

名古屋工業大学 正会員 ○ 前田健一
 国土交通省 館井 恵
 名古屋工業大学 学生会員 山崎友裕

1 はじめに

近年豪雨の多発により土砂災害が多発している¹⁾。著者らは模型実験と個別要素法 (DEM) 解析を用いて石礫集合体の流れについて地盤工学の視点から事例解析や対策効果を含めて検討している²⁻⁵⁾。本報告では、粒子流れ⁶⁾ 中を伝わる応力波に着目し、河床勾配や河床粗度といった河床特性が、単純斜面モデルにおける粒子群の流下挙動に与える影響についてまとめた結果を示す。

2 模型実験概要及び数値解析概要

2.1 模型実験概要

傾斜角が可変なアクリル板(側面)及びアルミ板(底面)から成る斜路を用いた。斜路の上流部に試料箱を設置し、試料を詰めた状態で前方のアルミ板を開けて試料を崩壊させ、流下挙動を観察した。崩壊試料にはアルミナボールを用いた。試料は直径 $D_{50}=2.5\text{mm}$ を用いた試料 (narrow grading sample) と、 $D=3, 6, 10, 30\text{mm}$ を用いた広い粒度分布を持った試料 (widely grading sample) について検討した。河床は滑らかなアルミ板床及び、 $D_{50}=2.5\text{mm}$ の粒子固定床を設け、水路床の粗度の比較を行った。斜路の傾斜角度は試料の安息角の 20 度及び 10 度、30 度について検討した。斜路と平行に設置した高速度カメラで流れを撮影し、輝度差累積法による PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて速度分布を求め、ひずみ速度分布を算出した。

2.2 数値解析概要

表-1 解析に用いたパラメータ

パラメータ	記号 (単位)	設定値
粒子直径	D (m)	0.05 ~ 0.10
粒子の密度	ρ (kg/m^3)	2700
法線方向バネ定数	k_n (N/m)	1.0×10^8
接線方向バネ定数	k_t (N/m)	2.5×10^7
法線方向減衰定数	h_n	1.000
接線方向減衰定数	h_t	1.000
粒子間摩擦角	ϕ_i (deg.)	30
計算時間刻み	Δt (s)	1.0×10^{-5}

表-2 解析ケース

狭い粒度での傾斜角の検討			
	傾斜角 (deg.)	崩壊試料の粒度 $R_D (=D_{max}/D_{min})$	河床粗度
緩傾斜・ラフ	10	2, 10	rough
安息角・ラフ	20	2, 10	rough
急傾斜・ラフ	30, 35	2, 10	rough
安息角・スムーズ	20	2, 10	wall only

個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) を用いた粒状斜面の流動特性の検討は二次元単純斜面モデルを用いた。解析に用いたパラメータを表-1に示す。斜路上流の試料箱 (長さ 15m, 高さ 7.5m) の中に斜路鉛直方向重力下のもとに粒子を自由落下させ最密な試料を作成し傾斜に対応する重力加速度を与え、試料箱前面の壁を取り去ることで崩壊した試料の流動挙動を再現した。試料は円

形粒子のみを用い、粒度分布は最小・最大粒径 (D_{max}, D_{min}) の範囲内において重量の対数正規分布に設定した。試料の粒度は最少粒径を固定した状態で、 $R_D (=D_{max}/D_{min}) = 2, 10$ について検討した。傾斜角度は崩壊試料の安息角の 20 度及び 10 度 (緩傾斜), 30, 35 度 (急傾斜) について検討した。河床には摩擦がある滑らかな板要素河床, wall only (粗度: 小) 及び、崩壊試料と同じ物性の粒子を固定した粒子固定河床 (大), rough (粗度: 大) に加えてを設け、河床粗度と河床の相対粗度の影響について検討した。比較検討に用いた傾斜角と粒度, 河床粗度の組み合わせは表-2に示す。

3 分級のメカニズムと発生条件

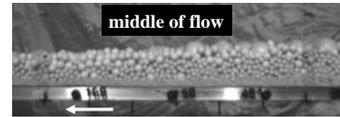


図-3 中腹部の分級の様子(実験: 良配合試料)

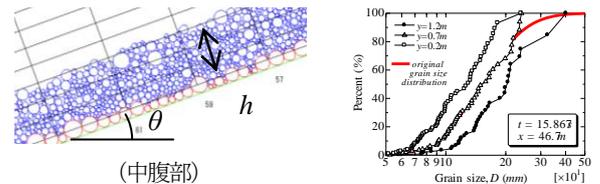


図-4 左図: 流れの様子(解析: $R_D=10$, 粒子固定河床), 右図: 深度方向にとつたメッシュ単位の粒度分布

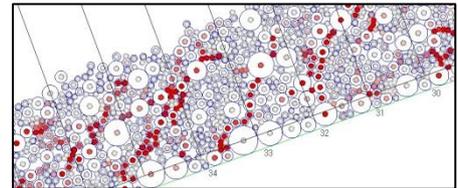


図-5 応力鎖発達の様子(解析: $R_D=10$, 粒子固定河床)

図-3に良配合試料の中腹部及における流れの様子 (実験) を示す。分級現象が確認できた。図-4には、広い粒度の崩壊試料で河床・ラフにおいて、着目メッシュ (2.0m×0.5m) 毎の粒度分布を示す (解析: $R_D=10$)。崩壊前は深度方向にほぼ同じだが、流れの中腹では河床から表層に向かうにつれて粒径の大きい粒子が多くなり、小さい粒子が少なくなる。一方、傾斜角度が大きい場合や河床が滑らかな速い流れでは分級が生じない。河床がラフで傾斜が安息角のとき粒状体流れ特有の現象が現れる。これは図-5にあるように大きい応力の印を付けられた粒子が連なった応力鎖が河床から大粒径粒子の下に向かって安定して発生するためである。

4 フルード数でみた粒状体流れ

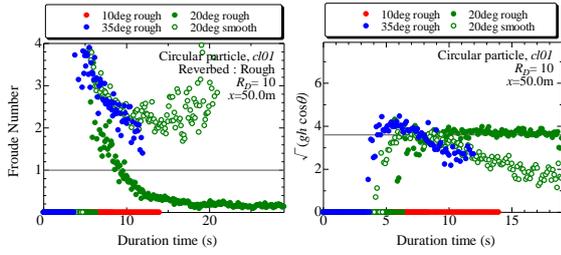


図-6 フルード数の経時変化(左), 長波速度の経時変化(右)

粒子群の流れを任意断面 ($x=50.0m$) にて観測を行った。粒状体流れ特有の現象を起こす速度について検討するため、粒状体流れに水理学で用いられるフルード数を当てはめた。図-4(左)に示すように、水路の傾斜角を θ (deg.), 高さを h (m), 断面平均速度を v (m/s) とし、長波速度を $\sqrt{gh \cos \theta}$, フルード数を $Fr = v/\sqrt{gh \cos \theta}$ とした。フルード数は断面平均速度と長波速度との比である。河床粗度や粒度の異なるケースの任意断面におけるフルード数の経時変化と重力波速度の経時変化を図-6に示す。

河床がスムーズのときのみフルード数は1より大きな値で発散する。そのほかのケースは1以下の値に収束する(図-6(左))。河床がスムーズのケース以外は前章で得られた応力波速度に長波速度が3.2m/sくらいに収束していく(図-6(右))。フルード数が1より大きくなる条件と応力鎖が発生しない条件が一致した。

5 応力波の存在と河床形状による影響

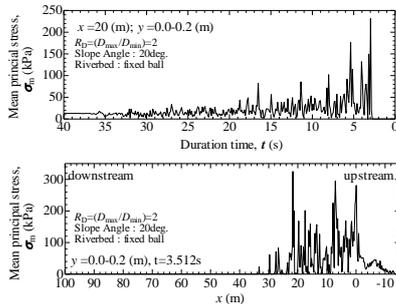


図-7 固定メッシュ($x=20m$, $y=0.1m$)における平均主応力分布の経時変化(上), 任意時刻における流下方向の平均主応力分布($y=0.1m$) (下)

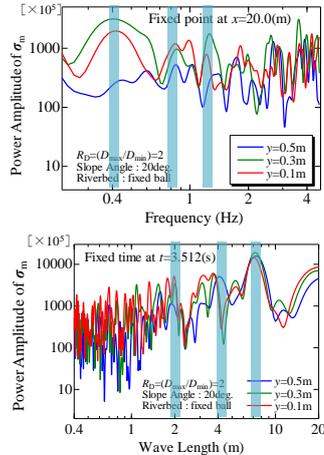


図-8 応力波の周波数特性(上), 波長特性(下)

粒子群の流れ中に発生する振動について検討を行った。固定メッ

シュ ($x=20.0m$, $y=0.1m$) における平均主応力分布の経時変化(図-7(上)), 任意時刻 ($t=3.512s$) における深さ $y=0.1m$ の流下方向の平均主応力分布(図-7(下))は振動しており粒子群の流れは振動を伴っていることがわかる。 $y=0.1, 0.3, 0.5m$ においてフーリエスペクトル解析により固定メッシュにおける平均主応力分布の経時変化から周波数特性(図-8(上)), 任意時刻における流下方向の平均主応力分布からは周波数特性(図-8(下))を求めた。応力鎖の発生する条件である傾斜角が安息角で河床がラフのとき図-8(上)より応力波の卓越周波数: $f=0.4, 0.8, 1.2$ (Hz) と、図-8(下)より応力波の卓越波長 $\lambda=8.0, 4.0, 2.0$ (m) と読み取れる。応力波の波速: $V_{\sigma} = f \times \lambda$ より $V_{\sigma} = 3.2$ (m/s) であると算出できる。これはフルード数の長波速度の収束した値と一致する。

図-9は波速比と配位数の経時変化を示す。波速比とは平均速度の応力波速との比で、配位数とは一粒子当たりの接点数のことである。配位数は大きいほど構造が安定していることを表す指標である。試料崩壊後、配位数は減少しながら波速比は大きくなっていく。次第に波速比が小さくなり1より小さくなると配位数が増加に転じ一気に配位数が増加する。つまり不安定化しながら加速し、減速に転じたのち波速比が1より小さくなると構造が安定化していく。

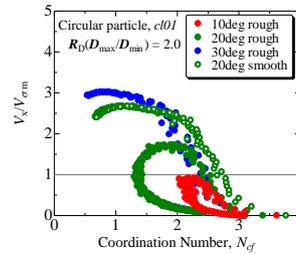


図-9 波速比と配位数の経時変化

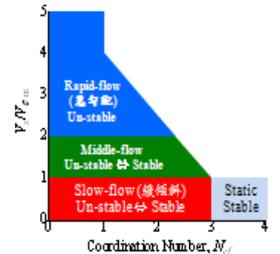


図-10 流れ中の速度と構造状態の概念図

6. 結論

粒子群の流れは応力鎖によって支配されている。応力鎖が発生と消滅を繰り返すことが縮波を伴った流れを作り出している。粒状体にフルード数を当てはめると長波速度は応力波速と一致し、流速と長波速度との大小関係で堆積や緩い状態での流下に分けることができた。(図-11)



図-11 流速と長波速度による流れの状態

7. 参考文献

- 1) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004,
- 2) MAEDA, K. and Hirabayashi, H.: J. of Appl. Mech., 9, JSCE, pp.623-630, 2006,
- 3) 平林, 福間, 前田: 土木学会応用力学論文集 Vol.11 :2008,
- 4) 福間他: 第45回地盤工学研究発表会: 1761-1762, 2010,
- 5) 館井他: 第45回地盤工学研究発表会: 1763-1764, 2010,
- 6) Bagnold: Sedimentology, 10, pp.45-46, 1968,