

# 短周期成分が卓越する地震動の ダムに及ぼす影響検討

岩下 友也<sup>1</sup>・原 基樹<sup>2</sup>・吉永 寿幸<sup>3</sup>・山口 嘉一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所水工研究グループ 総括主任研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

E-mail: iwashita@pwri.go.jp

<sup>2</sup>独立行政法人土木研究所水工研究グループ 交流研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

E-mail: m-hara44@pwri.go.jp

<sup>3</sup>独立行政法人土木研究所水工研究グループ 交流研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

E-mail: yosina44@pwri.go.jp

<sup>4</sup>独立行政法人土木研究所水工研究グループ 上席研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

E-mail: yamaguti@pwri.go.jp

近年、地震観測網が高密度に配備され、震源近傍の地震動が観測されるようになってきた。震源近傍の地震記録では短周期成分が卓越した地震動も観測されている。本論文では、短周期成分がダムの耐震性能に与える影響を検討した。重力式コンクリートダム及びロックフィルダムについて、ダム規模やダム形状を変化させたFEMモデルを用意し、短周期成分の有無を変化させた模擬地震動や実測地震動を入力した動的解析を行った。解析の結果、入力地震動の0.1sec以下の短周期成分の大きさの違いは、規模の小さい重力式コンクリートダムでは応答に若干の違いが生じるが、ダムの耐震安全上、問題となる応答となることは少ないと評価できる。

**Key Words :** concrete gravity dam, rockfill dam, FEM analysis, nonlinear analysis, natural period, high frequency

## 1. はじめに

近年、地震観測網が高密度に配備され、震源近傍地点の地震動も観測されるようになってきた。震源近傍地点の地震記録では短周期成分が卓越した地震動も観測されている。既往のダム基礎で観測された最大加速度100gal 以上を記録した地震動（水平方向）を図-1 に示す。総じて、最大加速度が 500gal 程度以下の観測地震動では加速度応答スペクトルが周期 0.1~0.2sec 程度より短周期域では、周期低下とともにスペクトルは低減する傾向である。しかし、近年、ダムへの地震計の配備が進み、震源付近における記録も観測されるようになってきた。それらの記録の加速度スペクトルでは周期 0.1sec 以下の短周期成分が卓越し、それによって最大加速度が大きな地震加速度記録が観測されている。

そこで、短周期成分の大きさが異なる入力地震動がダム（重力式コンクリートダムとロックフィルダム）に与える影響について解析的検討を実施した。

「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」

<sup>1)</sup>（国土交通省河川局：2005年3月策定）において、ダ

ム本体の耐震要求性能として、ダムの貯水機能が維持されること、及び生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることの2点を満足することと定めている。同指針（案）における耐震性照査は、ダムの損傷過程に踏み込んだ解析手法を用いることとしている。そこで、本検討においても、レベル2地震動に対する照査解析手法を用いた。

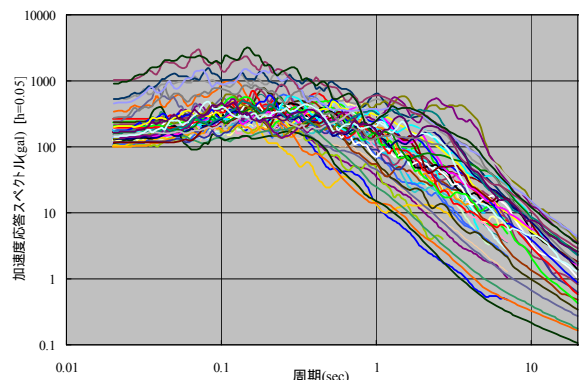


図-1 ダム基礎で観測された地震動の水平加速度応答スペクトル（文献2）に近年の地震記録を追加（最大加速度 100gal 以上、1974~2008）

## 2. 重力式コンクリートダム

### (1) 重力式コンクリートダムの耐震性能照査

重力式コンクリートダムのレベル2地震動に対する耐震性能照査項目として、最もクリティカルになることが多いのは引張破壊による亀裂の進展である。照査手順としては、まず、線形動的解析を行い、地震時にダム本体に発生する引張応力が堤体コンクリートの引張強度を超えない場合は所要の耐震性能が確保されていると判断する。引張強度に達し損傷する恐れがある場合は、非線形動的解析を行い、その結果、ダム本体に損傷が生じて、それが限定的かつ補修可能な範囲に留まる場合は、耐震性能が確保されていると判断する。具体的には、非線形解析により求まる引張亀裂がダム堤体の上下流面間に連続しなければ貯水機能は維持できると判断している。

### (2) 解析モデル

#### a) モデルの諸元

非線形のFEM解析モデルは、ダム高25m, 50m, 100m, 150m, ダム形状をフィレットなし、フィレット勾配1:0.5モデルとし、表-1、図-2に解析モデルの主要諸元を示す。

堤体コンクリートの引張破壊については、分布型ひび割れモデルにより表現した。図-3 に概念図を示す。コンクリートに引張応力が発生すると、大小様々な幅のクラックが発生するものと考えられるが、分布型ひび割れモデルでは、引張破壊後もコンクリートを連続体として扱い、クラック幅を要素のひずみとして評価する。

#### b) 物性値

解析には、一般的な重力式コンクリートダムの物性値を用いることとし、用いた物性値を表-2に示す。減衰マトリックスは、以下の減衰型を用いた。

$$\text{Rayleigh 減衰} : [C] = [M] + [K] \quad (1)$$

$$\text{瞬間剛性比例型減衰} : [C(t)] = [K(t)] \quad (2)$$

ここに、 $[C]$ ：減衰マトリックス、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[K]$ ：剛性マトリックス、 $t$ ：時刻、および対象とする構造物の支配的な固有振動数に対する減衰定数を設定して定める係数である。

本解析で使用する減衰マトリックスは、ダムの動的解析で多く使われている Rayleigh 減衰(式(1))を基本とするが、2.4 項の入力地震動の短周期成分の影響検討解析については、クラックが発生した場合に、そのクラック発生要素の分散が起こりにくく、クラック進展が促進されやすいとされる式(2)で表される瞬間剛性比例型減衰<sup>3)</sup>を用いた。また、コンクリートの引張軟化曲線は、図-4 に示す 2 直線近似型を用いることとし、解析結果の図は折れ点に相当するクラック変位(ひび割れ幅)で色分けして表現する。

表-1 解析モデル諸元一覧

項目	大別	細別
ダム上流面勾配	鉛直	
ダム下流面勾配	1:0.8	
ダム高	25m, 50m, 100m, 150m	
ダム形状	フィレットなし、フィレット 1:0.5	
フィレット 取付標高 (ダム高×0.3)	ダム高 25m	7.5m
	ダム高 50m	15m
	ダム高 100m	30m
	ダム高 150m	45m
貯水位 (ダム高×0.8)	ダム高 25m	20m
	ダム高 50m	40m
	ダム高 100m	80m
	ダム高 150m	120m

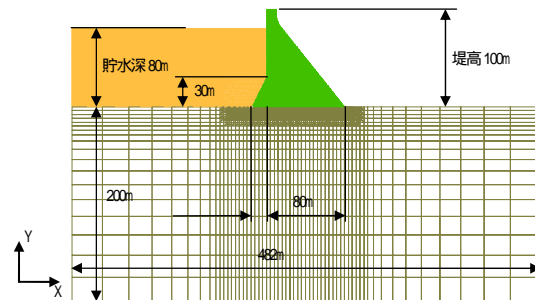


図-2 解析モデル

(ダム高100m フィレット勾配1:0.5の場合)

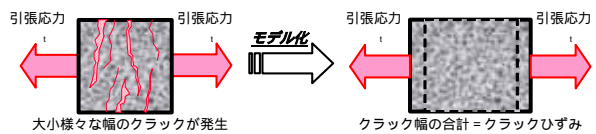


図-3 分布型ひび割れモデルの概念

表-2 解析に用いる材料物性値

材料物性	堤体	岩盤	貯水
単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	2,300	2,300	1,000
弾性係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	29,000	40,000	
ポアソン比	0.2	0.3	
減衰定数 h (%)	Rayleigh 減衰および瞬間剛性比例型 10%	5%	
引張軟化開始応力 f <sub>t</sub> (MPa)	2.8		
破壊エネルギー G <sub>f</sub> (N/m)	400		
引張軟化曲線	2 直線近似		

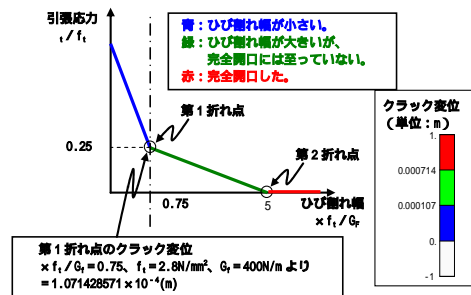


図-4 引張軟化曲線の設定

(3) 固有周期とモード応答特性

重力式コンクリートダムモデルの振動モード図を図-5に示す。また、図-6は、振幅100gal、周期を各次モード振動数とした正弦波加速度波形を入力した場合の第1主応力（引張側主応力）分布の解析結果を示す。

振動モード別にみると、応力に及ぼす影響としては1次モードが圧倒的に大きく、上流面では堤趾部とフィレット取付部、下流面は全面に大きな引張応力が作用している。堤体の引張応力は、堤体の1次固有周期に一致する周期成分の入力地震動の影響が大きい。しかし、堤体の高標高部の下流面では、1次モードでの発生応力が一番大きいものの、2次モードも大きくなっている。2次モード以上の高次数振動モードの影響域は、高標高部に限られると言える。

本検討で使用するダムモデルの固有周期を表-7に示

す。また、ダムモデルのダム高と1次の固有周期の関係を図-7に示す。同図は、実ダムの地震記録解析から算出した固有周期<sup>4)</sup>及び楔形の片持梁（満水位状態）の弾性振動の理論解を併記した。本検討で使用したダムモデルの固有周期は、実ダムの固有周期とほぼ一致し、振動特性をよく表しているといえる。25mモデルは、1次固有周期が0.1sec以下の短周期領域に入る。同様に、ダム高50mでは2次以上の高次数固有周期が、ダム高100mでは3次以上の高次数固有周期が0.1sec以下となる。

ダム高が低いほど低次の固有周期が短周期領域となることから、応答は短周期成分の影響を受けやすいことが考えられる。また、ダム高が高くなるほど、固有周期は長周期となることから、入力動の短周期成分の影響は少なくなると考えられる。このため、本検討では、ダム高25m,50m,および100mモデルを解析対象とした。

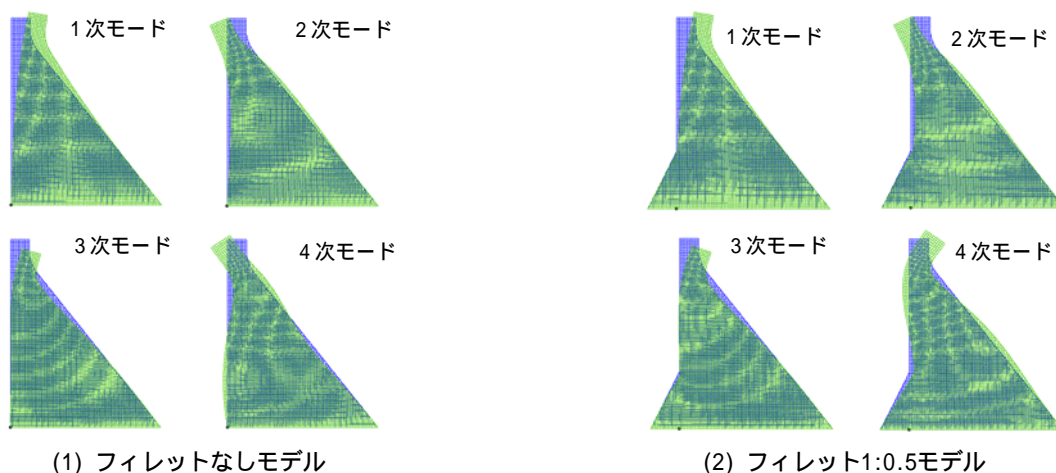


図-5 振動モード

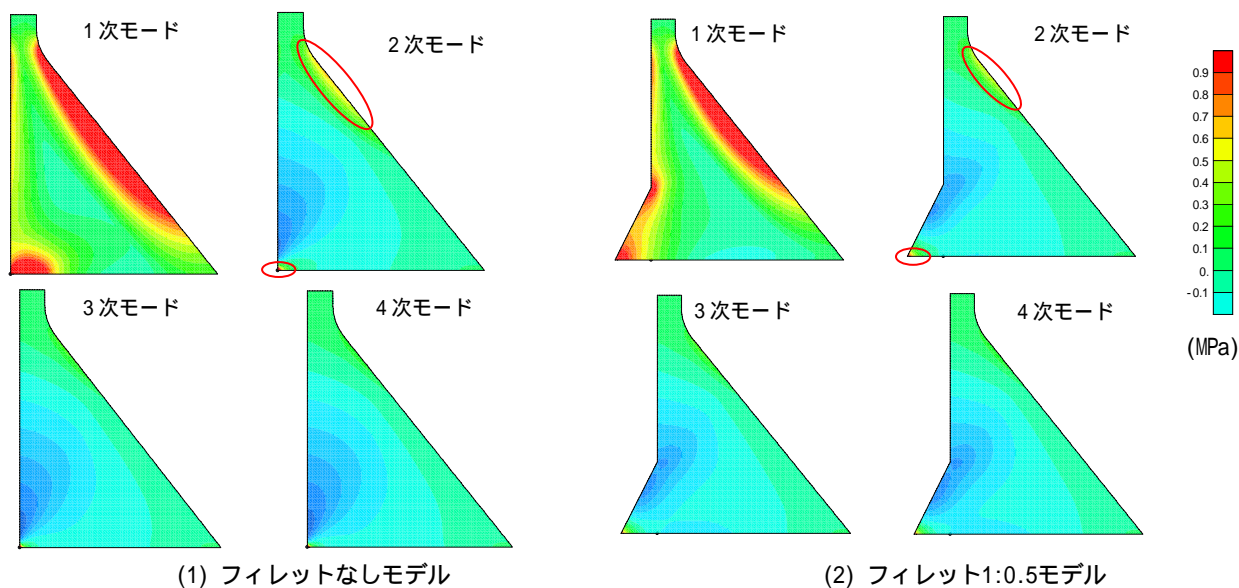


図-6 正弦波加速度(100gal振幅)入力結果による応力分布（第1主応力:引張側）（ダム高100mモデルの例）

表-7 重力式コンクリートダム固有周期 (1 ~ 6次)

(1) フィレットなしモデル (単位: sec)

次数	ダム高25m	ダム高50m	ダム高100m	ダム高150m
1	0.060	0.119	0.239	0.345
2	0.028	0.056	0.112	0.161
3	0.020	0.040	0.081	0.119
4	0.016	0.031	0.063	0.093
5	0.010	0.020	0.041	0.061
6	0.009	0.018	0.037	0.055

(2) フィレット勾配1:0.5モデル (単位: sec)

次数	ダム高25m	ダム高50m	ダム高100m	ダム高150m
1	0.055	0.109	0.219	0.315
2	0.026	0.053	0.106	0.154
3	0.020	0.039	0.079	0.116
4	0.015	0.030	0.060	0.090
5	0.010	0.020	0.040	0.061
6	0.009	0.019	0.037	0.055

網掛: 固有周期が0.1sec以下のもの

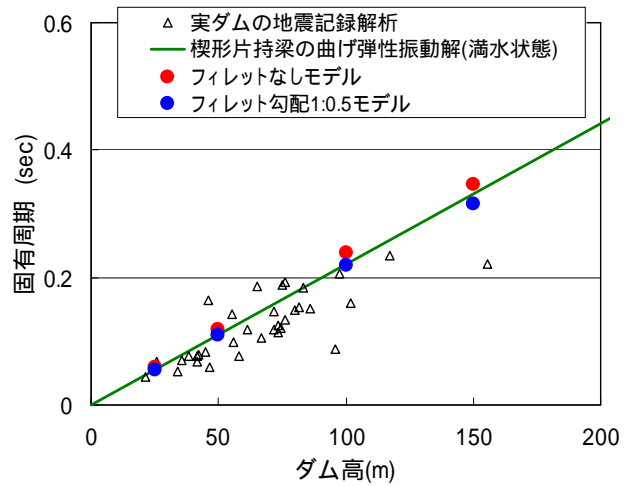


図-7 重力式コンクリートダムのダム高と1次固有周期の関係

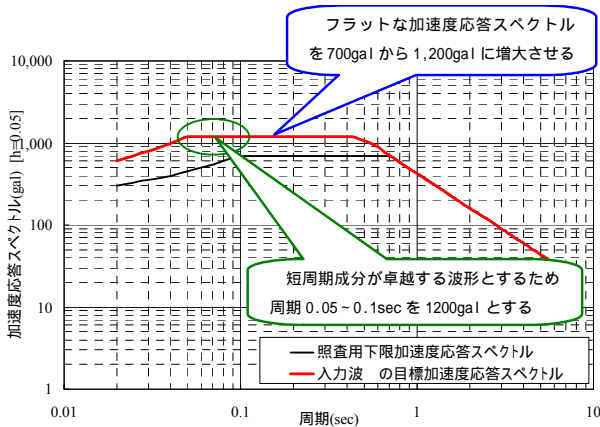


図-8 入力波の目標加速度応答スペクトル

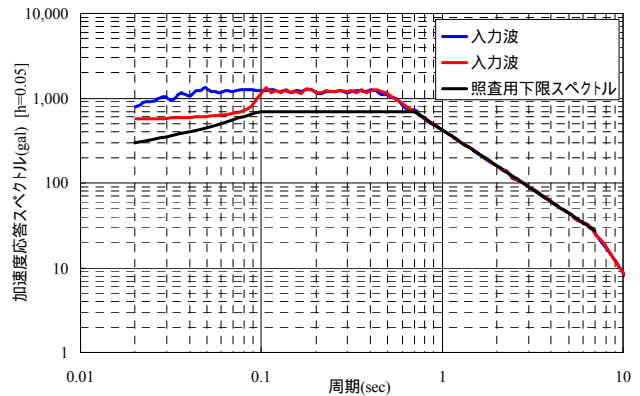


図-10 入力波の加速度応答スペクトル(入力波 と対比)

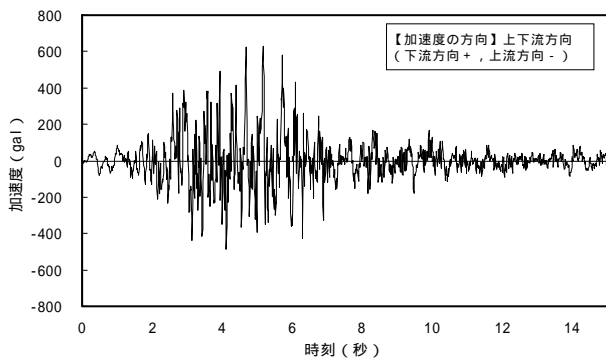


図-9 入力波の加速度時刻歴波形

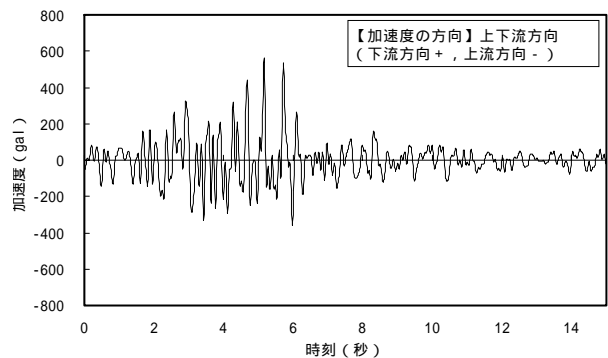


図-11 入力波の加速度時刻歴波形

#### (4) 入力地震動

検討に用いる入力地震動の設定に際しては、ダムの耐震性能照査において、レベル2地震動の設定に当たって最低限レベルの地震動として、「照査用下限加速度応答スペクトル」<sup>1)</sup>を定めていることからこのスペクトルをベースとして作成することとした。なお、このスペクトルは地震の震源となる活断層が地表面に現れていなくても、ダム地点の直下で地震が発生する可能性を考慮して

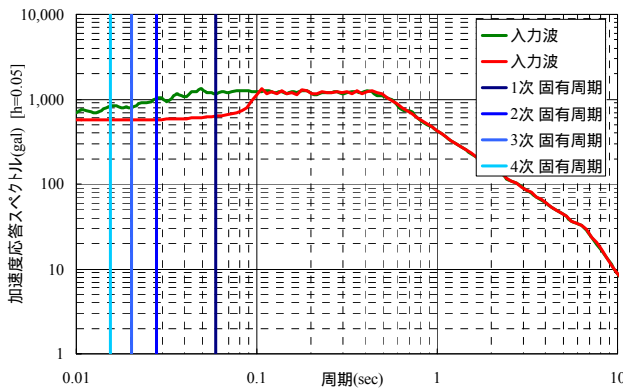
定められたものである。入力地震動の周波数影響を堤体応答として明瞭に見るため、照査用下限加速度応答スペクトルのフラット部を700galから1,200galに増幅させた。さらに、図-10のように数100gal程度の加速度応答スペクトルでは、0.1~0.2sec程度より短周期側では、短周期側になるにつれスペクトルも減少傾向を示す。そこで短周期領域である0.05~0.1secの領域まで1,200galのスペクトルフラット部を延伸させ、短周期成分を卓越させた

目標スペクトル(図-8)を有する「入力波」を作成した。

ダム地震記録としては、比較的震源の近くで観測された記録である2008年岩手・宮城内陸地震時の荒砥沢ダムのダム基礎で観測された地震動を原種波形として、図-8の目標スペクトルにフィッティングさせて作成した加速度時刻歴波形が入力波であり、図-9に示す。

入力波は、短周期成分が応答応力へ及ぼす影響を比較検討するため、「入力波」に対し、短周期成分(10Hz以上,0.1sec以下)を式(3)のフィルタ $w(f)$ で除去した加速度時刻歴波形(図-11)とした。入力波の加速度応答スペクトルを図-10に示す。

$$\begin{cases} w(f) = 1 & < 10\text{Hz} \\ w(f) = 0 & 10\text{Hz} \end{cases} \quad (\text{ローパスフィルタ}) \quad (3)$$



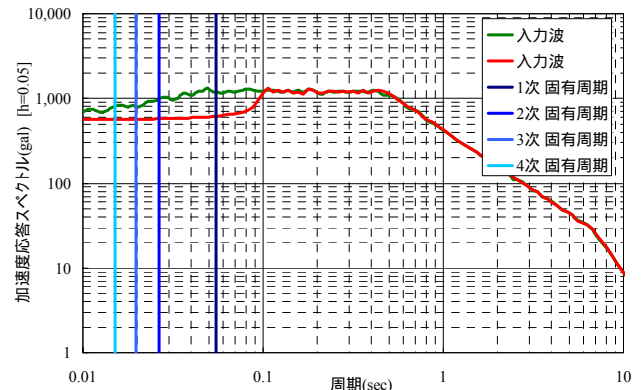
(1) ダム高25m フィレットなしモデル

(5) 入力地震動の短周期成分の影響検討

a) ダム高 25m モデル

ダム高25mモデルの固有周期と入力波及び入力波の加速度応答スペクトルとの関係を図-12に示す。堤体の1次固有周期が0.1sec以下の短周期となり、入力波は、入力波に比べ、1次の固有周期域も含めて加速度応答スペクトルが小さくなっている。

ダム高25mモデルにおける入力波及び入力波の応答解析結果を表-8, 表-9に示す。入力波及び入力波の両方とも引張強度をこえるような大きな応力が発生していない。ただし、引張側主応力分布は、堤踵部や堤体下流面に違いが生じている。これは、入力波が入力波に比べて入力波の1次固有周期における加速度応答スペクトルが大きく、1次モードの応答が大きいためである。しかし、ダム高が小さいダムに発生する引張応力は、ダム高の大きなダムに比べて総じて小さく、ダムの耐震性に問題ないと考えられる。



(2) ダム高25m フィレット勾配1:0.5モデル

図-12 入力波及び入力波の加速度応答スペクトルとダム高25mモデルの固有周期の関係

表-8 動的解析結果(ダム高 25m フィレットなし)

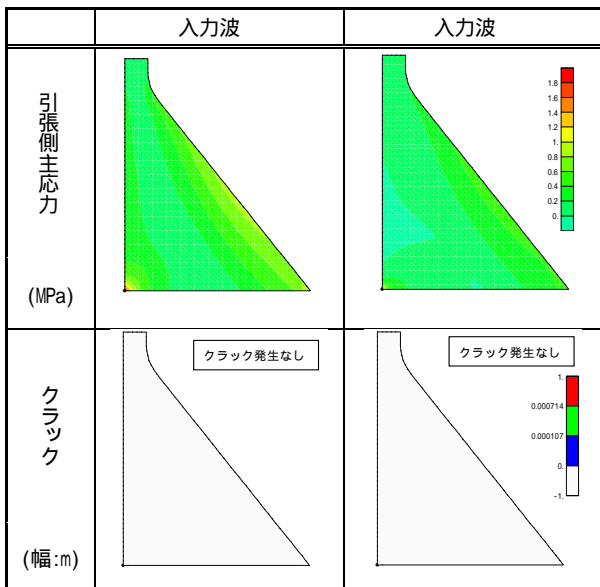
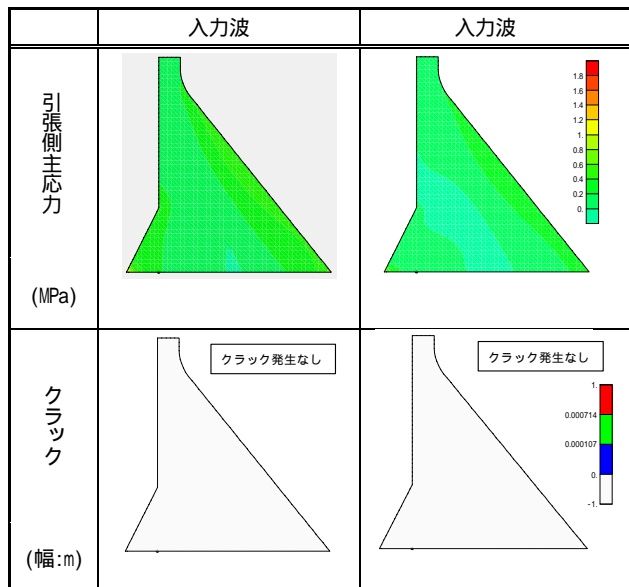


表-9 動的解析結果(ダム高 25m フィレット 1:0.5)



b) ダム高 50m モデル

ダム高50mモデルの固有周期と入力波 及び入力波 の加速度応答スペクトルとの関係を図-13に示す。堤体の1次固有周期においては、入力波 及び入力波 の加速度応答スペクトルに違いはないが、2次以降の高次の固有周期においては入力波 のフィルタカットの影響が生じる。

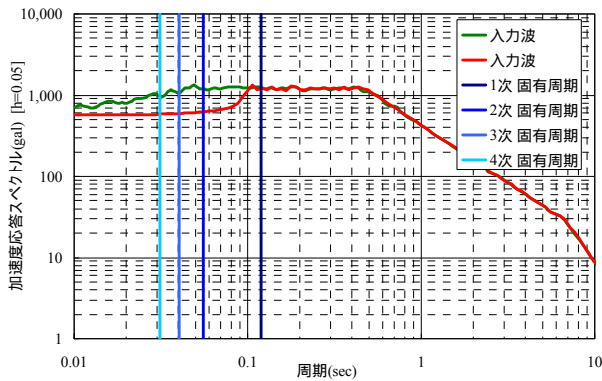
入力波 及び入力波 の応答解析結果を表-10、表-11に示す。入力波 及び入力波 は、2次以降の高次の固有周期における加速度応答スペクトルに大きな違いがあるが、全体として引張側主応力分布、クラック図は、ともに入力波 と入力波 とで大きな違いがない。

ダム高50m級ダムでは、ちょうど1次固有周期は、0.1sec程度以上となり、入力波の短周期成分(周期0.1sec程度以下)の影響はほとんどみられない。

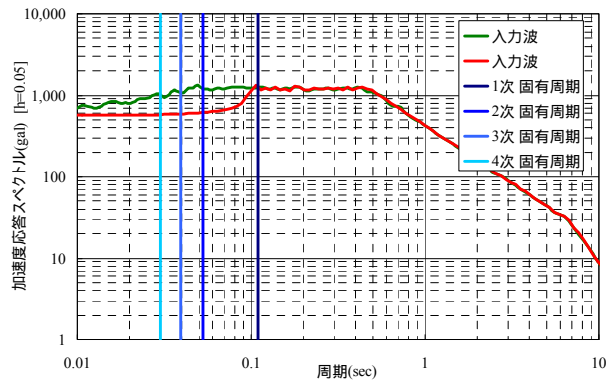
c) ダム高 100m モデル

ダム高 100m の固有周期と入力波 及び入力波 の加速度応答スペクトルとの関係を図-14 に示す。ダム高 100m モデルでは1, 2次固有周期は、0.1sec 程度以上であり、入力波 でフィルタカットした 0.1sec 以下の短周期成分は、ダムモデルの3次以上の高次固有周期に限られる。

入力波 と入力波 の解析結果を表-12、表-13 に示す。ダム高 100m 級の高いダムにレベル2地震動としてかなりの高レベルの地震動である入力波 及び入力波 が入力されたので、堤踵部と下流面に大きな引張応力が発生したが、入力波 と入力波 で大きな違いがなく、3次以上の高次振動モードによる応答応力への影響は、殆どみられない。下流面及び堤踵部に引張クラックが生じるが、貯水機能は維持できると判断できる。



(1) ダム高50m フィレットなしモデル



(2) ダム高50m フィレット勾配1:0.5モデル

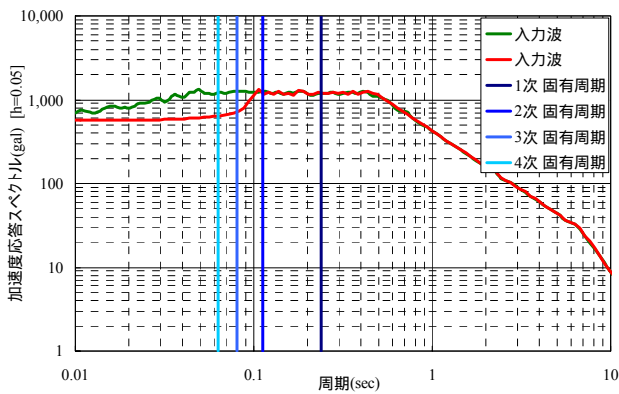
図-13 入力波 及び入力波 の加速度応答スペクトルとダム高50mモデルの固有周期の関係

表-10 動的解析結果(ダム高 50m フィレットなし)

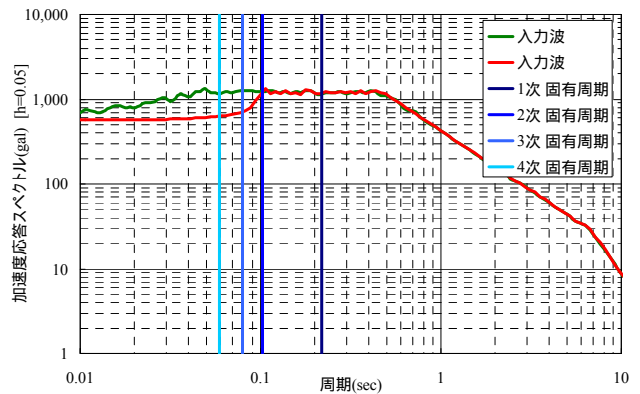
	入力波	入力波
引張側主応力 (MPa)		
クラック (幅:m)		

表-11 動的解析結果(ダム高 50m フィレット 1:0.5)

	入力波	入力波
引張側主応力 (MPa)		
クラック (幅:m)		



(1) ダム高100m フィレットなしモデル



(2) ダム高100m フィレット勾配1:0.5モデル

図-14 入力波 , 入力波 の加速度応答スペクトルとダム高 100m モデルの固有周期の関係

表-12 動的解析結果(ダム高 100m フィレットなし)

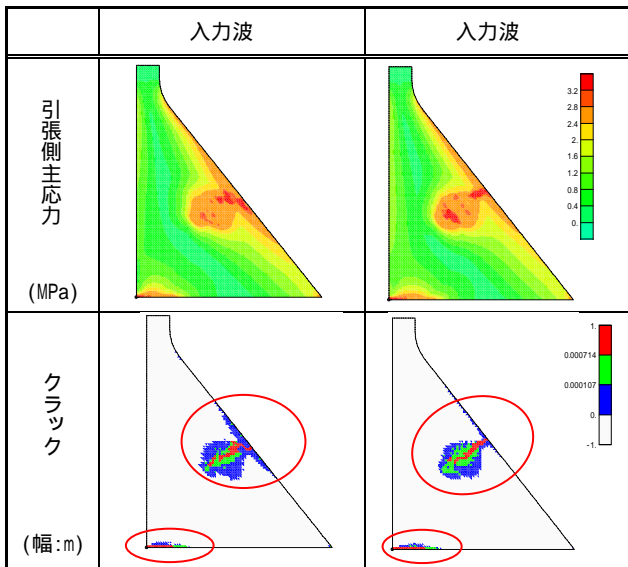
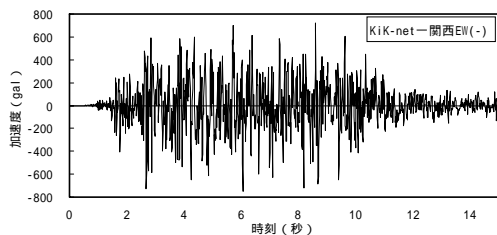
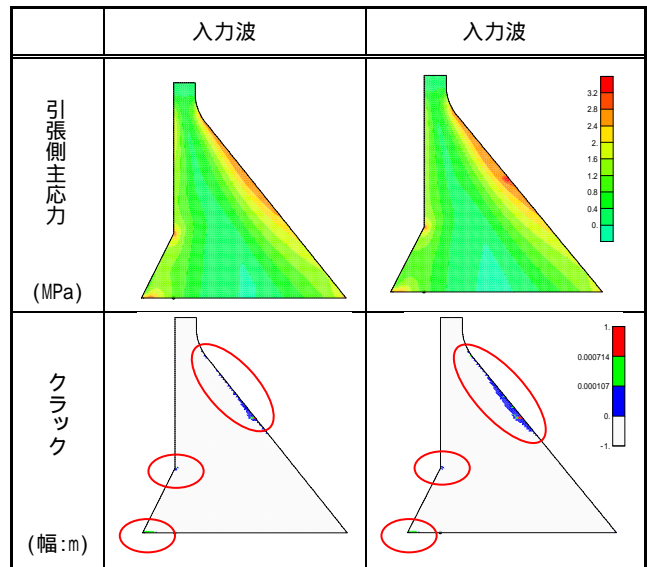
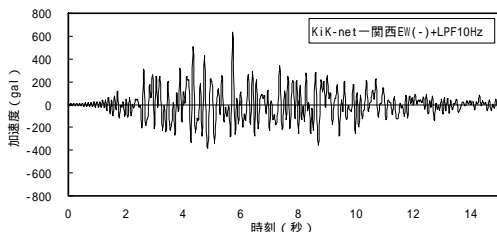


表-13 動的解析結果(ダム高 100m フィレット 1:0.5)



(1) KiK-net-関西波(EW-) (最大-748gal) : 水平方向



(2) KiK-net-関西波(EW-) + LPF10Hz

(最大-638gal) : 水平方向

図-15 実測地震動に対する検討で使用した地震加速度時刻歴波形

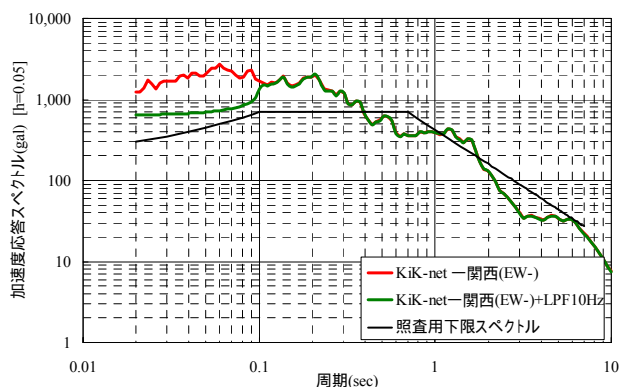


図-16 KiK-net-関西波(EW-)とKiK-net-関西波(EW-)+LPF10Hz 波の加速度応答スペクトル

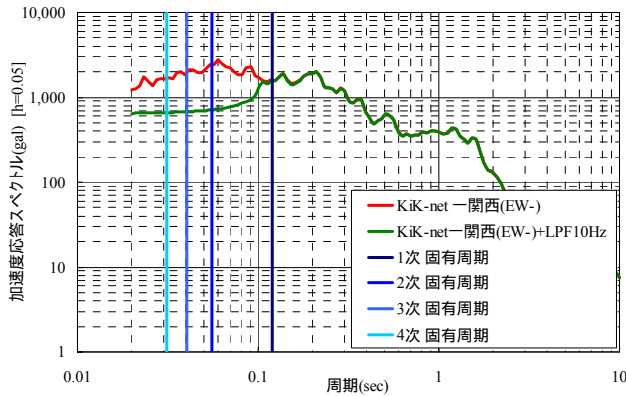
(6) 短周期成分が卓越する実測地震動を用いた検証

短周期成分の卓越する実測地震動によって重力式コンクリートダムへの影響を検証する．実測地震動としては、2008年岩手・宮城内陸地震におけるKiK-net-関西地点

の地中260m深で観測された記録を用いた。設置標高では、S波速度1,810m/sの地盤であり、ダム基礎と同程度の岩盤といえる。当地点は震央から3kmの距離にあり、マグニチュード7.2規模の地震断層のごく近傍であった。そのため、EW成分では加速度応答スペクトル ( $h=0.05$ ) が0.1sec以下の短周期域で2,000galを超えるほど短周期成分が非常に卓越した地震動である(図-16参照)。

a) 入力地震動

入力地震動は、KiK-net一関西波のうち、最も応答加速度が大きくなるEW反転波(以下、KiK-net一関西波(EW-)という)と10Hz以下に対しローパスフィルタを実施した波(以下、KiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hzという)とした。図-15に使用した入力加速度時刻歴を、図-16に加速度応答スペクトルを示す。

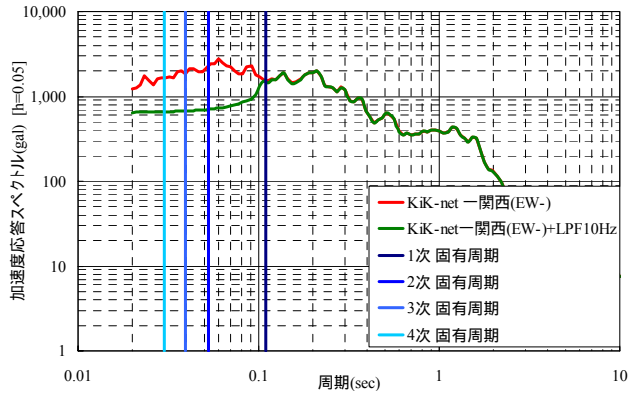


(1) ダム高50m フィレットなしモデル

b) ダム高 50m の場合

ダム高50mモデルの固有周期とKiK-net一関西波(EW-)及びKiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hzの応答スペクトルとの関係を図-17に示す。堤体の2次以降の高次固有周期が0.1sec以下の短周期となり、KiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hzは、KiK-net一関西波(EW-)に比べ、2次以降の高次の固有周期における加速度応答スペクトルが小さい。

ダム高50mの解析結果を表-14、表-15に示す。2つの入力波形は、2次以降の高次固有周期に対応する加速度スペクトルの違いがあり、堤体高標高部付近で引張応力が異なる結果となった。KiK-net一関西波(EW-)は、短周期の加速度スペクトルが非常に大きいため、2次以降の高次振動モード応答の影響が大きく現れたためと考えられる。しかし、堤体高標高部の応力発生状況の違いは、大きなものではなく、大きな引張亀裂を生じさせるほどの応力レベルではない。



(2) ダム高50m フィレット勾配1:0.5モデル

図-17 KiK-net一関西波(EW-)及びKiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hz波の加速度応答スペクトルとダム高50mモデルの固有周期の関係

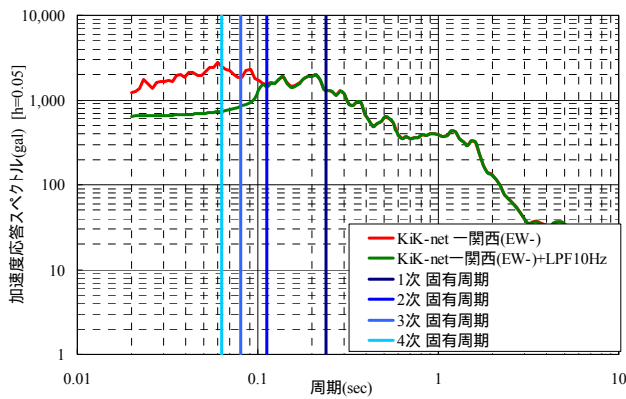
表-14 動的解析結果(ダム高 50m フィレットなし)

	KiK-net 一関西波(EW-)	KiK-net 一関西波(EW-) + LPF10Hz
引張側主応力 (MPa)		
クラック (幅:m)		

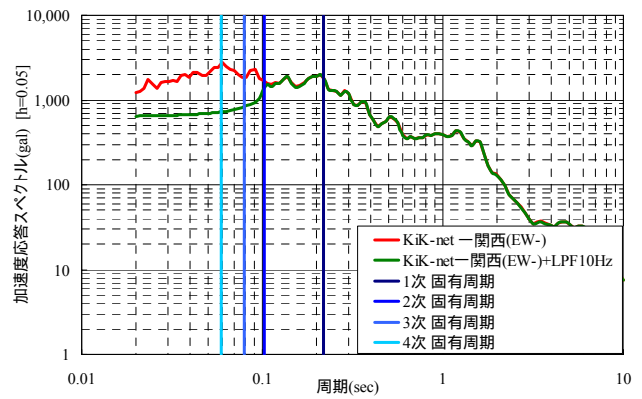
表-15 動的解析結果(ダム高 50m フィレット 1:0.5)

	KiK-net 一関西波(EW-)	KiK-net 一関西波(EW-) + LPF10Hz
引張側主応力 (MPa)		
クラック (幅:m)		





(1) ダム高100m フィレットなしモデル



(2) ダム高100m フィレット勾配1:0.5モデル

図-18 KiK-net一関西波(EW-)及びKiK-net一関西波(EW-)+LPF10Hz波の加速度応答スペクトルとダム高100mモデルの固有周期の関係

表-16 動的解析結果(ダム高100m フィレットなし)

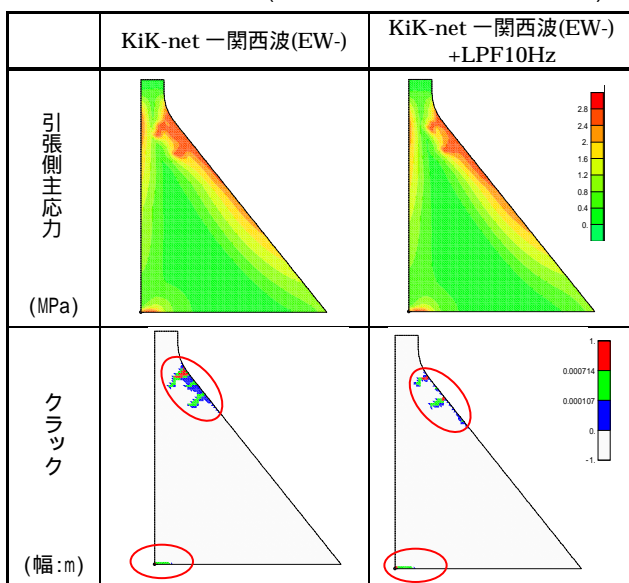
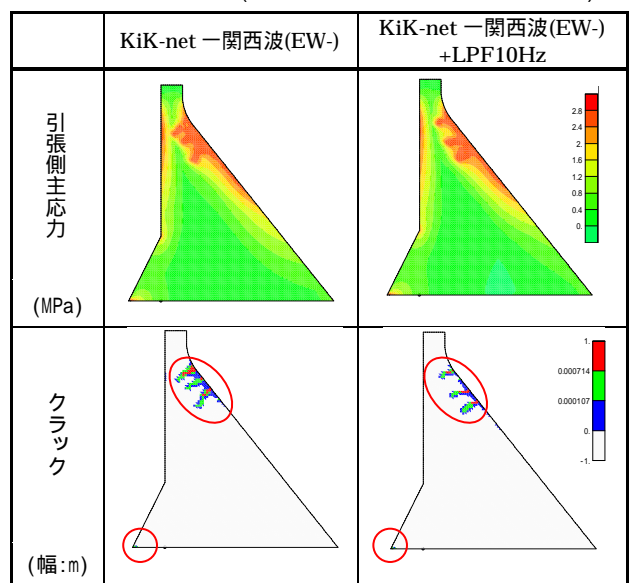


表-17 動的解析結果(ダム高100m フィレット1:0.5)



c) ダム高100mの場合

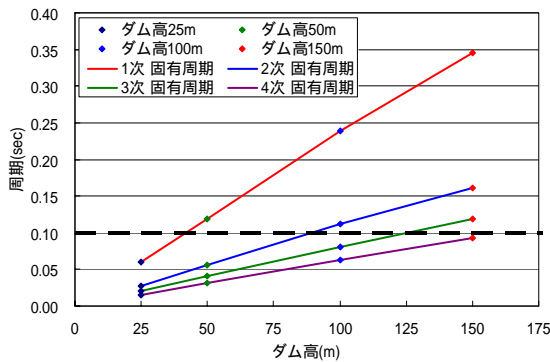
ダム高100mモデルの固有周期とKiK-net一関西波(EW-), KiK-net一関西波(EW-)+LPF10Hzの応答スペクトルとの関係を図-18に示す. 堤体の2次の固有周期が0.1sec程度であり, KiK-net一関西波(EW-)+LPF10Hzは, KiK-net一関西波(EW-)に比べ, ダム堤体の3次以降の固有周期における加速度応答スペクトルが小さくなっている. ダム高100mの解析結果を表-16,表-17に示す. 堤体高標高部で引張側応力分布, クラック分布に若干の違いが生じた. これは, ダム高50mモデルと同様, KiK-net一関西波(EW-)は, 短周期域の加速度スペクトルが非常に大きいため, 高次振動モードによる応答の影響が現れたためと考えられる. クラックが生じているが, 貯水機能は維持できると判断できる.

(7) 重力式コンクリートダムのおまとめ

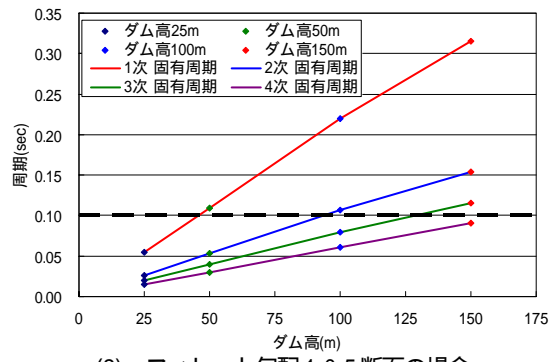
ダム高25,50,100mモデルに対し, レベル2地震動以上

程度の大きな地震動を与えてFEM応答解析を実施した. 短周期の加速度応答スペクトルが卓越する地震動と短周期成分をフィルタ削除した地震動の応答解析結果を比較すると, ダム高50m,100mについては, 入力地震動の0.1sec以下の短周期成分の違いは, 応答応力, クラックの程度への影響は殆どない結果となった. また, ダム高25mでは0.1sec以下の短周期における加速度応答スペクトルの大きさによって, 高標高部の応答応力分布に違いがみられたが, 概して発生応力は引張強度より小さい結果となった.

堤体に作用する応力は, 特に1次振動モードが高次振動モードに比べ圧倒的に大きく寄与する. ダム高と固有周期の関係を図-19に示す. 1次固有周期は, 概ねダム高40m, 2次固有周期は概ねダム高90m以下の低いダムにおいて, 0.1sec以下の短周期領域となっている. ダム高が低いほど, 短周期成分の大きさの違いが応答応力の大きさの影響を受けることになる. しかし, ダム高



(1) フィレットなし断面の場合



(2) フィレット勾配 1:0.5 断面の場合

図-19 ダム高と固有周期の関係(重力式コンクリートダム)

が低いほど堤体内に生じる応答応力値は相対的に小さく、重力式コンクリートダムの耐震安定上、入力地震動の短周期成分は、殆ど問題とならないと考えられる。

しかし、短周期成分が非常に大きい加速度レベルの地震動の場合は、ダムの応答応力に最も影響する1次モードには影響しないが、高次振動モードによる応答には若干の影響があり、ダム堤体の高標高部の引張応力が若干大きくなる。

### 3. ロックフィルダム

フィルダム本体のレベル2地震動に対する耐震性能照査は、地震動による永久変形量を求め、変形に伴う沈下が貯水の越流を生じるおそれがないほどに小さく、かつ、地震後において浸透破壊を生じるおそれがないことを確認する。一般的な手順としては、動的解析と塑性変形解析を組み合わせた方法などにより、すべり変形量などの塑性変形量を算出する。

本章では、特に不連続なせん断破壊面を生じるすべり変形に着目し、前章の重力式コンクリートダムで用いた短周期成分の大きさが異なる入力地震動を用いて、フィルダムに与える影響について解析的検討を実施した。

#### (1) 解析条件

動的解析は、複素応答法による等価線形解析により行い、地震時の堤体応答を求めた。塑性変形解析は、動的解析の結果から想定すべり土塊の平均応答加速度の時刻歴を求め、Newmark法<sup>5),6)</sup>の考え方にに基づきすべり変形量を算出した。

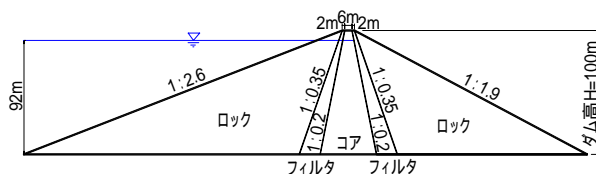


図-20 解析モデル(ダム高100mの場合)

#### a) 解析モデルの諸元

解析モデルは、堤体のみをモデル化した中央土質遮水壁型ロックフィルダムとした。ロックフィルダムの固有周期は、後述するが、重力式コンクリートダムのそれより長く、明らかに0.1sec以下の短周期成分の入力地震動の影響は小さいと考えられるので、ダム高は25m及び50mの2種類とした。

堤体の上下流面勾配は、我が国の中央土質遮水壁型ロックフィルダムの標準的な堤体材料と考えられる七ヶ宿ダムを基本とし、現行の設計法である震度法によるすべり安全率1.2以上をダム高100mとした場合に、ぎりぎり満たす上流側1:2.6, 下流側1:1.9とした。コア勾配は我が国の中央土質遮水壁型ロックフィルダムのコアの一般的な値である1:0.2, 天端幅はダム高に関係なく10mとし、コア幅6m, フィルタ幅2mとした。貯水位は常時満水位相当を想定し、ダム高の92%とした。解析モデルの概要図を図-20に、解析モデルの諸元を表-18に示す。

#### b) 物性値

解析に用いた物性値は、七ヶ宿ダムの設計値や材料試験値<sup>7),8)</sup>を基本に設定した。解析に用いた堤体材料の物性値を表-19に示す。表中のA, bは、ロック材料やフィルタ材料などの粗粒材料のせん断強度の拘束圧依存性を表すため、三軸圧縮試験から得られた複数のモール円の破壊包絡線を  $\tau = A(\sigma_n)^b$  というべき関数で表現した場合の定数である。ここに、 $\tau$  はせん断強度で、 $\sigma_n$  は想定すべり面に垂直な有効応力である。

堤体材料のせん断剛性及び減衰率とせん断ひずみとの関係を図-21に示す。なお、初期せん断剛性 $G_0$  (kN/m<sup>2</sup>) は、次式<sup>7)</sup>より算出した。

表-18 解析モデルの諸元

ダム高		25m	50m
法面勾配	上流側	1:2.6	
	下流側	1:1.9	
コア勾配		1:0.20	
フィルタ勾配		1:0.35	
天端幅		10m (コア幅: 6m、フィルタ幅: 2m)	
貯水位		23m	46m

(ロック)

$$G_o = 5,820 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.6} \quad (4)$$

(フィルタ・コア)

$$G_o = 2,380 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.7} \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{1 + 2K}{3} \rho \cdot g \cdot D \quad (6)$$

ここで、 $e$ :間隙比、 $\sigma_m$ :平均有効主応力(kN/m<sup>2</sup>)、 $K$ :主応力比、 $\rho$ :密度(t/m<sup>3</sup>)、 $g$ :重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)、 $D$ :層厚(m)である。

また、本検討の等価線形解析は堤体のみをモデル化しているため、基礎地盤でのエネルギー逸散を等価逸散減衰率として、材料減衰率に一律15%を上乗せした。

### c) 解析ケース

解析ケースは1つのダム高に対して、短周期成分に違いのある2種類の入力地震動とし計4ケースとした。入力地震動については、「2.重力式コンクリートダム (4) 入力地震動」と同じく、入力波 及び入力波 を用いた。解析ケースの一覧表を表-20に示す。

### d) 想定すべり円弧

Newmark 法によるすべり変形量解析の対象とした想定すべり円弧は、一般に水位のある上流側が下流側に比べてすべり変形量が大きいので、図-22 に示す上流側 20 円弧とした。(a) ~ (d) の4つの円弧グループにおいて、それぞれの円弧の無次元高さ  $y/H$  を 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 とした5円弧を設定した。ここに、 $y$  は天端からすべり円弧最深部までの深さである。

## (2) ダムモデルの固有周期

各ダム高におけるロックフィルダムモデルの初期剛性の固有周期と、各入力地震動による等価線形解析における剛性低下時の固有周期を表-21に示す。ダムモデルの1次固有周期とダム高の関係を図-23に示す。同図には、実ダムにおける地震記録のスペクトル解析及び起振実験による1次固有周期を併記した。ダムモデルの固有周期は、実ダムの固有周期とほぼ一致し、振動特性をよくモデル化しているといえる。

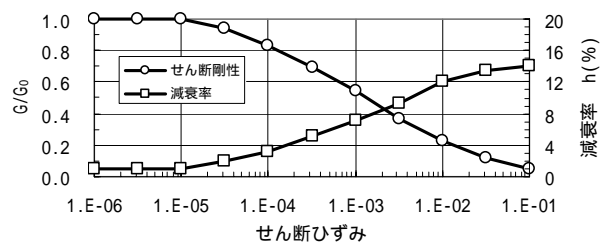
ダム高25m及びダム高50mの固有周期と入力波 及び入力波 の応答スペクトルとの関係を図-24に示す。固有周期はダム高が低いほど短周期側に位置し、固有周期の最も短いダム高25mでも1~3次の固有周期は0.12~0.23secであり、ロックフィルダムについては、その振動応答特性として、0.1sec以下の短周期成分の大きさの

影響が小さいと考えられる。アースダムについては、一般に同程度のダム高のロックフィルダムより固有周期は大きいので、短周期成分の入力地震動の影響をみる本検討ではロックフィルダムのみを対象とした。

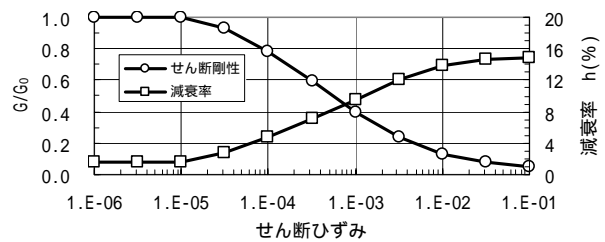
表-19 解析に用いた堤体材料の物性値

堤体材料	ロック材料	フィルタ材料	コア材料
湿潤密度 $\rho_t$ (t/m <sup>3</sup> )	1.94	2.13	2.22
飽和密度 $\rho_{sat}$ (t/m <sup>3</sup> )	2.15	2.24	2.23
間隙比 $e$	0.326	0.330	0.330
ポアソン比 $\nu$	0.35	0.35	0.35
粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	0
内部摩擦角 (°)	-	-	35
せん断強度に関する定数 <sup>1)</sup>	A	1.778	1.000
	b	0.804	0.902

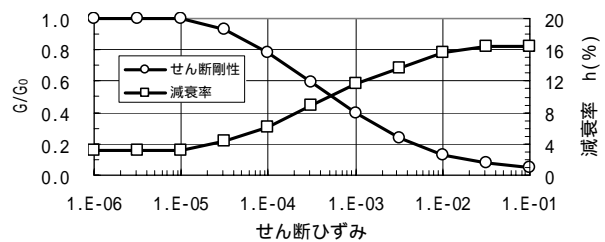
<sup>1)</sup>応力の単位系として kgf/cm<sup>2</sup> を用いた場合の値



(a) ロック材料



(b) フィルタ材料

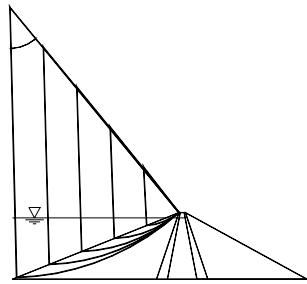


(c) コア材料

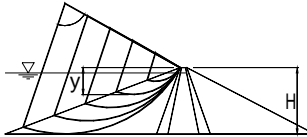
図-21 堤体材料のせん断剛性及び減衰率のせん断ひずみ依存性

表-20 模擬地震動に対する解析ケース

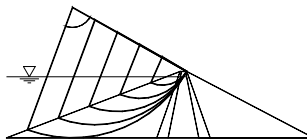
ケース	ダム高	入力地震動
1-1-1	25m	入力波
1-1-2		入力波
2-1-1	50m	入力波
2-1-2		入力波



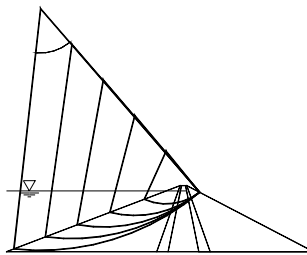
(a) ロック部分のみを通る浅い円弧



(b) ロック部分のみを通る深い円弧



(c) 天端を始点としコアを切る円弧



(d) 下流側斜面を始点としコアを切る円弧  
図-22 検討の対象とした想定すべり 20 円弧

表-21 ロックフィルダムの固有周期

(a) ダム高 25m

次数	初期剛性	等価線形解析による剛性低下時	
		入力波	入力波
1	0.228 sec	0.311 sec	0.310 sec
2	0.145 sec	0.202 sec	0.202 sec
3	0.123 sec	0.172 sec	0.172 sec

(b) ダム高 50m

次数	初期剛性	等価線形解析による剛性低下時	
		入力波	入力波
1	0.354 sec	0.487 sec	0.486 sec
2	0.226 sec	0.316 sec	0.316 sec
3	0.196 sec	0.272 sec	0.271 sec

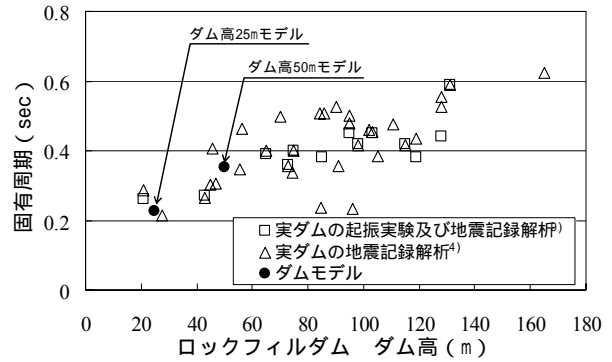


図-23 ロックフィルダムのダム高と固有周期の関係

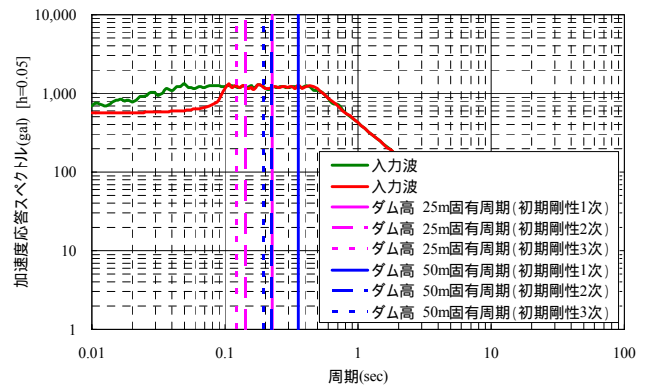


図-24 入力波 及び入力波 の加速度応答スペクトルとダム高 25m モデル及びダム高 50m モデルの固有周期の関係

### (3) 入力地震動の短周期成分の影響の検討

すべり変形量の算出結果として、円弧の無次元高さ ( $y/H$ ) とすべり変形量との関係を図-25に、ダム高25mにおける水平方向最大応答加速度分布を図-26に示す。

すべりは全てのケースにおいて発生しているが、すべり変形量は最大でも約1.1cmときわめて小さい。各円弧グループ中の5円弧において、すべり変形量は高標高部の半径の小さい円弧で相対的に大きくなる傾向にある。応答加速度分布は、天端及び天端から上流面にかけての高標高部における応答が大きく、800gal以上の応答加速度分布域は入力波 が入力波 にくらべて若干大きい。

スペクトルのフラットな周期帯 (0.1~0.4sec) に1~3次の固有周期が位置するダム高25m及びダム高50mにおいて、0.1sec以下の短周期域のスペクトルの有無が異なる入力波 及び入力波 によるすべり変形量は、最大でも1cm程度以下でほぼ同じである。これは、沈下による越流に対する危険性は、ダムの付加高さ等を考慮すれば、十分に許容内である。さらに、堤体材料の非線形性から地震加振中のダムの固有周期は、初期剛性より長周期化し、より短周期成分の影響は小さくなっていると考えられる。

(4) 短周期成分が卓越する実測地震動を用いた検証

前章の重力式コンクリートダムと同様に、実際に短周期成分が卓越した地震動であるKiK-net一関西波を入力地震動としたときのフィルダム応答特性について検証した。

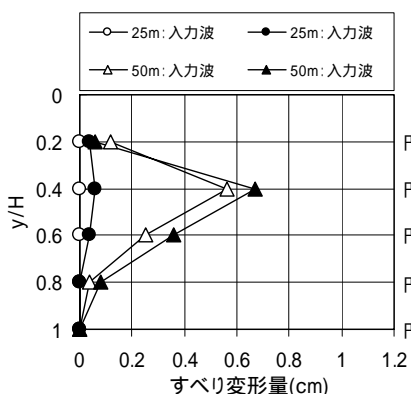
本検討に使用した解析モデルは、前節の検討で使用したダム高25m及びダム高50mとした。入力地震動は、重力式コンクリートダムでの検討と同様に、KiK-net一関西波(EW-)とそれの10Hz以下に対しローパスフィルタを実施したKiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hzとした。

解析ケースは1つのダム高に対して、2種類の入力地震

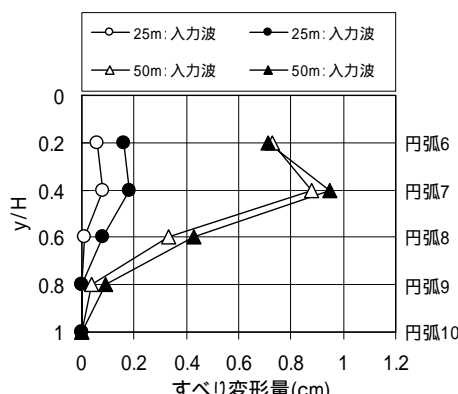
動とし、計4ケースとした。解析ケースの一覧表を表-22に示す。

すべり変形量の算出結果として、円弧の無次元高さ(y/H)とすべり変形量の関係を図-27に、ダム高25m及びダム高50mの固有周期とKiK-net一関西波(EW-)及びKiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hzの応答スペクトルとの関係を図-28に示す。

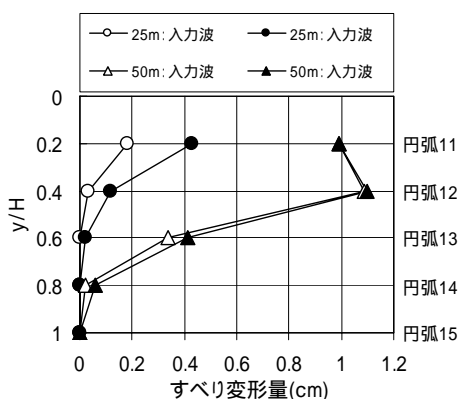
ダム高25m及び50mにおいて、0.1sec以下の短周期域のスペクトルの有無が異なるKiK-net一関西波(EW-)とKiK-net一関西波(EW-) + LPF10Hzのすべり変形量はほぼ等しく、すべりもほぼ同じ円弧で発生している。



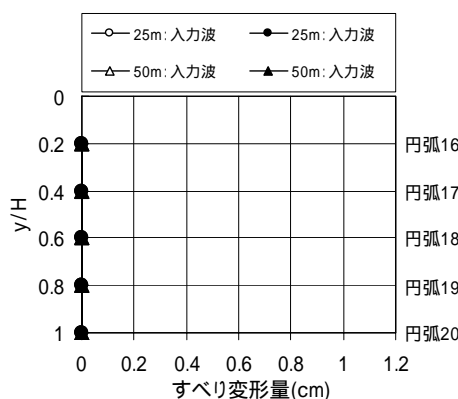
(a) ロック部分のみを通る浅い円弧



(b) ロック部分のみを通る深い円弧



(c) 天端を始点としコアを切る円弧



(d) 下流側斜面を始点としコアを切る円弧

図-25 すべり円弧の無次元高さとすべり変形量の関係

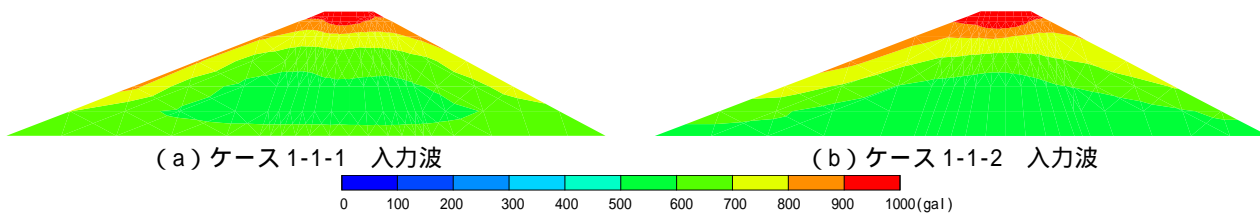


図-26 水平方向最大応答加速度分布図(ダム高25m)

表-22 実測地震動に対する解析ケース

ケース	ダム高	入力地震動
1-2-1	25m	KiK-net-関西波(EW-)
1-2-2		KiK-net-関西波(EW-) + LPF10Hz
2-2-1	50m	KiK-net-関西波(EW-)
2-2-2		KiK-net-関西波(EW-) + LPF10Hz

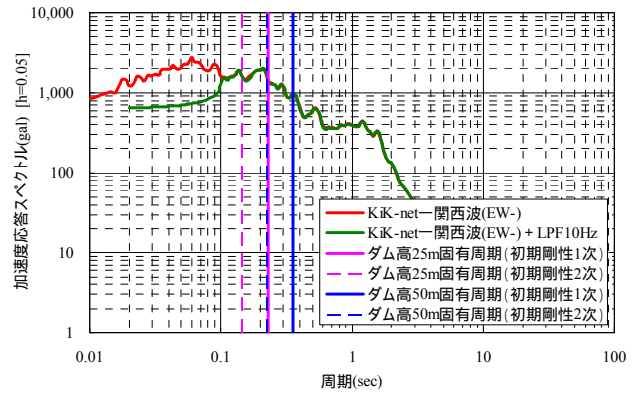


図-28 KiK-net 関西波(EW-)及び KiK-net 関西波(EW-)+LPF10Hz 波の加速度応答スペクトルとダム高25モデル及びダム高50モデルの固有周期の関係

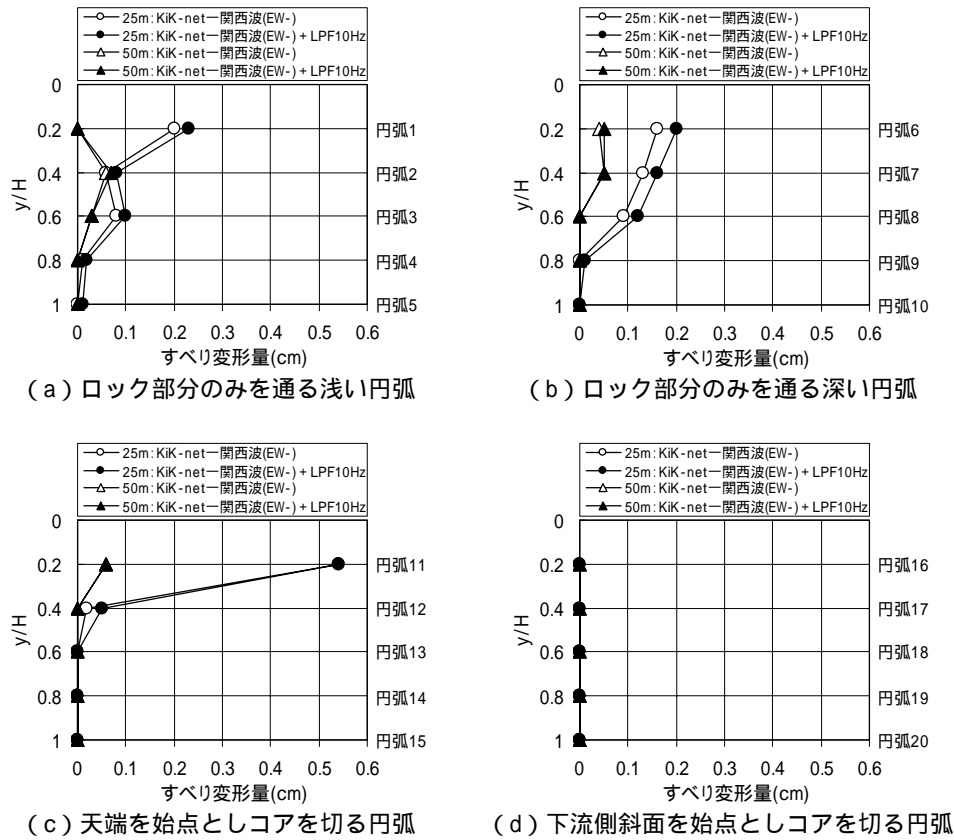


図-27 すべり円弧の無次元高さとするべり変形量の関係

(5) ロックフィルダムのまとめ

フィルダムの振動は、1次のせん断振動モードが支配的である。ダムの1次固有周期は、ダム高の低い25m級のロックフィルダムでさえ0.2sec程度であり、また、堤体材料の非線形性もあるため、地震加振中の固有周期はさらに長くなると考えられる。そのため、ロックフィルダムにおいて、入力地震動に含まれる0.1sec以下の短周期成分が、堤体応答やすべり変形に及ぼす影響は小さい解析結果となった。

4. まとめ

震源断層近傍での地震動で見られる短周期成分が卓越した地震動に対して、ダムの耐震安定性について解析的に検討した。

重力式コンクリートダムでは、耐震性能照査上クリティカルになることが多い引張損傷に対する照査を行うときに実施する非線形解析を行った。重力式コンクリートダムに地震により作用する引張応力は1次の振動モードに対して最も大きくなる。ダムの

1次固有周期に合致するような周期帯成分が卓越した地震動が入力すると、その影響で引張応力が堤体に作用するが、0.1sec程度以下の短周期域に1次固有周期を有する重力式コンクリートダムは堤高の低いダムに限られ、発生引張応力は総じて小さい。一方、堤高の高い重力式コンクリートダムでは、低次モード固有周期は0.1sec程度以上であり、短周期域では高次数の固有周期が合致するのみである。高次振動モードに起因する引張応力は、高標高部に僅かな影響が見られる程度である。

本検討解析では、代表的な重力式コンクリートダムの形状や物性値を用いて解析したが、今後、特に発生引張応力として高次振動モードによる振動に影響をうけるダム高標高部の形状、水位条件、及びコンクリート強度等の物性値の影響などを詳細に検討していくことは必要であると考えられる。

フィルダムの場合、その形状特性からせん断振動である1次振動モードがダム堤体の応答を大きく支配している。ロックフィルダムの固有周期は重力式コンクリートダムのそれより大きく、入力地震動の0.1sec程度以下の短周期成分がフィルダムの応答に大きく影響を与えることはないと考えられる。代表的なダム形状、物性値によるダムモデルにおけるすべり変形解析での結果は、数mm程度のすべり変形量としかならなかった。

本検討の解析では、不連続面となるせん断破壊面を有することになるすべり変形のみを解析対象としていたが、すべりを伴わない変形となる揺すり込み沈下等への短周期成分が卓越する地震動による影響も今後検討が必要である。

謝辞：本論文では、独立行政法人 防災科学技術研究所のKiK-net観測記録を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説，2005.3.
- 2) 山口嘉一，岩下友也：ダムの地震加速度記録による岩盤の地震動とフィルダムの地震応答特性，土木研究所資料，第3780号，p.63，2001.3.
- 3) 例えば，佐々木隆，山口嘉一，高藤 啓：無筋コンクリートのクラック進展解析における解析パラメータに関する検討，ダム工学，Vol.16 No.4，pp.282-293，2006.
- 4) 松本徳久，大町達夫，安田成夫，山口嘉一，佐々木隆，倉橋 宏：ダムで観測された強震記録の解析，大ダム，No.193，pp.88-94，2005.10.
- 5) 館山 勝，龍岡文夫，古関潤一，堀井克己：盛土の耐震設計法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.12，No.4，pp.7-12，1998.4.
- 6) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計・同解説耐震設計，1998.11.
- 7) 松本徳久，安田成夫，大久保雅彦，境野典夫：七ヶ宿ダムの動的解析，建設省土木研究所資料，第2480号，1987.3.
- 8) 藤澤侃彦，永山 功，吉田 等，佐々木隆，岩下友也：地震時におけるダムの安全性に関する検討，土木技術資料，Vol.39，No.3，pp.26～31，1997.3.
- 9) Okamoto, Shunzo: Introduction to Earthquake Engineering, 2nd Edition, pp.475-478, University of Tokyo Press, 1984.

## ANALYTICAL EVALUATION ON EFFECT OF EARTHQUAKE MOTIONS WITH A PREDOMINANCE IN THE RANGE OF HIGH FREQUENCIES ON DAMS

Tomoya IWASHITA, Motoki HARA,  
Hisayuki YOSHINAGA and Yoshikazu YAMAGUCHI

The earthquake motions have been observed near the earthquake source faults because of increasing of strong motion instrument stations. Some of the earthquake motions have the predominant waves in the range of high frequencies which are higher than around 10Hz. In this paper, the effects of the earthquake motions with a predominance in the high frequencies on dams were evaluated. Dynamic FE analyses of dams were carried out using the simulated motions and the observed earthquake motion with a predominance in the high frequencies. Analytical methods considering earthquake damage process were used; nonlinear analysis with a smeared crack model for concrete gravity dams and the combination of equivalent linear analysis and Newmark sliding block analysis for rockfill dams. The result of the analysis revealed that input earthquake motions with a predominance in the high frequencies have little effect on seismic performance as maintaining of water storage functions of dams.