プラグの自然的な形成段階におけるプラグ臨界長さ

Critical Plug Length at Natural Plug Formation

武居 昌宏*, 越智 光昭*, 高部 洋一*

Masahiro TAKEI*, Mitsuaki OCHI*, Youichi TAKABE*

Critical plug length at the stage of natural plug formation have been experimentally and theoretically obtained by measuring the length and establishing a deformation model of plug flow. As a result, the measured plug length has been in reasonable agreement with the plug length calculated from the model. The plug length were measured on condition that pipeline was 38mm in diameter and 25m long, particles were 1.5mm diameter polythylene pellets, and the supply particle flow rate was 0.21kg/s. The aim of this study is to obtain the critical plug length by means of an accurate deformation model when a plug generated and transported in a pipeline. The previous studies have mainly focused on pressure loss calculated from a simple plug model that neglects the plug deformation and consists of only one main body. The deformation model considers the generation and development of a plug. Next it considers an accurate plug shape with three parts: front, main body and rear. The generated plug with three parts develops until the critical length by the balance between knematic energy and energy losses of the particles. The energy losses result from momentum loss caused by accelerating the stationary layer to the plug flow velocity in the front part, and friction drags acting on inter - particles and pipeline inner wall in the main body.

Key Words : Plug, Plug Length, Pipeline, Pneumatic Transport

1. 緒 言

粉粒体の空気輸送においては、輸送効率が高く混合比を大きくできるなどの利点により、プラグ輸送が多く利用されるようになってきた。このようなプラグ輸送においては、そのプラグ形成方法にいくつかの方法が提唱されており、その中でも、1) モーノポンプ(一軸偏心ポンプ)によりプラグを形成させる方法^{1, 2)}, 2) 輸送管に断続的な空気流を供給し、閉塞した粉粒体を直接的に加圧してプラグを形成させる方法³⁾, 3) 二重管から圧縮空気⁴⁾ やエアナイフ⁵⁾ などの、2次的な空気流を供給してプラグを形成させる方法、4) 粒子供給部後方から圧縮空気を送り、補助的な手段を使わずにプラグを自然的に形成させる方法などがある。これらの方法の中でも1) ~ 3) の方法はプラ

グを強制的に形成させる方法であり、そのプラグの特性については現在まで多くの論文が発表されている⁶⁻⁹⁾。

一方、4) のプラグを自然的に形成させる方法においては、ロータリーバルブなどの定量供給装置との併用ができ、また2次的な空気供給装置が不必要であるため、汎用性が非常に高いといった利点がある。そして、このような方法では、プラグを強制的に形成させるのではなく自然的に形成させており、すなわち、長さが非常に短い初期プラグの発生と、その初期プラグがプラグ臨界長さまで発達するといった過程をたどり、他の三つの方法とは異なるプラグ形成過程を踏んでいる。そのため、この方法による自然的に形成されたプラグのプラグ特性に関する論文については、現在まであまり多く見られない。

一方、前記の1) ~ 3) の方法においては、そのプラグの流動特性を把握するために、圧力損失を実験的および理論的に検討することに主眼がおかれており、そのプラグの構成モデルとしては、矩形をした本体のみの単純なプラグモデルを用いている場合が多く、本研究のように長さを理論的に求めようとする場合、こ

1997年1月6日受付
粉体工学会技術討論会第32回(1997年6月、東京)にて一部発表
*日本大学理工学部機械工学科
(〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8-14) TEL03-3259-0749
Dept. of Mech. Eng., College of Sci & Tech., Nihon Univ.,
(1-8-14 Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101)

Table Properties of polyethylene pellet (PEP)

Mean diameter	Bulk density	Angle of internal friction	Internal cohesion force	Angle wall friction	Wall cohesion force
d	ρ	ϕ	c	ϕ_w	c_w
1.54mm	542kg/s	0.14rad	28.2Pa	0.12rad	16.5Pa

Fig. 1 Experimental equipment

Fig. 2 Relation between air pressure and plug velocity

のような単純なプラグモデルでは満足な結果が得られない。

そこで、本研究においては、補助的な手段を使わずに自然的に形成されるプラグについて、実験的にプラグ臨界長さを測定し、さらに、一つのプラグを前部・本体部・後部と三つの部分からなるプラグモデルを考え、各部分におけるエネルギー損失を考慮し、プラグ臨界長さを理論的に検討し、両者の値について比較検討を行った。

2. 実験

2.1 実験装置

実験装置は **Fig. 1** に示すように、管内径 38mm 全長 25m の鋼管路、ブロータンク、レシーブタンク、バグフィルター、粒子を管路に供給するロータリーバルブ、およびコンプレッサーからなる。管路は直管部 10m、鉛直部 5m、直管部 10m の全長 25m で、各ベンド部にはベンド半径 300mm のベンド管を備えている。粒子供給部から下流側 3.4m 離れた管路の一部はアクリル管とし、その位置にはプラグ撮影のための

Fig. 3 Relation between air pressure and plug length

カメラおよびストロボを配置した。

2.2 実験方法および条件

ブロータンク下端に配置したロータリーバルブの回転周波数を 60Hz、粒子供給量 M_s を 0.21kg/s とし、管路上方から混相室内に粒子を供給した。圧縮空気はコンプレッサーから一度エアチャンバー内に貯蔵された後、減圧弁で所定の圧力に設定して、粒子供給部後方から管路内に供給した。

減圧弁の設定圧を、 $P_r = 68.7, 78.5, 88.3, 98.1$ kPa とし、各減圧弁設定圧 P_r に対して、プラグ移動速度 U_p 、プラグ長さ l_m 、プラグ間の空気長さ l_a 、およびプラグピッチ $l_m / (l_m + l_a)$ を、カメラ（シャッタースピードを 0.25 秒）とストロボ（240rpm）により撮影した写真をもとに測定した。各減圧弁設定において、それぞれ 100 枚ずつ写真を撮影しその平均値を求めた。プラグ移動速度については、写真上のプラグの残像をもとに移動距離を算出し、その距離をシャッタースピードで除して求めた。プラグの長さについては、前部・本体部・後部からなるプラグにおいて、本体部の長さをプラグ長さとして定義した。

用いた粒子は、粒径 1.5mm のほぼ球形のポリエチレンペレット（PEP）で、その密度、内部摩擦角、内部動摩擦角、内部粘着力、壁面動摩擦角および壁面粘着力は、**Table** の通りである。

2.3 実験結果

減圧弁設定圧 P_r に対するプラグ移動速度 U_p は **Fig. 2** に示す通りであり、空気圧に比例してプラグ移動速度は速くなる傾向がある。減圧弁設定圧とプラグ長さ l_m

Fig. 4 Relation between air pressure and air length

Fig. 5 Relation between air pressure and plug pitch

Fig. 6 Plug generation and development

の関係は Fig. 3 に示す通りであり、空気圧に比例してプラグ長さは長くなる傾向がある。

二つのプラグ間の空気長さ l_a 、およびプラグピッチ $l_m / (l_m + l_a)$ は、Figs. 4 および 5 に示した通りである。これらの図より、二つのプラグ間の空気長さは、空気圧に比例して短くなる傾向があり、またプラグピッチは、空気圧に比例して増加する傾向がある。

3. 考 察

実験で測定したプラグは、粒子供給部近傍の管路内で、プラグの形成過程と発達過程を経てプラグの臨界長さに到達したものと思われる。そこで、このプラグの臨界長さに関する計算を行う準備として、実験と同様の条件でプラグ移動速度 0.8 m/s ($P_r = 78.5 \text{ kPa}$) における混相室付近の管路に対して、0.28 秒間隔で連続写真を撮影し、プラグの形成および発達過程を観察した。

Fig. 6 ①は、粒子供給部直後の管路内において、粒子が堆積し管内を閉塞し初期状態のプラグが形成した

ところを示している。そして、Fig. 6 ②③④に示した通り時間が経過すると、その初期状態のプラグは次第に長くなり、ついには、プラグ臨界長さまで成長し (Fig. 6 ⑤)、その長さはほぼ保たれ輸送される。

すなわち、プラグが自然的に形成される場合は、粒子供給部近傍の管路内において、粒子の堆積、初期プラグの形成、およびプラグの発達過程を経て、プラグの臨界長さまで到達して輸送されることがわかる。

4. 近似解析

4.1 プラグの近似的な長さ

前記の Fig. 6 に示したプラグの形成発達モデルを基にして、プラグ臨界長さを近似的に計算し実験値との比較検討を行った。従来のプラグ長さを計算する上で、基本となるプラグの圧力損失の計算方法においては、プラグを前部と後部を除いた単純な剛体状のプラグモデルで考えて、圧力損失を計算している場合が多い¹⁰⁾。

本研究においては、プラグを前部、本体部、後部の

Fig. 7 Forces acting in a plug

三つの部分からなるプラグモデルを考え、前部では粒子の加速損失を考慮し、本体部では管壁と内部損失エネルギーを考慮した。

プラグ前部直前の堆積層内の粒子の持つ運動エネルギーと、プラグ前部、本体部および後部におけるエネルギー損失との釣り合いから、プラグの臨界長さ \$l_m\$ は、

$$l_m = \frac{\rho U_1^2 - 2\Delta E_f - 2\Delta E_r}{2\Delta E_{mw} + 2\Delta E_{mi}} \quad (\text{m}) \quad (1)$$

となる。ここで、\$\Delta E_f\$ はプラグ前部におけるエネルギー損失、\$\Delta E_{mw}\$ はプラグ本体部における壁面摩擦を起因としたエネルギー損失、\$\Delta E_{mi}\$ は本体部における内部摩擦に起因したエネルギー損失、\$\Delta E_r\$ はプラグ後部におけるエネルギー損失であり、\$U_1\$ はプラグ直前の堆積層内の粒子のプラグ移動速度に対する相対速度であり、\$\rho\$ は粒子の密度である。次からの節において、Eq.(1) の各エネルギー損失を算出する。

4.2 プラグ本体部におけるエネルギー損失

Fig. 7 に示したように、ひとつのプラグ本体部に作用する力には、空気の圧力 \$P\$、圧力差により生じる軸応力 \$\sigma\$、その軸応力により生じるせん断応力 \$\tau_t\$、プラグと管壁との間に働く粘性摩擦抵抗 \$\tau_t\$、および、重力 \$\rho g\$ が考えられる。プラグの進行方向への移動速度が一定であると仮定すると、プラグ本体部におけるエネルギー損失は、プラグと管壁との間に作用する粘性摩擦抵抗 \$\tau_t\$ と、プラグ前後の圧力差によりプラグ本体に作用する軸応力 \$\sigma\$ とに起因する。そこで、プラグと管壁との間に作用する粘性摩擦抵抗によるプラグ本体における単位長さあたりのエネルギー損失 \$\Delta E_{mw}\$ は、

$$\Delta E_{mw} = \frac{f_p v_m^2 \rho}{2D} \quad (\text{Pa/m}) \quad (2)$$

となる。ここで、\$f_p\$ は管摩擦係数、\$v_m\$ はプラグ構成粒子の速度である。

また、Fig. 8 に例示したモールの応力円によると、

Fig. 8 Mohr's circle diagram

圧力差によりプラグ本体に作用する軸応力 \$\sigma\$ によるプラグ本体部のエネルギー損失 \$\Delta E_{mi}\$ は、

$$\Delta E_{mi} = \left[2\mu_w \rho g + \frac{4}{D} (\mu_w (K_w + 1) \times c \cdot \cos \phi \cos (\gamma + \phi_w) + c_w) \right] \quad (\text{Pa/m}) \quad (3)$$

となる¹¹⁾。ここで、

$$K_w = \frac{1 + \sin \phi \cos (\gamma + \phi_w)}{1 - \sin \phi \cos (\gamma + \phi_w)} \quad (4)$$

$$\sin \gamma = \frac{\sin \phi_w (\sigma_m + c_w \cot \phi_w)}{\sin \phi (\sigma_m + c \cdot \cot \phi)} \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

であり、\$\mu_w\$ は壁破壊包絡線の傾きを表す。

4.3 プラグ前部におけるエネルギー損失

プラグ前部の直前にある堆積層はプラグの進行と同時にプラグ先端に吸収され、そこにある粒子はプラグ移動速度 \$U_p\$ にまで加速される。プラグ前部における圧力損失は、ほとんどがその加速の際の運動量損失に起因している。この運動量損失は Fig. 9 に示したプラグモデルを用いることにより求める。

この図において \$S_1\$ 面はプラグ前部直前の管断面を示し、また、\$S_2\$ 面はプラグ前部の再後端の管断面を示す。\$U_1, U_2\$ はそれぞれ \$S_1, S_2\$ 面における粒子のプラグ移動速度に対する相対速度を示し、また、\$P_1\$ は \$S_1\$ 面の堆積層部分の中心における圧力を、\$P_2\$ は \$S_2\$ 面における管の中心における圧力をそれぞれ示している。\$S_1\$ 面と \$S_2\$ 面との間に運動量保存則を適用すると、

$$(p_1 - p_2) A_2 = \rho U_2 A_2 \cdot U_2 - \rho U_1 A_1 \cdot U_1 \quad (7)$$

となる。ここで、移動するプラグの系から各プラグ構成粒子の動きを考えた場合、プラグ内部において粒子

Fig. 9 Symbols definition in coordinate from plug system

に関する連続の式 $U_1 A_1 = U_2 A_2$ を適用すると、Eq. (7) は、

$$p_1 - p_2 = \rho U_2 (U_2 - U_1) \quad (8)$$

となる。また、 S_1 面と S_2 面にエネルギー保存則を適用すると、プラグ前部におけるエネルギー損失 ΔE_f は、

$$\Delta E_f = (p_1 - p_2) + \rho (U_1^2 - U_2^2) \quad (\text{Pa}) \quad (9)$$

となる。ここで Eq. (8) を Eq. (9) に代入すると、 ΔE_f は、

$$\Delta E_f = \rho U_1^2 \left[\frac{A_1}{A_2} - 1 \right] \left[\frac{A_1}{A_2} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \right] \quad (\text{Pa}) \quad (10)$$

となる。ここで、

$$A_1 = \sin^{-1} \left[\frac{2\sqrt{(D-H_s)H_s}}{D} \right] \cdot \left[\frac{D^2}{4} - 2\sqrt{(D-H_s)H_s} \left[\frac{D}{2} - H_s \right] \right] \quad (\text{m}^2) \quad (11)$$

であり、 A_1 はプラグ前部直前の堆積層の断面積、 A_2 は管の断面積を表す。

4.4 プラグ臨界長さの計算

本研究においては、プラグ後部ではエネルギー損失を無視できるとし、 ρ 、 ϕ 、 c 、 ϕ_w および c_w は Table より得られる値を用いる。また前記の Fig. 6 より管内径 $D = 38\text{mm}$ 、堆積層の厚さ $H_s = 17\text{mm}$ が与えられており、さらに堆積層における絶対速度は 0 であり、

Fig. 10 Calculated critical plug length

また S_2 面におけるプラグ構成粒子の絶対速度が v_m であることから、 $U_1 = U_p$ 、 $U_2 = U_p - v_m$ と仮定する。 f_p はポリエチレンペレットに対して一般的に用いられている値 0.3 を使った。Eqs. (2), (3), (10) を Eq. (1) に代入して計算したプラグ臨界長さ l_m は Fig. 10 の①のグラフの通りとなる。一方、前部のエネルギー損失 ΔE_f を無視した場合のプラグ臨界長さ l_m は Fig. 10 の②のグラフとなる。この図に示したように、実験により測定したプラグ長さとは、プラグ移動速度が増加すると、一致しなくなる傾向にあるが、プラグ移動速度が小さい場合は適切に一致している。本研究においては、プラグ前部のエネルギー損失をも考慮したため、実験値と理論値とが適切に一致したものと思われる。

5. 結 論

プラグの自然的な形成段階において、供給空気の圧力を変化させ、プラグの長さ、空気長さ、プラグピッチ、およびプラグ移動速度を測定し、さらに、プラグ生成と発達過程を観察し、プラグの臨界長さを近似的に計算した。

そして、本研究においては、以下のことが明らかになった。

(1) プラグ移動速度、プラグ長さ、プラグピッチは供給空気圧力に比例して増加する傾向がある。

(2) 二つのプラグ間の空気長さは、供給空気圧力に比例して減少する傾向がある。

(3) プラグ前部のエネルギー損失を考慮して計算したプラグ臨界長さの値は、実験値と適切に一致した。本研究においては、プラグ前部での粒子の加速損

失を考慮したため、プラグの臨界長さの計算値と理論 値とが適切に一致したものと思われる。

Nomenclature

A_1	cross sectional area occupied by stationary layer	(m^2)		cross section	(m/s)
A_2	cross sectional area of pipe	(m^2)	c	internal cohesion force of particles	(Pa)
D	pipe diameter	(m)	c_w	wall cohesion force of particles	(Pa)
ΔE_f	energy loss at front part of plug	(Pa)	f_p	pipe friction coefficient	(-)
ΔE_{mw}	energy loss per unit length caused by wall friction at main body	(Pa/m)	g	gravitational acceleration	(m/s^2)
ΔE_{mi}	energy loss per unit length caused by inner friction at main body	(Pa/m)	l_a	air length between plug in pipeline	(m)
ΔE_r	energy loss at rear part of plug	(Pa)	l_m	length of plug main body	(m)
H_s	height of stationary layer	(m)	P_1	gauge pressure of plug on S_1 cross section	(Pa)
K_w	coefficient	(-)	P_2	gauge pressure on plug on S_2 cross section	(Pa)
M_s	solid flow rate	(kg/s)	v_m	velocity of particles composing plug	(m/s)
P_r	air pressure supplied into pipeline	(kPa)	ϕ	angle of internal friction	(rad)
U_1	relative particle velocity to plug on S_1 cross section	(m/s)	ϕ_w	angle of wall friction	(rad)
U_2	relative particle velocity to plug on S_2		μ_w	inclination of wall yield locus (WYL)	(-)
				($=\tan \phi_w$)	(-)
			ρ	bulk density of particles	(kg/m^3)
			σ_m	length to center of Mohr's circle diagram	(-)

References

- 1) Eitoku, H., M. Hirota, M. Suzuki, T. Oshima, Y. Iwata and T. Matsumoto : "The Transport of a Dense Phase Powder in a Horizontal Pipe", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **32**, 606-611 (1995)
- 2) Morikawa, Y., N. Sugita, M. Matsuda, S. Nishimori, M. Maruo, M. Yamashita and H. Maruyama : "Dense Phase Horizontal Pneumatic Conveyance of Powder by a Mohno Pump", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **32**, 446-452 (1995)
- 3) Ueno, H. : "The High Density Pneumatic Conveyance of Solid Plugs (1st Report Friction Force)", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **23**, 571-577 (1986)
- 4) Krambrock, w. and S. Parekh., : "Pneumatic Conveying of Poor Flowing Abrasive or Fragile Bulk Materials", *Pneumotransport 5, BHRA Fluid Engineering*, 419-442 (1980)
- 5) Flatt, W. : "Low Velocity Pneumatic Conveying of Granulated and Pulverized Products", *Pneumotransport 5, BHRA Fluid Engineering*, Paper J2, 409-418 (1980)
- 6) Aziz, Z. B and G. E. Klinzing. : "Optimizing the Performance of a Plug Flow System", *Powder Technology*, **62**, 77-84 (1990)
- 7) Konrad, K, *et al.*, : "Prediction of the Pressure Drop for Horizontal Dense Phase Pneumatic Conveying of Particles", *Pneumotransport 5, BHRA Fluid Engineering*, Paper E1, 225-224 (1980)
- 8) Konrad, K, : "Dense-Phase Pneumatic Conveying" *Powder Technology*, **49**, 1-35 (1986)
- 9) Futamura, M. : "Pressure Drop in Plug-phase Conveyance and the Scale-up of Conveyance Lines", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **33**, 121-128 (1996)
- 10) Tsunakawa, H., J. Nakai and R. Aoki : "Pneumatic Conveying of Solid Plugs", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **16**, 249-254 (1979)
- 11) Tsuji, Y. : Kuukiyuso no kiso, p.114, Youkendo (1984)