

層状斜面の遠心模型実験と安定解析

菊沢正裕*・長谷川高士**・内田一徳***・
片平辰義****

弱層を含む斜面の安定は、弱層の位置、層厚、傾斜等に強く影響される。まず、締固め砂質土とカオリン粘土について均一斜面の遠心模型実験を行った。その結果からおのおの土の逆算強度を求め、要素試験結果を合わせて強度特性を評価した。次に、粘土薄層を砂質土斜面内にもつ模型の破壊試験を行った。先に決定した強度特性を用いた安定解析結果と模型実験結果を比較し、粘土層を含む砂質土斜面の安定解析予測能を検証するとともにその破壊メカニズムに関する知見を得た。

Keywords : centrifuge model test, slope stability, stability analysis, slip surface, safety factor, back analysis

1. 序

塑性変形から降伏・破壊に至る現象を数学的にモデル化しようとする理論的研究^{16),17)}が進展する一方で、模型実験による研究は降雨、浸透、地震力等複雑な外的条件を与えた場合^{10),11)}が多いようである。これに対し、補強土斜面の問題を除くと外的条件のない単純な自重破壊を理論解析と模型実験の両面から検討しているSmith¹⁴⁾や望月¹²⁾のような研究例は少ない。いうまでもなく数学モデルをFEMに導入して自重破壊はもとより複雑な外的条件下での変形から破壊に至る現象を模擬できることは早急に望まれることであるが、現実には斜面の限界高さや限界勾配は汎用的または経験的手法ともいえる極限約合法や古典的な手法に基づいた設計基準に従って決定される場合が多いのではなからうか。そこで、本研究では経験的な安全率という数値に支えられて実用性をもっている簡易解析法についてその妥当性と適用限界を遠心模型実験を通じて吟味することにした。

既報⁴⁾では、汎用の極限約合法との比較によってBakerらの変分安定理論¹⁾が簡易解析法として有効であることを示した。しかしながら、同理論が塑性論に基づいている関係上、考えている崩壊メカニズムが実際と異なればその実用性はなくなる。また、浅いすべり破壊に対しては低拘束圧下のせん断強度、モール・クーロンの降伏基準では粘着力 c の設定が安定評価に強く影響することは周知のところである。特に、層状斜面の場合では隣合う二層の c の強さ関係が破壊形状や限界高さに影響する場合が多い。このように斜面破壊という現象を模擬する理論の実用性を検討するうえで、斜面内部で発揮さ

れる土の強度と破壊のメカニズムを明らかにしておくことは不可欠である。実斜面の複雑性を考え、この点をここでは遠心模型実験によって検討するが、近年発展の一端にある遠心模型実験にも難点がある。

本研究では、遠心模型実験特有の難点を解析上でカバーしつつ変分安定理論の実用性を検討し、かつ斜面崩壊のメカニズムを忠実にモデル化するうえで今後解析法に導入すべき点を模型挙動から見出す等、実験と解析の両面から斜面崩壊機構を考究することにした。解析に必要な粘土と砂の強度定数については、均一斜面の遠心模型実験結果の逆解析および室内要素試験の両者によって決定した。結果として、均一斜面では排水条件と三次元効果に留意すれば限界高さ、すべり形状ともに実験結果を理論的に模擬できることがわかった。一方、粘土層を含む層状斜面についても理論計算がおおむね有効であることを確認できた。また、比較的厚い水平粘土層がある斜面では、上部砂層の引張亀裂、および粘土層と砂層の境界面における上部砂層の水平移動等を考慮した解析が厳密には必要であることが判明した。

2. 遠心模型実験と安定解析

(1) 遠心模型実験

近年遠心模型実験装置の普及とともにこの種の実験がもつ特質も明らかにされてきた^{3),8),9),12),13)}。基本的な問題点は、①遠心力が回転中心からの距離に比例して増大し、回転半径の小さい装置では等加速度線が曲率をもつこと、②弾性変形を超え塑性変形が増大するとクラックのような不連続線の形成によりひずみの相似則が保証されないこと、③粒径が実物と模型で同一とならないこと、④寸法効果、⑤応力履歴を再現するのが難しいこと、等である。①については後述のように解析の中で配慮し、②については等方剛完全塑性論的観点から破壊発生時に注目することとした。また③④⑤については種々研究さ

* 正会員 農博 京都大学助手 農業工学科
(〒606 京都市左京区北白川追分町)

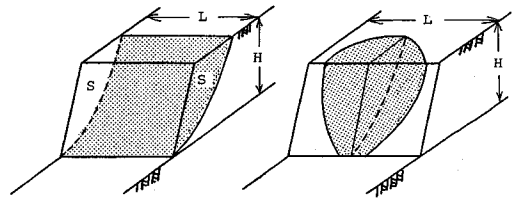
** 正会員 農博 京都大学教授 農業工学科

*** 農博 京都大学助教授 農業工学科

**** 農修 京都大学大学院 農学研究科

表一 遠心模型実験装置の主要諸元

型式	ビーム型スイングアップ		
有効半径	150cm	試料容器寸法	50×30×15cm ³
最大加速度	200g	回転用モータ	三相 11kW
最大回転数	345rpm	傾斜用モータ	0.4kW
スリップリング	計測用 (36極)	動力用	(10極)



(a) 二次元すべり (b) 三次元すべり

図一 斜面の破壊形態の分類

表二 模型斜面の特性

試験番号	模型高さ	傾斜角	均一性	砂層	粘土層	破壊加速度	粘土薄層	図番号
1	12.3cm	75°	均一	①	—	186.0	—	6
2	5.0	63.4	均一	—	①	140.0	—	7
3	9.2	63.4	均一	—	①	94.1	—	8
4	3, 4, 5	63.4	均一	—	②	—	—	9
5	12.2	75	層状	①	①	68.0	水平	1 1
6	13.0	79	層状	②	①	84.4	水平	1 2
7	12.0	74	層状	②	①	160.5	水平	1 3
8	22.0	75	層状	①	①	49.1	傾斜	1 4
9	12.3	75	層状	②	②	45.0	傾斜	1 5

砂層①: 湿潤密度2.0t/m³, 含水比17.5%, 飽和度85%
 砂層②: 湿潤密度2.0t/m³, 含水比20.0%, 飽和度90%
 粘土層①: 初期含水比150%, 最終圧密荷重750kg, 最終含水比50%
 粘土層②: 初期含水比200%, 最終圧密荷重750kg, 最終含水比60%

れているが^{3), 9)}, ここでも実験結果の解釈の中で留意した。

さて、ここで用いた遠心模型実験装置は、回転部だけを地上に置いた半地下方式のスイングアップタイプである。その仕様と能力を表一に示す。実験にあたり回転数は理論的に予測される破壊加速度の半分に対応する回転数までは1.5~2分で上昇させ、以後回転数を毎分40rpmずつ上昇させた。なお、材料特性や遠心場特有の模型挙動を把握するために有効半径30cm, 容器寸法12×10×4cmの小型遠心力荷装置も併用した。

表二は、ここで議論した模型斜面の概略をまとめたものである。実験では三次元的な破壊形態を実現するため試料容器の奥行き寸法を考え、できるだけ斜面高さを低くした。このため制約回転数以下で斜面破壊を発生させるべく表二のような急斜面模型に限って実験した。また均一粘土斜面の場合でも試料容器のサイズが小さいため底面破壊を避け、斜面先すべりとなるような斜面勾配を考えた。

(2) 変分安定法

一般に安定解析には極限約合法や上界法を用いることが多い。しかし、極限約合法に関して、簡易法では勾配など斜面の幾何学的条件によって用いる計算法の精度が異なり、厳密法は計算時間がかかり過ぎるなど汎用的でない面がある⁴⁾。一方、上界法は安全率の概念が厳密すぎて経験的な係数としての設計安全率を直接対応させるにくい点に加えて層状斜面のような非均一斜面では崩

壊メカニズムを定めるのが難しい。Bakerら¹⁾によって開発された変分安定法はこれらの欠点を解消する手法と考えられる⁴⁾。また変分安定法は、既報^{5), 6)}で示したように模型斜面の解析で必要となる強度の逆算や三次元効果を評価する手法としても有効であると考えられる。

変分安定法は基本的には上界理論に基づいているが、極限約合法と同じ安全率の概念も導入している。二次元解析における安全率F₂はスライスに対する離散形式で表すと次式のようなになる。

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= (C_i - \phi_i U_i) [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2] \\ &\quad \times [(y_i - y_c) + \phi_i / F_s (x_i - x_c)]^{-1} \\ \Gamma_2 &= p_{xi}(y_c - y_{si}), \quad \Gamma_3 = p_{vi}(x_c - x_i) \\ \Gamma_4 &= \Delta w_i (x_c - x_i) \\ C_i &= c_i \Delta l_i, \quad U_i = u_i \Delta l_i, \quad p_{xi} = p_x(x_i), \\ p_{vi} &= p_v(y_i), \quad y_{si} = y_s(x_i), \quad \phi_i = \tan \phi_i \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

である。ここで、(x_i, y_i)はすべり線上の点iの座標値、c_i, φ_i, u_iは同位置での地層の粘着力、内部摩擦角、過剰間隙水圧、Δl_iはすべり線上の点i-1とiの距離、p_x, p_vは表面力のx, y方向成分、(x_c, y_c)は対数らせんで表されるすべり線の極の座標値、y_sは斜面の表面を表す関数、Δw_iはスライスiに作用する遠心力、nはスライス数である。なお、変分安定法は、対数らせんすべり

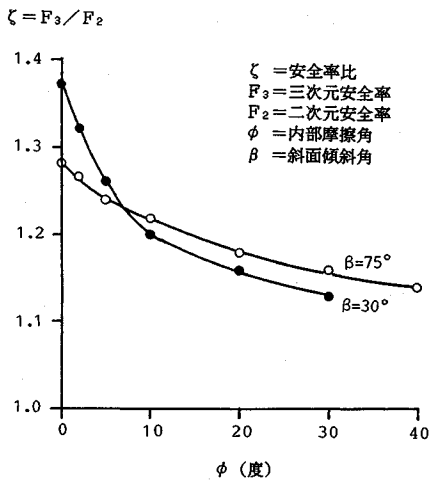


図-2 斜面特性と三次元効果⁵⁾

を考え上界法と同じく関連流れ則を適用するため膨脹角として内部摩擦角を用いる。よってすべり線は少し浅めに計算される可能性はある。

(3) 斜面のすべり形態と三次元効果⁵⁾

二次元解析が想定しているすべり破壊を三次元的にみると図-1 (a) において側面Sが全く抵抗力をもたない場合に対応する。このような状況は現実にはあり得ないが、最も破壊しやすい崩壊モードであり安全率も最小となる。一方、現実の斜面破壊は図-1 (b) のようなものが一般的である。これに対応するいわゆる三次元の安全率 F_3 は二次元の安全率 F_2 に比べて大きい場合が多く、その比 $\zeta = F_3/F_2$ は主として図-2 のように内部摩擦角と斜面傾斜角に関係する⁵⁾。図-1 (b) の三次元すべりを試料容器内で実現するには試料容器の奥行き L を大きく、また斜面高さ H を低くとることが望まれる。しかし、遠心装置の制約から図-1 (a) のようなすべりとなることも多い。これは前述の二次元すべりではなく、すべり土塊側面と試料容器との接触面Sで摩擦が生じる、いわば摩擦型二次元すべりとも呼ぶべきすべりで、このすべりに対する安全率は F_3 より大きくなるはずである。摩擦型二次元すべりの安全率が三次元すべりの安全率より大きいとはいえ、所与の L, H に対して摩擦型二次元すべりが起こる場合、その内側で三次元すべりは起こらない。それを可能にするには H を低くとるしかない。実験では、できるだけ H を低くとり L/H として 1.25 以上を確保するようにした (H を小さくとりすぎると装置がもつ最大回転数に達しても破壊が発生しないためあらかじめ理論的に推定した限界高さを参考に H を決定した)。なお、二次元状態と三次元状態では安全率も変わるが斜面中央部でのすべり面深さも変わる。解析によって両者を比較した例を図-3 に示す。同図から基本的には、内部摩擦角 ϕ が小さいと二次元解析によ

ζ = 安全率比 = F_3/F_2
 ϕ = 内部摩擦角, β = 斜面傾斜角
 F_3, F_2 = 三次元, 二次元安全率
 $c/\gamma H = 0.1$
 c = 粘着力, γ = 単位重量
 H = 斜面高さ

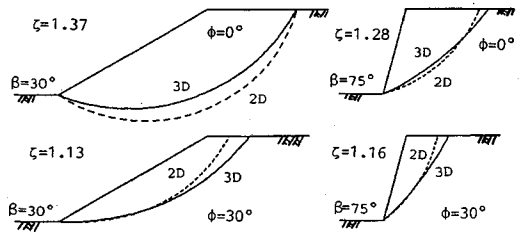
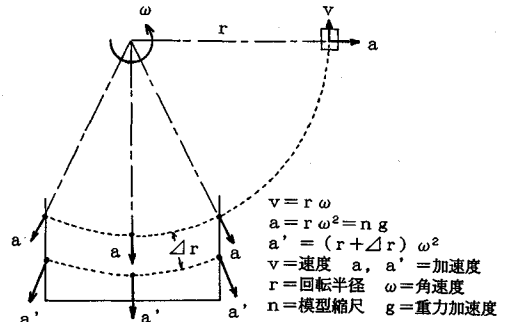


図-3 すべり線にみられる二次元 (2D) と三次元 (3D) 解析結果の相違⁵⁾



(a) 試料容器内の遠心加速度



(b) 遠心加速度場を考慮した斜面の模型 (c) 遠心加速度場を考慮した解析モデル

図-4 遠心力に関する補正

るすべり面は三次元解析のそれより深く、 ϕ が大きくなるにつれ逆に浅くなる傾向が認められる⁵⁾。本研究では二次元解析を用い、解析結果と実験結果の比較に際しては上記の特性を考慮することとした。

(4) 遠心加速度に関する補正

回転半径の小さい本装置のような場合、遠心加速度は半径と角速度の二乗に比例し、等加速度場は図-4 (a) のように曲率をもつ。したがって実物と同じ鉛直下方への自重作用状態を再現するには同図 (b) のような模型を作製する必要がある。しかしここでは同図 (c) のように通常の模型を作製し安定計算に際して場所ごとに異なる遠心力を与えて補正することにした。すなわち、模型斜面の高さを H_m 、実物換算高さ (あるいは解析モデルとしての斜面高さ) を H_p 、模型斜面の重心高さを H_w 、遠心装置の有効半径を r としてスライス i にかかる遠心力作用方向補正角 δ_i (図-4 (c)) を次式で求める。

$$\delta_i = \tan^{-1} \left[\frac{H_m x_i}{H_p (r - H_w)} \right] \dots \dots \dots (3)$$

表—3 模型材料の基本性質

砂	$G_s = 2.649$	$e_{min} = 0.54$	$e_{max} = 0.81$
	$w_{opt} = 16.5\%$	$U_c = 140$	
粘土	$G_s = 2.721$	LL 98.04	PL 32.21
	$C_u = 0.489$	シルト分96%	粘土分4%

表—4 模型材料の強度定数

【砂層①：三軸圧縮試験】

	c (tf/m ²)	ϕ	ρ_t (t/m ³)	ρ_d (t/m ³)	e	排水 条件	試料 状態	試料 作製法
(a)	2.38	37.7°	2.01	1.71	0.554	非排水	不飽和	突固め
(b)	2.96	38.0°	2.01	1.71	0.547	排水(気)	不飽和	突固め
(c)	2.93	42.9°	2.10	1.77	0.500	排水	飽和	K ₀ 圧密

(注1)

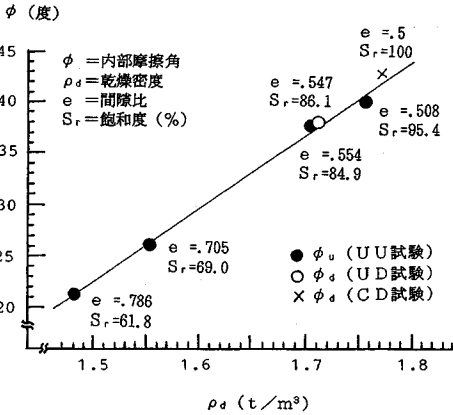
平均応力2.5kgf/cm²に対応する結果。砂層②の強度は図-5の試験を参考にc=3.0tf/m²、 $\phi=34^\circ$ と推定。砂層①、②の含水比等は表-2を参照。

【粘土：一軸圧縮試験】

	C_u	ρ_t	ρ_d	w
粘土層①	2.35 tf/m ²	1.77 t/m ³	1.17 t/m ³	51.8%
粘土層②	1.45	1.67	1.04	60.1%

(注2)

CBRモールドを用いた圧密試料(圧密圧力0.22kgf/cm²、w=55%)の三軸CU試験から得た強度： $c'=0.12\text{tf/m}^2$ 、 $\phi'=26.5^\circ$



図—5 砂層材料の内部摩擦角と乾燥密度の関係

ここで、 x_i はスライス*i*と法先との水平距離である。式(1)の代わりに δ_i を用いた式(4)を用いれば遠心力の作用方向が斜面内で一定でないことを補正した場合の安全率 F_2' が算定される。

$$F_2' = \frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_1}{\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_5} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\Gamma_1 \sim \Gamma_3$ は式(2)により計算され、また

$$\Gamma_5 = \Delta w_i [\sin \delta_i (y_c - y_i) + \cos \delta_i (x_c - x_i)]$$

である。

3. 模型材料とその強度特性

(1) 砂層材料

砂層材料として火山灰質砂(日本統一土質分類でSV)を使用した。これは、粒度分布のよいロックフィルダムのランダム材である。基本特性を表-3に示す。これをオーバーカット(4.76mm)し、表-2に示すように最適含水比より1%湿潤側(砂層①)と3.5%湿潤側(砂層②)に調整したのち遠心力載荷装置の試料容器内にて木板で突き固めた。砂層①の強度については同じ含水比に調整した試料を二分割モデルで同じ密度に突き固めて三軸圧縮試験を排水条件を変えて行った。斜面破壊は比較的小さい拘束圧下で発生することが多いと考えられるので非排水強度定数は平均応力2.5kgf/cm²以下の範囲のデータに対して定めた。拘束圧の小さい領域では不飽和のため過剰間隙水圧が発生しない。このため表-4にみられるように排水条件による強度の差は小さい。また、同表に示したK₀圧密によるCD強度も密度の違い

を考えれば締固め試料の強度と類似している。砂の強度、とりわけ内部摩擦角は排水条件より密度の影響を強く受け、本試験材料および密度範囲では図-5のような関係が得られた。これより模型作製にあたっては所定の密度で均一な模型となるよう努めた。なお、砂層②では、飽和度が90%と高いことから砂層①と同じ方法で非排水強度を決定し難いと考え、図-5から砂層②の乾燥密度 $\rho_d = 1.67 \text{ t/m}^3$ に対応する $\phi = 34^\circ$ を推定した。粘着力cは図-5で行った三軸試験の結果が2.4~3.4 tf/m²の範囲にあることから3 tf/m²と仮定した。

(2) 粘土層材料

カオリン粘土を主成分とするクラウンクレイ(その特性を表-3に示す)を遠心力載荷装置で自重圧密し、その後一定の遠心力場で載荷による圧密を行うことによって粘土層を作製した。その際、初期含水比と載荷重を変え強度の異なる2種類の粘土層を作製した(表-2, 4参照)。これら粘土層の強度は一軸圧縮試験結果を基本に逆算強度を配慮して推定したが、以下の点については十分注意した。

① 採取場所による差：遠心力場で作製したため試料容器の端部や土層上部の強度は中央低部の強度より15%程度小さくなる。模型試料と一軸試料を同一場所から採取できないので両試料の強度は厳密には同じではない。

② 遠心模型実験結果の逆解析による逆算強度は、模型が小さく破壊加速度が大きいと完全な非排水強度でなく部分排水あるいは排水条件下の強度となり一軸圧縮強度と一致しない場合がある。

③ 層状斜面のための粘土薄層として利用する場合、薄層の強度は切削に伴う乱れや応力解放によって一軸圧縮強度より小さくなると推測される。

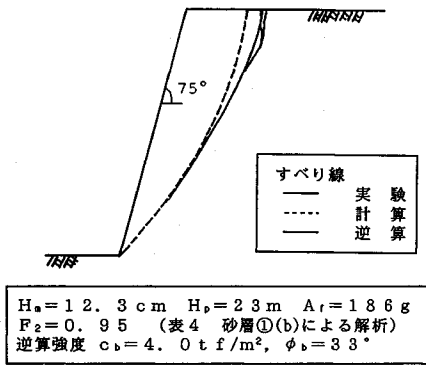


図-6 均一砂斜面の破壊特性

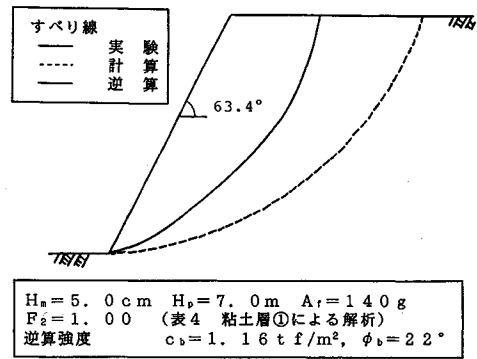


図-7 均一粘土斜面の破壊特性 1

(3) 模型斜面の作製方法

いずれの模型も水平土層をカットして斜面を形成した。砂層は含水比と密度を十分管理しながら人手で突き固めた(層数を多くせず巻出し厚5~7cmで短時間に作製すると模型の均質性は高まる)。カット後の斜面表面はタンピングによって綿密に整形した。中間層の密度が小さい場合や整形が不十分であるとその部分から滑动してしまうことが多いので注意が必要である。粘土層は、遠心装置内で段階的に载荷し粘土層①②ともに最終的には0.83 kgf/cm²(加速度場50gで15kg)を加えて作製した。

層状斜面のうち粘土層が水平な場合は、上下の砂層を作製ののち所定の厚さに切り出した粘土薄層を挿入した。一方、粘土層が傾斜する場合は、水平層状地盤をカットして斜面を形成後、所定の勾配をもつ傾斜土台に載せかえ、天端を水平にカットした。

すべての模型は、高さ5cmの木製土台に載せている。斜面崩壊は多くの場合一瞬のうちに発生するが、流下する崩壊土砂が斜面法先部分に停留すると後続の土砂の動きを抑制し、その結果すべり面の判別が困難になることを避けるためである。また、木製土台の表面で滑动することのないよう厚さ2mmのゴムシートを表面に接着した。

4. 均一斜面の破壊特性と解析的検討

(1) 砂斜面

図-6のような高さ12.3cmの均一斜面について実験した。遠心加速度が186gに達すると天端に鉛直亀裂(実物換算で約3.8m)が生じ、その直後202gで全体崩壊に至った。図-6には実験結果と三軸試験データを用いた安定解析の結果を比較している。材料の透水係数が10⁻³cm/sのオーダーであることと破壊加速度が186gであることから解析では排水(気)条件が適切と考え、表-4砂層①(b)の強度を用いた。実験での限界高さ(23m)に対する安全率F₂は0.95と過小(設計上安全側)

評価され、またすべり線も実験より浅くなることがわかる。この模型の場合、2.(3)で述べたL/Hは1.2と小さいものの模型天端に発生した亀裂は湾曲し三次元破壊に近い状況であった。この点から二次元解析の安全率が少し小さく算定され(図-2参照)、計算すべり線が浅くなっている(図-3右下図参照)ものと解釈される。よって三次元効果特性を勘案すると限界高さ、すべり線位置ともに実験値を理論的に模擬できる可能性は高い。なお、現実の状況に対応して表-4砂層①(a)の非排水強度を用いたとしても結果に格段の差はない。

(2) 粘土斜面

砂斜面と異なり粘土斜面では天端亀裂を伴わず安全率が最小となる低部法先付近から一気にすべりが発生した。図-7の模型に対して表-4粘土層①のc_b強度を用いて安全率を計算すると1.00となり、実験での限界高さを十分な精度で予測していることになる。しかし、高さを5cmとした本模型のL/Hは3.0と十分大きく、事実三次元すべりの様相を呈していた。よって二次元解析の安全率が1.0となることは実験結果を正しく模擬していることにはならない。実際すべり線は図-7のように実験結果と解析結果に大きな相違がみられる。そこで、実験のすべり線にフィットするすべり線から逆算強度⁶⁾を求めるとc=1.16 tf/m²、φ=22°となった。この値と表-4(注2)に示す三軸CU試験から求めた有効応力強度値を考え合わせると模型内部で部分排水、あるいは排水があったものと推測される。よって、実験と解析のすべり線位置が異なるのは砂斜面と同じ三次元効果の問題に加えて、強度に関する部分排水効果も影響しているものと思われる。すなわち、この模型の破壊加速度は140gと大きく、透水性の小さい粘土ではあるが破壊時に間隙水が移動し非排水状態を保てなかったものと推定される。この推定の妥当性を裏付けるため、模型高さを9.2cmと大きくとって同様の試験を行った。その結果、図-8のように94.1gと小さい加速度で模型は破壊し(非排水状態に近かったと思われる)すべり線も図-7

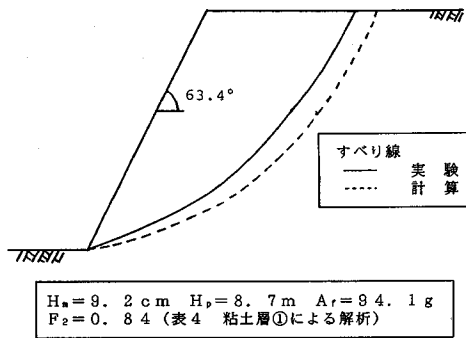


図-8 均一粘土斜面の破壊特性 2

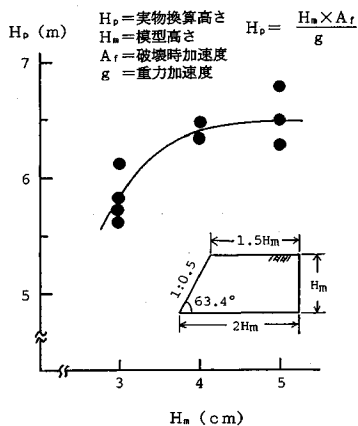


図-9 粘土斜面模型による寸法効果

に比べ深く解析結果に近くなっている。図-2, 3 に関連して述べた三次元効果を考慮すれば、解析結果は実験結果をほぼ満足できる精度で模擬しているといえる。

小型の遠心力載荷装置を用いて行った模型粘土斜面の寸法効果特性を図-9 に示した。同種の実験を行っている高田ら¹⁴⁾は、せん断帯の厚さが模型サイズによらないため模型が小さいと相対的に変形域の幅が大きくなることも寸法効果の原因であるとしている。論理的にはその可能性はあるが、それ以上に図-9 に認められる寸法効果には、破壊加速度レベルによる強度発現機構の違いが大きく影響していると思われる。つまり、同一条件で圧密した粘土層(表-2 参照)をカットして作製した一連の模型で、図-9 のごとく模型斜面高さ 4 cm を境に寸法効果がみられる理由の一つとして以下の点を指摘したい。模型寸法が小さいと破壊時の加速度は必然的に大きくなる。さらに遠心加速度を定速で上昇させているため破壊までの時間も長くなる。これらサイズ、加速度、時間の三要素はおのおの圧密距離、間隙流体の移動速度、圧密時間に影響する。その結果、サイズが小さいと部分的とはいえ周辺の排水可能な領域(斜面法面など)に向かって間隙水が移動する可能性が高い。一方、サイズが

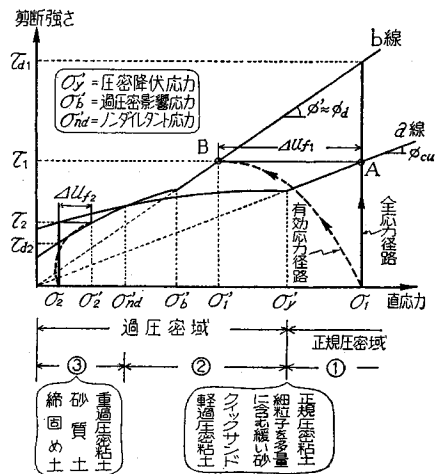


図-10 応力履歴がせん断強さに及ぼす影響⁷⁾

ある程度大きくなると間隙水の移動速度も遅く、短時間に破壊加速度に達するなど非排水条件が保たれやすくなる。使用した粘土斜面は掘削によって斜面を形成したことと破壊時の応力レベルからみて過圧密状態にある。よって、排水というよりは吸水現象が予想されるが、いずれにせよせん断強度が排水(吸水)条件より非排水条件の方が高い応力状態にある(図-10 の③の部分に対応)。これが、主として図-9 の模型サイズ 3 cm の実物換算高さか他より小さい理由と考える。図-8 に比べ図-7 の斜面の限界高さが小さいのも同様の理由からであろう。また、強度定数として c , ϕ を考えると図-10 のように重過圧密領域では全応力レベルで排水条件の場合の方が非排水条件の場合に比べ c が小さく ϕ が大きい場合が多い。図-8 に比べ図-7 のすべり線の法先からの立ち上がり急なのは、部分的にしる吸水や排水が起こり破壊時にモービライズされる ϕ が大きいからと推測される。

5. 層状斜面の破壊特性と解析的検討

(1) 粘土層が水平な場合

図-11 は、実物換算で約 1.7 m の比較的厚い水平粘土層が斜面中ほどの高さにある場合の結果である。均一模型実験の結果を踏まえ、解析では砂層強度として表-4 砂層① (b) を用い、粘土の強度については破壊時の加速度が均一粘土斜面の場合に比べて小さいことから非排水強度(表-4 粘土層①)を用いた。図-11 をみると安全率は 1.0 をはるかに越え、計算で得られるすべり線は実験と異なり斜面先すべりとなっている。そこで実験でのすべり線から逆算強度を求めたところ、砂の強度は表-4 の値とほぼ同じとなったのに対し、粘土の強度は図中に示すごとくかなり小さく算定された。そのうえ、

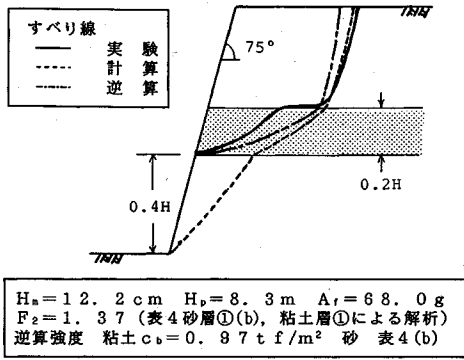


図-11 層状斜面(水平粘土層)の破壊特性1

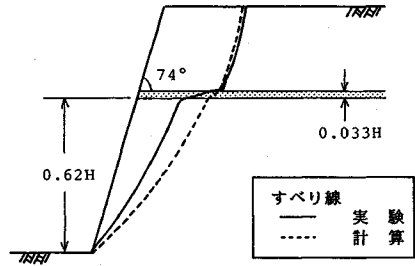


図-13 層状斜面(水平粘土層)の破壊特性3

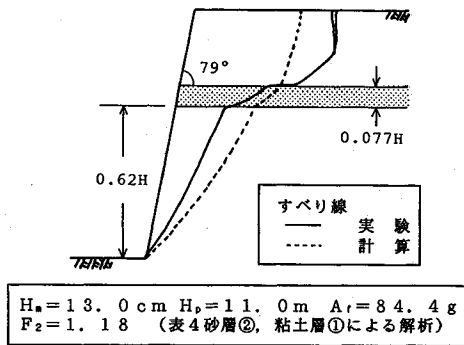


図-12 層状斜面(水平粘土層)の破壊特性2

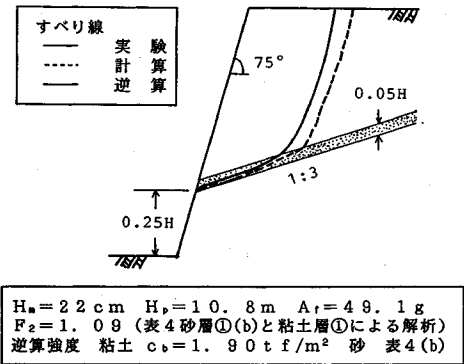


図-14 層状斜面(傾斜粘土層)の破壊特性1

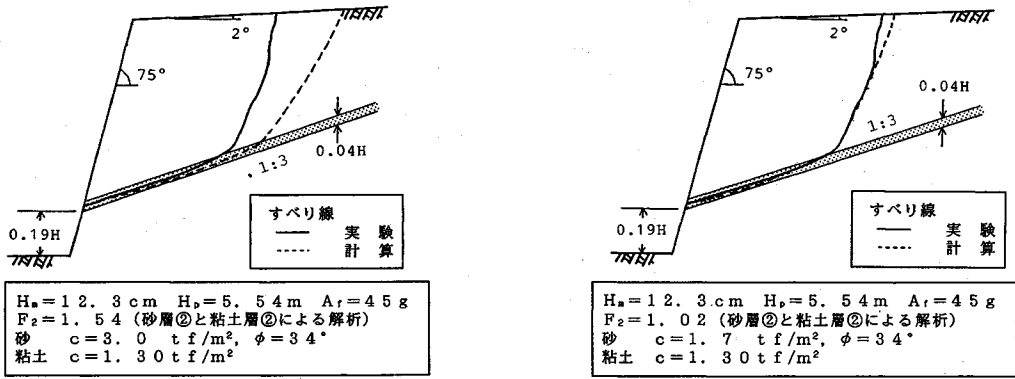
実験すべり線に完全にフィッティングを行うことができず図中に示す一点鎖線のようなすべり線ではか逆算解析を行えなかった。逆算した粘土強度が表-4のそれより小さい理由として粘土薄層を切り出す際の乱れや膨潤の影響が考えられる。しかし、上部砂層と粘土層が一体となって崩壊する後述の傾斜粘土層をもつ斜面とは対照的に、図-11の場合、ちょうど載荷(上部砂層を荷重と考える)を受ける粘土斜面のように粘土層がすべりを起こし、直後に上部砂層が粘土層に達する深い亀裂を伴って崩壊する形態が認められた。つまり図-11における破壊は、解析で想定している全層一体となってせん断破壊を起こすメカニズムとは異なっている。粘土層厚がどの程度になるとこのメカニズムで破壊するかを調べるため粘土層厚をより薄く、より高位置に置いた模型二体を作製した。粘土層厚が薄くなると破壊加速度が先の均一砂斜面のように大きくなり粘土層で部分排水を生じるおそれがある。そこで破壊加速度を少しでも小さくするために強度が少し弱い表-2の砂層②を用いた。結果を図-12, 13に示す。両模型とも下砂層を巻き込み、斜面先破壊を起こしていることがわかる。それぞれの斜面勾配はわずかに異なっているが、いずれも斜面上部2/5の位置に水平粘土層をもっている。また斜面高さに対する粘土層厚の比は7.7%および3.3%と異なるが、粘

土層の实物換算厚さは64cmおよび85cmと類似している。ともに斜面先破壊を起こしたわけであるが、図-12の場合は先の図-11と同じくかなり粘土の変形、強度特性に依存したすべり動態が観測され、図-11のときほどではないが本解析で想定しているメカニズムでは破壊を完全には模擬できないようである。ところが、図-13の程度まで粘土層厚が薄くなると解析は好結果を示している。図-13で計算すべり線が実験のそれとわずかに異なるのは粘土の強度評価に原因があると考えられる(破壊加速度が160gと大きく部分排水がある等、3.(2)参照)。

(2) 粘土層が傾斜する場合

図-14は粘土層①を用いた例で、粘土層が水平な前述の場合と違い粘土と砂が一体となって同時に崩落した。また粘土層にはせん断面がみられず、すべり域で薄くなりつつ前方に向かって伸び、すべり面先端で破断した。模型が22cmと高く、摩擦型二次元すべりの様相を示したものの解析的な模擬はかなり良好である。

次に、もう少し深いすべりを発生させる実験を考えた。このための条件を解析的に調べた結果、粘土層の位置を低くとること、砂層の強度を小さくすることが効果的であることがわかった。深いすべりを発生させることへの粘土層の強度の影響は比較的小さいと予想されたが念の



(a) 砂の粘着力 $c=3.0 \text{ tf/m}^2$ の場合

(b) 砂の粘着力 $c=1.7 \text{ tf/m}^2$ の場合

図—15 層状斜面（傾斜粘土層）の破壊特性 2

ため粘土層①より強度の小さい粘土層②、および試験 6, 7 (表—2 参照) 同様少し強度の弱い砂層②の条件で図—15 に示す模型斜面を作製した。

実験結果を解析するにあたり材料強度を以下のように推定した。粘土層の強度は一軸試験結果 1.45 tf/m^2 と均一粘土斜面の小型遠心模型実験から得た逆算強度 1.18 tf/m^2 の平均値 1.30 tf/m^2 とした。また砂層強度としては表—4 の推定値 (同表の注 1 参照) を用いた。解析の結果、砂層の c を 3 tf/m^2 以上とすると図—15 (a) のように安全率が大きくなるとともに、すべり線が実験より深いものとなることがわかった。そこで砂層の c だけを変えて最も実験すべり線に近いすべりを起こすケースを解析的に模擬したところ図—15 (b) に示すように安全率 1.02 と好結果を得た。このときの砂層の c は 1.7 tf/m^2 である。

(3) 水平粘土層をもつ砂斜面と傾斜粘土層をもつ砂斜面の破壊特性の比較

粘土層が水平な場合 (a) に比べて傾斜する場合 (b) の破壊特性として以下の点が指摘される。まず、(a) では粘土層が変形し破壊が進行するのに伴い砂層天端に深い鉛直亀裂を発生し粘土層上面を砂層が水平移動するといった破壊動態がみられるのに対して、(b) では天端の亀裂も比較的浅く砂層と粘土層が一体となって同時に崩落する。よって、(a) の破壊特性 (特に粘土層厚が相対的に厚い場合) を解析上厳密に評価するには亀裂や境界面でのすべりを考慮した従来と異なる破壊メカニズムを導入する必要があると思われる。これに対し (b) の場合、三次元効果も比較的明確でなく破壊メカニズムも従来の考え方を適用できそうである。このような破壊メカニズムの違いからみて破壊の発生にかかわる材料強度として、(a) の場合粘土層のせん断強度と砂層の引張強度が重要であり、(b) の場合上部砂層の強度、とりわけ粘着力が重要となるとと思われる。この不飽和状態にお

ける砂層の粘着力、つまり低拘束圧下のせん断強度を推定することは現実にはきわめて難しい。しかし、図—15 (a), (b) に示す例からみてもその重要性は無視し得ないものがある。なお、水平粘土層を含む砂斜面において観測された崩壊メカニズムについては、Baker ら¹⁾ と Baker²⁾ の方法を組み合わせることで解析に導入することができると考える。

6. 結 論

不飽和の砂斜面、飽和粘土斜面、さらに粘土層を挟む砂斜面の破壊特性を遠心模型実験と理論計算から吟味し以下の結論を得た。

- (1) 遠心力場での破壊特性を理論解析でおおむね模擬し得る。
 - (2) 水平粘土層を挟む砂斜面では、上部砂層が粘土層に達する鉛直亀裂を伴って破壊し、また砂層が粘土表面をわずかではあるが前方に水平移動しつつ崩落する。
 - (3) 粘土層が厚く、水平の場合特に (2) のメカニズムが顕著であり解析の中で考慮する必要がある。破壊発生は主に粘土層のせん断強度と砂層の引張強度に支配されると考えられる。
 - (4) 傾斜した粘土層を含む砂斜面では、粘土層が上部砂層と一体となって崩落し、従来の破壊メカニズムで説明される。破壊発生とすべり形状の支配因子は砂層のせん断強度、特に粘着力であり、また粘土層の強度よりむしろ粘土層の傾斜勾配と位置が重要となる。
 - (5) 理論解析で得た三次元効果は実験結果を解釈するうえで有効である。
- このほか、遠心模型実験を行ううえで留意すべき事柄、あるいは知見として以下の点が指摘される。
- (6) 模型内の遠心力分布は解析上で考慮すればよい。
 - (7) 粘土の場合、加速度レベルが 150 g 程度になる

と破壊時に過剰間隙水圧が十分発生せず体積変化を起こすと考えられるので排水強度を考える必要がある。これは実物とは異なる条件であるので、粘土材料の破壊試験には注意が必要である。

(8) 不飽和砂質土の場合飽和度が小さいと排水条件による強度の差が小さいため実物の非排水条件と遠心場の排水条件の間に差が生じないが、飽和度が高くなると排水条件による強度差が出る。このため遠心場で実物挙動を予測する場合、理論解析を併用するなど実験結果の解釈には注意が必要と思われる。

(9) 側面摩擦が存在する限り、天端幅を斜面高さに比べて短くとると実際よりかなり強い斜面となってしまう。天端平面でのすべり線が湾曲する実際的な三次元すべりを再現すれば、側面摩擦の影響はほとんどない。この意味で粘土斜面では天端幅を模型高さの2倍以上、砂斜面でも1.5倍以上とすることが望ましい。

謝 辞：遠心模型実験装置の製作にあたっては大阪市立大学の高田直俊教授から一方ならずご指導を賜った。また、本学卒業生である高村東里氏(丸紅)、柴藤勝也氏(間組)には実験およびデータ整理に多大の協力を得た。数値計算には京都大学大型計算機センターのFACOM M 780/30を用い、文部省科学研究費(一般研究(A)63420049 研究代表者：京都大学農学部 長谷川高士)の援助を受けた。この場を借りて深く感謝の意を表します。

記号の説明

- A_f : 模型斜面破壊時の遠心加速度
- C_c : 圧密指数
- c, ϕ : 粘着力, 内部摩擦角
- c_b, ϕ_b : 逆算解析による粘着力と内部摩擦角
- c_d, ϕ_d : 排水試験による粘着力と内部摩擦角
- c_u, ϕ_u : 非排水試験による粘着力と内部摩擦角
- c', ϕ' : 粘着力, 内部摩擦角 (有効応力表示)
- c_i, ϕ_i : スライス i の底面に作用する粘着力と内部摩擦角
- e : 間隙比
- e_{\max} : 最大間隙比
- e_{\min} : 最小間隙比
- F_2 : 二次元解析による安全率
- F_3 : 三次元解析による安全率
- F_2' : 遠心加速度に関する補正後の安全率 F_2
- g : 重力加速度
- G_s : 比重
- H : 斜面の高さ
- H_p : 実物換算高さ
- H_m : 模型高さ

- L : 斜面の天端幅 (試料容器の奥行き)
- LL: 液性限界
- n : 模型縮尺
- PI: 塑性指数
- PL: 塑性限界
- S_r : 飽和度
- u_i : スライス i の底面に作用する間隙水圧
- U_c : 均等係数
- w : 含水比
- w_i : スライス i の重量
- w_{opt} : 最適含水比
- β : 斜面の傾斜角
- γ_s : 単位体積重量
- δ_i : スライス i に作用する遠心加速度の方向と鉛直方向のなす角
- ρ_l : 湿潤密度
- ρ_d : 乾燥密度
- ζ : 安全率比 ($=F_3/F_2$)

参考文献

- 1) Baker, R. and Garber, M.: Theoretical analysis of the stability of slopes, *Geotechnique* 28, No.4, pp.395~411, 1978.
- 2) Baker, R.: Tensile strength, tension cracks and stability of slopes, *Soils and Foundations*, 21-2, pp.1~17, 1981.
- 3) Kerisel, J. et al.: The use of physical models in design. Discussion, Design parameters in geotechnical engineering, Vol.4, pp.315~360, 1980. Proc. 7th Eur. Conf. Soil Mech., Brighton.
- 4) 菊沢正裕・山崎勝司: 二次元層状斜面問題における変分安定解析法の数値解析的適用, 土木学会論文集, 第406号/III-11, pp.273~281, 1989.
- 5) 菊沢正裕: 斜面安定における三次元効果, 土木学会論文集, 第412号/III-12 (ノート), pp.187~190, 1989.
- 6) 菊沢正裕: 変分安定法に基づく均一及び層状斜面の強度定数 c, ϕ の逆算解析, 土木学会論文集, 第412号/III-12 (ノート), pp.191~194, 1989.
- 7) 菊沢正裕: 農業技術者のための最新土質工学 (その5) — 安定問題一, 農業土木学会誌, 57 巻 11 号, pp.57~64, 1989.
- 8) 木村 猛ほか: 講座「遠心模型実験」, 土と基礎, 35 巻 11 号~36 巻 8 号, 1987~1988.
- 9) Kimura, T. et al.: Geotechnical centrifuge model tests at the Tokyo Institute of Technology. Technical report No.30, Dept. of civil engng., Tokyo Institute of Technology, pp.7~33, 1982.
- 10) Kutter, B. L. and James, R. G.: Dynamic centrifuge model tests on clay embankments. *Geotechnique* 39, No.1, pp.91~106, 1989.
- 11) 久楽勝行・斉藤義章・石塚廣史: 大型盛土による浸透模型実験, 土と基礎, 28 巻 5 号, pp.33~38, 1980.
- 12) 望月秋利: 斜面安定の研究——一般応力法的立場から——, 大阪市立大学工学部学位請求論文, 1986.

-
- 13) Schofield, A. N. : Cambridge Geotechnical Operations, Geotechnique 30, No.3, pp.227~268, 1980.
- 14) Smith, I. M. and Hobbs, R. : Finite element analysis of centrifuged and built-up slopes, Geotechnique 24, No.4, pp.531~559, 1974.
- 15) 高田直俊・日下部治 : 講座「遠心模型実験」3. 原理, 土と基礎, 35 卷 12 号, pp. 89~94, 1987.
- 16) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A. and Sano, I. : General theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-clay model, Soils and Foundations, 29-3, pp.41~53, 1989.
- 17) Wan, R. G., Chan, D. H. and Morgenstern, N. R. : Modeling the development of rupture surfaces using displacement-type finite element methods. Numerical Methods in Geomechanics (Innsbruck 1988), Swoboda (ed.), pp. 373~378, Balkema 1988.
- (1990.5.17 受付)
-

CENTRIFUGE MODEL TEST AND STABILITY ANALYSIS OF LAYERED SLOPES

Masahiro KIKUSAWA, Takashi HASEGAWA,
Kazunori UCHIDA and Tatsunori KATAHIRA

A simple stability analysis based on the variational approach and the centrifuge model test are employed to investigate the failure characteristics of a slope. From the homogeneous models of sand and clay, we examine how the material strength is mobilized on the slip surface by back analysis of the observed results. Three dimensional effect, partial drained condition due to high centrifugal force, and the tension crack are found to be important factors to simulate the failure of a centrifuge model slope. From the experiments of a sand slope which sandwiches a clay layer, we make clear the failure characteristics affected by the way how the clay layer is deep, inclined and where it is located, and the failure characteristics are adequately simulated by a simple stability analysis.
