

粒状体斜面の崩壊機構とそれに基づく補強方法に関する一考察

松岡 元*・杉山要一郎**

2次元粒状体モデルとしての各種アルミ棒積層体に種々の補強を施して、斜面を傾ける傾斜箱の模型実験を行い、粒状体斜面の崩壊機構と効果的な補強方法について考察している。その結果、斜面の表層粒子のころがり角が斜面全体の崩壊の「引き金」になり、最初にすべり線に沿って剛体的にすべるのではないこと、それゆえ表層粒子の動きを抑える補強方法が効果的であることが明らかにされた。

Key Words : slope stability, granular materials, model test, reinforcement

1. 序 論

2次元粒状体モデルとしての、各種アルミ棒積層体に種々の補強を施して、斜面を傾ける傾斜箱(Tilting Box)の模型実験を行い、ビデオのコマ送り映像の観察に基づいて、粒状体斜面の崩壊機構と効果的な補強方法について考察した。その結果、表層の粒子のころがり角が斜面全体の崩壊の「引き金」になるようであり、それをガムテープなどで抑えることが予想外の効果をもたらすことが分かった。これは、表層粒子のころがり角を抑えることによって、斜面内部のせん断抵抗(すべり抵抗)で斜面全体の崩壊に対抗するようになり、ころがり摩擦(ほとんどゼロ)とすべり摩擦の大きな差に基づいて崩壊角度が飛躍的に増大するためと考えられる。なお、このことを裏付ける1つの実験事実として、同じ粒径、混合重量比、間隙比のアルミ丸棒積層体と摩擦の小さいテフロン丸棒積層体から成る斜面の崩壊角度が、両試料の粒子間すべり摩擦角 ϕ_μ が2倍程度違う(アルミ丸棒の $\phi_\mu \cong 19^\circ$ 、テフロン丸棒の $\phi_\mu \cong 10^\circ$)にもかかわらず、ほぼ等しい($28^\circ \sim 29^\circ$)という結果が得られている。

また、アルミ棒積層体を、乾燥状態だけでなく、水で濡らして水の表面張力による粒子間付着力を持たせた状態についても、種々の補強を施して、傾斜箱の模型実験を行った。その結果、水で濡らした状態でも、乾燥状態と同様に、表層から前倒れとなって崩壊し、すべり線に沿って最初に剛体的にすべるのではなく結果的にすべり線を形成するのが明らかになった。ただし、この場合には、表層付近に水の付着力によって剛体的な挙動をする領域の存在も認められた。このような崩壊機構に基づい

て、簡便で効果的な斜面の補強方法を検討している。

さらに、乾燥状態の豊浦砂を箱に入れて、表層2~3mmを霧吹きにより水で濡らし(水の表面張力による少しの粒子間付着力を持つ)、これを傾斜させて、崩壊させる実験も行った。なお、水で濡らした表層をさらに井桁状の薄いプラスチック板で補強した場合についても検討し、実際の斜面への適用についても模索している。

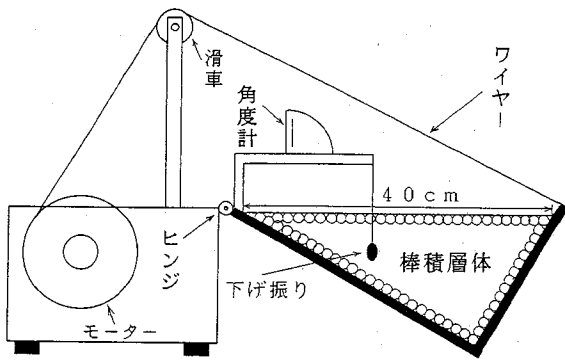
なお、ここで述べる斜面の崩壊機構は後に現場写真(写真—8参照)や砂を用いた傾斜箱の模型実験(写真—11参照)で示しているように、砂質土系の斜面に適用できるものと考えている。

2. 実験方法

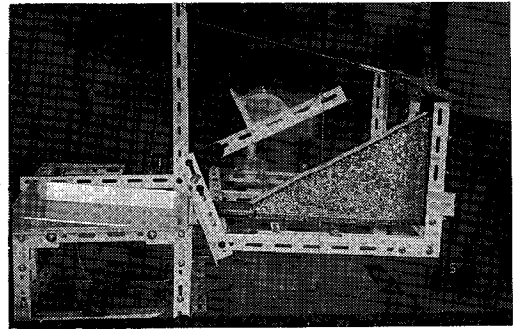
試料として直径d1.6mmとd3mm、およびd5mmとd9mmで長さ50mmのアルミ丸棒(混合重量比はともに3:2)、d5mmとd8mmで長さ50mmのアルミ丸棒を長短軸比1.4にプレスした偏平棒(混合重量比3:2)、d5mmとd9mmで長さ50mmのテフロン丸棒(混合重量比3:2)を用い、粒状体斜面(斜面長40cm)を作製した。実験装置(図—1,写真—1)は、傾斜箱に粒状体斜面を水平になるように積み上げ、モーターによりワイヤーを巻き上げることによって徐々に傾斜させていき、粒状体斜面の崩壊を引き起こさせるものである。粒状体斜面は棒を積み上げて自立させたものであり、両側面は解放された状態であるので、支えとなるものは必要がない。無補強と各種補強を施した場合について、それぞれ乾燥した状態と霧吹きにより水で濡らした状態(含水比約2.5%)の実験を行った。補強方法としては、斜面表面に錘を載せる方法、補強材を挿入する方法、斜面表層の両側面にガムテープを貼り付ける方法などを行った。水平状態(0°)を初期状態とし、角度計によって斜面が崩壊した時点の角度を崩壊角度として読み取った。なお、崩壊角度に達するまでは斜面はほとんど変形

**正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

**正会員 郵政省 名古屋中郵便局主任 (元・名古屋工業大学
学生)



図一 傾斜箱の模型実験装置の概要



写真一 傾斜箱の模型実験装置の全景

表一 乾燥状態のアルミ棒積層体、テフロン棒積層体の物性と斜面の崩壊角度

材 料	ア ル ミ 棒				テフロン棒	
	粒径・形状・ 混合比	d1.6:d3	d5:d9	d5偏:d8偏 =3:2(横積)	d5偏:d8偏 =3:2(縦積)	d5:d9
物性・崩壊角度	=3:2	=3:2	=3:2(横積)	=3:2(縦積)	=3:2	
粒子間摩擦角： ϕ_{μ}	19°	19°	19°	19°	10°	
内部摩擦角： ϕ	25°	25°	32°*	42°*	20°	
崩壊角度(無補強)	30°(2)	29°(4)	34°(2)	34°(2)	28°(4)	

(カッコ内は実験回数。*印は一面せん断試験から得られた ϕ 値であり、二軸圧縮試験と比べて大きな値となることが多い。)

せず、崩壊は瞬時にして起こる。

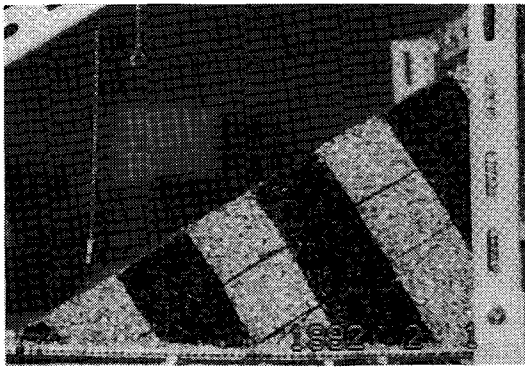
また、崩壊の様子をビデオカメラにより1/30秒のスピードで撮影した。これを大型テレビでコマ送り再生したり、ビデオプリンターにより静止画像写真にして、詳細に観察した。

3. 粒状体斜面の崩壊機構

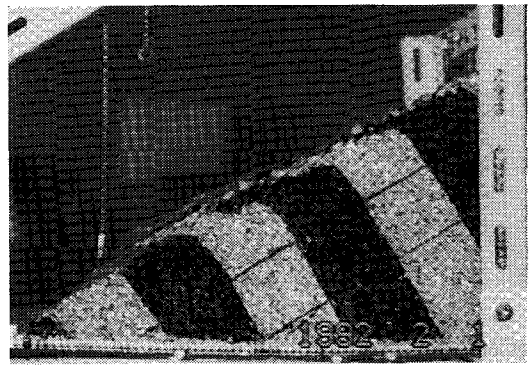
この装置を用いたこれまでの実験で、乾燥状態の無補強の斜面の崩壊角度(安息角)と内部摩擦角の関係について、次の点が明らかにされている^{1),2)}。斜面表層の「粒子接点の方向角³⁾」が重力方向と一致したとき、表層の粒子は不安定となり、まずころがり始める。このとき、表層粒子はころがるのであって、すべるのではない(すべり摩擦は発揮されていない)。したがって、斜面の安息角は内部摩擦角(すべり摩擦が発揮されている)と必ずしも一致しない。この表層粒子のころがり方が斜面全体の崩壊の「引き金」となり、順次斜面内部の崩壊へと進展する(時間的には瞬時である)。換言すれば、斜面内部のすべり線に沿って最初にすべるのではなく、表層からころがり行って結果的にすべり線を形成するのである。

表一は、乾燥状態のアルミ棒積層体とテフロン棒積層体の粒子間摩擦角 ϕ_{μ} 、内部摩擦角 ϕ および斜面の崩

壊角度の平均値(カッコ内は実験回数を示し、実験による崩壊角度のばらつきは数度であった)をまとめたものである。なお、ここでの粒子間摩擦角 ϕ_{μ} は、棒を数本並べた上に直行方向に棒を1本置いて傾斜箱を傾けていき、滑り出した時の傾斜角度として決定した。偏平棒の縦積み・横積みとは、それぞれ棒断面の長径方向が斜面表層に対して水平の場合と垂直な場合をいう。この表より、無補強の場合の崩壊角度は、 ϕ_{μ} や ϕ とあまり関係ないのみみられる。例えば、d5:d9=3:2のアルミ棒とテフロン棒の場合を比べると、無補強の崩壊角度は29°と28°でほとんど同じになっている。これは、両試料の粒子間摩擦角 ϕ_{μ} が2倍程度も違い、内部摩擦角 ϕ の値が大きく異なることを思えば驚くべき結果である。この一見不思議な実験結果も、提案する斜面崩壊のメカニズムを支持している。すなわち、表層粒子のころがり方が斜面全体の崩壊の「引き金」となるのであれば、アルミ丸棒もテフロン丸棒もころがり摩擦はほとんどゼロであるので、粒子配置が共にd5:d9=3:2で平均的にはば同じであれば崩壊角度もほぼ同じになるのである。また、d5偏:d8偏=3:2で横積みと縦積みの場合の崩壊角度が共に34°で同じになっているのも、 ϕ の値が10°も異なることを思えば、不思議に感じられるかもしれない。これは上述の斜面崩壊のメカニズムに



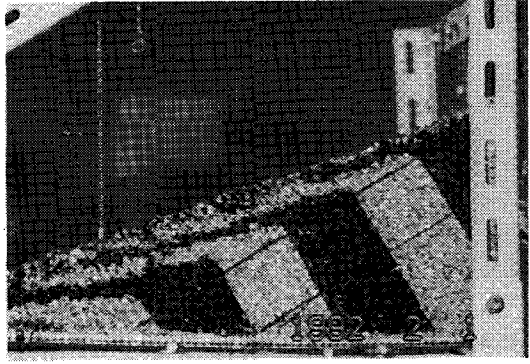
(a)



(b)

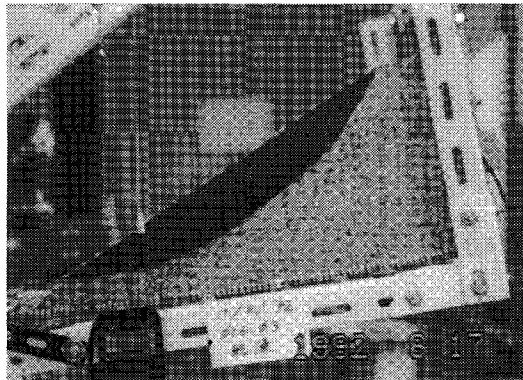


(c)



(d)

写真一2 乾燥状態のアルミ棒積層体斜面の崩壊状況(崩壊順序 (a)→(b)→(c)→(d), 黒い部分はマジックインクによる標線)



写真一3 乾燥状態のアルミ棒積層体斜面の崩壊領域に合わせて両側面にガムテープ(黒い部分)を貼った場合の崩壊状況

よれば、表層付近の重力方向に対する粒子接点の方向角が平均的に近くて、表層粒子のころがりやすさがたまたま同じ程度であったのであろう。このように、乾燥状態で無補強の場合の粒状体斜面の崩壊角度は、必ずしも粒子間すべり摩擦角 ϕ_μ や内部摩擦角 ϕ の大きさによって決定されない⁴⁾。粒子間すべり摩擦角 ϕ_μ や内部摩擦角 ϕ の大きさには必ずしも関係しないのである⁴⁾。

このことを、実際にビデオのコマ送り映像の観察に基

づいて考察した。写真一2(a)~(d)は、ビデオカメラで撮影した映像を1/30秒でコマ送り再生し、ビデオプリンターで写真としたものである。これまで肉眼では確認できなかったが、無補強の乾燥状態では、明らかに表層から粒子がころがりつつ、順次斜面内部の崩壊へと進展し、結果的にすべり線を形成するのが観察される。

一般に考えられているように、斜面がすべり線に沿って最初から剛体的にすべるのであれば、この実験方法ですべり線の内側(すべり線と斜面表面で囲まれた部分)を固定しても崩壊角度は変わらないはずである。そこで、写真一2(a)~(d)から無補強の場合の斜面崩壊のすべり線を推定し、写真一3のように側面にガムテープを貼って実験を行った。崩壊角度は無補強の30°に対し38°となり大きな差が生じた⁵⁾。この結果からも斜面がすべり線に沿って最初から剛体的にすべるとは考えにくく、この結果も「表層から崩壊していった結果的にすべり線を形成する」という提案する粒状体斜面の崩壊メカニズムを支持するものである。

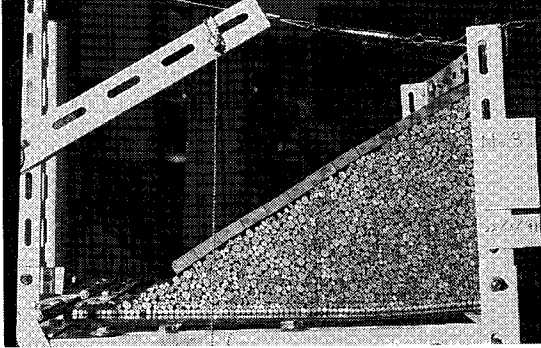
4. 粒状体斜面の崩壊機構に基づく補強方法

表一2は乾燥状態の積層体斜面に錘とガムテープによる補強を施した場合の崩壊角度をまとめたものである。

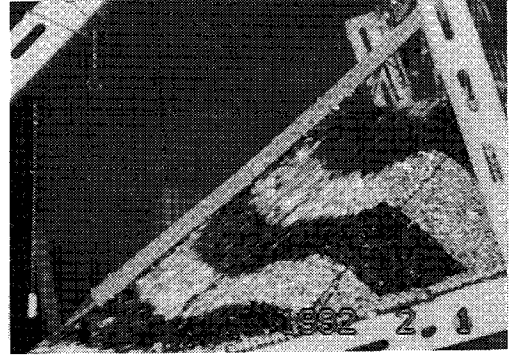
表一2 乾燥状態のアルミ棒積層体斜面の崩壊角度(錘とガムテープによる補強を施した場合)

補強方法 \ 粒径・形状・混合比	d1.6:d3 =3:2	d5:d9 =3:2	d5偏:d8偏 3:2(横積)	d5偏:d8偏 =3:2(縦積)
無補強	30°(2)	29°(4)	34°(2)	34°(2)
錘(21gf/cm, l=32.5cm)	40°(2)	41°(2)	46°(1)	53°(1)
錘(42gf/cm, l=32.5cm)	50°(1)	52°(3)	55°(1)	62°(1)
テープ(幅1cm, l=32.5cm)	43°(3)	46°(2)	45°(1)	54°(2)

(カッコ内は実験回数。1gf=980dyn)



写真一4 表面に錘を載せて補強したアルミ偏平棒積層体斜面



写真一5 表層1cmをガムテープで補強したアルミ棒積層体斜面の崩壊状況

錘 (21 gf/cm, 1 gf=980 dyn)とは、幅 25 mm×厚さ 5 mm×奥行 50 mm の真鍮板 13 個をビニールテープで接着し、斜面表面に並べた場合を、錘(42 gf/cm)とは、厚さ 2 倍の幅 25 mm×厚さ 10 mm×奥行 50 mm の真鍮板 13 個をビニールテープで接着し、斜面表面に並べた場合を意味している (写真一4 参照)。テープ(幅 1 cm)とは、斜面表層の両側(棒の前面と後面)に幅 1 cm のガムテープを貼り付けた場合を意味している (写真一5 参照)。l=32.5 cm とは、斜面長 40 cm のうち上部の 32.5 cm の部分に錘を並べたり、斜面表層の両側面にガムテープを貼り付けたりして補強していることを意味している。ガムテープと錘は、ともに斜面の上端において傾斜箱に固定されている。

斜面表面に錘を載せる実験では、錘の重量が増せば崩壊角度は大きくなり、この傾向は試料が変化しても変わらない。これは、有効垂直応力 σ' が増加し、斜面全体のせん断抵抗 ($\tau_f = \sigma' \cdot \tan \phi$) が増えるためと考えられる。ところが、斜面表層の側面にガムテープを貼る実験では、表層付近の粒子の回転や移動を拘束しただけで、 σ' は無補強の場合と比べて変化していないにもかかわらず、崩壊角度が増しており興味深い。この結果も、提案する斜面崩壊のメカニズムを支持している。つまり、ガムテープなどで表層部分の粒子のころがりを抑えることによって、斜面内部のせん断抵抗 (すべり抵抗) で斜面全体の

崩壊に対抗するようになり、ころがり摩擦とすべり摩擦の大きな差に基づいて崩壊角度が飛躍的に増大するものと考えられる。このことは、写真一5 に見られるように、表層をガムテープで補強して初めて明確なすべり線が現れることから分かる。なお、注目すべきは、全ての試料において、ガムテープに接着したアルミ棒の重量 (実験後の実測によれば 350 gf~450 gf) が、斜面表面に 682.5 gf (21 gf/cm, l=32.5 cm) の錘を載せた場合の重量を下回っているにもかかわらず、ガムテープを貼る実験の方が崩壊角度が大きい、ほぼ等しくなっている点である。ガムテープに接着した部分が単に錘として作用し、斜面全体の有効垂直応力 σ' を増大させることによる補強効果というよりも、むしろ崩壊の「引き金」となる表層粒子のころがりを抑えることによって、大きな補強効果が得られると考えられる。

また、現在よく行われている補強と同じように、アルミ丸棒積層体 (d1.6 mm, d3 mm, 長さ 50 mm, 混合重量比 3 : 2) に補強材 (幅 50 mm×長さ 57 mm×厚さ 1 mm のアクリル板両面に d1.6 mm, 長さ 50 mm のアルミ丸棒を接着したもの) を無補強の場合のすべり線 (深さ 4~5 cm) を横切るように、斜面に垂直に 10 cm 間隔で 3 枚挿入する補強を行った。その結果、崩壊角度は無補強 30° に対して 34° (実験回数 2 回の平均値) にしかならなかった。この結果も、上述の斜面崩壊のメ

表-3 ガムテープによる補強部分にかかる力の計算値 T_c とロードセルによる実験値 T_m の比較

崩壊角度・重量・引張力 試料	崩壊角度 θ (°)	内部摩擦角 ϕ (°)	かみテープに固定された重量 W (g)	式(1)による計算引張力 T_c (gf)	ロードセルにより測定した引張力 T_m (gf)
d5:d9=3:2 アルミ丸棒(乾燥)	46	25	368	384	380
d5:d9=3:2 テフロン丸棒(乾燥)	35	20	348	303	320

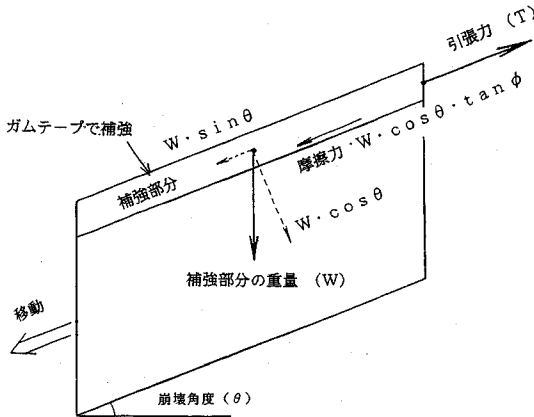


図-2 ガムテープによる補強部分に作用する力のつり合い

カニズムから最初にすべり線に沿って崩壊するのではなく、表層から崩壊するため補強材は斜面と一緒に倒れてしまうので、補強効果が少ないことによると考えられる。

さらに、ガムテープによる補強効果を定量的に検討するために、アルミ丸棒積層体 (d5 mm, d9 mm, 長さ50 mm, 混合重量比3:2) とテフロン丸棒積層体 (d5 mm, d9 mm, 長さ50 mm, 混合重量比3:2) を用いた実験においてガムテープにかかる力をロードセルによって測定した。すなわち、ガムテープを直接傾斜箱に固定する代わりに、傾斜箱に固定したロードセルに糸をつなぎ、ガムテープにかかる力の大きさを測定した。

図-2により、次のようになりつり合い式が成り立つ。

$$T = W \cdot \sin\theta + W \cdot \cos\theta \cdot \tan\phi \dots \dots \dots (1)$$

T : ガムテープにかかる力

W : ガムテープに接着した試料の重量

θ : 崩壊角度

ϕ : 内部摩擦角

表-3に式(1)の θ , ϕ , W とガムテープにかかる力の計算値 T_c および実測値 T_m を示す。ガムテープにかかる力の計算値と実測値がほぼ一致しているのが見られる。この結果と写真-5より、表層をテープなどで補強した場合には、すべり面を仮定する従来のような安定解析も可能と考えられる。

表-4 乾燥状態と水で濡らした状態のアルミ棒積層体斜面の崩壊角度(各種の補強を施した場合)

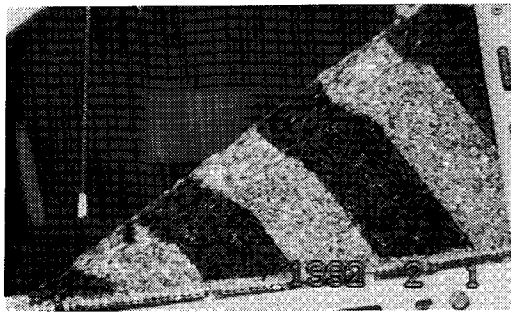
補強方法	試料(状態)	d1.6:d3=3:2 乾燥状態	d1.6:d3=3:2 水で濡らした状態*
①無補強		30°(2)	42°(6)
②板(長さ=7.5cm)3枚		34°(2)	44°(2)
③かみテープ(幅1cm, $\phi=32.5$ cm)		43°(3)	51°(3)
④発泡スチロール($\phi=32.5$ cm)にアクリル板を6枚、5cm間隔に差し込む(歯の長さ2cm)		47°(1)	50°(2)

(カッコ内は実験回数。*含水比は2.5%)

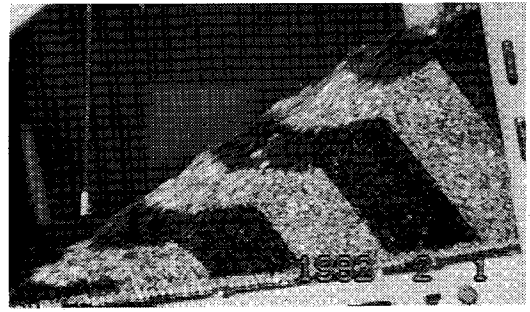
5. 水で濡らした状態の粒状体斜面の崩壊機構と補強方法

粒状体を水で濡らし水の表面張力による付着力を与えた状態に対しても、乾燥状態と同様に無補強の実験、板を挿入する補強を施した実験、斜面表層の両側面にガムテープを貼り付ける補強を施した実験を行った⁹⁾。試料はアルミ丸棒積層体 (d1.6 mm, d3 mm, 長さ50 mm, 混合重量比3:2) を用い、傾斜箱に粒状体を水平に積み上げた後、霧吹きで含水比が約2.5%になるよう濡らした。表-4①~③に乾燥状態と水で濡らした状態の、無補強と補強を施した場合の崩壊角度を比較して示す。写真-6, 7, 9, 10は、ビデオカメラで撮影した映像を1/30秒でコマ送り再生し、ビデオプリンターで写真としたものである。表-4①~③の結果について、ビデオのコマ送り映像の観察に基づいて考察する。

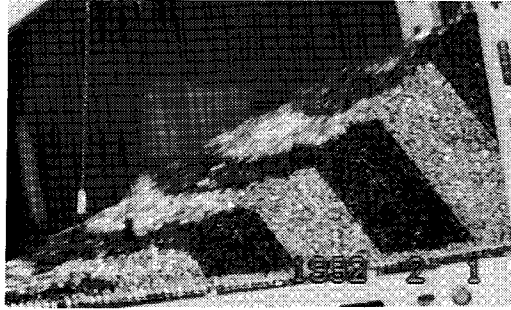
(1) 写真-6(a), (b), (c), (d)からわかるように、無補強で水で濡らした状態でも、斜面内部のすべり線に沿って最初にすべるのではなく、表層付近の崩壊が順次斜面内部へと進展する。つまり、写真の黒に塗った部分を柱に見立てれば、足元をすくわれるような形ではなく、前倒れとなっているのがわかる。このことは、写真-7(a)のように斜面に立っている木が斜面崩壊とともに倒れる時、写真-7(b)からわかるように前倒れになることを意味している。図-3に示すような、多くの人がイメージしているすべり形態は、必ずしも起こらないことが分かる。実際の斜面崩壊の現場においても、写真-8(a), (b)に示すように電柱が前倒れとなり、これまで考えられてきた円弧すべりのパターンでは説明しにくい場合も



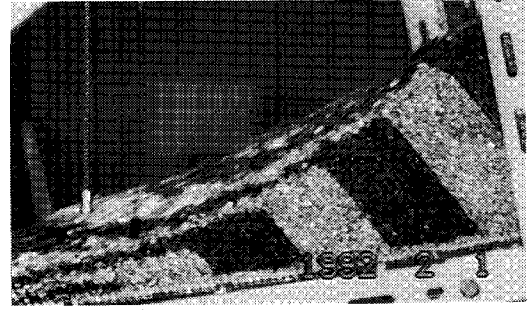
(a)



(b)



(c)



(d)

写真—6 水で濡らした状態のアルミ棒積層体斜面の崩壊状況 (崩壊順序(a)→(b)→(c)→(d), 黒い部分はマジックインクによる標線)



図—3 典型的(?)な円弧すべりのパターン

多く報告されている⁷⁾。無補強の場合、水で濡らしただけで崩壊角度が大幅に増加する ($30^\circ \rightarrow 42^\circ$) のは、水の表面張力によって表層粒子のころがりを抑えるためと考えられる。

(2) 補強材として板を斜面に挿入する実験は、乾燥した状態と同様に補強効果があまりなく、写真—9(a), (b)からわかるように、前倒れに崩壊するため板も前に倒れるだけであまり抵抗しないためと考えられる。

(3) 乾燥状態で効果のあった、斜面表層の両側面に 1 cm のガムテープを貼る補強方法は、水で濡らした状態でも大きな効果があった(写真—10参照)。これは、乾燥した状態では表層粒子のころがりを抑える効果により、水で濡らした状態では前倒れを抑える効果により、それぞれ大きな補強効果があるものと考えられる。

以上の結果から、乾燥状態と同様に水で濡らし弱い粘着力を与えた状態でも、粒状体斜面は表層から崩壊すること、すべり線に沿って最初に剛体的にすべるのではなく結果的にすべり線を形成すること、またこの崩壊機構に基づいて表層をガムテープなどで補強することが効果的であることが明らかになった。

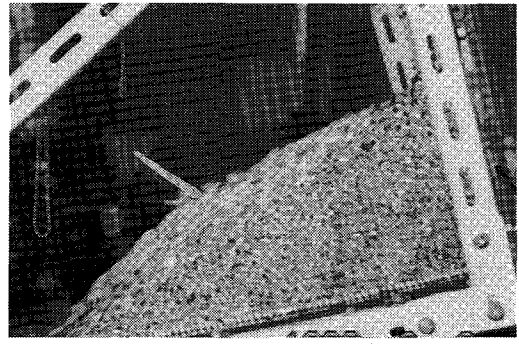
6. 実斜面の補強へのアプローチ

実際の斜面での補強を考えるために、次のような予備実験を行った。

(1) 実際の斜面にガムテープを貼ることはできないので、同様に効果的と思われる補強方法として次のような実験を行った。すなわち、発砲スチロールに長さ 60 mm、幅 60 mm、厚さ 1 mm のアクリル板 6 枚を、5 cm 間隔で深さ 4 cm まで下駄の歯状に (歯の長さ 2 cm) 差し込んだ補強材を作製した (図—4 参照)。乾燥状態と水で濡らした状態のアルミ丸棒積層体 (d1.6 mm, d3 mm, 長さ 50 mm, 混合重量比 3 : 2) 斜面の表面に、この補強材を歯 (アクリル板) の長さ 2 cm まで挿入し、

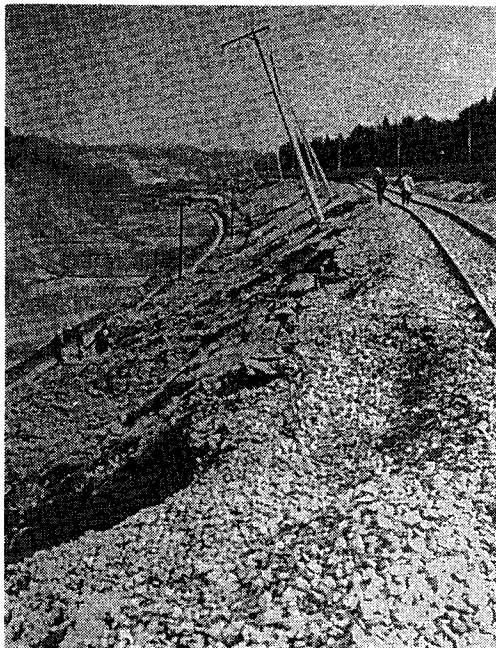


(a)

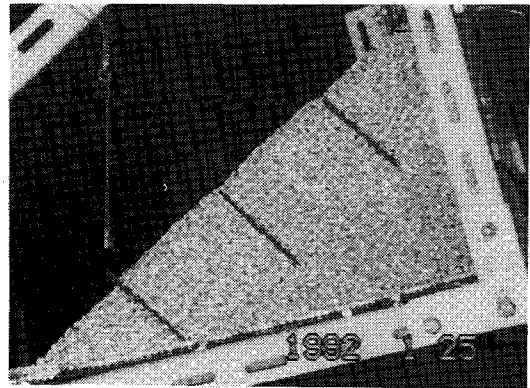


(b)

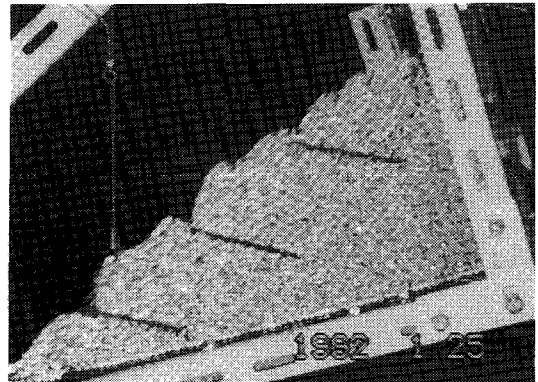
写真一七 水で濡らした状態のアルミ棒積層体斜面上の「木」の倒れる状況((a)→(b))



(a)



(a)



(b)

写真一八 水で濡らした状態のアルミ棒積層体斜面に補強材として矢板(アルミ棒を接着したアクリル板)を挿入した場合の崩壊状況((a)→(b))



(b)

写真一八 電柱が前倒れとなった斜面崩壊の現場写真

この補強材の上端を装置に固定した実験を行った。実験結果を表一四④に示す。乾燥状態でも水で濡らした状態でも、ともにガムテープを貼った場合と同様の結果が得られ有効であった。実際の斜面にガムテープ等を貼ることはできないが、このような方法によって効果的で施工

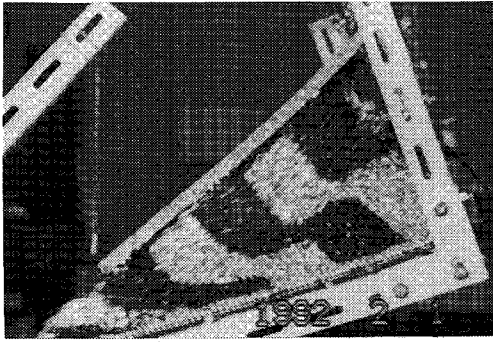


写真-10 水で濡らした状態のアルミ棒積層体斜面の表層1cmをガムテープで補強した場合の変形状況

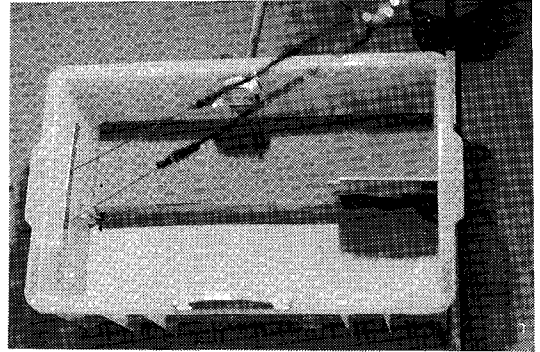


写真-11 豊浦砂を用いた傾斜箱の模型実験(白く見えるのが乾燥状態の無補強の部分、黒く見えるのが表層を濡らし補強を施した部分)

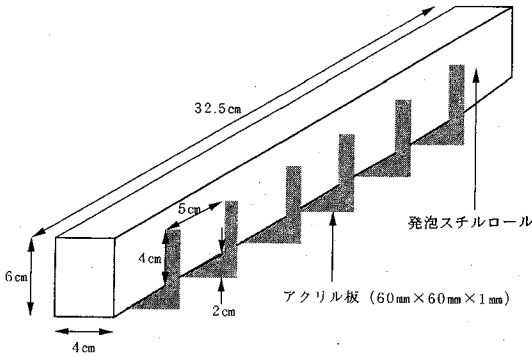


図-4 発泡スチロールにアクリル板を下駄の歯状に差し込んだ補強材

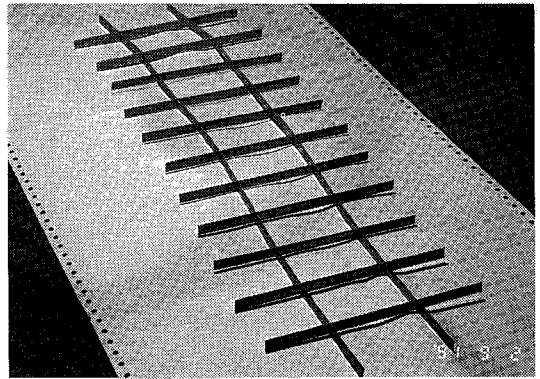


写真-12 アクリル板による井桁状の補強材

可能な補強も考えられる。

(2) 炉乾燥した豊浦砂を、長さ63cm、幅36cm、深さ30cmのプラスチック製容器の傾斜箱に深さ10cmまで入れ、幅36cmの半分のところで板で仕切って、片側に補強を施し、傾斜箱を傾けていくことによって斜面崩壊を引き起こさせる比較実験を行った(写真-11参照)。補強方法は表層2~3mmを霧吹きにより水でしめらせた場合と、幅10mm、厚さ1mm、長さ175mmと600mmのアクリル板を6cm間隔で井桁状に組み(写真-12参照)、斜面表層に深さ10mmまで埋め込んで表層2~3mmを霧吹きにより水で湿らせた場合である。その結果、実際に豊浦砂を用いた実験でも、表層を補強するだけで大きな補強効果が得られた(表-5参照)。井桁を斜面表層に差込む方法はよく行われている「法枠工法」に似ているが、上方を固定する点は新しい発想であろう。

(3) 寸法効果や境界条件の影響を見るため、写真-13に示すようにアルミ丸棒積層体(d1.6mm, d3mm, 混合重量比3:2, 長さ50mm)を板の上に高さ15cm、長さ150cmに積み上げた長い斜面を作製し、板を徐々に傾けていき斜面崩壊を起こさせる実験も行った。この実験では斜面長150cmのほぼ全域にわたってほぼ同時

に崩壊が生じ、崩壊角度は28°であった。30°で崩壊した斜面長40cmの模型実験と同様に、表層から崩壊していった順次内部へ進展し結果的にすべり線を形成するのが観察された。これより、斜面長40cmの傾斜箱の模型実験の結果は、ある程度の一般性を持つものと考えられる。

7. 結 論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

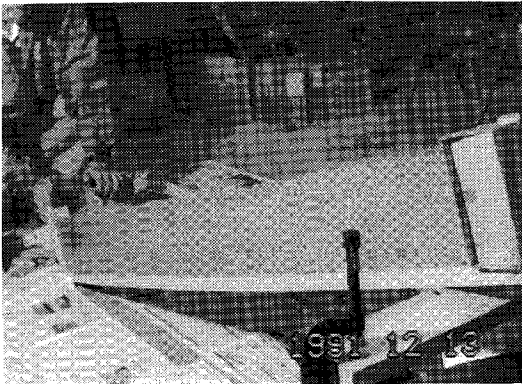
(1) 2次元粒状体モデルとしての、各種アルミ棒とテフロン丸棒を用いた積層体斜面を傾ける傾斜箱の模型実験を行った結果、表層粒子は粒子接点角が重力方向と一致したとき不安定となるところがり始め、これが「引き金」となって斜面崩壊の起こることがわかった。したがって、安息角は表層粒子の「ころがり」によって決まるのであって、「すべり」によって支配される内部摩擦角とは必ずしも関係しない。

(2) ビデオのコマ送り映像の観察により、2次元粒状体斜面の崩壊は、乾燥状態では表層粒子のころがり「引き金」となって発生し、表層から順次斜面内部へと進展していった結果的にすべり線を形成することを確認

表—5 豊浦砂を用いた斜面の崩壊角度

補強方法	試料	豊浦砂
①無補強(乾燥状態)		33°(5)
②水で表層(2~3mm)を湿らす		43°(2)
③水で表層(2~3mm)を湿らし 井桁を斜面表面から差込み 上端を固定		55°(2)

(カッコ内は実験回数)



写真—13 アルミ棒積層体の長い斜面の崩壊実験

した。また、水で濡らした状態(水の表面張力によって弱い粒子間付着力を持つ)でも、同様に表層から前倒れに崩壊することがうかがわれた。

(3) この斜面崩壊のメカニズムに基づいて、斜面表層をガムテープ等で補強し上端を傾斜箱に固定すると、大きな補強効果が得られた。これは、斜面崩壊の「引き金」となる表層粒子の「ころがり」をガムテープ等で抑えることによって、斜面内部のせん断抵抗(すべり抵抗)で斜面全体の崩壊に抵抗するようになり、ころがり摩擦(ほとんどゼロ)とすべり摩擦の大きな差に基づいて崩壊角度が飛躍的に増大するものと考えられる。

(4) ガムテープによって補強された斜面での、ガムテープにかかる力をロードセルで測定した結果、力のつり合いによる計算値と実測値がほぼ一致した。したがっ

て、ガムテープによって補強を行った場合には、すべり面を仮定する安定計算が可能であると考えられる。

(5) アルミ棒などの2次元粒状体斜面に対して効果的であった表層を固定し上端に止める補強を、実際の斜面に適用するため、豊浦砂を試料とする傾斜箱の模型実験を行った。そして、ガムテープの代わりにアクリル板で作製した井桁と水の表面張力で表層を固定し上端に止める補強を施した結果、有効であることが確かめられた。

最後に、アルミ棒を水で濡らすことについて有益な助言をいただいた京都大学 木村 亮助手、写真—8の資料を提供いただいた鉄道技術研究所 那須 誠室長、傾斜箱の模型実験装置の作製に援助いただいた筑波大学 恩田 裕一氏、それに実験等で協力いただいた名古屋工業大学 加藤正司助手、卒業生の大橋弘明氏(現・KK 白石)、田島 準氏(現・名古屋市)、三浦好央氏(現・愛知県)に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松岡 元・大橋弘明・恩田裕一・松倉公憲：粒状体斜面の崩壊機構に関する微視的考察，第24回土質工学研究発表会講演集，pp.1607~1610，1989。
- 2) 恩田裕一・松倉公憲・松岡 元・大橋弘明：粒状体斜面の崩壊機構に関する基礎的実験，第24回土質工学研究発表会講演集，pp.1605~1606，1989。
- 3) Matsuoka, H.: A microscopic study on shear mechanism of granular materials, Soils & Foundations, Vol.14, No.1, pp.29~43, 1974。
- 4) 松岡 元・杉山要一郎・田島 準：粒状体斜面の崩壊機構と補強方法についての一考察，第36回土質工学シンポジウム論文集(斜面の安定解析と安定化工法の諸問題)，pp.67~74，1991。
- 5) 松岡 元・加藤正司・川田善久・上田 稔・滝脇泰将・赤司有三・武馬雅志：水で濡らしたアルミ棒積層体の低拘束圧下のせん断強度と斜面の安定解析への適用，第28回土質工学研究発表会講演集，pp.621~624，1993。
- 6) 松岡 元・杉山要一郎・田島 準・三浦好央：非粘着性および粘着性粒状体斜面の崩壊機構と補強方法，第27回土質工学研究発表会講演集，pp.1885~1888，1992。
- 7) 山田剛二・高山常雄・室町忠彦・藤原俊郎：十勝沖地震調査報告，No.650，鉄道技術研究報告，1968。

(1994.1.5 受付)

FAILURE MECHANISM AND REINFORCEMENT OF SLOPE COMPOSED OF GRANULAR MATERIALS

Hajime MATSUOKA and Yoichiro SUGIYAMA

A model test of slope called "tilting box" is carried out on aluminium rod mass with various kinds of reinforcement, which is used as a two-dimensional model of granular materials. Based on the test results, the failure mechanism and effective reinforcement of slope composed of granular materials are considered. It became clear from the test results that the rolling of particles on the surface of slope is a "trigger" of the failure of the whole slope, the sliding like a rigid body along a slip line is not observed, and therefore the method of reinforcement to stop the motion of particles on the surface of slope is effective.