

DEMによる繰返し载荷時の応力誘導異方性と要素間滑り

名古屋工業大学 学生員○櫻井崇之
 名古屋工業大学 学生員 大村篤史
 名古屋工業大学 正会員 前田健一

1 はじめに

粒状材料である土の弾塑性変形挙動は、個々の粒子の性質（粒子形状、粒子の摩擦特性）や土粒子の集合がつくる構造の空間的・幾何学的特徴（構造異方性、配位数）などの影響を受けていると考えられる。特に後者について、粒子の接触関係によって形成される微細構造の変化にともなう応力誘導異方性の発展則を明らかにし、微細構造の変化が巨視的な弾性・塑性変形挙動に与える影響を明らかにすることは力学モデルの構築のためにも不可欠である¹⁾。

既報^{2,3)}では個別要素法（Distinct Element Method）による側圧一定二軸圧縮下での単調载荷試験の解析結果において、粒子の接触関係の

安定度が応力誘導異方性の変化に与える影響について検討している。そのとき、動員摩擦角 ϕ_c と接点力 f_c について $1/F_s = |\tan \phi_c| / \tan \phi_\mu$ と $r_{fc} = |f_c| / f_{cave}$ を導入した（ここで、 ϕ_μ は粒子間摩擦角、 f_{cave} は平均接点力である）。着目する接触構造が $0 < r_{fc}$ 、 $0 \leq (1/F_s) < 1$ のとき、つまり滑り状態にある接触構造と力を伝達していない接触構造を除いたとき、主応力比 (σ_1/σ_2) とファブリックテンソル⁴⁾の主値比 (F_1/F_2) との代表的な関係は、べき関数 $(F_1/F_2) = (\sigma_1/\sigma_2)^{0.5}$ で近似できることがわかった²⁾。また、片振り繰返し载荷試験結果におけるファブリックテンソル主値比の指標が示す応力誘導異方性の変化と粒子間滑りや粒子同士の接触といった内部構造の関係についても調べている³⁾。

2 解析方法

本解析では砂のような粒状材料を対象とし、マクロな変形に伴う供試体内部の幾何学量特性を観察するために個別要素法(DEM)²⁾を用いた。個別要素法では粒子を剛体粒子と仮定し、要素物質の変形特性は要素間の接触点に弾性バネ、粘性ダッシュポットとスライダーを想定することで表現する。バネとダッシュポットは接触面法線方向と接線方向の両方に配し、接線方向にはクーロン摩擦則に従うスライダーによって要素間の摩擦滑り（摩擦係数 $\tan \phi_\mu$ ）を考慮している（図-1）。また、応力による構造変化のみを見るために重力を作用させていない。

3 解析結果および考察

まず、非円形粒子約4000個を用いた密詰め供試体を、側圧一定のもとひずみ制御で圧縮した後、等方応力状態まで側圧一定を保ったまま除荷し、ひずみ振幅を徐々に増加しながらこの载荷・除荷を繰返した時の応力ひずみ関係を図-2示す。ここで、载荷・除荷の過程を1Cycleとし図中にサイクル番号を付記した。左図の拡大図が右図である。図-3には前述の閾値 $(0 < r_{fc}$ 、 $0 \leq (1/F_s) < 1)$ のもとでのCycle1、2における主応力比 (σ_1/σ_2) とファブリックテンソル主値比

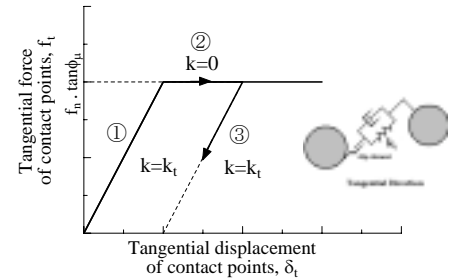


図-1 弾完全塑性材料の応力ひずみ関係とフォークトモデル（接線方向）

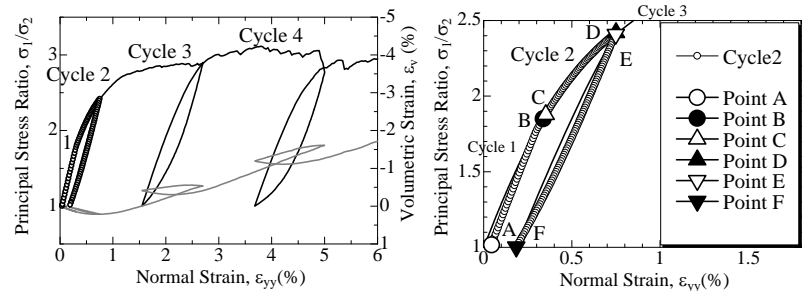


図-2 応力ひずみ関係

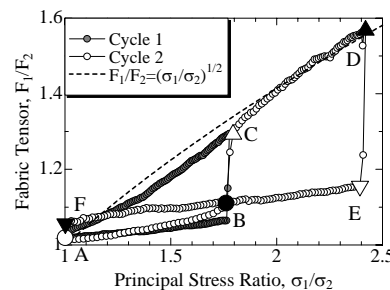


図-3 構造異方性の発達

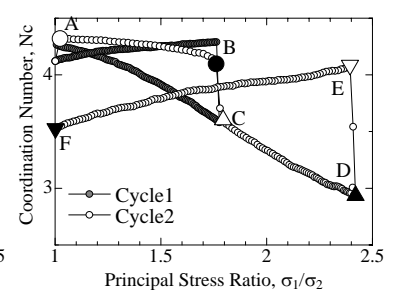


図-4 配異数の変化

キーワード：個別要素法 異方性 構造 摩擦 剛性

連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 Tel.& Fax. 052-735-5497

(F_1/F_2)の関係を示している(図中の破線はべき関数(F_1/F_2)= $(\sigma_1/\sigma_2)^{0.5}$ を示している)。この(F_1/F_2)が大きいく、異方性の度合いが大きい。

図-3 より Cycle2 の再載荷過程初期の段階では(σ_1/σ_2)が増加しても(F_1/F_2)の増加はほとんど見られない(図-3A-B)。しかし供試体がそれまでに受けた最大の主応力比付近で(F_1/F_2)の顕著な増加がみられる(図-3B-C)。そして処女載荷過程に至ると、単調載荷試験時の応力誘導異方性の発展(べき関数(F_1/F_2)= $(\sigma_1/\sigma_2)^{0.5}$)に従う(図-3C-D)。また、Cycle1、2ともに除荷初期に急激な(F_1/F_2)の低下を示している(図-3D-E)。図-4には同様な閾値のもとで(σ_1/σ_2)と配位数 Nc(一粒子当たりの平均接点数)の関係を示している。図2と同様な応力比で急激な変化が見られる。弾性的挙動といわれる除荷過程においても載荷過程と同様にすべりに伴う構造変化が生じている。

図-5は片振り繰返し載荷のCycle1とCycle2における主応力比(σ_1/σ_2)と滑り状態にある粒子接点数の総接点数に対する割合を示している。ここで、粒子間滑り状態にあっても接点力は伝達している接点に着目している。Cycle1において載荷とともに滑り状態の接点数は増加している。Cycle2に着目すると初期の再載荷過程では滑り状態の接点数はあまり変化しないが(図-5 A-B)、それまでに経験した最大の主応力比付近で急激に滑り状態の接点数が増加し、除荷前の滑り状態にあった粒子接点数とほぼ同数になる(図-5 B-C)。さらに載荷を進めると滑り状態の接点数が徐々に増加し、載荷から除荷へと載荷方向が変化する時に一度供試体内全体の粒子間滑りがすべて止まる。それから除荷過程にはいるとまた滑り状態の接点数は増加する。図-5と前述の閾値のもとの図-3 図-4は当然よく対応している。

図-6は図-2右図中の点A,B,C,D,E,Fにおける滑り状態にある粒子接点角の頻度分布図である。(図中には、各分布図の平均値を点線で描いている。)ここで、粒子接点角は各接点における接平面に立てた二つの単位法線ベクトル \mathbf{n} の方向である。既報³⁾において載荷時のひずみが小さい時には、滑り状態にある粒子接点の \mathbf{n} は最小主応力方向に集中し、Cycle2の再載荷過程において滑り状態の接点数が除荷前と同数に戻る時には(図-5C)、接点角頻度分布も同じ分布に戻っていることを確認している。そして、除荷過程においては等方応力状態に戻るにつれて、最小主応力方向への \mathbf{n} の集中は消え等方的な分布へと変化している(図-6 F)。

4 まとめ

供試体内の滑り状態にあった要素間においては図-1中②の載荷過程が対応し、滑りが止まるとその粒子間においては図-1中③の除荷過程が対応し接線方向の剛性が回復する。個々の粒子間における滑りについて、滑り状態の接点の割合(図-5)とその方向(図-6)の両者が、巨視的な塑性変形のみならず弾性的変形挙動(応力ひずみ関係)にも大きく寄与しているものと考えられる。

4 まとめ

供試体内の滑り状態にあった要素間においては図-1中②の載荷過程が対応し、滑りが止まるとその粒子間においては図-1中③の除荷過程が対応し接線方向の剛性が回復する。個々の粒子間における滑りについて、滑り状態の接点の割合(図-5)とその方向(図-6)の両者が、巨視的な塑性変形のみならず弾性的変形挙動(応力ひずみ関係)にも大きく寄与しているものと考えられる。

参考文献 1) Teruo Nakai and Yasuji Mihara ; A new mechanical quantity for soils and its application to elastoplastic constitutive models, soils and foundations Vol.24, No.2, pp.82-94, 1984. 2) 桑原直範、大野了悟、前田健一 : DEMによる密度・過圧密履歴が異なる粒状材料の変形・破壊挙動と内部構造の変化の解析、応用力学論文集、Vol.5, pp.431-440, 2002. 3) 櫻井崇之、大野了悟、前田健一、萩真次、大村篤史 : DEMによる繰返し載荷時の応力誘導異方性、第39回地盤工学研究発表概要集(掲載予定) 4) 佐武正雄 ; 粒状体における誘導異方性と修正応力について、第33回地盤工学研究発表概要集、pp549-550,1998.

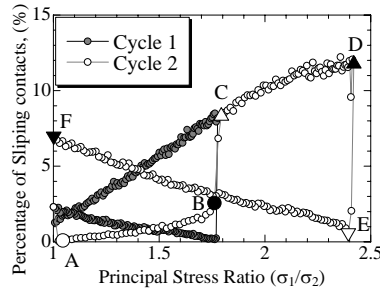


図-5 滑り状態の接点の割合

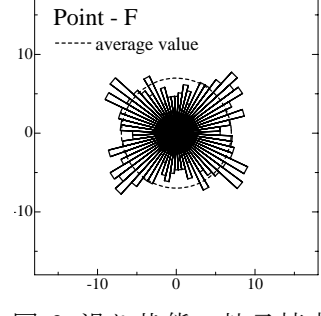
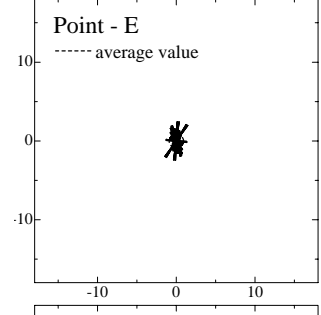
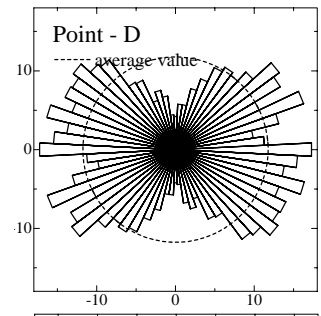
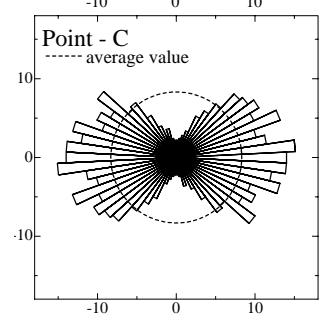
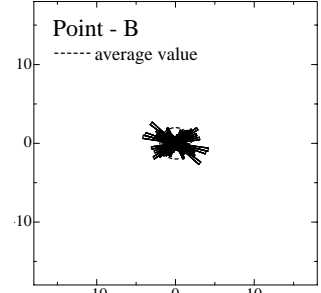
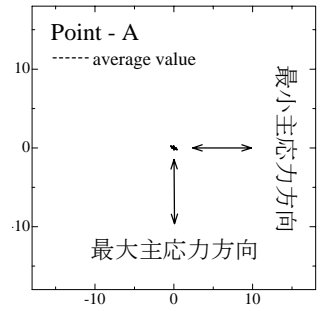


図-6 滑り状態の粒子接点の接点角頻度分布