くさび形試験片まわりのスラリー流れとプラスチックのエロージョン損傷[†]

新井和吉・富田恭弘・津田 健・北條英光

東京工業大学工学部 化学工学科^{††}

プラスチック材料のスラリーエロージョン損傷を流れの影響を考慮しながら検討するために、くさび形試験片まわりのスラリーの流れ挙動について理論的解析および可視化実験を行った。

スラリー粒子としては、粒径 $176\text{ }\mu\text{m}$ のガラスビーズを用い、試験片には6種の異なる先端角を有するくさび形を使用した。

試験片まわりの液相および粒子の挙動を、数値計算により求めた。その結果と、著者らが考案したチョッパー法を用いて撮影した写真から得られた実験結果とを比較したところ、両者はよい一致を示した。

スラリー流れの検討結果は、損傷に関与する粒子衝突速度、衝突角度、衝突密度係数の三つの因子が、試験片の位置により大きく異なることを示し、損傷について検討する際には、これらの因子の知見が重要であることを示した。

さらに、エポキシ樹脂について、スラリーエロージョン試験を行い、流れ解析の結果を用いて、エロージョン損傷に及ぼす衝突速度、衝突角度の影響を明らかにした。

緒 言

スラリーを取り扱う装置、機器においては、常にスラリー粒子の衝突による材料の損傷、すなわち、スラリーエロージョンが問題となる。スラリーエロージョンのみならず、固体粒子の衝突による材料の損傷に対しては、粒子の衝突速度、衝突角度などが大きな影響を及ぼすため、損傷機構の解明や耐エロージョン設計を行うには、流れの中での粒子の挙動を明らかにしておくなければならない。

スラリーの流れについては、今までかなり多くの報告が見られるが、大きなエロージョン損傷が問題となる粒径あるいは粒子密度の大きいスラリーの場合には、圧損に主眼を置いた研究がほとんどであり^{5,7,8)}、粒子個々の運動を対象としたものはほとんど見られない。

以上の観点から、著者らは、エロージョン挙動および機構の解明と試験法の確立を目的として、すでに理論的取り扱いの容易さを考慮し、矩形管内に円柱状試験片を置いた系等を用いて、スラリー粒子の挙動について解析を行うとともに、実験的な検討を行っている¹⁻⁴⁾。

本報告では、これら研究の一環として、さらに一般的

な形状の物体まわりの粒子の挙動とエロージョン性解明の可能性を検討することを目的とし、くさび形試験片を用いて実験、解析を行った結果につき報告する。

1. 実験装置および方法

使用した装置の概略図をFig. 1 (a) に示す。タンク内で均一に攪拌したスラリーをポンプにより吐出し、矩形管 ($50\times 20\text{ mm}$) へ導き再びタンクへ戻すものである¹⁻⁴⁾。

矩形管入口から 1680 mm (相当直径の58倍) の位置へ、Fig. 1 (b) に示す試験部を設け、くさび形状の試験片 (厚さ 10 mm 、高さ 20 mm) を設置した。試験片の先端角 $2\theta_0$ は、 60° 、 90° 、 106° 、 120° 、 143° および 180° の6種に変えた。また、スラリー粒子としては、比重2.48、平均粒径 $176\text{ }\mu\text{m}$ のガラスビーズを使用し、吐出体積濃度は $0.6\text{ vol.}\%$ 一定とした。

粒子の挙動を可視化するため透明なPMMA製の矩形管試験部を用い、チョッパーと二個のストロボを組み合わせた方法を使用して写真撮影を行った¹⁻⁴⁾。すなわち、チョッパーを通さない一つのストロボからの連続光により得た粒子粒跡線上に、チョッパーを通した他のストロボからの断続光、すなわち一定時間間隔における粒子位置を重ねるものである。

試験材料には、無水フタル酸 (HT 901) で硬化した脂環式エポキシ樹脂を用いた。

[†] 1987年8月4日受理

^{††} 〒152 目黒区大岡山2-12-1

Fig. 1 Experimental apparatus (a) and detail of testing section (b)

なお、実験はすべて、30°Cで行い、搬送流体としては水道水を用いている。

2. 理論的解析

2.1 液相の流れ

二次元ポテンシャル流れを仮定し、この中にくさび形の物体を置いたとき、物体まわりの液相の流れについて検討する。

このような系に対する解析解は得られておらず、したがって、次の流れ関数についてのラプラスの方程式を、差分法を用いて解くこととした。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

Fig. 2 Configuration and definition of boundary condition and calculation grid

計算格子および計算領域 (I, II) を Fig. 2 に示す。計算格子は長方形格子を使用し、縦横の比 ($\beta = H_x / H_y$) は格子点が試験片表面と一致するように選んだ。この格子についてのラプラスの差分方程式は、

$$\psi_{(i,j)} = \{ \psi_{(i-1,j)} + \psi_{(i+1,j)} + \beta^2 (\psi_{(i,j-1)} + \psi_{(i,j+1)}) \} / 2 (1 + \beta^2) \quad (2)$$

で与えられる。

繰り返し計算はガウス・ザイデル法⁶⁾を用い、境界条件としては、上流と下流で一樣流であること、管壁と試験片表面において流れ関数が一定であることを用いた。また、計算領域は、y方向については対称性を考え管中央から管壁までとし、x方向については、上流位置は観察結果より求めた液相流速の減速開始位置 (試験片先端から 20 mm) とし、下流位置は後方での流れがほぼ回復する位置 (試験片後端から 30 mm) とした。計算精度を上げ、かつ計算時間を短縮するため、試験片近傍の領域 II についてのみ格子を細かくして計算を行った。

以上のようにして得られた流れ関数の傾きから液相の速度 V_{lx} , V_{ly} (添字 x, y は各々 x, y 方向を表す) を求めた。

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = V_{lx}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -V_{ly} \quad (3)$$

2.2 粒子速度

液中における粒子の速度は、前節で求めた速度分布を有する液相中における単一粒子の運動の数値解より求めたが、この場合、粒子に加わる力は抗力と重力のみとし、また粒子同士の干渉は無視し、さらに試験片に衝突した後の粒子の運動は考慮しないものとした^{1,4)}。

粒子を球とすると、粒子に加わる加速度は、x, y 方向各々、

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p}\right) g - \frac{3}{4} \frac{\rho_l}{\rho_p} \frac{C_D}{d_p} (V_{px} - V_{lx}) \times |V_p - V_l|$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_l}{\rho_p} \frac{C_D}{d_p} (V_{py} - V_{ly}) |V_p - V_l| \quad (4)$$

となる。ここで、 C_D 、 ρ_p 、 ρ_l 、 V_p 、 g 、 d_p はそれぞれ粒子の抵抗係数、粒子密度、液体密度、粒子速度、重力加速度、粒径である。 C_D については、比較的広範囲の粒子レイノルズ数に対して成立するLangmuirの実験式を用いた³⁾。

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.197 Re_p^{0.63} + 0.00026 Re_p^{1.38}) \quad (5)$$

Eq.(4)に基づき、微小時間きざみ幅を与えて、数値計算により粒子の位置と速度を計算した。この時、境界条件として、粒子は液相の減速開始位置まで液相と同じ速度で流れるものとした。すなわち、

$$V_p = V_l \quad \text{at } x = x_0 \quad (= -20 \text{ mm}) \quad (6)$$

時間きざみ幅を $2 \times 10^{-6} \text{ sec}$ とし、粒子が試験片に衝突するまで、または側方を流れ去るまで行った。

2.3 粒子衝突挙動

粒子が試験片に衝突する場合には、Fig. 3に示すような衝突速度 V_{pl} 、衝突角度 α 、衝突密度係数 η 、および衝突位置 L をEqs. (7)~(10)により計算した。ここで η は、上流 $x = x_0$ において a_0 の範囲を通過する粒子が試験片表面上の a の範囲に衝突するものとして求めた。

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (7)$$

$$V_{pl} = \sqrt{V_{px}^2 + V_{py}^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \theta_0 - \tan^{-1} \left(\frac{V_{py}}{V_{px}} \right) \quad (9)$$

$$\eta = a_0/a \quad (10)$$

$2\theta_0 = 90^\circ$ 、スラリー流速 $V_m = 6.7 \text{ m/s}$ における V_{pl} 、 α 、 η の位置による変化をFig. 4に示す。 L は、試験片斜面の長さ L_0 により無次元化して示してある。同流速における他の $2\theta_0$ 、すなわち $2\theta_0 = 60^\circ$ 、 120° および 180° の V_{pl} 、 α の位置による変化の例をFig. 5に示す。衝突位置により、これらの因子が大きく異なるため、損傷について検討するためには、各衝突位置における V_{pl} 、 α 、 η の計算結果が重要となる。

3. 流れの観察

3.1 液相の流れ

液相の流れの観察は、比重1.04、平均粒径 $60 \mu\text{m}$ のポリスチレン粒子をトレーサーに用いて行い、ポリスチレン粒子の運動を前述の方法により写真撮影した。

Fig. 6に先端角 $2\theta_0 = 90^\circ$ の試験片を流速 6.7 m/s の中に置いた場合の、試験片近傍の流速分布を示す。Fig. 6中の実線は、2.1節で述べた数値計算の結果である。

上流では、ほぼ一様な流速分布を示しており、試験片

Fig. 3 Definition of impact parameter

Fig. 4 Variation of impact velocity (V_{pl}), impact angle (α) and striking efficiency (η) with the distance from the tip of wedge for $2\theta_0 = 90^\circ$ specimen at $V_m = 6.7 \text{ m/s}$

のない場合の結果とも全く同様であった。試験片に近づくにつれ、液相速度の x 成分 (V_{lx}) は減少し、その度合は管中心部ほど大きい。一方 y 成分 (V_{ly}) は増大し、最大となる位置は管中心よりややずれた所にある。試験片近傍における V_{lx} の減少は試験片先端近くで最も激しく、後方に移動するにつれ、 V_{lx} は次第に増加していく。試験片直後では、渦の発生により V_{lx} は最小となり、その後次第に回復し、 $x = 50 \text{ mm}$ では、ほぼ $x = -20 \text{ mm}$ の状態まで回復する。実測値と理論値は管壁付近を除くと

Fig. 5 Variation of impact velocity(V_{pl}), and impact angle(α) with the distance from the tip of wedge for $2\theta_0 = 60^\circ, 120^\circ$ and 180° specimens at $V_m = 6.7$ m/s

Fig. 6 Distribution of x component of liquid velocity at $V_m = 6.7$ m/s, (a) $x = -20$ mm, (b) $x = 0$ mm, (c) $x = 50$ mm

Fig. 7 Slurry particle flow taken by the chopper method at $V_m = 6.7$ m/s, $C_V = 0.6$ vol. %

よく一致しており、前述の計算方法が有効であることがいえる。

先端角 $2\theta_0$ が 90° 以外のものについても Fig. 6 とほぼ同様の傾向が観察された。

3.2 粒子の挙動

液相の場合と同様の方法で、ガラスビーズを流した時の粒子の流動挙動を観察した。写真撮影した結果の一例を Fig. 7 に示すが、極めて明瞭な粒子の動きの軌跡が観察される。粒子は液相の流れの影響を受け、試験片に近づくにつれ、大きく曲げられる様子がうかがわれる。 $2\theta_0 = 90^\circ, 120^\circ$ において $y = 0$ すなわち x 軸上での V_{px} の変化の様子を示したのが Fig. 8 であり、曲線は計算結果、

プロットは写真撮影から測定した結果を示す。ある速度で粒子が試験片に衝突する様子がわかる。さらに同図 (a) には $2\theta_0 = 180^\circ$ における変化を破線で示したが、 $2\theta_0$ が大きいほど、粒子速度は x の小さい位置 (試験片から離れた位置) から低下し始めているのがわかる。

粒子が試験片に衝突した場合の衝突角度について、写真撮影により測定した結果を、計算結果と比較したのが Fig. 9 である。衝突時の挙動についても、前に示した計算法により充分正確に予測できることがわかる。

4. エロージョン損傷挙動

前節までに述べた粒子挙動の解析結果を基にして、エ

Fig. 8 Distribution of particle velocity on x-axis at $V_m = 6.7$ m/s, $C_v = 0.6$ vol. %
(a) $2\theta_0 = 90^\circ$ and 180° , (b) $2\theta_0 = 120^\circ$

ポリシ樹脂のエロージョン損傷について検討した。損傷実験は $2\theta_0$ の異なる 6 種の試験片を用い、スラリー流速 $V_m = 6.7$ m/s で行い、矩形管内中央部における試験片の局所損傷深さ (Δh) を、表面形状測定器により測定した。一例として、 $2\theta_0 = 90^\circ$ の試験片における Δh の経時変化を Fig. 10 に示す。損傷深さの経時変化は、位置 (L) によらず原点を通る直線となる。

Fig. 4 で示したように、衝突密度係数 η は衝突位置により大きく異なっていた。すなわちスラリーエロージョンでは、流れの影響のため、衝突位置により、単位時間当たり衝突する粒子数が異なってくる。そこで、単位時間、単位面積当たりの衝突粒子数を考慮に入れて損傷速度を定量的に検討してみる。衝突開始から t 時間後までに、試験片単位面積当たりに衝突する粒子数 N は、 η を考慮して、次式のようになる¹⁾。

$$N = \frac{6 V_m \eta C_v}{\pi d_p^3} t \quad (11)$$

したがって、単位時間、単位面積に衝突する粒子数当たりの損傷深さで定義した損傷速度 R_h が次式のように求められる。

$$R_h = \frac{\Delta h}{N} = \left(\frac{\pi d_p^3}{6 V_m \eta C_v} \right) \left(\frac{\Delta h}{t} \right) \quad (12)$$

右辺の η については前節までの結果、 $(\Delta h/t)$ については Fig. 10 の傾きを代入することにより R_h を求めることができる。一方試験片の任意の位置への粒子の衝突速度 V_{pi} 、衝突角度 α は前節までに明らかにしているので、これらの結果を用いれば R_h に及ぼす衝突速度、衝突角度の影響を検討することができる。Figs. 11, 12 にその結果を示すが、 R_h は衝突速度の約 2 乗、また衝突角度

Fig. 9 Comparison between calculated and experimented results of impact angle on $2\theta_0 = 90^\circ$ specimen at $V_m = 6.7$ m/s

Fig. 10 Progressive change of erosion depth at $V_m = 6.7$ m/s, $C_v = 0.6$ vol. %, $2\theta_0 = 90^\circ$

が $40 \sim 50^\circ$ で最大値を示すことがわかる。

結 言

スラリーエロージョン損傷を粒子挙動と関連づけながら検討し、損傷機構等を検討する標準的試験法の確立をも目的とした研究の一環として、本報では、くさび形試験片による実験を行った。

その結果、試験片近傍の液相および粒子の運動は、数値計算により計算できることを示し、これらの結果が、実際に写真撮影により観察した結果と極めてよく一致することを示した。また、損傷に関与する粒子衝突速度、衝突角度、衝突密度係数の三つの因子が、試験片の位置により大きく異なることを示し、損傷について検討する

Fig. 11 Effect of impact velocity on erosion rate (R_h)

際には、これらの因子の知見が重要であることを示した。さらに、エポキシ樹脂試験片に対するエロージョン損傷実験を行い、計算結果を用いて損傷に及ぼす衝突角度および衝突速度の影響を明らかにした。

Nomenclature

A	= projection area of particle	$[m^2]$
C_D	= drag coefficient	$[-]$
C_V	= volume concentration	$[-]$
d_p	= diameter of particle	$[m]$
g	= gravity acceleration	$[m/s^2]$
H_x	= mesh width in x -direction	$[m]$
H_y	= mesh width in y -direction	$[m]$
Δh	= eroded depth	$[m]$
L	= impact location from the tip of wedge	$[m]$
L_0	= length of front surface of wedge	$[m]$
N	= number of impact particles per unit area	$[m^{-2}]$
R_h	= erosion rate (eroded depth by impact particles per unit area)	$[m^3]$
Re_p	= Reynolds number based on particle diameter	$[-]$
t	= time	$[s]$
V	= velocity	$[m/s]$
V_{PI}	= impact velocity of particle	$[m/s]$
x	= x -coordinate	$[m]$
y	= y -coordinate	$[m]$
α	= impact angle of particle	$[deg]$

Fig. 12 Effect of impact angle on erosion rate (R_h)

β	= ratio of mesh ($=H_x/H_y$)	$[-]$
η	= striking efficiency	$[-]$
$2\theta_0$	= wedge angle	$[deg]$
μ	= viscosity	$[Pa \cdot s]$
ρ	= density	$[kg/m^3]$
ψ	= stream function	$[m^2/s]$
<Subscripts>		
l	= liquid	
m	= slurry (mixture)	
p	= particle	
x	= x -direction	
y	= y -direction	

Literature cited

- 1) Arai, K., K. Tsuda and H. Hojo: *Zairyou Kagaku*, **24**, 90 (1987)
- 2) Hojo, H., K. Tsuda and K. Arai: "Proc. World Congress of Chem. Eng. III", 11a-201 (1986)
- 3) Hojo, H., K. Tsuda, K. Sirato and T. Yabu: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **14**, 161 (1988)
- 4) Hojo, H., K. Tsuda and T. Yabu: *Wear*, **112**, 17 (1986)
- 5) Newitt, D. M., J. F. Richardson, M. Abbott and R. B. Turtle: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **33**, 93 (1955)
- 6) Oohashi, H.: "Ryutai Rikigaku (1)", p.147, Corona Publishing Co., Tokyo (1986)

Slurry Flow Around Wedge-Shaped Specimen and Erosion Damage of Plastics

Kazuyoshi Arai, Yashuhiro Tomita, Ken Tsuda and
Hidemitsu Hojo

Dept. of Chem. Eng., Tokyo Inst. of Tech., Tokyo 152

Key Words : Material, Slurry Erosion, Slurry Flow, Plastics, Impact Velocity, Impact Angle

Behavior of slurry flow around a wedge-shaped specimen were studied to clarify slurry erosion damage behavior and its mechanism.

Glass beads of 176 μ m diameter and water were used as slurry flow, and wedge angles of specimens were varied from 60 to 180°.

Flow behavior of liquid and particles around the specimen were analyzed by numerical calculation, and were also observed experimentally by a chopper method developed by the authors. The analytical results agreed quite well with experimental ones.

Impact velocity, impact angle and striking efficiency obtained from calculations were important factors in erosion damage, and differed greatly at different locations on the specimen. A knowledge of these factors is required to understand erosion behavior properly.

Erosion tests of epoxy resin were carried out, and the effects of impact velocity and impact angle on erosion damage were determined by applying numerical calculation results.