粉体層剪断時の圧密崩壊現象*

Consolidation Yield Phenomenon at Powder Shearing Process

鈴木 道隆**
Michitaka SUZUKI

上 田 康 男***
Yasuo UEDA

井伊谷 鋼 —***
Koichi IINOYA

牧 野 和 孝***
Kazutaka MAKINO

山 中 章 裕***
Akihiro YAMANAKA

1. 結 言

粉体層がいかなる応力状態で崩壊するのかは、化学工業、鋳業、製粉、製薬、食品工業などにおける各種粉体プロセスの設計、操作などに関係して重要である。粉体層が崩壊面を境に二つに分離する引張りあるいは剪断崩壊時の応力状態は粉体崩壊曲線(Powder Yield Locus 略して PYL) として、巨視的な崩壊面なしに空間率のみが減少する圧密崩壊時のそれは圧密崩壊曲線(Consolidation Yield Locus 略して CYL) として表わされる。これらのうち、PYL は Jenike ら¹⁾によって定義され、Richmond と Gardner²⁾, Wroth と Bassett³⁾, Carr と Walker⁴⁾, 綱川と青木⁵⁾, 寺下ら⁶⁾などの多数の研究者によって測定が行われているばかりでなく、Ashton ら⁷⁾, 篠原と田中⁸⁾ならびに著者ら⁹⁾によってある程度モデル的な面から検討されている。それに対して CYL は Roscoe ら¹⁰⁾によって定義され、Schwedens¹¹⁾および著者ら⁹⁾によって若干の考察が行なわれているが、実際の粉体層については綱川と青木⁵⁾による直接一面剪断装置を用いて測定が試みられ、また剪断試験中の空間率変化も寺下ら¹²⁾が検討しているのが見られる程度である。

そこで本報ではリングセル型剪断試験装置を用い、3種類の供試粉体について剪断試験中の粉体層の空間率変化を観察した。その結果、予圧密圧と垂直応力との比に

よって3種の崩壊状態、すなわち2種類の剪断崩壊および圧密崩壊が存在し、特に圧密崩壊過程を Roscoe の応力空間¹⁰⁾を用いて説明し、その測定結果から直接 CYL が求められることを明らかにした。そして各供試粉体について PYL と CYL を実測したのでその結果を以下に報告する。

2. 実験装置ならびに方法

2.1 供試粉体

本報で用いた供試粉体は炭酸カルシウムシルバー W (白石工業製)、JIS 試験用ダスト¹³⁾である関東ローム第8種ならびにフライアッシュ第5種の合計3種類である。これら各供試粉体の特性を Table 1 に示した。ここで真密度 ρ_p は He-Aif ピクノメータによる測定値であり、また平均粒径は炭酸カルシウムシルバー W については沈降法は測定した値、他は文献値¹⁴⁾である。なお実験にはあらかじめ 110°C で6時間以上乾燥し、デシケータ中で数時間放冷した供試粉体を使用した。

2.2 剪断試験装置

剪断試験には既報¹⁵⁾と同じリングセル型一面剪断試験装置を用いた。装置の概略を Fig. 1 に示した。

実験は初めに所定の重量の供試粉体を振動ふるいを用いて可動①および固定②両セルによって構成された外半

Table 1 供試粉体の性質

Test powders	Calcium carbonate Silver W	Kanto loam No.8 (JIS Z8901)	Fly ash No.5 (JIS Z8901)
Particle density ρ [kg/m ³]	2.55×10^3	3.05×10^3	2.3×10^3
Mass median diameter Dp [μm]	6.3	8.0	15.0

昭和56年1月26日受付

*1980年10月、化学工学協会第14回秋期大会、横浜

**姫路工業大学産業機械工学教室 Himeji Institute of Tech., Dept. of Chem. Eng.

〒671-22 姫路市書写2167 TEL 0792-66-1661(内)249

***京都大学工学部化学工学教室 Kyoto University, Faculty of Eng., Dept. of Chem. Eng.

〒606 京都市吉田本町 TEL 075-751-2111(内)5586

Fig. 1 リングセル型剪断試験装置の概略

径 35 mm, 内半径 20 mm の環状部分に充填する。次に環状ピストン③と分銅⑧により粉体層を約10分間予圧密した。予圧密圧は炭酸カルシウムシルバーWで 5.0 kPa, 関東ローム第8種で 7.2 kPa, フライアッシュ第5種で 3.0 kPa である。これらの予圧密圧を用いたのは, 空間率を供試粉体によらず, できるだけ同一の値に近づけ, かつ剪断応力が精度良く測定できる範囲で剪断試験を行なうためである。なお, 予圧密後の粉体層厚さは剪断面よりも下の部分が 10 mm, 剪断面からピストン下面までが約 5 mm となるようにした。次にピストン上の分銅⑧を予圧密時より減少させ, 所定の垂直応力 σ を粉体層に加える。そして最少目盛 10 μ m のダイヤルゲージ⑨を用いて粉体層の厚さを測定し, 空間率 ϵ を求める。なお, 本装置ではピストン中心の高さをダイヤルゲージで測定しているので, ピストンが多少傾いても平均高さを求めることができ, また剪断中もダイヤルゲージの先端に剪断力加わらないので正確な測定が可能である。さ

て剪断前の空間率 ϵ_0 を求めた後, ピン④と電磁コイルとを連結棒で結び 980 dyn/min の剪断力印加速度で電磁的に剪断力 F を加えてゆく。なお, 本装置では印加速度が常に一定となるように自動制御されている。剪断試験中の剪断力 F ならびに粉体層の中心線すなわち半径 27.5 mm の円周上での変位 X は連結棒に取り付けたロードセルならびに差動トランスにて検出し, 2 ペンレコーダーで同時記録した。剪断応力では次式により F から算出した。

$$\tau = F \cdot \frac{0.3682}{\pi} - \tau_0 \quad \dots\dots(1)$$

ただし τ_0 は測定セル内に粉体を充填しないときの剪断応力, すなわち可動, 固定両セル間のベアリングボール⑤などによる装置自体の摩擦抵抗である。また剪断試験中の粉体層の厚さはダイヤルゲージ⑨により連続的に読み取ることができ, これから空間率変化が求められる。そして粉体層が剪断崩壊したら崩壊後の空間率 ϵ_s を測定する。

以上の操作を同一の予圧密圧 σ_0 について垂直応力 σ を 0 から σ_0 の範囲で変え, 1 回ごとに粉体を再充填して順次繰り返す, それぞれの場合について剪断試験中の空間率 ϵ の変化を実験的に求め検討した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 剪断試験中の空間率変化

剪断試験中の剪断方向の変位 X と空間率 ϵ の変化を実測した代表例として, 炭酸カルシウムシルバーWについての結果を Figs. 2~4 に示した。各図の実線はレコーダーに記録された剪断方向の変位 X を, 破線はダイヤルゲージの読みから求めた空間率 ϵ を表わしている注1)。これらの結果より, 予圧密圧 σ_0 と垂直応力 σ との比 σ/σ_0 の大きさによって剪断試験中の空間率の変化が以下のように圧密崩壊 1 種類 (Type I), 剪断崩壊 2 種類 (Type II ならびに Type III) の合計 3 種類に大別できることがわかったのでそれぞれについて説明する。

3.1.1 圧密崩壊 (Type I)

Type I の圧密崩壊は比 σ/σ_0 がほぼ 0.7 から 1 の範囲注2) に入る場合で, Fig. 2 のように剪断応力 τ がある値(図中の A 点)まで増加するとそれまで一定 ϵ_0 であった空間率 ϵ が減少しはじめ, その後は剪断応力 τ の増加とともに減少する。またその際に, ϵ の減少が大きいために, 剪断方向の変位 X は大きく増加し, 両者が対応し

注1) Figs. 2~4 で空間率 ϵ を小数点以下 4 桁まで求めているのは, これらの図は剪断試験中に空間率 ϵ が相対的にどのように変化しているのかを表わすことを目的としているからである。

Fig. 2 剪断試験時の空間率変化 (Type II)

Fig. 3 剪断試験時の空間率変化 (Type II)

た動きをする。そしてB点に達したら、剪断崩壊を起こし、変位 X は急激に増加するとともに空間率 ϵ も急激に低下し、最終値 ϵ_e に達する。剪断試験前後の空間率の比 ϵ_e/ϵ_s は 0.995 以下であった。ここでは代表例として炭酸カルシウムシルバー-W の場合を示したが、関東ローム第8種、フライアッシュ第5種についても同様の現象が見られた注2)。

3.1.2 剪断崩壊 (Type II, Type III)

Type II は比 σ/σ_c がほぼ0.3以下注3)の範囲に入る場合で、Fig. 3 のように剪断試験中はほとんど空間率 ϵ が変化せず、崩壊点Bでも剪断方向の変位 X のみが急激に増加し、 ϵ は変化しない。したがって、この場合は圧密崩壊を伴わない剪断崩壊であり、 ϵ_e/ϵ_s は1となる。なお、関東ローム第8種、フライアッシュ第5種については若干の膨張を生じ、空間率がわずかに増加する場合もあった。

Type III は Type I と Type II の間すなわち比 σ/σ_c が0.3~0.7程度の場合で、Fig. 4 のように剪断を開始しても空間率 ϵ はほとんど変化せず剪断崩壊の瞬間(図中の点B)でのみ ϵ が急激に減少する。この場合も剪断崩壊する直前までは空間率 ϵ がほとんど変化しないので、Type II と同じく剪断崩壊の一種と考えられる。なお、剪断前後の空間率の比 ϵ_e/ϵ_s はいずれの供試粉体についても0.995から1の範囲であった。

3.2 圧密崩壊曲線 (CYL) の測定

これら3種類の崩壊状態のうち、Type II と Type

Fig. 4 剪断試験時の空間率変化 (Type III)

III は前述のごとく剪断崩壊の1種と考えられるので、そのときの応力状態 (Figs. 3, 4 の点B) は粉体崩壊曲線すなわち PYL 上の1点を示していると思われる。これらに対して、Type I の場合には Fig. 2 のごとく点Aで圧密を生じ、さらに点Bで剪断崩壊しているが、これは Fig. 5 のとき Roscoe の応力空間¹⁰⁾を用いて次のように説明できる。すなわち供試粉体を充填し、予圧密した後 (Fig. 5 中の点Cから点D)、予圧容圧 σ_c を取り去って垂直応力 σ を加え (点E)、剪断応力 τ を徐々に加えてゆけば、応力空間では点Eから σ - ϵ 平面に垂

注2) 炭酸カルシウムシルバー-Wでは σ/σ_c が0.75~1、関東ローム第8種では0.7~1、フライアッシュ第5種では0.65~1の範囲で Type I の現象が観察された。

注3) 炭酸カルシウムシルバー-Wでは σ/σ_c が0.35以下、関東ローム第8種では0.3以下、フライアッシュ第5種では0.35以下で Type II の現象が観察された。

Fig. 5 Roscoe の応力空間を用いた剪断過程 (Type I) の表現

直に立ち上がり、圧密崩壊曲線 (CYL) 上の点 A に達すれば空間率 ε が変化しはじめる。さらに剪断応力 τ を増加させれば CYL の集合である圧密表面 (Consolidation Surface) 上を ε 軸に平行に進み空間率 ε が徐々に減少する。そして PYL と CYL の境界線 (Critical State Line) 上の点 B に達した時に剪断崩壊を生じる。粉体層内部の粒子配列が最初の安定状態から変化し、しかももとの状態にもどらない場合を崩壊とすれば、点 A において始まる空間率 ε の減少も崩壊の 1 種 (圧密崩壊) である。したがって、以上の考察より、Type I で空間率 ε が減少しはじめる点 A での垂直応力 σ と剪断応力 τ の実測結果より CYL 上の 1 点が実験的に求まると考えられる。そこで垂直応力 σ を予圧密圧 σ_c の 0.7 から 1 倍の範囲で変化させて Type I の剪断試験を多数行ない、空間率 ε の変化しはじめる点の τ を求め、 σ と τ との関係すなわち CYL を実験的に求めた。3 種類の供試粉体についての実測結果を Figs. 6~8 に示した。また、Type II, III の実測結果から求めた PYL も同時に示した。これらの測定結果よりどの供試体についても PYL と CYL とが連続でしかも滑らかに接続し、CYL は予圧密圧を示す σ 軸上の点と、PYL と CYL の接続点を通る円弧に近い形状を示していることが明らかとなった。

4. 結 言

リングセル型剪断試験装置を用い、剪断試験中の空間

Fig. 6 圧密崩壊曲線の測定結果 (炭酸カルシウムシルバー W)

Fig. 7 圧密崩壊曲線の測定結果 (関東ローム第 8 種)

Fig. 8 圧密崩壊曲線の測定結果 (フライアッシュ第 5 種)

率変化を測定した結果、垂直応力と予圧密圧の比によって 3 種の崩壊状態が存在し、特に剪断崩壊前に空間率が徐々に減少する圧密崩壊状態 (Type I) の測定結果から圧密崩壊曲線を得た。そして得られた圧密崩壊曲線は粉体崩壊曲線と滑らかに接続し、その接続点と予圧密圧を示す垂直応力軸上の点とを通る円弧に近い形状を示すことを明らかにした。

使 用 記 号

F_s : 剪断力	[N]	σ : 垂直応力	[kPa]
X : 剪断方向の変位	[μm]	σ_c : 予圧密圧	[kPa]
ε : 空間率	[—]	τ : 剪断応力	[kPa]
ε_e : 剪断崩壊後の空間率	[—]	τ_b : 試験装置自体の剪断摩擦抵抗	[kPa]
ε_s : 剪断崩壊前の空間率	[—]		

引用文献

- 1) Jenike, A.W., P.J. Elsey and R.H. Wooley; *Proceeding Am. Soc. Test. Mat.*, 60, 1168 (1960)
- 2) Richmond, O. and G.C. Gardner; *Chem. Eng. Sci.*, 17, 1071 (1962)
- 3) Wroth, C.P. and R.H. Bassett; *Geotechnique*, 15, 32 (1965)
- 4) Carr, J.F. and D.M. Walker; *Pow. Tech.*, 1, 369 (1967/68)
- 5) 網川浩, 青木隆一: 粉体工学研究会誌, 11, 263 (1974)
- 6) 寺下敬次郎, 宮南啓, 矢野武夫. 山本宣之: 粉体工学会誌, 17, 427 (1980)
- 7) Ashton, M.D., D.C.H. Cheng, R. Farley and F.H.H. Valentin; *Reologica Acta*, 4, 206 (1965)
- 8) 篠原邦夫, 田中達夫: 化学工学, 32, 88 (1968)
- 9) 牧野和孝, 幸一彦, 鈴木道隆, 玉村忠雄, 井伊谷鋼一: 化学工学論文集, 4, 439 (1978)
- 10) Roscoe, K.H., A.N. Schofields and A. Thrairajah; *Geotechnique*, 13, 211 (1963)
- 11) Schwedes, *Pow. Tech.*, 11, 59 (1975)
- 12) 寺下敬次郎, 山本宣之, 谷川正芳, 宮南啓, 矢野武夫: 材料, 29, 876 (1980)
- 13) JIS, Z 8901 (1974)
- 14) 壇上和美: 粉体工学会誌, 15, 491 (1978)
- 15) 鈴木道隆, 牧野和孝, 井伊谷鋼一. 渡辺金之助: 粉体工学会誌, 17, 559 (1980)

Author's abstract

The Consolidation Phenomenon in a Powder Shearing Process

by

Michitaka SUZUKI*, Kazutaka MAKINO**, Yasuo UEDA**,
Akihiro YAMAMOTO**, and Koichi IINOYA**

(*Department of Chemical Engineering, Himeji Institute of Technology, Himeji,
Hyōgo 671-22, JAPAN)

(**Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Kyoto 606, JAPAN)

On the basis of the variational patterns of the void fraction in the powder beds under shearing by a ring cell shear tester, the powder yield processes have been classified into three types; a consolidation yield type (Type I), a shear yield type (Type II) and an type intermediate between Type I and II (Type III). It has been shown that, the consolidation yield locus (C.Y.L.) can be obtained by representing the consolidation yield processes of Type I on Roscoe's diagram (a three dimensional presentation of normal stress-shearing stress-void fraction relationships) and the C.Y.L.'s of the powders tested (three kinds) can be smoothly connected to the corresponding P.Y.L.'s to form almost circular arcs.

List of Figures and Table

Fig. 1 Ring cell shear tester

Fig. 2 Void fraction variation of powder bed under shearing (Type I)

Fig. 3 Variation of void fraction on powder shearing process (Type II)

Fig. 4 Variation of void fraction on powder shearing process (Type III)

Fig. 5 Roscoe's diagrammatic presentation of shearing processes

Fig. 6 Consolidation yield locus (CaCO₃ Silver W)

Fig. 7 Consolidation yield locus (Kanto loam No.8)

Fig. 8 Consolidation yield locus (Flyash No.5)

Table 1 Properties of tested powders