

安息角の測定における斜面長の影響に関する 予察的実験

A Preliminary Experiments on the Influence of Slope Length on Angle of Repose

松倉 公憲*・恩田 裕一**・井石 博之***

Yukinori MATSUKURA, Yuichi ONDA and Hiroshi ISEKI

I はじめに

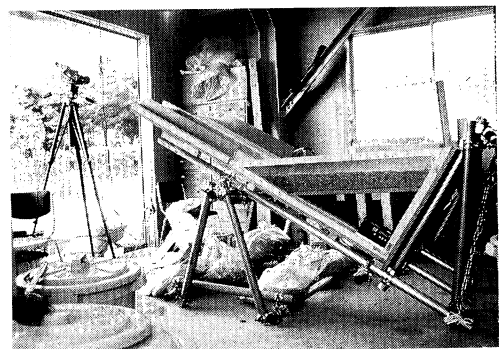
“安息角”は、地形学的に重要な概念であるにもかかわらず、その研究はあまり進んでいるとはいえない。著者らは、別稿（松倉・恩田、1989）において、その原因として、安息角そのものの定義が混乱していることや安息角の測定法自体にも種々の問題のあることなどに言及した。たとえば測定法に関する具体的な問題の1つとしては、“試料径に対する実験装置の大きさ”を指摘した。すなわち、実験試料が大きくなったとき、実験装置の大きさをどの程度大きくしなければならないかという問題である。砂や細粒のガラスビーズなどのような粒径の小さな試料の場合には、このことはあまり問題にならないが、試料径が大きくなると、この問題を避けて通れなくなるのである。なぜなら、たとえば傾斜箱の中に巨礫を数個～数10個投入して箱を傾けても、粒子が個別に転動するだけで、その試料のマス（集合体）としての安息角は計測できないからである。このことから、実験試料の径に対して、かなり大きな装置の必要ことが予想されるが、従来この問題を定量的に議論した研究はないようである。そこで、本研究では、比較的大型の傾斜箱（Tilting Box）を用い

た実験を行い、この問題について考えてみた。なお大型傾斜箱を用いた安息角実験は、昨年から始められており、その予備実験の結果の一部は恩田ほか（1988）で報告した。本稿はその続報である。

II 実験方法

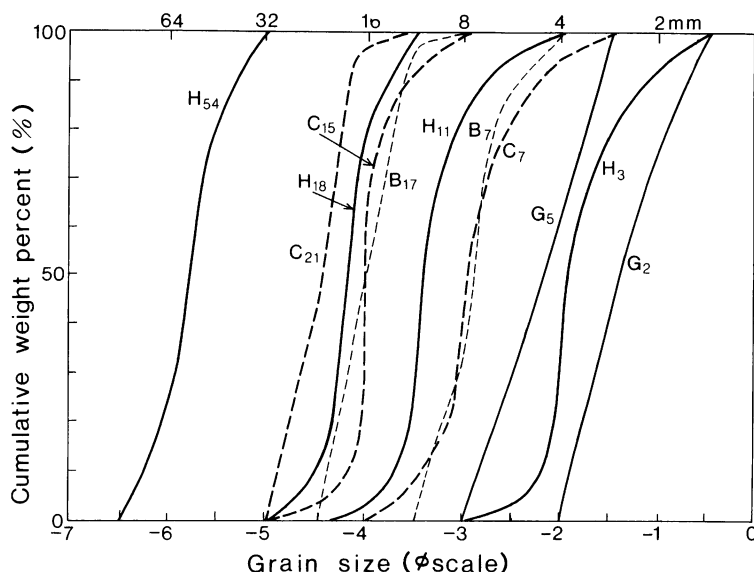
1) 実験装置および実験試料

実験に用いた傾斜箱（Tilting Box）は前報（恩田ほか、1988の第1図に示したもの）と同じものである。すなわち、実験試料を投入する部分は、長さ100cm、高さ62cm、幅80cmのプリズム型（三角柱の形状）の箱となっている（第1図参照）。当初は幅80cm



第1図 実験装置の概観

*筑波大学地球科学系 **筑波大学・院・地球科学研究科 ***筑波大学・自然学類（現：市立川口女子高等学校）



第2図 実験試料の粒径加積曲線

に一杯に試料を投入して実験を行っていたが、途中から箱の中央に仕切板を入れ、幅を半分の40cmにして実験を行った。箱の側面（三角形になった部分）はアクリル板となっており、試料の転動や崩れなどの挙動が観察できる。

実験に用いた試料は、ホルンフェルスの碎石（Hと略称する）、結晶片岩の碎石（C）、海浜礫（B）、ガラスビーズ（G）などである。それぞれ粒径の異なる試料を用意したので合計11種の試料となった。これらの試料の粒度組成を第2図に示した。どの試料も粒度は比較的揃っており、ふるい分け係数は0.8~0.9であった。本稿では試料の大きさ（粒径）と実験装置の大きさとの関係を議論することになるが、そのために、試料の大きさの代表値としてここでは中央粒径値をとることとする。そして、試料名を示すH、C、B、Gの記号と中央粒径値を添字として組み合わせることにより、11種の実験試料をH₅₄、H₁₈、H₁₁、H₃、C₂₁、C₁₅、C₇、B₁₇、B₇、G₅、G₂、と呼ぶことにする。この中のH₅₄、H₁₈、H₁₁、H₃、は前報における、碎石3号、5号、6号、7号にそれぞれ相当する。なおこのホルンフェルスの碎石（角礫）は、Krumbeinのチャートを用いた円磨度は0.2と判定される。同様に結晶片岩の碎石（偏平な

礫）は0.5、海浜礫（円礫）は0.8、ガラスビーズ（球形）は1.0となる。

2) 実験の手順

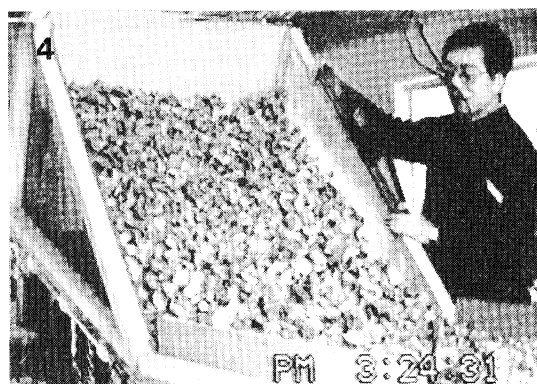
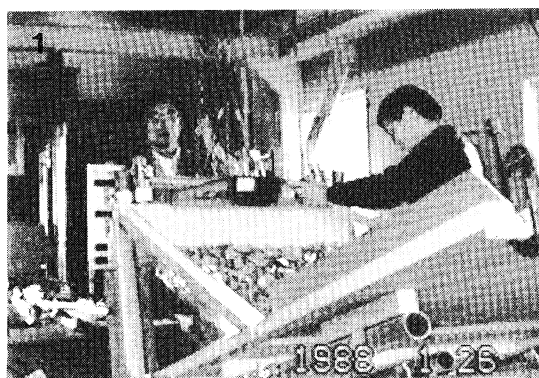
実験手順は前報とほとんど同じであるが、細部では少し異なっているので、それも含めてもう一度手順を整理して述べることにする（第3図参照）。

(1) まず箱の底部に、実験試料と同じものを一層分張付けた板を敷く。これは実験中に試料と底面との間ですべりが生じないようにするためである。同様の理由で、箱の前面の底部の崩壊した粒子群が流送する部分にも試料を張付けた板を置く。

(2) 試料を箱の中に静かに（できるだけゆるく詰まるように）投入する。試料Hの場合は80cm幅一杯に使ったため、約175~250kgの投入量となった。それ以外の試料では、箱の幅を40cmとし、しかも底上げも行ったので、投入試料の量は45~60kgほどであった。

(3) 試料投入後、試料の表面をできるだけ平らにならし、試料の体積を計測する。投入試料の重量と体積から、かさ密度が計算される。本実験における試料のかさ密度はいずれも、1.4~1.6g/cm³ほどであった。

(4) 箱の後部を毎秒0.1~0.2度程度のゆっくりした



第3図 実験手順

速度で引き上げる。引き上げによって徐々に変化する試料表面のつくる斜面角度をデジタル角度計で追跡する。崩れの徴候が見られたら（たとえば、いくつかの試料粒子がころころと転動し始めたら）、引き上げ速度を毎秒0.05度前後の低速にする。

(5) 斜面全体に崩れが発生した瞬間に引き上げを素早く停止する。この時の角度（松倉・恩田, 1989, の定義した限界安息角, α_c , に相当する）を記録する。

(6) 崩れが停止したら、その停止後の斜面縦断形をポイントゲージを用いて計測する。この斜面縦断形は、斜面末端に舌状の盛り上がりをもつため一本の直線とはならない。そこで、斜面中央から上部にかけての比較的直線となる部分の勾配を計測した。

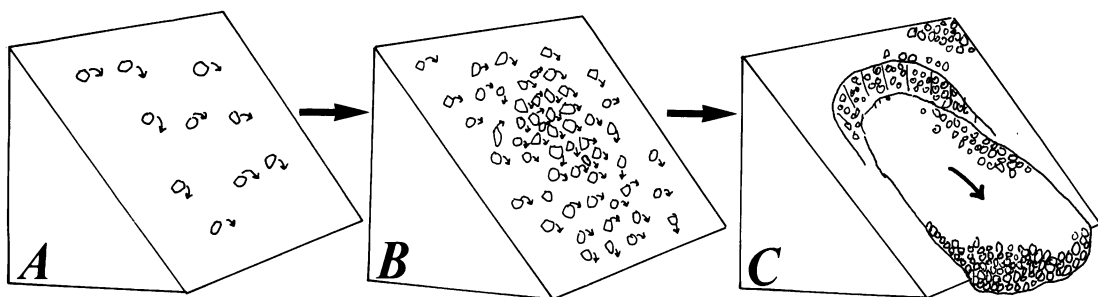
(7) なお、箱の引き上げ始めから、崩れが発生するまでの過程（上述の手順の4～5）を8mmビデオにより記録した。この映像を用いて、後述する崩れの

様式の判定や転動する粒子の移動速度の見積りを行った。

III 実験結果

箱の後部を引き上げるに従い、斜面の傾斜は徐々に増加する。これに伴い、斜面の表層では種々の試料粒子の移動現象が起ってくる。このような移動様式を、前報（恩田ほか, 1988）において第4図に示すようなA, B, Cのタイプに分類した。H（ホルンフェルスの碎石）の試料の実験結果については、すでに前報で報告したので、ここでは他の試料を用いた二、三の実験結果を述べることにする。

ガラスビーズ (G_s) を用いては合計8回の実験を行った。その中の1つの代表的な実験をとりあげる。この実験では最終的に $\alpha_c = 30^\circ$ （8回の平均は $\alpha_c = 27.4^\circ$ ）と $\alpha_R = 21.4^\circ$ （同 21.7° ）という結果が得られているが、この測定の過程において、以下の観察がな



第4図 粒子移動・崩れのタイプを示す概念図

された。斜面の勾配が約 20° を過ぎる頃から、試料粒子の2, 3個が斜面をころがり落ち始めた。転動は、いわゆるsaltation形式のものが多く、その軌跡は斜面下方へほぼ直線的である(第4図のAタイプに相当する)。8mmビデオを用いた解析によれば、このような転動粒子の動き始めから停止までの平均的な移動速度はおよそ $0.2 \sim 0.3 \text{ m/sec}$ と見積られた。

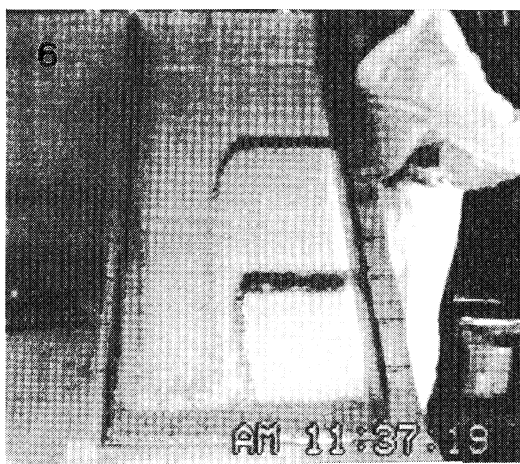
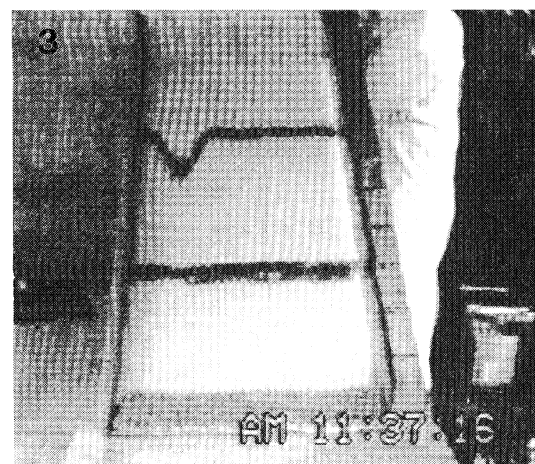
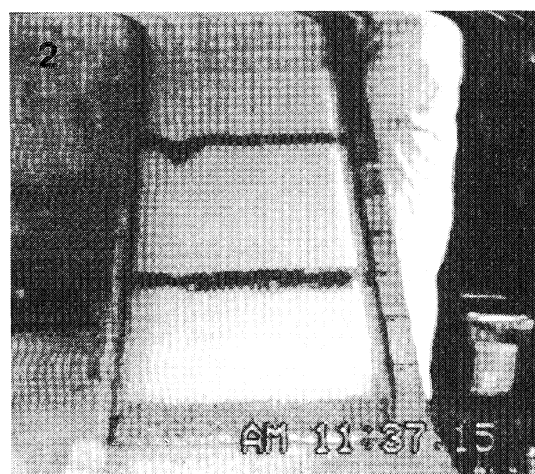
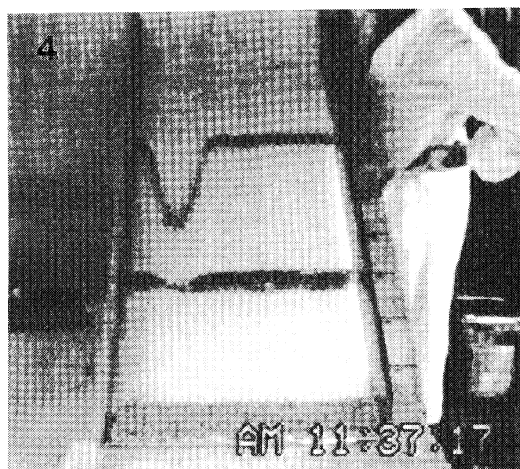
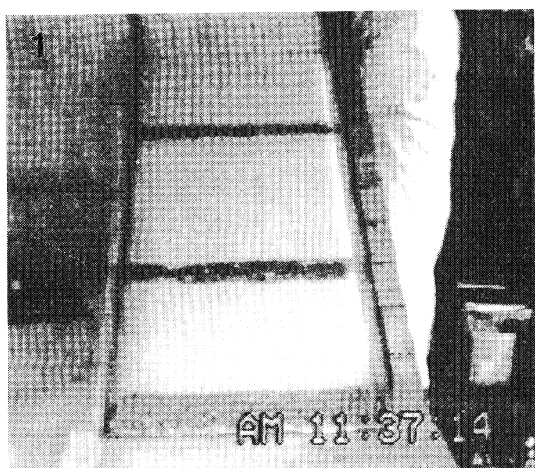
粒子転動がみられたら、箱の引き上げ速度を低下させながらさらに増傾斜を続ける。斜面勾配が 28° から 30° 近くになると、粒子の転動は、斜面の各所で発生するようになり、転動する粒子同志の衝突なども起ってくる(第4図のBタイプに相当する)。そのため粒子の移動速度はAタイプよりやや遅くなるように思われる。そして 30° でついに斜面中央部から崩れ(avalanche)が始まった。これが第4図のCタイプに相当する。そしてこの図のように、崩れの初期には、崩れの頭部に地すべりの滑落崖に相当するものが形成される。この小崖は斜面上部および左右へと比較的速い速度で拡大する。最終的には、崩れが開始してから数秒後には斜面全体にまで崩れが波及することになる。崩れは斜面前面に押し出し、ロープ状の地形をつくって停止する。このCタイプの崩れの速度は、崩れの初期や末期では約 0.1 m/sec 、最も速い崩れの間中期で約 0.2 m/sec と見積られた。

マスとして崩れるCタイプの一連の過程を G_2 の試料を用いた実験で追ったのが第5図である。この実験は斜面上部から25cmおよび65cmの所をそれぞれ青と赤のマーキングをしたものである。第5図の各図の右下の数字は時間を示している。(1)は11時37分

14秒で、この時点ではBタイプの粒子の個別転動が起っている。(2)の37分15秒でCタイプの崩れが上のラインの向って左側の付近から発生した。この時点で箱の引き上げを停止、 α_c を読み 25.2° という値が得られている。崩れは下方に流下するとともに上方や左右へも拡大する。崩れの発生から2秒後(4)には崩れの先端は下の線まで到達し、徐々に速度が速くなっていく。3秒後(5)には崩壊の頭部は斜面上端まで拡大している。崩れの速度は最大でも約 0.2 m/sec と見積られた。そして4秒後(6)には向って左半部の大部分が崩れ、斜面下部にロープ状に堆積している。このあと崩れは右半部に徐々に拡大し、約10秒後には崩れは斜面全体にまで拡大した。崩れが停止した後の斜面勾配(α_R)は 21.3° 、崩れの厚さ(斜面に直交する方向の厚さ)はおよそ $7 \sim 8 \text{ mm}$ と見積られた。

以上のようなガラスビーズの実験観察より、A, Bの両タイプは粒子の転動による各個移動プロセスとみなされ、Cタイプは崩れによる集合移動プロセスとみることができる。

このようにガラスビーズの実験においては、いずれの実験においても増傾斜とともにAタイプの発生からBタイプCタイプの発生への一連のプロセスが観察された。同様に、 C_7 , B_7 , H_3 などの細粒な試料を用いた実験においては、このA—B—Cタイプという一連のプロセスがみられた。ところが、試料が粗粒になると、必ずしも最終ステージであるCタイプが出現するとは限らなかった。特に粒径の大きい H_{54} , H_{18} , C_{21} の試料を用いた実験ではA, Bタイプだけが観察され、Cタイプは発生しなかった¹⁾。



第5図 試料G₂の崩れ (avalanche) の連続写真 (8 mmビデオで撮影した画像をもとに、ビデオプリンタで処理したものである)

第1表 実験結果のまとめ

試料	実験装置の幅 (mm)	深さ (mm)	長さ(斜面長, L) (mm)	崩れのタイプ	斜面長/粒径
B ₁₇	400	111	1,020	A-B, A-B-C	60
B ₇	400	111	1,020	A-B-A	145
C ₂₁	400	97	900	A-B	47
C ₁₅	400	97	990	A-B, A-B-C	66
C ₇	400	97	990	A-B-C	141
H ₅₄	800	333	750	A-B	14
H ₁₈	800	333	750	A-B	42
H ₁₁	800	333	750	A-B, A-B-C	68
H ₃	800	333	750	A-B-C	250
G ₅	400	85	890	A-B-C	178
G ₂	400	85	890	A-B-C	445

平均粒径が10～20mm位の試料 (B₁₇, C₁₅, H₁₁) においては, 実験によって集合移動のCタイプが発生するものとしなないものがあった. Cタイプのみられた回数は, B₁₇では5回の実験のうち2回, C₁₅では4回の実験のうち1回, H₁₁では4回の実験のうち3回であった.

以上のような粒子移動のタイプ分けをまとめたのが第1表である. 粒径の粗いH₅₄, H₁₈, C₂₁の試料ではA-Bタイプの各個移動のみが, 粒径の細かいB₇, C₇, H₃, G₅, G₂などではA-Bタイプから集団移動のCタイプまでの一連のプロセスが起っている. 中間的な粒径では実験によってA-Bタイプが起ったりA-B-Cタイプが起ることもあった.

IV 考 察

Carson (1977) は長さ77cm高さ47cm幅は7～43cmで可変のtilting boxを用いた安息角実験を行った. 彼によれば, 粒径6～13mmの礫(石灰岩)を用いた実験では大きいavalancheが発生し, 13～19mmの礫では各個転動と小さいavalancheしか起らなかったという. 大きいavalancheは本稿のCタイプに相当し, 各個転動や小さいavalancheはそれぞれA, Bタイプに相当すると思われる. このように彼の実験でも粒径が小さい場合にはCタイプが発生し, 粒径が大きくなるとA, Bタイプしか起らないことが示さ

れている. しかし, 彼は小さいavalanche(Bタイプ)が起ったあとの斜面角をも安息角として認めており, 崩れのタイプが安息角に与える影響については議論していない.

以上のようにCタイプの崩れが発生するかどうかは, 試料径と実験装置の大きさとの関係によることが明らかとなった. そこで, この問題をより詳細に検討してみよう.

実験装置の大きさといっても, 長さ(斜面長), 高さ(試料の深さ), 幅とがある. これらのうちのどれが崩れのタイプに影響を与えているかを吟味してみよう.

まず幅の影響であるが, 幅が狭いと側壁面の摩擦が影響を与えることが予想される. しかし上述のCarson (1977) の6～13mmの礫を用いた実験によれば, 箱の幅/粒径比を変えても(比は23.9, 11.3, 6.3, 3.9と変えている)同一の安息角が得られ, 側壁の摩擦は安息角に影響を与えないという. 本実験装置の幅は40cmないし80cmあり, 試料の大きさとの比はいずれも10以上あり, 側壁の影響はないと考えられる. すなわちCタイプの発生・非発生に実験装置の幅の影響はないと考えられる.

次に試料の深さ(厚さ)の影響をみてみよう. 第1表にも示したように試料の厚さは実験試料によって8.53～33.3cmと種々の値をとっている. ところで

Cタイプの崩れの厚さは最大でも B_{17} の例で2.9cmほどであった(ただしHの試料ではこの値は測定していない)。この値は試料厚さに比較して充分小さく、試料厚さが崩れのタイプに影響を与えることは考えにくい。

斜面長の影響をみるために、以下のような整理を行った。斜面長(L)と平均粒径(d_m)の比をとってみた(第1表末尾参照)。この結果をみると、Cタイプが発生するのは、いずれも L/d_m が100以上の場合であり、逆に発生しないのは L/d_m が50以下であることが判る。また数回の実験中にCタイプが発生したりしなかったりする B_{17} , C_{15} , H_{11} の L/d_m の値はそれぞれ60, 66, 68と極めて類似していることがわかった。このことは、Cタイプの発生・非発生の問題が L/d_m に影響されていることを示している。換言すれば、平均粒径の60~70倍以上の長い斜面長をもつような実験においては、Cタイプの崩れが発生し、斜面長が粒径の60~70倍以下の短い斜面の場合にはCタイプは発生しないということになる。

このように、斜面長がある程度長くならないとavalancheが発生しないことは石井による砂のパイル実験(Ishii, 1978; 石井, 1981)においても確かめられている。彼は、傾けた斜面上の上方のある一点に砂を落下させパイルを形成させた。この砂のパイルは徐々に斜面長および高さを成長させていくことになるが、斜面長がある長さまで成長するとavalancheが起るという。そしてavalancheが発生する直前の、安定を保ちうる最大斜面長(L)と砂の平均粒径(d)との間には $L=kd^a$ という関係式が成立するという。この式は、粒径の k 倍の斜面長になった時に不安定となり、avalanche(乾燥岩屑流)が発生することを示す。べき数 a のもつ意味はよくわからないが、 k の値は約78~90とされており、本稿の値(60~70)に比較的近いことは興味深い。

avalancheという集合移動(Cタイプ)が発生するためには、平均粒径の60~70倍以上の斜面長が必要となるということは以下の点で重要となる。松倉・恩田(1989)は、2つの安息角を定義し、その中の停止安息角(repose angle after avalanche, α_R)はavalancheという集合移動が起って、それが停止

した斜面の勾配とした。このことは、 α_R の計測にはavalanche(Cタイプ)の発生が不可欠であることを示している。従って、上述の議論から以下の結論が導かれる。すなわち、安息角の実験においては、斜面長を粒径の少なくとも60~70倍以上の長さに設定しなければならない。

このような視点から、従来の安息角の実験を見直すと、斜面長が充分でないものがあることに気がつく。前述のCarson(1977)の実験のうち、粗い方の13~19mmの実験ではCタイプが発生していないので、正しい安息角の測定がされていないと理解できる。彼の論文中には斜面長のデータが書かれていないが、論文中のFigure 3から推定すると約55cmほどと見積られる。 d_m を16mmと仮定すると L/d_m 比は34となり、明らかに斜面長が短いことがわかる。また、Statham(1974)は直径25cmの回転ドラムを用いて安息角の実験を行っている。その中で粒径の異なる10種類のガラスビーズの安息角を計測しているが、特に0.6cm, 1.1cm, 1.7cmの粒径の測定値が他の試料のそれと比較して大きすぎるように思われる。これらの斜面長/粒径比はそれぞれ41.7, 22.7, 14.7となり斜面長が短いために、正しい安息角が測定されていないことを示唆しているのではないだろうか。

V おわりに

以上のように安息角の計測をする場合には、実験試料の粒径のおよそ60~70倍以上の斜面長を必要とすることが判った。しかし本研究は、比較的粒度の揃った数種の試料を用いた限られた範囲の実験結果をもとにしたものである。今後、実験例を増やしていくことにより、斜面長/粒径比の厳密な議論を行う予定である。また、avalancheの発生・非発生に斜面長が影響するメカニズムについては現在のところ不明である。この問題についても、アルミ丸棒を用いた二次元実験などを通して考えていく予定である。

謝 辞

実験は、水理実験センター内にある、大型一面せん断試験機を設置してある建屋内において行われたものである。実験装置の作製などで同センターの皆

様から種々の便宜を計って頂いた。また伊勢屋ふじこ助手からは、鹿島産の海浜礫の入手にあたって御助力を頂いた。記して謝意を表します。

注

- 1) 従って前報で H_{54} , H_{18} の ϕ_i (本稿の α_c に相当)の値はBタイプが起った時の値ということになり、安息角を計測したことはない。

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.
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, 筑波大学水理実験センター報告, 12, 49—55.

- 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, 筑波大学水理実験センター報告, 13, 27—35.

- Carson, M.A. (1977): Angles of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes. *Earth Surface Processes*, 2, 363—380.

- Ishii, T. (1978): Influence of the grain size of rock fragment and the slope length on the development of talus slope. *Geogr. Rep. Osaka Kyoiku Univ.*, 17, 35—46.

- Statham, I. (1974): The relationship of porosity and angle of repose to mixture proportions in assemblages of different sized materials. *Sedimentology*, 21, 149—162.