

粒子構造に着目した応力波の存在と粒状体流れのフルード数

応力波 粒子構造 石礫型土石流

名古屋工業大学 学生会員 ○福間雅俊
名古屋工業大学 学生会員 舘井 恵
名古屋工業大学 国際会員 前田健一

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まとめた結果を示す。

2. 模型実験概要及び数値解析概要

模型実験では、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、試料の流下挙動を観察した。崩壊試料はアルミナボールを用いた。試料の粒径は直径 $D_{50}=2.5\text{mm}$ を用いた。河床は滑らかなアルミ板床及び、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、PIV 法を用いて速度分布を求め、ひずみ速度分布を算出した。

数値解析は個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) を用いた。DEM による粒状斜面の流動特性の検討は図-1 のような二次元単純斜面モデルを用いた。図中に示すように x, y 座標を設定した。解析に用いたパラメータ及び崩壊試料作成方法については既報に詳しい¹⁾。傾斜角度は崩壊試料の安息角の 20 度及び 10 度 (緩傾斜), 30 度 (急傾斜) について検討した。試料の粒度は $R_D (=D_{\max}/D_{\min})=2$ とした。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, fixed ball (粗度:大) を設け、河床粗度の影響について検討した。本報告では、表-1 に示す解析ケースについて、河床と傾斜角度が異なる流れ挙動について検討を行った。

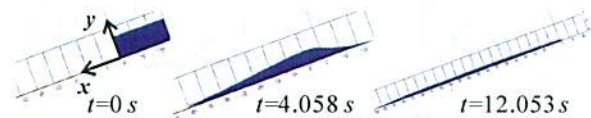


図-1 粒子群の流動挙動 (解析結果)

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

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を平均化して算出している。

図-2 に Case-2, $t=3.512\text{(s)}$ における速度分布 (左)、メッシュ単位の最大せん断ひずみ速度分布 (右) を示す。また、図-3 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。実験と解析は定量的に一致する。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している。これは、図-2;右に示した最大せん断ひずみ速度分布の深度方向と一致する (赤色:ひずみ速度が大きいことを示す)。

既報¹⁻³⁾では、粒状体流れ中のメッシュ要素単位における材料の限界状態線を State Parameter, ψ_v を用いて表すことにより、2箇所 (速度勾配の変曲点) が $\psi_v=0$ (限界状態) となる点と深度方向に一致しており、速度構造が3層構造を成していることを示した。また、 $\psi_v=0$ (限界状態) となる点ではせん断ひずみ速度が卓越していることから、粒状体流れでは、せん断現象が支配的であることを示している。

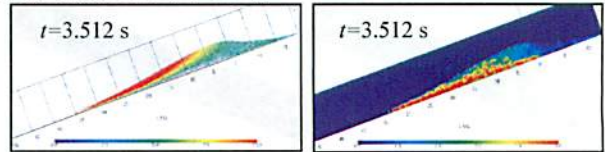
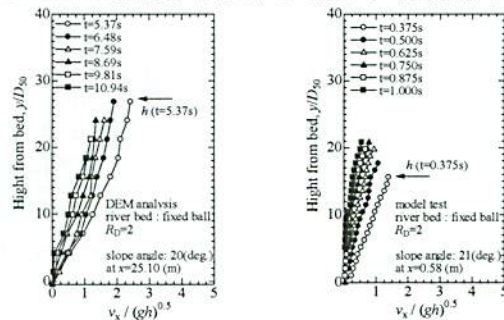


図-2 Case-2:速度分布 (左), せん断ひずみ速度分布 (右)



解析結果: Case-2 実験結果: 21度・粗度大
図-3 速度の深度分布の経時変化

4. 河床特性の違いによる粒子流れのマクロな比較

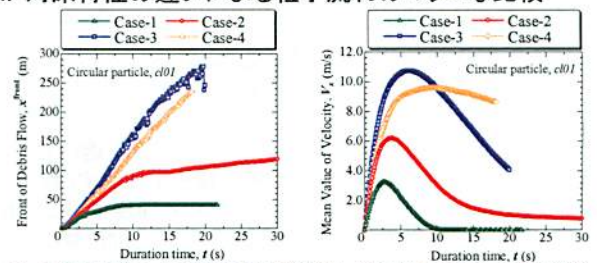


図-4 粒子群の先端到達距離 (左), 流下方向平均流速 (右)

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-4 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-4;左より、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。図-4;右より、河床が滑らかである程粒子塊の速度の減少が緩やかに進むことが確認できる。

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-6にCase-2における粒子単位の応力分布を示す。赤色程高い応力を示す。また、図-7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。

図-6、図-7;右より、応力が高い粒子が連なった応力鎖が形成されている。応力鎖は発生と消滅を繰り返す。応力鎖の発生・消滅に起因して、流れに圧縮域と膨張域が交互に発生する(図-7;左)。粒子流れ中には縦波が作用していることが解った。このことは実験結果によっても確認された。

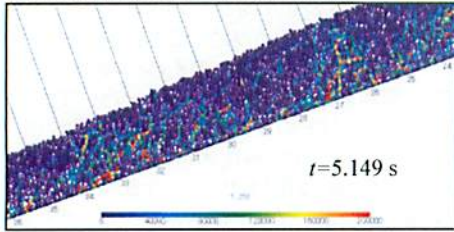


図-5 Case-2における流れ中の応力鎖の形成の様子

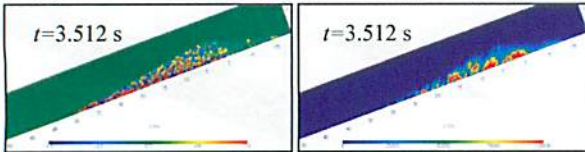


図-6 体積ひずみ速度分布(左)、平均主応力分布:Case-2

Case-2の固定メッシュ($x=20\text{m}$, $y=0.1\text{m}$)における平均主応力分布の経時変化を図-8;左に、また固定時間($t=3.512\text{s}$)における流下方向分布を図-8;右に示す。粒状体流れ中の応力分布は流れに伴い振動している。流れ中に発生する平均主応力の波を応力波と称する。各Caseにおける応力波の波形について周波数特性を調べた。さらに、時間を固定して得られる流下方向の波形について、その波長特性を調べた。

図-9;左に固定メッシュ($x=20\text{m}$)における応力波の周波数特性を、図-9;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(赤線: $y=0.1\text{m}$ →緑線: $y=0.3\text{m}$ →青線: $y=0.5\text{m}$)。図-9;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-9;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。応力波の波速は $V_{\text{om}} = f \times \lambda$ で求められるので、 $V_{\text{om}}=3.2(\text{m/s})$ である。その他の解析Caseでは顕著な卓越周波数や波長は見られなかった。

流れ全体のマクロな挙動について、応力波の波速に対する相対速度と粒子構造の安定性の関係を図-10に示す。粒子群の平均流速を応力波の波速で徐した値;相対速度: V_r/V_{om} を縦軸に、粒子群の配位数: N_c を横軸にとっている。配位数とは、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、 $N_c \geq 3$ で粒子構造が安定であることを示している。グラフは経過時間とともに推移する。即ち、①崩壊前→崩壊とともに速度は増加し、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、配位数も減少する。③構造劣化のピーク→配位数の減少は相対速度が1、つまり波速と等しくなるとピークに至り、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閾値であると言える。

図-11;左に各解析Caseにおける流れの断面分布(深度分布)の相対速度と配位数の関係を示す。赤のプロットはCase-2における最下層部やCase-1といった遅い流れを、青のプロットはCase-2の最上層部やCase-3, Case-4といった速い流れを、緑はその中間を示している。図より、赤で示した遅い流れは応力

波の波速よりも小さい領域に集中し、構造も卓越している。一方青で示した速い流れは、応力波の波速の2倍以上の領域に集中し、相対速度が大きくなるにつれ構造は不安定となることが解る。つまり、応力波の波速と粒子構造の安定性によって河床特性の異なる流れを統一的に理解することができる(図-11;右)。この応力波の波速は粒状体流れにおけるフルード数のようなものであると考えられる。粒子を含む流れでは応力鎖の概念が重要であると言える。

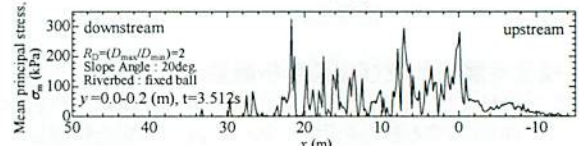
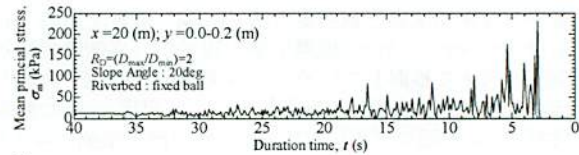


図-7 流れ中の応力の波動伝播:定点における応力の経時変化;上図,ある時刻における応力の流下方向変化;下図

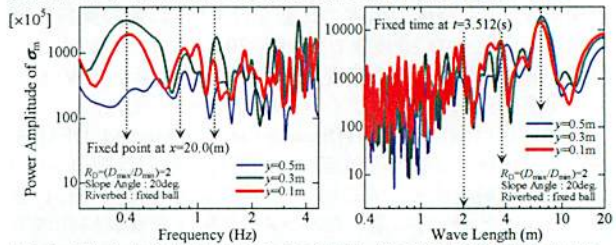


図-8 図-7から求めた流れ中の応力波の周波数特性;左図,波長特性;右図

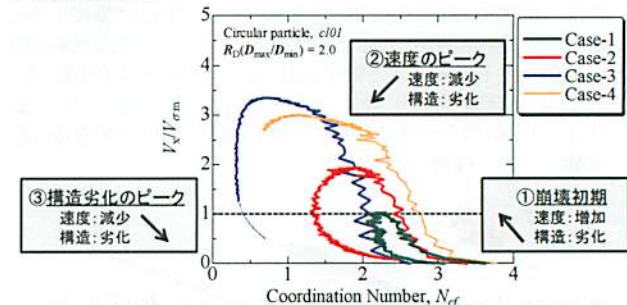


図-9 応力波の波速に対する粒子群の相対速度と内部構造の安定性(流れ全体)

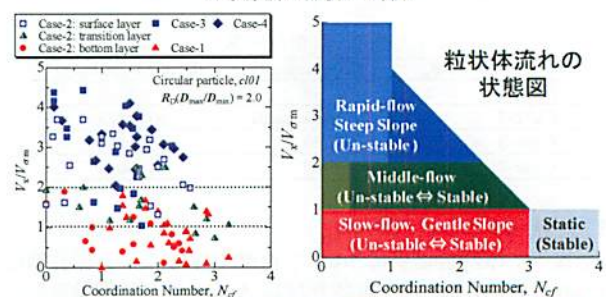


図-10 応力波の波速に対する深度方向速度分布の相対速度と内部構造の安定性(断面);左、粒状体流れの状態図;右

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44回地盤工学研究発表会:795-798,2009,3) 福岡他:第43回地盤工学研究発表会:1017-1018,2008,4) Wood, D.M.: Geotechnical modeling., Spon Press,2004,5) MAEDA, K. and Hirabayashi, H.: J. of Appl. Mech., 9, JSCE, pp.623-630,2006,6) 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 edited by H. Sekiguchi, 2008, E-8, CD-ROM.