低応力領域における粉粒体の三軸圧縮試験

寺下 敬次郎*, 小村 修司*, 宮 南 啓*

Triaxial Compression Test of Powder in Low Stress Ranges

by

Keihiro TERASHITA[†], Syuji KOMURA[†] and Kei MIYANAMI[†]

A triaxial compression test of coarse and fine powder in low stress (lateral pressure) ranges was performed to characterize the shear fracture surfaces under varying lateral pressure (minimum stress, σ_3) and to determine the principal stress difference-strain curve and internal friction factors. The results obtained were compared with those of a direct shear test. (1) The shear fracture surface under triaxial compression appears in a more definite outline with an increase in σ_3 and decrease in particle size. (2) Regardless of the kind of powder, the shearing process diagrams in the triaxial compression test and direct shear test show similar patterns ($\sigma_1 - \sigma_3$ vs σ_3 and τ_x vs δ_x). (3) Compared with the internal friction factors in the direct shear test under applied normal stress, the internal friction factors obtained in the triaxial compression test showed larger values for coarse powders and lower values for fine powder. However, the internal friction factors in the direct shear test under mean actual normal stress were nearly equal the actual values of the triaxial compression test.

1. 緒 言

粉粒体プロセスの装置の設計ならびに粉粒体の流動性などを検討するために必要な剪断過程および内部摩擦係数の測定に関する研究は、粉体工学や化学工学の分野においては直接剪断試験法によるものが多い。直接一面剪断試験では剪断中に主応力の方向が逐次回転し、かつ、剪断セル内の粉粒体層の垂直応力分布が一様でないことが指摘されている^{8, 10)}。そこでわれわれは、剪断面近傍での垂直応力とその分布を測定し、平均の実測垂直応力対剪断応力関係より内部摩擦係数などを求めてきた^{8, 9)}。一方、三軸圧縮試験は軸対称の条件により主応力が求められ、しかもその方向が剪断中変化しないという特徴がある。土質工学においては土の剪断などに三軸圧縮試験が古くから行なわれているが^{1, 4, 11)}、粉粒体プロセスで取り扱うような低応力領域でしかも高空隙率における研究は少ないといえる⁶⁾。

さらに三軸圧縮試験と一面剪断試験の比較は、いまだ十分とはいえない。

本研究では、粗粉および微粉を対象として低応力(側圧)領域で三軸圧縮試験を行ない、側圧(最小主応力)の変化による剪断面の状態、主応力差-歪曲線および内部摩擦係数を求め考察するとともに、一面剪断試験の測定値と比較検討したので、それらの結果について報告する。

2. 実験装置、実験方法および粉粒体試料

実験に用いた三軸圧縮試験機の概略を Fig.1 に示した。三軸セル①の圧力室の外筒は内径 0.177 m、高さ 0.33 m のアクリル樹脂製垂直円筒である。供試体④に加える側圧(最小主応力 σ_3)には操作上の容易さなどから空気を採用し、 $19.6 < \sigma_3 < 98.0$ kPa で実験を行なった。

三軸圧縮試験は、まず、薄いゴム膜③を装着した二分割のガイドリングを下部加圧板に固定した後、粉粒体試料を層状に数回に分けて装入し、そのつど、円板状の重り(0.086 Kg)で層表面を水平にする程度に軽く押えながら所定の粉粒体層高まで試料を充てんした。供試体④の大きさは直径 0.05 m、高さ 0.12 m になるように作成した。つぎに供試体を大気圧よりも 2.666 ×

昭和59年6月29日受付

*大阪府立大学工学部化学工学科(〒591 大阪府堺市百舌鳥梅町4丁804)

TEL 0722-52-1161 内線 2327

[†]Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka 591 JAPAN

Fig. 1 Triaxial compression tester.

10^3 Pa 低くして自立させた後、ガイドリングを取り、空隙率を求めるために供試体の寸法を測定してから三軸セル内に空気を流入した。さらに所定の側圧で等方応力を 600 秒程度作用させた後、その側圧を維持しながら三軸セル上部より軸方向荷重(上下方向応力(最大主応力 σ_1))を一定速度($1.55 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)で加えて供試体を破壊させた。

軸方向荷重(最大主応力 σ_1)はプルーベリングリング⑥によって変位に変換し、その変位をダイヤルゲージ式変位変換器⑤で測定した。また軸歪 ϵ_a はダイヤルゲージ式変位変換器⑤により検出した。軸方向荷重と軸歪の関係は 2 ペンレコーダ上に連続記録した。

剪断応力と垂直変位(軸歪)が測定でき、同時に剪断面近傍の垂直応力とその分布を実測できるようにした定荷重一面剪断試験機および基本的な実験方法は前報^{7,8)}と同一であるので、ここでは説明を省略する。なお、載荷垂直応力 $\sigma_{s,v}$ は三軸圧縮試験の最小主応力 σ_3 と同じ範囲で変化させた。

実験に用いた粉粒体試料を Table 1 に示した。ここで豊浦砂とジルコンサンドを粗粉、アルミナを微粉とそれぞれ便宜的に呼ぶことにした。

Table 1. Properties of the powders tested

Properties Powder	Mean diameter $D_p (\mu\text{m})$	Density $\rho (\text{kg/m}^3)$	Bulk density $\rho_s (\text{kg/m}^3)$
Toyoura sand	200	2,730	1,610
Zircon sand	130	4,660	2,910
Alumina	1.5	3,980	780

Fig. 2 Shear fracture surface.

3. 結果

粗粉および微粉について最小主応力 σ_3 (側圧)を変化させて得られた剪断面の状態を Fig. 2 に示した。同図の結果は、後述するように、最大主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$

を示した以後に観察されたものである。Fig. 2 からわかるように、斜めの剪断面は粗粉および微粉とも最小

Fig. 3 Relationships between the principal stress and the axial strain.

主応力 σ_3 の増加に伴い明瞭になっている。すなわち、 σ_3 が大きくなるほど固体に近い剪断破壊を示すことがわかる。さらに σ_3 一定条件下において剪断面を明瞭に示すのは、アルミナ>ジルコンサンド>豊浦砂の順である。ここで粒径の大きさは豊浦砂>ジルコンサンド>アルミナである(Table 1 参照)。したがって、粒径が小さいほど剪断すべり破壊面は明瞭になるといえる。

Fig. 3 は主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と軸歪 δ_z の関係を調べた結果の一例を示したものである。高空隙率（疎充てん状態）における供試体の作成は困難であり、各最小主応力 σ_3 において初期空隙率 $\bar{\epsilon}_0$ にばらつきが見られたが、数回の実験よりできるだけ $\bar{\epsilon}_0$ の近いものを測定値として選んである。Fig. 3 からわかるように、主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は最小主応力 σ_3 が大きいほど急勾配で増大

* 軸方向荷重 W 対軸歪 δ_z の関係を測定し、供試体の補正断面積 S を用いて W/S を計算し $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を求めた。ここで S には、ある時点での供試体と等しい高さと体積を有する円柱の断面積を用いた。

Fig. 4 Relationships between the principal stress difference and the axial strain due to the kind of powder.

し、▽印を示した付近で最大値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ が得られている。さらに圧縮剪断を続けると、Fig. 2 に示したような斜めの剪断面が観察された。

Fig. 4 には粉粒体の種類によって $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 対 δ_z 関係がどのように変化するかを調べた結果の一例を示した。粗粉（ジルコンサンド、豊浦砂）の場合、 δ_z の小さいところで最大主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を示している。一方、微粉のアルミナでは、 δ_z の増加とともに $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が単調に増大し、 δ_z の大きいところで $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ に到達していることがわかる。

最大主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ と最小主応力 σ_3 からモールの応力円を描き、破壊包絡線を作図した一例がFig. 5 である。破壊包絡線は直線を示しているので、クーロンの法則

$$\tau = \mu_y \cdot \sigma + C \quad \dots\dots (1)$$

より内部摩擦係数 μ_y を求めることができる。得られた

Fig. 5 Curve of the yield locus.

Fig. 6 Shear fracture surface (direct shear test).

内部摩擦係数 μ_y を Table 2 に示した。

4. 考 察

Fig. 6 は一面剪断試験で最大剪断応力 $\tau_{x,max}$ を経て定常剪断応力(残留応力) $\tau_{x,s}$ を示したときに得られた剪断状態の断そう写真の一例を示したものである。粉粒体試料にはジルコンサンドとはほぼ同じ粒径のガラス粉を用いた。Fig. 6 からわかるように、剪断は広い領域で起っているが、剪断面は載荷垂直応力 $\sigma_{z,w}$ の大きい方が明らかといえる。また、すでに、載荷垂直応力が大きくなるほど剪断領域厚みが小さくなることを報

Fig. 7 Effect of applied normal stress on the shearing process diagram (direct shear test).

告している³⁾。したがって、三軸圧縮試験および一面剪断試験とも高応力($\sigma_3, \sigma_{z,w}$)状態になるほど粉粒体層の剪断破壊が明瞭になる。

Fig. 7 には一面剪断試験で載荷垂直応力 $\sigma_{z,w}$ を種々変化させて得られた剪断過程曲線(剪断応力 τ_x および垂直変位 δ_z と水平変位 δ_x の関係)を示した。ここで水平変位 10mm で歪量は 13.4% である。Fig. 7 から、載荷垂直応力 $\sigma_{z,w}$ が大きいほど剪断応力 τ_x が急勾配で増大し、かつ、剪断応力の最大値 $\tau_{x,max}$ を明瞭に示していることがわかる。このことは三軸圧縮試験の結果(Fig. 3 参照)と同じである。三軸圧縮試験においては、すでに述べたように、最大主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を示した後に剪断面が観察される。一面剪断試験においても最大剪断応力 $\tau_{x,max}$ を示した後に剪断面が形成されることが確かめられている⁵⁾。したがって、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ および $\tau_{x,max}$ を示す付近において粉粒体層に破壊が起り、その後に剪断破壊を明らかに示すといえる。

三軸圧縮試験の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 対 δ_x 関係に対応する一面剪断試験結果を Fig. 8 に示した。粗粉(ジルコンサンド、豊浦砂)では水平変位 δ_x の小さいところで $\tau_{x,max}$ を示している。一方、微粉のアルミナにおいては、 δ_x の大きいところで $\tau_{x,max}$ ($= \tau_{x,s}$) が得られている。こ

Fig. 8 Shearing process diagram for the kind of powder.

Fig. 9 Relationships between $(\sigma_1 + \sigma_3)_{\max}/2$ and $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/2$.

の関係は Fig. 4 に示す三軸圧縮試験結果と同じ傾向にあることがわかる。また、Fig. 8 からわかるように、微粉の場合では剪断により垂直変位 δ_s が負の値を示し粉体層が圧密(体積減少)されている。粗粉においては剪断によって粉粒体層が膨張(体積増加)している($\delta_s \geq 4$ mm)。さらに体積増加は載荷垂直応 $\sigma_{s,w}$ が小さいほど大きいことがわかる(Fig. 7)。なお、微粉では $\sigma_{s,w}$ が小さいほど体積変化が逆に小さいことがわっている⁷⁾。本報告の三軸圧縮試験では剪断による粉粒体層(供試体)の体積変化を測定していないが、粉粒体の種類および最小主応力が変化しても、一面剪断試験結果と同様な傾向を示すはずである。

Fig. 5 に示すような破壊包絡線の接線の勾配より内部摩擦係数 μ_y を求める場合、個人差が生じることがある。この影響をなくするには、Fig. 9 に示すように $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/2$ 対 $(\sigma_1 + \sigma_3)_{\max}/2$ 関係で表わし、最小自乗法でこれらの点を通る直線を求めれば内部摩擦係数 μ_l および剪断付着力(粘着力) C が得られる¹⁴⁾。

$$\mu_l = \tan \phi = \tan \{ \sin^{-1}(\tan \beta) \},$$

$$C = \alpha / \cos \phi \quad \dots\dots (2)$$

得られた内部摩擦係数 μ_l を Table 2 に示した。同表には一面剪断試験で得られた内部摩擦係数も併せて示してある。一面剪断試験での $\mu_{w, \max}$ は載荷垂直応力、 $\mu_{m, \max}$ は平均の実測垂直応力にそれぞれ基づく内部摩擦係数である^{8,9)}。Table 2 からわかるように、三軸圧縮試験の内部摩擦係数(μ_y, μ_l)は一面剪断試験の $\mu_{w, \max}$ に比べて、粗粉では小さく、微粉では大きい。こ

Table 2. Internal friction factors in the triaxial compression test and direct shear test.

Powder	Triaxial compression test		Direct shear test	
	$\mu_y (-)$	$\mu_l (-)$	$\mu_{w, \max} (-)$	$\mu_{m, \max} (-)$
Toyoura sand	0.81	0.75	0.91	0.84
Zircon sand	0.75	0.76	0.85	0.81
Alumina	0.69	0.71	0.41	0.65

の大小関係は既往の結果と一致しているといえる^{2,4,11)}。三軸圧縮試験と一面剪断試験の内部摩擦係数が一致しないのは、1) 載荷方法や変形の制御方法が異なる、2) 粒子間の相互すべりあるいは粉粒体層の膨張・収縮に伴う内部的エネルギーの消散度合の相違、3) 一面剪断試験では載荷垂直応力と剪断面での垂直応力が等しくない、などであるといわれている^{1,4,11)}。どちらかという、一面剪断試験に問題があるという考えである。2) および 3) の問題に関しては、一面剪断試験の場合 $\mu_{m, \max}$ で評価できると考えられる。Table 2 から、 $\mu_{m, \max}$ は $\mu_{w, \max}$ に比べて三軸圧縮試験の内部摩擦係数に近い値を示していることがわかる。

5. 結 言

三軸圧縮応力下における剪断破壊面は最小主応力(側圧)が大きく、かつ、粒径が小さいほど明瞭になることがわかった。この剪断すべり破壊は最大主応力差を示した後に観察され、歪量の増加とともに明瞭になる。また粉粒体の種類が異なっても三軸圧縮試験の主応力差-歪曲線と一面剪断試験の剪断過程曲線は同様な傾向を示す。さらに、三軸圧縮試験の内部摩擦係数は載荷垂直応力に基づく一面剪断試験の内部摩擦係数に比べて、粗粉では小さく、微粉では大きい値が得られた。しかし、平均の実測垂直応力に基づく一面剪断試験の内部摩擦係数は三軸圧縮試験の測定値に近い値を示すことがわかった。

今後は、より多くの粉粒体を対象としたデータの集積と、剪断における体積変化に基づいて補正した破壊包絡線を描き内部摩擦係数を算出する必要があるだろう。

使 用 記 号

C	: 剪断付着力(粘着力)	[kPa]	H_1, H_2	: 剪断面より上部および下部の粉粒体層高	
D	: 剪断セル径	[mm]			[mm]
D_p	: 粒径	[μ m]	V_s	: 剪断速度	[m/s]

$\bar{e}_0$	: 初期空隙率	[-]	σ	: 垂直応力	[kPa]
δ_x	: 水平変位	[mm]	σ_1	: 最大主応力	[kPa]
δ_z	: 軸歪, 垂直変位	[%, mm]	σ_3	: 最小主応力	[kPa]
μ_f	: (2)式に基づく内部摩擦係数	[-]	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	: 主応力差	[kPa]
$\mu_{m, max}$	: 平均の実測垂直応力対最大剪断応力関係 より求められる内部摩擦係数	[-]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$	: 最大主応力差	[kPa]
μ_y	: (1)式に基づく内部摩擦係数	[-]	$\sigma_{x, p}$	: 予圧密応力	[kPa]
$\mu_{w, max}$	: 載荷垂直応力対最大剪断応力関係より求 められる内部摩擦係数	[-]	$\sigma_{x, w}$	: 載荷垂直応力	[kPa]
ρ	: 真密度	[kg/m ³]	τ, τ_x	: 剪断応力	[kPa]
ρ_a	: 見掛け密度	[kg/m ³]	$\tau_{x, max}$	: 最大剪断応力	[kPa]
			$\tau_{x, s}$	: 定常剪断応力(残留応力)	[kPa]

引用文献

- 1) 土質工学会編: “土質試験法”, p.495(1979), 土質工学会
- 2) 近藤連一編: “多孔材料”, p.133(1980), 技報堂出版
- 3) 宮南 啓, 寺下敬次郎, 尾崎 徹, 矢野武夫: 粉体工学会誌, **16**, 173(1979)
- 4) 最上武雄編: “土質工学”, p.507(1969), 技報堂出版
- 5) Morgenstern, N.R. and J. S. Tchalenko: Geotechnique, **17**, 309(1967)
- 6) 高木史人, 杉田 稔: 粉体工学会誌, **16**, 173(1979)
- 7) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 吉田元茂, 矢野武夫: *ibid.*, **15**, 515(1978)
- 8) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 矢野武夫, 山本宣之: *ibid.*, **15**, 583(1978)
- 9) 寺下敬次郎, 宮南 啓, 岩沢 哲: *ibid.*, **17**, 374(1980)
- 10) 若林隆夫: 粉体工学研究会誌, **4**, 657(1969)
- 11) 山口拍樹: “土の力学”, p.57(1976), 共立出版