

動的解析によるロックフィルダムの 兵庫県南部地震時の挙動とすべり安定性の評価

建設省土木研究所 中村 昭*
建設省土木研究所 岩下 友也*

兵庫県南部地震によりダムでは安全性に関わるような大きな被害は発生しなかった。本論文は、余震域近傍に位置するロックフィルダムについて実測挙動解析を行ったものである。動的解析は、剛基礎の2次元有限要素モデルを用い、実測地震波を入力した。適切な減衰定数を設定することにより、天端での応答加速度を良好な精度で再現することができた。今回の地震における鉛直動入力による影響は天端近くでの堤体応答が少し大きくなった程度であり、すべり安定性に及ぼす影響も小さかった。また、今回の地震の震源断層直近における地震動を想定し、入力した動的解析を行った。堤体応答加速度から、すべり円弧土塊に作用する平均加速度の時間最大値を求め、すべり安定性を評価した結果、十分な安全性を有することが確認された。

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、多くの土木構造物に被害が生じた。ダムにおいては、地震直後の臨時点検および、詳細調査を実施した結果、いくつかのダムにおいて天端舗装に小クラックが生じたり、地震後に漏水量が若干増加するなどの軽微な変状を示したものがあるが、全般的に、ダムは良好な挙動を示し、直ちに対策が必要な被害は生じなかった¹⁾。本論文では、余震域（震源断層）の近傍に位置する箕面川ダムを対象にして、実測加速度波を用いて動的解析を実施し、地震時におけるすべりに対する安定性を評価した。また、ダム堤体の地震応答における鉛直動の影響、および今回の震源断層直近の地震動を入力した場合のすべり安定性も検討した。

2. 箕面川ダムの概要

箕面川ダムは、1982年に完成した、堤高H47.0m

キーワード：兵庫県南部地震、ロックフィルダム、動的解析

* 建設省土木研究所フィルダム研究室、
0298-64-2211

の中央土質コア型ロックフィルダムである。ダム基礎岩盤は中古生層である丹波層群の砂岩、粘板岩より成り、弾性波速度 V_p が4km/s程度以上で堅固である。ダムの透水性材料であるロック材も、ダム基礎と同じ砂岩である。当ダムは、震度0.15で震度法により設計されている。標準断面図を図-1に示す。また、洪水調節を主目的とするため、常時満水位は、ダム高の6割程度の比較的低い標高に設定されている。地震時には、常時満水位より3.1m低い水位であった。

当ダムは、震央からは48km、余震域の東端より北東に11kmに位置している。図-1に示すように地震計が基礎（監査廊）と天端に位置されており、最大加速度は基礎では水平2軸方向に130gal程度、天端では上下流方向に約240gal、ダム軸方向に400galを記録した。地震によるダムに生じた変状としては、天端の標点が地震の3週間前の観測値に比べ最大箇所11mm沈下した程度であり、被害は生じなかった。

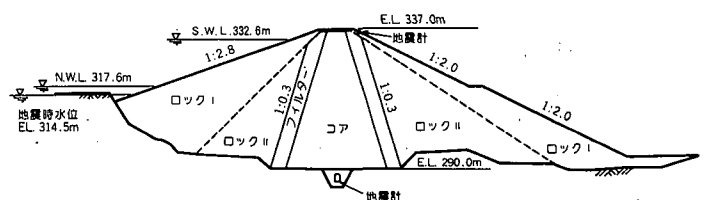


図-1 箕面川ダム標準断面図

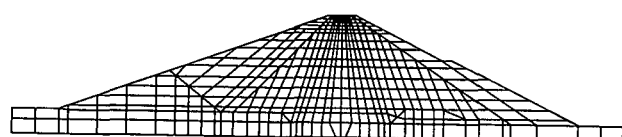


図-2 2次元要素図

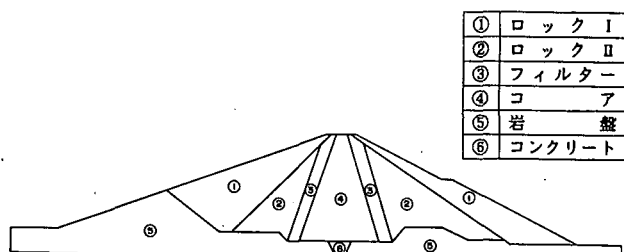


図-3 物性区分図

表-1 解析に用いた物理値

	土粒子比重 G_s	湿潤単位 体積重量 γ_t (t/m ³)	飽和単位 体積重量 γ_{sat} (t/m ³)
ロック I	2.73	2.12	2.32
ロック II	2.74	2.03	2.27
フィルター	2.73	2.23	2.35
コア	2.68	2.18	2.18

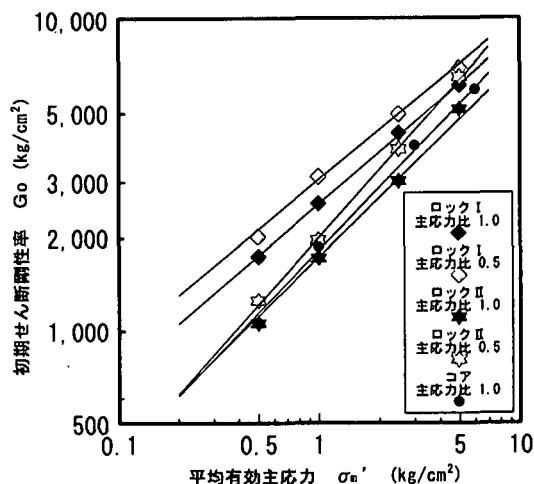


図-4 初期せん断剛性率と平均有効主応力の関係

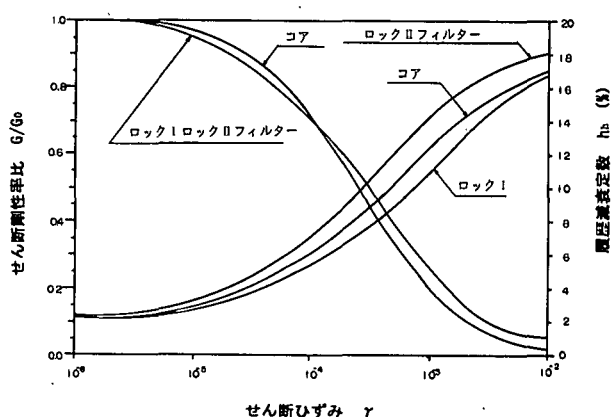


図-5 せん断剛性率比と履歴減衰定数のせん断ひずみ依存曲線

3. 解析方法および条件

箕面川ダムの標準断面を図-2のように剛基礎の2次元有限要素でモデル化（堤体部の総節点数475）した。解析の流れを以下に記す。まず、静的解析を行い、初期応力を求める。次に実測地震波を基礎より入力して動的解析を行い、応答加速度分布を求める。そして、仮想すべり円弧内の応答加速度を積分して、すべり円弧土塊に作用する地震力を算出し、すべりに対する安定性を検討する。

物性区分図を図-3に示す。表-1には、各ゾーンの土粒子比重と単位体積重量を示す。これらはダム盛立施工中の管理試験値を用いている。

(1) 静的解析

静的解析は築堤解析と湛水解析を行った。

築堤解析は、接線弾性係数を用いた荷重増分法による15層の盛立解析である。接線弾性係数、接線ポ

アソン比は室内静的三軸試験結果を用いて、各々 Duncan and Chang²⁾, Kulhawy, Duncan and Seed³⁾の方法により求めた。ただし、フィルターについてはロックIIと同じとした。湛水解析は上流透水ゾーン（ロック、フィルター）の浸潤線以下での浮力、コアでの浸透流力および上流面の水圧による影響の解析である。浸透流力は、コア部のみの定常飽和浸透流解析により求めた。ここで、コアの透水係数 k は、現場品質管理試験結果の平均値 2.8×10^{-6} cm/sを用いた。

(2) 動的解析

動的解析は、20Hzまでの周波数領域における等価線形法 (DINAS) で行った。ロックの初期せん断剛性率 G_0 とせん断剛性率比 G/G_0 、履歴減衰定数 h_s のせん断ひずみ依存性は、大型繰返し三軸試験を行

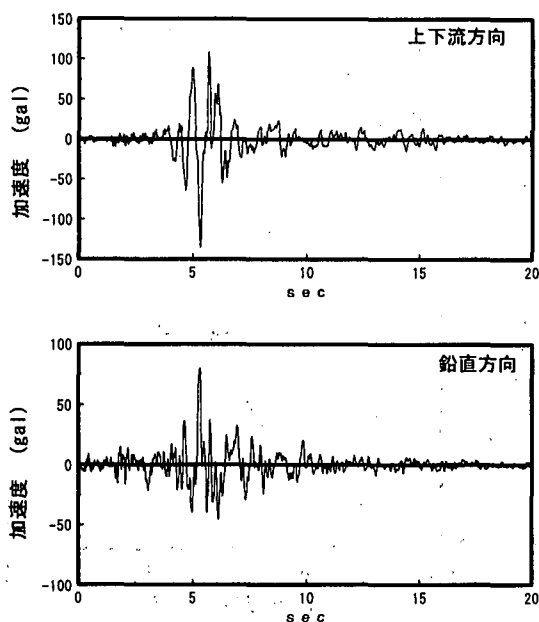


図-6 入力地震加速度波形（基礎における実測波形）

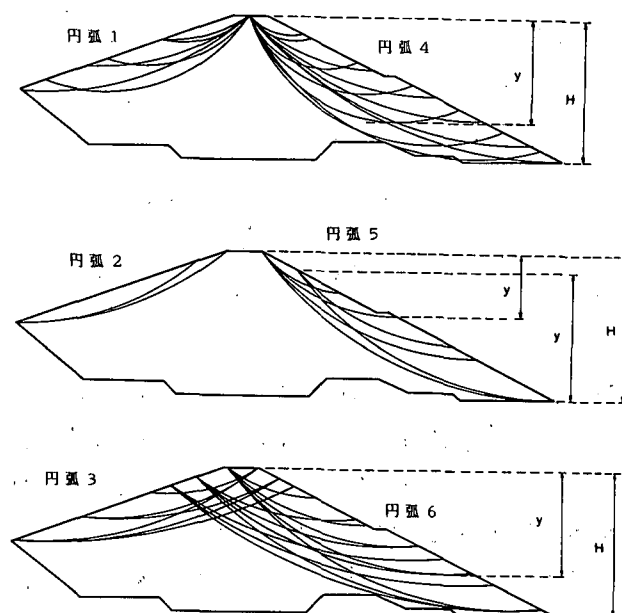


図-7 仮想円弧すべり形状

表-2 動的解析ケース

ケース	減衰定数	入力地震波	
		成分	実測に対する振幅倍率
Case 1	15%+ h_h	H+V	1.0
Case 2	10%+ h_h	H+V	1.0
Case 3	15%+ h_h	H	1.0
Case 4	15%+ h_h	H+V	1.95 (上下流方向最大250gal)

い、図-4、図-5のように設定した。ここに、ダム堤体内部の異方性を考慮して深度30m以浅では、等方圧密状態（主応力比1.0）の試験結果を、30m以深では、異方圧密状態（主応力比0.5）の試験結果を用いた。フィルターは、ロックⅡと同一とし、コアは他の同一型式のロックフィルダムのコア材の室内試験結果を用いた。ポアソン比 ν は、沢田ら⁴⁾によるロックフィルダムでの実測をもとにした経験式より設定した。また、岩盤の物性値は、弾性波探査と岩片の超音波速度試験結果より $G_0=9.16 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\nu=0.37$ とした。

解析に用いた入力地震波は、今回の地震時に箕面川ダムの基礎で実測された水平上下流方向（H成分）と鉛直方向（V成分）の2成分を用いた。入力地震波形を図-6に示す。動的解析は表-2に示す4ケース実施した。

(3) すべり安定解析

図-7に示す仮想円弧すべりに対してすべり安定解析を行った。この仮想円弧は、すべり方向、位置形状、深さ等を変化させて設定した。円弧すべり土塊に作用する地震力は、土塊の加速度と質量の積で表され、すべり土塊平均加速度 $\bar{a}(t)_{max}$ で評価した⁵⁾。 $\bar{a}(t)_{max}$ は、円弧すべり土塊中の各要素の応答水平加速度時系列 $a_{Hi}(t)$ と要素質量 m_i を用いて、(1)式のように算定した $\bar{a}(t)$ の継続時間中のすべり方向の最大値である。

$$\bar{a}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i \times a_{Hi}(t))}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (1)$$

ここに、 i は要素番号、 N は、土塊中の要素数である。ロックとフィルターのせん断強度 τ_f は「フィルダムの耐震設計指針（案）」⁵⁾で採用されている。内部摩擦角 ϕ のすべり面に作用する垂直応力 σ_n 依存性を考慮し、指数関数で近似した式(2)を用いた。

$$\tau_f = A \times \sigma_n^b \quad (2)$$

ここに、式(2)において τ_f と σ_n の単位は、 $[\text{kg/cm}^2]$ である。表-3に、安定解析に用いた材料の強度定

表-3 堤体材料の強度定数 単位系 [kg/cm²]

	<i>A</i>	<i>b</i>
ロックⅠ	1.796	0.778
ロックⅡ フィルター	1.434	0.845
	粘着力 <i>C</i> (kg/cm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
コア	0.63	32.5

数を示す。ロックの強度定数は、原石山から搬入したロック材を現場施工管理試験による現場粒度と相似粒度で、現場密度と同一に設定した径30cmの供試体に対する大型静的三軸試験結果を用いた。フィルターはロックⅡと同一とし、コアは現場品質管理試験値を用いた。安定解析には簡便分割法を用いた。図-8には、各仮想円弧においてすべり安全率*F_s*が、(3)式のように1.2となるようなすべり土塊の限界加速度*a_{Fs=1.2}*と、無次元円弧高さ*y/H*（円弧高さ／ダム高）の関係を示す。

$$\int_0^L (\tau_f \times r) dl \bigg/ \left(a_{Fs=1.2} \times \sum_{i=1}^N m_i \times r_{vi} \right) = F_s = 1.2 \quad (3)$$

ここに、*r*はすべり円弧半径、*r_{vi}*はすべり円中心から*i*要素への鉛直高さ、*L*はすべり土塊の円弧長さである。地震応答によるすべり土塊平均加速度が図-8に示す限界加速度を越えると、フィルダムの現行設計基準で定められている安全率1.2を下まわることになる。

4. 解析結果と考察

(1) 実測との検証 (Case1とCase2)

地震時のロックフィルダムの動的挙動により、堤体と基盤や貯水池の相互作用等によるエネルギー減衰や堤体内の粘性減衰が生じる。そのため、入力減衰定数としてこれらの影響と等価な減衰をダム堤体材料の履歴減衰*h_h*に付加しなければならない。今回は、これまでのロックフィルダムの動的解析における減衰定数の設定値を考慮して、15%および10%を*h_h*に付加したCase1とCase2の天端における解析応答加速度と実測加速度の時刻歴（図-9）並びにFourier振幅スペクトル（図-10）を比較した。図-9の上下流方向成分では、特に主要動の前半（*t*=4～5.5sec付

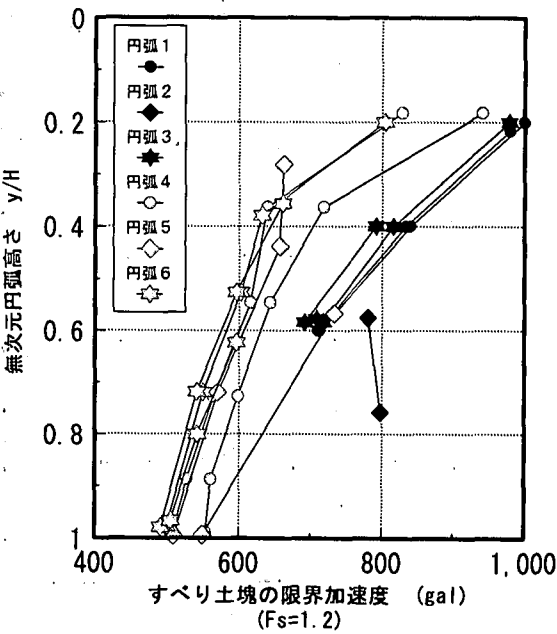


図-8 安全率1.2となるすべり土塊の限界加速度分布

近）では解析応答波形は精度良く再現されている。後半では解析応答波形の振幅は、実測波形より小さくなっている。鉛直方向成分では、解析波形は実測波形より全体的に振幅が小さい。図-10のFourierスペクトルの上下流方向成分では、周波数1.2Hzまでは実測値と解析値はほぼ等しいが、1.2～2Hzでは解析値のスペクトルが大きく、2Hz以上では逆に、実測値の方が大きくなっている。鉛直方向成分では、3Hz程度までは両者ほぼ等しいが、3Hz以上では実測値が大きくなっている。実測波と解析波の不一致は、他方向の入射波や地形等の3次元的要因によるところが大きい。上下流方向成分において、主要動の後半で、実測がかなり大きくなっているが、天端のダム軸方向加速度が300galを越える震動となる時刻帯と一致し、三次元的震動の影響が大きいことがわかる。

図-9,と図-10から、Case2に比し、Case1の方が天端での実測波との整合性がよく、比較的精度良く再現されていることから、他の解析ケースでは履歴減衰定数に一律15%を加えた減衰を入力した。

Case1の応答値によるすべり土塊平均加速度を図-11に示す。これは、箕面川ダムが兵庫県南部地震時に受けた地震力に相当する。同図に併記した安全率1.2となるすべり土塊の限界加速度*a_{Fs=1.2}*に比べ、はるかに地震力が小さかったことがわかる。

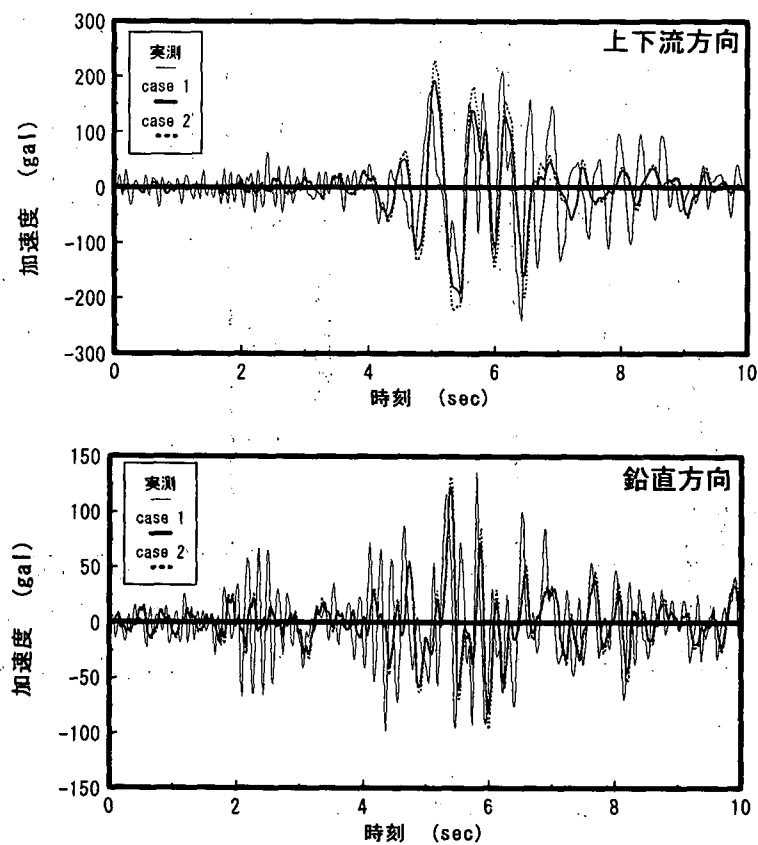


図-9 天端応答加速度波形 (Case1, Case 2と実測値)

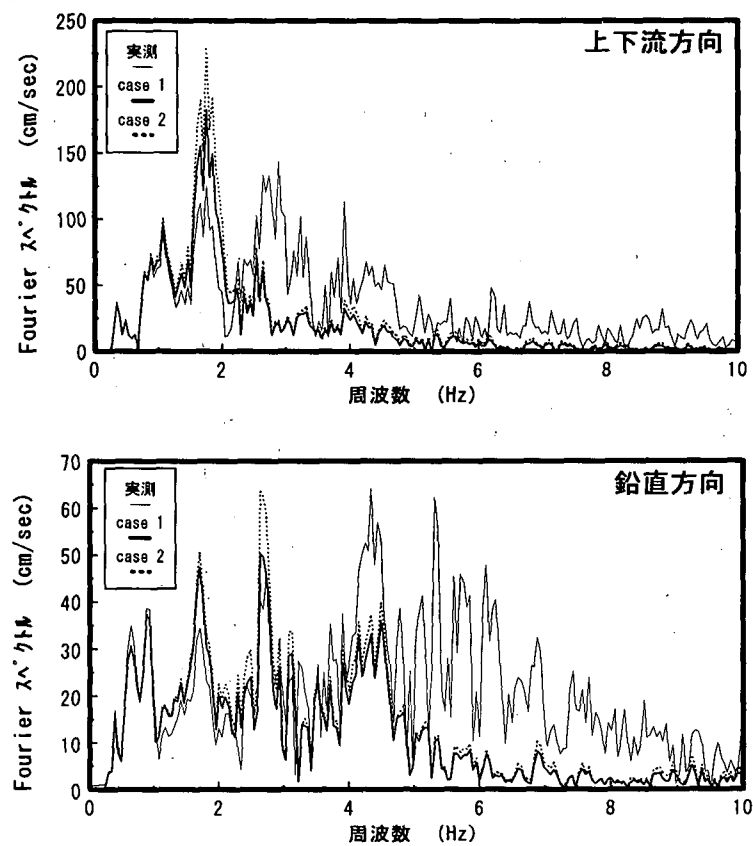


図-10 天端応答加速度の Fourier 振幅スペクトル (Case1, Case 2と実測値)

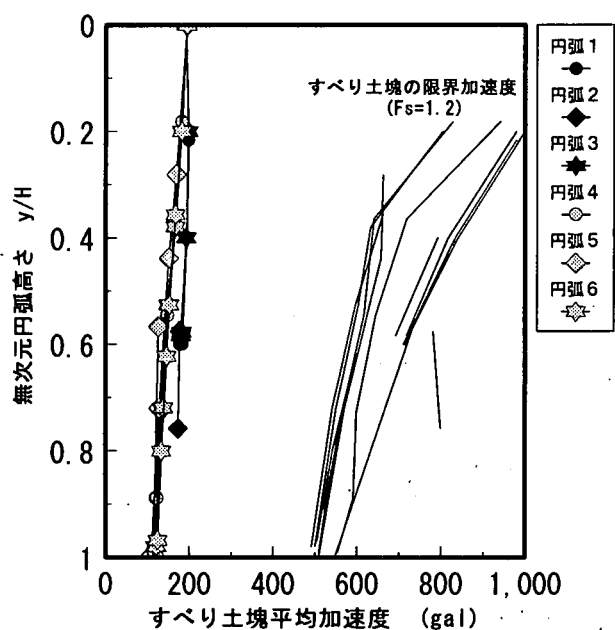


図-11 すべり土塊平均加速度分布 (Case1)

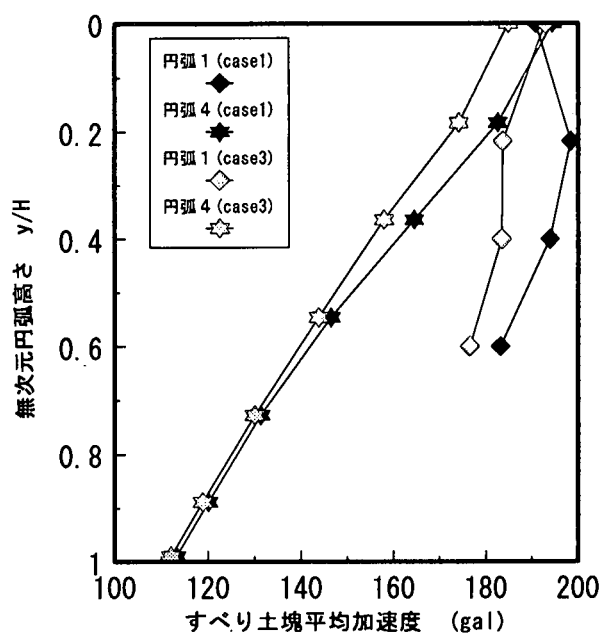


図-13 すべり土塊平均加速度分布 (Case1, 3)

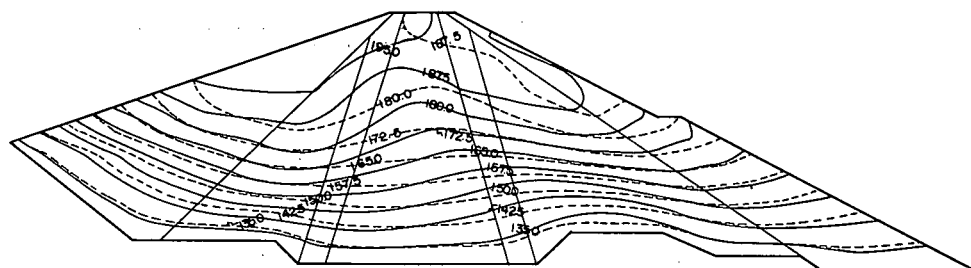


図-12 上下流方向の最大加速度分布 (Case1: 実線, Case3: 破線) 単位: gal

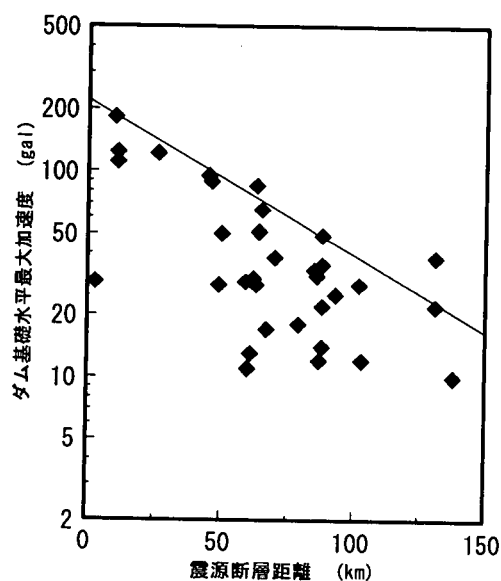


図-14 ダム基礎における水平最大加速度の距離減衰

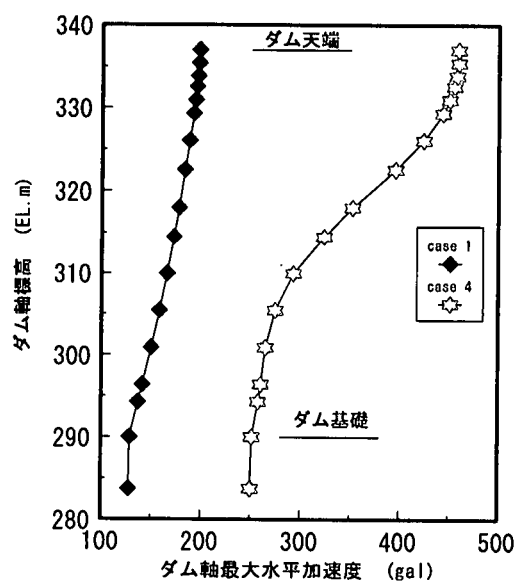


図-15 ダム軸の上下流方向最大加速度分布 (Case1,4)

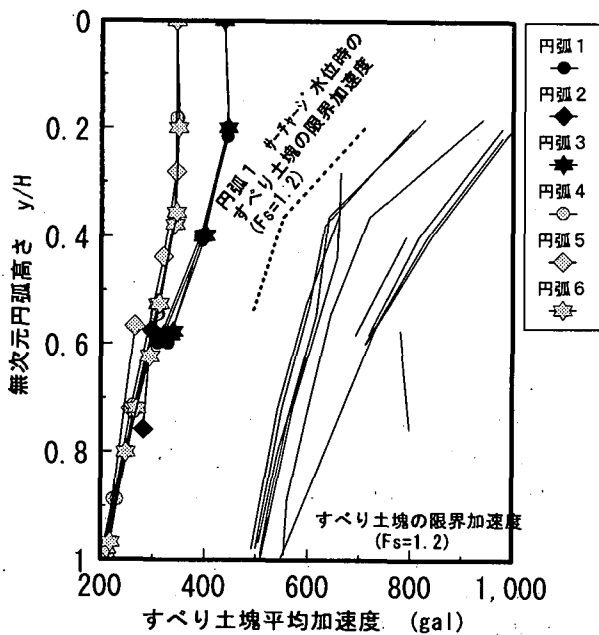


図-16 すべり土塊平均加速度分布 (Case4)

(2) 鉛直動入力の影響 (Case1とCase3)

Case1が水平上下流方向と鉛直方向の地震動2成分を基盤より入力したのに対し、Case3は、水平上下流方向の地震動のみを入力した。図-12に両ケースの最大加速度分布を示す。堤体上流側上部において、Case3はCase1より応答加速度がいく分小さくなっている。しかし、図-13に示すように、すべり土塊平均加速度の差はほとんどなく、最大で10数gal Case1のほうが大きい程度である。

(3) 震源断層直近における地震動入力の検討 (Case4)

ダムが今回の震源断層直近に位置したと仮定した場合における地震時安定性について検討する。

図-14は、兵庫県南部地震において観測されたダム基礎（下段あるいは底設監査廊を含む）における水平最大加速度と震源断層距離の関係である。ここに、震源断層は淡路島側では野島断層、本州側は地震当日の余震域の中心線としている。図-14の関係図の包絡線、および断層距離10kmの位置でダム基礎岩盤と同等の岩盤地点において水平最大加速度213galが記録されている⁶⁾ ことなどから総合的に判断して、今回の地震においてダムサイトとなりうる岩盤で生じた水平最大加速度の上限は220gal程度と推定される⁷⁾。

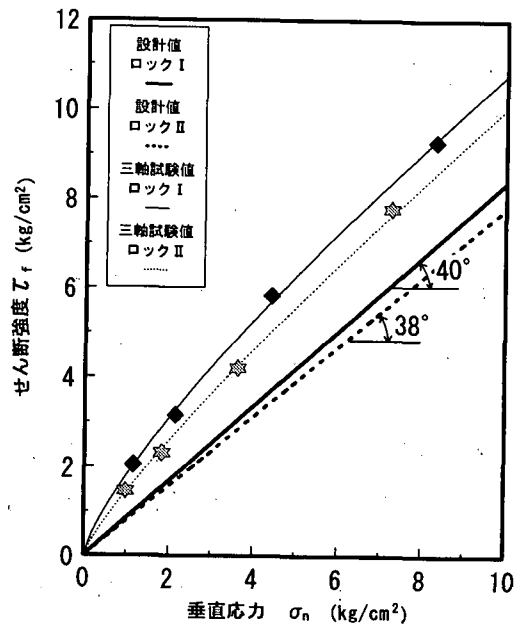


図-17 安定解析に用いた試験値のせん断強度とダム建設時の設計せん断強度値

そこで、箕面川ダムの基礎実測波形を水平上下流方向最大振幅が250galになるような倍率で引き延ばし、箕面川ダムモデルに入力した(Case4)。Case4は、今回の震源断層直近における震動振幅を有する地震動を入力したケースと見なせる。ただし、周波数特性や継続時間については、実測波のものをそのまま用いている。図-15は、ダム軸（コア）における最大水平加速度分布である。Case4では、天端応答倍率が1.84とCase1より大きくなっている。

図-16は、Case4におけるすべり土塊平均加速度分布である。また、同図には、地震時水位時の各すべり円弧の限界加速度 $a_{Fs=1.2}$ 分布とともに、サーチャージ水位（ダム高の約9割水位）時の円弧1に対する $a_{Fs=1.2}$ 分布も併記してある。いずれのすべり円弧に対しても安全率1.2以上を確保している。このように、安全率がかなり大きく推定される理由は、主として図-17に示すように、すべり安定解析で用いた三軸試験による材料のせん断強度が、ダム建設時のCφ法で規定した設計値（ロック I： $\phi=40^\circ$ ，ロック II： $\phi=38^\circ$ ）よりもかなり大きい値であることが挙げられる。

5. まとめ

箕面川ダムについて2次元有限要素モデルによる実測挙動解析等を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 基礎での実測地震波を入力したケースにおいて、天端における応答加速度波形は、実測波形を比較的精度良く再現できた。しかし、3次元的な構造要因もあり主要動後半の応答値は実測値よりも小さい。
- (2) 今回の地震においては入力鉛直動が堤体の加速度応答やすべり安定性に及ぼす影響は小さい。
- (3) 今回の震源断層の直近にダムが位置すると仮定して、震源断層直近における地震動と推定される波形を入力し、解析した結果、すべりに対する安全性は十分確保されている。

謝辞：本論文の解析にあたり、大阪府土木部ダム砂防課には貴重なデータを提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Matsumoto, N., Nakamura, A., Sasaki, T., Iwashita, T. : Effects on Dams, *A Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake*, JGS, 1996. 1.
- 2) Duncan J. M., Chang C. : Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of ASCE*, 1970. 9.
- 3) Kulhawy, F.H., Duncan, J.M., and Seed, H.B. : Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Embankments During Construction, *Geotechnical Engineering Report No. TE-69-4*. University of California, 1969. 9.
- 4) Sawada, Y. and Takahashi, T. : Study on the Material Properties and the Earthquake, *Proc. of 4th JEES*, pp.695-702, 1975. 11.
- 5) 建設省河川局開発課 監修：フィルダムの耐震設計指針（案），1991. 6.
- 6) 伊澤ら：兵庫県南部地震における岩盤上の観測記録，平成7年度 日本建築学会近畿支部研究報告集，1995. 6.
- 7) 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.

BEHAVIOR AND STABILITY OF A ROCKFILL DAM BY DYNAMIC ANALYSIS DURING THE 1995 HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE

Akira NAKAMURA and Tomoya IWASHITA

The performance of a rockfill dam located near the aftershock area was analyzed using measured acceleration by a two-dimensional finite element method. (1) It was possible to reproduce the response acceleration history during the main shock at the crest of the dam by setting an appropriate damping ratio. (2) The vertical input motion had little effect on the horizontal response. (3) The strong earthquake motion just near the fault of the Hyogoken-Nambu Earthquake was entered into the dynamic analysis of the dam model, and the maximum accelerations per unit mass acting on circular sliding masses were calculated from the response acceleration distribution of the dam body. The well stability against sliding was demonstrated.