

Ⅲ-35 粒状要素法を用いたシミュレーション試験による 滑動接触面に関する考察

東北大学 学生会員 ○丸子 文之
フェロー 岸野 佑次
学生会員 郷 春躍

1. はじめに

砂などの地盤材料は、離散的な粒子の集合体であり、その力学挙動を解明するために様々なアプローチがなされている。近年、粒状体の変形・強度特性などを調べるために、計算機による数値シミュレーション試験が盛んに行われている。数値シミュレーション試験の中で、岸野¹⁾によって提案された粒状要素法は、粒子の接触関係から得られる剛性行列に基づいて粒子を移動させる準静的な解析法であり、粒状体の静的な微視的挙動の考察や構成則レベルの議論に対して非常に有効な解析手法である。本研究は、3次元粒状要素法を用いて π 平面上での多方向せん断載荷シミュレーション試験及び三軸圧縮試験、三軸伸張試験を行い、その結果に基づいて粒状体の滑動接触面の統計解析より得られる応力ダイレイタンスー関係について考察を行ったものである。

2. 3次元粒状要素法を用いた多方向せん断載荷 シミュレーション試験

本研究では供試体モデルを応力制御として等方応力軸 n 上のA点まで等方圧縮し初期状態とする。その後、 π 平面上での多方向せん断載荷、三軸圧縮載荷及び三軸伸張載荷を行う。載荷経路を図-1に示す。

多方向せん断載荷シミュレーション試験は、 π 平面上で見て、 σ_x 軸から反時計回りに 15° 間隔で計5方向とする。本文においては 0° 及び 60° 載荷について示す。

使用する粒状体モデルについて、詳細を表-1に示す。ここで、 k_n 、 k_t は接触点における法線方向および接線方向のバネ定数である。試験に用いた粒状供試体モデルを図-2に示す。

3. 滑動接触面の統計的長所から導く応力ダイレイ タンスー関係

滑動接触面の2つの単位法線ベクトルにより方向性を示す滑動接触テンソルを統計分布量として用い、ある応力状態 σ においてひずみ増分 g が生じた時のエネルギー散逸を

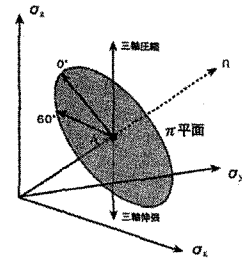


図-1 多方向せん断載荷シミュレーション試験の載荷経路

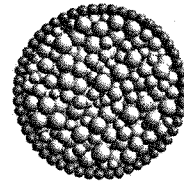


図-2 粒状体モデル

塑性変形の結果として表現した弾性部分以外の応力の仕事として表した散逸関数を次の式で表す。

$$\varphi = 3c(g_{ik}\sigma_{kj}N_{ij} - \sigma_{il}g_{kl}N_{ijkl}) \quad (1)$$

N_{ij} , N_{ijkl} は2階と4階の滑動接触テンソルであり、 c は全接触点数に対する滑りに関与する接触点数の割合である。

ここで、塑性ひずみ増分の大きさを $d\alpha = \sqrt{de_{ij}^p de_{ij}^p}$ とおき、これで正規化した量を g_{ij} とする。同様に、全ひずみ増分、弾性ひずみ増分も、 g_{ij} , g_{ij}^e とする。一様な応力 σ の場に一樣なひずみ増分 g が生じる時の仕事は、 $\omega = \sigma_{ij}g_{ij}$ であり、 ω の中の散逸部分は、

$$\omega^p = \sigma_{ij}g_{ij}^p = \sigma_{ij}(g_{ij} - g_{ij}^e) \quad (2)$$

となり、(1),(2) 式は等置することにより次式になる。

$$\sigma_{ij}(g_{ij} - g_{ij}^e) = 3c(g_{ik}\sigma_{kj}N_{ij} - \sigma_{il}g_{kl}N_{ijkl}) \quad (3)$$

側圧一定の載荷状態に対して、

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \sigma_3, & de_2 &= de_3 \\ p &= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}, & d\nu &= de_1 + 2de_3 \\ q &= \sigma_1 - \sigma_3, & d\epsilon &= \frac{2}{3}(de_1 - de_3) \end{aligned} \quad (4)$$

表-1 供試体データ

粒子数	粒子直径 (mm)	k_n (kN/m)	k_t (kN/m)	内部 摩擦角度 ($^\circ$)
1577	0.16~0.3	40	28	15

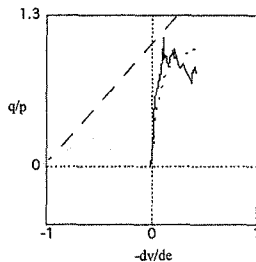


図-3 π 平面 0° 載荷試験

これを用いて左右両辺はそれぞれ次のように表せる.

$$\sigma_{ij}(g_{ij} - g_{ij}^e) = qde + pdv - \sigma_{ij}g_{ij}^e \quad (5)$$

$$3c(g_{ik}\sigma_{kj}N_{ij} - \sigma_{il}g_{kj}N_{ijkl}) = \frac{9c}{2}(N_{1133} + N_{2233})qde \quad (6)$$

これを整理すると,

$$\frac{q}{p} = \left[\frac{\sigma_{ij}g_{ij}^e}{pd\epsilon} + \frac{9c}{2}(N_{1133} + N_{2233})\frac{q}{p} \right] - \frac{dv}{d\epsilon} \quad (7)$$

これは土質力学において応力ダイレイタンシー関係と呼ばれる塑性ひずみ成分間の拘束条件式に相当する.

4. シミュレーション試験の結果及び考察

図3~6は実線で示す(7)式の q/p - $-dv/de$ 関係をグラフ化したもので, 同図の細い点線はデータから読み取った q/p のグラフであり, 破線は Roscoe²⁾が提唱する三軸圧縮による破壊時の応力比 q/p を定数 M として描いたグラフである. この応力比 q/p とひずみ増分比 $-dv/de$ に着目し, データから読み取った応力比 q/p との違いや土質力学における応力ダイレイタンシー関係との違いを検証する.

図3~6より実線はデータから読み取った応力比 q/p とほとんど一致している. Roscoe の関係式に比べて, 三軸圧縮以外においても良好に一致している. 図3,5の圧縮過程において多少ずれが生じるが, 初期状態は弾性ひずみ増分 g_{ij}^e が大きく, 弾性ひずみ増分 g_{ij}^e が安定してくるにつれデータから読み取った応力比 q/p に収束していく傾向がある. このように, Roscoe らによって仮定された応力ダイレイタンシー関係は載荷状態や非線形部に対応できていない.

5. おわりに

以上, 側圧一定の載荷状態と仮定した場合について考察したが, その他の場合についても検討を加える必要がある. また, (7)式における $\sigma_{ij}g_{ij}^e/pd\epsilon$ は定数と仮定して算定しているが実際は変数である. シミュレーションの正確な表現はひずみ増分間の拘束条件式(2)であり, 一般に, 応力ダイレイタンシー関係と呼ぶことには本来無理があると考えられる.

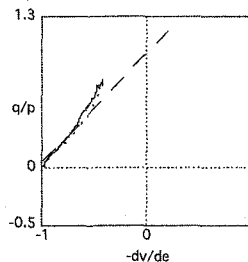


図-4 π 平面 60° 載荷試験

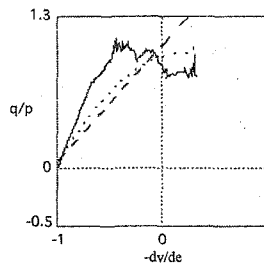


図-5 三軸圧縮試験

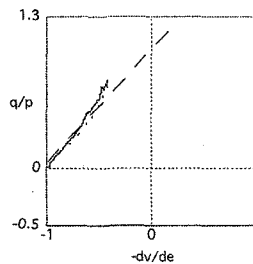


図-6 三軸伸張試験

参考文献

- 1) 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, No.406/III-11, pp.97-106, 1989
- 2) Roscoe, K.H., Bassett, R.H. and Cole, E.R.L.: Principal Axes Observed during Simple Shear of a Sand, Proc. Geotech. Conf., Oslo, pp. 231~237, 1967.
- 3) Matsuoka, H.: Stress-strain Relationships of sands Based on the Mobilized Plane, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 2, pp. 47~61, 1974.