

II-203

水砂混相流における粒子抵抗係数について

九州大学 正員 楊 永荻
〃 〃 平野宗夫

1 まえがき

水砂混相流における砂の移動は密度の相違により流水に遅滞して流れ、液相と固相との間に相対運動が存在する。液相ではこの相対運動により固相からの抵抗が増加する。この抵抗特性を表すパラメーターとしての粒子抵抗係数の究明は混相流の抵抗特性及び流動機構を解明する上で重要である。従来の研究により、粒子抵抗係数は主に影響する要素は粒子濃度であることが示されている⁽¹⁾⁽²⁾。本文は、粒子の平均移動速度がゼロで変動速度を持つ水砂混相流についての実験に基づいて、液相と固相の相対運動による粒子抵抗係数の変化を考察したものである。

2 実験の概要

実験では、直径57.5mm、長さ1.5mのガラス管を使用した。図1に示すように管路は垂直に設置し、通水前、粒子を管中に放置し、その初期の粒子層の厚さを測定した。水は下から供給される(図1(b))。粒子の重力と流体力の釣り合いにより、変動速度を持ち、平均移動速度がゼロになる混相流が形成される。こうした混相流では、せん断流による粒子間のせん断応力がないので、相対流速による粒子の乱れの影響を含む粒子集積効果についての粒子抵抗係数が評価できる。実験は表1に示すように粒子の密度、粒径及び供水流量を変化させて行う。管路壁面の影響を消去するため、エネルギー損失の水頭差については混相流の流速に対する水のみの場合の水頭差で管路の壁面及び局所のエネルギー損失を補正する。

相対流速、レイノルズ数及び粒子濃度は次のように求める。

$$\text{相対流速 } V = \frac{Q}{A(1-C)} \quad (1)$$

$$\text{レイノルズ数 } Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2)$$

$$\text{濃度 } C = C_* \frac{L_*}{L} \quad (3)$$

ここに、 Q は流量、 A は管路の断面積、 D は粒子の直径、 ν は動粘性係数、 C_* は体積比の最密填充濃度、 L_* は水を流す前の粒子層の厚さ、である。相対流速は粒子空隙間の流速、あるいは真流速を用いた。

個々粒子の流体力は次式を定義される。

$$f = C_* D \frac{1}{4} \pi D^2 \frac{2[C_* \rho + (1-C) \rho] V^2}{2} \quad (4)$$

粒子層 L における粒子個数と濃度の関係は

$$N = \frac{6C_* AL}{\pi D^3} \quad (5)$$

となる。そして、粒子層の全流体力は $F = Nf$ である。一方、水頭差による全流体力は

$$F = \rho g A \Delta H \quad (6)$$

となる。これにより、粒子抵抗係数は次式で求められる。

$$C_* D = \frac{3 \Delta H g D}{4 L C V^2} \quad (7)$$

ここに、 ρ_s, ρ はそれぞれ粒子と水の密度、 ΔH はエネルギー損失の水頭差、 g は重力加速度である。

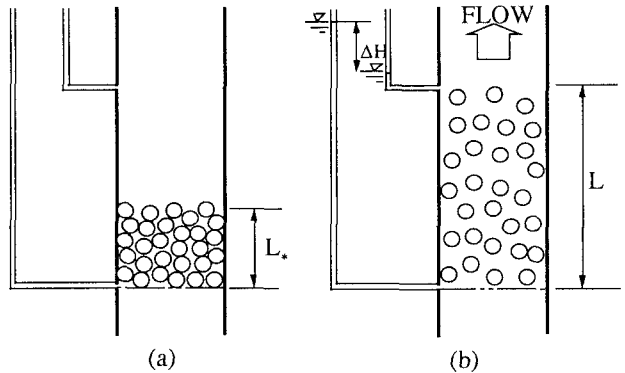


図1 実験概要

表1 実験条件

項目	密度 g/cm ³	最密填充濃度 V/V	直径 mm	濃度 V/V	相対流速 cm/sec	レイノルズ数
天然砂	2.615	0.493	0.45- 2.19	0.074- 0.438	2.072- 18.237	4-297
プラスチック	1.701	0.539	0.45- 2.72	0.105- 0.458	0.714- 10.489	1-213

3 実験結果及び考察

図2は粒子抵抗係数とレイノルズ数との関係を示している。ここに、 C_D は単粒子の静水中における沈降の抵抗係数である。図より、混相流における粒子抵抗係数は単粒子の場合より粒子集積による効果がかかなり大きく、10倍越えることもあることが分かった。Hwangは混相流の場合Stokes抵抗の外に多粒子の附加抵抗があるとしている²⁾。図3は粒子濃度と粒子抵抗係数との関係を示したものである。縦軸は粒子抵抗係数と単粒子のそれとの差で表した。増加分は多粒子の附加抵抗と考えられる。また、図4は椿・橋本⁴⁾が提案した粒子の最密充填濃度を用いた粒子濃度の増加関数 $F(C)$ で整理したものであり、図3よりまとまりが良いことが見られる。ここに、 $F(C)$ は

$$F(C) = \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \quad (8)$$

である。図より、粒子濃度が増加するとともに附加抵抗を増加する。これはUngaish¹⁾とDr Felice²⁾などの結果と一致しているが、図中の両者の関係がバラツキしていることより、附加抵抗が粒子濃度だけの関数ではなく、流れの乱れによる粒子の変動速度の効果が重要な要素であると考えられる。本報の場合では、粒子の変動速度の強度は流れの動力としての圧力差関数の摩擦流速と比例していると考えられる。また、粒子の抵抗要素は静水中の単粒子の沈降速度を用いる。図5は粒子抵抗係数と u^*/ω_0 との関係である。ここに、 u^* は摩擦流速、 $u^* = \sqrt{gRS}$ 、 R は管路の径深、 S は勾配、 ω_0 は静水における単粒子の沈降速度である。図より、粒子抵抗係数は u^*/ω_0 と相関がかかなり強いと見られる。摩擦流速が大きく、あるいは乱れ強度が大きくなるとともに粒子抵抗係数は増加する。

以上の考察によって、混相流における粒子抵抗係数は本実験のデータに基づいた実験式は

$$C'_D = C_D + 3\sqrt{F(C) \frac{u^*}{\omega_0}} \quad (9)$$

となる。式(9)と実験データとの比較は図6に示している。

4 おわり

混相流における多粒子の抵抗係数はかなり多くの要素に影響されている。本報では、比較的簡単な実験で検討したが、まだ不明な点が残されている。今後、さらにデータを積み重ねて検討する予定である。

参考文献

- 1) Ungarish M. & Greenspan H.P. (1983): Studies in Applied Math., 69, 145-175.
- 2) Hwang G.J. & Shen H.H. (1991): Int. J. Multiphase Flow, 17(1), 45-57.
- 3) Dr Felice R. (1994): Int. J. Multiphase Flow, 20(1), 153-159.
- 4) 椿、橋本、末次：土木学会論文集、No. 317, 1982

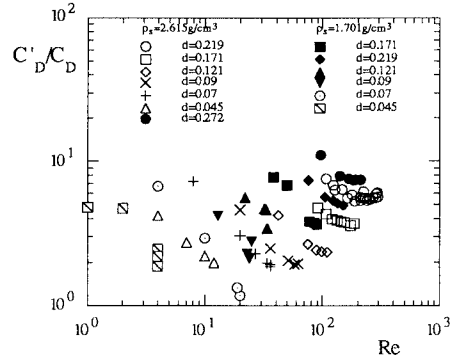


図2 抵抗係数とレイノルズ数の関係

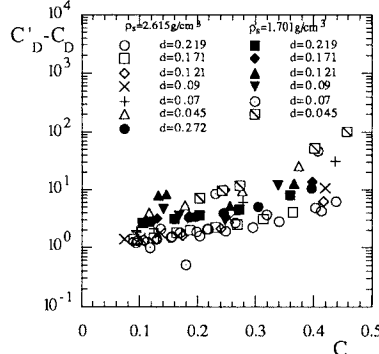


図3 抵抗係数と濃度の関係

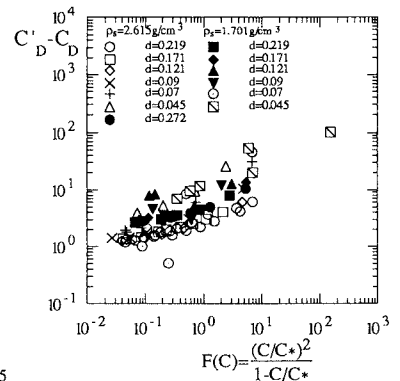


図4 抵抗係数と $F(C)$ の関係

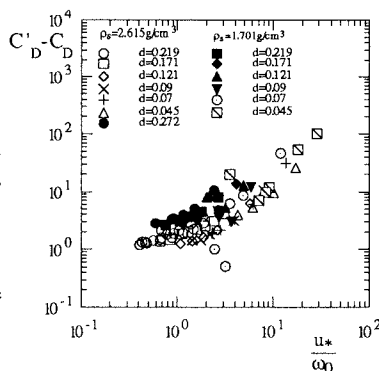


図5 抵抗係数と u^*/ω_0 の関係

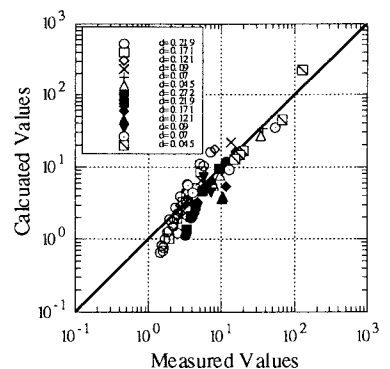


図6 粒子流の抵抗係数の実測値と式(9)の比較