

石礫流れ中の応力波伝播速度と安定性に着目した流れの力学的分類

名古屋工業大学 ○ 前田健一
 名古屋工業大学大学院 福間雅俊
 名古屋工業大学大学院 館井 恵

1. はじめに

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粒状体の視点から事例解析や対策効果を含めて検討している¹⁻³⁾. 本報告では, 粒子流れ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検討した結果を示す.

2. 模型実験及び数値解析の概要

模型実験および数値解析の個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) の詳細については紙面の都合上, 省略する (詳細は既報¹⁻³⁾ に詳しい). 傾斜角度は試料の安息角等しい 20 度と緩傾斜の 10 度および急傾斜の 30 度について検討した. 試料の粒度は $R_D (=D_{max}/D_{min})=2$ に設定し, 円形粒子を用いた. 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, fixed ball (粗度: 大) を設け, 河床粗度の影響について検討した. 検討したケースを表-1 に示す.

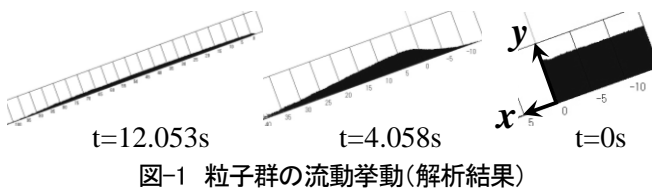


図-1 粒子群の流動挙動(解析結果)

表-1 解析ケース

	R_D	Slope Angle: θ	Riverbed Condition
Case-1	2	10	fixed ball
Case-2	2	20 ; repose angle	fixed ball
Case-3	2	30	fixed ball
Case-4	2	20	wall only

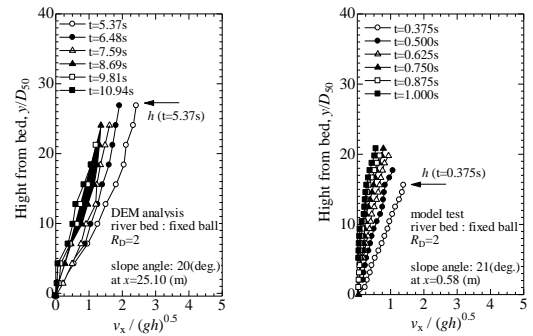
3. 粒状体流れの速度構造

図-2 に任意断面における速度の深度分布の経時変化を示す. 左図が Case-2 の解析結果 ($x=25.10\text{m}$) 断面, 右図が解析と同条件の実験結果である. 速度軸・深度軸を無次元化し, 結果の比較を行った. 実験と解析は定性的に一致する. 河床付近では速度勾配が大きく, 大きなせん断ひずみが卓越することになる. 既報¹⁻³⁾ では, 速度勾配の変曲点が, 「限界状態」⁴⁾ であり, 速度構造が 3 層構造を成していることを示した.

4. 河床特性の違いによる粒子流れのマクロな比較

河床特性が異なる粒子流れについて, 粒子群全体のマクロな流動挙動について検討を行った. 図-3 に各解析ケースにおける先端到達距離の経時変化(左)及び, 粒子塊の流下方向

の平均流速, V_x (右) を示す. 図-3 より, 勾配が急になる程, また河床が滑らかな程流動性が増すことが確認できる. また, 滑らかな河床では流下に伴うエネルギー損失が小さいため, 先端の流下挙動は直線的である. 河床が滑らかであるほど, 粒子塊の速度の減少が緩やかに進むことが確認できる.



解析結果: Case-2 実験結果: 20 度・河床粗度大
 図-2 速度の深度分布の経時変化

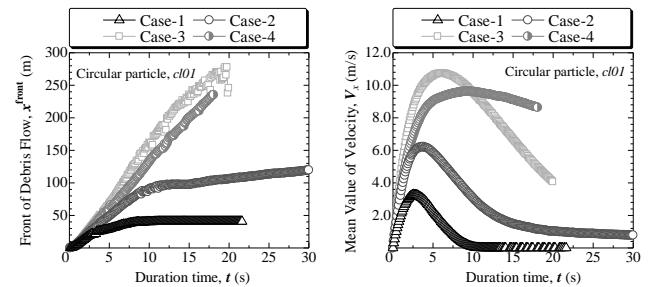


図-3 粒子群の先端到達距離(左), 流下方向平均流速(右)

5. 応力鎖の伝播速度による比較と検討

土石流を観測するとその速度分布や地中に設置した計測機により振動を伴うことが報告されている⁵⁻⁷⁾. 図-4 に Case-2 における粒子単位の応力分布を示す. 黒色程高い応力を示す.

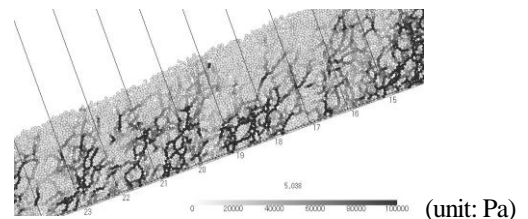


図-4 Case-2 における流れ中の応力鎖の形成の様子

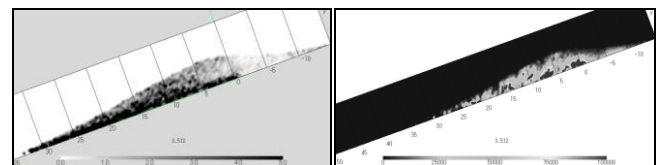


図-5 体積ひずみ速度分布(左), 平均主応力分布: Case-2

さらに、本報告では解析結果について、斜路全体をメッシュに分割し(0.2m×0.2m, 粒子4~10個程度)、メッシュ毎の物理量をそのメッシュに含まれる粒子の物理量を平均化して算出している。図-5にCase-2におけるメッシュ単位で算出した体積ひずみ速度分布(左)、平均主応力分布(右)を示す。流れ中に、ひずみ速度と応力の点から、圧縮域と膨張域が交互に発生していることがわかる。これは、応力が高い粒子が連なった応力鎖の発生と消滅に起因すると考えられる。Case-2の固定メッシュ(x=20m, y=0.1m)における平均主応力分布の経時変化を図-6(上)に、また固定時間(t=3.512s)における流下方向分布を図-6(下)に示す。粒状体流れ中の応力は波動を形成している。以下、この平均主応力の波を応力波と称することにする。

図-7(左)に固定メッシュ(x=20m)における応力波の周波数特性を、図-7(右)に任意時刻における応力波の波長特性をフーリエスペクトル解析により求めた結果を示す。紙面の都合上Case-2の結果についてのみ示す。いずれも河床付近の3つのメッシュについての解析結果を示している(y=0.1m:y=0.3m:y=0.5m)。図-7(左)より応力波の卓越周波数 $f=0.4, 0.8, 1.2(\text{Hz})$ と読み取れる。一方、図-7(右)より応力波の卓越波長 $\lambda=8.0, 4.0, 2.0(\text{m})$ と読み取れる。応力鎖の形成は多重構造になっていることがわかる。したがって、応力波の波速 $V_{\sigma_m}=f \times \lambda$ で求められるので、 $V_{\sigma_m}=3.2(\text{m/s})$ である。その他の解析Caseでは応力波の顕著な卓越周波数や波長は見られず、ホワイトノイズのようなスペクトルであった。

つぎに、流れ全体のマクロな挙動について、流れの平均流速 V_x の応力波波速 V_{σ_m} に対する相対速度 V_x/V_{σ_m} と平均配位数の関係を図-9に示す。配位数は、1つの粒子当たりの接触点数であり、粒子構造の安定度合いを示す。既報²⁾では、 $N_c > 3$ で粒子構造が不安定で安定構造であることを示している。各ケースとも経過時間とともに推移し、即ち、①試料崩壊初期:崩壊とともに速度は増加し、構造は劣化し、初期の高い配位数は減少する。②速度のピーク:速度のピークに至ると速度は減少し、配位数は流れが継続していることから継続して減少する。③構造劣化のピーク:配位数は相対速度が1、つまり波速と等しくなると、増加に転じ、その後回復する傾向が見られる。応力波の波速は粒子構造の劣化から回復の閾値であると言える。

図-9(左)に各解析Caseにおける流れの断面における相対速度 V_x/V_{σ_m} と配位数の関係を示す。Case-2における最下層部(bottom layer)やCase-1の緩斜面といった遅い流れ、Case-2の最上部層(surface layer)やCase-3の急斜面、Case-4の滑らかな河床の流れといった早い流れ、それらの中間のCase-2の中間層(transit layer)の流れ、の全てがプロットされている。図より、遅い流れは応力波の波速よりも小さい($V_x/V_{\sigma_m} < 1$)領域に集中し、配位数も高めで安定構造を示す。特に、速い流れは、 $V_x/V_{\sigma_m} > 2$ の領域に集中し、速度が増加すると構造が不安定になっている。つまり、応力波の波速との相対速度を用いて流れを捉えると、河床特性の傾斜と粗度の両方を統一的に理解できるのでは、といえる。(イメージ図を図-9右に示す)。つまり、 V_x/V_{σ_m} は粒状体流れのフルード数のようなものでないかと考えられる。

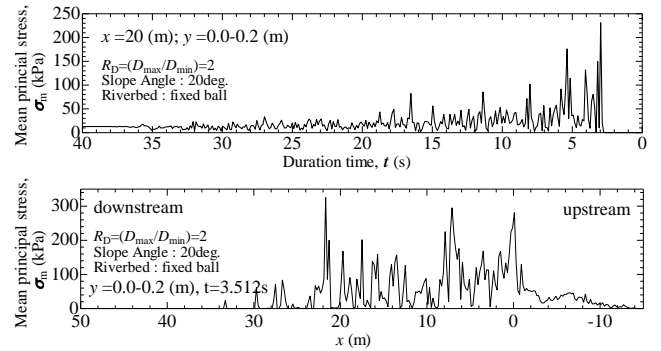


図-6 流れ中の応力の波動伝播: 定点における応力の経時変化(上图); 定時刻における応力の流下方向変化(下图)

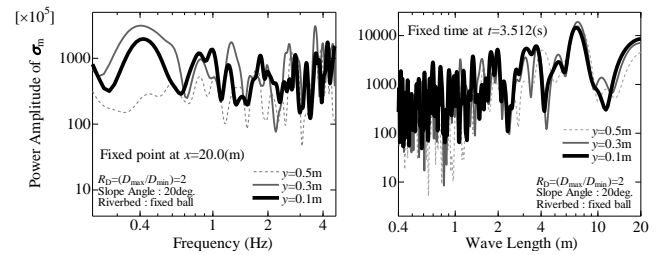


図-7 図-6 から求めた流れ中の応力波の周波数特性; 左図, 波長特性; 右図

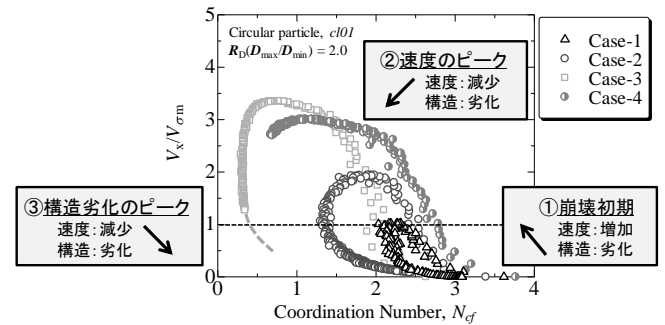


図-8 応力波の波速に対する粒子群の相対速度と内部構造の安定性の関係(流れ全体)

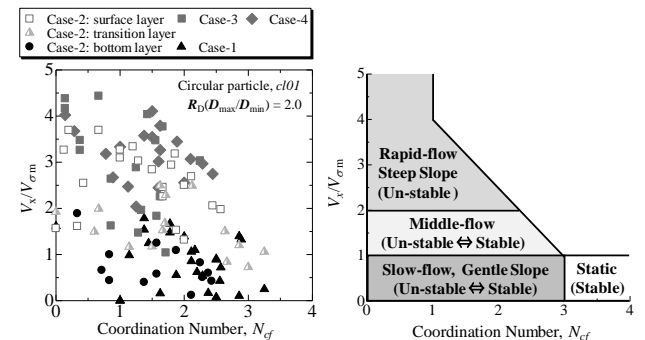


図-9 応力波の波速に対する相対速度と配位数の関係(左図)と流れの状態分類図(右)

参考文献: 1) 平林, 福岡, 前田: 土木学会応用力学論文集 Vol.11 :2008, 2) 福岡他: 第43回地盤工学研究発表会: 1017-1018, 2008, 3) 平林他: 第42回地盤工学研究発表会:1991-1992, 2007, 4) Wood, D.M.: Geotechnical modeling., Spon Press., 2004, 5) MAEDA, K. and Hirabayashi, H.: J. of Appl. Mech., 9, JSCE, pp.623-630, 2006, 5) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004, 6) Bagnold: Sedimentology, 10, pp.45-46, 1968, 7) F. Imaizumi and S. Tsuchiya, 4th ICSE, E-8, 2008.