

# 一面せん断試験における試料径とせん断箱の径 との関係に関する予察的研究

## Preliminary Study Using the Large-Sized Direct Shear Apparatus on Relation between Debris-Size and Dimension of Shearing Box

松倉公憲\*・奥山武彦\*\*・恩田裕一\*\*\*

Yukinori MATSUKURA, Takehiko OKUYAMA and Yuichi ONDA

### I はじめに

従来、粗粒な岩屑（特に4 mm以上の礫）のせん断特性については土質工学の分野で研究が蓄積されてきた。フィルダムのロック材あるいは盛土材料としての粗粒材の強度が問題となるからである。近年、土質工学会を中心にこれらの研究成果をまとめた成書が刊行されたり（ロックフィルム材料の試験と設計強度編集委員会，1982；粗粒材料の変形と強度編集委員会，1987）、シンポジウムが開催されたりしており（粗粒材料の試験に関する研究委員会，1987）、粗粒材料のせん断に関する研究の進展がみられるようである。しかし一般には、このような粗粒材の強度試験は、大型の試験機を用いなければならないことからデータの蓄積が容易ではない。そのため、粗粒材のせん断特性を含めた力学的挙動に関しては、基本的な試験方法の問題も含めてまだまだ不明な点が多い。

試験方法に関して言えば、たとえば一面せん断試験においては、せん断箱（あるいは供試体）の大きさと試験材料の径の関係が問題となることがある。一般に試験材料の粒径に対して供試体の径が相対的

に小さくなると、大きなせん断強度をとることが知られている。そこで土質試験法（土質工学会，1979，p.454）では「礫を含むような場合は、供試体の厚さは最大粒径の5倍以上、かつ平均粒径の20倍以上とるのが必要であろう」としている。しかし、この5倍以上、20倍以上という数字は厳密なものではなく一応の目安にすぎない。それ以外にもこの問題に関していくつかの研究があるが、いまだ共通の理解が得られてはいないようである。その原因の1つは、従来の多くの研究が供試体の大きさを変えず、相似粒径分布をもつ粒径の異なる材料で試験していることと関連するであろう。すなわちこのような実験では相似粒径分布をもつ材料は同じせん断強度（すなわちせん断抵抗角）をもつという前提に立っている。しかしこの点に関して、(1) この考えが正しいとする研究、(2) 粒径が大きくなるとせん断抵抗角が小さくなるとする研究、(3) 逆に、粒径が大きくなるとせん断抵抗角が小さくなるとする研究などがあり必ずしも明確でない（たとえば宇梶，1979，p.99）。このように相似粒径分布をもつ粒径の異なる材料が同一のせん断特性をもつかどうか明らかでない現状では、従来の多くの研究では厳密

\*筑波大学地球科学系 \*\*受託研究員（現・農業土木試験場農地整備部） \*\*\*筑波大学・院・地球科学研究科

な議論はできないことになる。これに対し同一の実験材料を用いて供試体の径を変える試験においては、以下で議論するような正しいせん断強度が測定できる供試体径の範囲内では、同一のせん断強度が得られるはずである。

以上のように、従来の研究においては試験材料が決まった（すなわち試料の粒径がわかった）時に、一体どの位の大きさのせん断箱を用いて試験をすればよいかという明確な基準は確立されていないようである。そこで本研究はこの点を明らかにすることを目的として始められた。勿論本研究では、同一の試験材料を用い、供試体の大きさを変えて試験を行うという方法でこの問題にアプローチする。

## II 試験材料および試験方法

### 1) 試験材料

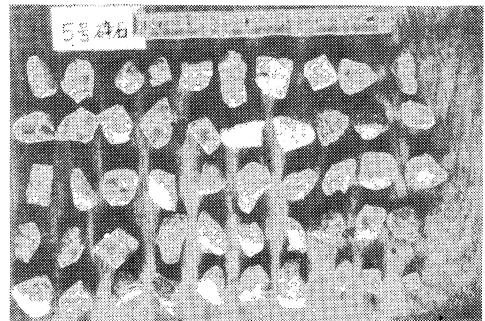
試験には次の2種類の材料を使用した。

試料A：茨城県新治郡新治村柳沢産の砂岩（一部ホルンフェルス化したアルコーズ質砂岩）を母岩とし、塚田陶管株式会社が建設用碎石（碎石5号と呼ばれている）として生産・販売しているものである。第1図でも明らかなように、この試料の粒子は角ばっているものが多い。また粒径加積曲線（第2図）に示されているように、大部分の粒子の中径は20 mm - 10 mm 程度であり、比較的淘汰が良い。

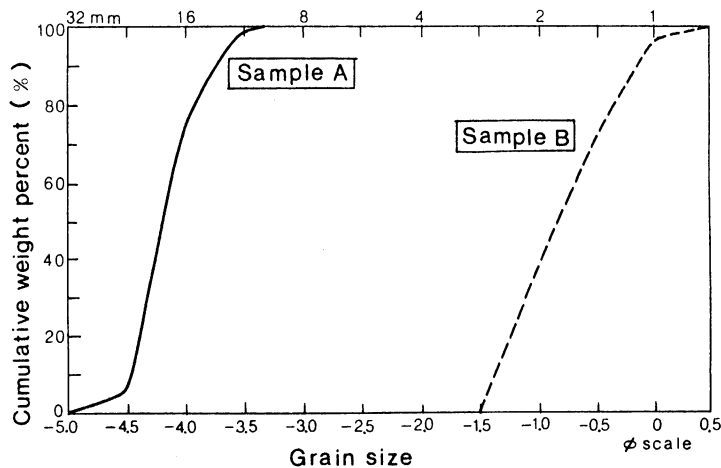
試料B：茨城県高萩産の海浜砂で、日本原料株式会社が販売している粒度調整をした「ろ過砂」である。その粒度は2.8 mm - 1.0 mm 程度（第2図参照）であり、この砂も比較的淘汰が良い。

### 2) 試験方法および試験条件

試験に使用した一面せん断試験機は、大きさの異なる5つのせん断箱を有している。この試験機の概要および性能については別稿（松倉，1988）に詳述している。試料Aについては、直径96 cm，48 cm，24 cmのせん断箱を用いた試験を行った。また試料Bの場合は、直径96 cm，48 cm，24 cm，12 cm，6 cmのすべてのせん断箱を用いた。供試体の高さを直径の1/3とし、供試体の形状が相似になるようにした。すなわち、直径96 cmの場合供試体の高さは32 cm，48 cmの場合は16 cm，24 cmの場合は8 cm，



第1図 試料Aの形状を示す写真



第2図 試料A、Bの粒径加積曲線

12 cm の場合は 4 cm, 6 cm の場合に 2 cm とした。

砂礫のせん断強度は、同一試料であっても試料のつまり方（かさ密度）、含水比、せん断速度などの違いによって異なってくることはよく知られている。そこで試験条件を以下のように統一して設定した。

- i) 試料は風乾状態で含水比はほぼ 0% に近い。
- ii) 供試体は比較的ゆる詰め状態の同一のかさ密度とする（第 3 図のようにせん断箱の上から試料を流し込んで供試体を作成したが、そのかさ密度は試料 A, B ともにほぼ  $1.5 \text{ g/cm}^3$  となった）。
- iii) せん断速度は、供試体寸法の 0.4–0.8%/min 程度を目安に以下のようにした。直径 96 cm のせん断箱の試験の場合 3.8 mm/min, 48 cm で 2.0 mm/min, 24 cm で 1.9 mm/min, 12 cm で 1.0 mm/min, 6 cm で 0.5 mm/min である。

なお、試験時には上下のせん断箱の間に 0.5–1.0 mm ほどの隙間を開け、せん断箱間の摩擦を除去してある。垂直応力が大きくなると試料が粒子破碎し、せん断強度に影響を与えることが予備実験によってわかったので、垂直応力としては最大  $8 \text{ kgf/cm}^2$  までの比較的小さい範囲で試験を行った。

### Ⅲ 試験結果および考察

試験結果の一例として、試料 B を径が 12 cm のせ

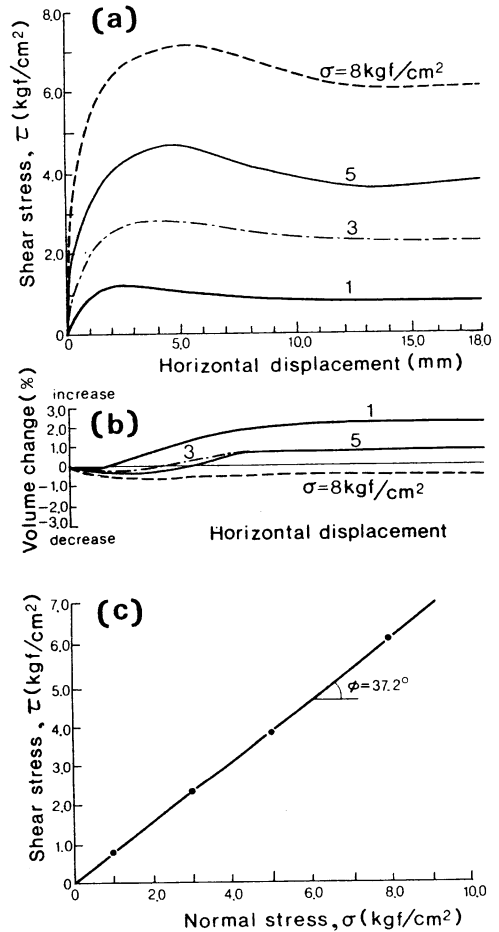


第 3 図 供試体作成時の様子

ん断箱を用いて試験した場合の結果を第 4 図に示した。前述したように、風乾の試料を用い、ゆる詰め

の供試体をつくり、垂直応力が 1, 3, 5,  $8 \text{ kgf/cm}^2$  のもとで  $1.0 \text{ mm/min}$  のせん断の速度で最大  $18 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}$  の水平変位を与えた。

水平変位（horizontal displacement）とせん断力（ $\tau$ , shear stress）との関係（第 4 図 a）から以下のことが読みとれる。いずれの垂直応力のもとでも、水平変位が 2–5 mm のところでせん断のピーク強度をとるが、変位が大きくなると強度は徐々に低下し最終的に一定値となる。垂直変位をもとに計算される体積変化（volume change）と水平変位の関係



第 4 図 試料 B を径が 12 cm のせん断箱を用いて試験した場合の試験結果。

第1表 試験によって得られた試料A, Bの粘着力およびせん断抵抗角.

せん断箱の直径 D (cm)	試料 A		試料 B	
	粘着力 c (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断抵抗角 $\phi$ (°)	粘着力 c (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断抵抗角 $\phi$ (°)
6	—	—	0	41.2
12	—	—	0	37.2
24	1.0	58.0	0	36.7
48	0.7	45.8	0	37.2
96	0	45.8	0	36.9

(第4図b)をみると, せん断の初期で収縮 (decrease) 傾向を示すが, せん断が進むと膨張傾向に転じ, 水平変位が9 mm 以上では膨張も収縮もしない状態となっている. この状態はダイラタンシールイトがゼロの状態, いわゆる限界間隙比状態に相当する. 垂直応力 ( $\sigma$ , normal stress) と水平変位が10~12 mm 以上 (すなわち限界間隙比状態) でのせん断応力との関係を示したのが第4図cである. この図から, せん断応力は垂直応力に依存する成分, すなわちせん断抵抗角 ( $\phi$ ) のみから成り, それは37.2°であることが読みとれる.

同様にしてすべての試験結果を整理し, 限界間隙比相当のせん断強度定数を求めると第1表のようになる. 試料Aの径24 cm, 48 cmのせん断箱を用いた試験においては, 粘着力成分としてそれぞれ1.0 kgf/cm<sup>2</sup>, 0.7 kgf/cm<sup>2</sup>が得られた. しかしその他の試験において, すべて粘着力成分はゼロとなった.

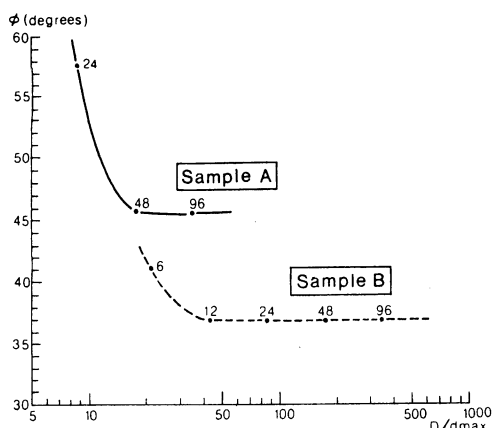
試料Aのせん断抵抗角をみると, 径48 cmと96 cmのせん断箱を使用して得られた値はいずれも45.8°であり, 24 cmのせん断箱の結果は58.0°とそれよりかなり大きな値となっている. 一方, 試料Bのせん断抵抗角を比較すると, 径12 cm以上のせん断箱を使用した結果はいずれも36.7°~37.2° (平均37.0°) という極めて近似した値をとる. 平均値からの $\pm 0.2^\circ \sim 0.3^\circ$ の小さな差は測定誤差の範囲と考えられることから, これらのせん断抵抗角の値はほぼ等しいものと考えてよいであろう. しかし, 径6 cmのせん断箱での試験結果は41.2°となり,

径12 cm以上で得られた値より4°も大きくなっている.

以上の結果から, 大きいせん断箱を用いて得られた値, すなわち試料Aの場合は径が48 cm以上のせん断箱で得られた45.8°が, 試料Bの場合は径が12 cm以上のせん断箱で得られた約37.0°が, それぞれの試料の真のせん断抵抗角とみなしてよいであろう. これに対し, 試料Aの径24 cmのせん断箱でのせん断抵抗角58°と試料Bの径6 cmのせん断箱で得られた41.2°という値は, それらの真の値より大き過ぎることになる.

同じ材料に対し, せん断箱の径が小さくなると過大なせん断抵抗角すなわち過大なせん断強度が測定される原因は次のように考えられる. 試料径に対してせん断箱の径がかなり大きい場合のせん断状態では, 粒子の再配列や体積膨張・収縮が自由になる. しかし, 試料径に対してせん断箱の径が相対的に小さくなると, 試料に与えるせん断箱の拘束の影響が大きくなり, そのためせん断に伴う粒子の再配列や体積膨張・収縮が起りにくくなっていく. 特に数ヶあるいは数10ヶの粒子によってせん断箱が一杯詰まった状態を考えれば, せん断による粒子再配列や体積膨張・収縮が起りにくいことは容易に想像される. このような状態では真の値より過大なせん断強度が測定されることになるであろう.

上記の試験結果をもとに, 本研究の目的であるせん断箱の大きさと試料径との関係を検討するために第5図を作成した. 横軸のD/d<sub>max</sub>はせん断箱の直



第 5 図 セン断箱の径と試料最大径との比 ( $D/d_{max}$ ) とせん断抵抗角 ( $\phi$ ) との関係。図中のプロットの脇の数字はせん断箱の直径を示す。

径 ( $D$ ) と試料の中径の最大値 ( $d_{max}$ ) との比である。  $d_{max}$  の値はここでは便宜的に次のようにして求めた。試料 A の  $d_{max} = 27.4$  mm は、任意に抽出した 50 個の試料について計測された中径の、大きい方から 5 番目までのデータの平均をとったものである。また、試料 B の  $d_{max} = 2.8$  mm は粒度加積曲線上の 1% 粒径に相当する。

前述したように試料 A の  $\phi = 45.8^\circ$ 、試料 B の  $\phi = 37^\circ$  がそれぞれの真のせん断抵抗角と認めると、第 5 図からも試料 A の径 24 cm のせん断箱を用いた試験で得られた  $58^\circ$ 、試料 B の径 6 cm のせん断箱を用いた試験で得られた  $41.2^\circ$  はそれらよりも過大であることが再確認される。この図から試料 A では  $D/d_{max}$  が 15~20 以上あれば真のせん断抵抗角が測定され、試料 B では  $D/d_{max}$  が 30~40 以上必要であることが読みとれる。

従来の研究においても  $D/d_{max}$  の値を議論しているものがいくつかある。Lewis (1956) は 30~40、三笠ほか (1975) あるいは石堂ほか (1979) は 15~20、Chandler (1973) は 10~12、を主張している。本研究で得られた 15~20 あるいは 30~40 という値は従来の研究結果とオーダーとしてはほぼ同様の値を示していることになる。しかし、それぞれの研究で用いられた試験機の構造が多少異なること (せん

断箱が丸型のものと同型のものがある)、供試体の径と厚さの比が異なること、試料の粒度組成が異なっていることなどから、現状では単純に  $D/d_{max}$  の数字だけを比較してこれ以上の議論を進めることはできないと思われる。

#### IV おわりに

直径 6 cm から 96 cm までの 5 種類の大きさのせん断箱をもつ一面せん断試験機を用いて、最大粒径 27.4 mm の碎石 (試料 A) と最大粒径 2.8 mm の砂 (試料 B) の限界間隙比に相当するせん断強度を測定した。その結果、試料 A では  $D/d_{max}$  が 15~20、試料 B では 30~40 以上で真のせん断強度が測定できることが判った。しかし、本研究ではわずかに 2 つの試料の結果しか得られておらず、さらにこの問題には、供試体の厚さの効果や試料の粒径分布の与える影響なども考慮されなければならないであろう。今後さらに試験例を増やしていく予定である。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、水理実験センターの皆様からご支援・御助力を頂いた。また自然学類学生の井石博之君にはせん断試験や粒度分析の仕事を手伝って頂いた。厚く御礼を申し上げます。

なお本研究は昭和 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。

#### 文 献

- 石堂 稔・関直三郎・前原慶三 (1979)：砕砂のせん断特性。第 14 回土質工学研究発表会発表講演集、341-344。
- 宇梶文雄 (1979)：『フィルダム技術ノート—材料の基本と実際—』日刊工業新聞社、256 p。
- 粗粒材料の試験に関する研究委員会 (1987)：『粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集』土質工学会、174 p。
- 粗粒材料の変形と強度編集委員会 (1987)：『粗粒材料の変形と強度』土質工学会、431 p。
- 土質工学会編 (1979)：『土質試験法』2 回改訂版。土質工学会、757 p。

松倉公憲 (1988) : 大型一面せん断試験機の作製とその目的. 筑波大学水理実験センター報告, **12**, 37-41.

三笠正人・高田直俊・西垣好彦 (1975) : Cと $\phi$ を考える. 5. レキおよびロック材. 土と基礎, **23-4**, 67-75.

ロックフィル材料の試験と設計強度編集委員会

(1982) : 『ロックフィル材料の試験と設計強度』土質工学会, 287 p.

Chandler, R.J. (1973) : The inclination of talus, arctic talus terraces, and other slopes composed of granular materials. *J. Geol.*, **81**, 1-14.

Lewis, J.G. (1956) : Shear strength of rockfill. *Proc. Australia and New Zealand Conf. on SMFE*, 50-52.