

III-22

シミュレーションによる粒状材料の補強メカニズムの考察

東北大学工学部 学生員 ○浅沼 秀雄
 東北大学工学部 正 員 京谷 孝史
 東北大学工学部 正 員 岸野 佑次

1.はじめに

地盤の補強のメカニズムをよりの確に把握するためには、微視的なアプローチが必要であると考えられる。ここではとくに、粒状材料の補強について粒状要素法を用いて解析を行い考察を行った。

2.解析方法

1) 境界の制御と剛性行列

要素試験においては、境界の制御による異方性が生じないように円形領域のモデルを用いる。最も外側に配置されている粒子は、境界要素である。境界要素は、それにより囲まれた内部領域を制御するためのものであり、境界要素の位置は式(1)に示す一次変換で定められるものとし、境界要素の回転は生じないものとする。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\varepsilon_x & -\gamma_{xy}/2 \\ -\gamma_{xy}/2 & 1-\varepsilon_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $[X \ Y]^T$ は現段階、 $[X_0 \ Y_0]^T$ は初期段階の境界要素の位置ベクトルであり、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ は、初期状態からの x, y 方向の伸縮ひずみ（圧縮正） γ_{xy} は、せん断ひずみ（工学ひずみ）である。(1)式によって定義される変形にエネルギー的に対応する応力は、Piola-Kirchhoff の第一応力テンソルであり、各境界要素に内部要素から作用する接触力の合力 (f_x, f_y) を用いて次式で定義される。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \frac{1}{A_0} \sum \begin{bmatrix} f_x X_0 & f_x Y_0 \\ f_y X_0 & f_y Y_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 σ_x, σ_y は垂直応力、 τ_{xy}, τ_{yx} はせん断応力、 $\sum$ は全境界要素に関する和、 A_0 は初期状態における領域の面積である。

2粒子間に作用する滑りに関しては、Coulombの摩擦則を仮定し、接触力の法線方向成分および接線方向成分を p_n および p_t 、粒子間の摩擦角を ϕ とするとき、2粒子間に相対滑りを生じない条件は次のように表すことができる。

$$|p_t| \leq p_n \tan \phi \quad (3)$$

接触点における法線方向、接線方向のバネ剛性を c_n, c_t とおく。任意の2粒子間の接触点Cにおける接触力増分ベクトルを $\Delta P_C = (p_n, p_t)_C^T$ 、対応する相対変位増分ベクトルを、 $\Delta U_C = (\Delta u_n, \Delta u_t)_C^T$ と置くと、これらの間には次の式が成り立つ。

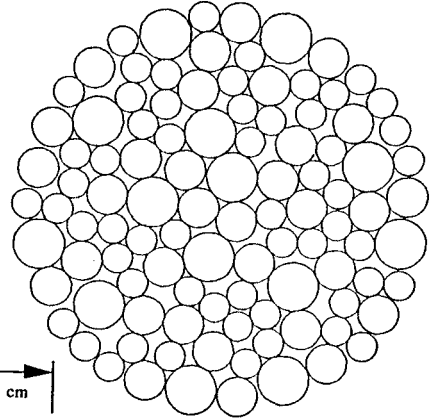


図-1 パッキングモデルの初期状態

次の式が成り立つ。

$$\Delta P_C = S_C \Delta U_C \quad (4)$$

$$\text{ここに、} S_C = \begin{bmatrix} c_n & 0 \\ 0 & c_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

を接触剛性行列である。粒子間の法線方向および接線方向バネのバネ定数をもとに剛性行列

$$\begin{bmatrix} \Delta \sigma \\ \Delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (6)$$

を定めることができる。ここに $\Delta \sigma$ は境界に作用する応力増分、 ΔF は粒子に作用する物体力増分、 $\Delta \varepsilon$ は境界に作用するひずみ増分、 ΔU は粒子の変位増分である。

2) 補強のモデル化

ここでは、ロックボルト等による補強を想定して領域内のある特定の幅をもった帯状の領域における粒子間のすべりを阻止することとする。このため重心がこの帯状領域（補強領域と称する）に含まれる2粒子間の摩擦係数（ $\tan \phi$ ）を無限大として補強のモデル化を行うこととする。とくにこの帯状領域の方向（ x 軸からの角度 α ）を変化させることに伴う補強の効果を調べる。

3) 解析条件

円形領域に3種類の半径の粒子をランダムに配置して粒状要素法でパッキングしたものを供試体モデルの初期状態とする（図-1）。解析に用いた諸定数を、表-1に示す。載荷方法は、平均応力

$$p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (7)$$

を一定に保つ応力制御二軸せん断試験とする。これを本試験として、この結果を基に様々な補強条件を与えて強度特性の比較を行う。境界要素も含んだ全ての粒子間の摩擦係数を、 $\tan \phi$ として本試験を行う。また、帯状の補強領域の幅は3cm、配置の方向 α は、 $\pi/4$ ずつ角度を変えて4通り行う。

3. 解析結果および考察

図-2 に本試験の応力ひずみ曲線を示す。摩擦角を全て 25° のままの場合、および各 α の方向の帯状領域の摩擦係数を無限大としたものについてのせん断ひずみの値が、約0.3%までは全ての場合についてほぼ同一の曲線上に載っている。これは、この部分では粒状体内部におけるすべりが顕著でなく、ほぼ弾性的な挙動を示すためであると思われる。 $\phi = 25^\circ$ の試験での粒子の変位ベクトルを図-3に示す。これを見ると、粒子群の左上から右下に伸びる線を境として右横ずれの傾向が顕著に表れる。図-2の応力ひずみ曲線を見ると $\alpha = 0, \pi/4, \pi/2$ とくらべて $\alpha = 3\pi/4$ のときに補強の効果が低いことが分かる。これは、 $\alpha = 0, \pi/4, \pi/2$ のときに補強領域が右横ずれの起きている面を貫くのにに対し、 $\alpha = 3\pi/4$ のときには右横ずれの起きている面に平行に配置されているためであると考ええる。つまり、ロックボルト等の補強材料はすべり面を貫くように配置を行った方が補強材料としての効果が、より高くなるということである。

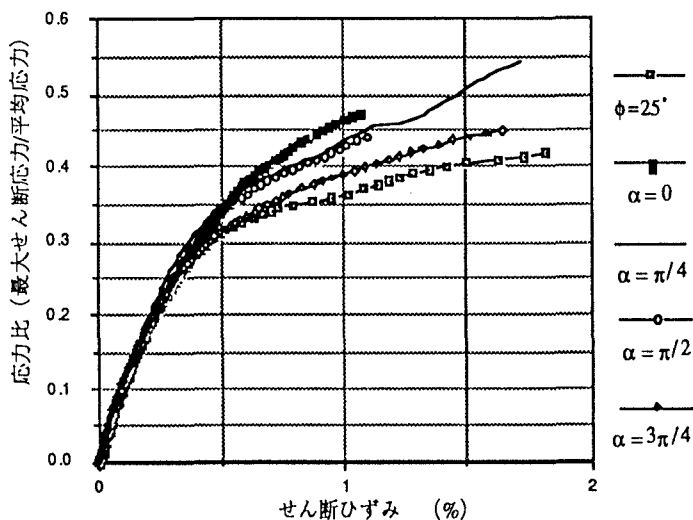


図-2 応力ひずみ曲線

表-1 諸定数

粒子数	103個
粒子半径	1.0, 0.8, 0.6 cm
面積比	1 : 1 : 1
単位体積重量	0.0 kgf/cm ³
接触バネ定数	
法線方向	1000 kgf/cm
接線方向	700 kgf/cm
摩擦角	25°
平均応力	2.0 kgf/cm ²

4. あとがき

ここでは粒状要素法を用いてロックボルト等を想定した粒状材料の補強効果に関する研究を行った。解析の規模など未だ不十分ではあるが、将来的にはこのような解析を通して補強効果のメカニズムの一端が明らかになると考えられる。

参考文献

岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文集，vol.406/III-11, pp.97-106 (1989)

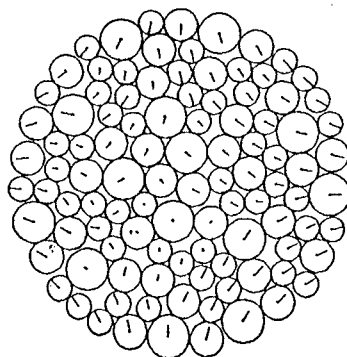


図-3 粒子の変位ベクトル
(せん断ひずみ 0~1.4 %)