

# レベル2地震動に対する 重力ダムの耐震性に関する検討

石川義樹<sup>1</sup>・渡辺仁<sup>1</sup>・石坂孝志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>八千代エンジニアリング株式会社 東京事業部耐震保全部 (〒153-8639 東京都目黒区中目黒1-10-23)

<sup>2</sup>八千代エンジニアリング株式会社 東京事業部水工部 (〒153-8639 東京都目黒区中目黒1-10-23)

我が国の重力ダムの耐震設計は、中規模地震に対して震度法による静的な耐震設計を行うが、大規模地震（レベル2地震動）については十分な検討が行われていないのが現状である。

本検討では、二次元FEMモデルによる地震応答解析を実施して、重力ダムの耐震性能を断面形状の観点から評価し、今後の大規模地震を考慮したダム設計基準のあり方について検討したものである。

**Key Words** : 重力ダム, レベル2地震動, 二次元FEMモデル, 地震応答解析

## 1. 概要

我が国のダムの安全性は極めて高く、兵庫県南部地震(1995年, M7.2)をはじめ、過去の大規模な地震においても重大な被害事例は無かった<sup>1),2)</sup>。

しかし、万が一、地震によってダムに致命的な被害が生じた場合、下流域に及ぼす社会的影響度（人命・財産・社会基盤等の損失）は非常に大きいため、大規模地震に対する耐震性の評価と安全性の確保が今後の重要な課題の一つである。

本検討では、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を断面形状（ダム高、下流面勾配、フィレットの有無等）の観点から評価し、今後の大規模地震を考慮した合理的なダム設計基準のあり方について検討することを目的とする。

ここでは、国内で計画中のモデルダム3基（ダム高H=158m, 91m, 67.4m）と、これらの設計条件をもとに海外の設計基準（アメリカ、中国）で試設

計したダム6基に対して、二次元FEMモデルによる地震応答解析を実施し、重力ダムの耐震性能について比較検討する。また、これらの結果をもとに、耐震性能の簡易評価法を提案する。

## 2. 検討対象断面

検討断面は、図-1に示すような高さが異なる日本のダム3基とフィレット無しの1基、各国の設計基準を適用して設計した6基である。ここで、適用した設計基準類は、以下を参考にした。

- ①日本：河川管理施設等構造例
- ②アメリカ：陸軍工兵隊規定
- ③中国：水工建築物抗震設計規範

設計は、静的解法により常時満水位・設計洪水位・地震時（設計震度0.12）等について行った。各断面の諸元を表-1に示す。

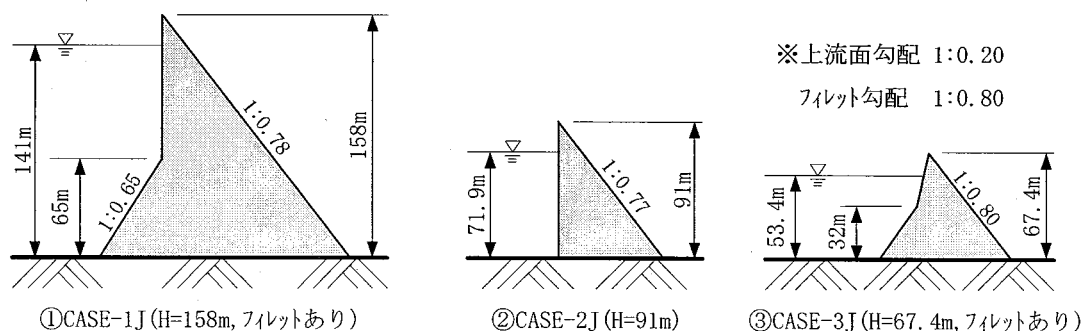


図-1 検討対象断面の例（日本のダム）

表-1 検討断面のモデルケース名と断面諸元

設計条件		ケース名	下流面勾配 1:n	フィルット (有無)	設計基準
ダム高H	岩盤強度*1				
158.0m	$\tau_0=225$ $f=1.0$	CASE-1A	0.64	—	アメリカ
		CASE-1C	0.72	—	中国
		CASE-1X	0.78	—	*2
		CASE-1J	0.78	○	日本
91.0m	$\tau_0=245$ $f=1.0$	CASE-2A	0.64	—	アメリカ
		CASE-2C	0.72	—	中国
		CASE-2J	0.77	—	日本
67.4m	$\tau_0=75$ $f=0.9$	CASE-3A	0.65	—	アメリカ
		CASE-3C	0.72	—	中国
		CASE-3J	0.80	○	日本

\*1)  $\tau_0$ : 平均せん断強度 ( $t/m^2$ ),  $f$ : 摩擦係数  
\*2) CASE-1Jのフィルット無モデル (比較検討用に追加、設計は行っていない)

### 3. 二次元FEMモデルによる重力ダムの地震応答解析

日本の事例や各国の基準を参考に設計した重力ダムのレベル2地震動に対する耐震性能を評価するため、二次元の線形動的FEM解析を実施した。

#### (1) 解析条件および解析モデル<sup>3)</sup>、入力地震動

解析条件を表-2にまとめる。解析モデルは、図-2に示すように、二次元の有限要素（平面ひずみ要素）でモデル化した。貯水および岩盤との動的相互作用は考慮しないため、貯水による動水圧はWestergaardの付加質量で評価し、逸散減衰の影響はダム堤体の減衰定数に含まれる。

入力地震動は、図-3に示す3波（観測波2波と模擬地震波1波）を用いた。

表-2 解析条件

項目	条件
解析方法	線形時刻歴応答解析(直接積分法) Newmarkの $\beta$ 法, $\beta=1/4$ , $\Delta t=0.01$ (sec)
減衰マトリクス	ひずみエネルギー比例減衰
入力地震動	E+F入力(図-3参照)
物性値	弾性係数 $E=3.0 \times 10^7$ ( $kN/m^2$ ) ポアソン比 $\nu=0.20$ 単位体積重量 $\gamma=23$ ( $kN/m^3$ ) 減衰定数 $h=10\%$

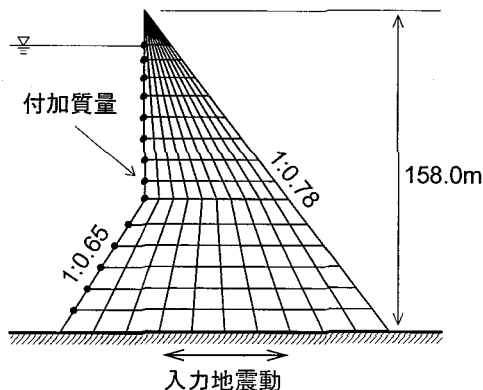
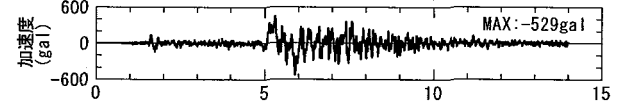
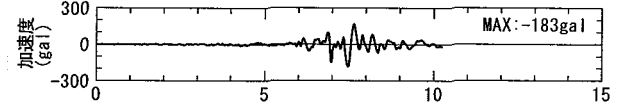


図-2 解析モデル図(CASE-1J)

① 質祥ダム底部監査廊NS成分観測波(2000年鳥取県西部地震)



② 一庫ダム底部通廊水平成分観測波(1995年兵庫県南部地震)



③ Tダム模擬地震波

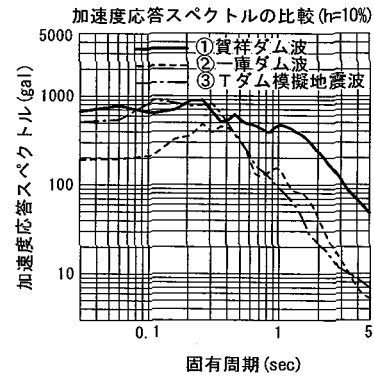
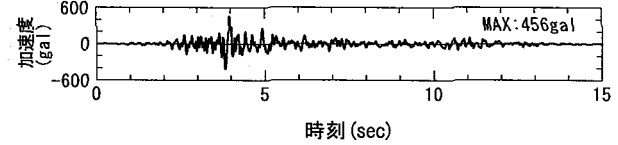


図-3 入力地震動および加速度応答スペクトル

#### (2) 固有振動解析

ダムの地震時の振動特性を把握するため、固有振動解析を行った。地震時の応答に寄与する主要な振動モードは、図-4に示すように1次モードと2次モードである。各断面の固有周期を表-3にまとめる。

1次モードの固有周期は0.451~0.107secで、これらと比較した結果、以下の傾向を示す。

- 1) ダム高が高いほど、固有周期は長くなる。
- 2) 下流面勾配が小さいほど、固有周期は長くなる。

#### (3) 地震応答解析

解析は、常時満水位の応力(事前に静的FEM解析で算出)をダム堤体に導入した後、地震動を入力してダムの応答および発生応力を計算する。解析結果の例を図-5に示す。

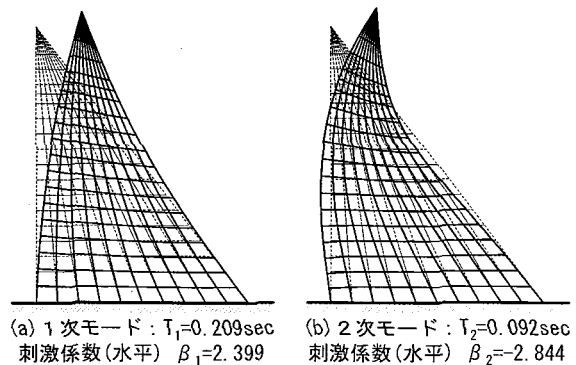


図-4 固有振動モード図(CASE-2J)

表-3 各断面の主要振動モードの固有周期(sec)

ケース名 (下流面勾配)	H=158m				H=91m			H=67.4m		
	CASE-1A (0.64)	CASE-1C (0.72)	CASE-1X (0.78)	CASE-1J (0.78)	CASE-2A (0.64)	CASE-2C (0.72)	CASE-2J (0.77)	CASE-3A (0.65)	CASE-3C (0.72)	CASE-3J (0.80)
1次モード	0.451	0.414	0.392	0.329	0.234	0.217	0.209	0.171	0.161	0.107
2次モード	0.181	0.172	0.167	0.156	0.098	0.094	0.092	0.072	0.069	0.056

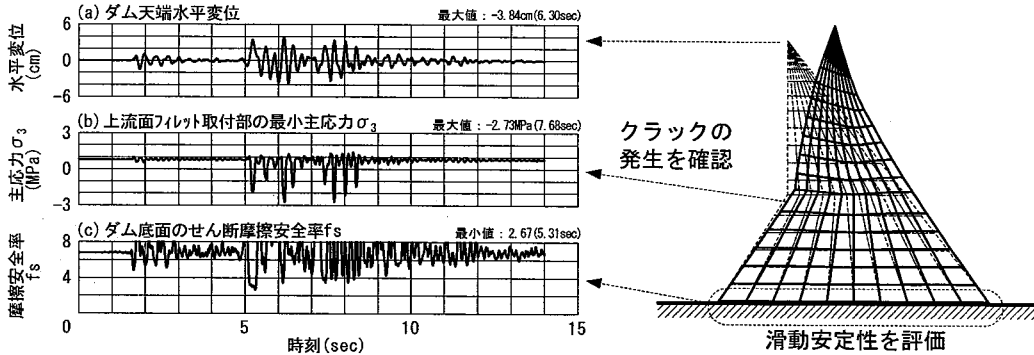


図-5 時刻歴応答波形および最大変位分布図 (CASE-1J、賀祥ダム波入力)

表-4 耐震性能の評価結果 (賀祥ダム波入力)

ケース名 (下流面勾配)	H=158m				H=91m			H=67.4m		
	CASE-1A (0.64)	CASE-1C (0.72)	CASE-1X (0.78)	CASE-1J (0.78)	CASE-2A (0.64)	CASE-2C (0.72)	CASE-2J (0.77)	CASE-3A (0.65)	CASE-3C (0.72)	CASE-3J (0.80)
①堤体引張応力 (MPa) 【3.0MPa以下】	5.67 (×)	4.25 (×)	3.37 (×)	2.73 (0.K)	4.25 (×)	3.31 (×)	2.72 (0.K)	1.93 (0.K)	1.58 (0.K)	0.50 (0.K)
②せん断摩擦安全率 【fs≥1.0】	1.72 (0.K)	1.83 (0.K)	1.93 (0.K)	2.67 (0.K)	2.41 (0.K)	2.67 (0.K)	2.75 (0.K)	1.51 (0.K)	1.56 (0.K)	2.12 (0.K)

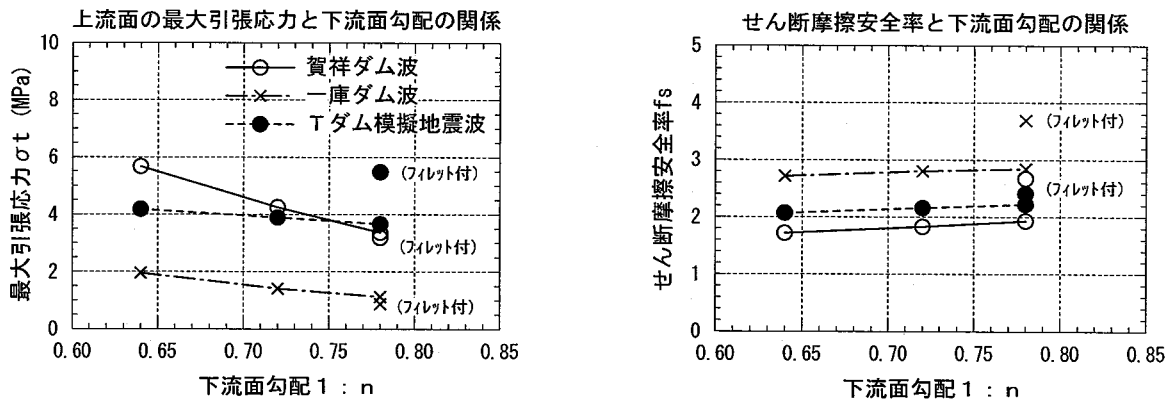


図-6 下流面勾配と最大引張応力、せん断摩擦安全率の関係 (ダム高158m)

#### 4. 耐震性能の評価および比較検討

$$f_s = \frac{\tau_0 \cdot l + f \cdot V}{H} \quad (1)$$

##### (1) 重力ダムの耐震性能の評価

ダムの構造の安全性を確保するために、耐震性能の評価は次の項目に関して実施する。

##### 1) 堤体の応力

ダム堤体上流面の最大引張応力  $\sigma_t$   
 $\leq$  コンクリートの引張強度  $\sigma_{ta}$  (=3.0MPa)

##### 2) 滑動安定性

ダム底面に作用する最大せん断力  $\leq$  抵抗力

ここでは、ダムの滑動安全性を次式の堤体底面のせん断摩擦安全率  $f_s$  で評価することとした。

ここで、 $\tau_0$ は岩盤の平均せん断強度、 $f$ はダム底面の内部摩擦係数、 $l$ はダム堤数長、 $H$ 、 $V$ は単位幅当りのダム底面に作用するせん断力、垂直力である。

表-4に、賀祥ダム波を入力した場合のダムの耐震性能について評価結果を示す。

引張応力は堤体上流面に発生するが、日本のダムの発生応力はコンクリートの引張強度以下となり、クラックは生じない結果となった。

せん断摩擦安全率  $f_s$  の最小値は1.51~2.75となり、震度法の  $f_s \geq 4.0$  を満足しないが、全ケースで  $f_s = 1.0$

以上となるため、底面が滑動することはない。また、日本のダムについては $f_s=2.0$ 以上を確保している。

レベル2地震動では、これまでの安全率4.0を担保することが困難と考えられるため、合理的に安全率の許容値を設定することが今後の課題となる。

## (2) 耐震性能の比較検討

ダム高158mのケース(CASE-1A, C, X, J)を例に、下流面勾配の大きさやフィレットの有無の観点から、ダム形状が耐震性能に与える影響を比較検討する。

図-6に、下流面勾配と上流面の最大引張応力、せん断摩擦安全率の関係を整理した。検討結果は概ね次のとおりである。

- ①下流面勾配が大きいほど、上流面に生じる最大引張応力は緩和され、せん断摩擦安全率が大きくなる傾向にある。ダム堤敷長の大きさが発生応力や滑動安定性に影響する。
- ②フィレットの有無(勾配 0.78)を比較すると、フィレットを設けた場合、上流面に発生する引張応力は小さくなり、せん断摩擦安全率は大きくなることから耐震性能が向上する。最大引張応力の発生箇所はフィレット取付部上端に集中する。

また、ダムに作用する地震力を、次式のように、ダム底面の地震時増分せん断力 $\Delta H$ をダム重量 $W$ で除して、水平震度 $Kh$ で表す。

$$Kh = \Delta H / W \quad (2)$$

地震力の大きさと耐震性能の関係を、図-7の水平震度とせん断摩擦安全率で整理した結果、設計計算で行う静的解析と動的解析は、概ね1:1で一致することが分かる。よって、水平震度を精度良く推定できれば、動的解析を実施する前に、静的な計算手法を用いて概略的な耐震検討が可能となる。

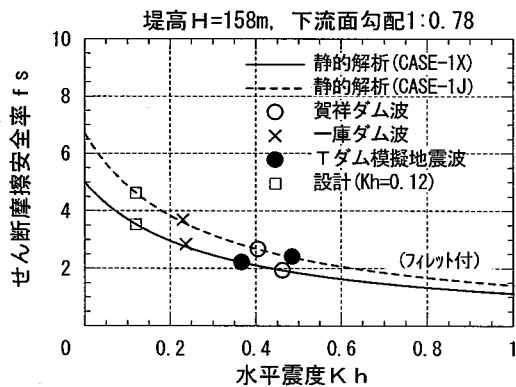


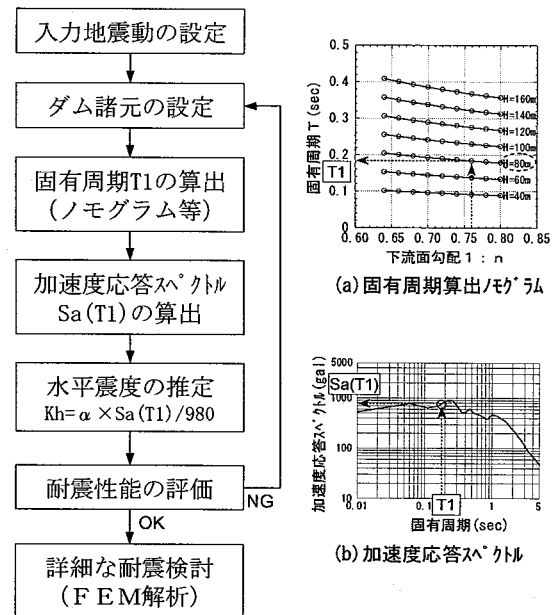
図-7 水平震度 $Kh$ とせん断摩擦安全率 $f_s$ の関係

## (3) 簡易耐震性評価法の提案

一般に、入力地震動の周期特性が分かっている場合、構造物の固有周期と応答スペクトルから地震時の応答を概略的に推定できる<sup>4)</sup>。

重力ダムは、比較的単純な振動性状を示すため、地震力を精度良く評価できれば、滑動安定性等の耐震性能を静的な計算手法で検討できる。

本検討では、ダムの固有周期から水平震度を推定し、耐震性能を簡易に評価する手法(図-8)を提案した。ただし、堤高が高いダムでは高次モードの影響が大きくなるため、本評価法の精度は低くなる。



- 【手順】①ダム諸元より固有周期 $T_1$ を推定(チャートの利用等)  
 ②固有周期 $T_1$ より加速度応答スペクトル $S_a(T_1)$ を算出  
 ③ $S_a(T_1)$ より水平震度 $Kh$ を推定、ダム応答値を算出

図-8 簡易耐震性評価法の流れ

## 5. まとめ

本検討の結果は以下のとおりである。

- (1)ダムの耐震性能は、下流面勾配が大きいほど、滑動安定性が高く、発生応力も緩和される傾向にある。また、フィレットの設置は耐震性能の向上に効果的である。
- (2)レベル2地震動に対する重力ダムの耐震設計において、断面諸元の決定や概略的な検討を目的とした簡易耐震性評価法を提案した。
- (3)レベル2地震動に対して震度法の応力レベル・滑動安定性を満足するのは困難であるため、大規模地震を考慮した安全かつ合理的な許容値や基準の見直しが課題である。

謝辞：本論文は、水資源開発公団試験研究所より受託した業務の成果をもとに検討、整理を行ったものである。ご指導・ご協力を頂いた関係者各位に心から感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1)ダムの耐震性に関する評価検討委員会：ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書，1995.11
- 2)田村，竹村，藤澤，永山ほか：兵庫県南部地震におけるダムの挙動，大ダムNo.164，pp.50-58，1998.7
- 3)木戸，杉村，森田，平木：兵庫県南部地震における一庫ダム動的解析，大ダムNo.167，pp.15-23，1999.4
- 4)永山，自閑：重力ダムの動的挙動特性とその簡易耐震設計法，大ダムNo.119，pp.14-34，1987.3