

京都府立大学 ○ 三好 岩生，野間 大祐

1. はじめに

土石流のような固液混相流の抵抗則においては、流体の乱れに伴う応力が大きな効果を持つことが知られているが、その実態については未解明な問題が多く残されている。ここでは二つの実験に基づき、固液混相流内に発生する乱れの構造を整理した上で、その応力を評価する方法について検討した結果を報告する。

2. 流れの条件と乱れの構造

土石流のような固液混相流体の乱れには、層流状で運動する固体粒子群の間隙における流体の乱れと、固体粒子群を含んだ流体塊の乱れがあり、それぞれの場合についてその応力を評価しようとした研究例が見られる。粒子群が層流状に流れる土石流を対象として江頭ら¹⁾が提案した構成則によると、速度依存型抵抗項は次のように記述されており、その第2項が乱れに伴うせん断抵抗力を表している。

$$\tau_d + \tau_f = k_g \sigma d^2 (1 - e^2) c^{\frac{1}{3}} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 + \rho k_f d^2 \frac{(1 - c)^{\frac{5}{3}}}{c^{\frac{2}{3}}} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \mu' \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad \dots \dots \quad (1)$$

堀田²⁾はこの抵抗則を用いて土石流のレイノルズ数を Re_{s2} を次のように定義している。

$$Re_{s2} = \frac{\rho_m U_0 h}{\mu'} \sqrt{\frac{h}{gi}} \quad \dots \dots \quad (2)$$

これらの式を一般的な水理学的に類推して解釈すると、濃度が小さいほど、また相対水深 h/d が大きいほどレイノルズ数が大きくなり、流体塊としての乱れが発生しやすくなることになるが、土石流においては層流と乱流との境界値となるレイノルズ数は不明である。江頭らの一連の研究では(1)式のような抵抗則が相対水深 10 程度の混相流において広い濃度範囲で適用できることが示されており、乱流領域と層流領域の二層からなる流れの解析では計算上の Interface を $c=0.05$ とすることによって現象を説明している。しかし、これら一連の研究では低濃度領域で混合距離を過大評価するという著者ら自身が指摘した課題が十分に解決されていない。その原因是、このモデルが粒子群の層流状の運動を前提として成り立っており、粒子群の運動に乱れが生じるような低濃度領域ではその前提条件が崩れるためであると考えられる。そこで一粒径幅回転流動装置を用いて、比較的濃度の低い領域での固液混相流中に発生する乱れについて実験的に詳細に観察した。用いた材料は水と $\phi=6mm$ 、比重 1.0 の粒径が一様な球形固体粒子であり、発生する流れは濃度がほぼ一様な混相流となる。またこの装置は水路幅が 6.1mm であるためにほぼ 2 次元流動とみなせる流れを作り出せる。発生した流れの平均流速は 40cm/s～140cm/s で、相対水深は 10 程度である。流体中の粒子の運動を観察した結果、2 次元濃度 c_{2d} (側面からの粒子の投影面積を流れの投影面積で除した数値) が 0.4 程度以上あれば粒子群はほぼ層流状に運動するが、それより濃度が低いと部分的に粒子群を含んだ乱れが発生し、さらに c_{2d} が 0.2 程度以下になると流れのほぼ全体が乱流的になる様子が見られた。全体を通じて濃度が大きければ粒子群の動きは層流的、小さいと乱流的になるという傾向が見られたが、その構造の変化は清水流のようにある濃度で急激に変化するのではなく、層流的な運動をする成分と乱流的な運動をする成分の時空間的な割合が徐々に変わっていくというものであった。この実験的検討は二次元的流動という特殊な条件があるため、三次元での現象に直接適用できないかもしれないが、固液混相流の特徴を表したものであると考えられる。

3. 亂れ応力の評価

粒子群が部分的に乱流的な挙動を示すような低濃度領域の固液混相流中に発生する乱れ応力の評価を目的として、濃度が 0.04～0.2 程度での固液混相流の水路実験を行った。混相流の材料としたのは前項と同じ $\phi=6mm$ 、比重 1.0 の球形粒子と水である。用いた水路は幅 5cm、長さ 200cm の矩形断面水路で、底面には材

料とした粒子と同じ粒子を貼り付けて粗度を設けてある。実験はすべて固定床条件で行った。得られた流速分布は図-1に示すように、すべて水路床近傍で大きなひずみ速度を持つが、その上の領域では勾配と流量が同じであれば濃度が高いほど流速が大きくなる傾向がある。これは流れが中立浮遊粒子を含む混相流であるためにせん断抵抗力のほとんどが乱れに伴う応力から成り立っており、濃度を増すと粒子の混入によって混合距離の発達が抑制されて乱れ応力が小さくなつたためと考えられる。実験で得られた流速分布形は(1)式を用いた計算値と近いものであったが、流动中に流体塊の乱れが発生していることが確認されており、(1)式による説明では不十分と考えられた。また、(1)式を用いた計算値では、それほど大きな違いではないが、濃度が小さくなると速度勾配が実測値とずれる傾向が見られた。そこで、部分的に流体塊の乱れが存在する流れの乱れ応力評価について以下のように考えた。まず、粒子群が層流状に運動する領域での混合距離が次式で得られるとする。

$$\ell = \frac{\kappa_0}{\sqrt{3}} \left(\frac{c_*}{c} \right)^{\frac{1}{3}} d \quad \dots \dots \dots (3)$$

これは清水乱流の場合の粗度面上に発生する乱れに類推したものであり、粒子が一様に分布しているときの空隙の中心とその上下の粒子層との距離にカルマン定数を乗じたものである。(3)式で得られる混合距離は、(1)式で用いられている混合距離よりも低濃度領域で小さくなるという特徴を持つ。また、流体塊の乱れに対応する混合距離は、開水路上の清水乱流と同様に $\ell = \kappa z$ で決まり、さらに両者のメカニズムが機能する時空間確立 R が、その空間における粒子層間距離と水路床からの距離の比で決まると考えて次のように表した。

$$\ell = R \kappa z + (1 - R) \frac{\kappa_0}{\sqrt{3}} \left(\frac{c_*}{c} \right)^{\frac{1}{3}} d \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$R = \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{c_*}{c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

(4)式による計算値は、高濃度領域では(1)式によるものと大きくは違わないが、低濃度領域では h/d の大きい領域でひずみ速度が大きくなる傾向がある。図-1中に示された実線は(4)式で決まる混合距離を用いて計算した流速分布形である。実験値にほぼ適合しているといえる。ここで示したモデルは、部分的に流体塊の乱れが発生するという固液混相流の特徴を捉るために有効な手段であると思われるが、この手法は濃度が一様な流れのみに適用可能なもので、いわゆる特殊解的なものである。今後さらに一般解を得られるよう検討を重ねていきたい。
参考文献

- 1) 江頭・芦田・矢島・高濱：土石流の構成則に関する研究，京大防災研年報，31，B-2，
- 2) 堀田：土石流の相似則に関する検討，平成12年度砂防学会研究発表会概要集

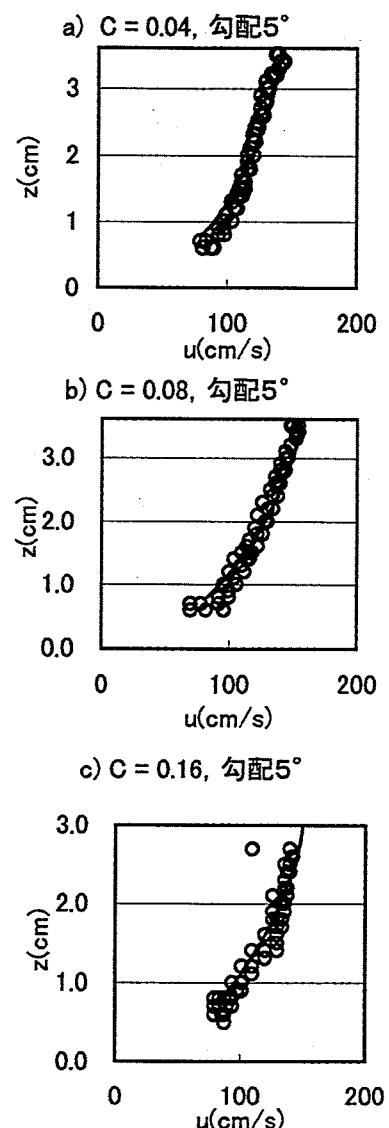


図-1 流速分布

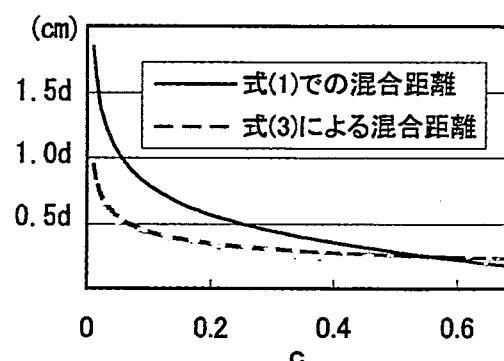


図-2 (1)式での混合距離と(3)式による混合距離の比較