動としては適当ではない。
- ・各方向とも、地震動③、④では8Hz以下で振幅が大きくなっている。

報-17

14

6. 観測点毎の各地震記録の共通点

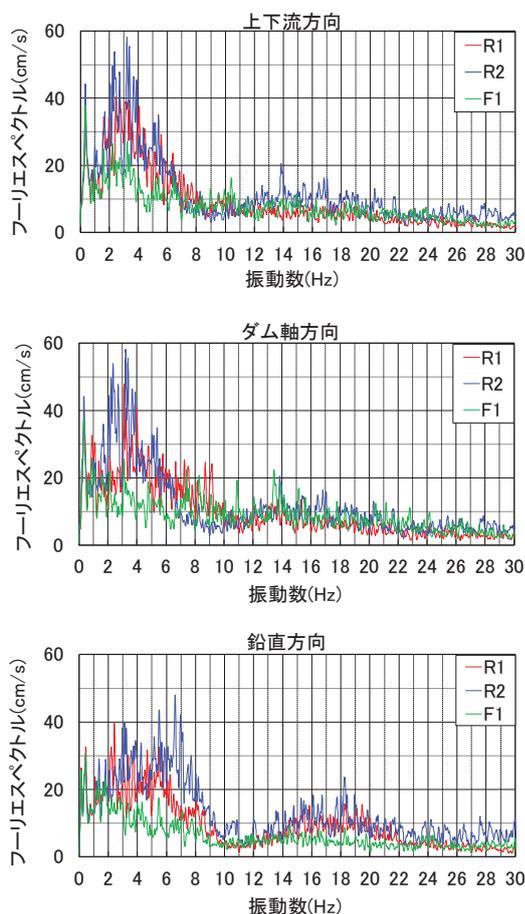


下流側開放基盤 (G1)

- ・下流解放基盤(G1)は、ダム底部(F2)に比較してダム堤体の震動の影響を受けていない。
- ・結果として、入力地震動の作成に比較的適用できる。
- ・下流解放基盤は転流工の出口から奥まったところに設置されており、ダム下流からダム高分はなされている。最低この離隔が必要と思われる。
- ・各方向とも、地震動③、④では1 Hz以下で振幅が大きくなっている。

15

7. 異なる観測点の地震動の相違点(十勝沖地震 本震)

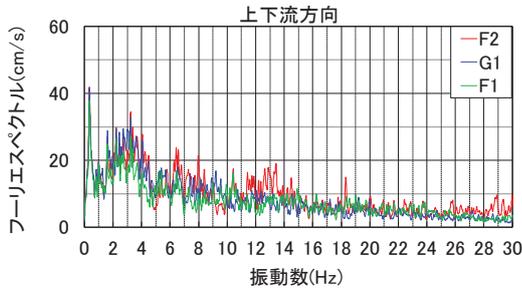


リムトンネル内の地山内部(R1, R2)と岩盤深部(F1)との比較

- ・10 Hz以下の低振動数では、R1、R2の振幅は大きくなっている。地山の震動の影響と考えられる。
- ・10 Hz以上では同程度であるものの、鉛直方向はR1、R2が大きくなっている。
- ・結果として、前述のとおりR1、R2は入力地震動として適当ではない。

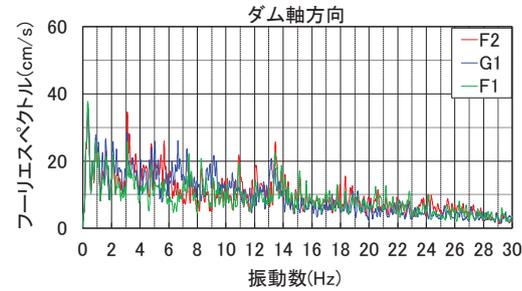
16

7. 異なる観測点の地震動の相違点(十勝沖地震 本震)

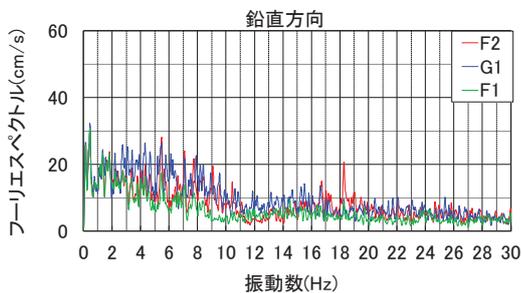


河床標高に相当するダム底部(F2)・下流解放基盤(G1) と岩盤深部(F1) との比較

・2 Hz～15 Hzでは、全体的にF2、G1のフーリエスペクトルの震幅は大きくなっている。



・入力地震動としては、ダム堤体・地山の影響を受けない、岩盤深部(F1)の記録が最適であるものの、このような事例を稀である。

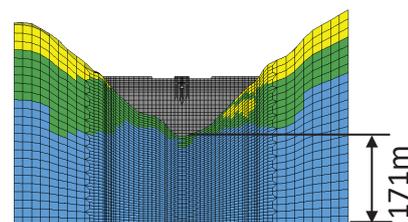
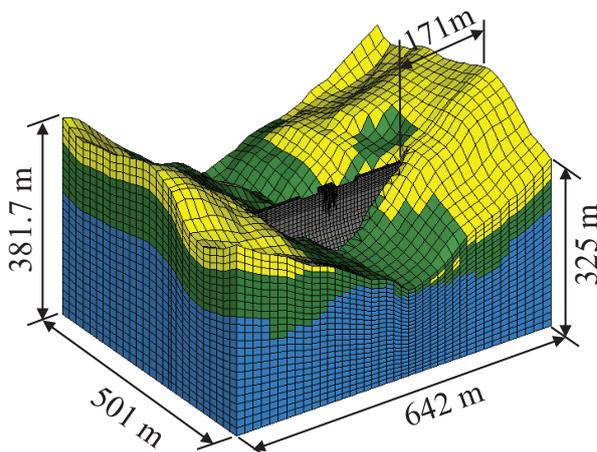


・現時点では、震動特性を理解したうえでダム底部(F2)の地震波を作成することが適当である。

河床位置(F2, G1)と岩盤深部(F1)

8. 再現解析による確認(十勝沖地震 本震)

区分	せん断弾性係数 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰定数
ダムコンクリート	13000	2.44	0.20	2%
基礎岩盤	C _M	2.74	0.28	5%
	C _H			2%
	B			1%

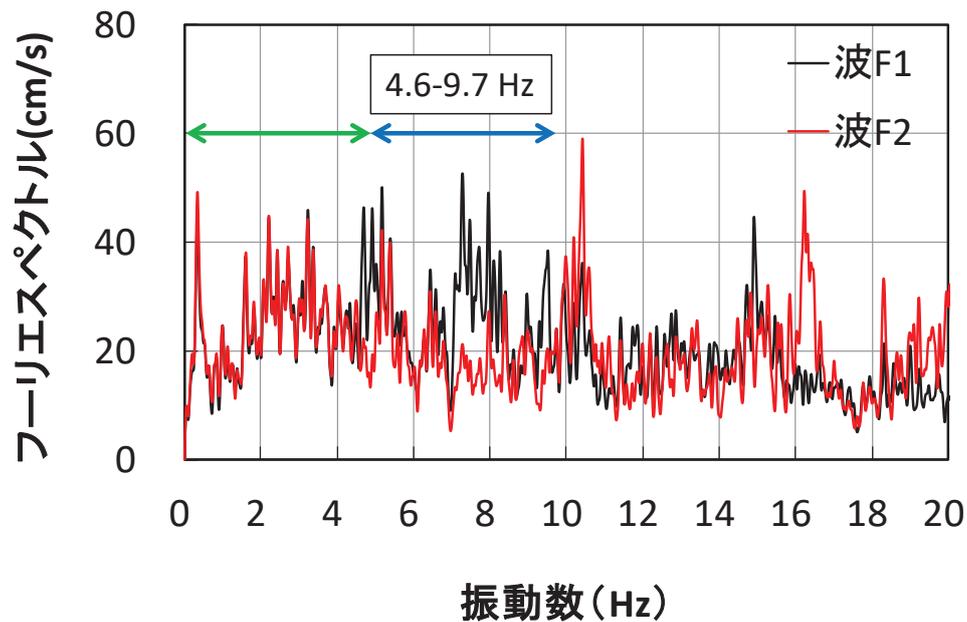


検討用解析モデル
報-19

8. 再現解析による確認(十勝沖地震 本震)

8.1 入力地震動の比較

下流解放基盤の物理定数が明確ではないため、F1とF2について比較する。

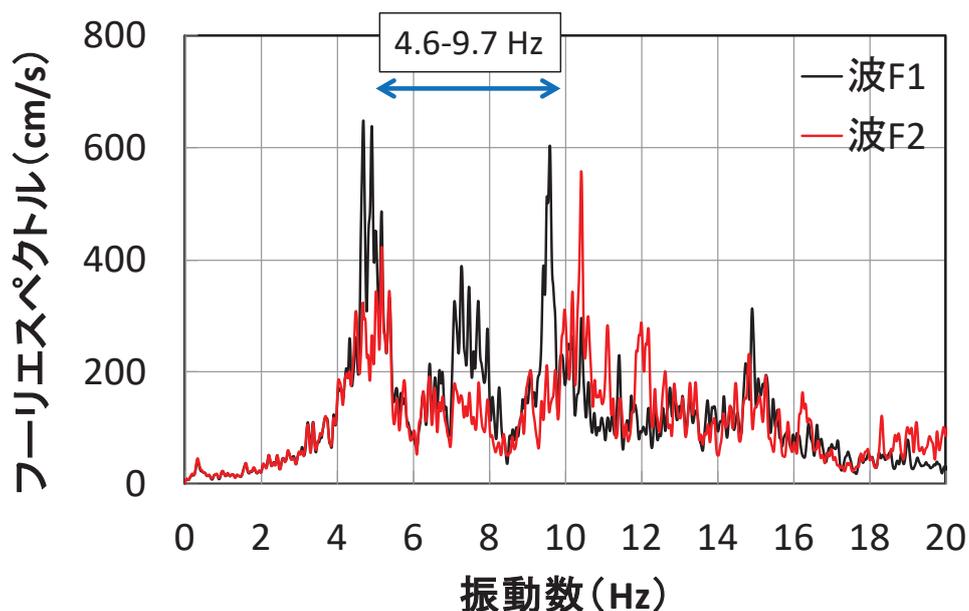


「波F1」；岩盤深部(F1)の地震記録を引き戻すことにより作成した波
「波F2」；ダム底部(F2)の地震記録を引き戻すことにより作成した波

19

8. 再現解析による確認(十勝沖地震 本震)

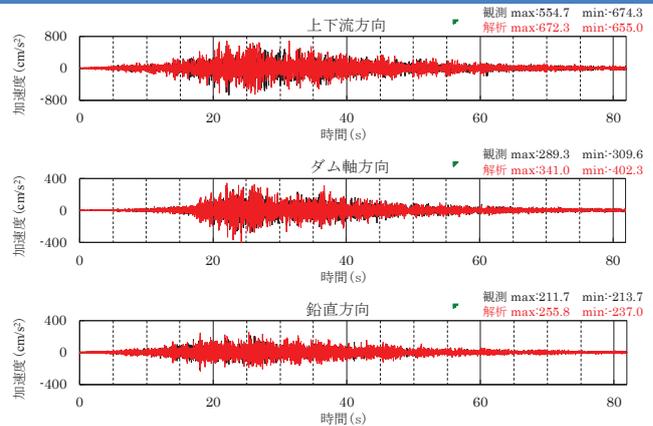
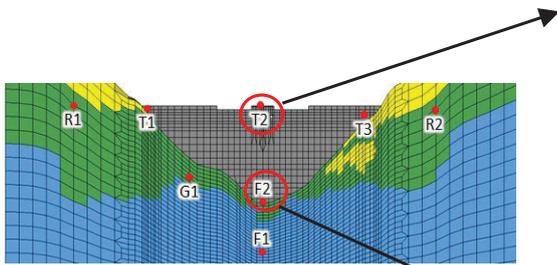
8.2 ダムの地震応答の比較



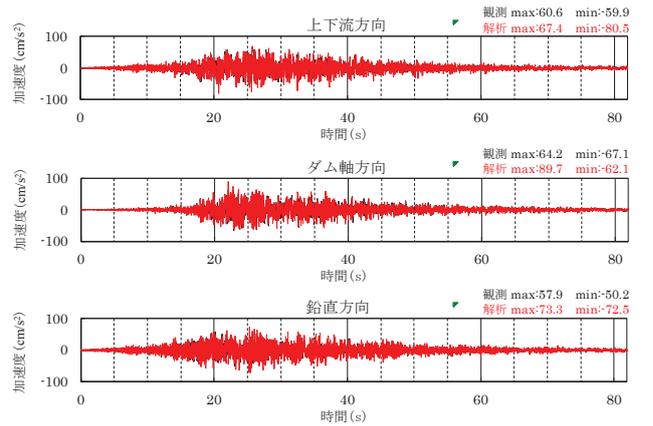
ダム天端中央 (T2) の加速度のフーリエスペクトルの比較

8. 再現解析による確認(+勝沖地震 本震)

8.3 (1) 加速度の比較



(a) 堤体天端部(T2)

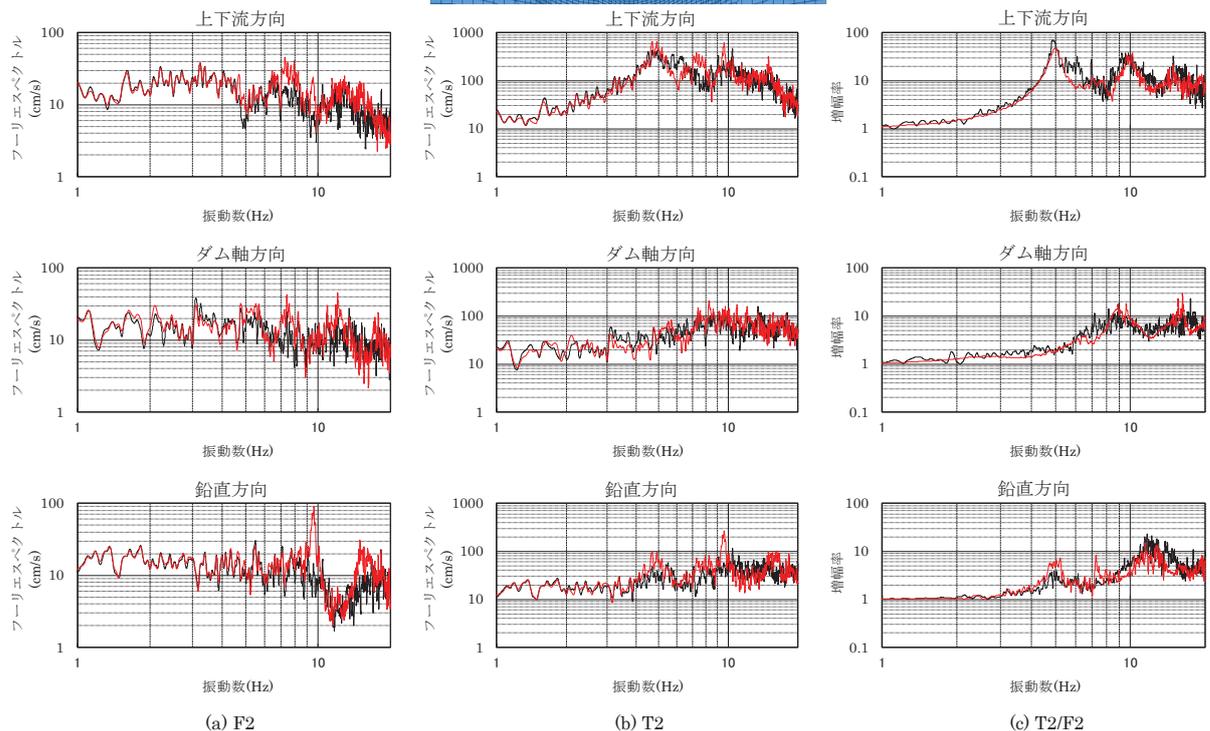
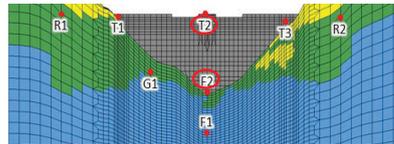


(b) 堤体基盤上部(F2)

「波F1」に対するダム天端と底部の加速度応答の比較

8. 再現解析による確認(+勝沖地震 本震)

8.3 (2) スペクトル及び伝達関数比較



波F1に対するダム天端中央(T2)と底部(F2)のフーリエスペクトル及び伝達関数の比較

9. まとめ

- ① ダム底部観測点の地震記録はダムの固有振動モードに対応する振動数成分が小さくなっており、この現象は各方向の地震記録に現れている。ダム底部の地震記録が入力地震動の原種波形として使用される場合、上記の特性には留意する必要がある。
- ② 札内川ダムでは、岩盤深部(ダム高の1/2倍の深さ)及び下流開放基盤(ダム高の約1倍の距離)の地震記録にはダムの地震時挙動の影響がわずかながら含まれていると見られるが、ダム底部と比べれば、その影響は遥かに小さい。
- ③ ダム底部(F2)よりも、岩盤深部(F1)の地震記録による入力地震動を用いることにより、良い再現性の地震応答が得られた。
- ④ 実務では、ダム底部の地震記録が適当である。
- ⑤ 今後は他の地震波に対しても上記傾向を確認する予定。
- ⑥ 下流解放基盤の物性値を何らかの方法で取得したい。

23

ご清聴、ありがとうございました。
また、当時の関係各位に御礼申し上げます。

