

宮城県沖の地震（2003年5月26日）における 農業用大ダムの地震時挙動

増川 晋*・中西憲雄**

目次

I 緒言	105	10 宿の沢ダム	124
II 地震及び地震動	106	11 保野川ダム	125
III 地震観測記録	107	12 松ヶ房ダム	126
IV 地震観測記録による地震時挙動	113	13 高の倉ダム	127
1 世増ダム	113	14 大柿ダム	127
2 大志田ダム	114	V ダムの地震時挙動	131
3 岩洞ダム	115	1 震央距離と最大加速度	131
4 山王海ダム	116	2 震央距離とスペクトル特性	133
5 葛丸ダム	118	3 ダム型式と最大加速度	134
6 相川ダム	120	VI 結言	136
7 千松ダム	121	参考文献	136
8 栗駒ダム	122	Summary	138
9 荒砥沢ダム	123		

I. 緒言

我が国において西暦600年代から2002年3月末までに完成した大ダムは2749個あり、そのうち農業用ダムおよび農業関連ダムは2081個を数え、大ダムのおよそ76%を占めている（財団法人日本ダム協会，2003）。

我が国は、環太平洋地震帯の中に位置し、世界の中でも極めて地震の発生が多い国である。平成7年（1995年）兵庫県南部地震を含め有史以来の被害地震は412回に及んでいる（国立天文台，2004）。2003年には震度6弱以上の観測が6回あり（宮城県沖の地震；2003年5月26日， M_j 7.0，宮城県北部の地震；2003年7月26日， M_j 6.4及び「平成15年（2003年）十勝沖地震」；2003年9月26日， M_j 8.0），2004年10月23日には震度7を初めて計測した「平成16年（2004年）新潟県中越地震」（ M_j 6.8（暫定値））が発生している。このような数多くの大地震において、大ダムが壊滅的被害を受けた例はない。しかし、マグニチュード6クラス（マグニチュード5.5以上）を越える地震ではなんらかの被害を受けていることから（例えば、増川，1999），ダムの地震時挙動を明ら

かにし、その安全性を確認することは重要な課題となっている。

ダムでの地震観測は地震時挙動を直接とらえる基本的な手段であり、地震時の安全管理と耐震設計の向上のために必要とされる。耐震性能照査における地震時外力として入力地震動は基本的な照査条件である。この入力地震動の合理的な選定のため土木構造物での質の良い地震観測記録はこれまで以上に貴重である。

本報告では、2003年5月26日18時24分頃に発生した宮城県沖の地震における農業用大ダムの地震観測記録の報告とこれらの観測記録を用いてダムの地震時挙動の把握を試みる。

本報告をまとめるにあたって、農林水産省東北農政局整備部設計課及び東北農政局管内のダム建設の農業水利事業所、青森県、岩手県、宮城県、山形県及び福島県のダムを管轄する事務所及び農村整備室、土地改良区等から貴重な地震観測記録の貸与及び種々の資料のご提供を頂いたことを記して感謝の意を表します。また、農林水産省農村振興局整備部設計課には、本報告をとりまとめる機会を頂きましたことを記して感謝の意を表します。

本報告における地震の諸元、各地の震度等は、気象庁HPの「地震解説資料」、「各地の震度」等を使用させて頂いた、ここに記して感謝致します。また、独立行政法人防災科学技術研究所の強震ネットワーク K-NET 及び基盤強震観測網 KiK-net の加速度記録を使用させて頂い

* 造構部施設機能研究室

** 造構部広域防災研究室

平成17年2月14日受理

キーワード：ダム・地震観測・地震時挙動・最大加速度

た、ここに記して感謝致します。さらに、地震観測装置に関して株式会社勝島製作所及びリオン株式会社から仕様等の資料を頂いた、ここに記して感謝致します。

II 地震及び地震動

2003年5月26日18時24分(震源時)、宮城県沖を震源とする気象庁マグニチュード M_j 7.0の地震が発生した。震央は、北緯38度48分、東経141度41分、震源の深さは71kmであり、東北地方の陸側のプレートの下に沈み込む太平洋プレートの内部(二重地震面の上面付近)で発生した逆断層型の地震であると考えられている。この付近で発生したプレート内地震では最大規模である。北海道から関東・中部・北陸及び近畿地方の広範囲において有感の震度1以上が観測され、兵庫県の豊岡市桜町及び奈良県の大和郡山市北郡山町* (*の市町村は地方公共団体の地震観測点、以下同様)の遠方においても震度1となった。本地震において津波は観測されなかった。本地震による最大震度である震度6弱は、岩手県の大船渡市大船渡町(南北方向572.7Gal, 東西方向1105.5Gal, 上下方向241.9Gal)、江刺市大通り*、衣川村古戸*、平泉町平泉*及び室根村役場*、宮城県の石巻市泉町(南北方向943.3Gal, 東西方向655.2Gal, 上下方向241.1Gal)、涌谷町新町、栗駒町岩ヶ崎、高清水町中町*、金成町沢辺*及び桃生町中津山*において計測された(Fig. 1)。東北地方で震度6弱を観測したのは1998年9月3日の岩手県内陸北部の地震(M_j 6.2)において岩手県雫石町長山にて観測して以来である。宮城県内において震度5弱以上を観測した最近の地震は、本地震と同一震央区分において発生した2002年11月3日の宮城県沖の地震(M_j 6.3)における震度5弱(桃生町中津山*など4観測点)である。本地震の地震活動は本震-余震型で推移し、最大の余震は5月27日0時44分に発生した M_j 4.9の地震で、最大震度4(宮城県気仙沼市)を観測した。余震は南北方向に約30km、深さ方向に約20kmの範囲に分布している(仙台管区気象台, 2003)。

2003年9月時点において、本地震による農地、農業用施設における主な被害は農地208ヶ所、農業用施設等433ヶ所が被災し、12億円の被害額になっており、岩手県496百万円、宮城県665百万円、秋田県42百万円等であった(農林水産省東北農政局整備部, 2003)。

本地震の震源域は、四半世紀前に発生した「1978年宮城県沖地震」(1978年(昭和53年)6月12日、北緯38.2度、東経142.2度、 M_j 7.4、深さ40km)の震源域の北西に位置しており、文部科学省地震調査研究推進本部(地震調査委員会)による2030年ころまでに98%の確率で発生すると想定している「1978年宮城県沖地震」の再現である宮城県沖地震の想定震源域より北北西に約80km離れており、Fig. 2に示すように「1978年宮城県沖地震」と深さや発震機構も異なっている(東京大学地震研究所

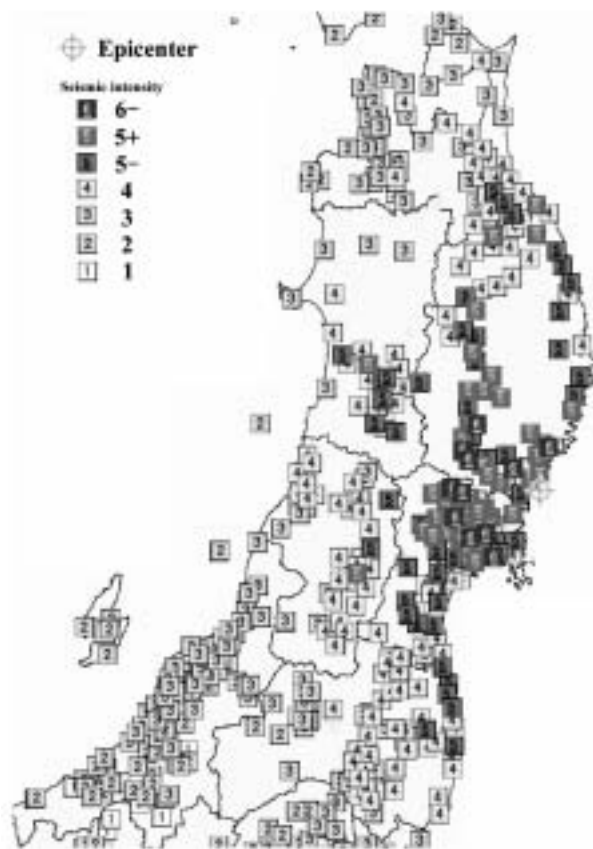


Fig.1 震度分布 (仙台管区気象台, 2003)
Seismic intensity distribution

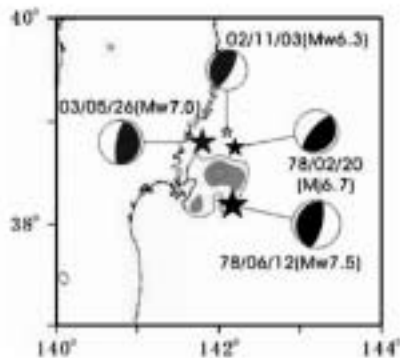


Fig.2 メカニズム情報 (東京大学地震研究所情報センター, 2003)
Earthquake mechanism information

情報センター, 2003)。このことから、地震調査委員会で98%の確率で発生すると想定している宮城県沖地震とは異なる地震と考えられると発表されている。また、将来に発生が想定されている宮城県沖地震の想定震源域及びその周辺の地震活動に、本地震に伴う変化は見られていない(文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2003)。

「1978年宮城県沖地震」において、農業水利施設に多大な被害が発生した。この地震ではFig. 3に示すように岩手県大船渡市、宮城県石巻市・仙台市、山形県新庄市、福島県福島市で震度Vを観測したほか、北海道帯広市、

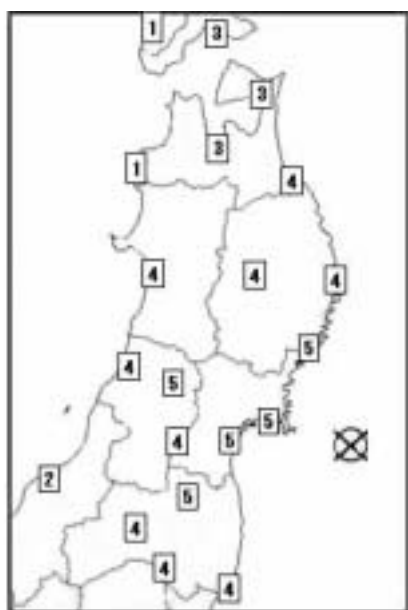


Fig.3 1978年宮城県沖地震の震度分布 (仙台管区気象台, 2003)
Seismic intensity distribution of the Miyagiken-oki Earthquake in 1978

青森県八戸市, 岩手県宮古市・盛岡市, 秋田県秋田市, 山形県酒田市・山形市, 福島県白河市・いわき市・会津若松市, 栃木県日光市・宇都宮市, 群馬県前橋市, 茨城県水戸市, 埼玉県熊谷市, 千葉県銚子市・千葉市・館山市, 東京都千代田区・伊豆大島町, 神奈川県横浜市で震度IVを観測するなど, 北海道から鳥根県にかけてのほぼ本州全域で有感となった (仙台管区気象台, 2003)。

この地震による農地・農業用施設の被害件数は, 2 621ヶ所, 被害額は126億円に達した。このうち, ため池, 頭首工, 水路, 道路, 機場, 橋梁, 海岸堤防の土地改良施設は847ヶ所, およそ59億円の復旧額であった。この地震により農業用大ダムは, 宿の沢ダム, 牛野ダム及び蛭沢ダムなどの5ダムにおいて被害が発生したが, 「1968年十勝沖地震」(1968年(昭和43年)5月16日, 北緯40.7度, 東経143.6度, M_j 7.9) におけるような決壊事故に至ったダムはない (農林水産省東北農政局, 1979)。また, この「1978年宮城県沖地震」は都市開発型の被害特徴を持つものとして注目され, 電気, ガス, 水道のライフラインの耐震性と防災がこの地震以降に重要視されるようになった。

III 地震観測記録

地震観測記録を収集した農業用大ダムは Table 1 に示すとおり東北農政局管内5県 (青森県, 岩手県, 宮城県, 山形県及び福島県) に存在する25ダムである。収集した地震観測記録は, 基本的に加速度波形記録を主体としたが, 震央から離れており, 基礎及び堤頂における最大加速度が25Galに達していない場合等には最大加速度値のみとした。Table 1 に収集した地震観測記録の種別を

Table 1 地震観測記録を収集した農業用大ダム
Dams of collected seismic observation records

	Name	Prefecture	Dam type	Height of dam (m)	Length of crest (m)	L/H	Seismic observation points	Type of record	
1	Shimizume (Sh)	Aomori	G	33.5	195.0	5.82	2	Maximum	
2	Yomasari (Yo)		G	52.0	247.0	4.75	2	Digital	
3	Ooshida (Os)	Iwate	G	63.7	165.0	2.59	2	Digital	
4	Itsukatai (Ic)		R	40.0	390.0	9.75	1	Maximum	
5	Arasawa2gou (Ar2)		R	45.5	246.6	5.42	3	Maximum	
6	Gandou (Ga)		R	40.0	351.0	8.78	2	Digital	
7	Sannoukai (Sa)		R	61.5	241.6	3.93	4	Digital	
8	Kuzumaru (Kuz)		R	51.7	220.0	4.26	3	Digital	
9	Koromogawa4gou (Ko4)		R	33.0	135.0	4.09	3	Maximum	
10	Aikawa (Ai)		R	40.3	168.0	4.17	2	Digital	
11	Senmatsu (Se)		G	26.8	111.0	4.14	1	Digital	
12	Kurikoma (Ku)		Miyagi	G	57.0	182.0	3.19	4	Digital
13	Aratozawa (Ar)			R	74.4	413.7	5.56	4	Digital
14	Shukunosawa (Sh)	E		26.0	227.7	8.76	1	Digital	
15	Honokawa (Ho)	R		41.4	223.0	5.39	2	Digital	
16	Namaigawa (Na)	Yamagata	R	47.8	313.7	6.56	4	Maximum	
17	Mizukubo (Mi)		R	62.0	205.0	3.31	3	Maximum	
18	Matsugabou (Ma)	Fukushima	R	46.0	242.5	5.27	2	Digital	
19	Tankanokura (Ta)		G	54.2	124.4	2.30	2	Digital	
20	Oogaki (Oo)		R	84.5	262.0	3.10	8	Digital	
21	Yamanoiri (Ya)		E	29.5	196.0	6.64	3	Maximum	
22	Kanezawa (Ka)		G	30.8	247.8	8.05	2	Maximum	
23	Ryuou (Ry)		G	31.0	138.3	4.46	2	Maximum	
24	Hatori (Ha)		E	36.8	169.5	4.61	1	Maximum	
25	Shinmiyagawa (Sm)		G	69.0	325.0	4.71	3	Maximum	

Dam type: R: rockfill, E: earthfill, G: gravity

「Maximum」(最大加速度値)及び「Digital」(加速度波形記録)として示した。Table 1 に示すとおり最大加速度値のみを収集したダムは11ダム, 加速度波形記録も収集したダムは14ダムである。なお, Table 1 の「Name」(ダム名称)の括弧書きはダムの略称として使用する。

地震観測記録を収集した25ダムと震央との位置関係を Fig. 4 に示す。25ダムは東北地方の太平洋岸に沿って震央を中心として震央から同じほどの距離に拡がり分布している。

なお, これらのダムは, 地震発生後に臨時安全点検を行っている。堤体への入力加速度や堤頂での応答加速度

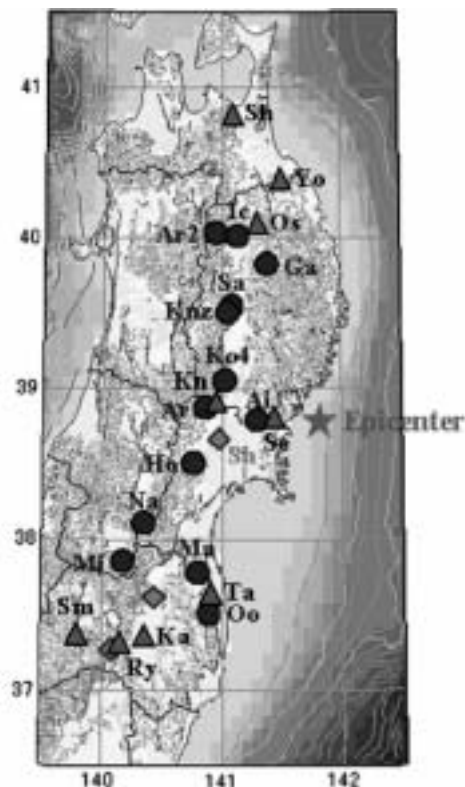


Fig.4 地震観測記録を収集した農業用大ダムの位置
Location of large dams for irrigation recorded seismic observation data

が300Galを越える加速度値を観測したダムがある。また、震央に近いダムにおいて堤頂の保護アスファルトのクラックや漏水量の一時的な増加が臨時点検で認められたが、緊急対応を必要とするのではなく、現在も供用中である。

「1978年宮城県沖地震」の発生時に東北地方で地震観測を実施していたダムは、小田川ダム（青森県）、山王海ダム（岩手県：Table 1の7番目の「Sannoukai(Sa)」ダムの嵩上げ前）、水窪ダム（山形県：Table 1の17番目の「Mizukubo(Mi)」ダムと同一）、千五沢ダム（福島県）及び深田ダム（福島県）の5ダムであった。このうち、千五沢ダムと深田ダムにおいて地震観測記録が得られた。千五沢ダムでは、基礎の観測点において12.5Gal（上下流方向）、堤頂の観測点において107Gal（上下流方向）（農林水産省東北農政局，1979）、深田ダムでは、基礎の観測点において35.0Gal（上下流方向）、堤頂の観測点において210.9Gal（上下流方向）の最大加速度値が記録されている（増川ら，2002）。「1978年宮城県沖地震」の発生時に記録が得られた千五沢ダム及び深田ダムにおいて今回の地震による地震観測記録は得られなかった。

最大加速度値のみを収集した11ダムにおいては、応答加速度増幅率及び上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を求めた。加速度波形記録を収集した14ダムにおいては、最大加速度値のみを収集した11ダムと同様に応答加速度増幅率及び上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係と、これらに加えてパワ・スペクトルを求め

た。なお、本報告で検討した応答加速度増幅率は、堤体の観測点における応答加速度の最大値を堤体への入力地震動の観測点と考慮しうる観測点における入力加速度の最大値で除した値（無次元量）である。応答加速度増幅率を用いて、入力地震動が堤体内を伝播する間に増幅される状況を検討した。上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係をj用いて、最大加速度の出現方向を含めて地震時の卓越した振動方向を検討した。また、複数のダムにおいて得られた加速度波形軌跡は、上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係において見いだされた地震時の卓越した振動方向をより明確に検討するためj用いた。パワ・スペクトルは、入力地震動の周波数成分が堤体内を伝播する間に増幅・減衰される状況を明らかにするためにj用いた。本報告では、これらの基礎的な処理方法を用いてダムの地震時挙動を検討した。パワ・スペクトルの計算に際しては、最大8192個までの記録を使用し、Hanning ウィンドウを用いて平滑化を行った（例えば、日野，1997）。

加速度波形記録を収集した14ダムにおける加速度波形の数値記録ファイルを巻末のCD-ROMに収録した。

各ダムで観測された最大加速度記録の表をTable 1で示したダム順に以下のTable 2～26に示す。以下のこれらの表において、最大加速度値のみを収集したダムにおいては応答加速度増幅率も示した。表中の左端の「crest」、「gallery」等の観測点欄の行の上段に記載した数値が最大加速度（Gal）、下段が応答加速度増幅率（無次元量）である。加速度波形記録を収集したダムでは最大加速度（Gal）のみを記載し、「IV 地震観測記録による地震時挙動」において応答加速度増幅率を付記した表を再掲している。また、表中の左端の観測点の「crest」の欄における括弧内の「H」は堤高である。

ダムにおいて3観測点以上における観測点の観測記録が得られている場合には、上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を図に示した。加速度波形記録を収集したダムでは、この関係の図を「IV 地震観測記録による地震時挙動」において示した。

清水目（Sh）ダムにおける最大加速度記録をTable 2に示す。

Table 2 清水目ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Shimizume dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H=33.5m)	22.7	20.4	12.1	123.8
	2.02	2.22	1.36	
Gallery	11.2	9.2	8.9	95.9
	1.00	1.00	1.00	

このTable 2から、2観測点においてともに上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりわずかに大きい。「crest」における加速度増幅率はダム軸方向が上下流方向よりわずかに大きい。

世増 (Yo) ダムにおける最大加速度記録を **Table 3** に示す。

Table 3 世増ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Yomasari dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H =52.0m)	-119.7	-92.8	47.8
Gallery	-24.1	18.7	17.2

大志田 (Os) ダムにおける最大加速度記録を **Table 4** に示す。

Table 4 大志田ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Ooshida dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H =63.7m)	-178.3	-85.4	35.2
Gallery	-29.7	20.7	23.6

世増 (Yo) ダム及び大志田 (Os) ダムの地震時挙動については、「IV 地震観測記録による地震時挙動」において詳細に検討している。

一方井 (Ic) ダムにおける最大加速度記録を **Table 5** に示す。

Table 5 一方井の最大加速度記録
Maximum acceleration records at Ichikatai dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H =40.0m)	-62	-88	47

この **Table 5** から、「crest」における観測記録のみであるが、ダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。

荒沢 2 号 (Ar2) ダムにおける最大加速度記録を **Table 6** に示す。

Table 6 荒沢 2 号ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Arasawa2gou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H =45.5m)	64	-71	-47	(533.5)
	2.13	2.03	2.61	
Foundation	-30	-35	-18	(488.0)
	1.00	1.00	1.00	
Abutment	47	33	-22	(533.5)
	1.57	0.94	1.22	

この **Table 6** から、「foundation」及び「crest」においてともにダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度よりわずかに大きい。「crest」における加速度増幅率は上下流方向及びダム軸方向ともにほぼ同じである。一方、「abutment」において堤体の観測点である「crest」と異なり、上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を **Fig. 5** に示す。この **Fig. 5** は、上下流方向の最大加速度を横軸、ダム軸方向の最大加速度を縦軸に与えている。図中の左下から右上への対角線上において上下流方向とダム軸方向の最大加速度が等しい。従って、この対角線より左に観測記録がプロットされるとダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きいことを現す。逆に、この対角線より右に観測記録がプロットされると上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きいことを現す。

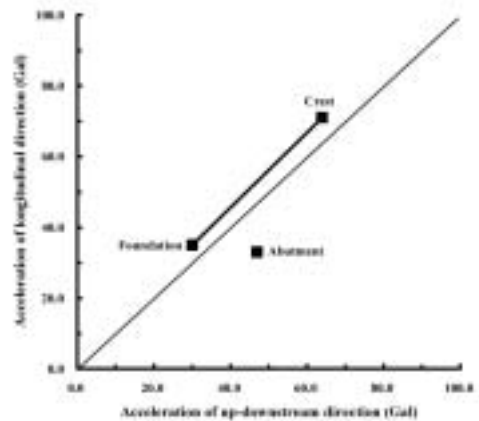


Fig.5 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この **Fig. 5** において、「foundation」と「crest」における観測記録のプロットを結んだ線が対角線にほぼ平行するため、「foundation」から「crest」への堤頂に向かって応答加速度は上下流方向及びダム軸方向のいずれの方向にも同程度に増幅している。

岩洞 (Ga) ダムにおける最大加速度記録を **Table 7** に示す。

Table 7 岩洞ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Gandou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H =40.0m)	208.7	141.9	67.7
Foundation	-71.4	59.3	-29.3

山王海 (Sa) ダムにおける最大加速度記録を **Table 8** に示す。

Table 8 山王海ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Sannoukai dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H =61.5m)	-234.1	211.5	164.6
1/2H core zone	107.4	-103.5	-99.9
Foundation	65.2	54.9	-43.4
Crest of old dam	209.7	-150.0	-99.8

葛丸 (Kuz) ダムにおける最大加速度記録を **Table 9** に示す。

Table 9 葛丸ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Kuzumaru dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H=51.7m)	-469.1	-310.9	-227.2
1/2H core zone	-174.2	124.0	-105.3
Foundation	-89.5	-53.0	-57.4

岩洞 (Ga) ダム, 山王海 (Sa) ダム及び葛丸 (Kuz) ダムの地震時挙動については、「Ⅳ 地震観測記録による地震時挙動」において詳細に検討している。

衣川4号 (Ko4) ダムにおける最大加速度記録を **Table 10** に示す。

Table 10 衣川4号ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Koromogawa4gou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H=33.0m)	-265	262	215	214.0
	1.98	2.11	1.75	
Foundation	-134	124	123	178.2
	1.00	1.00	1.00	
Left abutment	-89	-91	-73	214.0
	0.66	0.73	0.59	

この **Table 10** から、堤体への入力地震波の観測点と仮定できる「foundation」において最大加速度が 100Gal を越えており、地震観測記録を収集した 25 ダムの中で最も大きな入力加速度である。ダムの基礎地盤の観測点において、通常、鉛直方向の最大加速度は上下流・ダム軸方向の最大加速度に比較して 1/3 ~ 1/2 程度の加速度値を記録する。しかし、本ダムにおいて鉛直方向の最大加速度は上下流方向及びダム軸方向のいずれの方向の最大加速度とほぼ同じ大きさの加速度を記録している。本ダムは、震央からの距離が 74.5km と震央から離れており震央近傍に位置するダムではない。本ダムの所在する市町村では震度 6 弱を観測しており、比較的広範囲のサイトエフェクトにより地震動が増幅され、「foundation」においていずれの方向にも最大加速度が 100Gal を越えたと考えられる。入力加速度が 100Gal を越えるにもかかわらず、「crest」において最大加速度は 260Gal 程度を記録し、2 倍程度の加速度増幅率である。フィルダムの既往の知見では、加速度増幅率は、入力加速度が大きくなるに従い減少し、2 ~ 4 程度のほぼ一定値の増幅率に収束する非線形性を現す (増川ら, 2002)。本ダムにおいても、既往の知見と同様の現象が現れていると考えられる。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を **Fig. 6** に示す。

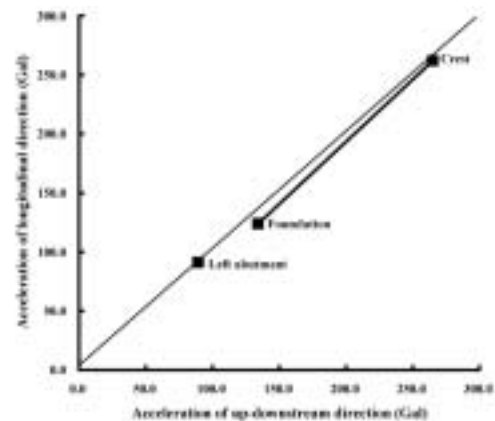


Fig.6 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この **Fig. 6** から、「foundation」及び「crest」の 2 観測点においてともに対角線に近接して観測記録がプロットされるため、上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じである。さらに、「foundation」と「crest」における観測記録のプロットを結んだ線分が対角線にほぼ平行するため、「foundation」から「crest」への堤頂に向かって応答加速度は上下流方向及びダム軸方向のいずれの方向にも同程度に増幅している。「left abutment」においても同様に対角線上に観測記録がプロットされる。従って、堤体・サイト形状や拘束条件が影響するような上下流・ダム軸方向による増幅特性の相違は現れていないと考えられる。

相川 (Ai) ダムにおける最大加速度記録を **Table 11** に示す。

Table 11 相川ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Aikawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H=40.3m)	-302.1	-343.0	289.2
Foundation	106.5	-125.5	85.3

千松 (Se) ダムにおける最大加速度記録を **Table 12** に示す。

Table 12 千松ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Senmatsu dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Upstream side of left abutment	302.2	-242.2	162.0

栗駒 (Ku) ダムにおける最大加速度記録を **Table 13** に示す。

Table 13 栗駒ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Kurikoma dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest right (H=57.0m)	-84.4	68.6	-61.3
Crest left	-73.2	87.0	-75.4
Gallery	45.1	55.0	-69.7
Right abutment	67.4	61.8	-62.2

荒砥沢 (Ar) ダムにおける最大加速度記録を **Table 14** に示す。

Table 14 荒砥沢ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Aratozawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H=74.4m)	-364.8	334.8	-220.1
2/3H core zone	145.3	-165.5	126.1
Foundation	-113.5	-89.9	67.1
Right abutment	229.2	224.7	-107.2

宿の沢 (Sh) ダムにおける最大加速度記録を **Table 15** に示す。

Table 15 宿の沢ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Shukunosawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H=26.0m)	282.4	260.7	-143.2

保野川 (Ho) ダムにおける最大加速度記録を **Table 16** に示す。

Table 16 保野川ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Honokawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H=41.4m)	187.3	166.5	-104.7
Foundation	-37.0	52.7	55.3

相川 (Ai) ダム, 千松 (Se) ダム, 栗駒 (Ku) ダム, 荒砥沢 (Ar) ダム, 宿の沢 (Sh) ダム及び保野川 (Ho) ダムの地震時挙動については、「IV 地震観測記録による地震時挙動」において詳細に検討している。

生居川 (Na) ダムにおける最大加速度記録を **Table 17** に示す。

Table 17 生居川ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Namaigawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H=47.8m)	60.1 3.78	46.7 2.85	20.8 1.91	(327.8)
Foundation	15.9 1.00	16.4 1.00	10.9 1.00	(280.0)
Right abutment	28.7 1.81	21.5 1.31	18.7 1.72	(327.8)
Left abutment	23.9 1.50	35.6 2.17	13.7 1.26	(327.8)

この **Table 17** から、「foundation」において上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じである。「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりも大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を **Fig. 7** に示す。

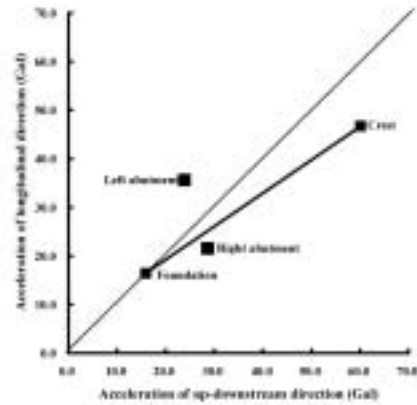


Fig.7 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この **Fig. 7** から、「foundation」において観測記録が対角線上にプロットされるため、上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じである。「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。従って、「foundation」から「crest」への堤頂に向かって応答加速度は、上下流方向に卓越して増幅される。地山 (abutment) においては、「right abutment」と「left abutment」と左右岸の地山の観測点において、対角線を挟んだ位置にそれぞれの観測点における観測記録がプロットされる。このため、最大加速度の大きな方向が異なり、左岸地山 (left abutment) と右岸地山 (right abutment) では増幅特性が異なると考えられる。

水窪 (Mi) ダムにおける最大加速度記録を **Table 18** に示す。

Table 18 水窪ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Mizukubo dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H=62.0m)	-42 4.20	32 3.56	22 3.14	(396.5)
Foundation	10 1.00	9 1.00	-7 1.00	(334.3)
Left abutment	-21 2.10	-31 3.44	17 2.43	(396.5)

この **Table 18** から、「foundation」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりもわずかに大きい。「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりも大きい。「left abutment」において、堤体の観測点である「crest」と異なりダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を **Fig. 8** に示す。この **Fig. 8** から、「foundation」及び「crest」の2観測点において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりも大きく、「foundation」から「crest」への堤頂に向かって応答加速度は上下流方向に卓越して

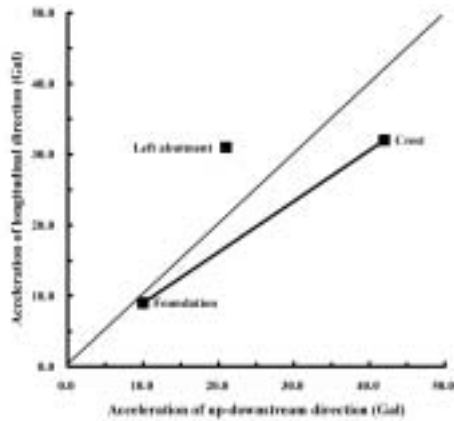


Fig.8 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

増幅される。「left abutment」において堤体とは逆にダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きくなっている。

松ヶ房 (Ma) ダムにおける最大加速度記録を Table 19 に示す。

Table 19 松ヶ房ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Matsugabou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H = 46.0m)	-70.8	104.4	-67.4
Foundation	-17.3	-20.7	-18.5

高の倉 (Ta) ダムにおける最大加速度記録を Table 20 に示す。

Table 20 高の倉ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Takonokura dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest (H = 54.2m)	69.5	41.5	-27.9
Gallery	-23.8	24.0	-20.3

大柿 (Oo) ダムにおける最大加速度記録を Table 21 に示す。

Table 21 大柿ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Oogaki dam

	Stream	Longitudinal	Vertical
Crest center (H = 84.5m)	-99.0	379.4	79.6
Crest 1/4L left	-129.1	-304.1	70.4
Crest left	-144.0	100.3	47.8
2/3H core zone	-47.1	-	25.9
Foundation	-16.3	25.9	10.8
1/3H left abutment	41.0	-30.8	23.1
Left abutment	-74.1	72.8	31.7
Right abutment	28.8	-47.8	30.5

松ヶ房 (Ma) ダム, 高の倉 (Ta) ダム及び大柿 (Oo) ダムの地震時挙動については、「Ⅳ 地震観測記録による地震時挙動」において詳細に検討している。

山の入 (Ya) ダムにおける最大加速度記録を Table 22 に示す。

Table 22 山の入ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Ymanoiri dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 29.5m)	-110 3.79	86 3.91	58 4.14	29.5 = height of dam
Foundation	29 1.00	22 1.00	14 1.00	0.0
Abutment	61 2.10	-34 1.55	20 1.43	29.5 = height of dam

この Table 22 から、「foundation」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりもわずかに大きい。「crest」及び「abutment」においても上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりも大きい。しかし、「crest」における加速度増幅率はダム軸方向が上下流方向より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 9 に示す。

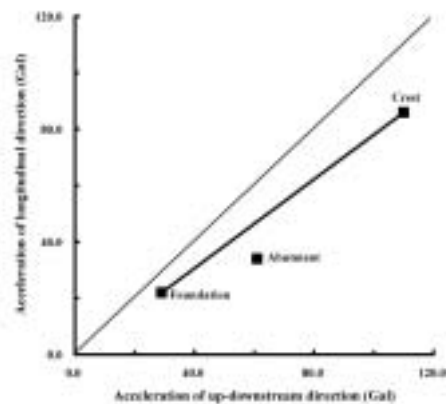


Fig.9 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 9 から, 3観測点いずれにおける観測記録も対角線より右にプロットされるため, 堤体及びダムサイトにおいて上下流方向に卓越した振動であったことがわかる。

金沢 (Ka) ダムにおける最大加速度記録を Table 23 に示す。

Table 23 金沢ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Kanazawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 30.8m)	-30 2.50	-25 1.56	-13 1.00	(313.3)
Gallery	12 1.00	-16 1.00	-13 1.00	(286.5)

この **Table 23** から, 「gallery」においてダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度よりわずかに大きく, 「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりわずかに大きい。このため, 「crest」における加速度増幅率は上下流方向がダム軸方向より大きい。従って, 「foundation」から「crest」への堤頂に向かって応答加速度は上下流方向に卓越して増幅されている。

龍生 (Ry) ダムにおける最大加速度記録を **Table 24** に示す。

Table 24 龍生ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Ryuou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 31.0m)	12.5	9.8	5.2	31.0 = height of dam
	1.39	1.07	1.04	
Gallery	9.0	9.2	5.0	0.0
	1.00	1.00	1.00	

この **Table 24** から, 「gallery」において上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じである。「crest」において, 加速度増幅率がダム軸方向より大きい上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。

羽鳥 (Ha) ダムにおける最大加速度記録を **Table 25** に示す。

Table 25 羽鳥ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Hatori dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Abutment	17.5	16.5	9.0	36.8 = height of dam

この **Table 25** から, 「abutment」における観測記録のみであるが, 上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じである。

最後に, 新宮川 (Sm) ダムにおける最大加速度記録を **Table 26** に示す。

Table 26 新宮川ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Shinmiyagawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 69.0m)	9	5	3	516.08
	1.80	1.25	1.50	
Gallery	5	4	2	459.0
	1.00	1.00	1.00	

この **Table 26** から, 観測された加速度値が小さいため, 各方向における最大加速度の差は優位な差であるのか明確ではない。

IV 地震観測記録による地震時挙動

1 世増ダム

Table 3 で示した最大加速度の表に応答加速度増幅率を付記し **Table 27** に示す。上段が最大加速度値 (Gal), 下段が応答加速度増幅率である。この表記は, 以後に記述するダムにおける最大加速度記録の表においても同様である。

Table 27 世増ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Yomasari dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 52.0m)	-119.7	-92.8	47.8	115.0
	4.97	4.96	2.78	
Gallery	-24.1	18.7	17.2	72.0
	1.00	1.00	1.00	

この **Table 27** から, 2観測点においてともに, 上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。加速度増幅率は上下流方向及びダム軸方向ともほぼ5倍であり, 堤体・サイト形状や拘束条件が影響するような上下流・ダム軸方向による増幅特性の相違は現れないと考えられる。堤体への入力地震動を観測している観測点と仮定できる「gallery」において最大加速度は20Gal前後と小さいが, 加速度増幅率はこのように5倍と比較的大きい。フィルダムの既往の知見では, 入力加速度が小さい場合に加速度増幅率は大きな値を示し, 入力加速度が大きくなるに従い増幅率は減少し, 2~4程度のほぼ一定値の増幅率に収束する非線形性を現す (増川ら, 2002)。本ダムのダム型式である重力式コンクリートダムにおいて, 入力加速度に対する加速度増幅率がフィルダムで現れるような非線形性を有しているのか今後データを蓄積し明らかにする必要がある。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を **Fig. 10** に示す。

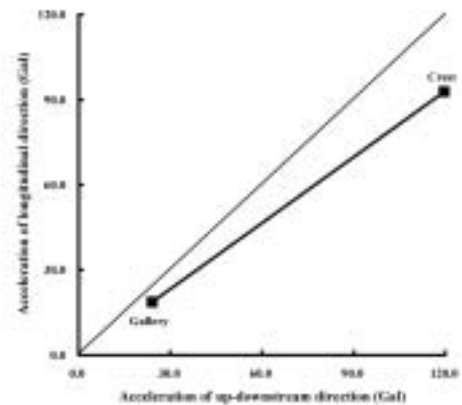


Fig.10 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この **Fig. 10** から, 2観測点においてともに, 上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。

2観測点におけるパワ・スペクトルを **Figs. 11** 及び **12** に示す。

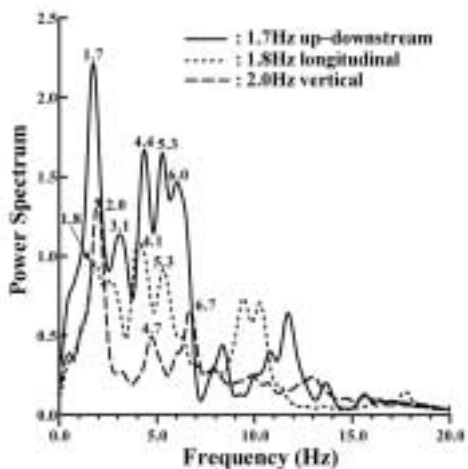


Fig.11 「gallery」のパワ・スペクトル
Power spectrum at gallery

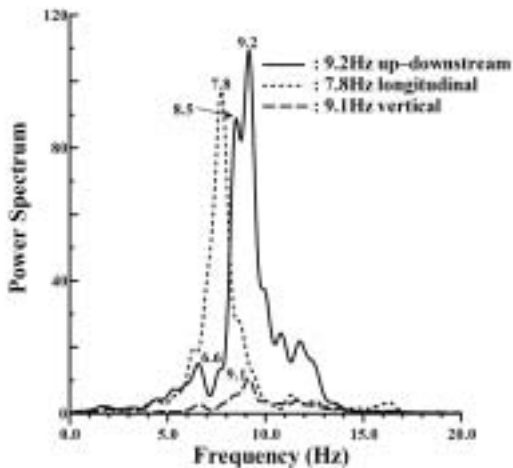


Fig.12 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

これらの **Figs. 11** 及び **12** から、「gallery」において7Hz以下の低い周波数領域に周波数成分が現れるが、「crest」において特定の周波数に卓越したピークが現れる。「gallery」における低い周波数領域から「crest」における卓越したピークが現れた高い周波数領域に周波数特性が移行する。**Fig. 12** から、「crest」における卓越したピークの周波数は上下流方向、ダム軸方向においてそれぞれ9.2Hz、7.8Hzと既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2～5Hzの周波数に比較して高い周波数である。ダム型式が重力式コンクリートダムであることから、堤体の剛性がフィルダムに比較し極めて高いため、フィルダムの共振周波数に比較して高い周波数領域に共振周波数が現れると考えられる。

2 大志田ダム

Table 4 に応答加速度増幅率を付記し **Table 28** に示す。

Table 28 大志田ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Ooshida dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 63.7m)	-178.3 6.01	-85.4 4.13	35.2 1.49	392.7
Gallery	-29.7 1.00	20.7 1.00	23.6 1.00	338.2

この **Table 28** から、「gallery」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりわずかに大きい。鉛直方向の最大加速度が他の二方向と同程度の大きさである。「crest」において上下流方向の最大加速度と加速度増幅率がダム軸方向の最大加速度と増幅率よりともに大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を **Fig. 13** に示す。この **Fig. 13** から、「gallery」に対して「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より極めて大きくなっている。

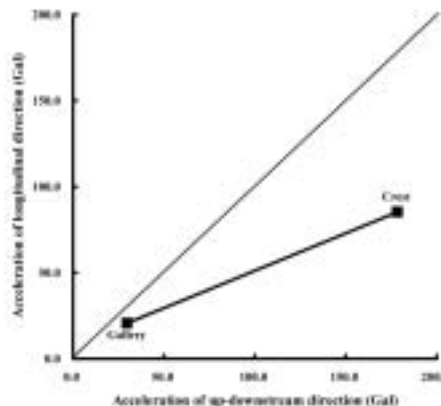


Fig.13 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

「gallery」及び「crest」の2観測点におけるパワ・スペクトル **Figs. 14** 及び **15** に示す。

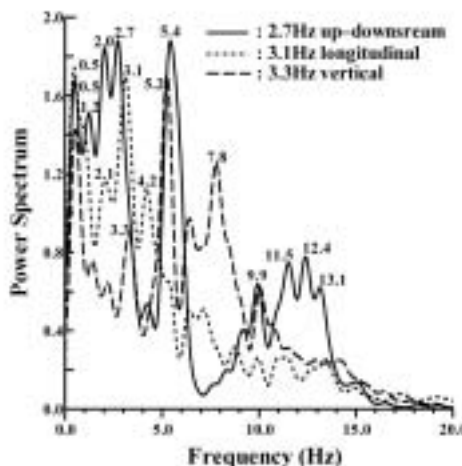


Fig.14 「gallery」のパワ・スペクトル
Power spectrum at gallery

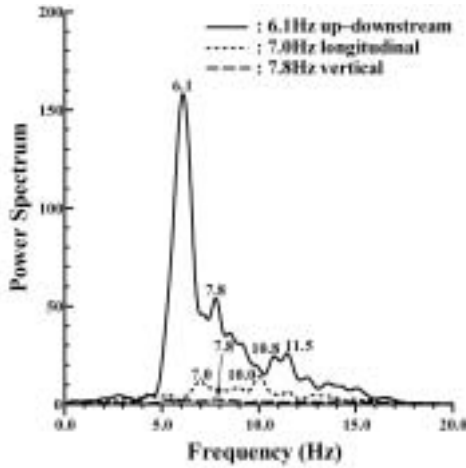


Fig.15 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

これらの Figs. 14 及び 15 から, 「gallery」において上下流方向及びダム軸方向ともに6Hz以下の低い周波数領域に周波数成分が現れる。「crest」において上下流方向はダム軸方向よりピーク値の大きな卓越したピークが現れるのは, 「crest」において上下流方向の振動が卓越したためと考えられる。「gallery」において周波数成分が現れる周波数領域は, 「crest」において周波数成分が現れる周波数領域より高い周波数領域にまで及んでいるが, 「crest」において高い周波数領域に周波数特性が移行する。Fig. 15 から, 「crest」における卓越したピークの周波数は上下流方向, ダム軸方向においてそれぞれ6.1Hz, 7.0Hzと既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2~5Hzの周波数に比較して高い周波数である。同一のダム型式の重力式コンクリートダムである前述の世増 (Yo) ダムの周波数特性と同様に, 堤体の剛性がフィルダムに比較し極めて高いため, フィルダムの共振周波数に比較して高い周波数領域に共振周波数が現れると考えられる。

3 岩洞ダム

Table 7 に応答加速度増幅率を付記し Table 29 に示す。

Table 29 岩洞ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Gandou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 40.0m)	208.7	141.9	67.7	(700.5)
	2.92	2.39	2.31	
Foundation	-71.4	59.3	-29.3	(660.5)
	1.00	1.00	1.00	

この Table 29 から, 「foundation」及び「crest」の2観測点のいずれにおいても上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりも大きい。また, 「crest」における上下流方向の加速度増幅率はダム軸方向の加速度増幅率よりわずかに大きく, ダム軸方向及び鉛直方向の加速度増幅率は同程度の大きさである。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 16 に示す。

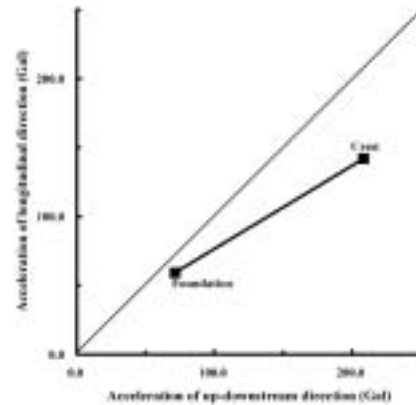


Fig.16 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 16 から, 2観測点においてともに上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。さらに, 「foundation」に対して「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より極めて大きい。本ダムは堤高に対する堤頂長の比である L/H が8.78と大きい。この L/H が大きい堤体形状によって上下流方向の拘束が小さいため, 堤頂に向かって上下流方向の応答加速度が卓越して増幅したと考えられる。

「foundation」及び「crest」の2観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 17 及び 18 に示す。これらの Figs. 17 及び 18 から, 「foundation」において4~7Hz付近の低い周波数領域に周波数成分が現れるが, 「crest」においてさらに低い2~5Hz以下の周波数領域に卓越したピークが現れる。「crest」において上下流方向及びダム軸方向ともに周波数特性が類似し, 卓越したピークの周波数がほぼ一致する。さらに, 「crest」において, 既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2~5Hzの周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れている。

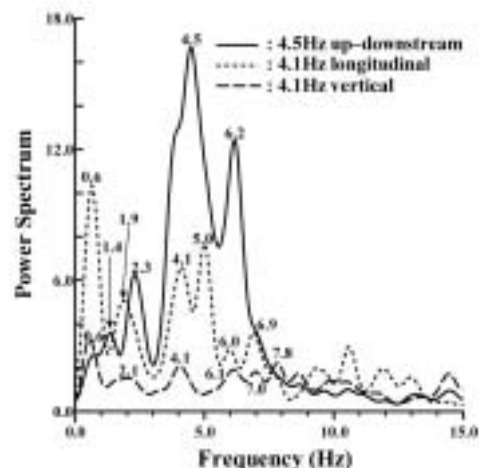


Fig.17 「foundation」のパワ・スペクトル
Power spectrum at foundation

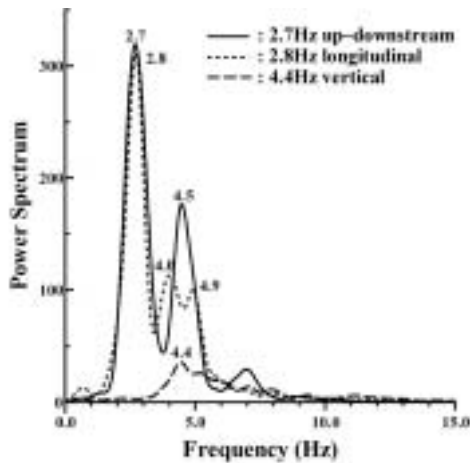


Fig.18 「crest」のパワースペクトル
Power spectrum at crest

4 山王海ダム

Table 8 に応答加速度増幅率を付記し Table 30 に示す。

Table 30 山王海ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Sannoukai dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 61.5m)	-234.1	211.5	164.6	307.5
	3.59	3.85	3.80	
1/2H core zone	107.4	-103.5	-99.9	276.0
	1.65	1.89	2.30	
Foundation	65.2	54.9	-43.4	242.0
	1.00	1.00	1.00	
Crest of old dam	209.7	-150.0	-99.8	276.9
	3.22	2.73	2.30	

この Table 30 から、「foundation」(嵩上げ新堤体の基礎)及び「crest」(嵩上げ新堤体の堤頂)において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりわずかに大きい。「1/2H core zone」(嵩上げ新堤体のコアゾーン内の堤高の1/2の標高)において上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度がほぼ同じである。「crest of old dam」(旧堤体の堤頂部を掘削除去したバーム状の平面)において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。「foundation」及び「crest」において加速度増幅率は、最大加速度に関して上下流方向がダム軸方向より大きい現象と逆にダム軸方向が上下流方向より大きい。「1/2H core zone」よりわずかに標高の高い「crest of old dam」において最大加速度は「1/2H core zone」における最大加速度より大きい。「1/2H core zone」は堤体内の観測点のため、拘束が大きく応答加速度の増幅が小さいと考えられる。また、旧堤体の築堤材料は嵩上げ新堤体の築堤材料に比較して密度や強度が小さいため(都築慶剛, 2002), 旧堤体において振動が嵩上げ新堤体よりも増幅されると考えられる。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 19 に示す。この Fig. 19 から、「crest of old dam」において、嵩上げ新堤体の2観測点(「1/2H core zone」及び「crest」)

における上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりわずかに大きい状態と異なり、上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。嵩上げ新堤体の「foundation」, 「1/2H core zone」, 「crest」の順に堤頂に向かって観測記録は対角線にほぼ沿ってプロットされるため、堤体・サイト形状や拘束条件が影響するような上下流・ダム軸方向による増幅特性の相違はあまり現れないと考えられる。

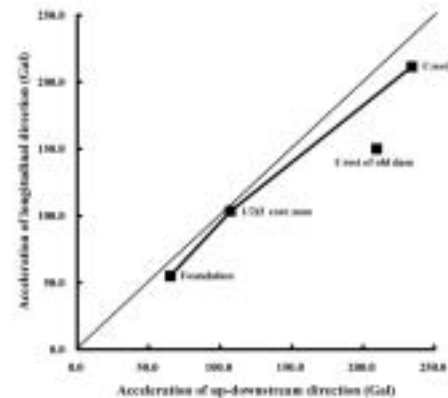


Fig.19 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

堤体内での加速度増幅特性を Fig. 20 に示す。

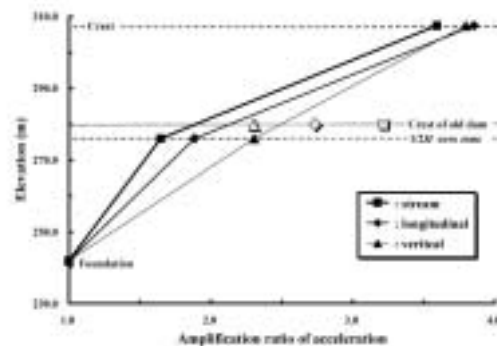


Fig.20 標高と加速度増幅率の関係
Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations

この Fig. 20 から、「1/2H core zone」は堤体内の観測点のため、拘束が大きいと考えられるため、いずれの方向にも加速度増幅率が小さい。「crest」は「1/2H core zone」に比較して拘束が小さいと考えられ、応答加速度が増幅されやすく、「1/2H core zone」から「crest」への堤頂に向かって上下流方向及びダム軸方向の応答加速度が増加する増幅特性を示す。「crest of old dam」において「1/2H core zone」における加速度増幅値より大きい。「crest of old dam」は密度や強度が小さい旧堤体の堤頂部を掘削除去したバーム状の広い平面上に位置することと、堤体内部の「1/2H core zone」に比べ拘束が小さいため、応答加速度が増幅されやすいと考えられる。「crest of old dam」において拘束が最も小さいと考えられる上下流方向の加

速度増幅率は、「crest」の加速度増幅率に迫るほど大きい。従って、旧堤体は嵩上げ新堤体と比較して加速度増幅が大きく、旧堤体の上流斜面は嵩上げ新堤体の上流斜面より大きく振動する可能性が考えられる。

各観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 21 ~ 24 に示す。

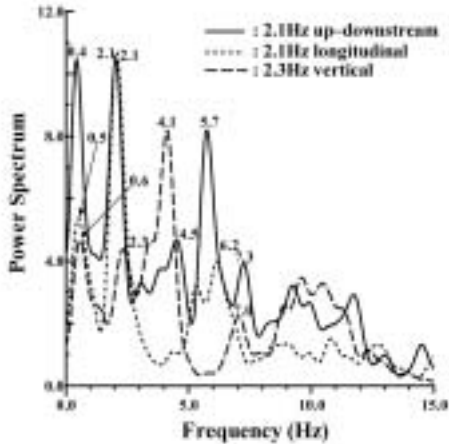


Fig.21 「foundation」のパワ・スペクトル
Power spectrum at foundation

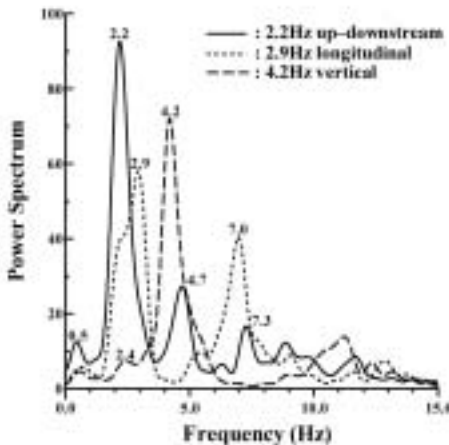


Fig.22 「1/2H core zone」のパワ・スペクトル
Power spectrum at 1/2H core zone

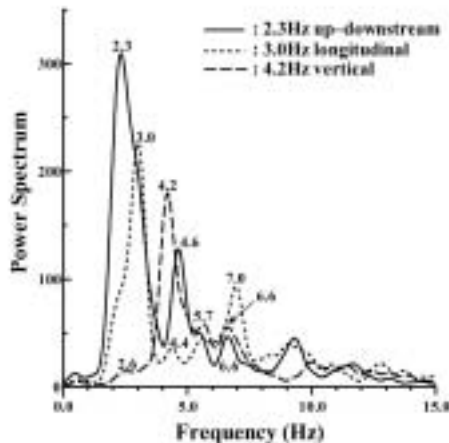


Fig.23 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

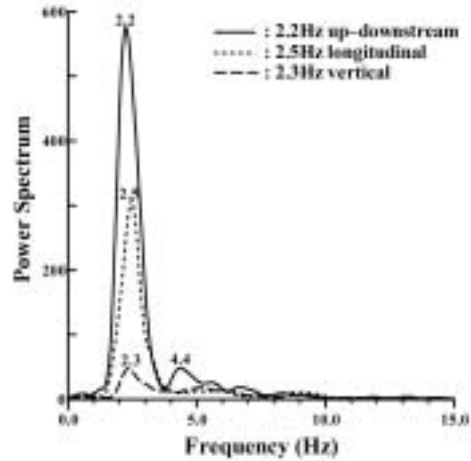


Fig.24 「crest of old dam」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest of old dam

これらの Figs. 21 ~ 24 から、「foundation」, 「1/2H core zone」, 「crest」の順に堤頂に向かうに従い、広い範囲の周波数領域の周波数成分から低い周波数領域において卓越したピークが現れる周波数成分に変化する。「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる 2 ~ 5Hz の周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。Fig. 24 から、「crest of old dam」において、卓越したピークが顕著であり、「crest」に比べて高い周波数領域に周波数成分が現れない。この結果は、前述のように旧堤体の築堤材料は嵩上げ新堤体の築堤材料と比較して密度や強度が小さいため (都築慶剛, 2002), 低次の共振周波数が現れると考えられる。

各観測点における水平面内における加速度波形の軌跡を Figs. 25 ~ 28 に示す。これらの図は、横軸がダム軸方向の加速度を示し、図の右側が左岸、左側が右岸、縦軸が上下流方向の加速度を示し、図の上側が上流、下側が下流となる。縦軸及び横軸のスケールは図毎に同一としている。Table 30 や Fig. 19 に示したように最大加速度をパラメータとした場合、振動現象の一時点のみに注目して振動特性を検討していることになるが、加速度波形の軌跡においては振動現象全体に着目して振動特性を検討できる。

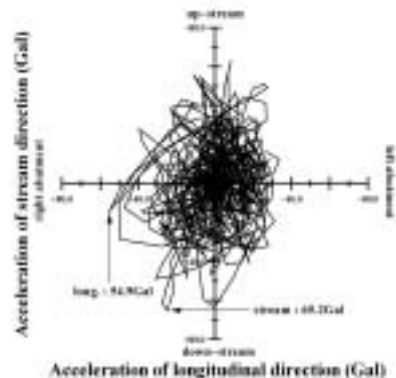


Fig.25 「foundation」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at foundation

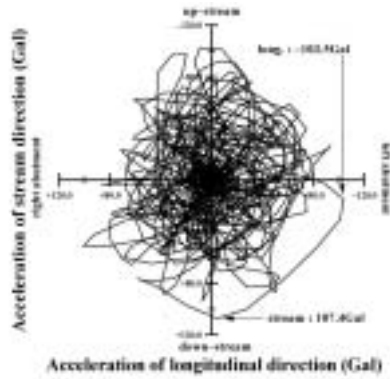


Fig.26 「1/2H core zone」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at 1/2H core zone

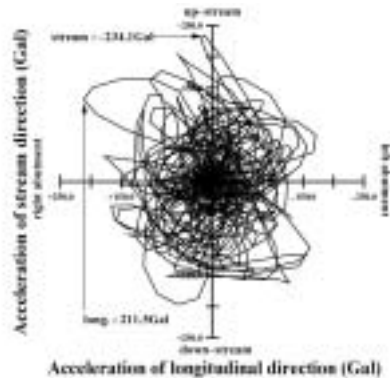


Fig.27 「crest」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at crest

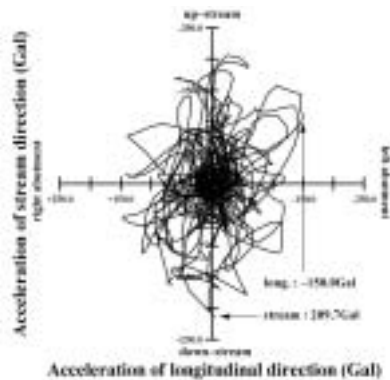


Fig.28 「crest of old dam」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at crest of old dam

これらの Figs. 25 ~ 28 から、「foundation」における軌跡は、上下流方向へ長い楕円状であり、上下流方向の振動が卓越した振動である。「1/2H core zone」及び「crest」における軌跡は、ほぼ円形に近い形状であり、上下流・ダム軸方向いずれの方向にも均等な振動である。「crest of old dam」における軌跡は、「foundation」における軌跡と同様に上下流方向へ長い楕円状であり、上下流方向の振動が卓越する。振動現象の一時点のみに着目した上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を示した Fig. 19 から得られた振動の特徴と加速度波形の軌跡の形状から得られた振動の特徴は一致する。

5 葛丸ダム

Table 9 に応答加速度増幅率を付記し Table 31 に示す。

Table 31 葛丸ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Kuzumaru dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 51.7m)	-469.1 5.24	-310.9 5.87	-227.2 3.96	274.1
1/2H core zone	-174.2 1.95	124.0 2.34	-105.3 1.84	248.0
Foundation	-89.5 1.00	-53.0 1.00	-57.4 1.00	217.9

この Table 31 から、「crest」における上下流方向において 469.1Gal の極めて大きな最大加速度を記録した。「foundation」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく、堤体への入力加速度自体が上下流方向に卓越した地震動である。このため、「crest」においても上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。しかし、「foundation」から「1/2H core zone」及び「1/2H core zone」から「crest」への堤体内における加速度増幅率は、「1/2H core zone」においてダム軸方向が上下流方向より大きく、「crest」においてもダム軸方向が上下流方向より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 29 に示す。

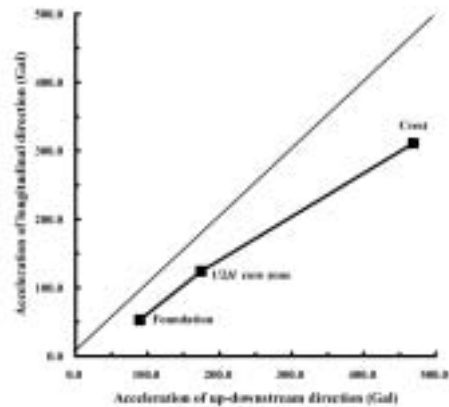


Fig.29 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 29 から、3観測点においてともに上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく、「foundation」、「1/2H core zone」、「crest」の順に堤頂に向かうに従い上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より少しずつ大きくなる。

堤体内での加速度増幅特性を Fig. 30 に示す。この Fig. 30 から、ダム軸方向の加速度増幅率が上下流方向の増幅率より大きい。「foundation」から「1/2H core zone」までの増幅率より「1/2H core zone」から「crest」までの増幅率の方が大きく、「1/2H core zone」から「crest」の間において応答加速度は急激に増幅されている。

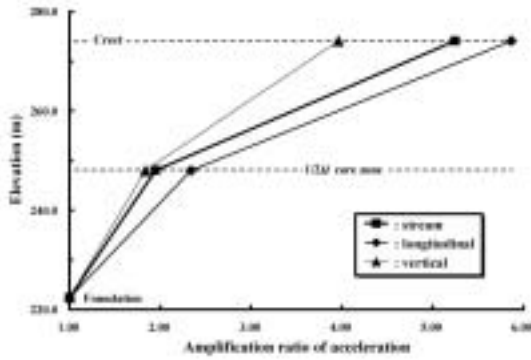


Fig.30 標高と加速度増幅率の関係

Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations

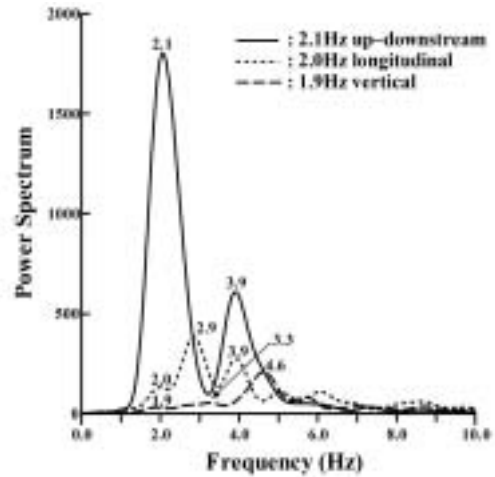


Fig.33 「crest」のパワ・スペクトル

Power spectrum at crest

各観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 31 ~ 33 に示す。

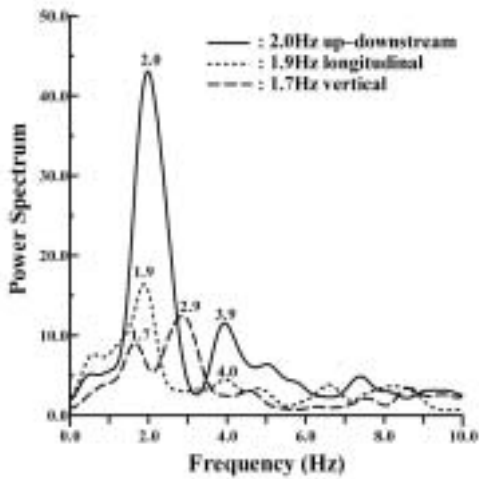


Fig.31 「foundation」のパワ・スペクトル

Power spectrum at foundation

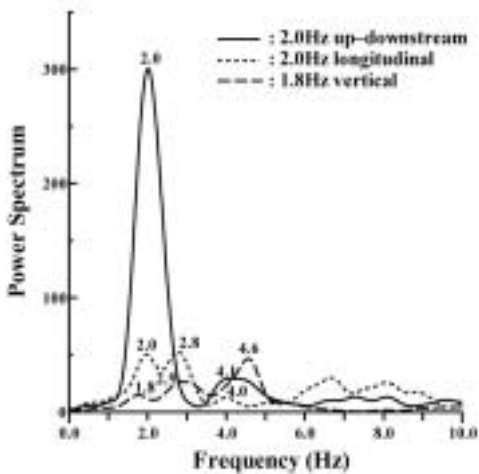


Fig.32 「1/2H core zone」のパワ・スペクトル

Power spectrum at 1/2H core zone

領域に周波数成分が現れ、各観測点においておよそ2Hzに卓越したピークが現れる。ダム軸方向及び鉛直方向ともに上下流方向と同様に低い周波数領域に周波数成分が現れる。しかし、上下流方向において現れる卓越したピークは現れない。「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2~5Hzの周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

各観測点における水平面内における加速度波形の軌跡を Figs. 34 ~ 36 に示す。これらの Figs. 34 ~ 36 から、「foundation」における軌跡は、上下流方向へ長い楕円状であり、上下流方向の振動が卓越した振動である。「1/2H core zone」における軌跡は、「foundation」における軌跡と同様に上下流方向が卓越した振動である。「crest」における軌跡は、「foundation」及び「1/2H core zone」よりも上下流方向へさらに扁平な楕円状であり、上下流方向の振動が卓越する。上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係の Fig. 29 において、堤頂に向かうに従い上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より少しずつ大きくなる増幅特性の結果と一致する。

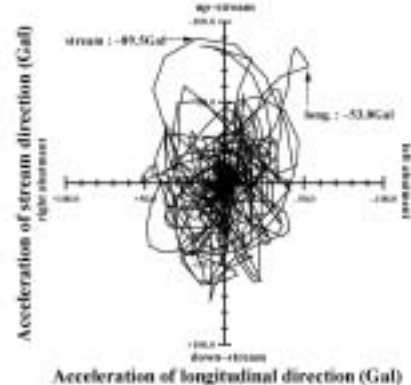


Fig.34 「foundation」の加速度波形の軌跡

Locus of accelerations at foundation

これらの Figs. 31 ~ 33 から、各観測点において類似した周波数特性が現れる。上下流方向において低い周波数

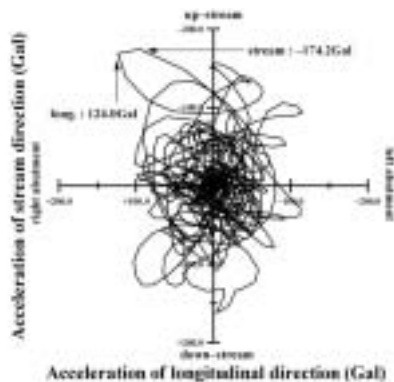


Fig.35 「1/2H core zone」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at 1/2H core zone

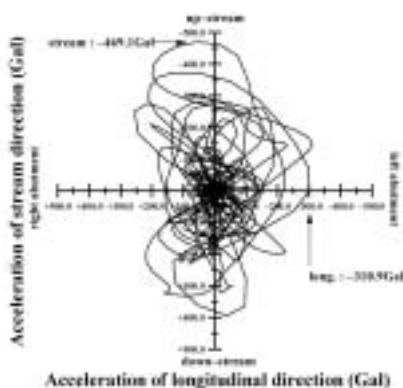


Fig.36 「crest」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at crest

6 相川ダム

Table 11 に応答加速度増幅率を付記し Table 32 に示す。

Table 32 相川ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Aikawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 40.3m)	-302.1	-343.0	289.2	98.5
	2.84	2.73	3.39	
Foundation	106.5	-125.5	85.3	55.5
	1.00	1.00	1.00	

この Table 32 から、2 観測点においてともにダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。「foundation」において鉛直方向の最大加速度は水平面内の 2 方向に迫る加速度を記録した。ダムの基礎地盤の観測点において、通常、鉛直方向の最大加速度は上下流・ダム軸方向の最大加速度に比較して 1/3 ~ 1/2 程度の加速度値を記録する。鉛直方向の最大加速度が水平面内の 2 方向の加速度に匹敵する現象は、本ダムが震央に近い位置（震央距離 44.6km）である特徴と考えられる。「crest」における加速度増幅率はダム軸方向が上下流方向よりわずかに小さい。鉛直方向の加速度増幅率が 3 方向の中で最も大きい。いずれの方向の加速度増幅率も 3 前後である。フィルダムの既往の知見では、加速度増幅率は、入力加速度が大きくなるに従い減少し、2 ~ 4 程度

のほぼ一定値の増幅率に収束する非線形性を現す（増川ら、2002）。本ダムにおいても既往の知見と同様の現象が現れていると考えられる。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 37 に示す。この Fig. 37 から、2 観測点においてともにダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度よりわずかに大きい。「crest」において、「foundation」における最大加速度がダム軸方向より上下流方向が大きい関係よりさらにダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。このため、堤体及びダムサイトにおいてダム軸方向に卓越した振動であると考えられる。

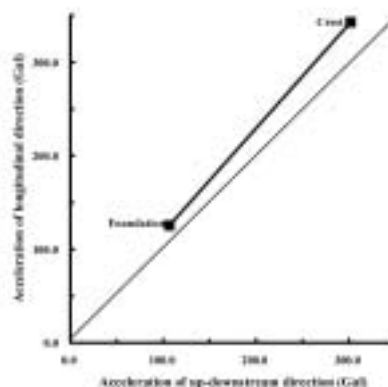


Fig.37 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

2 各観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 38 及び 39 に示す。これらの Figs. 38 及び 39 から、「foundation」において広い範囲の周波数領域に周波数成分が現れる。「crest」において 10Hz 以下の周波数領域において卓越した周波数成分が現れ、上下流方向及びダム軸方向において低い周波数に卓越したピークが現れる。宮城県沖の地震は短周期が顕著な地震波であることが報告されている（社地盤工学会 2003 年三陸南地震および宮城県北部地震災害調査委員会、2003）。本ダムは、前述のように震央に近く、地震動の伝播距離が短いため、高い周波数の地

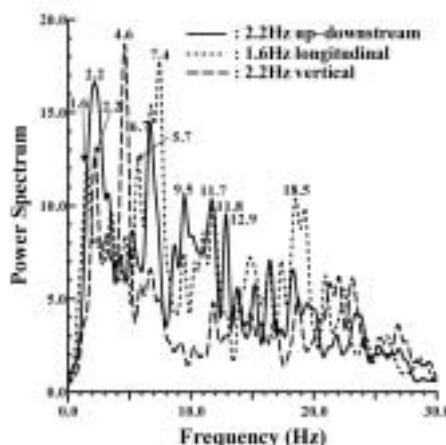


Fig.38 「foundation」のパワ・スペクトル
Power spectrum at foundation

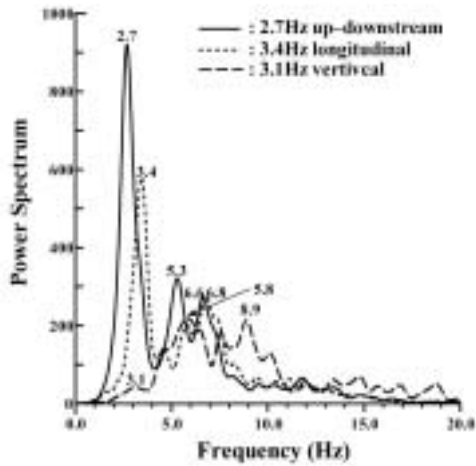


Fig.39 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

震波が減衰せずに地震動がダムサイトに到達し、「foundation」における周波数特性は震央近傍で観測された地震動の周波数特性を現すと考えられる。Fig. 39 から、「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2～5Hzの周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

2観測点における水平面内における加速度波形の軌跡をFigs. 40及び41に示す。

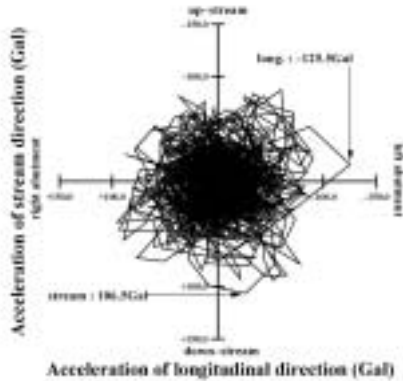


Fig.40 「foundation」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at foundation

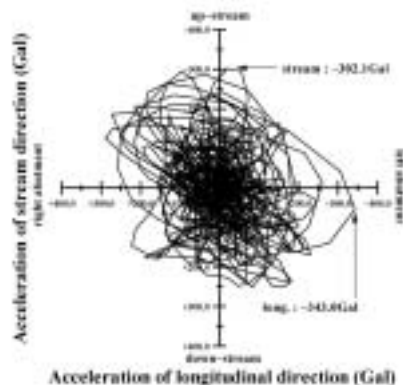


Fig.41 「crest」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at crest

これらのFigs. 40及び41から、「foundation」における軌跡は、ほぼ円形の形状であり、上下流方向及びダム軸方向いずれの方向にも均等な振動である。「crest」における軌跡は、上流右岸側から下流左岸側に傾いた長軸を持つ楕円形状のダム軸方向の振動がわずかに卓越した振動である。この結果は、上下流方向とダム軸方向の最大加速の関係のFig. 37から得られた振動の特徴と一致する。

7 千松ダム

Table 12を再度Table 33に示す。

Table 33 千松ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Senmatsu dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Upstream side of left abutment	302.2	-242.2	162.0	161.3

「upstream side of left abutment」における観測記録のみであるが、上下流方向において300Galを超えている。

「upstream side of left abutment」におけるパワ・スペクトルをFig. 42に示す。

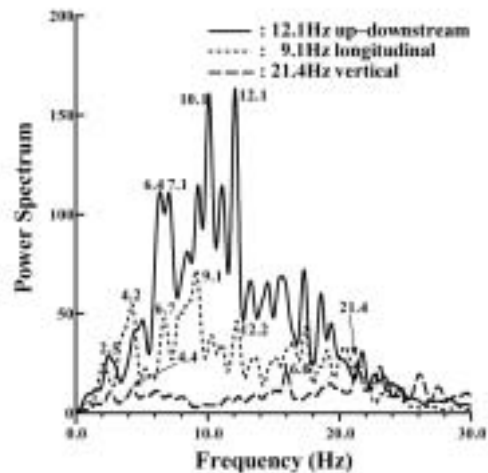


Fig.42 「upstream side of left abutment」のパワ・スペクトル
Power spectrum at upstream side of left abutment

このFig. 42から、広い範囲の周波数領域に周波数成分が現れ、上下流方向及びダム軸方向において10Hzを中心とする周波数領域が卓越する。本ダムは、震央距離が33.3kmと25ダムの中で最も震央に近く、地震動の伝播距離が短いため、高い周波数の地震波が減衰せずに地震動がダムサイトに到達し、相川(Ai)ダムの「foundation」における周波数特性と同様に「upstream side of left abutment」における周波数特性は震央近傍で観測された地震動の周波数特性を現すと考えられる。しかし、相川(Ai)ダムの「foundation」における周波数特性は、本ダムの「upstream side of left abutment」における周波数特性に類似するが、相川(Ai)ダムにおいては10Hz以下の

周波数領域にも周波数成分が現れる (Fig. 40)。この周波数特性の相違は、相川 (Ai) ダムと本ダムとの震央からの距離の差である 10km ほどの地震動の伝播距離の延伸による高い周波数の地震波の減衰、重力式コンクリートダムである本ダムとロックフィルダムである相川 (Ai) ダムの基礎岩盤の条件等の相違による局所的な影響、または相川 (Ai) ダムの堤体と基礎の境界の観測点と本ダムの解放地盤となる地山の観測点における振動特性の相違等が考えられる。

8 栗駒ダム

Table 13 に応答加速度増幅率を付記し Table 34 に示す。

Table 34 栗駒ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Kurikoma dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest right (H = 57.0m)	-84.4	68.6	-61.3	200.0
	1.87	1.25	0.88	
Crest left	-73.2	87.0	-75.4	200.0
	1.62	1.58	1.08	
Gallery	45.1	55.0	-69.7	157.3
	1.00	1.00	1.00	
Right abutment	67.4	61.8	-62.2	183.0
	1.49	1.12	0.89	

この Table 34 から、堤体への入力地震動を観測している観測点と仮定できる「gallery」において鉛直方向の最大加速度が大きい。堤体の観測点である「crest right」(堤頂付近の右岸監査廊) 及び「crest left」(堤頂付近の左岸監査廊) においても鉛直方向の応答加速度は「gallery」から増幅も減衰もほぼ生じずに上下流方向及びダム軸方向とほぼ同じ最大加速度である。加速度増幅率は、同一のダム型式の重力式コンクリートダムである前述の世増 (Yo) ダム及び大志田 (Os) ダムの 5 倍に比較して、いずれの方向も小さい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 43 に示す。

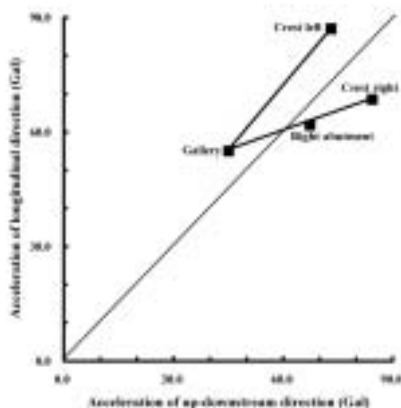


Fig.43 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 43 から、「crest right」と「crest left」において上下流方向とダム軸方向の最大加速度の大きさの関係が全く逆である。「right abutment」と「crest right」において、これらの観測点が右岸地山と堤体の右岸側に位置するため、上下流方向とダム軸方向の最大加速度の大きさ関係が類似する。「right abutment」及び「crest right」における上下流方向とダム軸方向の最大加速度の大きさの関係は、堤体の反対側の「crest left」における関係と全く逆である。

堤体内での加速度増幅特性を Fig. 44 に示す。この Fig. 44 から、いずれの方向においても、「gallery」と「crest right」の観測点における観測記録のプロットを結んだ線分の近傍に「right abutment」の観測点における観測記録がプロットされる。これは、堤体及び地山ともに右岸側において応答加速度の増幅特性は類似する、つまり、「crest right」の観測点は右岸地山における振動の影響を受け、左岸地山と振動特性が異なると考えられる。

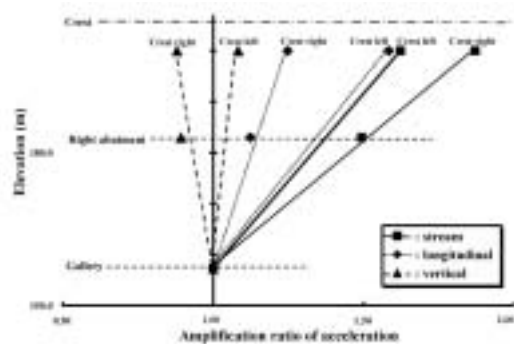


Fig.44 標高と加速度増幅率の関係

Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations

各観測点におけるパワースペクトルを Figs. 45 ~ 48 に示す。これらの Figs. 45 ~ 48 から、広い範囲の周波数領域に周波数成分が現れる。「crest right」と「crest left」に

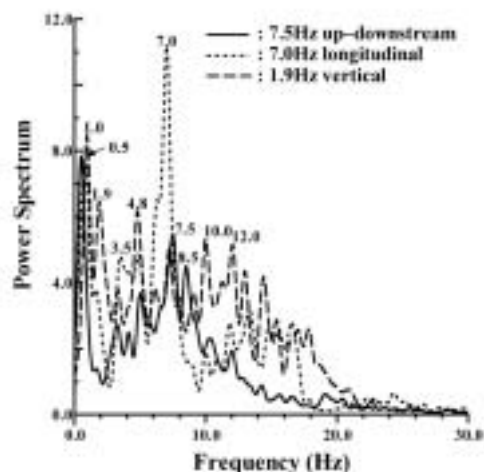


Fig.45 「gallery」のパワースペクトル
Power spectrum at gallery

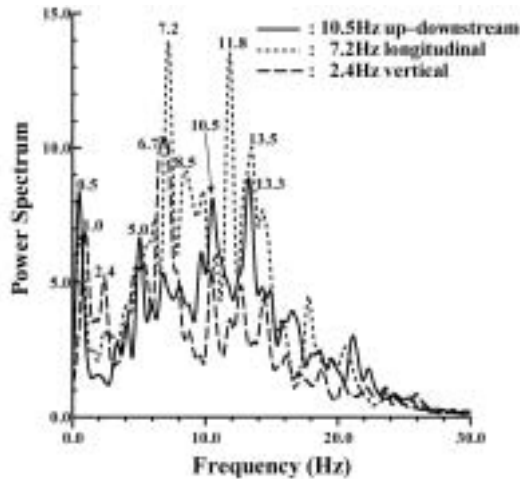


Fig.46 「crest left」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest left

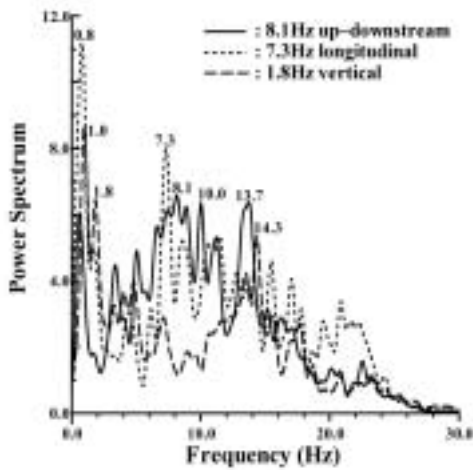


Fig.47 「crest right」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest right

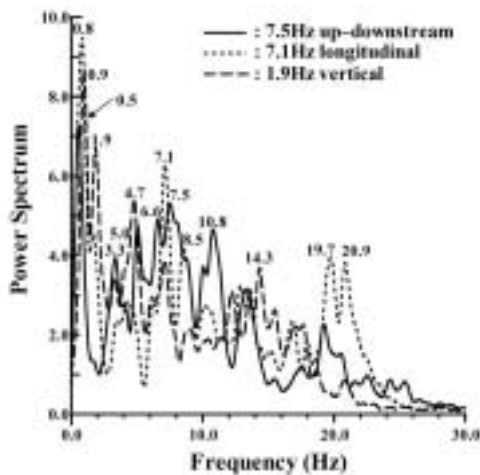


Fig.48 「right abutment」のパワ・スペクトル
Power spectrum at right abutment

においてともに10Hzを中心とするほぼ同じ周波数領域に卓越したピークが現れる。「crest right」における周波数成分は「crest left」における周波数成分より5Hz以下の

低い周波数領域に周波数成分が大きく、「right abutment」において低い周波数領域になるに従い周波数成分が卓越して現れる周波数特性と類似した傾向を示す。このことから前述のように「crest right」の観測点は右岸地山における振動の影響を受けると考えられる。同一のダム型式の重力式コンクリートダムである前述の世増 (Yo) ダム及び大志田 (Os) ダムの周波数特性と比較して、広い周波数領域に周波数成分が現れている。

9 荒砥沢ダム

Table 14 に応答加速度増幅率を付記し Table 35 に示す。

Table 35 荒砥沢ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Aratozawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 74.4m)	-364.8	334.8	-220.1	279.4
	3.21	3.73	3.28	
2/3H core zone	145.3	-165.5	126.1	250.0
	1.28	1.84	1.88	
Foundation	-113.5	-89.9	67.1	200.2
	1.00	1.00	1.00	
Right abutment	229.2	224.7	-107.2	284.5
	2.02	2.50	1.60	

この Table 35 から、「foundation」及び「crest」においていずれも上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。「2/3H core zone」において、これらの2観測点における関係とは逆にダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 49 に示す。この Fig. 49 から、「2/3H core zone」においてのみダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きいことがわかる。

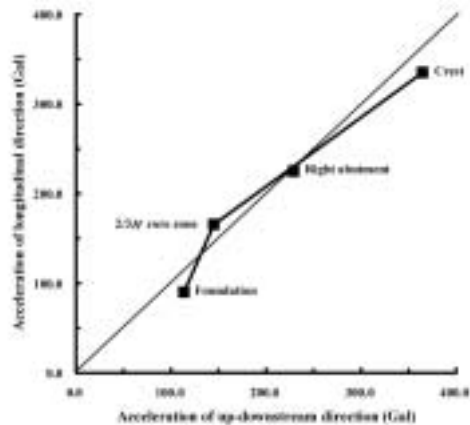


Fig.49 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

堤体内での加速度増幅特性を Fig. 50 に示す。

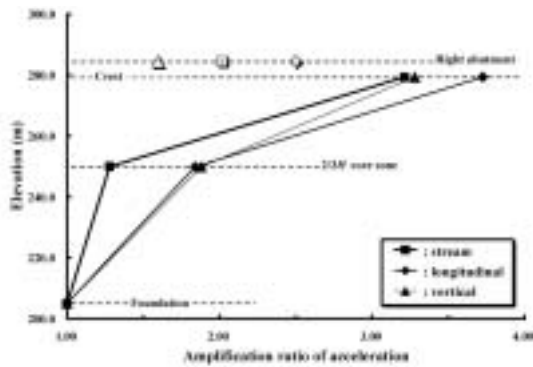


Fig.50 標高と加速度増幅率の関係

Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations

この Fig. 50 から、「2/3H core zone」から「crest」に向かって応答加速度が急激に増加する増幅特性を示し、特に、上下流方向における増幅が著しい。

各観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 51 ~ 54 示す。

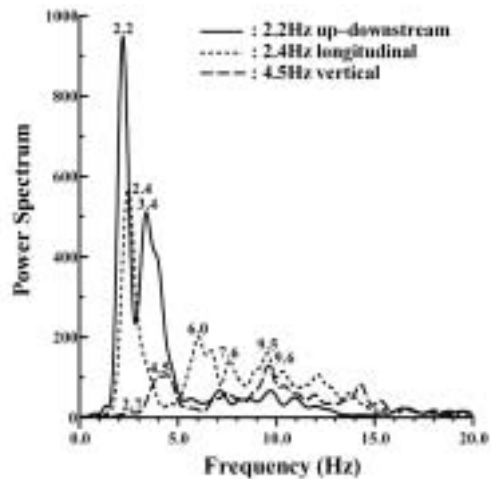


Fig.53 「crest」のパワ・スペクトル

Power spectrum at crest

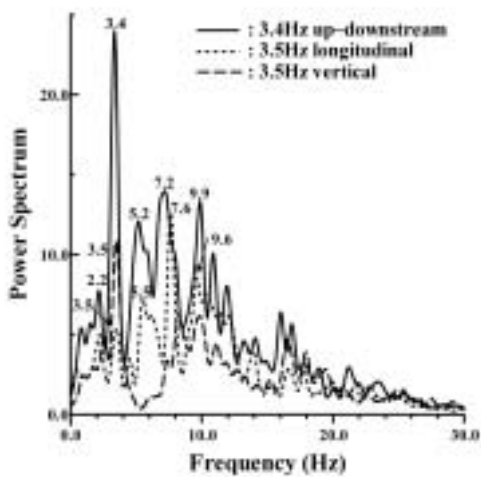


Fig.51 「foundation」のパワ・スペクトル

Power spectrum at foundation

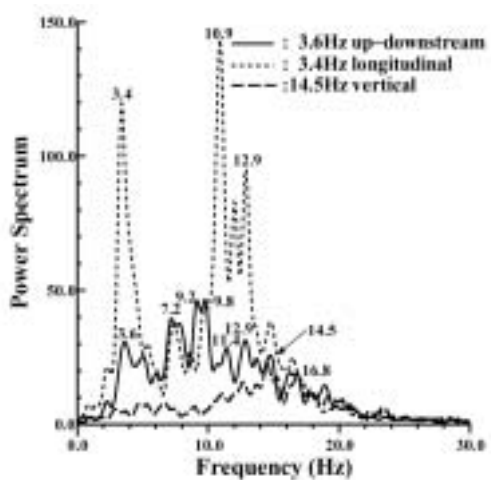


Fig.54 「right abutment」のパワ・スペクトル

Power spectrum at right abutment

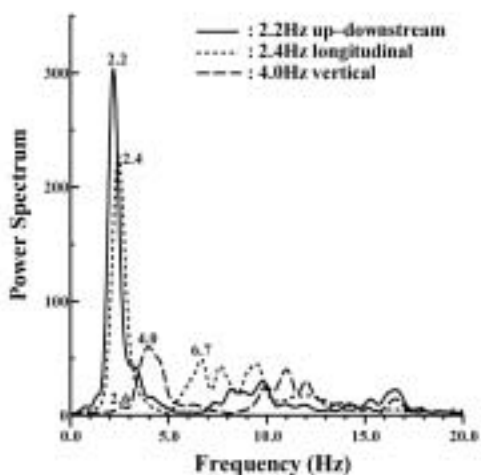


Fig.52 「2/3H core zone」のパワ・スペクトル

Power spectrum at 2/3H core zone

これらの Figs. 51 ~ 54 から、「foundation」及び「right abutment」において広い範囲の周波数領域に周波数成分が現れる。「right abutment」より「foundation」において低い周波数領域に卓越したピークが現れる。「crest」及び「2/3H core zone」においてともに類似した周波数特性を示す。また、これらの2観測点において上下流方向及びダム軸方向ともに卓越したピークの周波数はほぼ同じである。この結果は、これまでの地震観測記録と同様である(増川ら, 2002)。Fig. 54 から、「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2~5Hzの周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

10 宿の沢ダム

1観測点における観測記録のみであるため、最大加速度は Table 15 ですでに示したとおりである。この Table 15 から、上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じである。本ダムの所在市町村では震度6弱と

なっているため、前述の衣川4号 (Ko4) ダムと同様に基礎での最大加速度は100Galを越えたと推定することができる。ローカルサイトエフェクトの相違によって震度6弱の計測点や衣川4号 (Ko4) ダムの基礎における地震動の大きさと異なる可能性もある。しかし、基礎において最大加速度が前述の衣川4号 (Ko4) ダムにおける基礎の最大加速度と同じであると仮定すると、衣川4号 (Ko4) ダムと同様の2倍程度の増幅率である。フィルダムの既往の知見では、加速度増幅率は、入力加速度が大きくなるに従い減少し、2~4程度のほぼ一定値の増幅率に収束する非線形性を現す (増川ら, 2002)。本ダムにおいても、既往の知見と同様の現象が現れていると考えられる。

「crest」におけるパワースペクトルを Fig. 55 に示す。この Fig. 55 から、上下流方向及びダム軸方向ともに類似した周波数特性を示し、ほぼ同じ周波数に卓越したピークが現れる。「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワースペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2~5Hzの周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

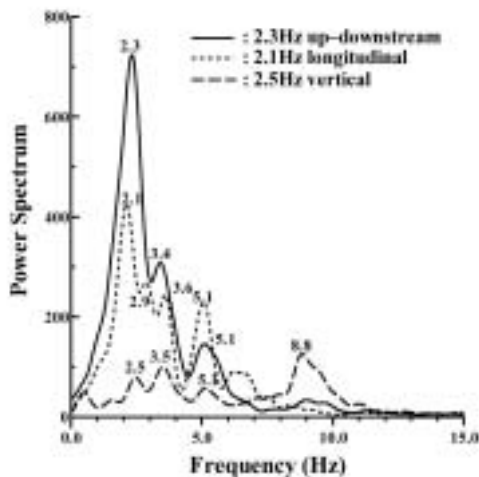


Fig.55 「crest」のパワースペクトル
Power spectrum at crest

11 保野川ダム

Table 16 に応答加速度増幅率を付記し Table 36 に示す。

Table 36 保野川ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Honokawa dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 41.4m)	187.3	166.5	-104.7	239.4
	5.06	3.16	1.89	
Foundation	-37.0	52.7	55.3	198.0
	1.00	1.00	1.00	

この Table 36 から、「foundation」においては鉛直方向が3成分の中で最も大きい最大加速度を記録し、ダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。

い。「crest」においては上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく、かつ3成分の中で最も大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 56 に示す。

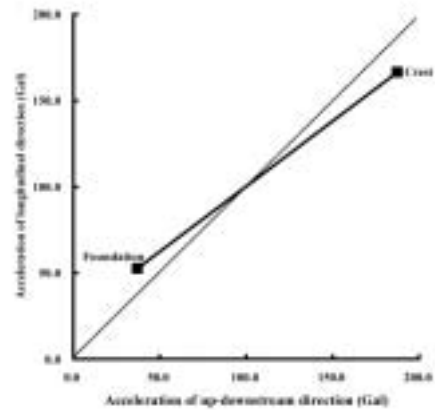


Fig.56 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 56 から、「foundation」におけるダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい関係が、「crest」において上下流方向の最大加速度が逆にダム軸方向の最大加速度より大きくなっている。

2観測点におけるパワースペクトルを Figs. 57 及び 58 に示す。これらの Figs. 57 及び 58 から、「foundation」及び「crest」の2観測点においてともに5Hz以下の低い周波数領域に周波数成分が現れる。「foundation」において鉛直方向の周波数成分が顕著に現れ、「foundation」において鉛直方向の最大加速度が3成分の中で最も大きい結果と一致する。Fig. 58 から、「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワースペクトルにおいて顕著なピークとして現れる2~5Hzの周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

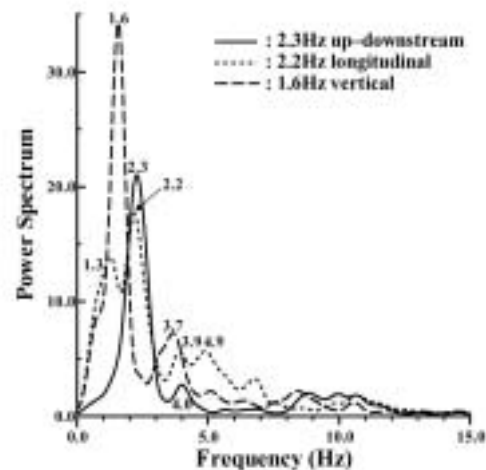


Fig.57 「foundation」のパワースペクトル
Power spectrum at foundation

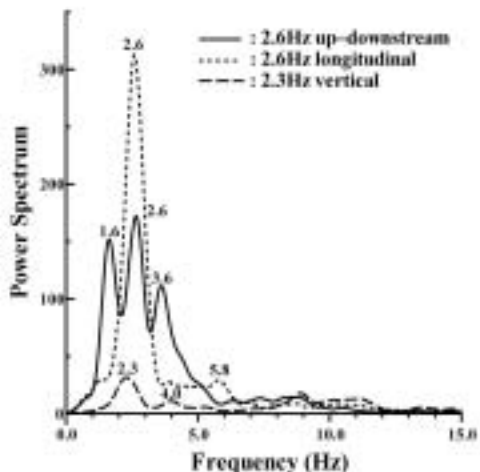


Fig.58 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

12 松ヶ房ダム

Table 19 に応答加速度増幅率を付記し Table 37 に示す。

Table 37 松ヶ房ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Matsugabou dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 46.0m)	-70.8	104.4	-67.4	(411.5)
	4.10	5.04	3.65	
Foundation	-17.3	-20.7	-18.5	(366.5)
	1.00	1.00	1.00	

この Table 37 から、2 観測点においてともに鉛直方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度とほぼ同じである。2 観測点においてともにダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 59 に示す。

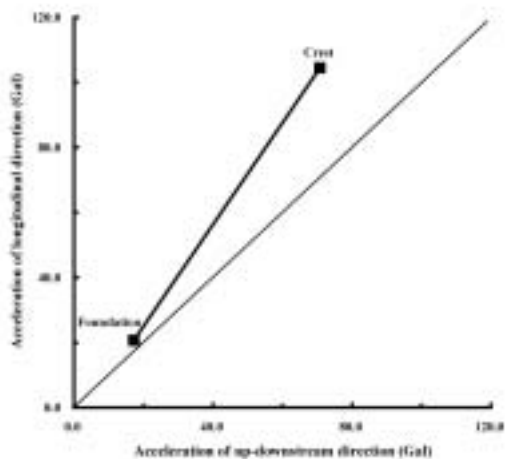


Fig.59 上下流-ダム軸方向の最大加速度
Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 59 から、「foundation」においてダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度よりわずかに大きい。「crest」においてダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。

2 観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 60 及び 61 に示す。これらの Figs. 60 及び 61 から、「foundation」において低い周波数領域になるに従い周波数成分が卓越して現れる。「crest」において任意の周波数に卓越したピークが現れる。

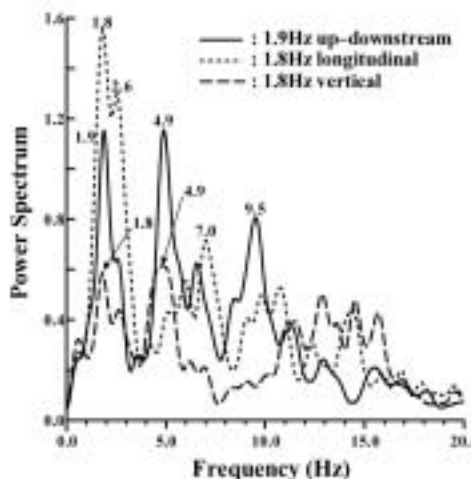


Fig.60 「foundation」のパワ・スペクトル
Power spectrum at foundation

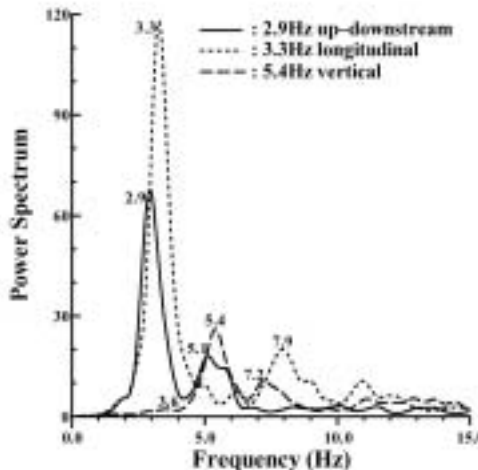


Fig.61 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

Fig. 61 から、「crest」における卓越したピークは、ダム軸方向のピーク値が上下流方向のピーク値より大きく、ダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい結果と一致する。「crest」において、既知のフィルダムの堤頂におけるパワ・スペクトルにおいて顕著なピークとして現れる 2~5Hz の周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

13 高の倉ダム

Table 20 に応答加速度増幅率を付記し Table 38 に示す。

Table 38 高の倉ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Takanokura dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 54.2m)	69.5	41.5	-27.9	(158.2)
	2.93	1.73	1.38	
Gallery	-23.8	24.0	-20.3	(104.0)
	1.00	1.00	1.00	

この Table 38 から, 「gallery」において上下流方向及びダム軸方向ともに最大加速度はほぼ同じであるが, 「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく, 加速度増幅率も上下流方向がダム軸方向より大きい。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 62 に示す。この Fig. 62 から, 「crest」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より極めて大きい。この特徴は, Fig. 13 に示した大志田 (Os) ダムにおける上下流-ダム軸方向の最大加速度と類似する。

2 観測点におけるパワ・スペクトルを Figs. 63 及び 64 に示す。これらの Figs. 63 及び 64 から, 「gallery」において 10Hz 以下の周波数領域に周波数成分が現れる。各方向ともに類似した周波数特性を示す。「crest」において上下流方向に 10 ~ 20Hz の周波数領域に周波数成分が現れる。上下流方向において, 「gallery」における低い周波数領域から「crest」における高い周波数領域に周波数特性が移行する。この傾向は, 同一のダム型式の重力式コンクリートダムである世増 (Yo) ダム及び大志田 (Os) ダムにおける周波数特性と同様に, 堤体の剛性が高い重力式コンクリートダムの特徴と考えられる。卓越したピークにおける周波数の 9.9Hz は世増 (Yo) ダムとほぼ同じである。

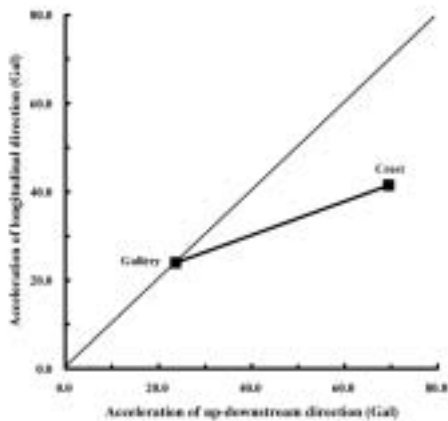


Fig.62 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

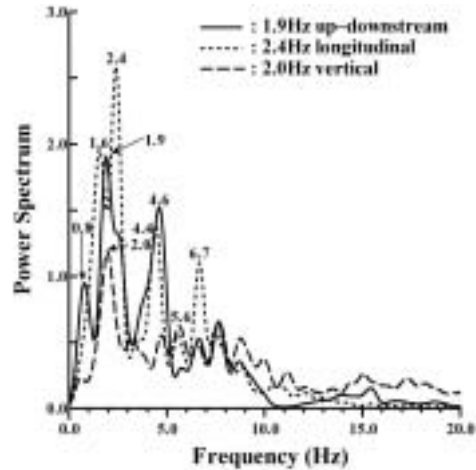


Fig.63 「gallery」のパワ・スペクトル
Power spectrum at gallery

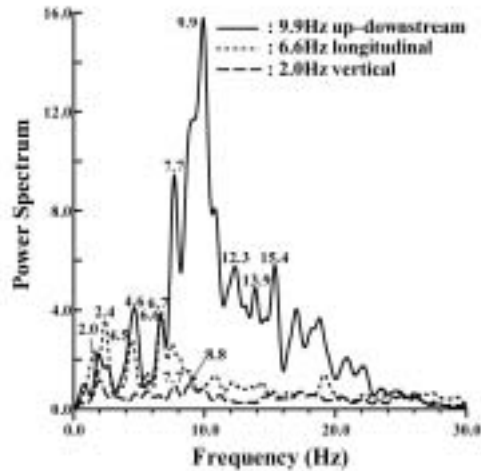


Fig.64 「crest」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest

14 大柿ダム

Table 21 に応答加速度増幅率を付記し Table 39 に示す。

Table 39 大柿ダムの最大加速度記録
Maximum acceleration records at Oogaki dam

	Stream	Longitudinal	Vertical	EL. (m)
Crest (H = 84.5m)	-99.0	379.4	79.6	173.8
	6.06	14.64	7.36	
Crest 1/4L left	-129.1	-304.1	70.4	173.8
	7.90	11.74	6.51	
Crest left	-144.0	100.3	47.8	171.0
	8.81	3.87	4.42	
2/3H core zone	-47.1	-	25.9	140.0
	2.88	-	2.39	
Foundation	-16.3	25.9	10.8	84.1
	1.00	1.00	1.00	
1/3H left abutment	41.0	-30.8	23.1	113.8
	2.51	1.19	2.14	
Left abutment	-74.1	72.8	31.7	171.0
	4.53	2.81	2.93	
Right abutment	28.8	-47.8	30.5	171.0
	1.76	1.85	2.82	

この Table 39 から, 「foundation」, 「crest 1/4L left」, 「crest center」及び「right abutment」の各観測点において, ダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きい。「crest 1/4L left」の観測点は, 堤体最大断面内の堤頂に位置する「crest center」の観測点より堤頂長のおよそ1/4の長さ左岸地山寄りの堤頂に位置している。「crest left」の観測点は, この「crest 1/4L left」よりさらに左岸地山に近接し, ほぼ地山と堤体の境界付近の堤体の堤頂に設置されている。「crest left」, 「crest 1/4L left」, 「crest center」の観測点の順に堤体最大断面に近づくに従い, ダム軸方向の最大加速度が大きくなる。「crest center」より左岸地山寄りの「crest 1/4L left」において上下流方向の最大加速度が大きく, この観測点よりさらに左岸地山寄りの「crest left」において全観測点の中で最も大きい上下流方向の最大加速度である。

上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 65 に示す。

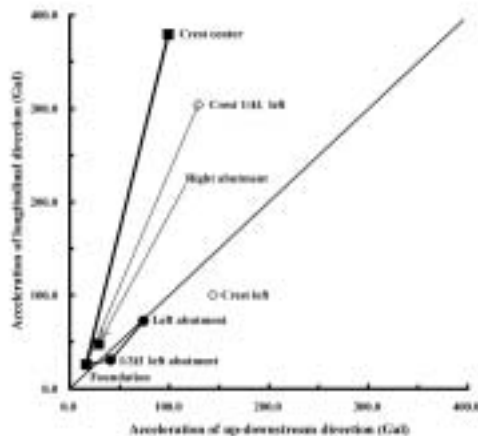


Fig.65 上下流- ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

この Fig. 65 から, 「crest center」及び「crest 1/4L left」においてダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より極端に大きい。「crest left」において, これらの2観測点と逆の上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。「1/3H left abutment」や「left abutment」の左岸地山に設置された観測点において, わずかに上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きい。

堤頂標高に設置されている観測点 (「left abutment」, 「crest left」, 「crest 1/4L left」, 「crest center」及び「right abutment」の5観測点) における最大加速度のダム軸方向の変化を Fig. 66 に示す。この Fig. 66 から, 上下流方向の最大加速度は, 「crest left」において最も大きく, 「right abutment」に向かい減少する。ダム軸方向の最大加速度は, 左右岸地山において小さく, 堤体最大断面内の堤頂に位置する「crest center」において最も大きい。鉛直方向の最大加速度もこのダム軸方向の最大加速度の変化と類似した変化を示す。堤頂全体は拘束が大きいと考えられるダム軸方向に振動が卓越する。

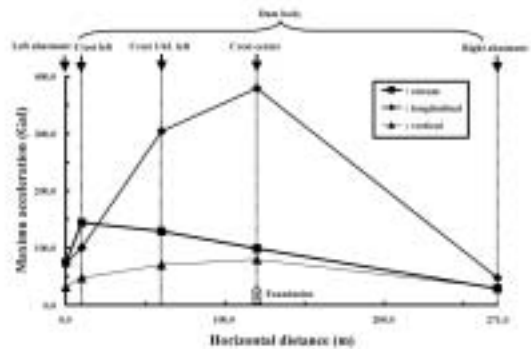


Fig.66 堤頂のダム軸に沿った最大加速度
Maximum accelerations along longitudinal direction on crest

堤体の最大断面断面 (標準断面) に位置する観測点 (「crest center」, 「2/3H core zone」及び「foundation」) の3観測点) における加速度増幅特性を Fig. 67 に示す。この Fig. 67 から, ダム軸方向の加速度増幅率は上下流方向の加速度増幅率より極めて大きい。上下流方向の加速度増幅率は鉛直方向の加速度増幅率とほぼ同じである。

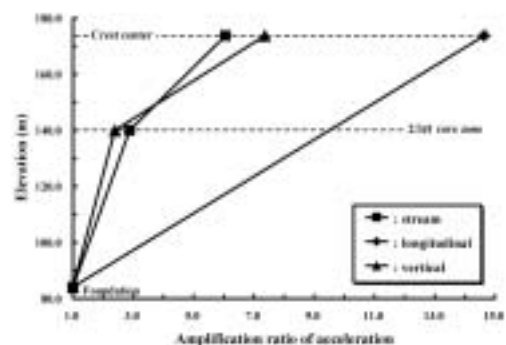


Fig.67 標準断面における標高と加速度増幅率の関係
Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations on typical cross section

堤体の左岸側に設置されている観測点 (「left abutment」, 「crest left」及び「crest 1/4L left」の3観測点) における加速度増幅特性を Fig. 68 に示す。この Fig. 68 から, Fig. 67 に示した加速度増幅特性と類似し, 「crest 1/4L left」においてダム軸方向の加速度増幅率は上下流方向の加速度増幅率より極めて大きい。一方, 「crest left」において上下流方向の加速度増幅率がダム軸方向及び鉛直方向の加速度増幅率より極めて大きい。「crest 1/4L left」と「crest left」における上下流方向とダム軸方向との増幅特性は全く異なっている。

左岸地山においても標高に沿って「1/3H left abutment」及び「left abutment」の2観測点が設置されている。堤体内と同様に整理した図を Fig. 69 に示す (図中には左岸地山との対比に右岸地山の観測点「right abutment」も加えた)。この Fig. 69 から, 「left abutment」は上下流方向の加速度増幅率がダム軸方向の加速度増幅率より大きく, 堤体と異なる増幅特性を示し, 「crest left」と類似する。

「left abutment」において「right abutment」においてより加速度増幅率が大きい。

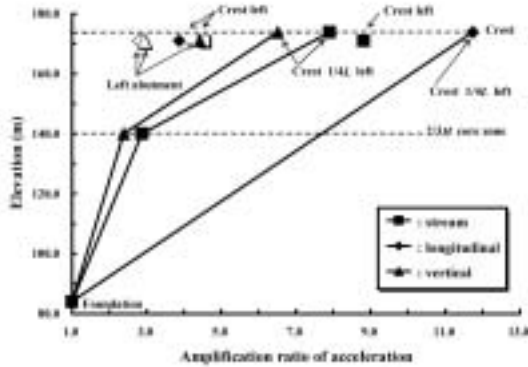


Fig.68 堤体左岸側における標高と加速度増幅率の関係
Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations at left side dam body

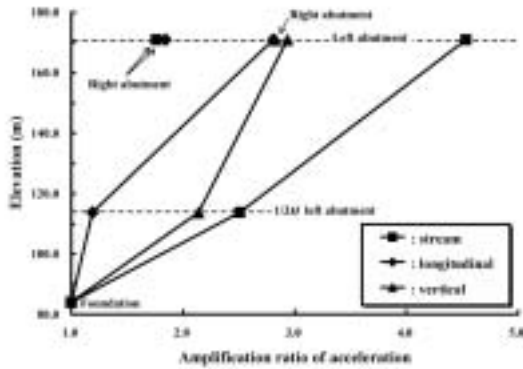


Fig.69 左岸地山における標高と加速度増幅率の関係
Relationship between amplification ratios of accelerations and elevations at left abutment

以上の地震時挙動の特徴は、本地震以前の地震における地震観測記録においても現れ、ダムサイトの特殊な地形条件の影響と考えられる (Masukawa et al., 1996; 増川ら, 2002)。本地震における地震時挙動は、「crest left」を除いた堤頂全体においてダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より大きく現れる。これまでの観測記録では、「crest 1/4L left」において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく現れ、これまでの観測記録における地震時挙動と本地震における地震時挙動に相違がある (増川ら, 2004b)。

各観測点におけるパワースペクトルを Figs. 70 ~ 77 に示す。これらの Figs. 70 ~ 77 から、「foundation」、「2/3H core zone」、「crest center」と堤頂に近づくに従い、低い周波数領域に卓越したピークがより顕著に現れる。さらに、堤頂に近づくに従い、上下流方向とダム軸方向とのピーク値の差が大きい。「crest left」(Fig. 74) と「left abutment」(Fig. 76) は左岸地山の掘削面を境に地山と堤体に設置された隣接する観測点のため、類似した周波数特性を示す。Fig. 72 から、「crest center」において、既知

のフィルダムの堤頂におけるパワースペクトルにおいて顕著なピークとして現れる 2 ~ 5Hz の周波数と一致した周波数に卓越したピークが現れる。

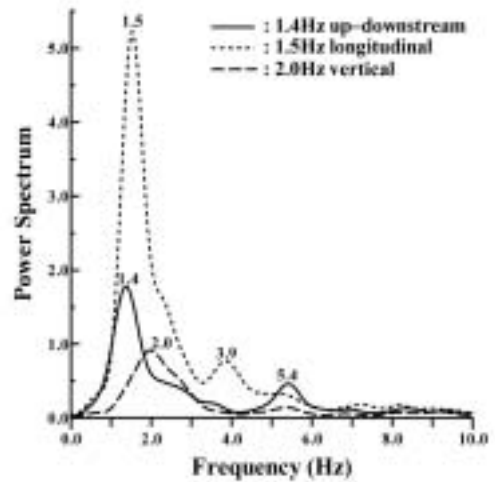


Fig.70 「foundation」のパワースペクトル
Power spectrum at foundation

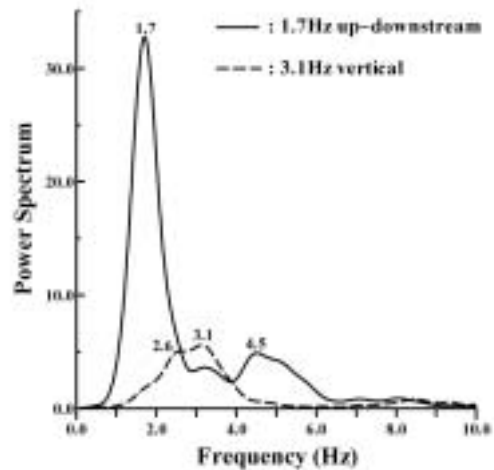


Fig.71 「2/3H core zone」のパワースペクトル
Power spectrum at 2/3H core zone

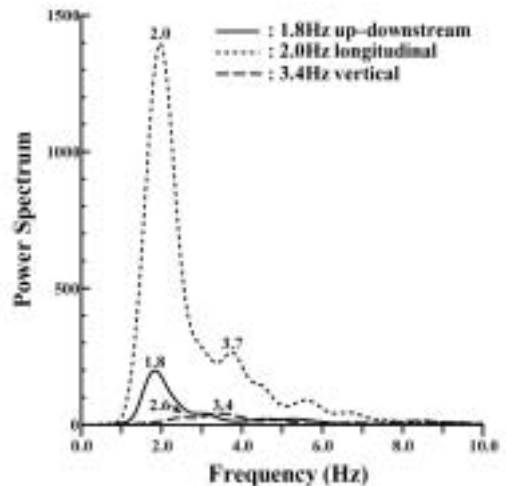


Fig.72 「crest center」のパワースペクトル
Power spectrum at crest center

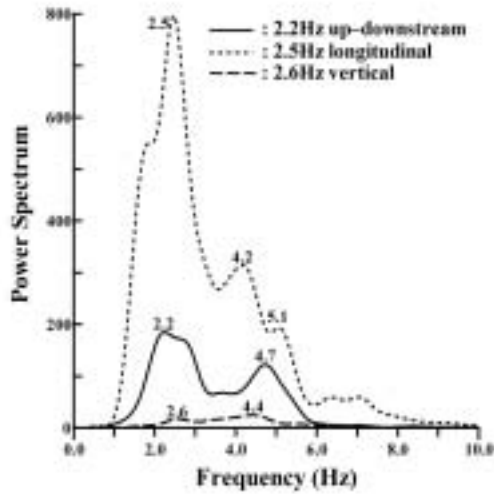


Fig.73 「crest 1/4L left」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest 1/4L left

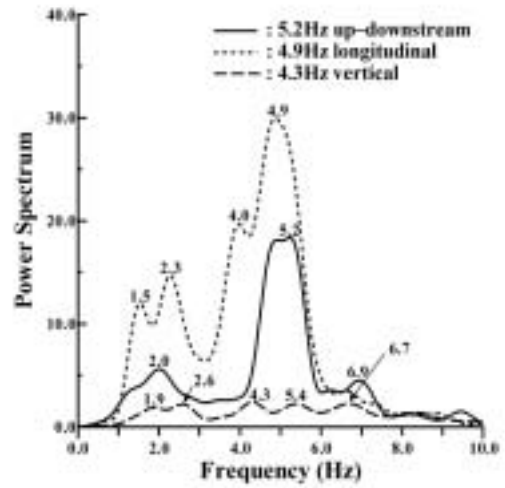


Fig.76 「left abutment」のパワ・スペクトル
Power spectrum at left abutment

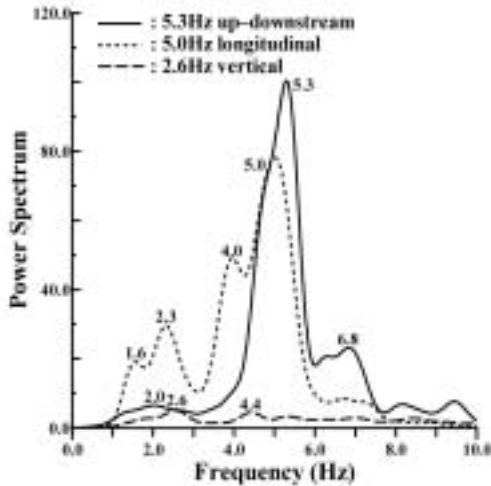


Fig.74 「crest left」のパワ・スペクトル
Power spectrum at crest left

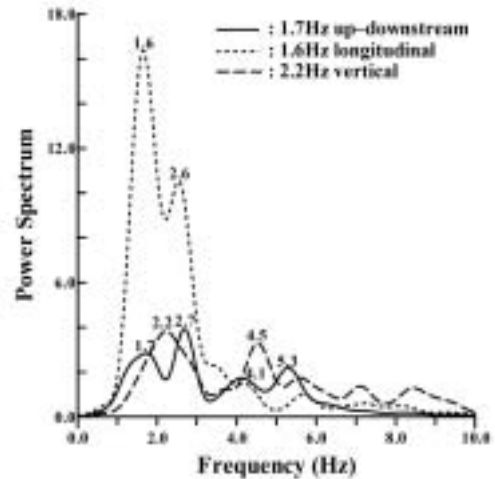


Fig.77 「right abutment」のパワ・スペクトル
Power spectrum at right abutment

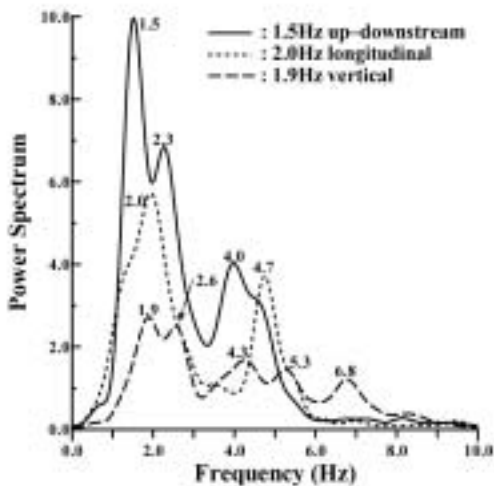


Fig.75 「1/3H left abutment」のパワ・スペクトル
Power spectrum at 1/3H left abutment

「foundation」, 「crest center」及び「crest 1/4L left」における水平面内における加速度波形の軌跡を Figs. 78 ~ 80 に示す。

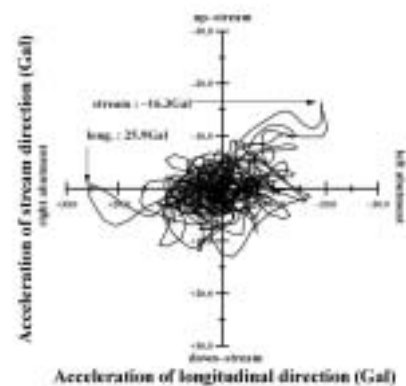


Fig.78 「foundation」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at foundation

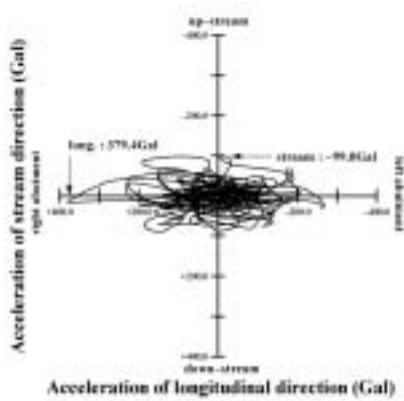


Fig.79 「crest center」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at crest center

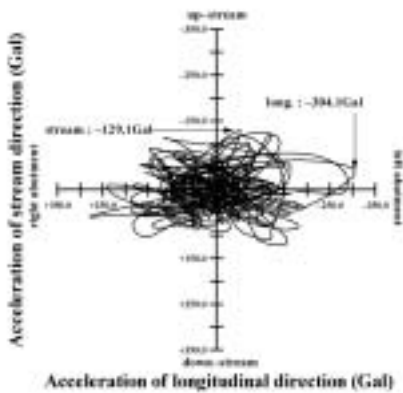


Fig.80 「crest 1/4L left」の加速度波形の軌跡
Locus of accelerations at crest 1/4L left

これらの Figs. 78 ~ 80 から、ダム軸方向が長軸となる扁平な楕円形の軌跡を示し、各観測点においてダム軸方向に振動が極めて卓越する。これらの加速度波形の軌跡の特徴は、ダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度より極めて大きい結果と一致する。

V ダムの地震時挙動

1 震央距離と最大加速度

公表された震度から推定した震度分布及び K-NET の最大加速度から推定した加速度分布を Fig. 81 に示す(増川ら, 2004a)。図の左が推定した震度分布, 右が推定した加速度分布である。図中の小円及び灰色で塗りつぶした小円はそれぞれ、地震観測装置が設置されていない農業用大ダム及び地震観測装置が設置されている農業用大ダムである。左図の推定した震度分布における震央を中心とする三つの同心円は、マグニチュードから求まる経験的震度限界である。震央に近い小さい円から大きい円へとそれぞれ、震度 VI, V 及び IV の限界範囲である。

この Fig. 81 から、推定した震度及び加速度分布は、経験的震度限界の同心円のように単純に震央距離に応じて減衰せず、南北方向に細長く分布し、かつ、震央距離に

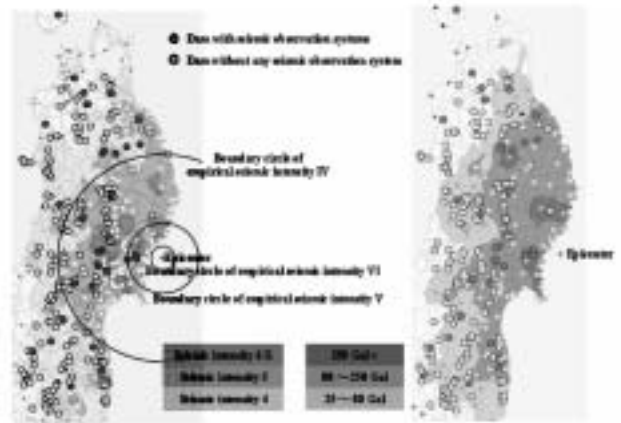


Fig.81 震度及び加速度の推定分布
Distributions of seismic intensity (JMA) and maximum acceleration (K-NET)

応じない震度分布の不規則な広がりがある。推定した震度分布において、北上川に沿って震度が大きく現れ、日本海側の盆地や平野において震度が大きい。また、推定した加速度分布において、東北新幹線の高架橋橋脚の損傷が発生した石鳥谷町付近で加速度が大きく、震度分布と同様に日本海側の盆地や平野において加速度が大きい。

これまでに地震時挙動を検討した 25 個の農業用大ダムにおいて震央に近いダムの順番に最大加速度を Table 40 に示した。この Table 40 において、「foundation」の最大加速度は、基礎または基礎に相当すると考えられる観測点の三成分の最大加速度の中で最も大きな加速度値である。「crest」の最大加速度は、「foundation」の最大加速度と同様に、堤頂の観測点の三成分の最大加速度の中で最も大きな加速度値である。表中にダムの所在地の市町村における発表震度を参考のために記載した。また、表中にダムの所在地の市町村に存在する K-NET 及び KiK-net の三成分合成最大加速度も記載した。KiK-net は、地表の観測点の加速度を用いた。表中の K-NET 及び KiK-net の三成分合成最大加速度を記載した列の括弧内の数値は、K-NET 及び KiK-net の観測点の震央距離である。

この Table 40 から、震央距離 70 ~ 90km で震度が 6 弱となり、この震央距離の範囲において「foundation」における最大加速度が震央距離 44.6km の相川 (Ai) ダムにおける最大加速度 (125.5Gal) とほぼ同じ最大加速度を記録した衣川 4 号 (Ko4) ダム (134.0Gal) 及び荒砥沢 (Ar) ダム (113.5Gal) がある。これらのダムは北上川流域の西側に位置し、Fig. 81 に示した推定した振動分布において震度 6 弱の震度である。また、震央距離 119.4km の岩洞 (Ga) ダムの所在する市町村において 853.9Gal (震央距離 115.8km) の加速度を観測している。このように震央距離に応じて震度及び加速度は減衰せず、地震地帯構造区分のような広域で深い位置の構造の相違や地形・地質の影響、すなわち、サイトエフェクトが現れると考えられる。また、Table 40 から、K-NET 及

Table 40 ダムの震央距離と最大加速度
Epicentral distance and maximum accelerations of dams

Name	Epicentral distance (km)	Seismic intensity (JMA)	Maximum acceleration of foundation (Gal)	Maximum acceleration of crest (Gal)	K-NET, KiK-net maximum acceleration (Gal)
Se	33.3	5+	302.2 (S)	-	604.7 (29.1km)
Ai	44.6	5+	125.5 (L)	343.0 (L)	604.7 (29.1km)
Sh	73.1	6-	-	282.4 (S)	-
Ko4	74.5	6-	134 (S)	265 (S)	-
Ku	77.1	6-	69.7 (V)	87.0 (S)	-
Ar	82.1	6-	113.5 (S)	364.8 (S)	-
Ho	96.8	5+	55.3 (V)	187.3 (S)	-
Kuz	101.5	-	89.5 (S)	469.1 (S)	266.4 (88.1km)
Sa	104.0	5-	65.2 (S)	234.1 (S)	-
Ga	119.4	5+	71.4 (S)	208.7 (S)	853.9 (115.8km)
Ma	143.5	5-	20.7 (L)	104.4 (L)	158.5 (130.6km)
Ic	145.7	4	-	88 (L)	-
Os	149.1	4	29.7 (S)	178.3 (S)	96.3 (147.5km)
Na	149.3	4	16.4 (S)	60.1 (S)	63.3 (143.2km)
Ta	152.8	5-	24.0 (L)	69.5 (S)	191.5 (144.3km)
Ar2	154.9	4	35 (L)	71 (L)	137.9 (153.4km)
Oo	164.2	4	25.9 (L)	379.3 (L)	127.9 (158.2km)
Mi	177.3	4	10 (S)	42 (S)	57.9 (170.6km)
Ya	178.0	4	29 (S)	110 (S)	-
Yo	178.5	5-	24.1 (S)	119.7 (S)	-
Ka	206.6	4	16 (L)	30 (S)	62.8 (207.3km)
Ry	223.6	4	9.2 (L)	12.5 (S)	-
Ha	228.4	4	17.5 (S)	-	-
Sh	230.6	4	11.2 (S)	22.7 (S)	-
Sm	239.2	-	5 (S)	9 (S)	21.6 (222.4km)

S: up-downstream direction, L: longitudinal direction, V: vertical

び KiK-net の三成分合成最大加速度は、同程度の震央距離となるダムの「foundation」の最大加速度に比較して大きい。ダムにおける最大加速度は、基礎または基礎に相当すると考えられる観測点の三成分の最大加速度の中で最も大きな加速度値のため、三成分合成最大加速度と異なる評価である。しかし、主要要因は K-NET 及び KiK-net の最大加速度は、地表の観測点における記録のため、地震動が増幅されたが、ダムの基礎は硬質な岩盤であるため、増幅されず加速度が小さいと考えられる。さらに、Table 40 から、「foundation」においてダム軸方向に最大加速度が現れる場合、同様に、「crest」においてもダム軸方向に最大加速度が現れる場合がある。「crest」の最大加速度は、震央距離に応じて減少せず、堤体への入力地震動のスペクトル特性や各ダムの堤高や応答特性が影響する。「foundation」の最大加速度が 100Gal を越えるダムでは、「crest」で 2 ~ 3 倍程度の加速度増幅率の応答加速度となり、フィルダムにおいて明らかにされた既往の結果と一致する (増川ら, 2002)。「crest」において観測記録を得たダムの中では、葛丸 (Kuz) ダムが 469.1Gal で最も大きく、大柿 (Oo) ダムが 379.4Gal で二番目となり、震央に近いダムの堤頂の応答加速度より大きい。これは、震央から離れるに従い、短周期の地震波が減衰しダムの共振周波数に一致する長周期が卓越したスペクトル特性を持つ地震動となったことが影響すると考えられる (増川ら, 2004b)。

Table 40 に示した震央距離と最大加速度の関係を既往の加速度距離減衰式と比較するため、震央距離とダムの基礎または基礎相当と考慮できる観測点で記録された三成分の中で最も大きい加速度との関係を Fig. 82 に示す。図中に K-NET または KiK-net の三成分合成最大加速度を横向き三角印で示した。KiK-net の観測点における加速度は、地表における観測記録である。二つの既往の加速度距離減衰式をそれぞれ実線 (神山, 1997) 及び波線 (司ら, 1999) によって図中に示した。

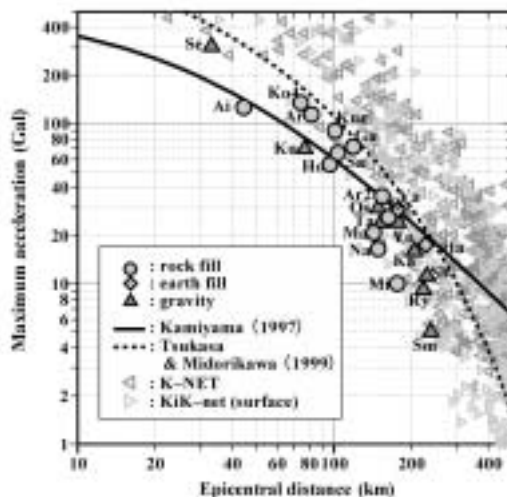


Fig.82 震央距離による加速度減衰
Attenuation of acceleration for epicentral distance

この Fig. 82 から、基礎地盤の種類・構造等が異なるが、震央から遠くなるに従い加速度は減少する傾向を示す。図中に菱形でプロットされた「Ya」(山の入ダム)及び「Ha」(羽鳥ダム)の加速度は同程度の震央距離となる他のダムにおける加速度に比較して大きい。これは、山の入 (Ya) ダム及び羽鳥 (Ha) ダムがアースフィルダムのダム型式であるため、他のダムの基礎地盤に比較して軟質な基礎地盤であり、加速度が増幅され大きな加速度が観察されたと考えられる。また、Fig. 82 から、司らの距離減衰式の震央距離による加速度の減衰傾向とダムにおける最大加速度の震央距離による減衰傾向は類似する。一方、神山の距離減衰式は震央近傍で加速度を小さく、震央から遠方で加速度を大きく評価する。さらに、Fig. 82 における K-NET 及び KiK-net の観測点における加速度は、地表で観測された三成分合成最大加速度であるため、ダムにおいて考慮した基礎または基礎に相当すると考えられる観測点における上下流方向の一方向のみの最大加速度とは異なる。しかし、Fig. 82 から同一の震央距離では、K-NET 及び KiK-net の観測点における加速度は、ほとんどのダムにおいて基礎で記録される加速度より大きな最大加速度を与える。これは、Table 40 から得た前述の結果と同じである。このため、地震観測装置が未設置のダムでは、震度発表地点が近傍に存在しない場

合に、近傍の K-NET または KiK-net の観測点の最大加速度を地震時安全点検の必要性の判断に用いた場合には、安全側の判断基準になると考えられる。

2 震央距離とスペクトル特性

本地震は、「II. 地震及び地震動」で記述したように震源に近い気象庁のいくつかの観測点で 1 000Gal 前後の加速度が観測され、これらの大きな加速度値に対して被害が少ないことが注目された。この大きな加速度値に対して被害が少ない原因として、相川 (Ai) ダムにおける地震時挙動の検討ですでに述べたように短周期の成分が卓越した地震動であったと言われている ((社) 地盤工学会 2003 年三陸南地震および宮城県北部地震災害調査委員会, 2003)。この地震動における短周期成分の卓越がダムの地震時挙動にどのような影響を与えているかをスペクトル特性によって検討した。

震央から離れていながら、堤頂で比較的大きな最大加速度を観測した葛丸 (Kuz) ダム (震央距離 101.5km)、このダムに近接する山王海 (Sa) ダム (震央距離 104.0km) を対象とする。これらのダムは新幹線の高架橋橋脚に被害を生じた石鳥谷町の西北に位置する。さらに、これらの 2 ダムに加えて、同様に震央から離れていながら、堤頂で比較的大きな最大加速度を観測し、かつダム軸方向の振動が極めて卓越する特徴的な地震時挙動を示した大柿 (Oo) ダムを対象とする。これらのダムと震央に近いダムとを比較するため、相川 (Ai) ダム (震央距離 44.6km) を対象とした。地震動の震央距離によるスペクトル特性の変化を捉えるため、上記の検討の対象としたダムの近傍の K-NET または KiK-net の観測点も対象とした。対象とした相川 (Ai) ダム、葛丸 (Kuz) ダム、山王海 (Sa) ダム及び大柿 (Oo) ダム、及び K-NET または KiK-net の観測点の位置関係を Fig. 83, Fig. 84 及び Fig. 85 にそれぞれ示す。これらの Figs. 83 ~ 85 中に記入した地震観測点名称に続けて記入した加速度は、ダムに関しては基礎における三成分の中で最も大きい加速度、K-NET 及び KiK-net に関しては三成分合成最大加速度である。また、各図中の「km」で記入した距離は震央距離である。震央距離の前に記入した数値 5+, 5- 及び 4 は震度 (5+:5 強, 5-:5 弱) である。

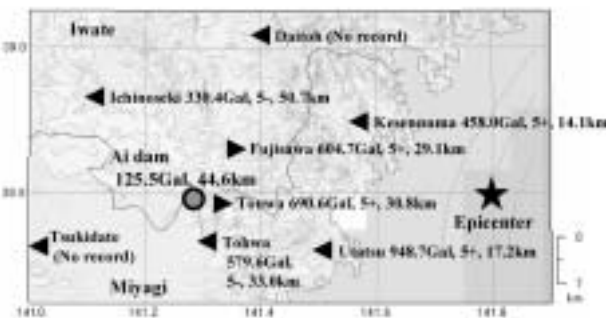


Fig.83 相川 (Ai) ダムの位置
Location of Aikawa (Ai) dam

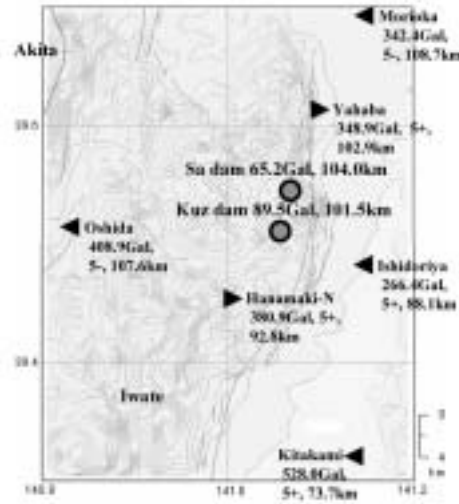


Fig.84 葛丸 (Kuz) ダム及び山王海 (Sa) ダムの位置
Location of Kuzumaru (Kuz) dam and Sannoukai (Sa) dam

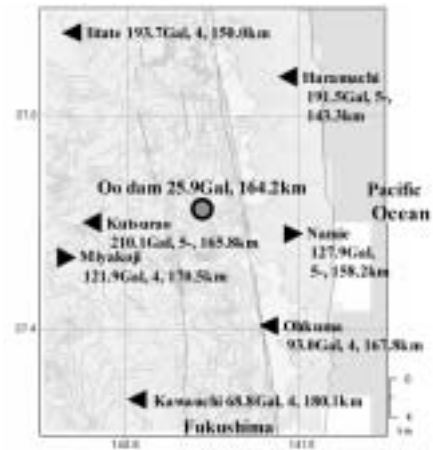


Fig.85 大柿 (Oo) ダムの位置
Location of Oogaki (Oo) dam

Figs. 83 ~ 85 に示したダム及び K-NET または KiK-net の観測点のパワ・スペクトルを Fig. 86, Fig. 87 及び Fig. 88 にそれぞれ示す。これらの図のパワ・スペクトルはこれまでに掲載したパワ・スペクトルの図と異なり、横軸の物理量は周期を対数表示とした。縦軸の物理量はパワ・スペクトルでこれまでの図と同じであるが対数表示とした。さらに、葛丸 (Kuz) ダム及び山王海 (Sa) ダムのパワ・スペクトルを示した Fig. 87 及び大柿 (Oo) ダムのパワ・スペクトルを示した Fig. 88 には、Fig. 86 に描いた短周期成分が卓越した地震動を記録した震央近傍の観測点の代表として K-NET 観測点の「Utatsu」(歌津) をプロットした。

Fig. 86 から、震央近傍の K-NET または KiK-net の観測点のパワ・スペクトルは 0.07 ~ 0.3 秒の短周期の成分が卓越する。一方、相川 (Ai) ダムのパワ・スペクトルは、短周期成分も現れるが 0.4 ~ 0.5 秒にも周期成分が現れる。このスペクトル特性は、相川 (Ai) ダム近傍の K-NET 及び KiK-net の観測点のそれぞれの「Tohwa」(東和) 及

び「Touwa」(東和)のパワ・スペクトルとは異なる。パワの絶対値は異なるが、K-NET観測点の「Ichinoseki」(一関)のパワ・スペクトルとスペクトル特性は類似する。

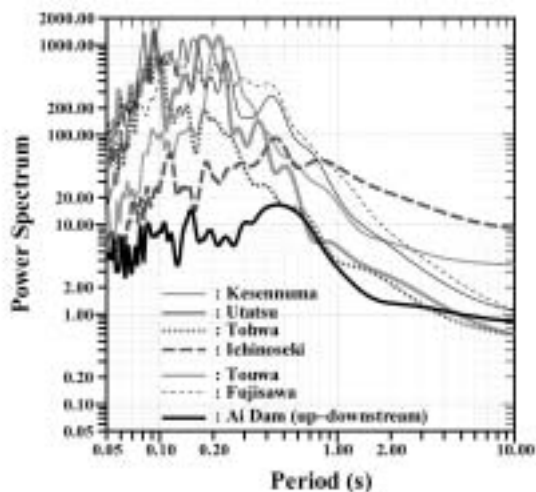


Fig.86 相川 (Ai) ダムのパワ・スペクトル
Power spectrum of Aikawa (Ai) dam

Fig. 87 から、葛丸 (Kuz) ダム及び山王海 (Sa) ダムの近傍の K-NET または KiK-net の観測点のパワ・スペクトルは、震央近傍の観測点の代表として描画している「Utatsu」(歌津)と比較して、0.2 ~ 0.5 秒の周期成分が卓越する。Fig. 86 の震央近傍の K-NET または KiK-net の観測点のパワ・スペクトルより卓越した周期成分が長周期領域に移行する。葛丸 (Kuz) ダム及び山王海 (Sa) ダムのパワ・スペクトルは、Fig. 86 の相川 (Ai) ダムに比較して 0.1 秒より短い周期の周期成分が小さくなり、相川 (Ai) ダムと同様に 0.4 ~ 0.6 秒の周期成分が顕著に卓越する。

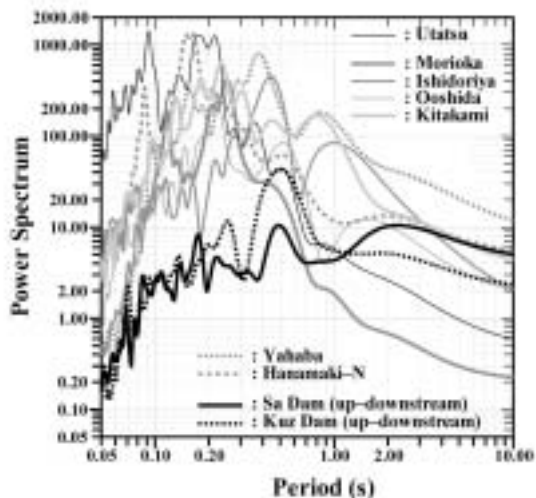


Fig.87 葛丸 (Kuz) ダム及び山王海 (Sa) ダムのパワ・スペクトル
Power spectrum of Kuzumaru (Kuz) dam and Sannoukai (Sa) dam

Fig. 88 から、大柿 (Oo) ダムの近傍の K-NET または KiK-net の観測点のパワ・スペクトルは、震央近傍の観測

点の代表として描画している「Utatsu」(歌津)と比較して、卓越した周期成分が長周期領域に移行し、特に 0.7 秒付近の周期成分が卓越し、0.2 秒以下の短周期領域の周期成分が減少する。さらに、Fig. 87 の K-NET または KiK-net の観測点より加速度が小さいため、全体の周期成分が減少する。大柿 (Oo) ダムのパワ・スペクトルは、Fig. 86 の相川 (Ai) ダムに比較して 0.1 秒より短い周期領域の周期成分が現れず、0.7 ~ 0.8 秒の周期領域の周期成分が顕著に卓越する。

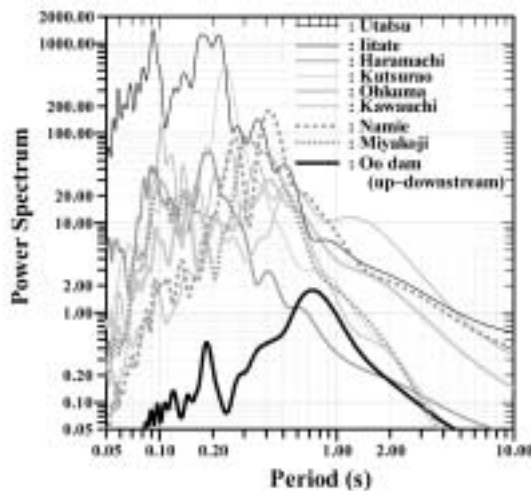


Fig.88 大柿 (Oo) ダムのパワ・スペクトル
Power spectrum of Oogaki (Oo) dam

これらの Figs. 86 ~ 88 から、震央から遠くなるに従い、地震動の短周期成分が減衰し、長周期領域成分が卓越した周期成分へスペクトル特性が移行する。この卓越した周期成分は、ダムの固有周期に一致する周期領域となり、このような周期を持つ地震動が入射したダムは共振現象によって堤頂に向かって応答加速度が顕著に増幅される。従って、地震時の安全点検の観点から、震央距離のみによる安全点検の必要性の判断は危険を含むことになる。重要な農業用大ダムでは、地震観測装置を設置し、当該ダムにおける入力加速度や応答加速度の大きさを把握して安全点検の必要性を判断する必要がある。

3 ダム型式と最大加速度

ロックフィルダムにおける上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を示した衣川 4 号 (Ko4) ダムの Fig. 6, 山王海 (Sa) ダムの Fig. 19, 葛丸 (Kuz) ダムの Fig. 29, 相川 (Ai) ダムの Fig. 37, 荒砥沢 (Ar) ダムの Fig. 49 及び大柿 (Oo) ダムの Fig. 65 を重ねて Fig. 89 に示す (増川ら, 2004b)。この Fig. 89 から、衣川 4 号 (Ko4) ダムはほぼ対角線上に観測記録がプロットされ、振動が卓越する方向は現れない。また、衣川 4 号 (Ko4) ダムと同様に荒砥沢 (Ar) ダム, 相川 (Ai) ダム及び山王海 (Sa) ダムでは、ほぼ対角線に沿って観測記録がプロットされる。葛丸 (Kuz) ダムは、対角線より右側に観測

記録がプロットされるため、基礎及び堤体において上下流方向の振動が卓越する。大柿 (Oo) ダムは逆に、対角線より左側に観測記録がプロットされるため、堤頂部 [crest center] 及び [crest 1/4L left] では、ダム軸方向の振動が卓越する。この大柿 (Oo) ダムにおける上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係の特徴は他のダムと比較して特異な現象である。衣川 4 号 (Ko4) ダムの LH (堤頂長 / 堤高) は 4.09, 荒砥沢 (Ar) ダムは 5.56, 相川 (Ai) ダムは 4.17, 山王海 (Sa) ダムは 3.93, 葛丸 (Kuz) ダムは 4.26, 大柿 (Oo) ダムは 3.10 である。 LH の大きなダムほど地山による拘束の影響が小さく、上下流方向の振動が卓越すると考えられる。しかし、 LH の最も大きい荒砥沢 (Ar) ダムは堤頂において上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりやや大きく、 LH が 4.26 の葛丸 (Kuz) ダムの方が上下流方向の振動が卓越する。 LH が 3.10 と最も小さい大柿 (Oo) ダムは堤頂部においてダム軸方向の最大加速度が上下流方向の最大加速度の 4 倍程度とダム軸方向の振動が卓越する。この大柿 (Oo) ダムについて LH の小さい山王海 (Sa) ダムは、上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度よりわずかに大きい。このように、 LH が大きいと堤頂において上下流方向の振動が卓越すると推定することが可能であるが (増川ら, 2002), LH で示される堤体形状以外の堤体や地盤の条件, 入力地震動のスペクトル特性が増幅特性に影響すると考えられる。

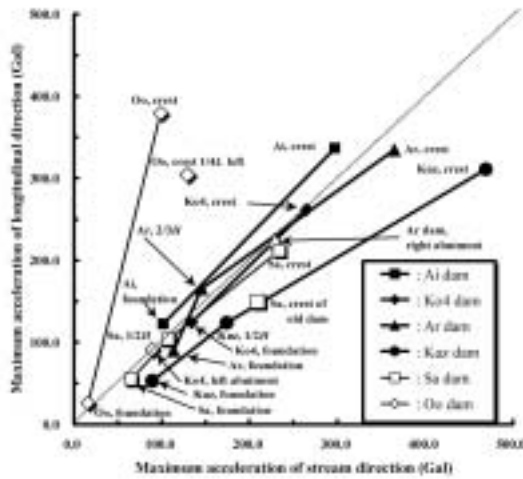


Fig.89 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

Fig. 89 に取り上げていないフィルダムに対する上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を示した荒沢 2 号 (Ar2) ダムの Fig. 5, 生居川 (Na) ダムの Fig. 7, 水窪 (Mi) ダムの Fig. 8, 山の入 (Ya) ダムの Fig. 9, 岩洞 (Ga) ダムの Fig. 16, 保野川 (Ho) ダムの Fig. 56 及び松ヶ房 (Ma) ダムの Fig. 59 を重ねて Fig. 89 と同様に Fig. 90 に示す。この Fig. 90 の両軸のスケールを拡大し、最大加速度が小さい観測記録におけるダムの上下流方向とダ

ム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 91 に示す。これらの Figs. 90 及び 91 から、保野川 (Ho) ダムと岩洞 (Ga) ダムにおいて堤頂に向かって上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく増幅される。山の入 (Ya) ダムは基礎及び堤体において上下流方向の振動が卓越する。松ヶ房 (Ma) ダムは堤頂においてダム軸方向の振動が卓越する。これらのダムの LH は、保野川 (Ho) ダムは 5.39, 岩洞 (Ga) ダムは 8.78, 山の入 (Ya) ダムは 6.64 及び松ヶ房 (Ma) ダムは 5.27 である。岩洞 (Ga) ダムのように LH が 5 ~ 6 を越える大きな LH であるダムは、上下流方向の振動が卓越する可能性が高いことが示唆される (増川ら, 2002)。

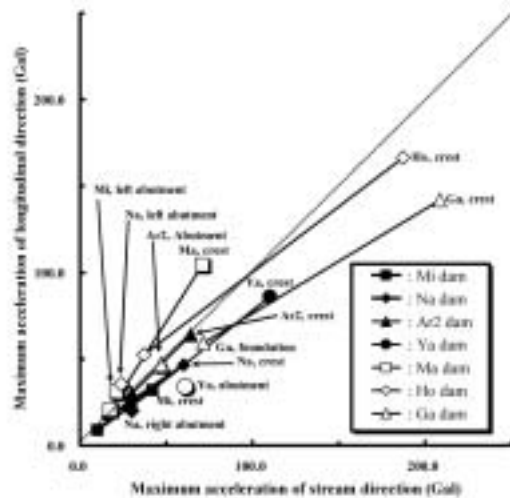


Fig.90 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

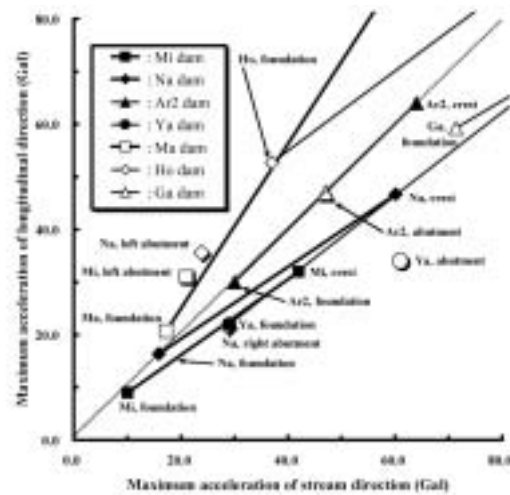


Fig.91 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

重力式コンクリートダムにおいて上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を示した世増 (Yo) ダムの Fig. 10, 大志田 (Os) ダムの Fig. 34, 栗駒 (Ku) ダムの Fig. 43, 高の倉 (Ta) ダムの Fig. 62 及び、清水目 (Sh) ダム, 金沢 (Ka) ダム, 龍生 (Ry) ダム及び新宮川 (Sm) ダ

ムの上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を重ねて Fig. 92 に示す。この Fig. 92 の両軸のスケールを拡大し、最大加速度が小さい観測記録におけるダムの上下流方向とダム軸方向の最大加速度の関係を Fig. 93 に示す。これらの Figs. 92 及び 93 から、清水目 (Sh) ダムを除いたいずれのダムにおいても堤頂に向かって上下流方向の最大加速度がダム軸方向の最大加速度より大きく増幅される。堤頂において上下流方向の応答加速度が増幅される増幅特性が、重力式コンクリートダムの増幅特性を示すと推定できる。しかし、複数のダムにおける観測記録からの結果であるが、同一地震における観測記録からの結果のみであるため、今後、観測記録を蓄積して検討する必要がある。

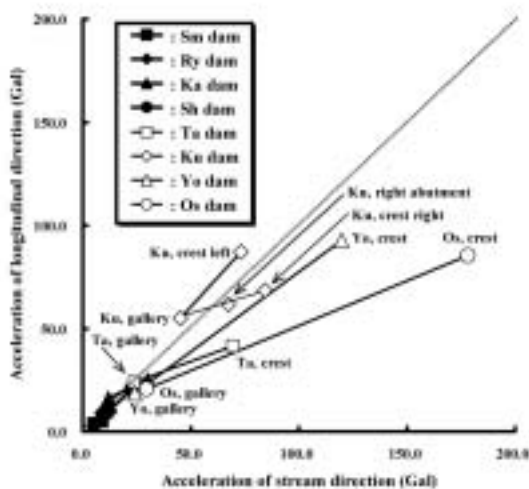


Fig.92 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

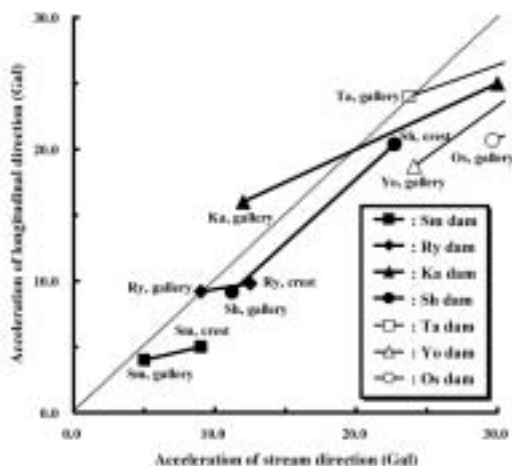


Fig.93 上下流-ダム軸方向の最大加速度

Maximum accelerations in up-downstream direction and longitudinal direction

VI 結 言

平成 15 年 5 月 26 日 18 時 24 分頃に発生した宮城県沖の地震において記録された農業用大ダムの地震観測記録に基づいて、最大加速度の処理及び波形解析を行い、堤

体内での加速度増幅率、スペクトル特性からダムの地震時挙動の把握を試みた。本報告により明らかになったことを列記すると以下のとおりである。

- 1) 地震時の堤頂における振動は、上下流方向が必ずしも卓越せず、ダム軸方向にも上下流方向と同程度の振動が現れる場合がある。特に、大柿ダムでは、堤頂のダム軸方向の振動が上下流方向の振動より卓越した。
- 2) 堤体に入射した地震動は、堤頂に近くなるほど増幅され、応答加速度増幅率が大きくなる傾向がある。
- 3) ダム軸方向にも上下流方向と同等またはそれ以上の加速度が発生することから、ダム軸方向に対する安全性の検討も必要である。
- 4) 基礎から入射した幅広い周波数成分を持つ地震動は、堤体内を伝播する間に堤体の固有周波数に相当する周波数成分が増幅し、他の周波数成分が減衰する。
- 5) この結果、フィルダムでは、堤頂において各方向とも低い周波数成分のみが顕著に現れる。一方、重力式ダムでは、堤頂において各方向ともフィルダムに比較して高い周波数成分が顕著に現れる。
- 6) 堤体内部と堤頂、堤体と地山等では、応答加速度が卓越する方向や卓越する周波数が異なっているなど、ダムサイトや堤体は複雑な振動現象を示す。
- 7) 基礎の最大加速度は震央距離に関係し、震央から遠くなるに従い最大加速度は減少する傾向がある。しかし、サイトエフェクトによって震央距離に比例して最大加速度が減少しない場合もある。
- 8) アースフィルダムの基礎の最大加速度は、同程度の震央距離のロックフィル・重力式ダムのそれに比べてやや大きくなっていった。これは、アースフィルダムの基礎地盤が後者の二型式のダムの硬質な基礎地盤に比較してやや劣るような岩級区分の基礎地盤であるためと考えられる。
- 9) 地震動は、震源から遠くなると短周期の成分が減衰し、広域の地盤構造によってスペクトル特性が変化する。ダム堤体の振動もサイト形状・基礎地盤の影響を受ける。このため、地震時の安全点検の必要性の判断のため地震観測装置を設置し的確な判断を下す必要がある。また、耐震設計・照査の入力地震動は地震動のスペクトル特性やダム軸方向を含めた応答特性を考慮して設定する必要があると考えられる。

今後は、地震観測による農業用大ダム、特に重力式コンクリートダムにおける地震時挙動の事例の蓄積を進め、農業用大ダムにおける地震時挙動の解明に努め、地震時の安全点検の向上に寄与したい。

参考文献

- 1) 日野幹雄 (1977) : スペクトル解析, p. 300, 朝倉書店, 東京
- 2) 社団法人地盤工学会 2003 年三陸南地震および宮城県北部

- 地震災害調査委員会 (2003): 2003 年三陸南地震・宮城県北部地震災害調査報告書
- 3) 神山眞 (1997): 1995 年兵庫県南部地震で得られた強震記録の最大地動ならびに波動特性, 土木学会論文集, No. 568 / III-39, p. 49-66
- 4) 国立天文台編 (2004): 理科年表 平成 17 年, 第 78 冊, p. 698-729, 丸善株式会社, 東京
- 5) 増川晋 (1999): フィルダムの地震時挙動に及ぼす地質・地形条件の影響に関する研究, 神戸大学博士論文, p. 4-5
- 6) 増川晋・向後雄二・浅野勇・林田洋一 (2002): 地震観測による複数のフィルダムの地震時挙動, 農業工学研究所報告, 第 41 号, p. 19-59
- 7) 増川晋・中西憲雄 (2004a): 農業大ダム位置の震度推定システム [4-36], 平成 16 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, p. 450-451
- 8) 増川晋・中西憲雄・林田洋一 (2004b): 宮城県沖の地震における農業用大ダムの地震時挙動 [646], 第 39 回地盤工学研究発表会平成 16 年度発表講演集, p. 1289-1290
- 9) Masukawa, S., Yasunaka M. and Tagashira, H. (1996): Earthquake observation and three dimensional modal analysis of a rock fill dam, *the 11th World Conf. on Earthq. Engng.*, Paper No. 534, Elsevier Science Ltd.
- 10) 文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2003): 宮城県沖地震の長期評価, <http://www.jishin.go.jp/main/> (地震に関する評価—長期評価—・海溝型地震の発生可能性の長期評価)
- 11) 財団法人日本ダム協会編 (2003): ダム年鑑 2003, p. 1446-1448, 財団法人日本ダム協会, 東京
- 12) 農林水産省東北農政局 (1979): 1978 年宮城県沖地震—土地改良施設の災害と復旧—
- 13) 農林水産省東北農政局整備部 (2003): 平成 15 年宮城県沖地震・宮城県北部地震被害報告書
- 14) 仙台管区気象台 (2003): 災害時地震速報 平成 15 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震, 災害時自然現象報告 2003 年第 1 号, 対象地域 東北(東北技術だより Vol. 20 別冊), <http://www.sendai-jma.go.jp/jishin-kazan/j-miyagioki0526/SAIGAIISOKUHO20030526.pdf>
- 15) 東京大学地震研究所情報センター (2003): EIC 地震学ノート, No.135, http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/030526.html
- 16) 司宏俊・翠川三郎 (1999): 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 523 号, p. 63-70
- 17) 都築慶剛 (2002): 山王海ダムの再開発 (嵩上げ) について—ゾーン型ロックフィルダム—, ダム日本, 第 676 号, p. 39-46

Seismic Behavior of Large Dams for Irrigation by Seismic Observation Records at Off Miyagi Earthquake (2003.5.26)

MASUKAWA Susumu and NAKANISHI Norio

Summary

This paper describes the seismic behavior of 25 large dams for irrigation based on records of seismic observation at off Miyagi earthquake (2003.5.26). The seismic behavior of these dams are investigated by the loci of seismic acceleration waves on up-downstream and longitudinal directions, the relationships between maximum accelerations to upstream-downstream direction and to longitudinal direction, the relationships between input accelerations and amplification ratios of acceleration, and power spectrum of seismic acceleration waves. The main results are as follows. The upstream-downstream accelerations at crests are not always greater than those on other two directions (longitudinal and vertical direction). Seismic acceleration waves are amplified by their propagation throughout the dam body. The frequency component that corresponds to the eigen frequency of the dam body is amplified by propagation of seismic acceleration waves throughout the dam body. In the fill dam, the eigen frequency of a low frequency for power spectrum appears at the crest of dam. The eigen frequency of a higher frequency for power spectrum appears at the crest of gravity dam than these of the power spectrum at the fill dams. The dam site configuration and the rigidity of dam body and foundation influence the seismic behavior of the dam.

Key words: dam, earthquake observation, seismic behavior, maximum acceleration