

粒状体斜面の崩壊メカニズム

名古屋工業大学 正会員 松岡 元
郵 政 省 “ ○杉山 要一郎
名 古 屋 市 学生会員 田島 準

2次元粒状体モデルとしての、各種アルミ棒積層体あるいは摩擦の小さいテフロン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、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わかった。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 が2倍程度違う(アルミ丸棒の $\phi \approx 19^\circ$ 、テフロン丸棒の $\phi \approx 10^\circ$)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。

1. 試料および実験装置

$\phi 1.6\text{mm}$ と $\phi 3\text{mm}$ および $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 9\text{mm}$ 、長さ50mmのアルミ丸棒積層体(混合重量比はともに3:2)、 $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 8\text{mm}$ 、長さ50mmのアルミ丸棒をプレスした楕円形(長短径比1.4)の偏平棒積層体(混合重量比3:2)、および $\phi 5\text{mm}$ と $\phi 9\text{mm}$ 、長さ50mmのテフロン丸棒積層体(混合重量比3:2)を粒状体の2次元モデルとして、斜面を傾ける傾斜箱の模型実験を無補強の場合と各種補強を施した場合について行った。写真-1に傾斜箱の模型実験装置の全景を示す。これは、モーターによりワイヤーを巻き上げることによって、2次元粒状体試料を水平から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装置である。補強方法については、種々試みた結果、比較的補強効果のあった①斜面表面に錘としてビニールテープで接着された真鍮板(幅25mm×厚さ5mm×奥行50mm—21g/cmの荷重と幅25mm×厚さ10mm×奥行50mm—42g/cmの荷重の2種)を並べる方法(写真-2, 3, 4, 5 (b), (c)参照)と②斜面表層の両側面に幅1cmのガムテープを貼り付ける方法(写真-2, 3, 4, 5 (d)参照)、を採用した。なお、いずれの場合もテープは斜面の上端において傾斜箱に固定されている。

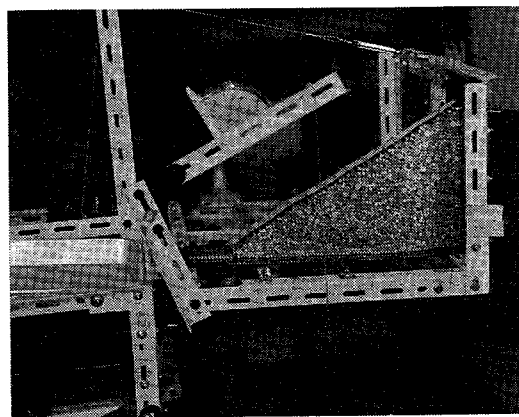


写真-1 傾斜箱の模型実験装置の全景

Failure Mechanism of Slope Composed of Granular Materials;

H. Matsuoka, Y. Sugiyama and J. Tajima (Nagoya Institute of Technology)

2. 粒状体斜面の崩壊機構の要点

すでに粒状体斜面の崩壊のメカニズムについては、以下の点が明らかにされている¹⁾。すなわち、斜面表層の「粒子接点の方向角」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)と一致する必要はない²⁾。この表層粒子のころがり角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て、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。

3. 実験結果と考察

表-1はアルミ棒積層体斜面の崩壊角度を、種々の試料、補強方法に対してまとめたものである。偏平棒の横積・縦積とは、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の場合をいう。(a)無補強とは、アルミ棒積層体だけで特に何も補強もしていない場合を、(b)錘(21g/cm)とは、25mm×5mm×50mmの真鍮板を並べた場合を、(c)錘(42g/cm)とは、厚さが2倍の25mm×10mm×50mmの真鍮板を並べた場合を、また(d)テープ(幅1cm)とは、斜面表面の両側面に幅1cmのガムテープを張り付けた場合を意味している。 $l=32.5$ cmとは、斜面長40cmの内、上部の32.5cmの部分に錘を並べたり、側面に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。いずれの場合も、斜面の上端において傾斜箱に固定されている。表中の崩壊角度とは、明確なすべり線を伴って粒子が崩れ落ちた状態での水平面からの斜面角度であって、表層の粒子数個が動いたり、ころがり落ちた状態や、表層がわずかに動いた状態、単にきれつ線が少し生じた状態とは区別した。何回か同じ条件で実験を行った場合には、崩壊角度の平均値とカッコ内にその実験回数を記している。写真-2～5(a)-(d)にアルミ棒積層体の各実験に崩壊前の状態を示した。なお、写真中の(a)-(d)は表-1中の補強方法(a)-(d)に対応させている。

無補強で偏平粒子を横積と縦積とした場合、崩壊角度が 34° で等しくなるのは、表層における粒子接点角の重力方向に対して抵抗しやすい部分の分布がたまたま近かったためと考えられる¹⁾。斜面表面に錘をのせる実験では、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($\tau_r = \sigma' \cdot \tan \phi$)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。この結果から考えられることは、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、それをテープなどで抑えることが予想外の効果をもたらしたということである。これは、テープなどで表層部分の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ものと考えられる。この考え方が正しければ、斜面全体のせん断抵抗が大きい粒子構造で、斜面表層の粒子のころがり角が比較的容易な粒子構造の場合、表層の側面にテープを貼る補強を施せば、より大きな補強効果が得られることになる。表-1中の $\phi 5$ 偏: $\phi 8$ 偏=3:2で縦積の試料に、斜面表層の側面に幅1cmのテープを貼った場合を見ると、崩壊角度は 54° となっている。これは、横積の場合の 45° を大きく上回っている。一般に、粒子の長径がせん断方向となす角が大きい程、内部摩擦角度 ϕ は大きいとされ、先の研究²⁾では $\phi 5$ 偏: $\phi 8$ 偏=3:2の場合、縦積で $\phi = 41.5^\circ$ 、横積で $\phi = 31.9^\circ$ と測定されている。このことは、上記の斜面崩壊角度の傾向と一致しており興味深い。なお、 $\phi 5$ 偏: $\phi 8$ 偏=3:2で縦積の実験後、側面に貼り付けたテープとテープに接着しているアルミ棒の合計の重量を測定したところ、約440gであった。この実験の崩壊角度 54° は、斜面表面に $682.5\text{g}(=21\text{g/cm} \times 32.5\text{cm})$ の錘を載せた場合の、全ての試料に対する崩壊角度 40° 、 41° 、 46° 、 53° を上回っており、表層にテープを貼るだけで大きな補強効果があるといえる。

表-1 傾斜箱の模型実験によるアルミ棒積層体斜面の崩壊角度

粒径・形状・混合比 補強方法	$\phi 1.6 : \phi 3$	$\phi 5 : \phi 9$	$\phi 5偏 : \phi 8偏$	$\phi 5偏 : \phi 8偏$
	=3:2	=3:2	=3:2(横積)	=3:2(縦積)
(a) 無補強	30° (2)	29° (4)	34° (2)	34° (2)
(b) 錘 (21g/cm, $\ell = 32.5\text{cm}$)	40° (2)	41° (2)	46° (1)	53° (1)
(c) 錘 (42g/cm, $\ell = 32.5\text{cm}$)	50° (1)	52° (3)	55° (1)	62° (1)
(d) テープ (幅1cm, $\ell = 32.5\text{cm}$)	43° (3)	46° (2)	45° (1)	54° (2)

→ 表-1の29°は
お223
↓
可なり抵抗
に抵抗

次に、表-2はテフロン棒積層体($\phi 5 : \phi 9 = 3:2$)斜面の崩壊角度を示したものである。カッコ内の数字はその実験回数を意味している。写真-6~9にテフロン棒積層体の各実験の初期状態(0°)から崩壊状態までを示した。写真-6は(a)無補強の場合を、写真-7は(b)錘(21g/cm)を載せた場合を、写真-8は(c)錘(42g/cm)を載せた場合を、写真-9は(d)テープ(幅1cm)を斜面表層の両側面に張り付けた場合を示している。興味深いのは、表-1と表-2の無補強、 $\phi 5 : \phi 9 = 3:2$ の場合を比べると、29°と28°でほとんど同じになることである。これは、両試料の粒子間すべり摩擦角 $\phi \mu$ が2倍程度も違う(アルミ丸棒の $\phi \mu = 19^\circ$ 、テフロン丸棒の $\phi \mu = 10^\circ$)ことを思えば、驚くべき結果である。誰がこの結果を予想できようか。この一見不思議な実験結果も、上述の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角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、粒子配置が同じであれば同じ崩壊角度となる。粒子間すべり摩擦角 $\phi \mu$ の違いには関係しないのである。なお、このアルミ丸棒積層体($\phi 5 : \phi 9 = 3:2$)の内部摩擦角は $\phi = 24^\circ \sim 25^\circ$ 、テフロン丸棒積層体($\phi 5 : \phi 9 = 3:2$)の内部摩擦角は $\phi = 19^\circ \sim 20^\circ$ であった。テフロン棒積層体の場合も、表層に幅1cmのテープを貼るだけで崩壊角度がかなり上昇するのが見られる(28°→35°)が、アルミ棒積層体ほどではない。これは、「引き金」となる表層粒子のころがりを抑えても、テフロン棒積層体は、アルミ棒積層体に比べて内部摩擦角が小さく、斜面全体のせん断抵抗も小さいためと考えられる。このことも、前述した斜面崩壊のメカニズムに関する考え方を支持するものである。

ϕ が2倍も5倍にも違っても

表-2 傾斜箱の模型実験によるテフロン棒積層体斜面の崩壊角度

粒径・混合比 補強方法	$\phi 5 : \phi 9$
	=3:2
(a) 無補強	28° (4)
(b) 錘 (21g/cm, $\ell = 32.5\text{cm}$)	34° (4)
(c) 錘 (42g/cm, $\ell = 32.5\text{cm}$)	37° (2)
(d) テープ (幅1cm, $\ell = 32.5\text{cm}$)	35° (4)

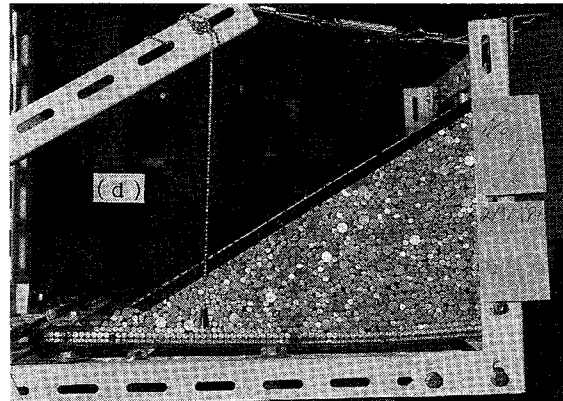
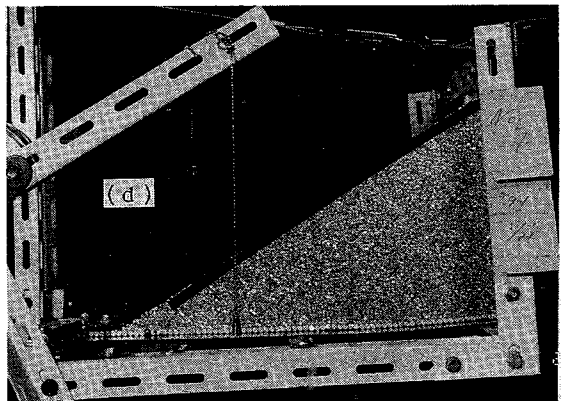
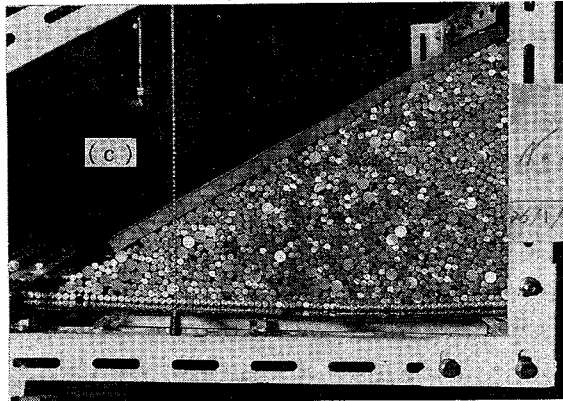
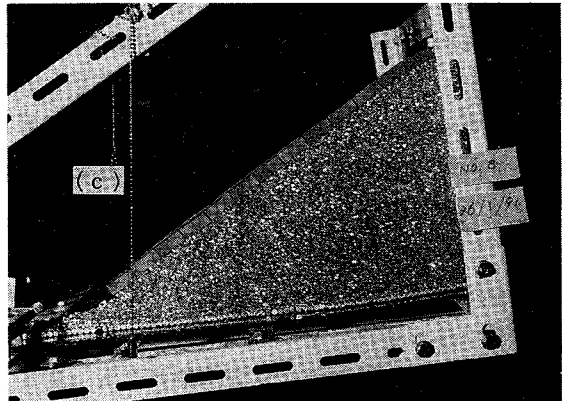
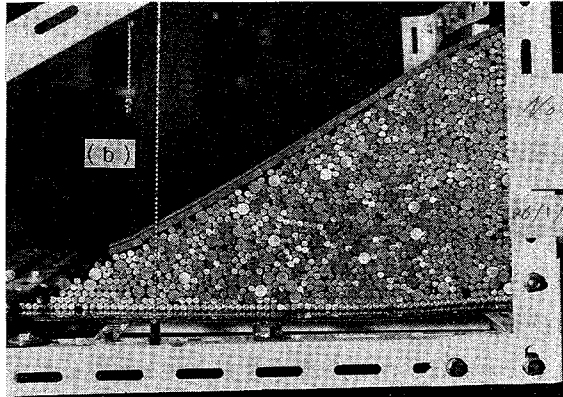
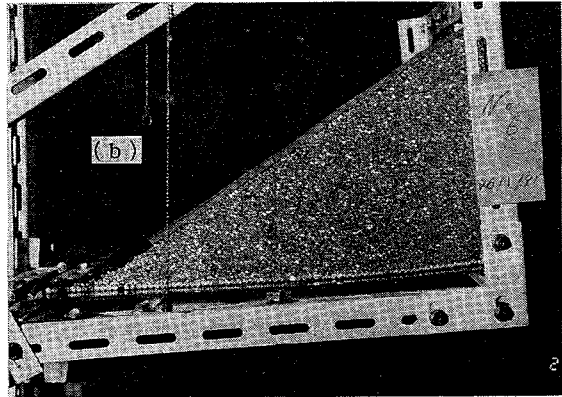
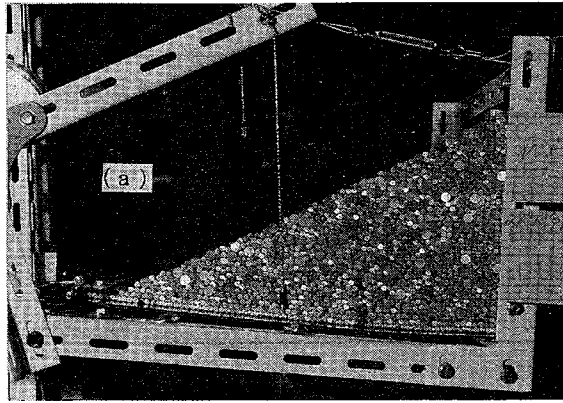
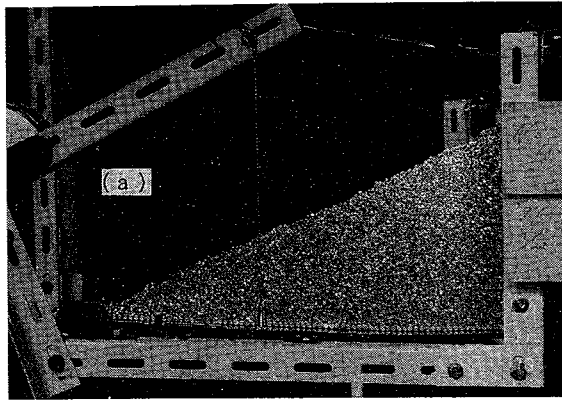


写真-2 種々の補強下のアルミ丸棒積層体
($\phi 1.6 : \phi 3 = 3 : 2$)の傾斜箱の模型
実験

写真-3 種々の補強下のアルミ丸棒積層体
($\phi 5 : \phi 9 = 3 : 2$)の傾斜箱の模型
実験

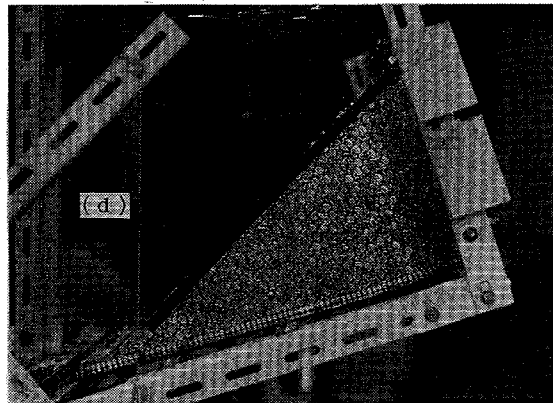
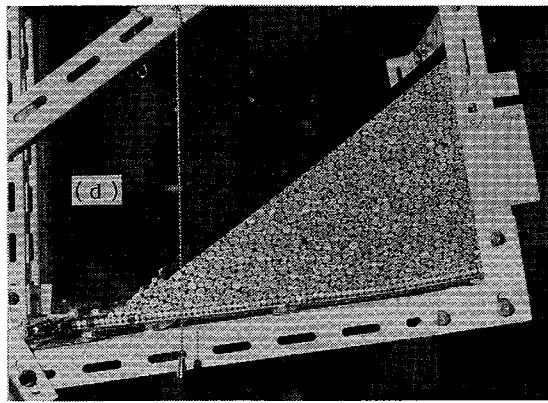
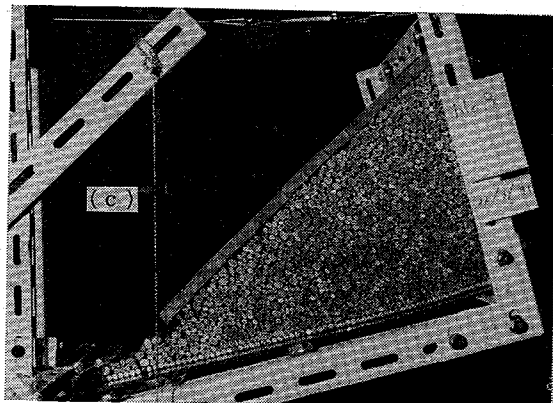
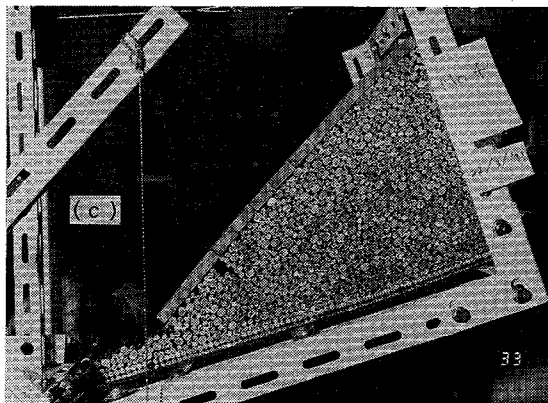
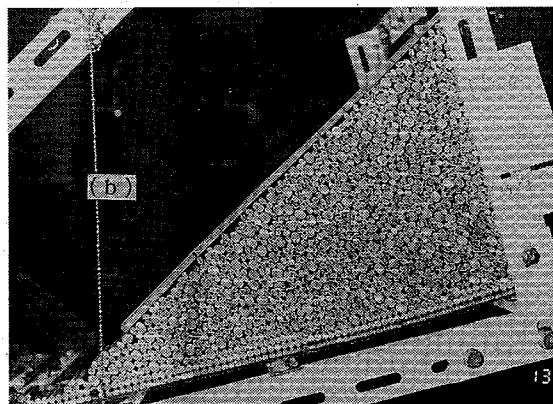
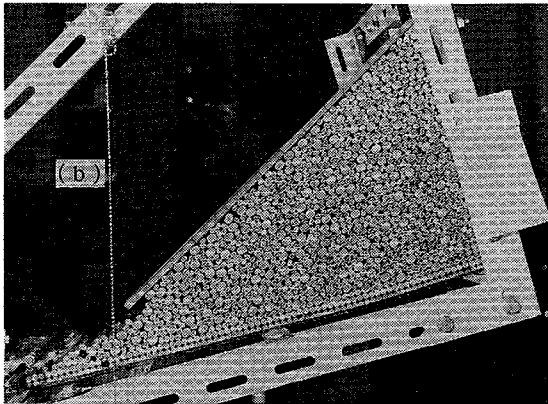
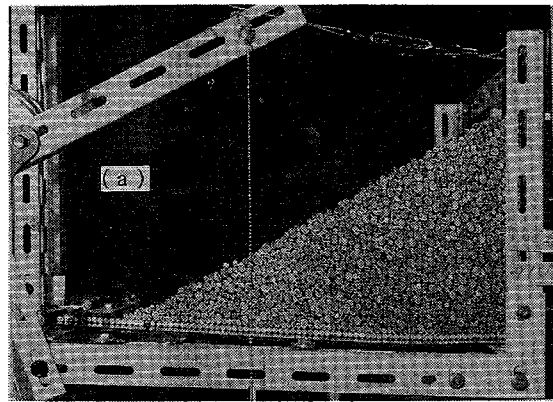
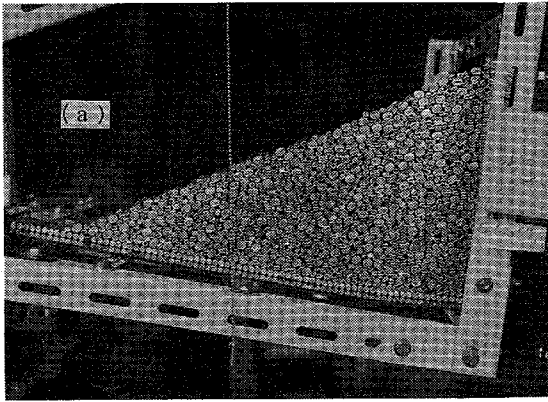


写真-4 種々の補強下のアルミ偏平棒積層体
($\phi 5$ 偏: $\phi 8$ 偏=3:2, 横積)の傾斜箱の
模型実験

写真-5 種々の補強下のアルミ偏平棒積層体
($\phi 5$ 偏: $\phi 8$ 偏=3:2, 縦積)の傾斜箱の
模型実験

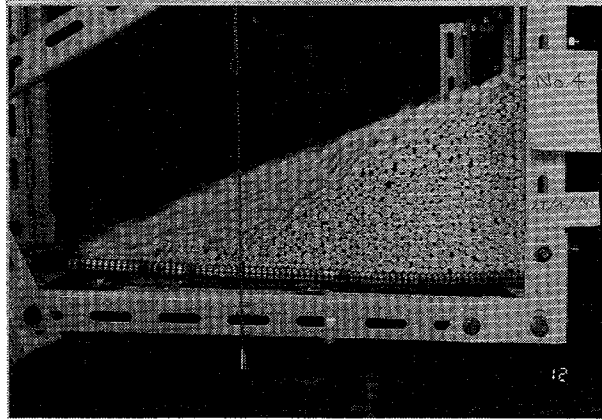
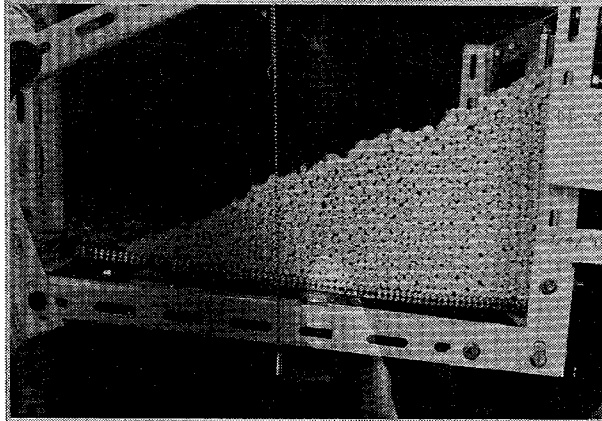
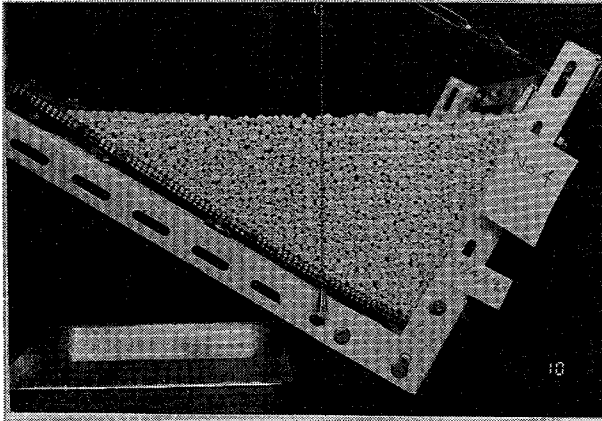


写真-6 無補強のテフロン丸棒積層体($\phi 5$:
 $\phi 9=3:2$)の傾斜箱の模型実験

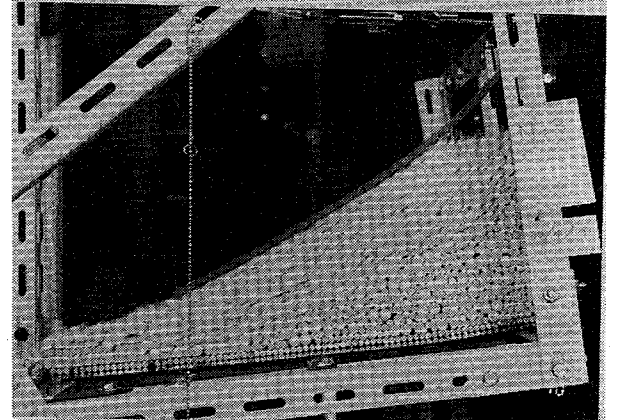
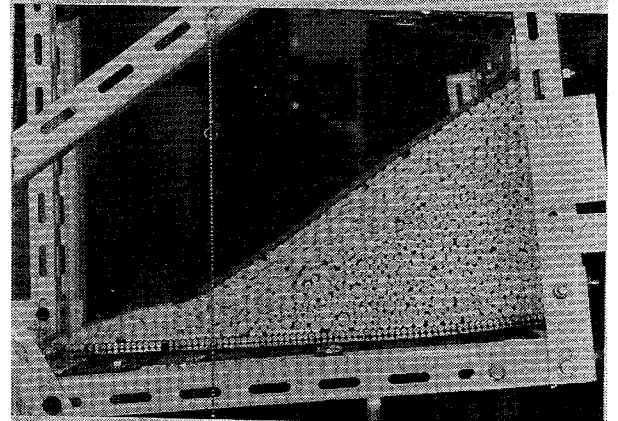
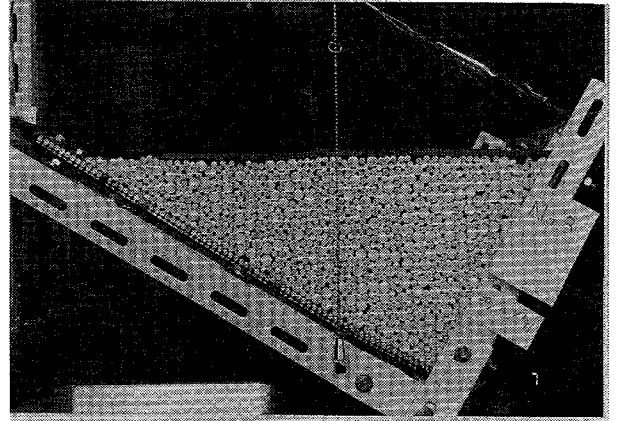


写真-7 錘(21g/cm)を載せたテフロン丸棒積層体($\phi 5$: $\phi 9=3:2$)の傾斜箱の模型実験

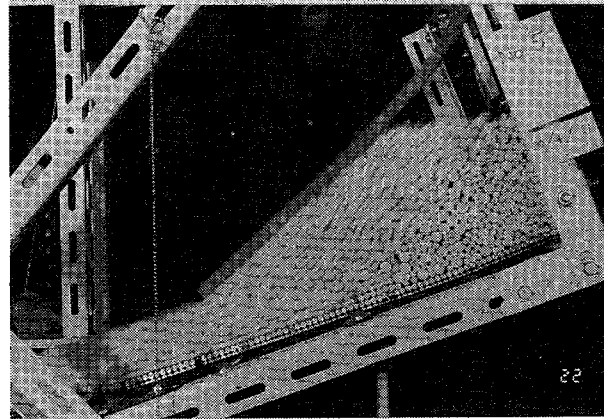
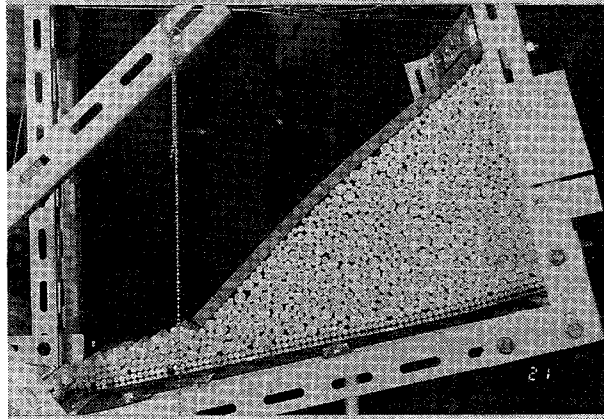
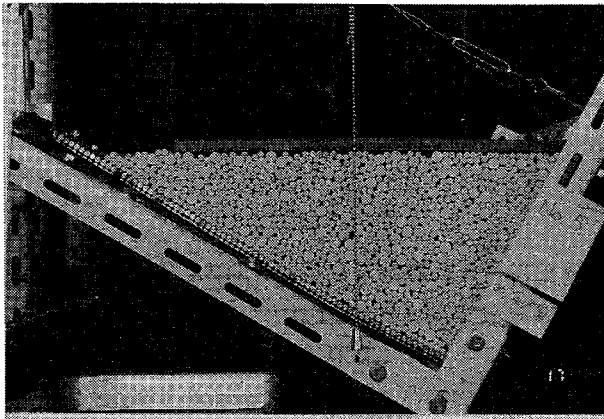


写真-8 錘(42g/cm)を載せたテフロン丸棒積層体($\phi 5:\phi 9=3:2$)の傾斜箱の模型実験

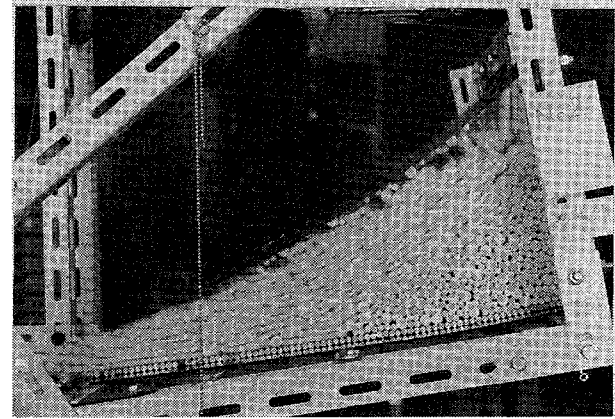
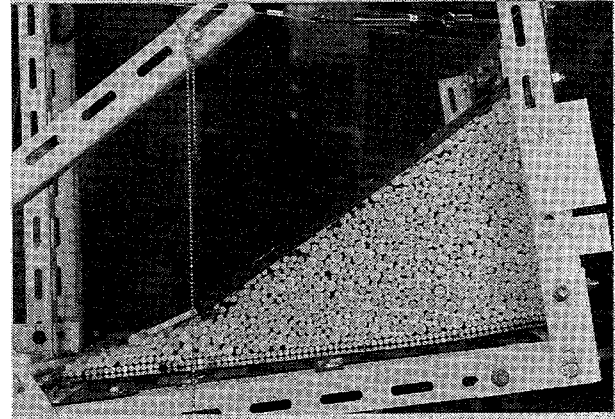
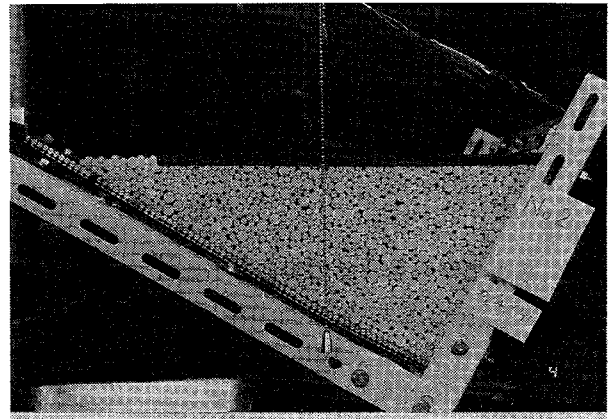


写真-9 斜面表層の両側面にテープ(幅1cm)を貼り付けたテフロン丸棒積層体($\phi 5:\phi 9=3:2$)の傾斜箱の模型実験

参考文献

- 1) 松岡・大橋・恩田・松倉(1989):第24回土質工学研究発表会, 590, pp.1607-1610.
- 2) 恩田・松倉・松岡・大橋(1989):第24回土質工学研究発表会, 589, pp.1605-1606.

謝辞

傾斜箱の模型実験装置の製作にあたっては、筑波大学の恩田裕一氏に御教示をいただいた。記して謝辞を表す。