

(財)電力中央研究所 (正)石田毅・(正)渡辺啓行・(正)北原義浩

1. 緒言

長大斜面の地震時安定性を調べるため、標準砂(岐阜砂)などで一定形状の斜面模型を作成し、模型の片端をクレーンで釣り上げ傾斜させながら静的に破壊する実験、および模型を振動台上にのせ水平振動を加えて動的に破壊する実験を行なった。これらの実験結果を簡便な円弧すべり面法・複合すべり面法、および静的・動的有限要素法で解析した。なお、解析に必要な模型実験材料の諸物性は、低拘束圧下で実施された静的3軸せん断試験・動的中空ねじれせん断試験の結果に基づいて表1のように定めた。

2. 静的破壊実験における斜面の逐次破壊の解析と簡便計算法による安全率²⁾

弱層によりすべり面が規定される斜面の破壊を静的破壊実験により検討した。まず模型下端を釣り上げ逆傾斜をつけながら、斜面下部基盤にベントナイトを塗りつけて弱層を表現し、その上に湿潤砂を載せて斜面模型を作成した。なお、模型材料と基盤との接触を配慮して、基盤には模型実験材料をはりつけた。次いで、釣り上げていた模型下端を序々に下げ接地したところ(傾斜角 $\theta = 0^\circ$)、斜面上方に水平な引張亀裂が発生した。さらに、水平地震力が作用している状態をつくるため、模型上端を釣り上げて傾斜角を増大させていったところ、図1のように 9.9° でベントナイト層を含む基盤沿いの深いすべり面により斜面が崩壊した。

この実験における逐次破壊の進展をシミュレートするため、傾斜角 $\theta = 0^\circ$ から順次 2° 毎に 12° まで7段階にわたって有限要素法による増分型の応力解析を行なった。すなわち、各段階で表1の定数のクーロンの式で表示される破壊規準に抵触した要素のヤング率を初期値の $1/1000$ 、ポアソン比を 0.45 に順次置きかえて解析を進めた。なお、模型実験材料と基盤との接触状態を、図1の斜面底面の下にさらに一層の境界要素を設け境界要素の下端を固定することにより表現した。解析結果は、 $\theta = 2^\circ$ までにベントナイト層がすべて破壊し次第に破壊が基盤沿いに進展していくことを示しており実験結果とよく一致している。

さて同じ実験結果を簡便計算法で説明するためすべり面を図1の円弧で近似し、ベントナイトと湿潤砂のピーク強度を用いて、破壊傾斜角に対応する水平震度 $k = \tan 9.9^\circ = 0.17$ でのすべり安全率を算出したところ 1.10 と大きすぎる値となった。一方、有限要素法による弾性解析結果は図4より $\theta = 0^\circ$ で斜面上部に引張領域が存在することを示している。そこで、斜面上部にはすでに引張破壊が生じ強度は残留強度にまで低下しているものと考え、実際のすべり面に近い複合すべり面に沿って計算したところ、安全率は 1.00 となった。

このように、有限要素法や簡便計算法によって

表-1 解析に用いた模型実験材料の諸物性¹⁾

(1) 湿潤砂 ($e_0 = 0.95$, $w = 8\%$) の静的・動的特性

密 度	$\rho = 1.662 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
静的ヤング率	$E = 5.00 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \approx 0.49 \text{ (MPa)}$
静的ポアソン比	$\nu = 0.30$
動的せん断定数	$G = 496 \text{ (dyn/cm}^2\text{)}^{0.269} \cdot \frac{4.52 \times 10^{-4}}{4.52 \times 10^{-4} + \tau} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
減 衰 比	$h = 0.400 \cdot \frac{\tau}{\tau + 4.52 \times 10^{-4}}$
動的ポアソン比	$\nu = 0.25$
σ_m : 平均主応力 (kgf/cm ²); τ : せん断ひずみ	

(2) ベントナイト ($w = 159\%$) の静的特性

密 度	$\rho = 1.280 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
静的ヤング率	$E = 1.50 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \approx 0.147 \text{ (MPa)}$
静的ポアソン比	$\nu = 0.35$

(3) 強度定数

含水比 w (%)	初期値 c_0 (kgf/cm ²)	peak 強度 c (kgf/cm ²)	ϕ (deg)	残留強度 c' (kgf/cm ²)	ϕ' (deg)	該当する実験ケース	
湿潤砂	8	0.82	60.0	10.7	18.0	15.3	静的破壊実験(図1)
		0.95	38.0	9.6	11.0	14.0	動的破壊実験(図2)
乾燥砂	0	0.95	10.0	27.5	4.0	19.0	動的破壊実験(図2)
ベントナイト	159	4.07	22.0	0	22.0	0	静的破壊実験(図1)

(付) 逐次破壊機構の解析には引張強度 σ_t を、湿潤砂: ベントナイトと 0.6 、
 $\sigma_t = 30 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ と仮定した。

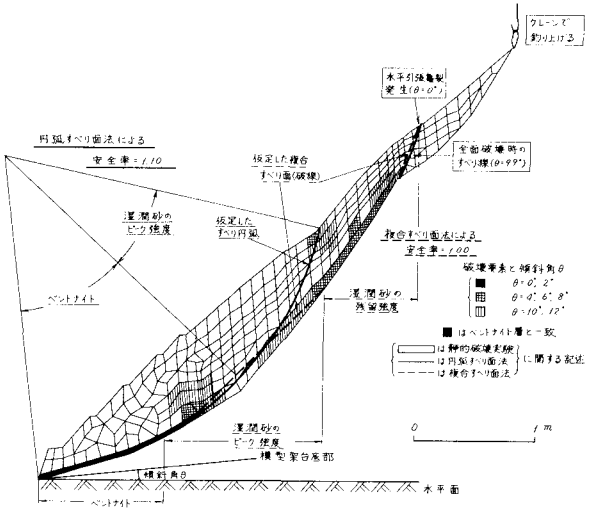


図-1 静的破壊実験結果と円弧すべり面・複合すべり面モデル

模型実験の静的な破壊の状態を十分シミュレートしうることが明らかとなった。

3. 動的破壊実験と円弧すべり面法による安全率および静的・動的F.E.M.による安全率³⁾

斜面模型を振動台上にのせ、正弦波5Hzの水平振動を与え、その振幅を増大させて斜面を破壊させる実験を行なったところ、図2に示すように、台上200 cm/s²で斜面上1/3が崩壊し、次いで台上300 cm/s²で斜面全体が崩壊した。ここに台上加速度とは振動台を水平加振する入力値であり、加速度計④⑤で検出された斜面基盤上の応答値は図3に示すとおりである。さて、この応答値を斜面基盤に入力し、実験結果を粘弾性モデルを用いた動的有限要素法によりシミュレートしたところ、図3に示すように、台上200 cm/s²

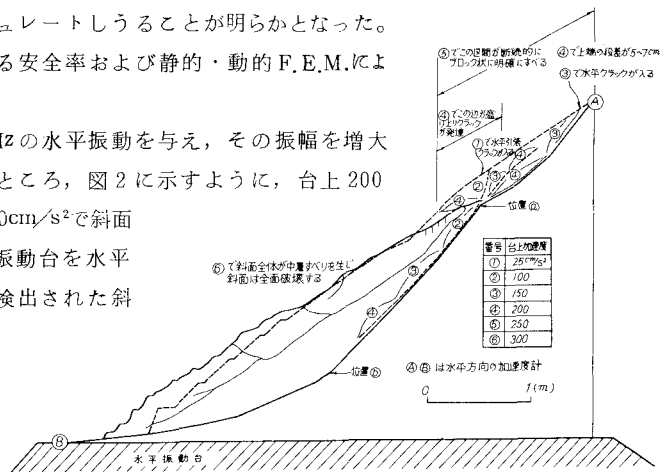


図-2 動的破壊実験での斜面の破壊状況

の方が台上100 cm/s²よりも破壊規準に抵触する要素が少ない結果を得た。これは図3に示したように、台上200 cm/s²では斜面基盤の上端と下端で入力される加速度の差が小さいのに対し、台上100・150 cm/s²ではこの差が大きく斜面がねじれた状態になり大きな応力が発生するためと思われる。破壊した要素が多くてもマクロ的なすべり破壊が生じるとは限らない。そこで、図4に示した2つの円弧について各時刻の応力分布からすべり安全率を求め、安全率の時刻歴を得た。なお、模型作成から実験までの24時間に斜面下端にかなり多量の水が排水された事実から斜面上部には乾燥砂の強度を、さらに初期応力状態で引張応力が10 gf/cm²以上のところでは微細な引張破壊の発生があると思われるので残留強度を採用した。その結果は図5に示すとおり、円弧1は複雑な破壊機構を有すると思われる実験での破壊を十分説明できないが、円弧2では台上加速度の増大とともに安全率の時刻歴の最小値が減少傾向にあり、動的解析が妥当な結果を与えていることがわかる。

一方、斜面基盤上の応答加速度の最大値の平均が静的に作用した場合の安全率を、静的F.E.M.の応力分布と円弧すべり法で計算し、動的F.E.M.による安全率の時刻歴と比較した。図5より、(円弧すべり面法による安全率) < (静的F.E.M.による安全率) < 動的F.E.M.による安全率)の

傾向が明らかである。従って簡便な円弧すべり面法による設計は安全側の設計値を与えるといえる。<参考文献>(1)石田毅他、電中研報告No.380045, (2)同No.380057, (3)同印刷中, (4)渡辺啓行、土木学会論文集(1972-2)PP.21-35.

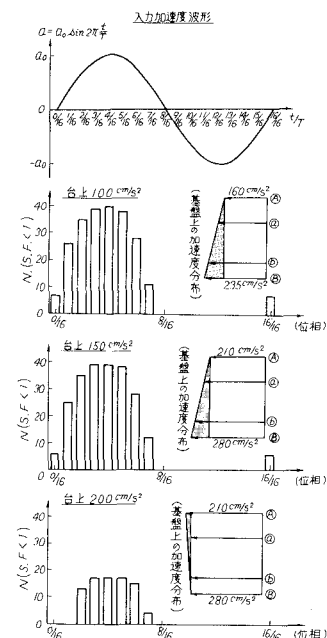


図-3 入力加速度波形と破壊規準に抵触するピーク強度を用いたときに場所安全率が1以下になる要素数の割合による変化、および鉛直距離に応じて線形分布する基盤の水平方向剪断力加速度と最小入力加速度との差(薄壁型)

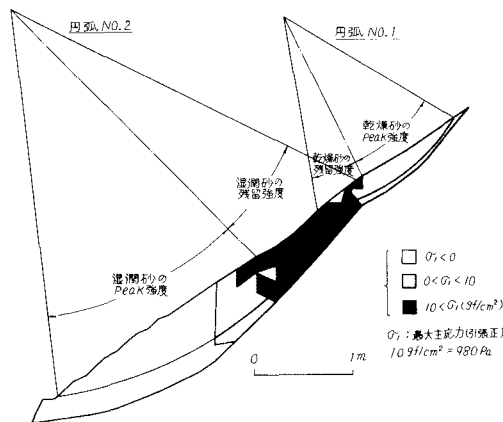


図-4 初期応力状態(傾斜角 θ = 0°)での引張応力発生領域と振動破壊実験に関して設定した円弧すべり面および実験状態から予想される各領域の強度

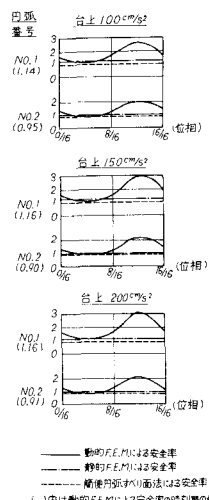


図-5 簡便円弧すべり面法によるすべり安全率と動的・静的F.E.M.による安全率の比較