

土石流の流動深方向の粒径別濃度分布

日本工営株式会社 ○木佐洋志 京都府立大学 三好岩生

1. はじめに

幅広い粒径材料から成る土石流の流動特性にその粒径や粒径別濃度分布が影響する。例えば、土石流の流体相密度を上昇させる粒子間隙の細粒土砂の分布や、流れ前方へ大径粒子を集中させる逆級化がある。これらは土石流の流動層内部で同時に生じ得ると考えられるが、その相互作用が粒径別濃度分布の形成や流動特性に及ぼす影響は明らかにはされていない。本稿は、前報¹⁾の実験で得た土石流の粒径別濃度分布の特徴を示し、その形成の解釈を試みたので報告する。

2. 使用した実験データ

前報では長さ 8m の開水路を用い、粗粒子と細粒土砂の二粒径を体積比 1:1 で混合して堆積させ、侵食型土石流の実験を行い、粒径別濃度を三層に区分して示した。実験装置や粒径別濃度分布の取得方法の詳細は前報¹⁾に譲る。実験条件一覧を表 1 に示す。流動層全体での固体粒子、粗粒子、細粒土砂の輸送濃度(C_1, C_{c1}, C_{f1})と断面平均濃度($\bar{c}, \bar{c}_c, \bar{c}_f$)を表 1 に、粒径別濃度分布と粗粒子の流速分布を図 1 に示す。

3. 考察

3.1 流速分布

実験では長さ 7.4m の移動床上を流下した流れを扱ったが、CASE 8 を除けば河床近傍で速度勾配(du/dz)が大きく、固定床上の一樣粒径土石流に近い流速分布を示した。図 1 には示していないが上流端から 7.0m の移動床部の流速分布も同じ傾向であった。

3.2 粒径別濃度分布の特徴

固体粒子全体では断面平均濃度 \bar{c} は 0.34 から 0.53 であり、下層で濃度が大きく、中間層はそれと同程度かより小さく、上層はさらに小さい。細粒土砂は

CASE 10 を除けば下層で濃度が最大で中間層、上層の順に小さい、粗粒子は CASE 6 を除けば中間層で濃度が最大となることが共通の特徴である。

3.3 粒径条件の及ぼす影響

粒径条件に応じた粒径別濃度分布の形成の定性的な解釈を試みた。比較する実験条件は細粒土砂と粗粒子の輸送濃度の比($C_{c1}:C_{f1}$)が極端には異なる条件とし CASE 3, 8 は除く。CASE 5 は下層で粗粒子濃度が負(-0.2)、CASE 6 は下層の固体粒子濃度が 0.75 でこの粒径比での最大充填密度²⁾より大きいため除く。粗粒子粒径 d_c と水路勾配 θ が同じ条件の組合せは、(a)CASE 1 ($d_c/d_f=7.8$)と CASE 2 (23.8)、(b)CASE 9 (15.6)と CASE 10 (47.6)がある。

以降、(a)を詳述する。粗粒子濃度 c_c は CASE 1, 2 ともに中間層で濃度が最大、下層と上層は CASE 2 の方が大きい。粗粒子の断面平均濃度 \bar{c}_c は CASE 2 が CASE 1 の 2 倍と大きい。細粒土砂濃度 c_f は CASE 1, 2 のいずれも下層で最大で濃度勾配は $dc_f/dz < 0$ である。CASE 2 は上層で細粒土砂濃度が大きい。細粒土砂の断面平均濃度 \bar{c}_f は CASE 1, 2 は同じである。固体粒子濃度 c は CASE 1, 2 は中間層は同程度、上層と下層は CASE 2 の方が大きく、断面平均濃度 \bar{c} は CASE 1 は 0.34 で、CASE 2 の方が 0.43 と大きい。CASE 1, 2 ともに濃度勾配 $dc/dz < 0$ で、CASE 1 の下層は 0.49 でほぼ細粒土砂が占め、CASE 2 の下層は 0.55($c_c:c_f=0.22:0.33$)で細粒土砂が多い。

上記をふまえ、次の解釈をした。まず、河床近傍の層である。CASE 1 は下層で粗粒子間隙の細粒土砂濃度 $c_f^* = c_f/(1-c_c)$ が 0.48 と高濃度である。CASE 2 は下層の粗粒子間隙スケール l を式(1)²⁾より求める

表 1 実験条件および実験結果

実験 番号	実験条件					実験結果							
	粗粒子 粒径 d_c (mm)	細粒土砂 粒径 d_f (mm)	粒径比 d_c/d_f	水路 勾配 θ (deg.)	内部 摩擦角 (deg.)	輸送濃度 (Run 1)				断面平均濃度			
						固体粒子 全体 C_1	粗粒子 C_{c1}	細粒土砂 C_{f1}	粗粒子と細粒 土砂の比 $C_{c1}:C_{f1}$	固体粒子 全体 \bar{c}	粗粒子 \bar{c}_c	細粒土砂 \bar{c}_f	粗粒子と細粒 土砂の比 $\bar{c}_c:\bar{c}_f$
CASE 1	5	0.64	7.8	11.3	38.9	0.27	0.13	0.14	1.00 : 1.11	0.34	0.12	0.22	1.00 : 1.89
CASE 2	5	0.21	23.8	11.3	39.5	0.39	0.21	0.18	1.00 : 0.86	0.43	0.22	0.22	1.00 : 1.00
CASE 3	10	1.43	7.0	11.3	43.3	0.29	0.23	0.05	1.00 : 0.22	0.34	0.25	0.09	1.00 : 0.37
CASE 4	10	0.64	15.6	11.3	41.5	0.32	0.15	0.17	1.00 : 1.17	0.38	0.15	0.23	1.00 : 1.58
CASE 5	10	0.21	47.6	11.3	40.5	0.42	0.22	0.20	1.00 : 0.92	-	-	-	-
CASE 6	5	0.64	7.8	14.0	38.9	0.35	0.19	0.17	1.00 : 0.91	0.44	0.20	0.24	1.00 : 1.23
CASE 7	5	0.21	23.8	14.0	39.5	0.44	0.20	0.24	1.00 : 1.21	0.46	0.16	0.30	1.00 : 1.88
CASE 8	10	1.43	7.0	14.0	43.3	0.36	0.23	0.13	1.00 : 0.57	0.43	0.21	0.22	1.00 : 1.06
CASE 9	10	0.64	15.6	14.0	41.5	0.41	0.20	0.21	1.00 : 1.07	0.46	0.17	0.29	1.00 : 1.77
CASE 10	10	0.21	47.6	14.0	40.5	0.50	0.26	0.24	1.00 : 0.91	0.53	0.28	0.25	1.00 : 0.90

注: 本稿では前報¹⁾の実験条件番号を次の通り一部振替えた(Case 7 → CASE 1, Case 8 → CASE 10, Case 10 → CASE 8)

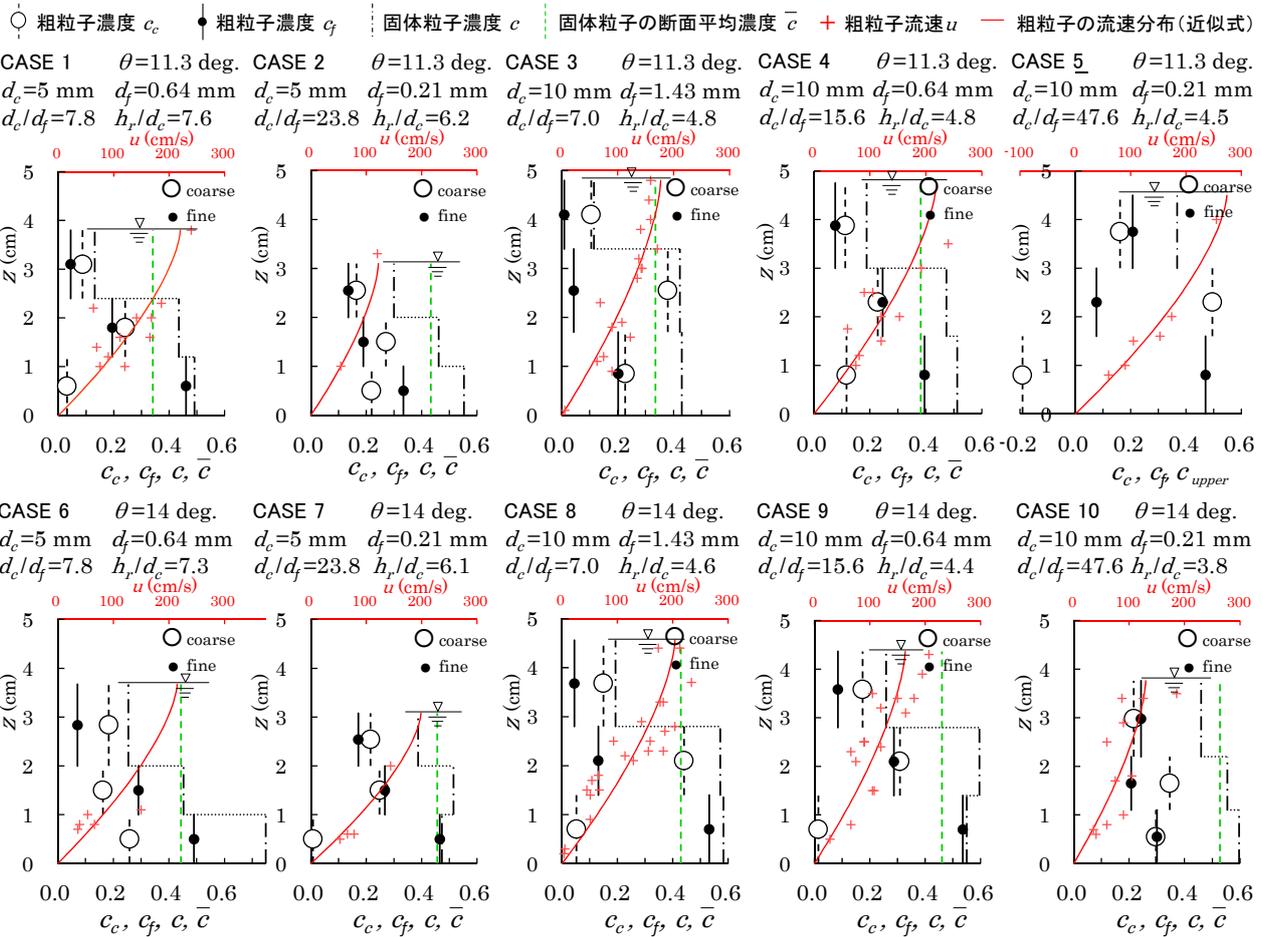


図1 粒径別濃度分布および流速分布

と $l=3.0$ mm, $l/d_f=14.3$ で粗粒子間隙スケールは細粒土砂粒径 d_f に対して十分に大きい、粗粒子間隙の細粒土砂濃度 c_f^* が 0.42 と高濃度である。そのため、CASE 1, 2 とともに下層では粗粒子だけでなく細粒土砂も主に骨格応力を担う可能性がある。

$$l = \sqrt{k_f} \left(\frac{1-c_c}{c_c} \right)^{\frac{1}{3}} d_c \quad \dots(1)$$

粗粒子が CASE 2 の方が多く下層に存在するのは、後述する下層から上層への細粒土砂の拡散により下層にできる空間を埋めるよう粗粒子が落ち込むためと推測される。粒径比や細粒土砂濃度に応じた粗粒子濃度が形成され、CASE 2 の下層は二粒径が混合状態のため、固体粒子濃度が大きい可能性がある。

次に水面近傍の層である。CASE 2 の方が細粒土砂の濃度勾配 (dc_f/dz) が小さくなる理由は、前報で触れた速度勾配 (du/dz) と粗粒子粒径 d_c , 粗粒子濃度 c_c に応じた粗粒子間隙流体の散逸応力 σ により水面近傍に細粒土砂が多く分布する可能性がある ¹⁾。CASE 2 の上層は $l=3.4$ mm, $l/d_f=16.8$ と大きく、流体相密度 $\rho_m=(1-c_f^*) \rho_w+c_f^* \sigma_f$ の上昇が生じ ($\rho_m \leq 1.26$ g/cm³)、上層では粗粒子濃度が大きい可能性がある。

以上のように解釈すると、CASE 2 で細粒土砂も粗粒子も濃度勾配 ($dc_c/dz, dc_f/dz$) が小さいこと、CASE 2 の方が固体粒子の断面平均濃度 \bar{c} が大きいことも一応の説明が付く。

4. 今後の課題

河床近傍の層では固体粒子間の静的応力が、水面近傍の層では粗粒子間の動的応力および粗粒子間隙流体の散逸応力が卓越すると予想されるが、混合粒径土石流の流動特性への影響を評価するうえで、両層の応力分布特性や境界条件を明らかにすることが今後の課題である。また、本実験で扱った流れは一樣粒径土石流の固定床上の流れに近い流速分布を示したが、移動床と固定床上の一樣粒径土石流では河床近傍の応力分布特性が全く異なる ⁴⁾ ため、今後、一樣粒径土石流の構成則を拡張して混合粒径土石流の流動特性を検討する際は移動床、固定床流れのいずれを扱っているかに十分な注意が必要である。

- 参考文献 1) 木佐・三好：平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, 108-109, 2017, <http://www.isece.or.jp/event/conf/abstract/2017/pdf/108.pdf>
 2) 江頭ら：京大防災研年報, 32B-2, 487-501, 1989
 3) 伊藤ら：日本金属学会誌, 50, 5, 475-479, 1986
 4) 伊藤ら：水工学論文集, 43, 635-640, 1999