Author's abstract

Influence of Consolidation Stress upon Yield Loci of Cohesive Powders

by

Hiroshi TSUNAKAWA

(Dept. of Chem. Eng., Yokohama National University, Tokiwadai,
Hodogaya-ku, Yokohama.)

In order to study an influence of a consolidation stress upon yield loci of powders, a family of reduced yield loci and their corresponding voidages were measured by a constant volume direct shear tester over a consolidation stress range of 10 to 350 gf/cm². The reduced locus was directly drawn in the plane of the shear and normal stresses as the coordinate axes reduced respectively by a factor of corresponding consolidation stress. The Warren Spring equation was also rewritten by the reduced shear and normal stresses. The reduced Warren Spring equation included a shear index, a ratio of a cohesive to a tensile stress and an effective angle of internal friction at steady state failure as parameters. The values of these three parameters were determined from the reduced locus experimentally obtained. In the range of consolidation stress 10 to about 150 gf/cm² the three parameters decreased with a decrease in the voidage, but in the range of 150 to 350 gf/cm² they did not change without change in the voidage.

A relationship between the unconfined yield stress and the major consolidation stress was found to be superior in an estimation of the flowability of powder to Jenike's failure function which was available only in a limited case when the parameter values were characteristic of the powder.

研究報告

単一段流動層の動特性*

——オリフィスを付備した溢流管形式および外孔板形式の場合——

Dynamic Characteristics for a Single-Stage Fluidized Bed—Types of Fluidized Bed both without and with a Downcomer Equipped with an Orifice—

田中 勇 武** 石 蔵 利 文***
Isamu Tanaka Toshifumi Ishikura

杉 正 浩**** 篠 原 久*****
Masahiro Sugi Hisashi Shinohara

緒 言

流動層において、熱効率や反応率を向上させるため

に、層を多段化することが考えられる。しかし、粉粒体の流動化状態は、複雑に変化するため、多段流動層では、しばしば定常操作ができなくなる。このため、いかなる場合にこの状態が現出するか、さらに、操作条件が変動した場合の動特性を定量的に把握することは、多段流動層を設計する際にもっとも重要となる。

前報²⁻⁴⁾において、典型的な多段流動層と考えられる、溢流管なしの多孔板形式および溢流管形式の多段流動層を用いて、定常的に粉粒体が流動する領域（安定操作領域）について実験的に検討し、各形式のこの領域における各段の流動特性は、ほぼ同一であることを明らかに

昭和54年3月5日受付

* 化学工学協会第42年会 (1977. 4 広島) および同学部大会にて発表

** 産業医科大学医学部労働衛生工学科

(〒807 北九州市八幡西区医生ヶ丘1の1) TEL 093-603-1611

*** 福岡大学工学部化学工学科

(〒814 福岡市西区七隈11) TEL 092-871-6631

**** 三井石油化学(株)岩国工場

(〒740 山口県玖波郡和木町字扇洲1143) TEL 0827-22-4111

***** 九州大学工学部化学機械工学科

(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1) TEL 092-641-1101

し、さらに、粒子排出速度について、実験整理式を提示した。

本報では、層を多段化しても各段の流動特性には顕著な差異が認められなかった前報^{2,4)}の結果から、多段流動層における動特性を検討する第一歩として、単一段流動層を用いて、実験的に調べた。流動化状態は、前報^{2,4)}で明らかにされた安定操作領域の範囲内に限定し、粒子群の供給速度がステップ状に増加あるいは減少した場合の粒子群の排出速度の応答特性について検討した。

さらに、前報^{2,4)}で得られた安定操作領域における定常状態での粒子群の排出速度に関する実験整理式を基にして、粒子群の供給速度がステップ的に変化した場合の粒子排出速度に対する過渡応答特性の推算式を導出し、実験値と比較検討した。

1. 理論

1.1 溢流管がない多孔板形式流動層

単一段流動層において、 F をステップ状に増加させた場合の流動化状態の推移を定性的にFig.1に示す。 $t \leq 0$ で、空塔ガス速度 u_1 、粒子の供給速度 F_1 の場合、流動層中の粒子保有量 W および粒子の排出速度 D は、それぞれ W_1 、 F_1 で一定となり、定常操作されている(Fig.1-a)。今、 F_1 から F_2 へ供給速度をステップ的に増加させると、 D は F_1 から F_2 へただちに反応できず、 W が次第に増加する(Fig.1-b)。ある時間が経過すると D が F_2 に等しくなり、 $W = W_2$ で定常状態となる(Fig.1-c)。 $F_1 \rightarrow F_2$ の変化に伴って、 W が増加するため、 u_1 は多少低くなるが、本実験範囲内では、 u_2/u_1 は、高々1.03であり、 u は、ほぼ一定とみなせる。ステップ的に減少する場合も上述と同様な経過をたどる。Fig.1-bにおける物質収支から次式を得る。

$$dW(t)/dt = F_2 - D(t) \quad \dots\dots(1)$$

前報⁴⁾で得られた定常状態における粒子排出速度に関

Fig. 1 F のステップ状変化による各変数間の関係 (多孔板形式流動層の場合)

する実験整理式は、Eq.(2)で示される。

$$F/F_g = 6.0 \times 10^{-4} (Wg/A) / \left\{ \frac{\rho}{2} (u/m)^2 \right\} \quad \dots\dots(2)$$

Eq. (2)が、非定常時の各時刻においても成立すると仮定すれば、次式を得る。

$$D(t)/F_g = 6.0 \times 10^{-4} (W(t)g/A) / \left\{ \frac{\rho}{2} (u/m)^2 \right\} \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 F_g は重力落下時における分散板からの粒子の排出速度*、 m は、分散板の開孔比を示す。

Eq. (3)中、 u も時間の関数と考えられるが、本実験範囲内では、 u の変動はわずかであるので、ほぼ一定とみなすと $D(t)$ は、次式で示される。

$$D(t) = kW(t) \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{ただし } k = 6.0 \times 10^{-4} F_g g / (\rho A u^2 / 2 m^2)$$

Eqs.(1), (4)から

$$dD(t)/kdt + D(t) = F_2 \quad \dots\dots(5)$$

$$(D(t) - F_1)/(F_2 - F_1) = 1 - e^{-t/T_f} \quad \dots\dots(6)$$

$$\text{ただし } T_f = 1/k = \rho A u^2 / 1.2 \times 10^{-3} F_g g m^2 \quad \dots\dots(7)$$

1.2 オリフィスを付備した溢流管形式流動層

単一段流動層において、 F をステップ的に増加させた場合の流動状態の推移を定性的にFig.2に示す。Fig.2-aの定常状態にある流動層において、 F_1 から F_2 へステップ状に増加させると、溢流管の排出口高さ l が一定であるた、 ΔP 、 W ほとんど変化せず、 u もほぼ一定値を保つ。一方、溢流管内の粒子群は、移動層状態で下方へ移動していることが前報^{1,2)}で明らかにされている。 $F_1 \rightarrow F_2$ と変化すると、 D は F_1 から F_2 へ瞬時に反応できず、溢流管内の粒子保有量 w 、すなわち、溢流管内の粒子層高 L が時間とともに増加する(Fig.2-b)。ある時間経過すると D は F_2 となり、 $w = w_2$ 、 $L = L_2$ で定常状態になる(Fig.2-c)。ステップ的に減少する場合にも上述と同様な経過をたどる。Fig.2-bにおける物質収支から次式を得る。

* F_g は、多孔板の孔が各々独立した1個のオリフィスとみなし、1個のオリフィスから排出される粒子の速度 F_0 ⁵⁾の孔数 n 倍に相当するとして、次式から算出した。

$$F_g = 0.24 \sqrt{g} (D_0 - D_p)^{2.5} \rho_s \cdot n$$

Fig. 2 F のステップ状変化による各変数間の関係
(溢流管形式流動層の場合)

$$dw(t)/dt = F_2 - D(t) \quad \dots\dots(8)$$

溢流管内の粒子層高 L を用いて Eq.(8) を表わすと

$$k' dL(t)/dt = F_2 - D(t) \quad \dots\dots(9)$$

$$\text{ただし, } w(t) = \rho_s(1 - \varepsilon) A_d L(t) = k' L(t)$$

前報^{1,2)} で得られた定常状態における 粒子群の排出速度に関する実験整理式を Eq.(10) に示す。

$$(F_0 - F)/F_0 = 0.53(\Delta P/\gamma L)(D_d/D_0)^{1.8} \quad \dots\dots(10)$$

過渡状態における任意の時刻においても, Eq.(10) が成立すると仮定すれば, 次式を得る。

$$(F_0 - D(t))/F_0 = 0.53(\Delta P/L(t)\gamma)(D_d/D_0)^{1.8} \quad \dots\dots(11)$$

上式において, $X(t) = F_0 - D(t)$, および時間に独立な因子を K' で示すと次式をうる。

$$X(t)/F_0 = K'/L(t) \quad \dots\dots(12)$$

$$\text{ただし, } K' = 0.53(\Delta P/\gamma)(D_d/D_0)^{1.8}$$

Eqs. (9), (12) から, 次式が導出される。

$$\ln \frac{X}{|X - X_2|} - \frac{X_2}{X} = \frac{X_2^2}{k' K' F_0} t + \ln \frac{X_1}{|X_1 - X_2|} - \frac{X_2}{X_1} \quad \dots\dots(13)$$

$$\text{ただし, } X_1 = F_0 - F_1, X_2 = F_0 - F_2$$

Eq.(13) は, 単一段流動層に関する過渡応答特性の推算式であるが, 多段化した際に複雑な計算となるため, ここでは, Eq.(13) を 1 次おくれ系で近似できると仮定し, 次式で表わした。この式の妥当性については, 実験的に確かめる。

$$(D(t) - F_1)/(F_2 - F_1) = 1 - e^{-t/T_m} \quad \dots\dots(14)$$

ただし, 時定数 T_m は, Eq.(13) において $(D(t) - F_1)/(F_2 - F_1) = 0.632$ になるように選ばれ, 各実験において流動層圧損 ΔP , 粒子種類 (ρ_s, D_p, ε), 溢流管の幾何形状 (D_0, D_d), F_0^* , F_1, F_2 が定まるので計算から求まる。

2. 実験装置および実験方法

多孔板形式流動層の実験装置を Fig.3-a に示す。塔径は 106mmφ のアクリル製であり, 分散板は厚さ 1mm の真鍮製で孔径, 孔数の異なる 2 種類のものを用いた。

オリフィスを付備した溢流管形式流動層の実験装置を Fig.3-b に示す。塔径は 106mmφ のアクリル製であり, 溢流管は, 内径 24mmφ, オリフィス径が 9, 10mmφ の 2 種類を付備した厚さ 1mm の真鍮製を用い, 流動層の分散板としては, 流動化粒子が多孔板孔からもれないように, 孔径 1.5mmφ, 厚さ 1mm の真鍮板を用いた。

Fig.3-c は, Fig.3-b の実験を模擬できるように工夫

- ①ホッパー ②粒子供給オリフィス板 ③粒子分散器
④多孔板 ⑤溢流管 ⑥マンメーター ⑦捕集ビン

Fig. 3 実験装置概略図

(a)多孔板形式流動層の場合 (b)溢流管形式流動層の場合 (c) (b)の装置を簡略にした場合

* F_0 は次式⁵⁾から算出した。 $F_0 = 0.24\sqrt{g}(D_0 - D_p)^{2.5}\rho_s$

された簡易装置であり、Fig.3-b中の流動層部における流動化粒子をなくすことによって、溢流管内の粒子群の挙動が観察できるようになっている。実験に用いた溢流管は、内径24mm ϕ のアクリル製であり、その下部に厚さ1mmの真鍮製で6,7mm ϕ の2種類のオリフィスを付備したものを用いた。

分散板あるいはオリフィス板上で静電気が発生すると粒子群の排出に影響をおよぼすので、これら真鍮板はすべてアースされている。

実験は、粒子供給速度 F_1 を一定に保ち、 D が F_1 になっていることを確認した後、 F_1 を F_2 にステップ状に変化させた。 F の変化は、Fig.3中の①のホッパー下部にとりつけてある粒子供給用オリフィス板②をスライドさせた。オリフィス板には、粒子の供給速度が各々、 F_1 、 F_2 になるような径の孔が2個あけられており、この孔径をすばやくスライドさせて現出させた。この時を $t=0$ として、その後、多孔板形式の場合、20~40秒間隔で、溢流管形式の場合5~10秒間隔で、排出粒子を採取し、秤量した。なお、 F_1 および応答の最終平衡値である F_2 において定常状態になっていることを確かめるため、多孔板形式の場合Eq.(2)を、一方、溢流管形式の場合*、Eq.(4)を満足していることを確認した。

実験に用いた流動化粒子はガラスビーズ(80~100 μ シユ、 $D_p=154\mu\text{m}$ 、 $\rho_s=2.50\text{g/cm}^3$ 、 $u_{mf}=2.2\text{cm/s}$)である。

3. 実験結果および考察

3.1 多孔板形式流動層の動特性

定常状態における多孔板形式流動層の場合、3つの異なる流動化状態が存在することを明らかにした⁴⁾。この領域の広さは、分散板の種類、粒子の種類、および F に

Fig. 4 多孔板形式における安定操作領域

*Fig.3-bの装置では、 L の測定が不可能であるため、この確認は、Fig.3-cの装置のみで行なった。

よって異なり、本研究で用いた分散板についての流動様式をFig.4に示す。それぞれの領域における観察による

Fig. 5 F のステップ状変化による過渡応答曲線 (多孔板形式の場合、 $D_0=6$, $P=16$, $n=29$, $m=0.093$)

Fig. 6 F のステップ状変化による過渡応答曲線 (多孔板形式の場合、 $D_0=7$, $P=18$, $n=20$, $m=0.083$)

流動化状態は前報⁴⁾と同様である。安定な流動層を形成させるための領域（B領域）は比較的狭いことがわかる。また、粒子供給速度が大きくなるとその領域は、極端に狭くなる傾向もみられる。動特性を調べる際には、B領域内で F をステップ状に変化させた。本研究で動特性を調べた実験操作位置を図中の縦実線で示している。その結果をFig.5～Fig.6に示す。図中の各実線は、Eq.(6)から算出された理論応答曲線を示す。 F_1, F_2 が1.45≐2.6g/secと定常値に比較して大きな変動幅にすると、過渡応答の推算値よりも実測値の応答が速くなる傾向がみられる。このことは、変動幅が大きくなると、過渡応答の各時刻において、Eq.(3)が成立するという仮定が成立しなくなり、その時刻より前の状態の影響を受けると考えられる。他の実験値については、ほぼ推算値と一致している。分散板の種類を変化させても、その分散板に対応した時定数 T_f をEq.(7)から算出すれば、推算式は、ほぼ実験値と一致することがわかった。

3.2 溢流管形式流動層の動特性

定常状態において二つの流動様式が存在することを明らかにした²⁾。その一つは安定な流動層を形成する領域であり、他の一つは、上段の流動層に粒子が蓄積するフラッシング領域である。本実験で用いた溢流管での流動様式をFig.7に示す。図中、D領域が安定な流動層を形成する領域、E領域はフラッシング領域を示す。フラッシングは、溢流管中の粒子層高さが溢流管長さ l よりも高くなる時に生じる²⁾ので、DとE領域との境界線は、Eq.(10)において、 $L=l$ の時の値で、溢流管の幾何条件(D_d, D_o, l)、粒子種類(ρ_s, D_p)を代入して算出された線である。 ΔP が大きくなると、流動層を定常的に操作できる F の範囲が狭くなることがわかる。本研究で動特性を調べるための実験操作位置を図中の縦実線で示してい

Fig. 7 溢流管形式における安定操作領域

Fig. 8 F のステップ状変化による過渡応答曲線（溢流管形式の場合）

Fig. 9 F のステップ状変化による過渡応答曲線（溢流管のみの場合）

る。その結果をFig.8に示す。図中破線はEq.(13)、実線はEq.(14)による推算値を示す。ほぼ推算値と実験値とは一致していることがわかる。また、破線と実線とは、顕著な差異がみられず、Eq.(14)による1次おくれ系の近似は、ほぼ妥当であると考えられる。

次に、溢流管のみの動特性をFig.3-cの装置を用いて調べた結果をFig.9に示す。Eqs.(13), (14)から算出された

推算値と実験値とは、ほぼ一致している。Figs. 8, 9からオリフィスを付備した溢流管形式流動層においては、流動化粒子層の有 (Fig. 8) 無 (Fig. 9)にかかわらず、時定数 T_m は、同一の推算式で算出できることから、Fig. 3-b は、Fig. 3-c の装置で模擬できることがわかる。このことから、溢流管形式の流動層における動特性は、溢流管内の粒子群の挙動によって支配されていると考えられる。

3.3 多孔板形式流動層と溢流管形式流動層の動特性の比較

Figs. 5, 6 および 8 を比較することにより、 F が変動した場合の粒子の排出速度の応答性は、溢流管形式の方が短いことがわかる。しかしながら、Figs. 4, 7 からわかるように、各流動層の安定操作領域が異なっており、どちらの流動層がすぐれているとは断定し難いが、供給速度に変動がある場合の操作においては、オリフィスを付

備した溢流管形式の方が有利と考えられる。

結 言

多段流動層において、粒子供給速度がステップ的に変化した場合の粒子排出速度の応答性を調べるための第一歩として、単一段流動層を用いて、実験的、理論的に検討し次の結果を得た。

(1) 溢流管のない多孔板形式およびオリフィスを付備した溢流管形式の流動層における応答特性は、ともに近似的に 1 次おくれ系で示される。

(2) 各形式の時定数は、前報^{1,2,4)}の実験整理式から推算できることが認められた。

(3) オリフィスを付備した溢流管形式の流動層における時定数は、多孔板形式の流動層における値よりも短いことがわかった。

Nomenclature

A, A_d, A_o : cross-sectional area of column, downcomer and orifice, respectively	[cm ²]	ΔP : pressure drop	[G/cm ²]
D : discharge rate of solid particles	[g/s]	P : pitch of holes in perforated plate	[mm]
D_d, D_o, D_p : diameter of downcomer, orifice and particle, respectively	[mm]	t : time	[s]
F : feed rate of solid particles	[g/s]	T_f, T_m : time constant, respectively	[s]
F_o, F_o : discharge rate of solid particles through holes in a perforated plate and an orifice in the case of gravitational flow, respectively	[g/s]	u : superficial air velocity based on empty column	[cm/s]
g : gravitational acceleration	[cm/s ²]	u_{mf} : minimum fluidizing velocity	[cm/s]
K' : coefficient of Eq.(2)	[1/cm]	u_{max}, u_{min} : maximum and minimum superficial air velocity for stable operation region, respectively	[cm/s]
k : coefficient of Eq.(4)	[1/s]	W : hold up of fluidized bed	[g]
k' : coefficient of Eq.(9)	[g/cm]	w : hold up of moving bed	[g]
L : moving bed height	[cm]	γ : specific weight ($\gamma = \rho_s g/g_c$)	[G/cm ³]
l : length of downcomer	[cm]	ε : void fraction in moving bed	[-]
l' : length of fluidized bed	[cm]	ρ, ρ_s : fluid and solid density	[g/cm ³]
m : opening ratio of perforated plate	[-]	Subscripts	
n : number of holes in perforated plate	[-]	1: steady state before change	
		2: steady state after change	

Literature cited

- 1) Tanaka, I., N. Yoshihara and H. Shinohara : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **4**, 238(1978)
- 2) Tanaka, I., M. Yamaguchi and H. Shinohara : *ibid.*, **4**, 317 (1978)
- 3) Tanaka, I., Y. Hashimoto and H. Shinohara : *ibid.*, **4**, 320(1978)
- 4) Tanaka, I., T. Ishikura, A. Uchiyama and H. Shinohara : *ibid.*, **5**, 397(1979)
- 5) Yagi, S. and I. Muchi : *Kagaku Kogaku*, **19**, 158 (1955)

Authors' Abstract

Dynamic Characteristics for a Single-Stage Fluidized Bed-Types of Fluidized Bed both without and with a Downcomer equipped with an Orifice-

by

Isamu TANAKA* and Toshifumi ISHIKURA** and Masahiro SUGJ*** and Hisashi SHINOHARA ****

(*Department of Environment Health Engineering, University of Occupation and Environment Health)

(**Department of Chemical Engineering, Fukuoka University)

(***Mitsui Petro. Chemical Industries Company)

(****Department of Chemical Engineering, Kyushu University)

For the continuous operation in a multi-stage fluidized bed, it is important to find the region of the operating conditions for stable fluidization and the dynamic characteristics in this region.

In this work, the dynamic characteristics of a simple apparatus, that is, a single-stage fluidized bed is investigated instead of a multi-stage one. The types of a single-stage fluidized bed used are the fluidized bed both without and with a downcomer equipped with an orifice.

The transient responses for the discharging rate of solid particles are examined, when the feed rate of solid particles is changed stepwise. The fluidized particles used is glass beads ($D_p=154\mu\text{m}$, $\rho_s=2.50\text{ g/cm}^3$, $u_{mf}=2.2\text{ cm/s}$). The transient responses for the discharge of solids are estimated by developing from the experimental correlations in steady states. The estimated values are agreement with the experimentally measured transients.

It is found that the transient responses in both types of fluidized beds can be shown approximately by the first order lag. The time constant in a fluidized bed with a downcomer equipped with an orifice is recognized to be shorter than that without a downcomer.

List of Figures

Fig. 1 Transients of $D(t)$, $W(t)$ and $u(t)$ by stepwise change of F

(the case of fluidized bed without downcomer)

Fig. 2 Transients of $D(t)$, $W(t)$ and $u(t)$ by stepwise change of F

(the case of fluidized bed with downcomer equipped with an orifice)

Fig. 3 Experimental apparatus

①Hopper ②Orifice ③Distributor ④Perforated plate ⑤Downcomer ⑥Manometer ⑦Reservoir

(a) fluidized bed without downcomer

(b) fluidized bed with downcomer

(c) simple apparatus instead of a single-stage fluidized bed shown in Fig.3-b

Fig. 4 Stable operation region in the fluidized bed without downcomer

Fig. 5 Transient response curve by stepwise change

of F

(the case of fluidized bed without downcomer, $D_0=6$, $P=16$, $n=29$, $m=0.093$)

Fig. 6 Transient response curve by stepwise change of F

(the case of fluidized bed without downcomer, $D_0=7$, $P=18$, $n=20$, $m=0.087$)

Fig. 7 Stable operation region in the fluidized bed with downcomer equipped with an orifice

Fig. 8 Transient response curve by stepwise change of F

(the case of fluidized bed with downcomer equipped with an orifice)

Fig. 9 Transient response curve by stepwise change of F

(the case of downcomer equipped with an orifice)