

Ⅲ-A213

DEMによる粒状体斜面の崩壊機構の微視的考察

名古屋工業大学 正 会 員 松岡 元
 " 学生会員 劉 斯宏・○飯塚洋介
 (株)大林組 正 会 員 山本修一

個別要素法 (DEM) は、個々の粒子を要素でモデル化して、粒状体の力学挙動を1つ1つの粒子の挙動の微視的観点から考察できるメリットがある。そこで本研究では、粒状体斜面の2次元モデルとしてアルミ丸棒積層体斜面の崩壊実験を行い、実験結果と実験にできる限り初期粒子配置を合わせたDEMによる解析結果を比較した後、粒状体斜面の崩壊現象の微視的メカニズムをDEM解析結果より考察した。

1. 斜面崩壊実験のDEM解析

斜面崩壊実験¹⁾は写真-1に示す傾斜箱を用いて行った。試料は直径5mmと9mm、長さ50mmのアルミ丸棒を混合重量比3:2としたものである。傾斜箱の底面と試料の間に十分な摩擦を持たせるために、直径5mmと9mmのアルミ丸棒を並べてマグネットシートに接着したものを設置し、その上にアルミ丸棒積層体の斜面長を80cmとなるように、斜面の表面は凸凹がないようにして三角形の斜面を形成した(写真-1参照)。このように設定した傾斜箱模型実験において、傾斜箱を徐々に傾けていき斜面を崩壊させた。

実験は同一条件で何回も行った。崩壊角度 θ は平均して $24^{\circ} \sim 26^{\circ}$ 程度であり、DEMによる斜面崩壊シミュレーションの解析結果は 24° となった(表-1)。また、アルミ丸棒積層体の内部摩擦角 ϕ は $24^{\circ} \sim 25^{\circ}$ であることが知られているので、崩壊角度 θ は内部摩擦角 ϕ とほぼ等しいことがわかる。したがって、斜面の崩壊現象が「表層すべり」現象であると考えられる。

DEMにおける初期(斜面を傾ける前の)粒子配置は、写真-1に示す実験での粒子配置にできる限り合わせるべく、図-1に示すようにコンピューターに粒子1つ1つの中心座標と直径を数値化して作成した。DEMによるシミュレーション解析には表-2に示す材料定数を用いた。

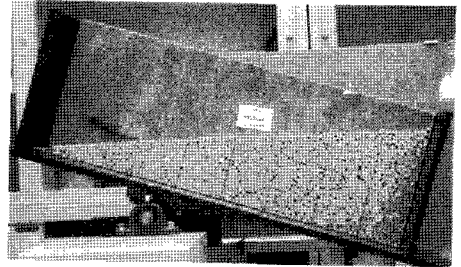


写真-1 実験の初期粒子配置

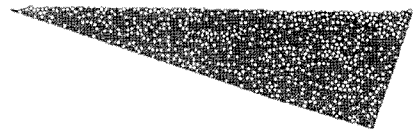


図-1 デジタル化した初期粒子配置

表-1 実験結果と解析結果

アルミ丸棒積層体の内部摩擦角 ϕ	斜面の崩壊角度 θ	DEM解析による斜面の崩壊角度
$24^{\circ} \sim 25^{\circ}$	$24^{\circ} \sim 26^{\circ}$	24°

表-2 解析に用いた材料定数

粒子間		粒子間
バネ定数 (N/m/m)	法線方向 k_N	6.7×10^9
	接線方向 k_S	2.0×10^7
粘性定数 (N/m/m)	法線方向 η_N	3.8×10^4
	接線方向 η_S	2.0×10^3
粒子間摩擦角 μ (deg)		16
粒子の質量密度 ρ (kg/m ³)		2700
粒子の直径D (mm)		5, 9

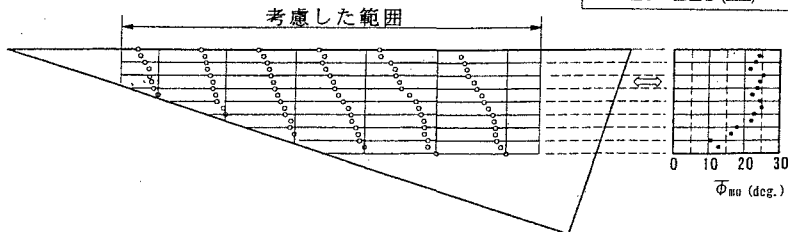


図-2 $\gamma=8\%$ の時の斜面表面に平行な方向の粒子の平均移動量と各断面での内部摩擦角 ϕ_m

Key words : 粒状体斜面、模型実験、個別要素法、表層すべり、粒子接点角

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 Tel 052-735-5483 FAX 052-735-5483, 5503

図一2は $\gamma \approx 8\%$ の時の斜面表面に平行な方向の粒子の平均移動量と各断面で発揮されている平均的な内部摩擦角 $\bar{\phi}_{mo}$ を示したものである。表層付近の発揮されている内部摩擦角 $\bar{\phi}_{mo}$ が $22^\circ \sim 25^\circ$ 程度にプロットされているのが見られる。また、斜面崩壊現象が表層付近で単純せん断的な変形²⁾を示すと見られるので、以下 DEM 解析結果を用いて斜面崩壊現象を微視的観点から考察する。

2. 粒状体の斜面崩壊現象の微視的メカニズム

粒状体の平均的な応力 σ_{ij} は粒子に作用する接触力 F_j から次のように導かれる³⁾

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_R l_i F_j \quad (1)$$

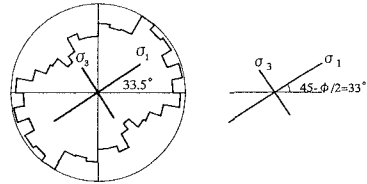
ここに、 R は領域、 V は領域の体積、 l_i は接触する粒子の中心を結ぶベクトル、 F_j は粒子に作用する接触力を意味する。

式(1)により粒状体の平均応力を計算すると、せん断ひずみ $\gamma \approx 8\%$ の時に最大主応力方向が斜面表面に平行な面と約 33.5° をなすことが分かった(図-3参照)。一方、アルミ丸棒積層体の内部摩擦角 ϕ は 24° 程度であるので、最大主応力方向がスベリ面となす角度は $\pi/4 - \phi/2 = 33^\circ$ となり、両者の値はほぼ一致する。したがって、斜面表面に平行な面がスベリ面と考えられる。図一4は斜面表面に平行な面上での粒子接点角の度数分布 $N(\theta)$ の変化を最大度数 N_{max} で正規化して示したものである。図一4より、せん断ひずみ γ の増加に伴って、斜面表面に平行な面上のせん断力に抵抗しやすい正の粒子接点角(θ が大きいくほど抵抗しやすい)の度数分布が相対的に増加していくのが見られる。図一5は斜面表面に平行な面上における粒子接点角の、定常接点(接触し続ける接点の個数)の度数分布 $N_s(\theta)$ 、発生接点(接触していなかった粒子が接触して、新たに発生した接点の個数)の度数分布 $N_g(\theta)$ 、消滅接点(接触していた粒子が離れて消滅した接点の個数)の度数分布 $N_d(\theta)$ を示している。この図より、粒子接点の発生、消滅によってせん断力に対して抵抗しやすい θ の正の方向に粒子接点角の分布が片寄ることが理解される。図一6は斜面表面に平行な面上の粒子接点角 θ の変化量 ξ を示したもので、実線は角度 θ に対するマクロなせん断・垂直応力比 $\tau(\theta)/\sigma(\theta)$ ($=\sin \phi_{mo} \cos(2\theta - \phi_{mo}) / \{1 + \sin \phi_{mo} \sin(2\theta - \phi_{mo})\}$)の分布をプロットに合うようにスケールしたものである。斜面表面に平行な面上の粒子接点角の変化量 ξ がマクロなせん断・垂直応力比の分布とほぼ対応しているのが見られる⁴⁾。このことは、粒子の滑動が粒子接点の摩擦則、すなわちせん断・垂直応力比 $\tau(\theta)/\sigma(\theta)$ に支配されていることを示しており興味深い。

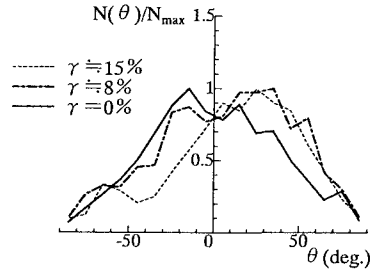
3. 結論

斜面模型実験の崩壊角度 θ とアルミ丸棒積層体の内部摩擦角 ϕ が一致したことから、粒状体の斜面崩壊現象が「表層すべり」であると考えられる。また図一3～図一6より表層付近の斜面崩壊現象は単純せん断的なせん断現象であると考えられる。

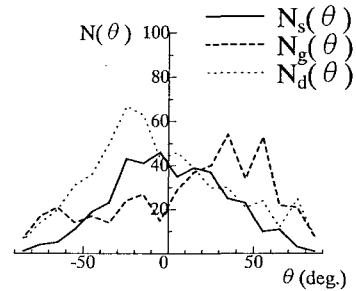
参考文献 1) 松岡他：粒状体斜面の崩壊機構とその効果的な補強方法に関する基礎的研究, 第32回地盤工学研究発表会, pp.1879-1880, 1997. 2) 松岡他：DEMによる粒状体の単純せん断試験のシミュレーションとせん断機構の考察, 土木学会第53回年次学術講演会, III-A10, pp.20-21, 1998. 3) Christoffersen, J. et al.: A micromechanical description of granular material behavior, J. Appl. Mech., Vol. 48, No. 2, pp.339-344, 1981. 4) 山本・松岡：粒状体のせん断時の粒子構造の変化とせん断ひずみの関係, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.219-228, 1994.



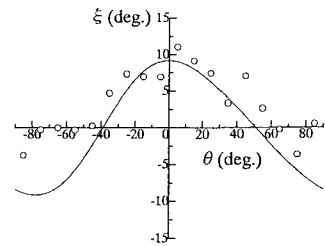
図一3 粒子接点角分布と主応力方向



図一4 斜面表面に水平な面上の粒子接点角の度数分布



図一5 斜面表面に平行な面上の定常・発生・消滅の度数分布



図一6 斜面表面に平行な面上の粒子接点角の変化量の分布