

Ⅲ-163

粒子間付着力による見かけの粘着力に関する微視的考察

(株)大林組技術研究所 正会員 山本修一
名古屋工業大学 正会員 松岡 元

1. はじめに

個別要素法 (DEM) による粒状体のせん断試験の数値シミュレーションを行って、粒子間付着力を有する粒状体の見かけの粘着力 c' について考察した。粒子間に付着力が作用する粒状体の代表的なものに不飽和土がある。不飽和土では粒子間に形成されるメニスカスによって粒子間付着力が作用する。本研究では、接触する粒子間に付着力が作用する単純化された2次元粒状体を考えて、見かけの粘着力 c' と粒子間付着力および粒子構造との関係を誘導し、その関係を DEM による数値シミュレーションによって検証した。

2. 見かけの粘着力 c' の誘導

接触する粒子間だけに粒子間付着力が作用する2次元粒状体を考える。外的に与えられたモービライズド面 (せん断・垂直応力比の最大面) 上の単位面積当たりのせん断力を H/A 、垂直力を V/A とし、モービライズド面上の粒子接点 i (接点角 θ_i) に作用する粒子間力の垂直方向成分を f_{Ni} 、接線方向成分を f_{Si} 、粒子間付着力を P_i とすれば (図-1 参照)、力のつり合いより次式が得られる^{1), 2)}。

$$H/A + \sum P_i \sin \theta_i / A = (\sum f_{Ni} \sin \theta_i + \sum f_{Si} \cos \theta_i) / A \quad (1)$$

$$V/A + \sum P_i \cos \theta_i / A = (\sum f_{Ni} \cos \theta_i - \sum f_{Si} \sin \theta_i) / A \quad (2)$$

ここで、平均的な粒子間力の垂直成分、接線成分を $\bar{f}_N$ 、 $\bar{f}_S$ とし式(1)と式(2)の比をとれば近似的に次式が成立する^{1), 2), 3)}。

$$\frac{H/A + \sum P_i \sin \theta_i / A}{V/A + \sum P_i \cos \theta_i / A} = \frac{\bar{f}_N \sum \sin \theta_i + \bar{f}_S \sum \cos \theta_i}{\bar{f}_N \sum \cos \theta_i - \bar{f}_S \sum \sin \theta_i} = \frac{\sum \sin \theta_i + \frac{\bar{f}_S}{\bar{f}_N} \sum \cos \theta_i}{1 - \frac{\bar{f}_S}{\bar{f}_N} \sum \sin \theta_i / \sum \cos \theta_i} = \frac{\tan \bar{\theta} + \tan \bar{\phi}_{\mu mo}}{1 - \tan \bar{\phi}_{\mu mo} \tan \bar{\theta}} = \tan(\bar{\theta} + \bar{\phi}_{\mu mo}) = \tan \phi'_{mo} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\theta}$ は平均粒子接点角、 $\bar{\phi}_{\mu mo}$ はモービライズされている粒子間摩擦角の平均値、 ϕ'_{mo} はモービライズされている内部摩擦角である。破壊時のモービライズド面上の垂直応力を $V/H = \sigma'$ 、せん断応力を $H/A = \tau_f$ とすれば、式(3)より次の関係が得られる^{1), 2)}。

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4)$$

$$c' = (\sum P_i \cos \theta_i / A) \tan \phi' - \sum P_i \sin \theta_i / A \quad (5)$$

3. せん断試験シミュレーションによる見かけの粘着力 c' の検証

松岡ら⁴⁾は上箱のない簡易一面せん断試験機 (写真-1 参照) を用いてアルミ丸棒積層体、砂、ガラスビーズ、ロックフィル材などのせん断試験を行って、簡易一面せん断試験で得られる内部摩擦角と二軸圧縮試験、三軸圧縮試験から得られる内部摩擦角とがほぼ一致することを示している。そこで、まずアルミ丸棒積層体の簡易一面せん断試験の DEM による数値解析結果に基づいて式(4)、(5)を検証する。次に、二軸圧縮試験の DEM による数値解析結果に基づいて式(4)、(5)を検証する。なお、筆者ら³⁾はアルミ丸棒積層体の一面せん断試験と二軸圧縮試験について実験結果と DEM による数値解析結果とが定量的に一致することを示している。

粒子間付着力のないアルミ丸棒積層体 (長さ 5cm、直径 5mm、9mm、混合重量比 3:2、粒子数約 300 個) の簡易一面せん断試験を初期粒子配置を変えて2ケース (ケース1、ケース2) 行い、それらをできるだけ忠実にモデル化した DEM による数値解析を行った。次にそれらの2ケースについて同じ初期粒子配置で上載圧や粒子間付着力を変えて DEM による数値解析を行った。写真-1 は簡易一面せん断試験機とアルミ丸棒積層体の初期粒子配置の例を示している。載荷板底面には試料の混合重量比と同じ割合でアルミ丸棒を並べて接着してある。

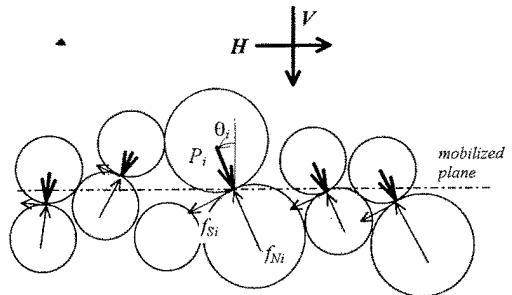


図-1 モービライズド面上の力のつり合い

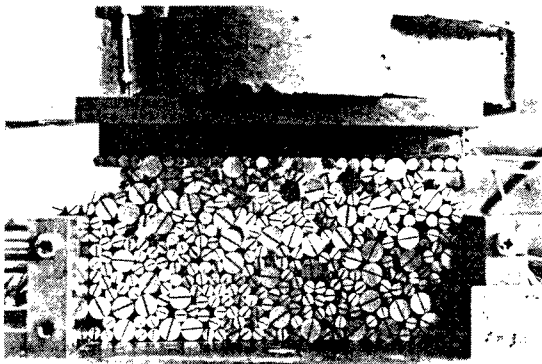


写真-1 簡易一面せん断試験装置と初期粒子配置

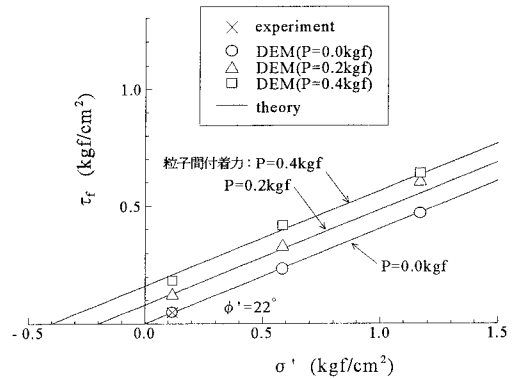
載荷板の上に錘を載せ、載荷板を水平方向にロードセルを介して引っ張り、せん断力を測定した。DEM による数値解析は実験と同じ上載圧（ケース 1 では $\sigma' = 0.12 \text{ kgf/cm}^2$ 、ケース 2 では $\sigma' = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ）およびその 5 倍、10 倍の上載圧で行った。それぞれについて 3 種類の粒子間付着力（ $P=0, P=0.2, P=0.4 \text{ kgf}$ ）を作用させた。ここでは、粒子間付着力によるせん断強度の増加が明確に現れるように仮想的にかなり大きな付着力を作用させた。また、不飽和土ではメニスカスのでき方などによって粒子間付着力は粒子接点ごとに異なるが、ここでは全ての粒子接点に同じ粒子間付着力（ $P_i = P$ ）を与えた。図-2 は、実験結果（×印）と DEM による数値解析結果（○, △, □印）と式(4), (5)による理論値（実線）の比較を上載圧 σ' と破壊時のせん断応力 τ_f の関係で示したものである。理論値（実線）は、DEM による数値解析結果から得られた破壊時のせん断面上の粒子接点角 θ_i を用いて式(4), (5)より計算された値を示している。なお、 ϕ' は粒子間付着力 $P=0 \text{ kgf}$ の場合の ϕ' を用いた。図-2 より、DEM による数値解析結果と式(4), (5)による理論値とがほぼ一致するのが見られる。

図-3 は、アルミ丸棒積層体（長さ 5cm、直径 5mm、9mm、混合重量比 3:2、粒子数約 840 個）の二軸圧縮試験の DEM による数値解析結果から得られた破壊時のモールの応力円と、式(4), (5)による理論値を示している（理論値は簡易一面せん断試験の場合と同様の方法で計算した）。二軸圧縮試験においても DEM による数値解析結果と式(4), (5)による理論値とがほぼ一致するのが見られる。

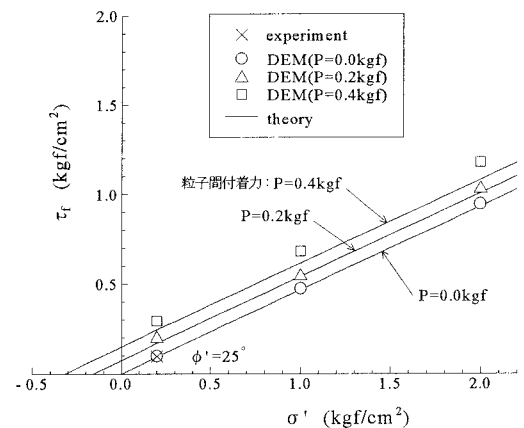
以上より、粒子間付着力による見かけの粘着力 c' はモービライズド面上の粒子間付着力 P_i と粒子構造（粒子接点角 θ_i ）の関数として式(5)で表されるといえる。

参考文献

- 1) 松岡・加藤：水の表面張力によるアルミ棒積層体の粘着力の微視的考察，粒状体の力学シンポジウム，土質工学会，1993。
- 2) 大橋・松岡：水で濡らしたアルミ棒積層体の粘着力の微視的考察，土木学会第 50 回年次学術講演会，1995（掲載予定）。
- 3) 松岡・山本：個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察，土木学会論文集，No. 487/III-26，1994。
- 4) 松岡・吉村・村田：粒状体の簡易一面せん断試験機の開発に関する研究，第 30 回土質工学研究発表会，1995（掲載予定）。

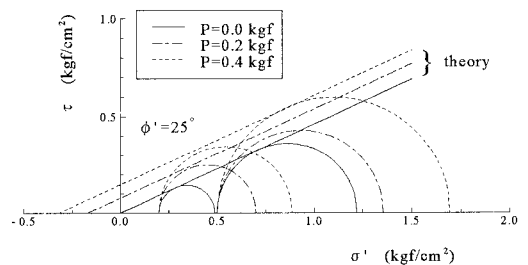


(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-2 簡易一面せん断試験の DEM による数値解析結果と式(4), (5)による理論値の比較


図-3 二軸圧縮試験の DEM による数値解析結果（破壊時のモールの応力円）と式(4), (5)による理論せん断強度 τ_f の比較