

Ⅲ-A10 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

名古屋工業大学 正 会 員 松岡 元

" 学生会員 劉 斯宏・上野祐資・〇児玉 仁

個別要素法 (DEM) は、粒状体の粒子1つ1つを個別の要素でモデル化して粒状体挙動を粒子レベルの微視的観点から考察できるというメリットがある。山本ら¹⁾はアルミ丸棒積層体の二軸圧縮試験をDEMによるシミュレーション解析を行うことによって、粒状体のせん断現象の微視的メカニズムを考察した。ここでは、アルミ丸棒積層体の単純せん断試験をDEMによりシミュレートし、粒状体のせん断現象の微視的メカニズムを検討した。

1. DEMによる単純せん断試験のシミュレーション

単純せん断試験は写真-1に示す試験機を用いて行った。試料は直径 3mm と 5mm、長さ 50mm のアルミ丸棒を混合重量比 3:2 で積み上げたものである。供試体の横幅は 20cm、高さは 4.9cm とした。積み上げた試料の上に載荷板をのせて荷重をかけ、載荷板を水平方向に引張ることによりせん断力をかけ、試験を行った。載荷板の底面およびせん断箱の底面には十分摩擦を伝えるために、試料と同じアルミ丸棒が貼り付けてある。また、せん断箱の左右には下端がヒンジで傾倒可能な側板が設置しており、左右の側板を装置の裏側でヒンジで連結することによって左右両端でのせん断ひずみが等しくなるように工夫してある。

DEM解析における粒子配置は写真-1に示している試験写真をデジタイズすることによって粒子1つ1つの中心座標と直径を数値化して作成した(図-1)。DEMシミュレーションには表-1に示す材料定数を用いた。図-2はせん断・垂直応力比 (τ/σ) ~ せん断ひずみ (γ) ~ 垂直ひずみ (ε_N) 関係について試験結果と解析結果を比較したものである。試験結果と解析結果はほぼ一致しているのが見られる。上述のように、この試験は載荷板を水平方向に引張ることにより、左右の剛性板を同じ角度(せん断ひずみ)ずつ変形させるので、モービライズド面が水平と考えるのが自然であろう。図-3はDEMによるせん断過程(せん断開始からピークまで、 $\tau/\sigma = 0 \sim 0.42$)における粒子の変位ベクトル図であり、図-4は5cmの水平間隔での鉛直断面上の粒子の水平変位の分布図である。図-3、

4より、供試体全体で水平方向にほぼ様な変形をしているのが分かる。また、粒子間力から式 $\sigma_y = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{R}} \ell_i F_j$ ($\mathbf{R}$ は領域、

V は領域の体積、 ℓ_i は接触する粒子中心を結ぶベクトル、 F_j は粒子に作用する接触力)により粒状体の平均応力を計算²⁾すると、最大主応力方向が τ/σ のピーク時に水平面と約 33° を成すことが分かった(図-5参照)。一方、アルミ丸棒積層体の ϕ は 24° 程度であるので、最大主応力方向がモービライズド面となす角度は $\pi/4 - \phi/2 = 33^\circ$ となり、両者は一致する。供試体の水平方向への様な変形と最大主応力方向より、モービライズド面はほぼ水平と考えられ

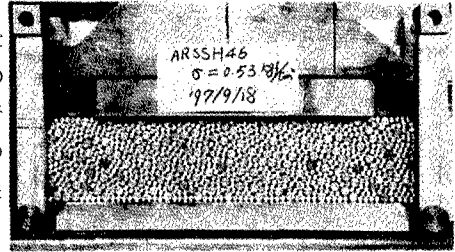


写真-1 単純せん断試験機

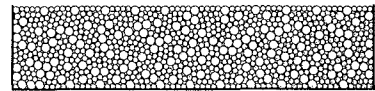


図-1 解析における初期粒子配置

表-1 DEM解析に用いた材料定数

バネ定数 (N/m/m)	法線方向 k_n	粒子間	粒子-載荷板間
		接線方向 k_s	
粘性定数 (N/m/m)	法線方向 η_n	0.9×10^{10}	1.8×10^{10}
	接線方向 η_s	3.0×10^8	6.0×10^8
摩擦角 ϕ_n, ϕ_s (deg)	法線方向 η_n	7.9×10^4	1.1×10^5
	接線方向 η_s	1.4×10^4	2.0×10^4
摩擦角 ϕ_n, ϕ_s (deg)		15	16
粒子の質量密度 ρ (g/m ³)		2700	
粒子の直径 D (mm)		3, 5	

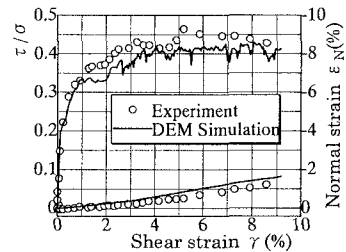


図-2 単純せん断試験における実験結果と解析結果の比較

キーワード: 個別要素法、単純せん断試験、シミュレーション、粒状体、せん断機構

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

る。以下、モービライズド面を水平面として粒状体のせん断機構を考察する。

2. 粒状体のせん断現象の微視的メカニズム

図-6はモービライズド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-6より「応力比 (τ/σ) の増加に伴って、モービライズド面上のせん断力に抵抗しやすい粒子接点角 (θ) が大きいほど抵抗しやすいの度数が相対的に増加する」が見られる。このことが粒状体のせん断抵抗を支配する要因の1つであると考えられる³⁾。図-7は粒子構造が図-6のように変化する場合 $(\tau/\sigma=0\sim0.42)$ のモービライズド面上の発生接点(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)の度数分布 $N_g(\theta)$ と消滅接点(接触していた粒子が離れて消滅した接点)の度数分布 $N_d(\theta)$ を示している。図-7よりモービライズド面で見た場合、発生接点はせん断力に抵抗しやすい θ の正の方向に集中し、消滅接点は反対に θ の負の方向に集中することが分かり、興味深い。このことは図-6に示している粒子接点角の分布形が θ の正の方向へ片寄る理由と考えられる。また、山本ら^{1,4)}はすでにDEMによる二軸圧縮試験シミュレーション結果より、モービライズド面上の粒子接点角の変化量 (ξ) と粒子接点角との関係を考察した。ここでは、単純せん断試験のDEMによるシミュレーション結果に基づいて同じ関係の整理をした(図-8参照)。図-8の実線は粒子接点角 θ の粒子接平面に作用するマクロなせん断・垂直応力比 $\tau(\theta)/\sigma(\theta)$ $(=\sin\phi_{m0}\cos(2\theta-\phi_{m0})/[1+\sin\phi_{m0}\sin(2\theta-\phi_{m0})])$ の分布をプロットに合うようにスケーリングしたものである。単純せん断試験の場合でも、モービライズド面上の粒子接点角の変化量 (ξ) の分布は粒子接平面のマクロなせん断・垂直応力比の分布とほぼ対応しているのが見られる。

3. おわりに

DEMによる単純せん断試験のシミュレーション解析を行ったところ、解析結果は試験結果とよく対応した。この解析結果に基づいて、単純せん断の場合について粒状体のせん断機構(せん断に伴う粒子接点角の変化とその理由およびモービライズド面上の粒子接点角の変化量と粒子接点角との関係)を検討した。

謝辞 DEM解析に関してご教示いただいた大林組の山本修一氏に深く謝意を表します。

参考文献 1)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, 12. 2)Christoffersen, J., et al.(1981): A micromechanical description of granular material behavior, J. Appl. Mech., Vol.48, No.2, pp.339-344. 3) Matsuoka, H.: A microscopic study on shear mechanism of granular materials, Soils and Foundations, Vol.14, No.1, pp.29-43, 1974. 4)山本修一:個別要素法による粒状体の力学挙動に関する基礎的研究,名古屋工業大学博士論文, 1995.

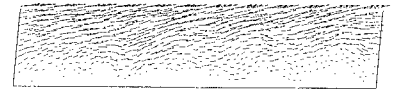


図-3 変位ベクトル図
($\tau/\sigma=0\sim0.42$)

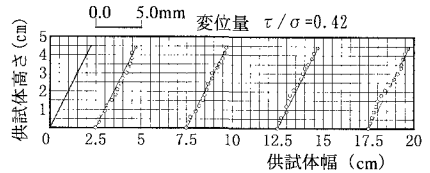


図-4 粒子の水平変位分布図
($\tau/\sigma=0\sim0.42$)

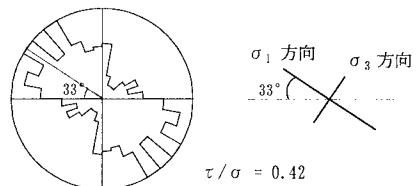


図-5 粒子接点角分布と主応力方向

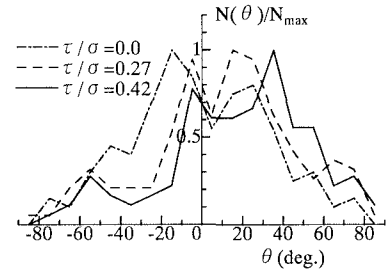


図-6 モービライズド面上の粒子接点角分布 $N(\theta)$ の変化

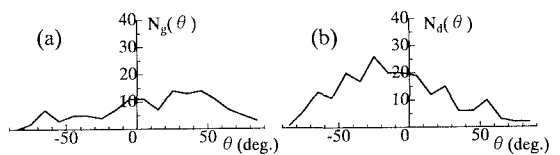


図-7 モービライズド面上の発生・消滅接点の度数分布 $N_g(\theta)$ 、 $N_d(\theta)$

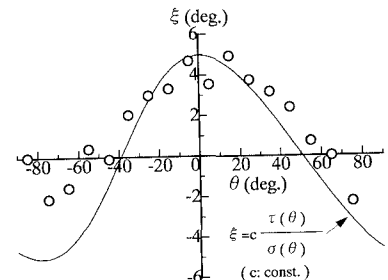


図-8 モービライズド面上の粒子接点角の変化量 ξ の分布