

# 強地震動下の大規模斜面の安定性評価に関する実験的・解析的検討

## EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON STABILITY EVALUATION OF A LARGE SLOPE UNDER STRONG SEISMIC MOTION

伊藤 洋\*・渡辺啓行\*\*

By Hiroshi ITO and Hiroyuki WATANABE

This paper presents results of model tests in the laboratory and the numerical analyses by the kinds of static and dynamic method carried out as a series of the research on the seismic stability of a large scale slopes. As these results, it is clear that the failure mechanism of slope between pseudo-static inclination test and dynamic test using shaking table differ and the circular arc slip method gives the severest assessment in the kinds of analyses of seismic stability. In addition, the relationship between the seismic coefficient of pseudo-static test and the acceleration of dynamic test is evaluated quantitatively and it is proposed to use the equivalent seismic coefficient obtained from the response equivalent acceleration of slope as seismic force for seismic stability evaluation by static method.

*Keywords*: slope stability, model test, seismic coefficient method, dynamic analysis, equivalent seismic coefficient

### 1. はじめに

原子力発電所等の重要構造物に隣接する周辺斜面の設計にあたっては地震時の安定性評価が最も重要であり、現在、震度法に基づくすべり面法が慣用的な静的手法として使われている。しかし、厳密で高い耐震性の評価が必要となるこのような斜面の場合には、この手法を一次設計的なものとして位置づけられる場合が多い。これはこの評価法が実際の動的挙動とどのような対応にあり、得られた結果がどの程度の信頼性のあるものか定量的に評価されていないためと考える。地震時の安定性を静的な手法で検討することの妥当性についての研究として、静的地震力の大きさについて検討した松尾<sup>1)</sup>、伊藤<sup>2)</sup>らの研究、港湾施設技術基準のすべり面解析について検討した上部らの模型実験<sup>3)</sup>、大町らの三次元すべり解析と模型実験<sup>4),5)</sup>、岩崎らの地震時被害の解析的検討<sup>6)</sup>などがあるものの、いまだ慣用的な設計法で用いられる入力条件(荷重、物性値、初期条件など)、安全率などと実際の地震時現象を考慮し得る動的応答解析の結果とどのよ

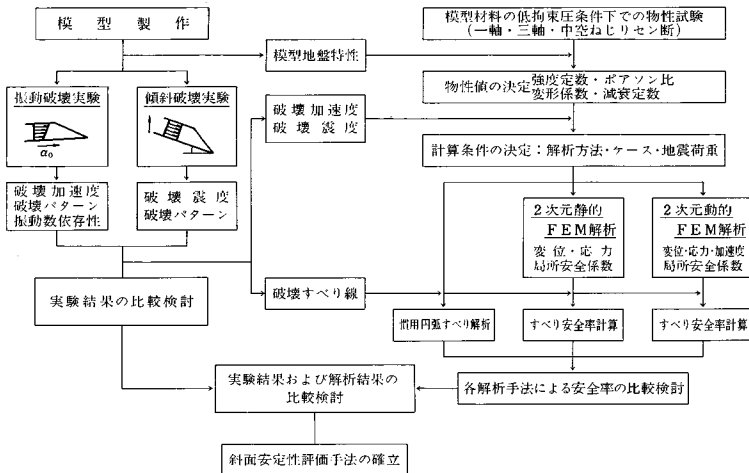
うな対応や相関関係にあるか実証されていないため種々の観点から論議されている。

ところで、地震時の斜面の安定性評価は実際の斜面の動的挙動を把握することなしに検討できないが、原子力発電所施設で考慮されるような強地震動下で実物大の斜面の破壊挙動を把握することは現実的に困難である。そのため、破壊現象の相似則をとり込むことはできないが、模型実験による検討が考えられる。すなわち、模型斜面を小さい現実の斜面と考え、その破壊現象を実験的に把握し、その現象をすべり面解析、静的・動的FEM解析による数値シミュレーションで実際の斜面安定解析のケーススタディと全く同一の方法・手順で検討することにより、解析法の異なるもの同士の結果の相互比較、解析法・設計法の妥当性の解明に役立つものと考えられる。

以上の観点から、本研究は条件を統一した斜面の実験と数値解析により図-1に示す研究フローに従って、①震度法を模擬した傾斜破壊実験、②振動破壊実験、③傾斜および振動破壊実験の数値シミュレーションによる安定評価法の検証、④各種安定評価法の比較と地震力の評価、などについて検討し、斜面の地震時の評価・設計法の位置づけを明確にしようと試みたものである。なお、節理性岩盤斜面を対象とした実験もある<sup>7)</sup>が、ここでは従来設計法との比較や数値解析的な解釈上の容易さなど

\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所我孫子研究所立地部地盤研究室(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

\*\* 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科(〒338 浦和市下大久保255)



図一 斜面の地震時安定性に関する研究フロー

表一 実験材料の一般的な物理特性

項目	定数	
比重	2.65	
土質分類	S.C粘土質砂	
粒度試験	砂分	76%
	シルト分	10%
	粘土分	14%
液性限界	25.1%	
塑性限界	18.9%	
塑性指数	6.2	
最適含水比	16.2%	
最大乾燥密度	1.715g/cm <sup>3</sup>	

から、まず均質な斜面を対象として検討することとした。

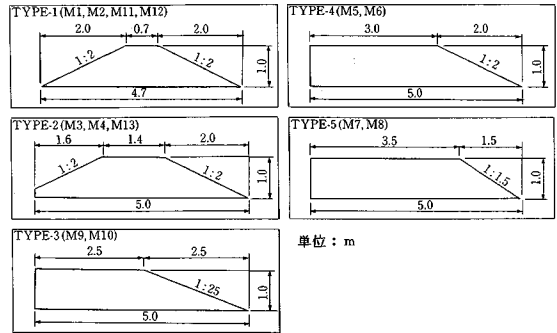
## 2. 斜面の破壊現象の実験的解明

斜面の地震時安定性に関する基本的な研究として、古くから、数多くの模型実験<sup>8),9)</sup>が行われているが、ここでは斜面の設計・評価に用いられる荷重条件(震度、地震動)に対し斜面がどのような挙動や破壊パターンを示すかを把握するために、①震度法に対応する応力状態を現象として模擬した準静的な模型斜面の傾斜破壊実験、②大型振動台を利用した模型斜面の振動破壊実験を行った。以下に、これら2つの実験とその結果の概要を述べる。なお、両者の実験に用いた材料の一般的な物理特性は表一に示すとおりである。

### (1) 傾斜および振動破壊実験の概要<sup>10),11)</sup>

傾斜実験は傾斜用土槽(2.0m×L5.0m×H1.3m)内に含水比(W)、間隙比(e)が一定となるように調整して、模型斜面(W=14%, e=1.1)を作成し、その土槽の一端をクレーンで徐々に吊り上げて傾斜させ斜面にすべり破壊を発生させる実験である。この実験では、①斜面ののり勾配、天端幅の違いが傾斜時の斜面の挙動や破壊形態に及ぼす影響の把握、②静的な解析法による地震時安定評価手法確立のための基礎資料の把握、などを目的とし、5種類の形状の模型斜面により実施した(図一2参照)。

一方、振動実験は傾斜実験と同様に土槽内に作成した模型斜面(TYPE-1)を振動台で加振させ、①斜面の振動特性、破壊特性の把握、②動的解析による地震時安定評価手法確立のための基礎資料の把握、などを目的として実施した実験である。実験は5、10、15、20、25 Hzの5種類の振動数のもとで、おのおの正弦波入力加速度を段階的に増加させ、斜面にクラックやすべりが



図二 傾斜破壊実験の模型形状

生じるまで加振した。各段階における加振は振動台入力加速度を所定の加速度に設定し、約5秒間加振する。その後、約20 gal増加して同様に加振を繰り返す方法で行った。

### (2) 傾斜破壊現象と振動破壊現象の比較

#### a) 破壊過程の比較

破壊に至るまでの過程は、天端幅0.7m、高さ1.0m、斜面勾配1:2の模型斜面(以後、標準斜面という)の傾斜実験の場合、傾斜角 $\theta=33\sim34$ 度(換算水平震度 $K'_h=\sin\theta:0.54\sim0.56$ )前後まで外見上、ほとんど変化がなく安定しており、傾斜角 $35\sim37$ 度( $K'_h=0.54\sim0.60$ )付近で傾斜側のり面と反対側のり面(以後、背後のり面という)上部や傾斜側にテンションクラックを生じながら斜面内部にもせん断によるすべり線が形成され、それらが徐々に進行する。さらに、傾斜角 $38\sim39$ 度( $K'_h=0.62\sim0.63$ )で進行性破壊現象的な全体破壊が生じている。以上の破壊過程は、各現象が現われる傾斜角に若干の違いはあるものの他の斜面形状の模型斜面の場合も同様の傾向を示した。

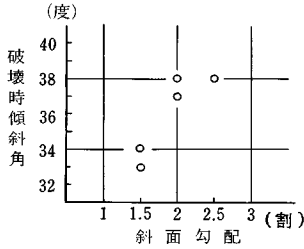


図-3(a) 破壊時傾斜角と斜面勾配の関係

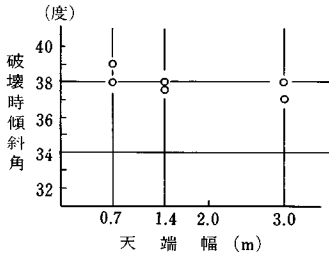


図-3(b) 破壊時傾斜角と斜面天端幅の関係

また、図-3(a)は破壊時の傾斜角を示したものであり、斜面の勾配がゆるいほど破壊時傾斜角は大きい、2割勾配以上になるとほとんど変化しない。しかも、破壊に至るまでのクラックやすべり面の発生形態にはのり勾配の違いによる差がほとんど観察されなかった。図-3(b)には斜面天端幅と斜面の破壊時傾斜角との関係を示したが、天端幅の違いにより破壊時傾斜角はほとんど差がないこともわかる。したがって、斜面が破壊するときの傾斜角はのり勾配に依存するものと考えられる。

一方、振動破壊実験の場合、詳細は省略し文献11)に譲るが、実験時の振動数に関係なく水平および鉛直応答加速度、応答土圧、斜面内部ひずみなどの各種物理量の応答は破壊開始直前まではほとんど顕著な変化がなく、破壊時に急激に増大する。ただし、破壊時の水平加速度の応答倍率は振動数に応じて増減が認められる。すなわち、図-4に示すように、模型斜面が破壊したとき

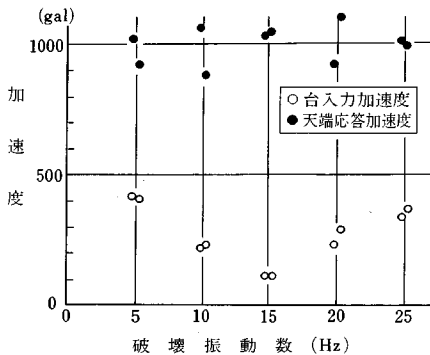


図-4 破壊振動数と破壊時加速度

の振動台入力加速度は、低振動数 (5 Hz) の場合約 400 gal であるが、15 Hz 付近で 100 gal をやや上回る値となり、さらに振動数が大きくなると再び大きくなり、25 Hz の高振動数では 300~370 gal となる。このときのおのおの振動数における天端の水平応答加速度は若干ばらついているものの約 1000 gal とほぼ一定であった。また、振動数 15 Hz における斜面内の加速度応答倍率の等高線は、模型斜面中心線上に中心をもつ長大円弧状の曲線となり、その値は底部から顶部に向けて増幅する層状の分布を示す (後述図-9 参照)。低振動数では円弧がより平坦になり、高振動数では斜面の 1/2~3/4 以上の高さで応答倍率の値が小さくなるものの、等倍率曲線の分布は 15 Hz の結果と類似した状況となっている。なお、別途実施した標準斜面の共振実験によれば、斜面の共振振動数は約 15 Hz であった。

以上のことから、5~25 Hz の範囲の振動実験では約 1000 gal 程度の応答加速度が生じない限り斜面は崩壊しないが、傾斜実験では換算水平震度  $K_H=1.0$  を 980 gal の対応加速度とみなした場合、約 610~620 gal で斜面が破壊することを意味している。

b) 破壊形状の比較

図-5に傾斜実験と振動実験の標準斜面の典型的な破壊形態を示すが、両者に顕著な相違が認められる。すなわち、傾斜実験では背後のり面ののり肩付近と傾斜側のり面ののり尻を結ぶ深い円弧状の破壊形態を示す。しかもり肩部の小崩壊はなく、のり肩の形状を保持したま

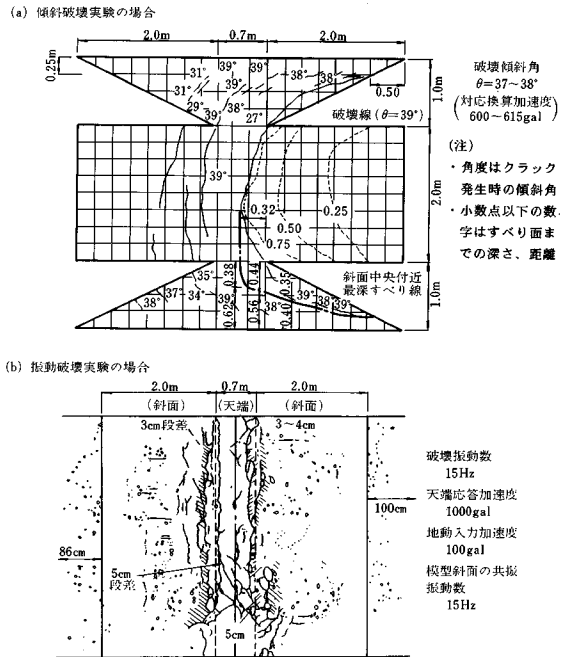


図-5 傾斜破壊実験と振動破壊実験の破壊形態の比較

まの剛体ブロック的なすべり破壊を生じている。一方、振動実験では斜面軸方向のり肩沿いに多くのクラックが集中して発生するのり肩のみの小破壊形態を示す。ただし、振動数により破壊パターンはかなり異なり、低振動数（5 Hz）の場合、破壊は脆性的ですべり位置がやや深く（のり肩直下で約 25～35 cm）崩壊土量も多いが、15 Hz の破壊はのり肩沿いにゆっくりとクラックが多く発生する小さな崩壊（深さ約 15 cm）であり、さらに高次の振動数（25 Hz）ではまず、斜面下方 1/2 の高さ付近からクラックが発生し、徐々に上部に伝播してのり肩の崩壊（深さ約 5 cm）が生じた。なお、実験で崩壊した土塊はのり尻から 60 cm～1 m 内に散乱する。

以上述べたように、形状、土質条件が同じ斜面でも傾斜実験と振動実験とでは破壊過程、破壊形態がかなり異なることがわかる。しかも、両実験の破壊時の加速度（傾斜実験の場合、対応加速度）の最大値を比較した場合、傾斜実験が斜面を安定させる方向の重力を逐次減少し、斜面を不安定にさせる実験であるため、傾斜実験の値の方が小さい。すなわち、振動実験で破壊させるためにはさらにこの値より大きな加速度を必要とすることがわかる。したがって、これらの検討結果から、現在、一般に行っている最大加速度振幅を震度に換算し、これを地震力としてすべり面法等の静的な評価法で安定性を検討することは、地震波の加速度波形を入力する動的評価法に比べて、現象的にも過酷な評価であることが確認できた。

### 3. 模型実験の数値シミュレーションによる斜面安定解析法の検証

#### (1) 数値解析手法の概要

傾斜破壊実験の数値シミュレーションは、二次元平面ひずみ理論に地盤材料の非線形性を導入した非線形弾性解析プログラム“SLOPAN”<sup>12)</sup>で行った。なお、傾斜実験と震度法の間には図-6 に示す関係があり、 $k$  の値が十分小さければ  $1+k^2/2 \approx 1$  とし  $\theta = \alpha$  とすることができ、模型斜面に傾斜を与えることと、斜面に震度を与えることとほぼ等価となる。しかしながら、本研究で対象とした模型斜面の場合、破壊近傍では  $k^2/2$  による誤差が 21～33% にもなり無視できない値となる。そのため、傾斜実験の数値シミュレーションではこの値を省略せず、数値解析に導入した。

一方、振動破壊実験の数値シミュレーションは有限要素法による粘弾性動的応答解析理論に基づいて開発されたプログラム“NODAL”<sup>13)</sup>で行った。

また、数値シミュレーションに用いる模型材料の物性値とその非線形変化特性は、低拘束圧下（10～300 gf/cm<sup>2</sup>）の各種試験により把握した。実施した試験は物理試験、模型斜面の土質条件下での一軸、三軸圧縮試験、

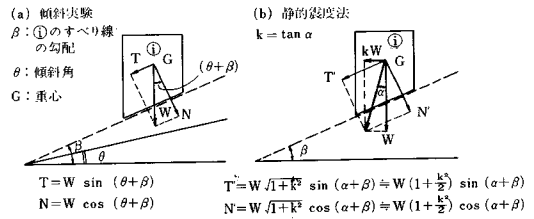


図-6 傾斜実験と震度法との対応

表-2 数値解析に用いた非線形特性

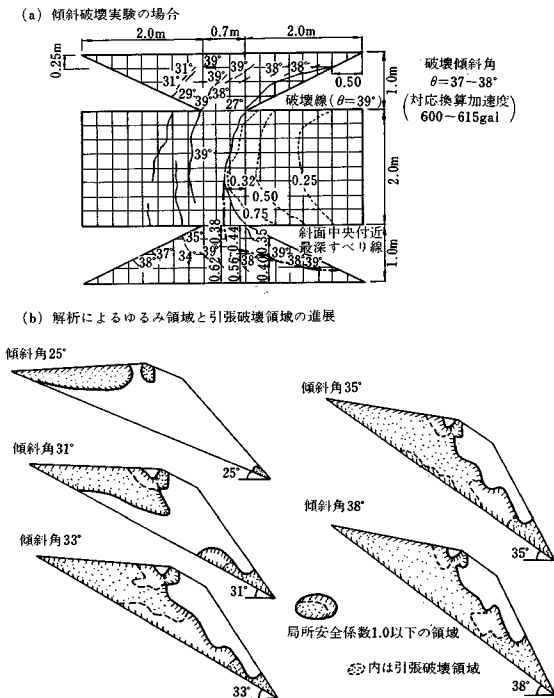
解析法	変形特性の非線形変化式
静的 FEM	(変形係数の変化式) $E/E_0 = R_0^{0.48}$ ( $0 \leq R_0 \leq 1.0$ ) $E_0$ : 初期変形係数 または $E/E_0 = 1.0$ ( $R_0 > 1.0$ ) $E$ : 応力レベルに応じた後線形変形係数 ここで、 $R_0 = \frac{1}{0.43} \cdot \frac{(C \cdot \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2})}{(C \cdot \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2})}$ (ポアソン化) $\nu_0 = 0.3$ (一定値: 模型地盤実験値より設定)
動的 FEM	(せん断弾性係数の変化式) $G/G_0 = \frac{1}{1 + 2.69 \times 10^{-4} \gamma}$ ここに $G_0 = 600 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$ ( $\sigma'_v$ ) <sup>0.525</sup> (単位: kgf/cm <sup>2</sup> ) (減衰化の変化式) $h = 0.143 \cdot \frac{\gamma}{2.69 \times 10^{-4} + \gamma}$
備考	(試験条件) ・土質条件 間隙比 $e = 1.1$ 粘着力 $c = 25$ gf/cm <sup>2</sup> $\gamma$ : せん断ひずみ 含水比 $w = 14\%$ 内部摩擦角 $\phi = 36^\circ$ ・三軸圧縮試験の強度定数 ・ $\sigma'_v$ : 有効拘束圧

動的中空ねじり試験、模型地盤の弾性波速度試験である。表-2 に解析に用いた非線形特性を示すが、実験結果等の詳細は文献 14) を参照されたい。

#### (2) 解析結果とその考察

##### a) 傾斜破壊実験の場合

実験の数値シミュレーションで得られた応力と変形の変化過程から、斜面の破壊過程は以下のように解釈することができた。すなわち、模型斜面の形状（天端幅、のり面勾配）の違いにより、引張り、ゆるみ領域などの現象が現われる傾斜角の違いはあるものの、斜面の挙動としては、①背後のり面に引張りによるゆるみ領域の発生（換算水平震度  $K_H \approx 0.34 \sim 0.42$ ）、②傾斜側斜面のり尻に引張りによるゆるみ領域の発生（ $K_H \approx 0.45$ ）、③①、②のゆるみ領域が進行し斜面内部で互いに連結する。④斜面内部のせん断によるゆるみ領域が引張りによるゆるみ状態へと移行（ $K_H \approx 0.54$ 、せん断・ずれ変形からテンションクラックへと移行）、⑤背後のり面のり肩と傾斜側斜面のり尻を結ぶ全域が引張りによるゆるみ領域となり、全体破壊（ $K_H \approx 0.61$ ）のような傾向が解析的に得られた。これらの結果は、図-7 に示すように実



図一七 解析結果と実験結果の破壊領域の比較

験中に観察されたクラックの発生する位置やその進展の様相などの現象とほぼ対応している。また、予想される破壊のすべり面の形状も、斜面のり肩部の形状を保持したままの深い円弧形状を示し、実験結果とよく一致している。

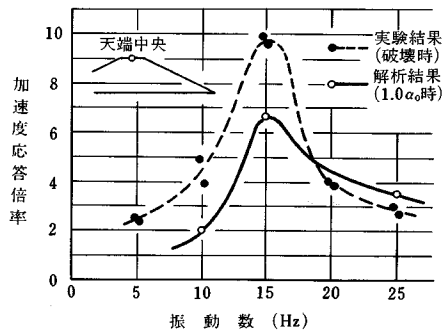
b) 振動破壊実験の場合

図一八は実験による破壊時の台入力加速度  $1.0 \alpha_0$  のもとで各振動数ごとに解析的に得られた斜面天端中央における加速度の応答倍率と振動数の関係を実験結果と比較して示したものである。図一九は解析で得られた斜面内の加速度応答倍率の分布と実験結果との対比の一例である。これらの図から、両者の応答倍率の値には違いはあるが、共振振動数は両者ともほぼ 15 Hz と一致している。ただし、解析による共振曲線は全般的に実験よりもやや高振動数側にある。これは、数値解析において、破壊領域の物性値の低減を精度よく模擬できず、剛性等大きく評価していることも 1 つの原因と考えられる。

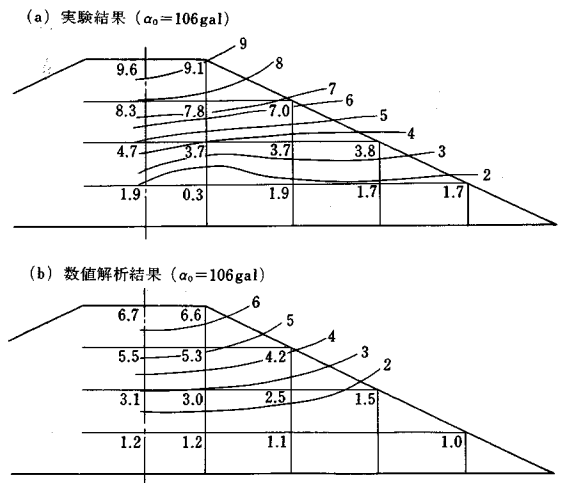
また、詳細は文献 11) を参照して頂きたいが、数値解析により得られた各振動数ごとの応答変位は、振動数の違いにより変位の増幅過程が異なっており、振動数が高いほど 2 次モード的な変位分布を示す。さらに、のり面上の鉛直変位の応答は、各振動数で模型の斜面高さ 1/2 から天端のり肩付近に顕著な変動が認められ、振動数の増加とともに鉛直変位の変動範囲が天端付近からのり面全体の表層に広がる傾向となった。

図一十は各振動数ごとに、解析によるテンション領域と実験による破壊領域とを対比して示したものである。振動数 15 Hz, 25 Hz ではのり肩付近からのり面中央付近にかけてテンション領域が発生する。特に、共振振動数では、振動台入力加速度の増加に伴い、テンション領域の発生が徐々に増加し、斜面内の深部にまで進行した。一方、振動数 10 Hz の場合には斜面表層の一層のみにテンション領域が生じているだけである。したがって、模型材料に引張強度を期待しないものとする、解析上、このテンション領域は崩壊することになり、ほとんどのり面および天端の表層的なすべり崩壊となるものと推察でき、振動破壊実験の定性的な傾向と一致しているものと判断できる。

以上、a), b) の数値シミュレーション解析の結果から、破壊後の現象を定量的に評価するために表層部のゆるみ領域、テンションクラックの影響を忠実に考慮し得る解析手法の開発を必要とするものの上記プログラム“SLOPAN”, “NODAL” の解析手法の斜面への適用の



図一八 加速度応答倍率の共振曲線



図一九 斜面内の加速度応答倍率の分布の比較 (振動数 15 Hz の場合)

妥当性はある程度確認できたものとする。以下にはこれら解析プログラムを用いて検討した結果を述べる。

(3) 数値シミュレーション解析による動的・静的安定性評価比較

斜面の安定性を評価する際に用いる一般的な評価項目としては、すべり安全率と局所安全係数とがある。しか

表-3 動的解析のすべり安全率と最大等価加速度

振動数	円弧番号	すべり安全率		等価加速度	
		S.F min		水平 $U_A$ max	鉛直 $V_A$ max
10Hz	1	4.28 (6/8)	430gal (2/8)	4gal (6.5/8)	
	2	3.61 (6/8)	405 (2/8)	9 (6.5/8)	
	3	3.26 (6/8)	391 (2/8)	10 (2.5/8)	
	4	2.02 (6/8)	367 (2/8)	9 (2.5/8)	
	5	1.88 (6/8)	351 (2/8)	7 (2.5/8)	
15Hz	1	2.97 (0.5/8)	666 (4.5/8)	15 (5/8)	
	2	3.06 (0.5/8)	544 (4.5/8)	33 (5/8)	
	3	2.96 (0.5/8)	473 (4.5/8)	34 (5/8)	
	4	2.03 (8/8)	377 (4.5/8)	28 (5/8)	
	5	1.89 (8/8)	333 (4.5/8)	20 (5/8)	
25Hz	1	3.20 (4.5/8)	426 (0/8)	473 (7.5/8)	
	2	2.93 (1.5/8)	450 (5.5/8)	322 (7.5/8)	
	3	3.06 (1.5/8)	361 (5.5/8)	243 (7.5/8)	
	4	2.35 (8/8)	239 (4.5/8)	182 (7.5/8)	
	5	2.63 (8/8)	157 (8/8)	100 (7.5/8)	

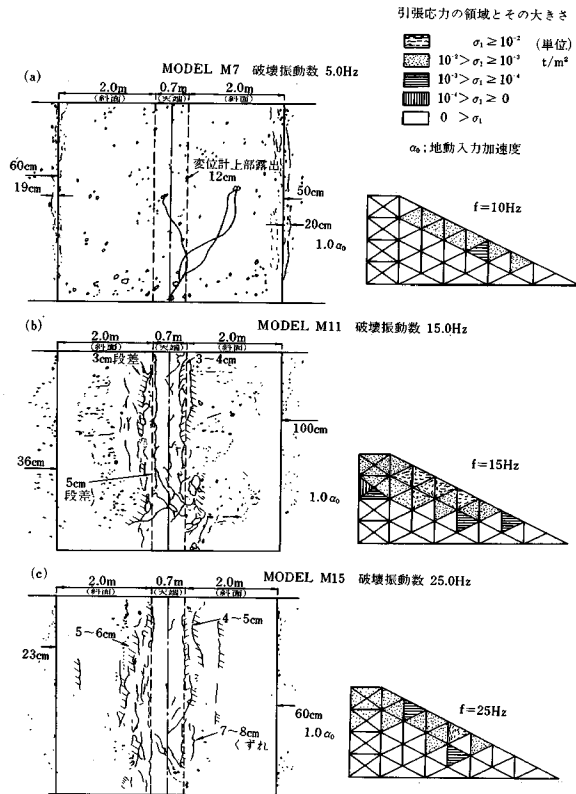
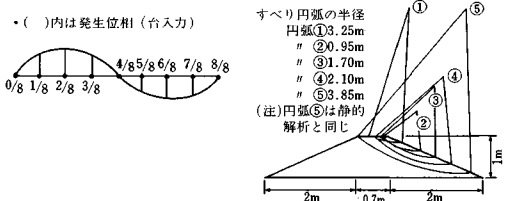


図-10 振動実験結果と動的解析のテンション破壊領域



しながら、各種解析法で得られた結果は、荷重条件がおのおの異なるため、お互いの相互関係が明確でなく、その評価項目の統一的な評価ができない。そこで、評価項目にかかわる直接的な物性値、荷重条件を同一の基準の下で考える必要があり、その点に配慮した静的・動的すべり安全率、等価震度についての検討を行った。以下では傾斜および振動破壊実験の数値シミュレーションによる結果をもとに得られた知見を述べる。

図-11は傾斜実験を円弧すべり面法解析、静的FEM解析により模擬して得られた傾斜角とすべり安全率の変化を示したものである。表-3は振動実験を動的

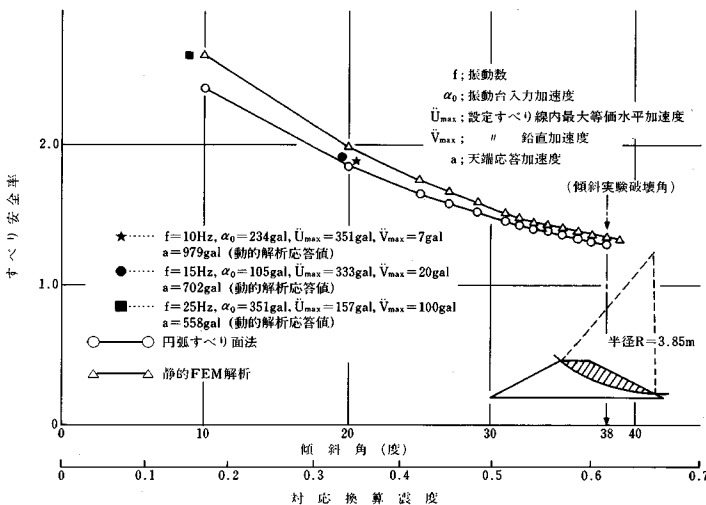


図-11 すべり安全率と各種評価法の対応関係

FEM解析により模擬し、各設定すべり線について求めた時刻歴すべり安全率の最小値である。設定したすべり線は実験時の破壊状況および解析で得られた応力分布より求まる潜在すべり線を参考にして決定したものである。これらの結果から理解されるように、実験で破壊と判定したときの荷重条件に対し動的FEM解析では1.8以上、静的な解析では1.25以上のすべり安全率となっており、すべり安全率の面からはいずれの解析でも模型実験の破壊現象を定量的に説明できていない。この原因として、模型実験で観察されたテンションクラックおよび破壊領域の材料の強度低下やクラック等の発生に伴う動的剛性の変化などが解析

に導入されていないこと、低拘束圧下の材料の強度定数がゴムスリーブなどの拘束の影響で過大評価となっていること、引張側の材料特性が実験的に把握されておらず、解析に反映されなかったことなどが考えられる。事実、文献14)によると、三軸試験の材料強度はゴムスリーブの拘束のため約20~40%高めとなるとの報告もある。したがって、ここで用いた強度定数をその割合で低減した場合、静的な解析ではすべり安全率がほぼ1.0となり、傾斜実験の破壊を説明できることがわかる。

一方、表-3には動的FEM解析で得られた各設定すべり線ごとの等価加速度も示されている。等価加速度は静的な解析に用いる震度による静的地震力と動的FEM解析の動的地震力との対応関係を検討するために導入したものであり、次式で定義した。

$$U_A(t) = \frac{\sum_{i=1}^n u_{Ai} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad V_A(t) = \frac{\sum_{i=1}^n v_{Ai} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

ここに、

- $U_A(t), V_A(t)$ : 水平、鉛直方向の等価加速度
- $u_{Ai}, v_{Ai}$ : 要素  $i$  の水平、鉛直加速度
- $m_i$ : 要素  $i$  の質量

すなわち、動的FEM解析による各節点の加速度を用いて得られる設定すべり線上の要素に働く慣性力の総和をその土塊の質量の総和の重みつき平均として表わしたものである。なお、等価加速度の時刻歴の最大値を重力加速度で割った値を等価震度と定義する。

これらの結果から、各すべり線ごとの等価水平加速度は、いずれの振動数の場合でも、表層の浅い円弧形状ほど大きい値(400~670 gal)を示しており、深い円弧形状ほど小さい値(160~350 gal)となっている。一方、等価鉛直加速度は10, 15 Hzの振動数の場合、水平成分の数%以下とかなり小さいが、25 Hzの場合には水平成分の約65~100%強の値となり、高次の振動数側になるほど鉛直動が卓越している。これは振動数の違いによる振動モードの違いが考えられる。

以上より、すべり面の位置、すべり面上の土塊の体積による影響が現われているものの、同時刻・同方向にすべり土塊に働く地震力は斜面に生じる最大応答加速度による地震力よりかなり小さいことがわかった。また、地震動の卓越振動数や水平・鉛直加速度の位相のずれなどを考慮すれば、斜面の安定性評価上は、従来、設計で一般的に用いられている鉛直震度の考え方で十分であることがわかる。なお、これら各評価法相互の関係や解釈については、次章以降で述べる。

#### 4. 斜面の地震時安定性評価に関する考察

前述したように、斜面の振動破壊実験がきわめて大きな振動台入力加速度と応答加速度の条件下であったにもかかわらず、のり肩表層付近の局所的な浅い崩壊であるのに対し、震度法を模擬した傾斜破壊実験は深い円弧状のすべり面を有する全体破壊であることから、地震時の振動による斜面の崩壊は地質的な弱面等がないかぎり、必ずしも大きな土塊の滑動とならないことを示唆している。

また、模型実験の数値シミュレーション解析による安定性評価によると、同一すべり面を対象としたすべり安全率の大小関係が前述の図-11に示されるように、(円弧すべり面法) < (静的FEM解析) < (動的FEM解析) となっている。各解析手法が、このような傾向を示す理由として、以下のことが考えられる。すなわち、円弧すべり面法と静的FEM解析では、荷重としての地震力が同一方向に無限時間作用した場合の安全率であるのに対し、動的FEM解析では、有限な時間で地震力の方向とその大きさが時々刻々変化し、しかも同時刻でも応答特性が場所により異なり、位相差が生じるという条件下での安全率である。したがって、動的FEM解析で得られる要素ごとの局所安全係数があるすべり面上のある場所で最小であっても、同じすべり面の他の場所では最小となっておらず、しかも場所によって、局所安全係数が最小となる方向は必ずしも一致しない。それゆえ、動的FEM解析から求めたあるすべり面全体としてのすべり安全率は高くなる。さらに、円弧すべり面法と静的FEM解析によるすべり安全率の差は、前者がすべり面上の土塊を剛体として計算しているのに対し、後者は、分割した有限要素を弾(塑)性体または粘弾(塑)性体とし、要素同士のすべての力と変位のつり合いを考慮して、すべり安全率を算定している。そのため、任意のすべり面上の力のつり合いを考えた場合、円弧すべり

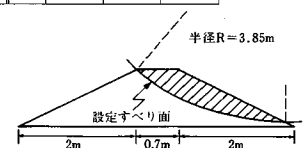
表-4 振動・傾斜実験結果と各種評価法との対応関係 (洪積砂の模型斜面の場合)

動的評価法							静的評価法			
振動数 (Hz)	入力加速度 (gal)	天端応答水平加速度 (gal)	対応換算震度	最小すべり安全率	動的等価線形解析		傾斜破壊実験 傾斜角 対応換算 (度)	静的な解析		
					最大等価加速度 (gal)	水平平均値 $U_{eq}$		円弧すべり面法によるすべり安全率	静的FEM解析によるすべり安全率	
10	235	1012	1.032	1.88	351	7	22	0.37	1.76 (1.52)*	1.89 (1.71)*
15	105	1027	1.048	1.89	333	20				
25	351	998	1.018	2.63	157	100				

\*  $K_H = \sin \theta_1$ ,  $\theta_1$ : 傾斜角  
 \*\* 応答加速度  $\alpha$  を重力加速度  $g$  で割った地震力の大きさ

(注) 図中の設定すべり面形状は円弧番号⑤に対応する。

\* ( )内の安全率はテンションクラックを考慮



面法では、静的FEM解析で実施される変形等による応力分散が考慮されないため、過大な力がすべり面に作用することになり、すべり安全率は低下し厳しい評価となるものとする。

一方、表4~6は各種安定性評価法の結果の相互関係を同一荷重条件の下で行うため、等価加速度の概念などを用いて考察しようと試みた対比表である。表4は2.~3.で述べた一連の模型実験とその解析の評価結果の例であり、表5は著者らが別途実施した乾燥した標準砂(岐阜砂)による模型斜面の実験と解析評価例である。すなわち、傾斜破壊実験、振動破壊実験の結果とその動的、静的な評価法による数値シミュレーションの結果をすべり安全率と表中に定義する種々の震度の値とで示したものである。表4の静的評価法の結果は振動数15

Hzの動的すべり安全率を基準とし、その値に等しくなるときの静的FEM解析の震度を求め、傾斜実験時の傾斜角、換算震度として示したものである。これより、動的解析における等価震度(最大等価加速度/重力加速度)と換算震度はほぼ等しいことがわかる。また、表5によると、2.の実験結果と同様、実験的には振動実験の方が傾斜実験に比べ、かなり大きな応答加速度で破壊したことがわかる。ただし、解析的には動的・静的FEM解析結果は震度・安全率ともほぼ等しい値を示している。また、両表より作用する震度の大きさが等しい場合にはすべり面法による結果が最も厳しくなることも理解できよう。次に、表6は実際の洪積地盤からなる実規模斜面(斜面高さ約25m、平均勾配1.5~2.0割)を対象に、最大加速度300galとしたEL.CENTRO波

表5 振動・傾斜実験結果と各種評価法との対応関係(岐阜砂の模型斜面の場合)

対象すべり線形状	動的評価法						静的評価法					
	振動破壊実験			動的解析(等価線形解析)			静的な解析		傾斜破壊実験			
振動台入力周波数(Hz)	振動台入力加速度(gal)	斜面入力加速度(gal)	斜面内の水平応答加速度(gal)	対応すべり震度	最小すべり安全率	最大等価水平加速度(gal)	解析に用いた水平震度	円弧すべり面法による安全率	線形FEMによるすべり安全率	破壊時の傾斜角θ(度)	対応換算水平震度	
円弧 No.1	5	100	160~235	162~205	0.165~0.209	3.36	177	0.201	2.71	3.42	9 10	0.156 0.174
		150	210~280	210~250	0.214~0.255	3.18	226	0.250	2.56	3.23		
	200	270~290	290~295	0.296~0.301	3.14	286	0.285	2.45	3.10			
	円弧No.1付近の上部斜面崩壊						—	—	—	—		
円弧 No.2	5	100	160~235	160~285	0.163~0.291	1.28	213	0.201	1.34	1.33	11	0.191
		150	210~280	190~350	0.194~0.357	1.22	260	0.250	1.26	1.26		
	200	270~290	225~315	0.230~0.321	1.23	279	0.285	1.21	1.21			
	350	円弧No.2付近の斜面もすべり全体崩壊をす。 (注)						—	—	—		

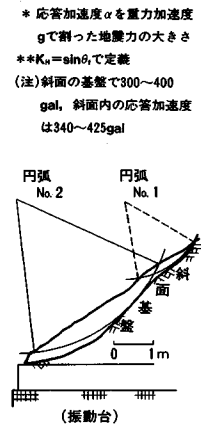


表6 実斜面の地震時すべり安全率と地震力との対応

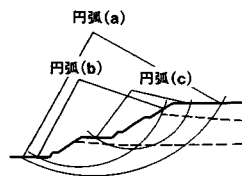
地震力の種類	すべり安全率	動的解析(等価線形)			静的な解析	
		斜面のすべり線内最大応答加速度(gal)	すべり線の最大等価水平加速度(鉛直)(gal)	対応換算震度	円弧すべり面法による逆算水平震度***	***
円弧 (a)	K <sub>h</sub>	1.54	500	371	0.378	0.315
		1.42	720	379	0.367	0.360
	K <sub>h</sub> , K <sub>v</sub>	1.58	510	328(65)	0.335	0.30(0.15)
		1.24	610	382(73)	0.390	0.43(0.215)
円弧 (b)	K <sub>h</sub>	2.16	500	367	0.374	0.277
		1.64	720	526	0.537	0.460
	K <sub>h</sub> , K <sub>v</sub>	1.95	500	429(37)	0.438	0.38(0.19)
		1.56	600	511(368)	0.521	0.51(0.255)
円弧 (c)	K <sub>h</sub>	2.22	500	380	0.388	0.245
		1.74	700	513	0.523	0.425
	K <sub>h</sub> , K <sub>v</sub>	1.97	500	426(102)	0.435	0.404(0.252)
		1.61	700	506(183)	0.516	0.504(0.252)

\* 動的解析の場合、入力基礎面の水平および鉛直加速度は、300galおよび150galとし、波形はEL.CENTRO波を使用

\*\* 第n回加速度を重力加速度gで割った地震力の大きさ

\*\*\* 円弧すべり面法による安全率が表中の値となったときの震度

仮想設定すべり線





形を入力して得られた動的解析結果と、その動的解析のすべり安全率となるように円弧すべり面法で逆算した震度との対応を示したものである。表中の安全率は動的すべり安全率の時刻歴変化より最小値を含む2点を抽出し示したものである。表より、すべり線の土塊に働く等価加速度は土塊内の最大応答加速度値の約50~80%程度となっている。しかしながら、等価加速度から求めた換算震度と円弧すべり面法で換算した逆算震度と比べると、両者はほぼ等しいか前者の方が若干大きい値となっている。

以上、一般的に、動的解析の最小すべり安全率はその瞬間でのすべり面上の土塊の等価加速度から求めた換算震度を静的評価法の震度として与えた場合のすべり安全率にほぼ等しく、最大加速度の振幅を震度として与えた静的評価法の結果の方が小さくなる。このことは、任意のすべり面上の土塊に同一震度(荷重)を与えれば、静的、動的各解析を問わず、同一のすべり安全率が得られ、両者の差は土塊の応答特性に伴う等価加速度の大小によって生ずることを意味するものである。

以上の観点から、従来の静的な評価手法は動的評価手法に比べて過酷な評価手法であり、中でも従来から用いられている円弧すべり面法が最も厳しい評価法であるといえる。また、静的な評価法では地震時の安定性を評価する際の地震力として、従来から設計地震動あるいは応答加速度の最大振幅を震度として一様に与えて検討しているが、これは実際の地震動によって作用する地震力を過大評価していることになり、静的な解析で動的解析と同一の荷重条件の下で安定性を評価するためには、すべり面上の土塊に働く等価加速度を静的な地震力の震度として与え、すべり安全率を評価すればよいものと考えられる。

## 5. ま と め

本報告では一連の実験的・解析的な検討により、強地震動下の地震力による斜面の破壊過程や破壊形態を把握するとともに、その実験結果をもとに各種評価法の検証や各種評価法で得られる結果の相互比較、動的荷重と静的荷重の大きさのつ意味などについて考察を行った。以下に得られた主な知見を示す。

(1) 今回の傾斜破壊実験では、斜面ののり勾配が緩いほど、斜面の全体破壊が始まる傾斜角が大きくなるが、2割以上ののり勾配になると破壊時傾斜角はほとんど変化しない。また、斜面天端幅の違いは破壊時傾斜角に影響しない。さらに、破壊に至るまでのクラックやすべり面の発生様式にはのり勾配の違いに差はほとんど認められない。

(2) 今回の振動破壊実験では斜面天端の応答加速度

が1000 gal程度になると破壊が急激に生じる。それまでは斜面に顕著な変化がなく全体として安定している。

(3) 斜面の破壊形態は傾斜破壊実験の場合、深い円弧状の全体破壊であるが、振動破壊実験ではのり肩のみの小崩壊である。しかしながら、両者を破壊時の加速度で比較した場合、傾斜実験では630~640 gal、振動実験では約1000 galであり後者の地震動の方が大きいことがわかった。

(4) (3)より、設計検討で一般に行っている地震動の最大加速度振幅値を震度に換算し、円形すべり面法等の静的な評価法の地震力とすることは、地震波の波形を入力する動的評価法に比べて、現象的にも過酷な評価であることが実験的に実証できた。

(5) 傾斜・振動破壊実験結果とその数値シミュレーション解析の結果の比較から、著者らの開発した解析プログラム“SLODAN”“NODAL”は斜面の逐次破壊過程を定性的に良く模擬でき、物性値の評価とそのモデル化が適切にできれば、強地震動下の斜面安定性評価法として有効な手法であるものと考えられる。

(6) 模型実験の結果と円弧すべり面法、静的FEM解析法、動的FEM解析法による解析結果とその相互比較・検証から、静的な評価法は過酷な評価法であり、中でも従来から設計に使われている円弧すべり面法が最も厳しい安定性評価法であることがわかった。

(7) 種々の模型実験と解析との相互比較によると、地震動の最大加速度値を作用震度とする従来の静的な評価法と地震動を用いる動的評価法は地震時安定性評価法としていずれも有効なものであることが確認できたが、両者は荷重評価の観点で大きな違いがある。したがって、静的な評価法で動的評価法と同一の安定性評価を行うためには、すべり面上の土塊に働く等価加速度を震度として与え、すべり安全率を評価すればよいことがわかった。

## 6. あとがき

本研究では強地震動下の斜面安定について、設計上の観点から種々の検証がなされ、今後、斜面の合理的設計法を体系化するうえでの有益な資料が得られたものと考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始貴重なご助言を賜った当所 林 正夫博士をはじめとする関係各位、ならびに多大なご協力を頂いた電力各社の各位に深謝の意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) 松尾 稔・板橋一雄・佐々木康: 実際事例の逆解析による土木構造物の耐震性に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 343, pp. 25~33, 1984.
- 2) 伊藤 洋・北原義浩・平田和太: 原子力発電所周辺切取

- り斜面の耐震性評価のための入力地震動と震度の関係に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 370, pp. 47~56, 1986.
- 3) Uwabe, T., Kitazawa, S. and Higaki, N. : Shaking Table Tests and Circular Arc Analysis for Large Models of Embankments on Saturated Sand Layers, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 4, pp. 1~15, Dec., 1986.
  - 4) Ohmachi, T. and Yokoyama, H. : An Interactive Method for Seismic Stability Analysis of Three Dimensional Earth Dams, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 2, June 1983.
  - 5) Ohmachi, T. and Momenzadeth, M. : Impulsive Failure Experiments on V-Shaped Sloping Embankment Models, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp. 49~57, Dec. 1984.
  - 6) 岩崎敏男・川島一彦・安江朝光・仲野公章：地震応答解析による沿道斜面の耐震性の検討—1978年伊豆大島近海地震による梨本地区の斜面崩壊の解析—, 土木研究所資料, 土研資料第1600号, 昭和55年7月.
  - 7) 清水泰弘・市川康明・川本桃万：不連続性岩盤斜面の崩壊形状に関する実験的研究, 土木学会第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1986年2月.
  - 8) たとえば, Seed, H.B. and Goodman, R.E. : Earthquake Stability of Slopes of Cohesionless soils, ASCE, Vol. 90, No. SN 6, pp. 43~73, Nov., 1964.
  - 9) たとえば, 黒岩真彦・谷場照志：ロックフィルダムの模型振動実験による安全性の検討, 関西電力総研資料, No. 77-072, 1977年10月.
  - 10) 伊藤 洋・渡辺啓行・今出 博：原子力発電所大規模斜面の地震時安定性—模型盛土斜面の傾斜破壊実験—, 電力中央研究所報告, 研究報告 No. 381030, 昭和57年4月.
  - 11) 伊藤 洋・渡辺啓行：原子力発電所大規模斜面の地震時安定性—振動破壊実験の動的応答解析とその一考察—, 電力中央研究所報告, 研究報告 No. 382020, 昭和57年9月.
  - 12) 伊藤 洋・北原義浩：破砕帯を有する岩盤斜面掘削時の挙動解析と挙動観測に関する検討, 電力中央研究所報告, 研究報告 No. 381009, 昭和56年10月.
  - 13) 渡辺啓行・馬場恭平：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察, 大ダム, No. 97, 1981年9月.
  - 14) 伊藤 洋・渡辺啓行・今出 博：原子力発電所大規模斜面の地震時安定性—模型盛土斜面材料(洪積砂)の低拘束圧下における静的・動的力学特性—, 電力中央研究所報告, 研究報告 No. 382020, 昭和57年9月.

(1988.10.22・受付)