研究報告

定荷重一面剪断試験機における粉粒体層の剪断過程

Shearing-Failure Process of Powder Bed in a Direct Shear Tester with Constant Vertical Load

宮 南 啓* 寺 下 敬次郎*
Kei Miyanami Keijiro Terashita

尾 崎 徹* 矢 野 武 夫*
Tohru Ozaki Takeo Yano

1. 結 言

粉粒体層の剪断特性は、種々の条件下での粉粒体の流動特性を検討したり粉粒体を取り扱うプロセス・装置の設計および解析を行なう場合に考慮しなければならない重要な因子の一つである。とくに、静止状態にあった粉粒体層が外部から力を受け限界応力状態を経て流動してゆく過程を明らかにすることは粉粒体層の諸特性を把握する上で大切なことである。

一面剪断試験機における粉粒体層の剪断破壊が一つの面で起こっているのではなく層を成して滑っていることは、すでに Morgenstern と Tchalenko¹⁾、梅屋ら²⁾および Schwedes³⁾ によって指摘されている。また、この剪断領域の幅は粉粒体の種類に関係し、かつ垂直荷重の大きさによって変化することも明らかになっている。一面剪断試験は不均一なひずみや平面変形条件のもとで起こる実際上の状況や問題をシミュレートしているといわれ、粉粒体層の剪断流動に関して基本的な知見を与えるものと考えられるが、剪断領域の幅などに関する定量的な研究はまったくといってよいほど行なわれていない。

さきにわれわれは、粉粒体層の剪断に伴う剪断応力および層体積の変化を示す垂直変位を同時に測定できる定荷重一面剪断試験機を用いた剪断過程曲線（剪断変位—剪断応力および剪断変位—垂直変位の両曲線）の型に基づく粉粒体の分類結果、および剪断面附近の実測垂直応力に基づく粉粒体の内部摩擦係数の測定結果について報告したが^{4,5)}、ここでは剪断初期の粉粒体層の空隙率と剪断を受ける粉粒体層の体積変化量から、簡単な仮定に基づく巨視的モデルを用いて、剪断面近傍で滑っている粉粒体層の臨界空隙率とその厚みを求め、さらにそれ

らに及ぼす粉粒体の種類と垂直荷重の影響を調べてみたので、それらの結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置として用い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⁴⁾と同一であり、ここでは説明を省略する。

粉粒体の空隙率は予圧密と充てん方法によって調整した。すなわち、密充てんの場合には試料を多層にわけて剪断セル内に装入し、その都度押え板で荷重を加えた。また、粗充てんの状態を得たいときには試料を一度に装入し、荷重を加えずに層表面を水平にした。粉粒体層の充てん高さ $H(=H_1+H_2)$ は読み取り顕微鏡で較正したダイヤルゲージによって 10^{-2} cm の精度で測定し、(1)式によって空隙率 ε を求めた。

$$\varepsilon = 1 - M / \rho A H \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 M は装入粉粒体の質量、 ρ は粉粒体の真密度、および A は剪断セルの断面積である。

剪断試験は実験条件の影響をあまり受けないことがわかっている Table 1 に示すような条件下で⁵⁾、Table 2

Table 1 実験条件

剪断セル径 (D)	10.0	cm
剪断面上部粉粒体層の高さ (H_1)	1.2	cm
剪断面下部粉粒体層の高さ (H_2)	1.0	cm
剪断速度 (V_s)	6.67×10^{-3}	cm/s
予圧密荷重 (σ_z, p)	1.0	Kg/cm ²
垂直荷重 (σ_z, w)	0.1, 0.4, 0.7, 1.0	Kg/cm ²

昭和53年10月21日受理

* 大阪府立大学工学部化学工学科 (〒591 堺市百舌鳥梅町4-804)
TEL 0722-52-1161

Table 2 試料粉粒体とその物性

試料粉粒体	粒径範囲 [μm]	平均粒子径 [μm]	真密度 [g/cm^3]	見掛け密度 [g/cm^3]
豊浦砂	208 — 295	252	2.735	1.598
ジルコンサンド	175 — 246	211	4.663	2.916
ガラス粉	246 — 295	271	2.508	1.401
ホワイトアランダム	246 — 295	271	3.806	2.013
ケイ砂—I	991 — 1,397	1,194	2.671	1.399
ケイ砂—II	417 — 701	559	2.671	1.330
ケイ砂—III	175 — 246	211	2.671	1.394
カーボランダム—I	589 — 701	645	3.233	1.698
カーボランダム—II	175 — 246	211	3.233	1.683
カーボランダム—III	74 — 107	91	3.233	1.551
アルミナ	0.6 — 7.0	3.8	3.982	0.784

に示す試料粉粒体について行なった。

3. 実験結果および考察

Fig. 1, Fig. 2 および Fig. 3 は垂直荷重 $\sigma_{z,w}$ 一定のもとで粉粒体層の初期空隙率（剪断開始直前の空隙率） ε_0 を種々変化させて得られた剪断過程曲線（剪断変位 δ_x -剪断応力 τ_x 曲線および剪断変位 δ_x -垂直変位 δ_z 曲線）の一例を示したものである。 δ_x - τ_x 曲線が最大値 $\tau_{x,\max}$ を示す場合（Fig. 1 および Fig. 2），その値は初期空隙率 ε_0 が大きくなると小さくなる。また， δ_x - δ_z 曲線にみられる体積膨脹量も小さくなる。しかしなが

ら，剪断変位 δ_x の大きいところでの剪断応力 τ_x の値，すなわち定常値 $\tau_{x,s}$ は ε_0 の影響をほとんど受けないことがわかる。また， δ_x - δ_z 曲線において垂直変位 δ_z が最小値をとるまでの部分も ε_0 によってあまり変化しないことに注目すべきである。なお，アルミナのような微粉の場合（Fig. 3）には，ここで用いた剪断試験機では初期空隙率 ε_0 の小さい状態が実現できないために δ_x - τ_x 曲線における最大値が観測されず， ε_0 の影響は δ_x - δ_z 曲線にのみ顕著に現われている。

これらの実験結果から，定荷重一面剪断試験機の剪断セル内の剪断面近傍で滑っている粉粒体層は初期空隙率 ε_0 によらず一定の臨界空隙率 ε_c になっているものと考

Fig. 1 剪断過程曲線に及ぼす初期空隙率の影響（ジルコンサンド）

Fig. 2 剪断過程曲線に及ぼす初期空隙率の影響（ガラス粉）

Fig. 3 剪断過程曲線に及ぼす初期空隙率の影響
(アルミナ)

えられる。すなわち、剪断過程曲線は充てんされた粉粒体層が剪断され限界応力状態を経て層の体積変化を伴わない流動における臨界状態へ移行する過程を示している。したがって、剪断過程曲線の型は初期空隙率 ϵ_0 と臨界空隙率 ϵ_c の相対関係に応じて Fig. 4 のように変化し⁹⁾、これらの空隙率の差が剪断に伴う粉粒体層の体積変化を引き起こすものと考えられる。しかしながら、Fig. 1, Fig. 2 および Fig. 3 の δ_x - δ_z 曲線からあきらかなように、全粉粒体層の高さ H は初期空隙率 ϵ_0 の

Fig. 4 初期空隙率と臨界空隙率の相対関係が
剪断過程曲線に及ぼす影響

影響を受けており、定常状態における見掛けの空隙率を臨界空隙率 ϵ_c とみなすことはできない。いいかえるならば、粉粒体層の剪断破壊は一面で起こっているのではなくある厚み h_c をもった層を成して生じているはずである。そこで、われわれは Fig. 5 に示すような巨視的モデルを想定して、臨界空隙率 ϵ_c と臨界剪断領域の厚み h_c を算出してみた。

剪断初期において静止粉粒体層にひずみが加えられると粒子の再配列が起こり、層は収縮する。したがって初期空隙率としては ϵ_0 よりむしろ収縮後の最小空隙率 $\epsilon_{0, \min}$ (Fig. 5 の B 点) を考える方が妥当である。さらにつぎの仮定をおく。

- (1) 剪断による初期の圧密 (Fig. 5 中 A 点から B 点への変化) は層内で均等に起こる⁹⁾。
- (2) Fig. 5 において B 点から C 点への変化に伴う体積

Fig. 5 剪断セル内の剪断領域の巨視的モデル

変化は剪断面近傍における変化のみに起因する。

- (3) 垂直荷重 σ_z, w が一定のもとでは臨界空隙率 ε_c と臨界剪断領域厚み h_c は粉粒体試料に応じて一定の値をとる。

以上の仮定のもとに剪断面近傍にある粉粒体についての物質収支をとると(2)式が成立する。

$$h_0(1-\varepsilon_{0, \min}) = (h_0 + \Delta h_\infty)(1-\varepsilon_c) \equiv \alpha(\text{一定}) \cdots \cdots (2)$$

また, h_c は

$$h_c = h_0 + \Delta h_\infty \cdots \cdots (3)$$

で与えられる。ここで, h_0 および α は, それぞれ, 剪断に関与する粉粒体層の初期厚みおよび単位剪断面積当りの粉粒体量であり, Δh_∞ は剪断による粉粒体層の最終膨脹量である。(2)式を変形すると(4)式が得られる。

$$\Delta h_\infty = -\alpha \left(\frac{1}{1-\varepsilon_{0, \min}} - \frac{1}{1-\varepsilon_c} \right) \cdots \cdots (4)$$

すなわち, Δh_∞ を $1/(1-\varepsilon_{0, \min})$ に対して点綴すると直線関係が得られるはずであり, 結果の一例をFig. 6およびFig. 7に示した。これらの図からあきらかなように, 試験した粉粒体のうちアルミナを除くすべてについて概ね良好な直線関係が認められ, 剪断セル内の粉粒体の体積変化が仮定した変形とほぼ一致していることが

Fig. 6 Δh_∞ と $1/(1-\varepsilon_{0, \min})$ の関係 (ガラス粉)

確かめられた。得られた直線関係から(4)式に従って ε_c と h_c を求め, 垂直荷重 σ_z, w に対して点綴した結果を, 平均粒子径および粒径範囲がほぼ同じ粉粒体について示したのが Fig. 8 および Fig. 9 である。平均粒子径および粒径範囲がほぼ同じでも粉粒体の種類によって臨界空隙率 ε_c と臨界剪断領域厚み h_c の値は異なり, ε_c は垂直荷重 σ_z, w が小さいほど大きくなる傾向を示してい

Fig. 7 Δh_∞ と $1/(1-\varepsilon_{0, \min})$ の関係 (ジルコンサンド)

Fig. 8 臨界空隙率に及ぼす垂直荷重の影響

Fig. 9 臨界剪断領域厚みに及ぼす垂直荷重の影響

Fig. 10 臨界剪断領域厚みに及ぼす粒径分布と平均粒子径の影響 (ケイ砂およびカーボランダム)

る。また、剪断破壊は $h_c = 0.5 \sim 1.5 \text{ cm}$ 程度の厚みをもって起こっており、 $\sigma_{z,w}$ が小さいほど大きくなること

がわかる。さらに、 h_c が大きいほど実際に粉粒体を取り扱った経験から判断される流動性が良いことも確かめられた。すなわち、種々の粉粒体が同一条件下での剪断過程曲線の型に基づいて分類できたのは、その条件における臨界空隙率と臨界剪断領域厚みが各粉粒体によって違ってくるからであると考えられる。

Fig. 10 はケイ砂とカーボランダムについて、臨界剪断領域厚み h_c に及ぼす粒径分布と平均粒子径の影響を示したものである。平均粒子径が大きいほど h_c は大きくなり、流動性の評価順序とも一致する。

4. 結 言

定荷重一面剪断試験機によって得られる粉粒体の剪断過程曲線は、粉粒体層が限界応力状態を経て破壊され臨界流動状態へ移行する過程を表わしており、それらの曲線の型は初期空隙率と臨界空隙率の相対関係によって決まること、およびその差が剪断に伴う粉粒体層の体積変化を引き起こすことを示した。さらに、剪断破壊時の粉粒体層の変形を巨視的にモデル化して剪断面近傍で滑っている粉粒体層の臨界空隙率と臨界剪断領域厚みを最小初期空隙率と最終粉粒体層膨脹量の関係から求め得ることを示した。また、試験した各粉粒体について求められた臨界剪断領域厚みの値はそれらの粉粒体を取り扱った経験から判断される流動性の良否と対応した。

剪断層を静止状態で微視的に観察した場合、多くの剪断面が斜めに交錯しており、実際に剪断セルを取り外したときに観測される剪断面はそれらの剪断面の交点をほぼ水平につないだ凹凸のあるものであるといわれている。しかし、それはあくまでも静止状態で観測したときのことであり、定常に動的に剪断されている場合にはその凹凸がたえず発生と消滅をくりかえしているはずである。したがって、巨視的に見た場合には全体として層状の可動部分が存在し、平均値としての臨界厚みと臨界空隙率をもった剪断領域が形成されていると考えても一向に差し支えなく、剪断過程曲線から粉粒体の種類などによる流動性の相違と対応のつく臨界剪断領域厚みの値を求めることは、工学上の目的には意義のあることと考えられる。

使 用 記 号

A : 剪断セル断面積 ($=\pi D^2/4$) [cm²]
 D : 剪断セル内径 [cm]
 H : 剪断セルに充てんされている粉粒体層の高さ [cm]
 H_1 : 剪断面上部粉粒体層の高さ [cm]

H_2 : 剪断面下部粉粒体層の高さ [cm]
 h : 剪断領域の厚み [cm]
 h_0 : 剪断初期における剪断領域の厚み [cm]
 h_c : 臨界状態における剪断領域の厚み [cm]
 Δh : 剪断領域の厚みの変化量 [cm]

Δh_{∞} : 臨界状態における Δh , 最終膨張量	[cm]	$\varepsilon_{0, \min}$: 最小初期空隙率	[—]
M : 剪断セルに充てんされている粉粒体の質量	[g]	ε_c : 臨界空隙率	[—]
V_s : 剪断速度	[cm/s]	ρ : 粉粒体の真密度	[g/cm ³]
α : 剪断領域に存在する単位剪断面積当りの粉粒体量 (体積)	[cm]	$\sigma_{z, p}$: 予圧密荷重	[Kg/cm ²]
δ_x : 剪断変位	[cm]	$\sigma_{z, w}$: 垂直荷重	[Kg/cm ²]
δ_z : 垂直変位	[cm]	τ_x : 剪断応力	[Kg/cm ²]
ε_0 : 初期空隙率	[—]	$\tau_{x, \max}$: 最大剪断応力	[Kg/cm ²]
		$\tau_{x, s}$: 剪断応力の定常値 (臨界状態における剪断応力)	[Kg/cm ²]

引用文献

- 1) Morgenstern, N. R. and J. S. Tchalenko: *Geotechnique*, **17**, 309 (1967)
- 2) 梅屋薫, 北森信三, 原隆一, 吉田達郎: 材料, **18**, 489 (1969)
- 3) Schwedes, J.: *Powder Technology*, **11**, 59 (1975)
- 4) 寺下敬次郎, 宮南啓, 吉田元茂, 矢野武夫: 粉体工学会誌, **15**, 515 (1978)
- 5) 寺下敬次郎, 宮南啓, 山本孝夫, 矢野武夫: 粉体工学会誌, **15**, 526 (1978)
- 6) Stutz, P.: *Comportement élasto-plastique des milieux granulaires*, A. Sawczuk, ed. "Mechanics of Plastic Solids", p. 37~49, Noordhoff International Publishing, Netherland (1973)

Authors' Abstract

Shearing-Failure Process of Powder Bed in a Direct Shear Tester with Constant Vertical Load

by

Kei MIYANAMI, Keijiro TERASHITA, Tohru OZAKI and Takeo YANO

(Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka 591, JAPAN)

Shearing process diagrams (the relations of shearing stress and vertical dilating strain to horizontal shearing strain) for eleven varieties of powders have been obtained to analyze the shearing-failure behaviors of the powder beds by a direct shear tester with constant vertical load. A macroscopic model has been presented to estimate the average critical void fraction and thickness of shearing zone under flowing condition in the circular shearing cell of the tester. It has been shown that the average critical void fraction and thickness are characteristic of the powders tested under identical experimental conditions.

List of figures and tables

- Fig. 1 Effect of initial void fraction on shearing process diagram (Zircon sand)
- Fig. 2 Effect of initial void fraction on shearing process diagram (Glass powder)
- Fig. 3 Effect of initial void fraction on shearing process diagram (Alumina)
- Fig. 4 Typical shearing process diagrams and relation of initial void fraction to critical void fraction
- Fig. 5 Macroscopic model of shearing zone in shearing cell
- Fig. 6 Plot of Δh_{∞} vs. $1/(1-\varepsilon_{0, \min})$ (Eq. 4 for Glass powder)
- Fig. 7 Plot of Δh_{∞} vs. $1/(1-\varepsilon_{0, \min})$ (Eq. 4 for Zircon sand)
- Fig. 8 Effect of vertical stress on critical void fraction
- Fig. 9 Effect of vertical stress on critical thickness of shearing zone
- Fig. 10. Effect of particle diameter distribution on critical thickness of shearing zone
- Table 1 Experimental conditions
- Table 2 Properties of powders tested