tensile strength indicates the minor principal stress σ_3 , and therefore a Mohr failure circle is obtained for each measurement. By drawing an envelop around Mohr's failure circles obtained for several values of σ_1 , PYL is determined corresponding to the specified porosity of the bed. This method is also useful for evaluating the unconfined yield strength of the powder bed.

List of Figures

- Fig. 1 Illustration of hanging strips type split cell tensile strength tester
Fig. 2 Tensile fracture for the powder having straight line PYL
Fig. 3 Effect of bed height on the tensile strength when upper surface is kept free
Fig. 4 Split cell with split lids
Fig. 5 Effect of bed height on the tensile strength when upper surface is confined by lids
Fig. 6 Illustrative diagram for tri-axial compression and tensile test

- Fig. 7 Procedure of tri-axial compression and tensile test
Fig. 8 Results of measurements for CaCO_3 , P-30 under different porosities
Fig. 9 Results of measurements for White Alundum #2500 under different porosities
Fig. 10 Results of measurements for CaCO_3 , SS under different porosities

研究速報

初期充てん時空隙率とフローパターンの実験

Relationship Between Porosity of Initial Packing and Flow-Patterns

高木 史人*
Fumito TAKAGI

杉田 稔*
Minoru SUGITA

1. はじめに

模型サイロによるフローパターンの実験は、抽出時動的圧力の発生部位の予測や粉体が残留しないマスフローホッパーの設計条件の検討等を目的としてこれまでに多くの研究者によって取り組まれてきている¹⁻⁴⁾。これらの実験では、まず第一に容器（実験サイロ）に試料を投入し、次に排出口を開いてフローパターンの観察をおこなっている。ここでの試料の投入は、通常、容器上部に置いたフルイやロートに少量ずつの試料を投入し自由落下により推積させて、一定の充てん状態の粉体層を形成させるようにした後、容器の排出口径やホッパー角度等を変化させてそれに伴うフローパターンの変化を観察している。

しかしこのようなフルイやロート等を用いた簡単な方

法では単位時間当りの試料の投入重量や投入位置等が変動することが多く、それによって形成される粉体層はかならずしも一定の充てん状態になるとは考えにくい。さらに通常は、フローパターンを観察するための色を変えた粉体等のマーク粒子を試料と交互に投入するため、粉体層の充てん状態のバラツキはさらに大きなものになることが予想される。

試料の投入方法とそこで形成される粉体層の充てん状態については、浅川ら⁵⁾、高木ら^{6,7)}、森山ら^{8,9)}、綱川ら¹⁰⁾の実験があり、試料の投入位置⁹⁾や単位時間当りの投入重量^{6,9,10)}、試料の投入高さ⁹⁾、使用するフルイの目開きと粒子径の比⁵⁾等によって容器内のかさ密度や粉体圧が大きく変化することが報告されている。

このようにこれまでおこなってきたフローパターンの実験方法では、はじめに形成する粉体層の充てん状態のバラツキが大きくなり、容器の排出口径やホッパー角度等の変化に伴うフローパターンの変化の実験をおこなっても、それに粉体層の充てん状態の違いによるフローパ

昭和57年3月15日受付

*清水建設(株)研究所(〒135 東京都江東区越中島 3-4-17)
TEL 03-643-4311

Fig. 1 実験装置図

ターンの変化が合成された結果となってしまうことが考えられる。

ここでは容器内粉体層の初期充填時のかさ密度が変化した場合のフローパターンの変化について検討するために、試料の投入が中断すること無く常に均一で一定の充填状態の粉体層が形成できる新たな試料の投入方法を考案し、実験をおこなったので報告する。

2. 実験装置と方法

実験装置を Fig. 1 に示すように粉体供給容器の粉体は投入用角形ホッパーを通して一定の割合で連続的に角形容器へ投入される。Fig. 2 に示す投入用角形ホッパーは縦一直線に排出口があり、排出口プレートの開口の断面積を変えることによって一定の投入速度（単位時間当りの粉体投入重量）で粉体を投入することができる。今回の実験で用いた豊浦標準の（ $105\mu\sim 297\mu$ ）による13種類の排出口プレートと平均投入速度を Table 1 に示す。

角形容器の寸法は $10\text{ cm}\times 5\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ である。かさ密度測定用4分割容器（Fig. 6）はアクリル製で高さ方向のかさ密度変化を測定することができる。フローパターン観察用は側面はアルミ製で、前面はアクリル板に5

Table 1 排出口プレートと平均投入速度

略称	排出口プレート 寸法 (mm)	投入速度 w g/s	排出口面積 (mm^2)
A	($d=2\phi\sim 13$, $l=42$)	3.00	40.8
B	($d=3\phi\sim 11$, $l=42$)	7.64	77.8
C	($d=2.0$, $l=43$)	10.1	86.0
D	($d=3.0$, $l=41$)	20.4	123.0
E	($d=4.0$, $l=41$)	37.7	164.0
F	($d=5.0$, $l=41$)	47.0	205.0
G	($d=6.0$, $l=41$)	63.1	246.0
H	($d=7.0$, $l=41$)	86.5	287.0
I	($d=8.0$, $l=41$)	104.5	328.0
D1	($d=3.2$, $l=42$)	24.9	134.4
D2	($d=3.4$, $l=42$)	25.5	142.8
D3	($d=3.6$, $l=42$)	29.2	151.2
D4	($d=3.8$, $l=41$)	31.3	155.8

Fig. 2 投入用角形ホッパー

Fig. 3 実験装置全景

Fig. 4 粉体投入中の様子

cm毎に印が付いており、試料の流動状態が観察できるようになっている。フローパターンの実験はまずアクリル板の前面に棒状の磁石を5 cm 間隔にならべ容器内部にマーク粒子としての鉄粉を付着させておいて試料を投入

する。試料投入後に前面の磁石をはずし、投入用角形ホッパーと同形の排出口(巾2.0 mm)を開きその流動状態を写真撮影と16ミリ映画撮影により観察した。このような方法により粉体層は二次元的に連続・均一に堆積し、マーク粒子の投入によって粉体層が乱されることなくフローパターンの観察をおこなうことができる。なお、かさ密度の重量測定には上皿天秤を用い、同一実験条件で5回ずつ測定してその平均値を求めた。

Fig. 3に実験装置全景、Fig. 4に粉体投入中の様子の写真を示す。

3. 実験結果と検討

3.1 投入速度とかさ密度の実験

フローパターン観察用容器に Table 1 の A~I のホッパーで試料を投入してかさ密度を測定した。結果を Fig. 5 に示すように投入速度が 10 g/s まで密充てん、40 g/s 以降が疎充てんとなることが分かる。投入速度の増加に伴ってかさ密度が減少することは円筒容器での実験結果⁷⁾からも明らかであるが、円筒容器の結果では投入速度 1.0 g/s までが密充てん、10 g/s 以降が疎充てんであった。双方の結果を比較するために投入用ホッパーの排出口の断面積より単位面積当りの投入速度を算出したところ、どちらの場合も $0.12 \text{ g/s} \cdot \text{mm}^2$ までが密充てん $0.23 \text{ g/s} \cdot \text{mm}^2$ 以降が疎充てんとなった。これは容器内粉体の充てん状態は単に投入速度だけでなく、粉体の落下する面積との関連も大きなことを示すものであるが⁹⁾、この問題の詳細検討は別の機会とする。

Fig. 5 投入速度とかさ密度

Fig. 6 4分割容器

Fig. 7 投入速度と高さ方向のかさ密度変化

次に Fig. 6 の 4 分割容器によって高さ方向かさ密度変化を測定した。Fig. 7 の結果からも明らかなようにに密充てん (A~C) と疎充てん (E~H) に比べてその中

Fig. 8 フローパターン (A~H)

Fig. 9 基本的な2つの流動形態

間 (D) では容器内部のかさ密度変化の大きいことが分かる。同一容器内の最大・最小かさ密度からそのバラツキの割合を計算したところ A~C と F~H は 2.7~3.4% の範囲内であるのに対して D~E はすべて 4.3% 以上 (最大 7.0%) であり、3.2 で述べるフローパターンが移行するところでのバラツキの値の大きいことが分かった。

ファネルフロー型						
初期充てんかさ密度 (平均値) $\rho = 1.427 \text{ g/cm}^3$ (空隙率 $\epsilon = 0.453$)						
試料投入ホッパーD						
マスフロー型						
初期充てんかさ密度 (平均値) $\rho = 1.368 \text{ g/cm}^3$ (空隙率 $\epsilon = 0.476$)						
試料投入ホッパーE						
経過時間	0"	10"	20"	30"	40"	50"

Fig. 10 フローパターン観察結果例 (D, E)

3.2 フローパターン観察実験

Table 1 の A～H のホッパーを用いて試料を投入しフローパターンを観察した。試料の排出は約 4 分間で終了するが、流れが同一パターンのくり返しとなる排出 30 秒後以降を定常流動状態と考えた。Fig. 8 に排出 30 秒後の各々のフローパターンを示す。サイロ内粉粒体の基本的な 2 つの流動形態であるマスフローとファネルフローを Fig. 9 のように考えると、A～D はファネルフロー型・

E～H はマスフロー型となり、D～E のところで流動形態が変わっている。Fig. 5 の結果と合わせて考えると D から E にかけてかさ密度が大きく変化しており、フローパターンはかさ密度との関連が大きいことが分かる。Fig. 10 に D と E の排出開始から 50 秒後までのフローパターン観察写真を示す。

D から E へのフローパターンの移行を調べるために Table 1 の D1～D4 の排出口プレートによって試料を投

Fig. 11 フローパターン (D～E)

Fig. 12 フローパターンのモデルと a, b, L の定義

Fig. 13 各々の位置に対する b/L の値

入し容器内かさ密度を少しずつ変化させてフローパターンを観察した。排出30秒後の結果を Fig. 11 に示すように D から E へ流動域が徐々に広がっており、ファネルフロー型からマスフロー型へ移行している様子が分かる。次に Fig. 12 のように粉体が流動している部分を主流動部・静止している部分を静止部・両者の中間部分を従流動部と定め、主流動部の幅 a ・従流動部間の幅 b ・容器の幅 L を定義する。 $a \cdot b \cdot L$ の値を写真撮影の結果から読み取り、 $a/L \cdot b/L$ の値を Fig. 12 の各高さ位置ごとに計算した。 b/L の結果を Fig. 13 に示すように D から E に移行するにつれて b/L の値は少しずつ大きくなっている。 a/L についても同様の結果が得られた。

Fig. 14 空隙率と $a/L, b/L$ の関係

Fig. 15 空隙率と a/L の関係 (容器内各部の値)

Fig. 16 空隙率と b/L の関係 (容器内各部の値)

3.3 空隙率とフローパターン

各流動部の幅の割合と初期充てん時空隙率の関係を検討するために試料の真密度を 2.61 g/cm^3 として空隙率を計算した。 a/L と b/L の容器位置 1～6 (Fig. 12) の平均値と容器全体の平均かさ密度から求めた空隙率の関係を図示すると Fig. 14 のようになり、 a/L (および b/L) と空隙率がほぼ直線関係となる。Fig. 6 の 4 分割容器の位置②・③・④のかさ密度測定結果から各部分における空隙率を計算し、それに対する a/L , b/L の値を求めて図示すると、Fig. 15, Fig. 16 のようになる。以上の結果より容器内部の各部分においても各流動部の幅と初期充てん時空隙率が直線関係となることが分かる。

ここで試料の力学的物性値と流動域の幅の関係をみるために、空隙率と内部摩擦係数の関係¹¹⁾(Table 2) を用いて Fig. 16 を書き直すと Fig. 17 のようになる。これより試料の内部摩擦係数が大きい程流動域の幅の割合は小さいが、内部摩擦係数が小さく流動性が増すにつれて流動域の幅の割合も大きくなっていることが分かる。

(Fig. 14～Fig. 17 中の * 印は、 a/L (または b/L) と空隙率または内部摩擦係数の関係を回帰分析によって求めた式である。)

Table 2¹¹⁾ 空隙率と内部摩擦係数 (豊浦標準砂)

かさ密度 (ρ) g/cm^3	空隙率* (ϵ)	内部摩擦角 (ϕ_i) $^\circ$	内部摩擦係 数(μ_i)
1.60	0.387	$40^\circ 15'$	0.847
1.57	0.398	$39^\circ 45'$	0.832
1.42	0.456	$35^\circ 00'$	0.700
1.37	0.475	$34^\circ 00'$	0.675

* 真密度を 2.61 g/cm^3 として計算

Fig. 17 内部摩擦係数と b/L の関係 (容器内各部の値)

4. ま と め

容器内粉体層を連続的・均一に形成できる新たな試料投入装置を考案し、二次元角形容器に豊浦標準砂を投入して初期充てん時かさ密度とフローパターンの関係を検討した結果次のことが分かった。

- (1) 粉粒体のフローパターンは容器内のかさ密度との関連が大きく、密充てんかさ密度の時にはファネルフロー型、疎充てんかさ密度の時にはマスフロー型となる。
- (2) マスフロー型からファネルフロー型へ移行するところでのフローパターンとかさ密度の関係は、フローパターンを容器の幅 L に対する粉粒体流動域の幅 a (または b) の割合 a/L (または b/L) で表現すると、 a/L (または b/L) と初期充てん時の空隙率との間に直線

関係が成り立つ。

(3) 同一容器内の高さ方向最大・最小かさ密度のバラツキの割合は、フローパターンがマスフロー型からファンネルフロー型へ移行するところで最も大きな値となる。

以上のように粉粒体のフローパターンを規定する要因の1つとして容器内のかさ密度が明らかになり、フローパターンの実験では、はじめに形成する粉体層の充てん状態を均一・一定にする試料の投入方法が重要であることが分かった。

今回の実験結果は一試料だけによるものであり、さらに容器の形状や排出口の巾が変わった場合のフローパタ

ーンを推定するまでにはいたっていない。今後はこれら残された課題についての実験をおこない、粉粒体プロセス上好ましい合理的なサイロ設計のための資料としていきたい。

なお初期充てんかさ密度を変化させた時のフローパターンの実験は M.B. SUGDEN 等^{12,13)}によってもおこなわれており、今回の実験結果と同様の傾向が報告されている。

実験の実施に当って多くの援助のあった西林秀雄君に末筆ながら謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 五十嵐：粉体工学研究会誌, 6, No. 3, 176 (1969)
- 2) 杉田：粉体工学研究会誌, 7, No. 6, 520 (1970)
- 3) Kotchanova, I.I. : *Powder Tech.*, 4, 32 (1970/71)
- 4) Nguyen, T. C. Berennen, R. Sabersky : *ASME AMD*, 31, 25 (1979)
- 5) 浅川, 神保：粉体工学研究会誌, 9, No. 3, 171 (1972)
- 6) 高木, 杉田：粉体工学会誌, 16, No. 9, 528 (1979)
- 7) 高木, 杉田：粉碎, 23, 15 (1978)
- 8) 上滝, 森山：粉体工学研究会誌, 14, No. 11, 609 (1977)
- 9) 森山, 早野, 上滝：粉体工学会誌, 18, No. 7, 507 (1981)
- 10) 綱川, 浅野, 青木：粉体工学研究会誌, 14, No. 9, 479 (1977)
- 11) 高木, 杉田：粉体工学会誌, 16, No. 5, 277 (1979)
- 12) Sugden, M.B. : *International Conf. on DESIGN OF SILOS FOR STRENGTH AND FLOW*, U.K. (1980, 9)
- 13) *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 40, 281 (1962)

Authors' Abstract

Relationship Between Porosity of Initial Packing and Flow-patterns

by

Fumito TAKAGI, Minoru SUGITA

(The Research Institute of Shimizu Construction Co.)

The correlation between initial bulk density and flow-patterns were investigated using a model bin. A two-dimensional rectangular bin (10 cm × 5 cm × 40 cm) was filled with Toyoura-sand, having a particle size of 105~297 μ .

The following results were found from the experiments:

- (1) The bulk density leads to the Mass-Flow type when loosely packed, and the funnel-flow type when closely packed
- (2) When the Mass-Flow type is transformed into the Funnel-Flow type, there is a linear relationship between the initial void ratio of a model bin and the rate of the flow region, which means the ratio of the width of the main (sub)-flowing region and the width of a model bin.
- (3) When the Mass-Flow type is transformed into the Funnel-Flow type, the difference between the maximum and the minimum bulk density in the vertical direction of the same model has a maximum value.

List of Figures and Tables

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

Fig. 2 Schematic Diagram of Rectangular Hopper.

Fig. 3 Experimental apparatus.

Fig. 4 Charging the Toyoura Sand from Rectangular Hopper.

Fig. 5 Relationship Between Rate of filling and Bulk Density.

Fig. 6 Model Bin of Measuring Bulk Density.
 Fig. 7 Correlation of Rate of Filling with Bulk Density and Height of Model Bin.
 Fig. 8 Example of Changes in Flow-patterns with initial Bulk Density. (From type A to type H.)
 Fig. 9 Two Types of fundamental Flow-patterns.
 Fig. 10 Example of Changes in Flow-patterns. (Type D and Type E.)
 Fig. 11 Example of Changes in Flow-patterns with Initial Bulk Density. (From type D to type E.)

Fig. 12 Flow-Pattern Model.
 Fig. 13 Correlation of Rate of Filling with b/L and Height of Model Bin.
 Fig. 14 Relationship Between porosity and a/L and b/L .
 Fig. 15 Relationship Between porosity and a/L .
 Fig. 16 Relationship Between Porosity and b/L .
 Fig. 17 Relationship Between Internal Friction Coefficient and b/L .
 Table 1 Outlet Plates and Average Rate of Filling.
 Table 2 Porosity and Internal Friction Coefficient

第19回粉体に関する討論会関係の他学会誌への掲載論文一覧

日本材料学会編『材料』第31巻348号

(9月号)掲載

論文

ZnO粒子の酸素拡散と欠陥構造

・白崎信一, 守吉佑介, 山村 博, 羽田 肇(無機材質研), 掛川一幸(千葉大), 眞鍋和夫, 小川 誠(東京工芸大)

$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の脱水物の粉体表面物性

金澤孝文, ・近沢正敏, 佐野雄二(都立大)

H_2 および H_2S 雰囲気中における MnO_2 還元の高温X線回折による研究

奥田悟志, 成富俊雄, ・上野晃史, 小寺嘉秀(豊橋技科大)

He-Neレーザによるカオリンおよび底泥の光散乱特性

・高坂彬夫, 高橋健一, 松田良弘(山形大), 二階堂清志(栗田工業)

電気抵抗法による2成分粒子系のランダムネスの推定(縁端効果について)

・吉村慶英, 藤原幸男(工学院大)

混合粉による圧縮成形体の密度と強度

・高橋 実, 鈴木 傑, 小林種雄, 荒木 規(名工大)

振動粉体の流動挙動と粒子特性

荒川正文(京大)

各種混合機の混合性能に及ぼす内部摩擦係数の影響

・寺下敬次郎, 大村秀夫, 宮南 啓(阪府大)
 水平回転円すい型容器による造粒と分粒の同時操作(製品粒度特性に及ぼすバインダー・粒子供給比の影響)

・杉本益規, 川上隆司, 中村恵威(富山大)

粉体粉末冶金協会編『粉体および粉末冶金』

第29巻5号掲載

研究論文

塩基性炭酸マグネシウムの熱分解と熱分解生成物の検討

宇津木弘(宇都宮大)

正誤表の掲載について

粉体工学会誌の研究報告, 参考資料, 総説等の正誤表を下記のように定期的に掲載します。

著者の皆様, よろしくご協力下さい。

No. 1~No. 6の分は, 同じVol. のNo. 9に掲載

原稿提出締切 毎年6月30日

No. 7~No. 12の分は, 次のVol. のNo. 3に掲載

原稿提出締切 毎年12月28日

原稿提出先: 粉体工学会, 編集事務局

〒606 京都市左京区田中関田町 2-7

思文閣会館33号