

マルチスケールでみた石礫集合体の流れとその内部の限界状態

株式会社パスコ ○ 平林大輝
名古屋工業大学 福岡雅俊
名古屋工業大学 前田健一
株式会社パスコ 筒井胤雄
株式会社パスコ 杉井大輔

1. はじめに

本研究は石礫集合体の複雑な流れ挙動を支配するメカニズムを粒子の微視的スケールと連続体のマクロスケールの両面で解明し、効率的な土石流対策開発への応用を目標としている。

著者らは個別要素法(以下DEMと略す)解析を用いて事例解析¹⁾を行うとともに、石礫集合体の流れ機構と対策効果について検討している。既報^{2,3)}では図-1に示すように堰堤無しの場合と堰堤有り(板要素の堰堤)の場合について、二次元DEM解析結果と模型実験結果との定性的比較から、DEMの有用性を示した。また、速度分布とせん断ひずみ速度分布を調べ(図-2)、図-3(a)のように斜面平行方向速度 V_x の深度分布が三層構造となることを示した。粒子群による堰堤に作用する衝撃力を算定した結果(図-3(b))、大きな振動を伴い遷移することが分かった。さらに、粒子群の間隙比(間隙率)と応力状態について調べ、速度構造の変化点が地盤力学で用いられる限界状態⁴⁾(粒子構造の限界状態⁵⁾)に達していることを明らかにした。

そこで本論文では、流れ特性や堰堤への衝撃力を支配する粒子同士の接触構造が流れ中にどのように変化するか調べた。

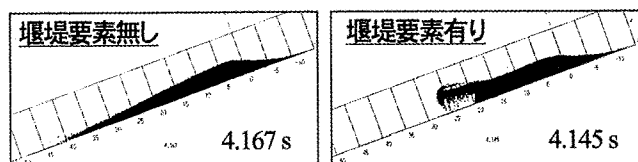


図-1 粒子群の流下挙動の計算例



図-2 堰堤要素なしの場合における粒子群の特性

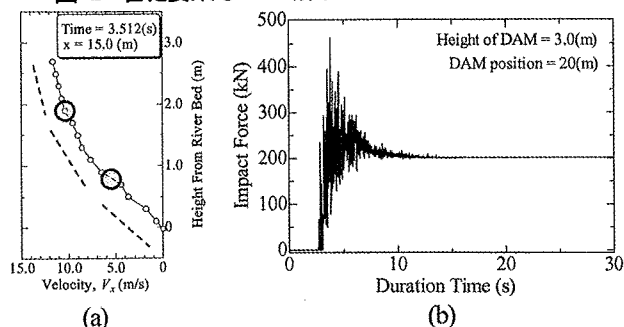


図-3 粒子群の流れのマクロな挙動: (a) 速度の深度分布; (b) 堰堤に作用する衝撃力

2. 解析手法及び解析パラメータ

二次元斜面(流下方向に x 軸)における粒子群の流下に関するDEM数値解析に用いた主なパラメータを表-1に示す。詳細

は既報³⁾に詳しい。上流の試料箱(長さ15m, 高さ7.5m)に最密な試料を作成し全体に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観察した。傾斜角度は試料の安息角の20度とした。円形粒子のみを用い、粒度分布は最小・最大粒径の範囲内において重量の対数正規分布に設定した。粒子数は約20,000個である。河床には崩壊試料と同じ物性の粒子を固定し粗度を設けた。

表1 DEM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_s (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_μ (deg.)	30
計算時間刻み	Δt (s)	1.0×10^{-5}

3. 解析結果及び考察

本研究では、流れ全体のマクロ挙動、粒子単位のマクロ挙動の他に、着目した領域をメッシュ(0.2m×0.2m; 粒子4~10個程度)に分割しメッシュ毎で平均化した物理量についても考察する。様々なスケール(マルチスケール)で観察することがメカニズム解明には重要である。ここでは、ミクロな量として配位数(粒子の平均接点数)や粒子同士の接触方向の集中度の指標であるファブリックテンソルに着目し、マクロ挙動との関係を検討した。

3.1 ミクロ量の物理的意味

配位数とは、1つの粒子当たりの接触点数で粒子特性や密度の影響を受ける。図-4は配位数 N_c の力学的意味を考察したものである。図上部に示すトラス構造を考えると、未知の部材力数(例えば S_1, S_2, S_3)が釣合い式の数(x, y 方向の二つ)よりも大きな構造(つまり不静定次数が高い構造)の方が安定である。不安定な図(a)の場合は、釣り合うまでに大きな変位が必要な準動的状態である。同様に粒子総数 M 個の粒状構造について考えると、未知の接点力の数($2 \times$ 接点数 N)と釣り合いの式の数(x, y の並進二方向と回転の計 $3 \times$ 粒子数 M)との大小関係により安定性を議論できる。よって、着目する領域内の平均配位数 N_c ($=2N/M$)が大きいくほど粒子構造は安定した状態にある。

ファブリックテンソルは、下記のような二階のテンソルである。

$$F_{ij} = \frac{1}{2M} \sum_{c=1}^{2N} n_i^c n_j^c \quad (1)$$

ここに、 n_i^c は粒子間接触点の単位法線ベクトル(図-4参照)である。ファブリックテンソルの主軸(最大主値の方向)は粒子接触面が集中している方向、つまり異方性が発達した方向を表し、主値(二次元では最大・最小値 F_1, F_2)の比やその偏差は異方性の強さを示す。また、その定義から $F_1 + F_2 = 1$ が成立し、接触方向

がランダム(等方状態)の場合、 $F_1=F_2=0.5$ となる。粒子集合体のせん断試験下では異方性の主軸は最大主応力方向に誘導され、異方性の程度は主応力比の1/2乗で発展することがわかっている⁹⁾。図-5はメッシュ毎の粒子群のファブリックテンソルで、接触方向(異方性)が卓越した最大主軸方向を直線で示した例である。

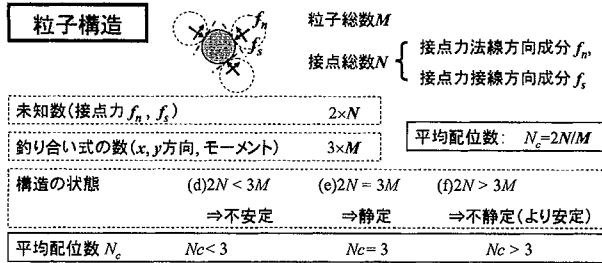
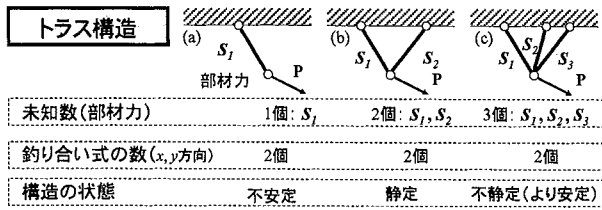


図-4 トラス構造と粒子構造の安定性

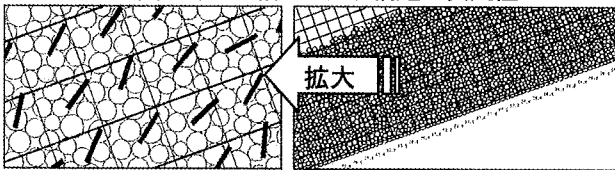


図-5 メッシュ毎の粒子集合の異方性配向性

3.2 流れ中に観察されたミクロ量と流れ挙動

図-6 に $t = 7.370$ s における各粒子が分担する圧縮応力の大きさを色の濃度を変えて示している(濃色な程高い応力を分担する)。応力が集中した粒子が並んだ応力鎖部分と応力をほとんど受け持たない部分が流れ方向に傾きながらほぼ交互に形成されている。応力鎖は流れ中に消滅と発生を繰り返す。既報^{2),3)}ではこの応力鎖の発生・消滅が圧縮ひずみ増分の不均質さをもたらし、流れ方向に縦波振動を発生させることを確認している。これが、図-3(b)の堰堤要素に働く衝撃荷重の振動成分をもたらしていると考えられる。堰堤の安定性にもこのような繰り返し荷重の考慮が必要とおもわれる。また、図-7 にメッシュ内の平均化された応力について、最大主応力の方向と主応力比をそれぞれ線の方向と色の濃度で示す。ミクロな応力鎖に対応して傾斜している。ただし、深度で向きが異なるようである。

図-8 に各粒子単位の配位数分布を示す。図-9 に流れ全体における平均配位数(実線は全ての接点を、破線は力を伝えている接点のみ)と $x=34.0$ m 地点における平均配位数の深度分布を示す。マクロな平均配位数は試料の流下と伴に低下し、停止に向かうにつれて構造的に安定である $N_c=3$ に近づく。

深度分布図(b)から、速度が大きく粒子が希薄で衝突現象が主な表面付近と速度は小さいもののせん断ひずみは大きく変形が局所化した(せん断帯)河床付近では、平均配位数が低く構造が不安定であることがわかる。粒状体中のせん断帯内部では疎な構造が発達し間隙比が顕著に高いことが知られている⁴⁾。この二層に挟まれた中間層では平均配位数は高い値を示している(図-8 でも確認できる)。流れの中央部では比較的安定な構造状態で静的と動的状態の境界にあると言える。この部分では、粒子集合体としてのせん断現象が卓越していることになる。

図-10 にファブリックテンソルの主値の方向と主値比(異方性の度合い)を示す。表層では河床に対して平行で、深くなると傾きが大きくなり、右斜め方向に傾斜し最大主応力方向(図-7)に配向している。つまり中間層では、粒子集合体としてのせん断現象が卓越していることを意味している。

以上のように、ミクロ挙動とマクロ挙動を結びつけることでより明確な石礫流れの理解と効率的な対策が可能と考えられる。

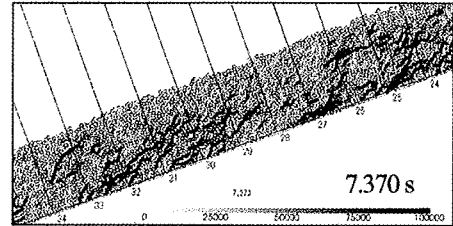


図-6 流れ中の粒子単位の応力分布($t=7.370$ s, $x=24-34$ m)

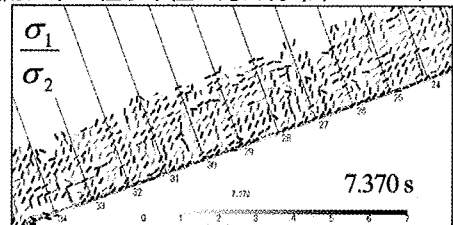


図-7 応力の主値の方向と主値比($t=7.370$ s, $x=24-34$ m)

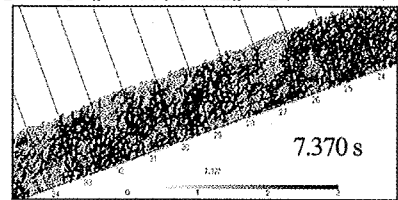


図-8 粒子単位の配位数分布($x=24-34$ m)

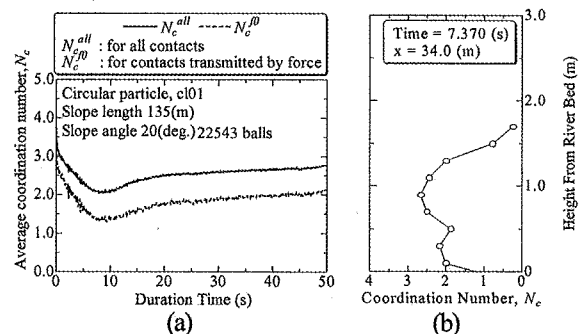


図-9 流れに伴う配位数の変化と深度分布: (a)マクロな平均配位数の経時変化、(b) 配位数の深度分布

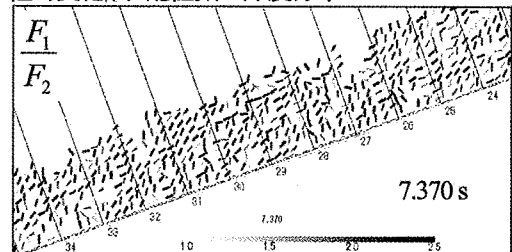


図-10 ファブリックテンソルの主値の方向と主値比: $t=7.370$ (s), $x=24-34$ (m)

参考文献: 1) 中谷, 筒井, 杉井, 前田, 菅井: 砂防学会誌, 58 (4): 35-40, 2005, 2) 福岡他: 第 42 回地盤工学研究発表会: 1989-1990, 2007, 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.