

Ⅲ - 38

過圧密履歴を受けた粒状集合体の非排水繰返しせん断抵抗に関する解析的研究

東北大学大学院工学研究科
東北大学大学院工学研究科

学正員
正会員

○森本 大志 星 悠紀
仙頭 紀明 渦岡 良介 風間 基樹

1. はじめに

過圧密による液状化抵抗増大効果についてはこれまで数多くの研究が行われており、その結果供試体の密度、平均有効主応力の増大に加えて内部構造の発達に液状化抵抗に影響を及ぼしていることが実験的に示されている¹⁾。しかしながらこの内部構造の発達程度は実験から得られるマクロな挙動からは解明することは難しく、液状化における微視的機構の解明が待たれる現状である。本研究では、個別要素法を用いることによって、液状化におけるこの内部構造の変化を異なる過圧密履歴の観点から考察し、供試体内部構造と液状化抵抗の関係について検討する。また液状化過程を「重力堆積状態において集合体が保有しているポテンシャルエネルギーが繰返し載荷を受けることによって粒子間の接触が消失されエネルギーを解放する過程」と捉え、個別要素法において接触エネルギーなる内部エネルギー量を定義し、液状化現象との関係を考察する。

2. DEMにおけるエネルギーの定義

個別要素法では、要素集合体の全ての挙動は要素間に想定された弾性スプリングによって支配されている。本研究ではある接触状態における要素集合体が保有するポテンシャルエネルギーをこの弾性スプリングに蓄積される弾性エネルギーとして、次式により定義する。

$$E_p = \sum E_n + \sum E_s, \quad E_n = 1/2 k_n (\Delta u_n)^2, \quad E_s = 1/2 k_s (\Delta u_s)^2$$

ここに、 E_p は接触点における接触エネルギーの総和、 E_n および E_s はそれぞれ接触点*i*において法線方向と接線方向に蓄えられる弾性エネルギー、 k_n および k_s 、 Δu_n および Δu_s はそれぞれ法線方向と接線方向のバネ定数、相対変位増分を示す。このように表現された接触エネルギーは、ある接触構造を持った粒状集合体が保有している内部エネルギーを意味し、集合体に変形が加えられることによって生じた接触エネルギーの増減分は外力によってなされた仕事量に一致すると考えられる。液状化をポテンシャルエネルギーの解放と考えることは即ち、この接触エネルギーが接触点の消失に伴い解放されることを意味する²⁾。

3. 解析条件

Table.1 にシミュレーションケースを示す。98kPa で K_0 正規圧密された供試体モデルに対し K_0 圧密-除荷試験および非排水繰返し単純せん断試験のシミュレーションを行なう。 K_0 圧密-除荷試験は側面境界の変位を拘束し K_0 状態を保ったまま上面境界により一次元的に圧密する。非排水繰返し単純せん断試験はひずみ制御で上底面境界に水平方向の強制変位を与え、側面境界は上下境界の移動と共に定体積条件を保ちながらせん断変形させる。

4. 結果と考察

4.1 非排水繰返しせん断過程における粒子挙動と過圧密効果

Fig.1 に繰返しせん断過程における (a) 応力-ひずみ曲線、(b) 有効応力経路、(c) 初期有効上載圧で正規化した累積損失エネルギーの時刻歴および (d) 接触エネルギーと平均有効主応力の関係を示す。これよりいずれのケースにおいても1波目で剛性が低下し、液状化状態に至っている。過圧密履歴の効果として、過圧密比が大きいものほど初期剛性、最大せん断応力共に高い値を示している。また繰返しせん断中に消費された累積損失エネルギーより明らかに過圧密モデルの方が高い液状化抵抗を示していることが分かる。これは砂の液状化試験において示される過圧密効果と同様の傾向である。繰返しせん断前に集合体内に蓄積された接触エネルギーは有効応力の低下とともに解放され、有効応力が0近傍ではそのほとんどを放出してしまっていることが分かる。また平均有効主応力との間にはほぼ1対1の単調な関係があることから、液状化をポテンシャルエネルギーの解放と捉えることの妥当性が示された結果であるといえる。Fig.2, 3, 4 には繰返しせん断前後の98kPa

Table.1 Simulation cases

Case	OCR	Consolidation (kPa)	Shearing
A	1	0 → 98	4%×5
B	3	0 → 294 → 98	4%×5
C	5	0 → 490 → 98	4%×5

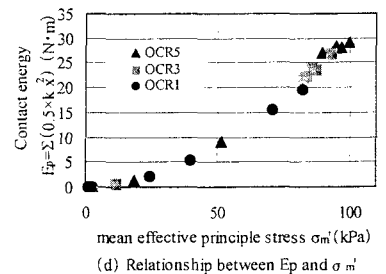
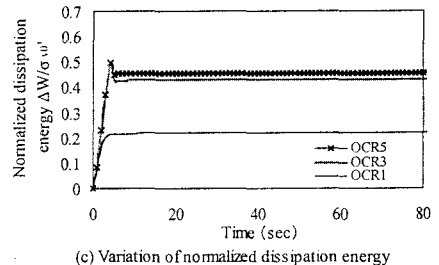
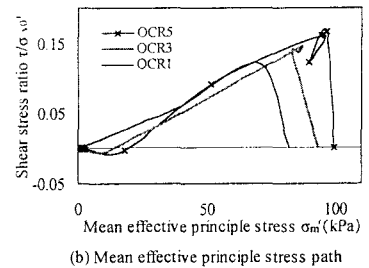
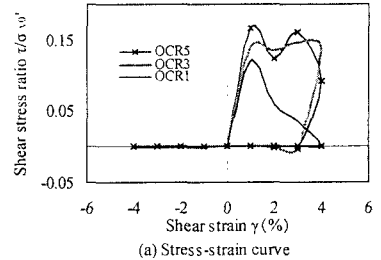


Fig.1 Result of cyclic shear

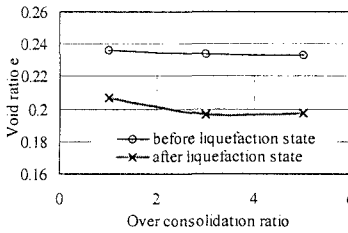


Fig. 2 Variation of void ratio before or after cyclic shearing

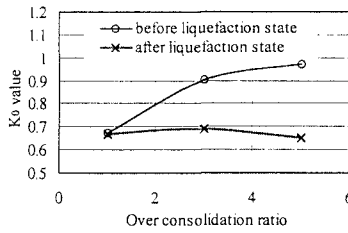


Fig. 3 Variation of K_0 value before or after cyclic shearing

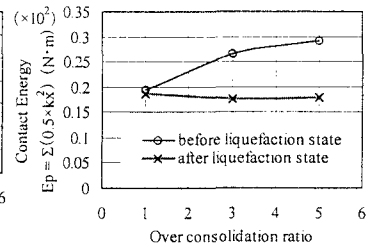


Fig. 4 Variation of Contact Energy before or after cyclic shearing

圧密状態における間隙比, K_0 値および接触エネルギーの値を示した。繰返しせん断前では, 過圧密比の増加とともに集合体の間隙は密になり, K_0 値は正規圧密時で 0.6 程度だったものが 1 の等方状態に近くなっている。 K_0 値の増加は平均有効主応力の増加を示す。また接触エネルギーについても過圧密の増加とともに大きな値を示しており過圧密によって集合体内部により大きなエネルギーが蓄積されていることを表している。繰返しせん断を受けると間隙比は減少し, K_0 値はせん断前の正規圧密状態に近い異方状態を示す。また接触エネルギーもせん断前の正規圧密状態に近く, 繰返しせん断によって過圧密の効果がほぼ失われてしまっている。

4.2 微視的な過圧密効果発現機構

Fig.5 に繰返しせん断前後の 98kPa 圧密状態における角度方向別平均接触強さ分布をそれぞれ示す。平均接触強さとは法線ベクトルの向きがある角度範囲内に存在する接触点での法線方向力の総和をその接点数で除したもので表され, ある角度方向に向いた接触経路の平均接触強さを意味する。つまり,

$$\bar{F}_{n\theta} = \frac{\sum_{k=1}^{2N_\theta} f_n^k}{2N_\theta}$$

ここに $\bar{F}_{n\theta}$ は平均接触強さ, N_θ はある角度方向に向いた法線ベクトルを持つ接触点の数, また f_n^k は N_θ の内 k 番目の接触点における法線方向力である。角度方向と粒子接触モードについては Fig.5 の下に示した通りである。正規圧密状態のものは鉛直および 135° 方向に特に卓越

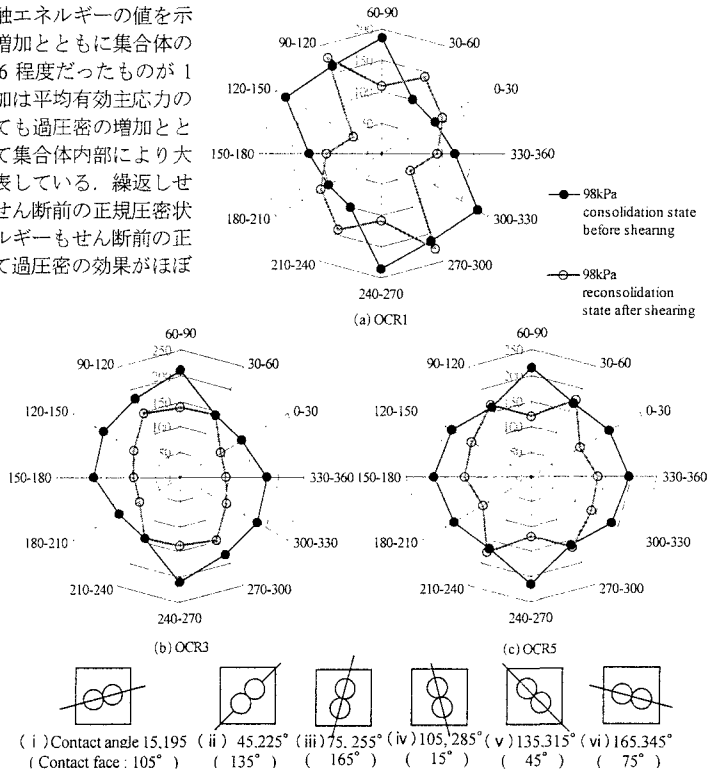


Fig.5 The distribution of average contact strength

した構造であり, 即ち 135° 方向に圧縮力が作用する場合には強度を発揮するものの, その接線方向の 45° 方向に作用する場合は抵抗力を発揮しにくく, また逆をいえば 45° 方向に伸張される場合には極端に弱い構造であると考えられる。一方過圧密状態では極めて等方に近い構造であり, 正規圧密状態における非卓越方向が強化され, どの方向の圧縮にも強度を発揮しうる構造といえる。即ち過圧密によってこのような粒子接触経路の接触強さの異方性が等方性へと強化されるため, 過圧密状態のものは繰返しせん断に対する初期剛性および抵抗力が大きかったと考えられる。繰返しせん断後 98kPa 再圧密状態における接触強さ分布は, どのケースにおいても鉛直および対角方向に卓越した構造となり, 過圧密によって強化された構造は失われ, 正規圧密の繰返しせん断前とはまた異なる異方状態へどれも同様に変化している。

5. 結論

砂の液状化抵抗に及ぼす過圧密の効果を調べるため, 過圧密された粒状集合体の非排水繰返し単純せん断試験のシミュレーションを行った。過圧密比が大きくなるほど繰返しせん断過程における初期剛性, および抵抗力が大きくなる。その要因として過圧密状態における供試体モデルでは正規圧密状態のモデルにおける特異な構造異方性が強化され等方的な内部構造を示し, 繰返しせん断に伴う内部構造の圧縮・伸張に対し抵抗力を発揮しうる構造を持つことが分かった。

<参考文献>

- 森友宏. K_0 圧密・除荷履歴を受けた砂質土の液状化抵抗, 東北大学修士論文, 2001.3.
- H.Morimoto, N.Okada, and M.Kazama : Evaluation of elastic energy of granular assemblies subjected to various consolidation histories by DEM, P&G 2001. Kishino(ed.), pp.247-250.2001.