

Tilting box による岩屑斜面の安定角に関する 予察の実験

Preliminary Study on Angle of Initial Yield and Angle of Rest
by Tilting-Box Tests

恩田 裕一*・松倉 公憲**

井石 博之***・奥山 武彦****

Yuichi ONDA, Yukinori MATSUKURA,

Hiroshi ISEKI and Takehiko OKUYAMA

I はじめに

砂や礫などの粒状体が、外部からの擾乱のない状態のもとで静止しうる最大の角度のことを安息角と呼び、これは角礫からなる崖錐の表面の角度に相当する(井口, 1981)といわれている。従来、この安息角に関する研究は、Van Burkalow^{*}(1945)の先駆的な実験をはじめとして数多くなされてきた。いくつかの代表的研究としては、回転ドラムによる実験(Carrigy, 1970; Allen, 1970; Statham, 1974)、採石場のコーンの観察やtilting boxによる実験(Carson, 1977)などがある。しかしそのうち、従来の回転ドラムによる実験に対しては、実験装置に対して試験材料が相対的に大きすぎること、側壁の摩擦の影響があり正しい安息角が計れないことなどの問題点が指摘されている(Carson, 1977)。一方、tilting boxを用いた従来の研究では、実験例が少なく、試験材料の岩質の違いあるいは粒径・形状・粒度分布などの違いによる安息角の違いについて十分なデータがあるとはいいがたい。また、Carson(1977)

のtilting boxを用いた実験では、崩れの大小によって安息角の値がバラついており、安息角を決定づける「崩れ」の実態についてもまだ不明な点が多い。そこで、本研究では大型tilting boxを製作し、碎石と砂のいくつかの材料を用いた実験を行い、材料のつくる斜面の安定角を計測するとともに、崩れの実態について観察を行った。

II 実験方法

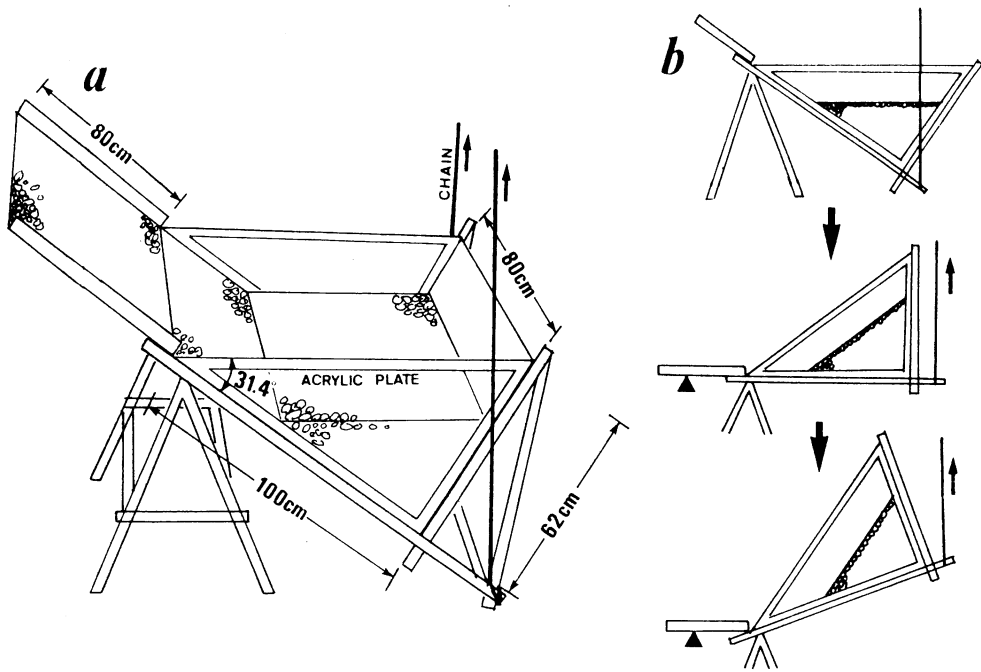
1) 実験装置および実験材料

本研究を行うにあたり、新たに第1図aに示すような大型tilting boxを製作した。これは、幅80 cm、長さ100 cm、高さ62 cmの三角錐の木製の箱を主要部分としている。箱の両側は、材料の転動や崩れなどの挙動を観察できるようにアクリル板となっている。また、補強のために、箱の下部および後部には鉄パイプを組んである。この後部の鉄パイプ部分に、チェーンを結び付け、チェーンブロックにより引き上げる構造となっている。

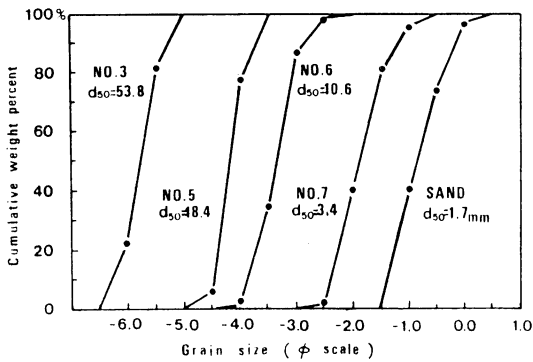
実験に使用した材料は、茨城県新治郡産の塚田陶

*筑波大学・院・地球科学研究科 **筑波大学地球科学系

筑波大学自然学類 *受託研究員(現・農業土木試験場農地整備部)

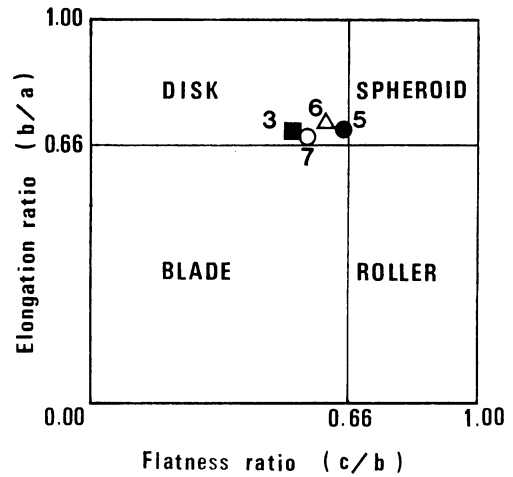


第1図 実験装置の概要及び試験の手順を示す概念図



第2図 実験材料の粒径加積曲線

管株式会社が生産・販売している砂岩の碎石4種類と、濾過砂として日本原料株式会社から販売されている茨城県高萩産の海浜砂である。それぞれの粒度組成を第2図に示す。粒径の大きい方から順に、それぞれ碎石3号 ($d_{50}=53.8$ mm)、碎石5号 ($d_{50}=18.4$ mm)、碎石6号 ($d_{50}=10.6$ mm)、碎石7号 ($d_{50}=3.48$ mm)、砂 ($d_{50}=1.74$ mm) と呼ぶことにする。どの材料も粒度は比較的揃っており、



第3図 実験材料の形状

ふるい分け係数 (d_{75}/d_{25})^{0.5} は、0.8~0.9程度である。

実験に使用した材料のうち、碎石3号、碎石5号、碎石6号、碎石7号、について、長・中・短軸を測定することにより形態分析を行った。第3図は、

Zingg のダイヤグラムにその結果をプロットしたものである。碎石5号は塊状 (spheroid) と板状 (disk) の境界付近にあたるが、碎石6号では板状、碎石7号では板状と葉状 (blade) の境界付近となっている。碎石3号は、4種のなかで最も平板率 (c/b) が低く板状となっている。4種の碎石の細長率 (b/a) には顕著な差は認められない。

2) 実験の手順

まず始めに、tilting box を第1図bの最上部の状態で、実験を始める前に、まず箱の底部と崩壊粒子が流送する前面底部には、実験材料と同じ材料を一層分張り付けたベニア板を敷いておく。次に、175~250 kg 程度の材料を静かに流し込む。このようにしてできた比較的ゆる詰め供試体のかさ密度 (bulk density) は、1.4~1.6 g/cm³ 程度であった (第1表参照)。このようなゆる詰め状態のほかに振動締め固めによって、密詰め供試体も作成した。その締め固めには、コンクリート用パイプレータ (特殊電気工業社製、DV-28) を用いた。その結果、ゆる詰め状態と比較して0.1~0.3 g/cm³ 程度のかさ密度の増加がみられた (第1表参照)。

以上のような試料調整後に、tilting box を静かに引き上げる。箱は第1図b中部に示されるような挙動をして、徐々に材料のつくる斜面の角度が増していく。引き上げによって徐々に変化する斜面の角度及び崩壊直前の角度は、デジタル角度計 (soar社、model 1700:0.01度刻み、model 1710:0.5度刻み) 2種類を併用して測定した。引き上げの速度は、0.1~0.2 deg/s 程度で、崩れの徴候が見られてきたら (例えば礫1個が転動したら)、引き上げの速度を落とす。そして、ほぼ斜面全体に崩れが発生した時点で、引き上げを停止した。

崩れが発生する直前の斜面角度を、Allen (1969) は angle of initial yield (ϕ_i) と呼んでいる。ここではそれに従い、崩壊発生限界角度 (ϕ_i) と呼ぶことにする。崩れが停止してできた斜面角度は、同様に Allen (1969) によって residual angle after shearing (ϕ_r) と呼ばれており、ここでは崩壊後の角度 (ϕ_r) と呼ぶことにする。安息角 (angle of repose) という用語は、一般にこの ϕ_r に相当し

て使われることが多い。しかし、研究者によっては、 ϕ_i あるいは、 ϕ_i と ϕ_r の両方を指すこともあり、混乱している。そこで、本稿では以後安息角という語は使わず、上述の ϕ_i 、 ϕ_r を用いることにする。

ϕ_r は、崩れのほぼ中心のライン沿いに、斜面の高さ・長さを実測することによって求めた。なお、以上の過程を8ミリビデオにより記録し、崩れの実態について観察を行った。

III 実験結果および考察

1) 崩れの実態

碎石3号の場合は、かさ密度の大小にかかわらず、徐々に傾斜が増すにつれ、隣接する礫の噛み合わせ (interlocking) の悪い不安定な礫が転げ落ちていき、そのうち斜面全体の表面の礫が転動するようにして落ちていく。このタイプの崩れは、崩れの規模が大きい場合でもすべて個別粒子の転動の集合である。碎石3号の限界傾斜角 (ϕ_i) は大きく、密な場合には50度を越えることもある。

碎石5号の場合は、大まかには碎石3号と同様なプロセスをとり、崩れに至る。ただし、この材料を用いた実験が最初の実験だったため、崩れの認定に不確かな点がある。すなわち、Run II-2では崩れが斜面全体に及ばないような小さな崩れがあった段階で実験を終了してしまったため、安息角 ϕ_r が過大になってしまったようである。このような、小さい崩れを含んだ実験において過大な傾斜角が求められるということは、Carson (1977) においても報告されている。

碎石6号の場合は、崩れの初期においては碎石3号・5号と同様に、表面の不安定な粒子が最初に転動しながら落下して行き、続いてより拡大した崩れに至る。その後、Run III-4、III-5以外においては、礫の数層分の深さの位置に滑り面ができ、マスとして全体に移動するというプロセスが観察された。この集合移動のプロセスにおいて、集合移動粒子の速度が粒子の個別移動速度に比べて著しく速いという特徴がある。また、締め固めた密詰めの場合は、ゆる詰めの場合に比べて、崩れの初期に発生する不安定粒子の転動の量が著しく少ないことも観察され

第1表 実験結果一覧表

RUN NO.	試料	d_{\max} (mm) (D/d_{\max})	締め固め	かさ密度 (g/cm^3)	ϕ_i (degrees)	ϕ_r (degrees)	$\Delta\phi$ (degrees)	崩れのタイプ
I-1	碎石3号	55.0	×	1.65	47.1	36.2	10.9	A-B
I-2		(14.5)	×	1.67	46.3	36.5	9.8	A-B
I-3			○	1.80	49.7	37.5	12.2	A-B
I-4			○	1.79	50.3	36.5	13.8	A-B
I-5			○	1.80	50.1	36.4	13.7	A-B
II-1	碎石5号	28.9	×	1.46	47.6	36.2	11.4	A-B
II-2		(27.7)	×	1.46	45.1	41.6	3.5	A-B
II-3			×	1.49	45.2	37.7	7.5	A-B
II-4			○	1.67	48.3	35.6	12.7	B
II-5			○	1.71	47.9	38.2	9.7	B
II-6			○	1.71	46.8	39.1	7.7	B
III-1	碎石6号	18.3	×	1.47	44.9	32.9	12.0	A-B-C
III-2		(43.7)	×	1.48	45.2	35.1	10.1	A-B-C
III-3			×	1.48	43.0	34.7	8.3	A-B-C
III-4			×	1.48	42.6	36.7	6.4	A-B
III-5			○	1.59	45.6	36.2	9.4	B
III-6			○	1.65	46.7	36.4	10.3	A-B-C
III-7			○	1.65	46.4	34.5	11.9	B-C
IV-1	碎石7号	9.20	×	1.37	43.7	33.6	10.1	A-B-C
IV-2		(87.0)	×	1.39	42.5	33.7	8.8	A-B-C
IV-3			×	1.38	42.4	32.7	9.7	A-B-C
IV-4			○	1.65	45.0	37.5	7.5	B-C
IV-5			○	1.65	44.6	35.5	9.1	B-C
IV-6			○	1.68	46.4	35.0	11.4	B-C
V-1	砂	2.82	×	1.66	38.9	29.9	9.0	A-B-C
V-2		(283)	×	1.68	38.5	30.8	7.7	A-B-C
V-3			○	1.80	38.5	32.4	6.1	B-C
V-4			○	1.84	38.0	31.6	6.4	B-C

D: tilting boxの幅 (800mm) d_{\max} : 試料の中径の最大値 ϕ_i : 崩壊発生限界角 ϕ_r : 崩壊後の斜面角
 $\Delta\phi$: ϕ_i と ϕ_r との差 ($\phi_i - \phi_r$)

た. このことは, 締め固めによって礫の噛み合わせ効果が大きくなっているためと考えられる.

碎石7号の場合には, 碎石6号の場合と同様に, まず個別移動が起こり, 続いてすべてのRunについて粒子の集合移動がみられた. 砂の場合も, 碎石

7号とほぼ同様に個別移動から集合移動へという経過を経る. しかし, 碎石7号の場合に比べて集合移動の幅が小さく, その移動速度も小さい. また, ϕ_i , ϕ_r とも碎石粒子の値に比べかなり小さい値をとる.

以上のような粒子の挙動の観察から, tilting box

による傾斜の増大に伴う粒子の崩れについて以下のようなモデルをつくり、それを第4図に示した。まずAは、不安定な粒子が個別に転がり落ちるステージである。続くBステージは斜面全体にわたって粒子が個別に転動を起し崩れて行くものである。最後のCステージは、斜面のある部分に滑り面ができ、個々の礫があまり回転を伴わず集合的にマスとして移動するものである。このステージがテラス斜面およびストックパイル斜面の安定角を規定する重要な移動様式であることは、町田ほか(1975)やCarson (1977) などでも指摘されている。

上述の崩れに関するモデルをもとに、おのおののRunにおいて崩れのステージがどのように発現したかをまとめ、第1表末尾に示した。碎石3号と碎石5号では、主にAステージからBステージへと変化する(A-Bタイプ)。ただし、碎石5号の密詰めでは、Aステージは明瞭でなくBステージのみ観察された。一方、碎石7号と砂では、A-BステージのあとでCステージが発現する(A-B-Cタイプ)。ただし密詰めの場合、碎石7号ではAステージが明瞭ではなくB-Cタイプとなり、砂の場合A、Bステージが明瞭ではなく、Cタイプとなった。碎石6号の場合には、碎石3号・5号でみられるA-BタイプおよびBタイプと、碎石7号および砂でみられるA-B-CタイプおよびB-Cタイプなどが観察され、Cタイプの発現する移行型と見なされる。このように、碎石6号を境にしてそれより粒子径が小さい場合にのみ、すべり面を伴う集合移動(Cステージ)が発生する。

このような崩れのタイプが単に材料の粒径の違い

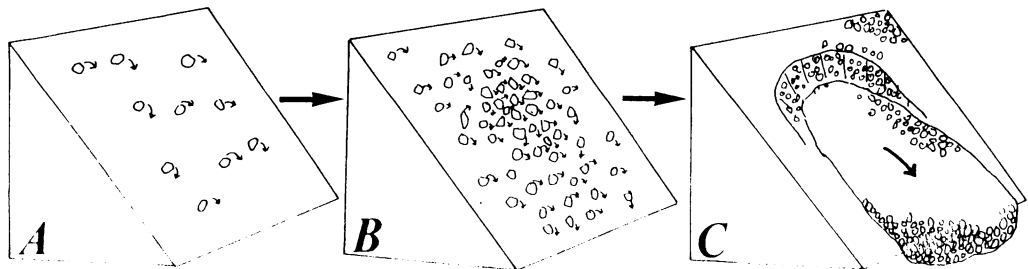
によるのかどうかは、これだけの実験ではまだよくわからないが、材料の粒径(中径の最大値、 d_{max})とtilting boxのdimension(例えば幅、 D)との比(D/d_{max})が影響を与えている可能性も考えられる。その場合には、碎石6号の粒径とtilting boxの幅から得られる D/d_{max} が43.7、および50という値が、崩れのタイプをわける境界値としての意味を持つことになろう。

2) ϕ_i , ϕ_r に及ぼす粒径・かさ密度の影響

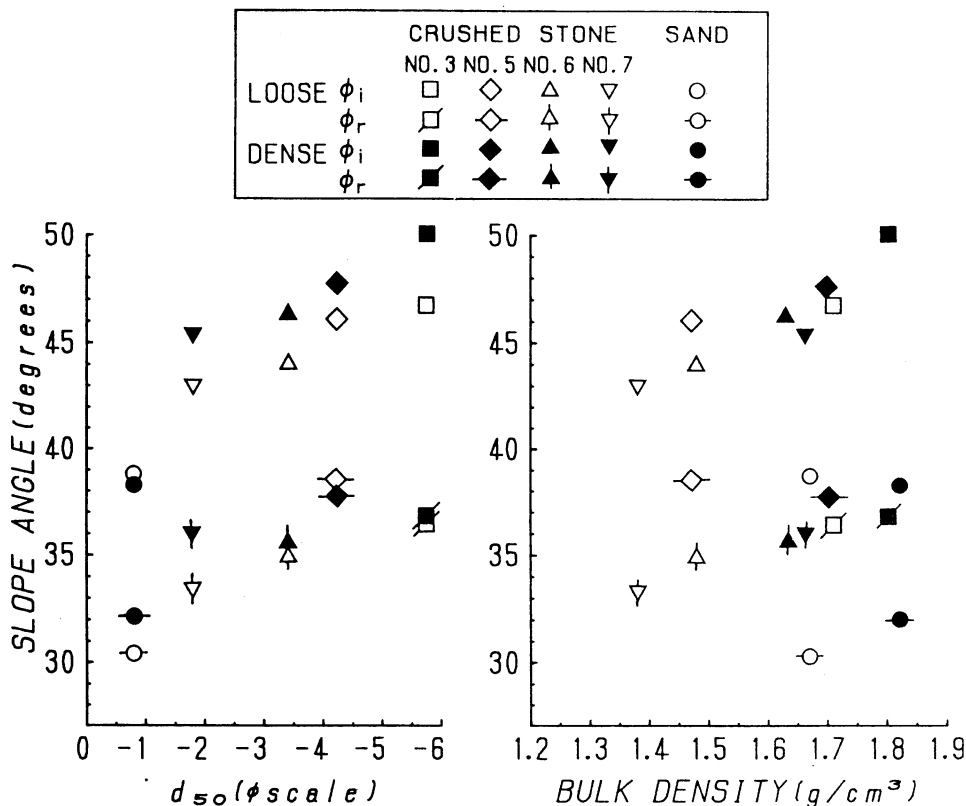
それぞれの材料で、締め固めを行った場合(密詰め; denseな状態)と行わない場合(ゆる詰め; looseな状態)について、2回~4回ずつ実験を繰り返した。第1表に、その実験結果をまとめた。表中の $\Delta\phi$ は、崩壊発生限界角度(ϕ_i)と崩れの後の角度(ϕ_r)との差を計算したものである。

最初に、ゆる詰めのかさ密度のデータを見ると、碎石の場合、3号で 1.66 g/cm^3 、5号で 1.38 g/cm^3 と、粒径が小さくなるにしたがい、値が小さくなっている。しかし、碎石より細粒な砂は、 1.67 g/cm^3 と碎石3号とほぼ同じ比較的大きな値を持つ。

第1表をもとにそれぞれの材料の締め固めの有無ごとに値を平均し(ϕ_i は $38\sim 50^\circ$ 、 ϕ_r は $30\sim 38^\circ$ 程度の値をとる)、第5図を作成した。第5図aは、材料の中央粒径(d_{50})と ϕ_i 、 ϕ_r との関係を見たものである。この図から2つのことが読み取れる。1つは、同じ材料では、一、二の例外を除いて締め固めた方が、ゆる詰めより ϕ_i 、 ϕ_r 共に大きくなっていることである。2つ目は、粒径と ϕ_i 、 ϕ_r の間に明瞭な関係が認められることである。すなわち、



第4図 崩れの模式図



第5図 中央粒径およびかさ密度と ϕ_i , ϕ_r との関係

粒径が大きくなるほど ϕ_i , ϕ_r ともに大きくなっており、特に碎石のデータだけ見ると ϕ_i , ϕ_r ともにそれぞれ1本の直線で回帰できるように思われる。ただし粒径が大きくなるにしたがい、 ϕ_i の大きくなる程度に比較して、 ϕ_r の増加程度は小さいようである。その結果、粒径が大きいほど $\Delta\phi$ ($\phi_i - \phi_r$) の値が大きくなる。

第5図bは、これらのデータをかさ密度で整理したものである。碎石の場合、かさ密度が大きくなると ϕ_i が大きくなる傾向が認められる。ただし、砂の場合は、この傾向からかなりはずれている。一方 ϕ_r については、 $34^\circ \sim 39^\circ$ 程度の間にバラつき、かさ密度との明瞭な関係は認められないようである。砂のデータは碎石と比較して、同じかさ密度において ϕ_i , ϕ_r ともに 5° 程度小さくなっている。これには、粒子の形状（砂は球形度が高いと思われるが

未測定）が影響している可能性がある。

Ⅳ おわりに

本研究では、新たに tilting box を製作して斜面の崩れの限界角度 (ϕ_i) および崩壊後の角度 (ϕ_r) に関する実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 粒径の大きい碎石3号、碎石5号では、主要な崩れは個々の粒子の転動による。一方、それより細粒の碎石7号および砂の崩れは、個々の粒子の転動とその後の粒子数層分の厚さのすべりを伴う集合移動のプロセスとからなる。碎石6号では、崩れの両方のパターンがみられ、移行型と見なされる。
- 2) 粒径が大きくなるほど ϕ_i , ϕ_r ともに大きくなる傾向が認められた。また碎石に限ると、かさ密度が大きいほど ϕ_i が大きいという関係が得られた。

謝 辞

本研究は、昭和62年度の筑波大学学内プロジェクト研究（奨励研究）からの助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- 井口正男 (1981) : 安息角. 町田 貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤 正・梶根 勇・小野有五編著 : 『地形学辞典』古今書院, p. 16.
- 町田 貞・松本栄次・石井孝行 (1975) : 足尾荒廃地における崖錐の形成プロセス. 地理学評論, **48**, 768-783.
- Allen, J.R.L. (1969) : Maximum slope attainable by surfaces underlain by bulked equal spheroids with variable dimensional ordering. *Bulletin of Geological Society of America*, **80**, 1924-1930.
- Allen, J.R.L. (1970) : The avalanching of granular solids on dune and similar slopes. *Journal of Geology*, **78**, 326-351.
- Carrigy, M.A. (1970) : Experiments on the angles of repose of granular materials. *Sedimentology*, **14**, 147-158.
- Carson, M.A. (1977) : Angles of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes. *Earth Surface Processes*, **2**, 363-380.
- Statham, I. (1974) : The relationship of porosity and angle of repose to mixture proportions in assemblages of different sized materials. *Sedimentology*, **21**, 149-162.
- Van Burkalow, A. (1945) : Angle of repose and angle of sliding friction: an experimental study. *Bulletin of Geological Society of America*, **56**, 669-708.