

アルミニウム丸棒積層体による安息角実験

A preliminary experiment of angle of repose
by an assembly of aluminium rods.

恩田 裕一*・松倉 公憲**

Yuichi ONDA and Yukinori MATSUKURA

I はじめに

従来, Talus斜面の勾配, 砂丘のslip faceの勾配などは安息角により規定されていると考えられている。安息角は, 粒状体の崩れにより規定されていると考えられていることから (Carson, 1977), 崩れの発生のメカニズムを明らかにすることは地形学的にも重要と考えられる。

一方, 粒状体の崩れの原因について, Terzaghi (1943)は無限長の斜面の安定解析との対比から, 粒状体の崩れは, 斜面勾配が内部摩擦角と等しくなると発生すると考えた。それ以来, この問題はいわば解決済みの問題であると考えられている。しかし, 粒状体は, 粒子同士の接触面積が見かけの接触面積に比べてきわめて小さいという特徴を持ち, 連続体とは極めて異なる特性を持っている。このような粒状体で構成される斜面の安定が, 集合体としての平均の摩擦抵抗である内部摩擦角に支配されているかについては疑問の点がある。

ところで, 粒状体のせん断メカニズムについては, 個々の粒子の粒子同士の摩擦・粒子間力に基づく微視的モデルが提案され, 粒状体におけるせん断の物理的意義について明らかにされつつある (松岡, 1977; 小田, 1977)。せん断現象の微視的モデルを可能にしたのは, 2次元材料の開発とそれによる実験

結果の蓄積にある。もし, 粒状体の斜面の安定について2次元の実験ができれば, 粒状体斜面の安定についての微視的考察を行うための端緒となるかもしれない。そこで, 本研究では2次元のアルミニウム丸棒積層体(以下アルミ丸棒積層体と略称する)を用い安息角の実験を行ない, 粒状体の崩れについて観察を行った。

II 実験方法

1) 実験装置

実験装置は, 写真1に示すような三角形の試料箱を持つTilting boxである(恩田ほか, 1989)。箱は底辺40cm, 高さ25cmの鉄製のアングルでつくられており, 箱の底面および背面には, 試料の底面すべりを防ぐために, 5mm丸棒を一層分張り付けている。2次元材料の実験を想定しているために, 箱の側面はフリーになっている。

この箱を鉄製のワイヤーを介してモーターにより引き上げる。ワイヤーの一端はTilting boxにしばりつけられており, そこから高さ45cmの「塔」まで上げられ, そこで滑車により方向が変えられてモーターにたどり着く。モーターは出力15Wの速度可変式電磁ブレーキつき交流モーターである(オリエンタルモーター社製: 3RK15RGN-AM)。ブレーキ付きのタイプにしたのは, 引き上げた位置で静止させ

*筑波大学・院・地球科学研究科 **筑波大学地球科学系

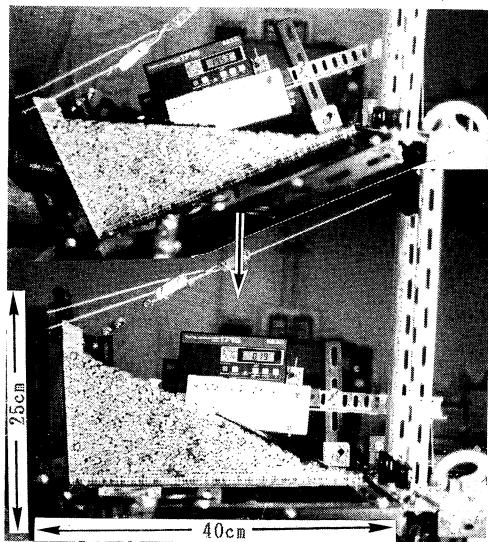


写真1 実験装置 (Tilting box)

るためである。このモーターに1:1000のギアヘッドを付け、直径10cmのブーリーにワイヤーを巻き付け固定した。ギヤ比は、最低0.05deg/sという極めて低速で引き上げることを想定して決定した。

箱の側面の両側には、ビデオ及びカメラ記録用の張り出しがある。この先端部にビデオまたはカメラを固定して実験を行う。すると、ビデオまたはカメラは箱とともに上昇するため、箱が上昇しても、たえず同じ位置からの画像を得ることができる。

2) 実験材料

実験材料は、写真2のような長さ5cm、直径が1.6mm, 3mm, 5mm, 9mmのアルミニウムの棒である。

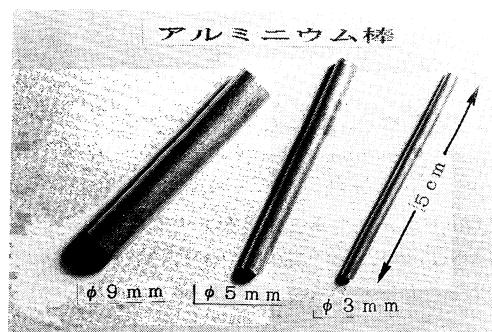


写真2 実験材料 (アルミニウム棒)

アルミニウム棒を用いたのは、比重が2.69と土粒子の比重とほとんど同じためである。

従来、このようなアルミニウム丸棒を用いた実験は土質工学の分野で数多く行われている。たとえば、せん断試験（村山・松岡, 1970など）、根切り実験（Lambe and Whitman, 1969）、沈下床の実験（Matsuoka, 1973）などである。

3) 実験の手順

実験の手順は前報（恩田ほか, 1988）における3次元材料のTilting box実験とおおむね同様である。まず、試料箱の中に、表面が平らになるようにアルミ棒を積み上げる。つづいて、アルミ棒を両側面からたたく。これは、側面を平らにするとともに、アルミ棒を詰めたときの構造を消し去るためである。

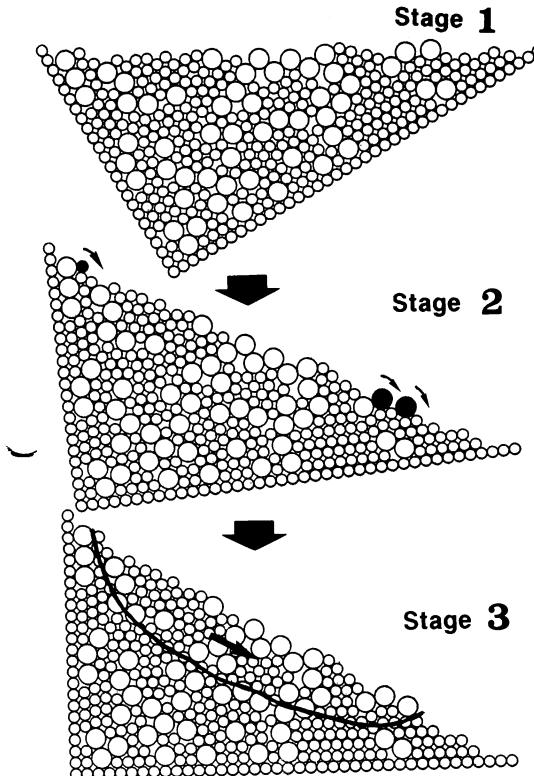
このような積層体が作成されたのち、角度計（Soar社：model 1700, 0.01°刻み）およびビデオまたはカメラをセットする。この際、角度計をビデオに写しこんでもおく。次に箱をゆっくりと引き上げる。20°くらいまでは0.3deg/s, それ以上の角度では0.1deg/s程度の速度で引き上げた。材料が大きな崩れを起こしたら、引き上げるのを停止する。崩れを起こしたときの角度（ α_c ；松倉・恩田, 1989）は、ビデオに写し込まれている角度計の値から正確に読み取る。

III 実験結果および考察

1) アルミ丸棒積層体における崩れ

第1図に、アルミニウム丸棒積層体の崩れに至るまでの過程の模式図を示す。アルミニウム丸棒積層体は最初は表面がほぼ水平になっているが（Stage 1），傾斜が急になるにつれ、不安定な粒子が転がり落ちる（Stage 2）。さらに引き上げると、ある深さを持った崩れが発生する（Stage 3）。このような崩れのパターンは、レキなどの3次元の材料の場合（恩田ほか, 1988；松倉ほか, 1989）と同様である。したがって、2次元にしても基本的な物理現象は保存されていると見なし得る。

実験には2次元の材料を用いているので、崩れの深さは明瞭に判定できる。第2図に、斜面の一部における崩壊前・崩壊後の画像（ビデオプリンターに



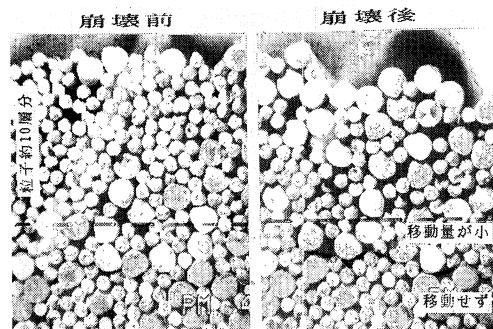
第1図 崩れの模式図

よる)を示す。このように、崩れる深さはほぼ粒子5~10層分程度である。3次元材料における崩れの深さは、前報(恩田ほか, 1988)および石井(1981)によると、粒子数層分の厚さであるという観察結果がある。2次元実験での観察結果は、これら3次元材料による実験結果と調和的である。

2) 混合比を変えた実験

アルミ丸棒積層体を使った実験の第一段階として、径の異なる材料の混合比を変えた実験を行った。 $\phi 5\text{ mm}$ 均一、 $\phi 9\text{ mm}$ 均一および $\phi 5\text{ mm}$ と $\phi 9\text{ mm}$ の丸棒の混合比を、重量比で20:1, 10:1, 8:2, 7:3, 5:5, 3:7, 2:8, 1:10, 1:20, 0:1と段階的に変化させた(写真3)。それぞれの混合比で2回ずつ実験を行い、第1表にその平均値を示した。

均一粒径の α_c は、 $\phi 9\text{ mm}$ のとき52.5°、 $\phi 5\text{ mm}$ のとき56.5°ときわめて大きな値を示すのに対し、混合粒径



第2図 崩壊前、崩壊後の粒子の様子

の場合はすべて30°以下である。以上のように、均一粒径と混合粒径の α_c の差はきわめて大きい。混合粒径の場合は、混合比によらず26°~30°の間の値をとる。 $\phi 5\text{ mm}:\phi 9\text{ mm}$ の比が20:1, 10:1の時の α_c がやや大きいが、これも誤差の範囲にはいるかも知れない。

3) 考察

今回の結果を、前報(恩田ほか, 1988)の3次元材料を用いた実験結果とあわせて検討すると、 $\phi 5\text{ mm}$ 均一粒径の実験で得られた安息角の56.5°という値は極めて高いことがわかる。これは、今回用いた材料が、2次元材料のため、非常に極端な状況を作り出すことができるためであろう。また、少しでも粒子が混合されると安息角が急激に下がることも興味深い。これは、異種粒径の粒子が混入することに

第1表 混合比と限界安息角

混合比(重量比) ($\phi 5\text{ mm}:\phi 9\text{ mm}$)	限界安息角 α_c (°)
$\phi 5\text{ mm}$ 均一	56.5
20:1	29.1
10:1	30.0
8:2	26.3
7:3	26.4
5:5	28.6
3:7	27.6
2:8	27.6
1:10	27.4
1:20	26.4
$\phi 9\text{ mm}$ 均一	52.5

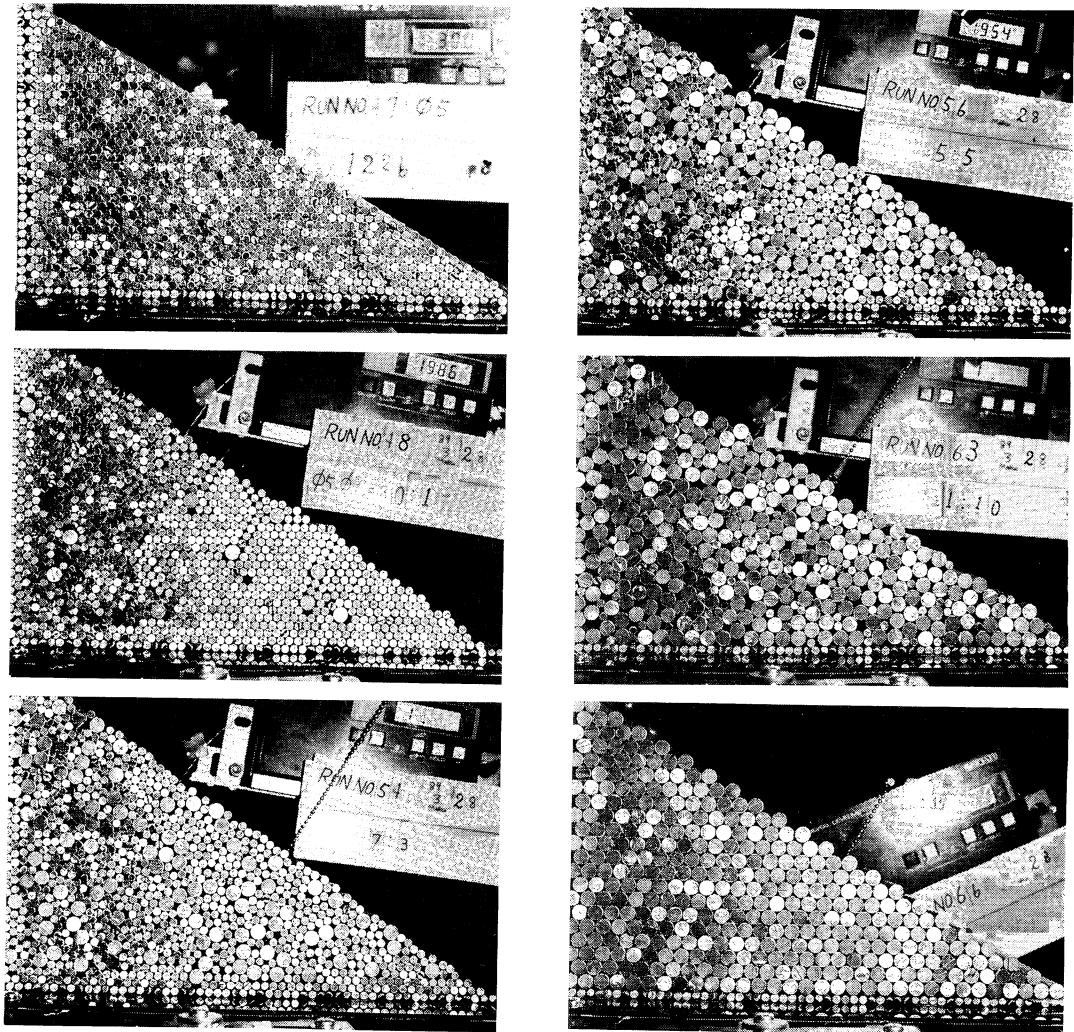


写真3 混合比を変えた実験

a) $\phi 5\text{ mm}$ 均一, b) $\phi 5\text{ mm} : \phi 9\text{ mm} = 20 : 1$
 c) 7 : 3, d) 5 : 5, e) 1 : 10, f) $\phi 9\text{ mm}$ 均一

より、アルミ丸棒積層体内部での不安定性が増大すると考えられる。今後、限界安息角のメカニズムを解明していく上で、2次元アルミ丸棒積層体による実験は非常に有用であろう。

謝 辞

名古屋工業大学の松岡元教授からはアルミ丸棒の二次元材料としての有用性を御教示頂いた。記して謝意を表する。

文 献

- 石井孝行 (1981) : テーラス斜面と岩屑の粒径のもつ意義、地形、2, 19-24.
- 小田匡寛 (1978) : 土の構成式に関する現状総括6. 粒状体の構造とその変形モデル。土質工学会論文報告集, 18(4), 119-130.
- 恩田裕一・松倉公憲・井石博之・奥山武彦 (1988) : Tilting boxによる岩屑斜面の安定角に関する予察的実験。筑波大学水理センター報告、12, 49-55.

- 恩田裕一・松倉公憲・松岡元・大橋弘明（1989）：粒状体斜面の崩壊機構に関する基礎的実験、第24回土質工学会研究発表講演集、1605～1606。
- 松岡元（1978）：土の構成式に関する現状総括5. 粒状体としてのアプローチ、土質工学会論文報告集、18(4), 97-104.
- 松倉公憲・恩田裕一（1989）：安息角：定義と測定法にまつわる諸問題・水理実験センター報告、13, 27-35.
- 松倉公憲・恩田裕一・井石博之（1989）：安息角の測定における斜面長の効果に関する予察的実験、水理実験センター報告、13, 37-44.
- 村山朔郎・松岡元（1970）：2次元モデルによるせん断現象の微視的考察、京大防災研年報、13B, 505-523.
- Carson, M.A.(1977): Angles of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes. *Earth Surface Processes*, 2, 363-380.
- Lambe, W.T. and Whitmam, R.V.(1969): *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 553p.
- Matsuoka, H.(1973): Deformation characteristics soil. Doctor thethis, Kyoto University, 233p.
- Terzaghi, K.(1943): *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 510p.