

間隙比・有効拘束圧依存の砂の非排水せん断挙動に関する 初期構造と過圧密の違いによる記述

名古屋大学大学院 学生会員 中井健太郎

国際会員 中野正樹・野田利弘・浅岡顕

1. はじめに

砂は緩く詰めた状態だと、軽く振動を与えるだけで容易に密に詰まる。粘土と違って容易に密度（間隙比）を変えることができるため、砂は同じ有効拘束圧下でも異なる間隙比を有することができたり、逆に異なる有効拘束圧を与えても同じ間隙比でいることができたりする。さらに、間隙比や有効拘束圧の違いによって、砂のせん断特性は大きく異なる。緩く堆積した砂質地盤は地震などによって繰り返し载荷を受けると液状化を起こすが、締固め等によって地盤を密にしておくことで液状化を起こさないなどは、その典型的な例である。

従来、間隙比や有効拘束圧の異なる砂のせん断挙動は、たとえ同じ砂の挙動であっても、それぞれ状態に応じて材料定数を変えて記述されていた。つまり言い方を変えると、間隙比や有効拘束圧の違いに応じて、あたかも別の材料として挙動を記述していたこととなる。著者らの提案した Super/subloading Yield Surface Cam-clay model（以降簡単のため SYS カムクレイモデル）は、構造・過圧密・異方性 3 つの骨格構造の概念を取り入れており、間隙比や有効拘束圧の違いを、初期に有する構造や過圧密の程度の違いとみなすことによって、材料定数を変更せずに記述することができる。そこで本研究では、間隙比・有効拘束圧の異なる砂のせん断挙動を、非排水三軸圧縮試験を行うことによって把握し、さらには SYS カムクレイモデルを用いた数値計算を実施して数値解析的考察を加える。

2. 初期間隙比・有効拘束圧の異なる砂の非排水三軸圧縮試験

本章では、同じ有効拘束圧のもとで初期間隙比を変えて行った砂の非排水三軸圧縮試験結果、および石原らの行った同じ間隙比のもとでの異なる有効拘束圧での非排水三軸圧縮試験結果を紹介し、砂の非排水せん断挙動に与える影響について実験結果から把握する。

2.1. 同じ有効拘束圧のもとでの間隙比の異なる砂の非排水三軸圧縮試験

試験に用いた試料は三河珪砂 6 号である。緩詰め供試体は、乾燥砂を 5%程度に湿らせてフワフワの状態にしたものを、そっとモールドに敷き詰めて作製し（Moist Placement 法¹⁾）、中・密詰め供試体は乾燥砂をモールド内に堆積させ、必要に応じてバイブレータをモールド側面に当て、振動によって締め固めた（Dry Deposition 法）。どの供試体も三軸試験機にセットした後、通水を十分な時間行って飽和度を高めた（B 値 95%以上）。294kPa で約 20 分間等方圧密した後、軸ひずみ速度 0.5%/min で非排水せん断した。表 1 にせん断試験前の各供試体の初期間隙比とともに相対密度 D_r を示す。同じ有効拘束圧のもとで、緩詰めから密詰めまで様々な初期状態の供試体を作製できている。

図 1 に試験結果（有効応力パス $q \sim p'$ 関係と $q \sim \varepsilon_a$ 関係）を示す。間隙比によって異なる非排水せん断挙動を示している。緩詰め砂（[1]）の有効応力パスを見てみると、 p' の減少を伴いながら q が増加してピークを示し、その後 $q = p' = 0$ 付近まで減少し続ける。中詰め砂（[2]と[3]）は緩詰め砂とは異なって、 q が減少した後、 p' の増加を伴いながら再び q が増加していく。このとき、間隙比が小さいほど、 q の減少の割合は小さく、その後の q の増加の程度は大きくなっている。密詰め砂（[4]と[5]）では、 q の減少は見られず、 p' の増加を伴いながら q は増加し続ける。またその程度は、間隙比が小さいほど大きい。 $q \sim \varepsilon_a$ 関係を見てみると、緩い（間隙比の大きい）供試体ほど q のピークが明確に現れ、間隙比が小さく密になるにしたがってピークが現れなくなっている。

Description of undrained shear behavior of sand depending on density and effective confining pressure based on initial soil structure and overconsolidation. Nakai, K., Nakano, M., Noda, T. and Asaoka, A. (Nagoya University)

表1 せん断前初期状態

Sample	e_0	Dr
Mikawa-[1]	1.07	-0.03
Mikawa-[2]	0.97	0.23
Mikawa-[3]	0.92	0.33
Mikawa-[4]	0.87	0.45
Mikawa-[5]	0.77	0.69

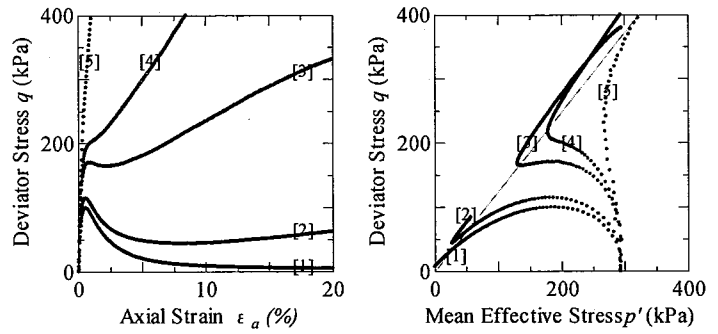


図1 有効拘束圧一定条件での非排水三軸圧縮試験

2.2. 同じ間隙比のもとでの有効拘束圧の異なる砂の非排水三軸圧縮試験

石原らはせん断前間隙比を揃えて、様々な有効拘束圧での砂の非排水三軸圧縮試験を行った¹⁾。試験に用いた試料は豊浦砂であり、供試体は全て Moist Placement 法で作製された。

図2は間隙比 $e = 0.916$ 、相対密度 $Dr = 16\%$ の緩詰め供試体の試験結果 ($q \sim \epsilon_a$ 関係と有効応力パス $q \sim p'$ 関係) である。相対密度 (間隙比) が同じであっても、有効拘束圧によって非排水せん断挙動が異なっている。 $q \sim \epsilon_a$ 関係を見てみると、有効拘束圧が大きいほど明確なピークが見られるが、小さくなるほどだんだんピークは現れなくなる。せん断初期は有効拘束圧によって挙動が異なるが、せん断が進んで ϵ_a が大きくなると ($\epsilon_a = 25\%$ 程度)、有効拘束圧に依らず全ての試験結果が一致する。有効応力パスを見てみると、有効拘束圧が小さいほど、 p' の増加を伴う q の増加の程度が大きくなり、2.1. で示した密詰めの挙動に近づいていることがわかる。有効応力パスからも試験終了時には全ての試験結果が一致していることがわかる。図3は $e = 0.833$ 、 $Dr = 38\%$ の中詰め供試体、図4は $e = 0.735$ 、 $Dr = 64\%$ の密詰め供試体の試験結果である。両試験結果とも、有効拘束圧が非排水せん断挙動に与える影響は、緩詰め供試体と同じ傾向を示している。

2.3. まとめ

砂の非排水せん断挙動は、初期間隙比や有効拘束圧に応じて異なることを確認した。特に有効応力パスは、初期間隙比が小さいほど、また有効拘束圧が小さいほど、 p' の減少を伴う q の減少の程度が小さくなり、そ

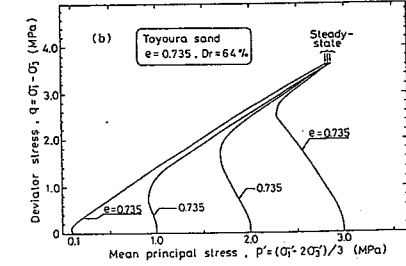
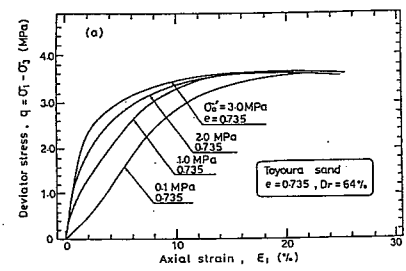
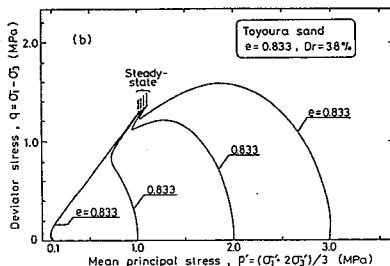
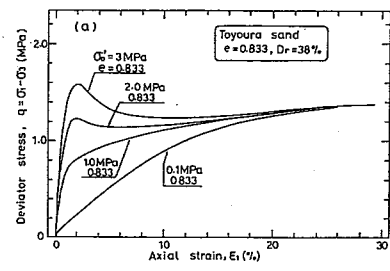
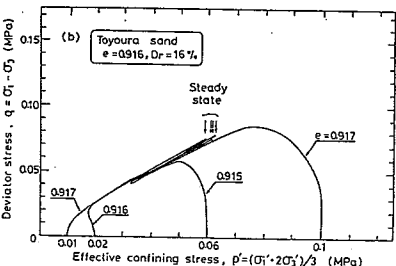
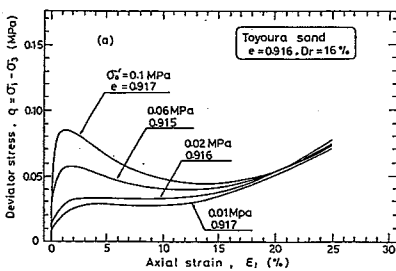


図2 間隙比一定条件での非排水三軸圧縮試験 ($e=0.916$)

図3 間隙比一定条件での非排水三軸圧縮試験 ($e=0.833$)

図4 間隙比一定条件での非排水三軸圧縮試験 ($e=0.735$)

の後起こる p' の増加を伴う q の増加の程度は大きくなる、すなわち、密な砂の挙動に近づくことがわかった。また、有効拘束圧の異なる砂の非排水せん断挙動はそれぞれ異なるが、初期間隙比が同じならば、せん断が進むとやがて非排水せん断挙動は一致することがわかった。

3. Super/subloading Yield Surface Cam-clay model (SYS カムクレイモデル) の概要

3.1. 構造・過圧密・異方性を有する土の塑性ポテンシャルと発展則

自然に堆積した土は、粘性土でも砂質土でも大抵は「構造」が発達した過圧密状態にある。構造を有する土は、正規圧密線の外側 (Impossible state) にその応力状態を取ることがある。十分に練り返されて、構造を失った正規圧密土の挙動は修正カムクレイモデル²⁾に従うものとするが、さらに異方性が存在すると仮定して定式化する。したがって、構造のない正規圧密土の挙動は、関口・太田³⁾による異方性を表す応力パラメータ η^* とその発展を考慮した回転硬化概念 (Hashiguchi and Chen⁴⁾) を有する修正カムクレイで記述する。

$$f(p', \eta^*) = MD \ln \frac{p'}{\tilde{p}_0'} + MD \ln \frac{M^2 + \eta^{*2}}{M^2} = \varepsilon_v^p = - \int_0^t J \text{tr} \mathbf{D}^p d\tau \quad (1)$$

ここで、 $D = (\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) / M(1 + e_0)$ は dilatancy 係数であり、 $\tilde{\lambda}$ 、 $\tilde{\kappa}$ 、 M はそれぞれ、圧縮指数、膨潤指数、限界状態定数と呼ばれる材料定数である。 $J = (1 + e) / (1 + e_0)$ (e_0 は初期間隙比、 e は時刻 $t = t$ での空隙比)、 \mathbf{D}^p は塑性ストレッチング、 \tilde{p}_0' は修正カムクレイポテンシャル (降伏面) 上の平均有効応力であり、初期状態における平均有効応力 p_0' と等しい。また、異方性を表す η^* は、回転硬化変数 β と有効応力 (引張: 正) \mathbf{T}' を用いて次式で与える。

$$\eta^* = \sqrt{\frac{3}{2} \hat{\eta} \cdot \hat{\eta}} \quad , \quad \hat{\eta} = \eta - \beta \quad , \quad \eta = \frac{S}{p'} \quad , \quad S = \mathbf{T}' + p' \mathbf{I} \quad (2)$$

「構造」概念を表すために修正カムクレイポテンシャルの外側に相似な上負荷面 (相似中心は原点 $p' = q = 0$ で、その相似率を R^*) を、過圧密状態については Hashiguchi⁵⁾ に倣い、上負荷面の内側に相似な下負荷面 (相似中心は原点 $p' = q = 0$ で、その相似率を R) を導入し、構造を有する過圧密土の塑性ポテンシャルを定式化した。3つの負荷面の位置関係は図5で、構成式の詳細は、Asaoka *et al.*⁶⁾ を参照。現応力状態は常に下負荷面上にあるので、下負荷面は現応力を表す応力パラメータ p' 、 q を用いて以下のように定式化される。

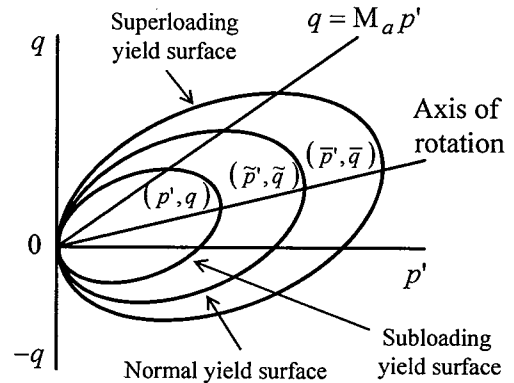


図5 3つの負荷面

$$f(p', \eta^*) + MD \ln R^* - MD \ln R + \int_0^t J \text{tr} \mathbf{D}^p d\tau = 0$$

$$= MD \ln \frac{p'}{\tilde{p}_0'} + MD \ln \frac{M^2 + \eta^{*2}}{M^2} + MD \ln R^* - MD \ln R + \int_0^t J \text{tr} \mathbf{D}^p d\tau = 0 \quad (3)$$

ここで R^* は構造の程度を、 R は過圧密状態 (その逆数 $1/R$ は過圧密比) を表す。

$$R^* = \frac{\tilde{p}'}{p'} = \frac{\tilde{q}}{q} \quad (0 < R^* \leq 1) \quad , \quad R = \frac{p'}{\tilde{p}'} = \frac{q}{\tilde{q}} \quad (0 < R \leq 1) \quad (4)$$

構造が高位なほど、また過圧密の程度が大きいほど、 R^* および R が小さい。また、塑性変形を伴う負荷時には、構造劣化 ($R^* \rightarrow 1$) と過圧密解消 ($R \rightarrow 1$) が生じるとして発展則を与える。 R^* (構造)、 R (過圧密) ならびに β (異方性) の発展則は、以下のように与える。

$$R^* \text{ の発展則} : \dot{R}^* = \mathcal{J} U^* \left\| \mathbf{D}_s^p \right\| \quad , \quad U^* = \frac{a}{D} R^{*b} (1 - R^*)^c \quad (5)$$

$$R \text{ の発展則} : \dot{R} = JU \|D^p\|, \quad U = -\frac{m}{D} \ln R \quad (6)$$

$$\beta \text{ の発展則} : \dot{\beta} = J \frac{br}{D} \sqrt{\frac{2}{3}} \|D_s^p\| \|\hat{\eta}\| \left(m_b \frac{\hat{\eta}}{\|\hat{\eta}\|} - \beta \right) \quad (7)$$

ここに、 D_s^p は偏差塑性ストレッチング、 $\|\cdot\|$ はそれらのノルムを表す。式(5)～式(7)の発展則パラメータはすべて定数で、それぞれの性質から a, b, c を構造劣化指数、 m を正規圧密土化指数、 br を回転硬化指数ならびに m_b を回転硬化限界定数と呼ぶ。

3.2. 塑性乗数と構成式

関連流れ則、後続負荷面に関する Prager の適応条件など普通の弾塑性諸法則に基づく、塑性乗数 λ は以下のように与えられる。

$$\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial T^i} \cdot \dot{T}^i}{J \frac{MD}{p'(M^2 + \eta^{*2})} (M_s^2 - \eta^2)} \quad (\lambda > 0) \quad (8)$$

ここで、

$$M_s^2 = M_a^2 + br \frac{4M\eta^{*2}}{M^2 + \eta^{*2}} (m_b \eta^* - \sqrt{\frac{3}{2}} \hat{\eta} \cdot \beta) - \sqrt{6} \frac{U^*}{R^*} \eta^* + \frac{U}{R} \sqrt{6\eta^{*2} + \frac{1}{3}(M_a^2 - \eta^2)^2} \quad (9)$$

$$M_a^2 = M^2 + \zeta^2, \quad \zeta = \sqrt{\frac{3}{2} \beta \cdot \beta} = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\beta\| \quad (10)$$

また、有効応力変化は弾性応答によることから、構成式を求めると以下ようになる。

$$\dot{T}^i = ED^e = ED - \lambda E \frac{\partial f}{\partial T^i} \quad (11)$$

3.3. 負荷時の挙動

式(8)の塑性乗数 λ に注目し、硬化・軟化の分類を行う。負荷時には $\lambda > 0$ であるので、式(8)の右辺の分母分子がそれぞれ正の場合と、負の場合を考慮すると、 $\eta^2 = M_s^2$ が硬化・軟化の境界線を表す。すなわち、 $\eta^2 > M_s^2$ のときは軟化を、 $\eta^2 < M_s^2$ のときは硬化を示す。この M_s は、構造低位化、過圧密解消、異方性の発達・消滅および現応力比の値によって変化する。また、同時に式(10)の $\eta^2 = M_a^2$ は、塑性ポテンシャルの形から、塑性圧縮と塑性膨張の境界線を与えるが、異方性の発達・消滅に伴いポテンシャル面が回転するので、この境界線も変化する。

式(9)の M_s に含まれる U^*/R^* 、 U/R に式(5)、(6)の U^* 、 U を代入すれば、過圧密解消時に M_s は減少し、構造喪失時に M_s は増加することが分かる。

3.4. モデルの特徴

SYS カムクレイモデルでは、発展則パラメータ、特に過圧密解消速度と構造喪失速度の大小関係を変えることによって、典型的な砂の挙動と典型的な粘土の挙動を、1つの構成式を用いて統一的に表現することができる。例えば、構造喪失が過圧密解消より卓越している時は、典型的な砂の挙動を表し、過圧密の解消が構造の喪失より卓越している時は、典型的な粘土の挙動を表す。これらの詳しい記述は文献6)に譲る。また発展則パラメータの選択によって、砂や粘土だけでなく、中間土や特殊土も表現可能である。

式(3)の物質時間微分をとり、構造喪失と過圧密解消が塑性体積変化速度に与える影響について調べる。

$$(\dot{\epsilon}_v^p)^- - \text{Tr} D^p = \frac{\partial f}{\partial T^i} \cdot \dot{T}^i + \frac{\partial f}{\partial \beta} \cdot \dot{\beta} + MD \frac{\dot{R}^*}{R^*} - MD \frac{\dot{R}}{R} \quad (12)$$

本報告では特に、構造の喪失速度と過圧密の解消速度に注目しているため、異方性を考慮せずに考察すると、この式の右辺から、構造の喪失 ($\dot{R}^* > 0$) は塑性圧縮 ($\dot{\epsilon}_v^p > 0$) を生み、過圧密の解消 ($\dot{R} > 0$) は塑性膨張 ($\dot{\epsilon}_v^p < 0$) を生むことが分かる。

4. SYS カムクレイモデルを用いた数値計算

本章では SYS カムクレイモデルを用いて、間隙比と有効拘束圧の異なる砂の非排水せん断挙動を、構成式の応答として計算し、2章で示した実験結果について、特にせん断前初期値（構造と過圧密）に着目して、数値解析的考察を加える。計算には三河珪砂6号の材料定数を用いる。計算に用いた弾塑性パラメータおよび発展則パラメータを表2に示す。発展則パラメータを見てみると、構造の喪失速度が過圧密の解消速度より卓越しており、本モデルで主張している典型的な砂のパラメータであることがわかる。なお、異方性の発達速度は、砂の計算に通常用いられているものである。

4.1. 締固めおよび等方圧密過程による初期状態の計算

実験で供試体を作製する際には、その方法が Moist Placement 法であれ、Dry Deposition 法であれ、試料をモールドに詰めた後に所定の間隙比になるように、タンピングや振動によって締固めを行っている。そこで本章の計算では、締固めを模擬して、微小な応力振幅 ($q = \pm 2.3 \text{ kPa}$) での側圧一定排水繰返しせん断を与え、繰返し回数を変えることによって異なる間隙比を作製した。その後、実験と同じように所定の有効拘束圧になるまで等方圧密してから非排水せん断した。

表3に計算に用いた初期値を示す。供試体作製は自重のみの、有効拘束圧のない状態で行うので、非常に小さい初期有効拘束圧として本研究では 10 kPa とし、構造の程度が非常に高位で正規圧密状態の（過圧密のない）、非常に緩い状態を想定した。図6に供試体作製過程を模擬した、締固めと等方圧密の一連の計算結果を示す。締固め過程では、繰返すにつれて構造の喪失 ($1/R^*$ の減少) と過圧密の蓄積 ($1/R$ の増加) を伴いながら、大圧縮を起こしている。式(12)からもわかるように、構造の喪失は塑性体積圧縮を生み、過圧密の解消は塑性

表2 三河珪砂6号の材料定数

Elasto-plastic parameters	
Compression index $\tilde{\lambda}$	0.05
Swelling index $\tilde{\kappa}$	0.012
Critical state constant M	1.00
Void ratio at $p' = 98.1 \text{ kPa}$ and $q = 0$ on NCL N	0.98
Poisson's ratio ν	0.3
Evolution parameters	
Degradation parameter of overconsolidation state m	0.03
Degradation parameter of structure a ($b = c = 1.0$)	2.35
Evolution parameter of β br	3.5
Limit of rotation m_b	0.7

表3 計算に用いた初期値

Initial conditions	
Initial void ratio e_0	1.28
Initial mean effective stress p'_0 (kPa)	10.0
Initial value of structure $1/R^*_0$	150.0
Initial overconsolidation ratio $1/R_0$	1.00
Initial anisotropy $\zeta_0 = \sqrt{2/3\beta_0 \cdot \beta_0}$	0.00

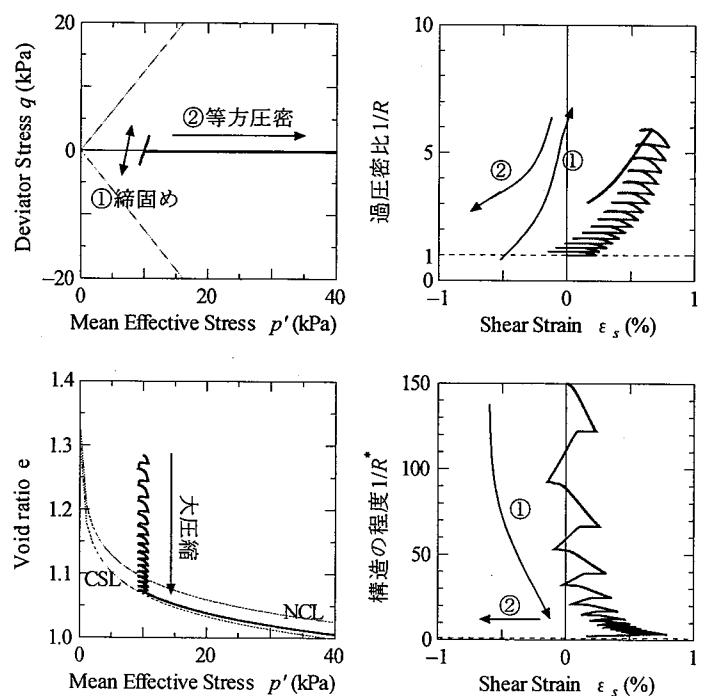


図6 締固めと等方圧密過程計算結果

体積膨張を生む。計算結果にも表れているが、この構造の喪失と過圧密の蓄積によって締固め挙動を説明することができる。ここでは示さなかったが、応力振幅が非常に小さいため、締固

表 4 有効拘束圧一定条件での非排水せん断計算初期値

Sample	n	e_0	Dr	$1/R_0$	$1/R_0^*$	ζ_0
Mikawa-[1]	2	1.08	-0.05	1.12	61.68	0.0
Mikawa-[2]	14	0.97	0.21	2.17	8.01	0.0
Mikawa-[3]	28	0.91	0.36	3.70	2.83	0.0
Mikawa-[4]	52	0.88	0.43	5.95	1.75	0.0
Mikawa-[5]	1000	0.79	0.64	28.82	1.13	0.0

め過程において異方性はほとんど発達しなかった。続いて等方圧密過程では、過圧密は圧密圧力が大きくなるにしたがって、次第に解消してゆく ($1/R$ の減少)。しかし構造については、発展則に $\|D_s^p\|$ を用いているので (式(5))、等方圧密ではほとんど喪失しない。

4.2. 同じ有効拘束圧のもとでの間隙比の異なる砂の非排水せん断計算結果

図 7 と表 4 は異なる繰り返し回数で排水繰り返しせん断を止め、294kPa まで等方圧密した後の、非排水せん断試験の計算結果である。計算結果はせん断挙動から間隙比に至るまで、実験結果 (図 1、表 1) と非常に良い対応を示している。表 4 から、繰り返し回数が多くて間隙比の小さいものほど、せん断前の初期構造の程度が低位で、初期過圧密比が大きいことがわかる。これは 4.1.でも示したが、構造の喪失と過圧密の蓄積こそが締固め (大圧縮) 挙動を記述しているためであり、繰り返し回数が多く密になるほど、構造の程度は低位になり、過圧密比は大きくなるからである。

図 8~図 10 は緩詰め砂 ([1])、中詰め砂 ([3])、密詰め砂 ([5]) の計算結果を抜き出したものである。各図の左下には、現応力比 η 、 M_s および M_a のせん断に伴う推移を示している。硬化と軟化の境界線である M_s は、構造の程度、過圧密比、異方性の発達度合いおよび現応力比によって様々に変化する (式(9))。 M_a は塑性圧縮と塑性膨張の境界線であり、異方性の発達/消滅によって増加/減少する (式(10))。図 8 の緩詰め砂については、表 4 からわかるように、初期構造の程度が非常に高位で、過圧密比が小さい (ほぼ正規状態) ため、 M_s は最初 M_a よりも小さい ($M_s < M_a$)。せん断初期は現応力比 $\eta (= q/p')$ が大きくなって異方性が発達する影響で M_s は減少するが、その後、構造の喪失が原因となって M_s は次第に増加していく。この過程において現応力比 η は、 $M_s < \eta < M_a$ に応力状態を取り、つまりは塑性圧縮を伴う軟化挙

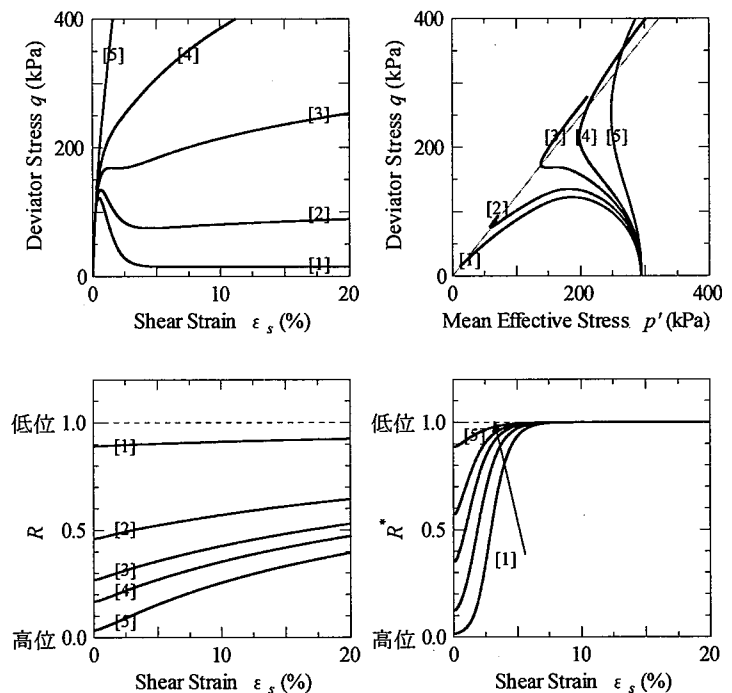


図 7 有効拘束圧一定条件での非排水せん断計算結果

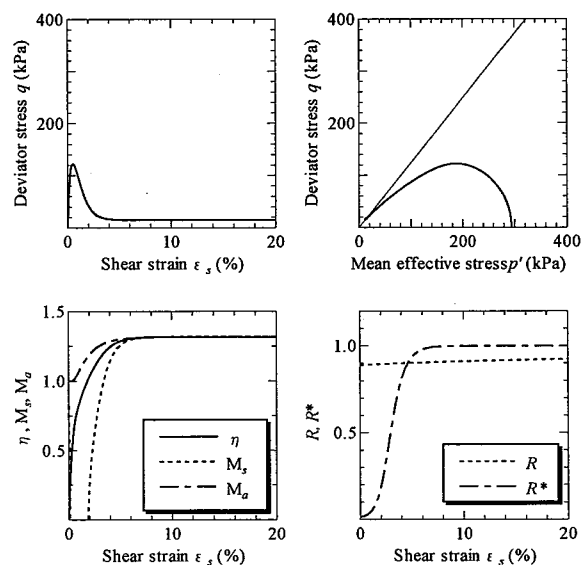


図 8 緩詰め砂の非排水せん断計算結果

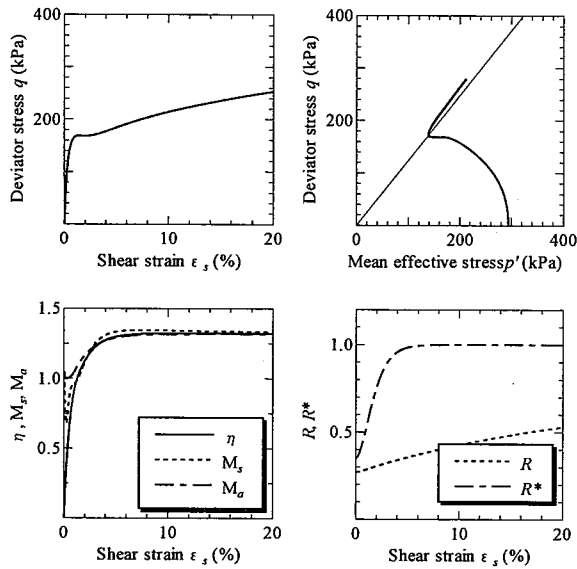


図9 中詰め砂の非排水せん断計算結果

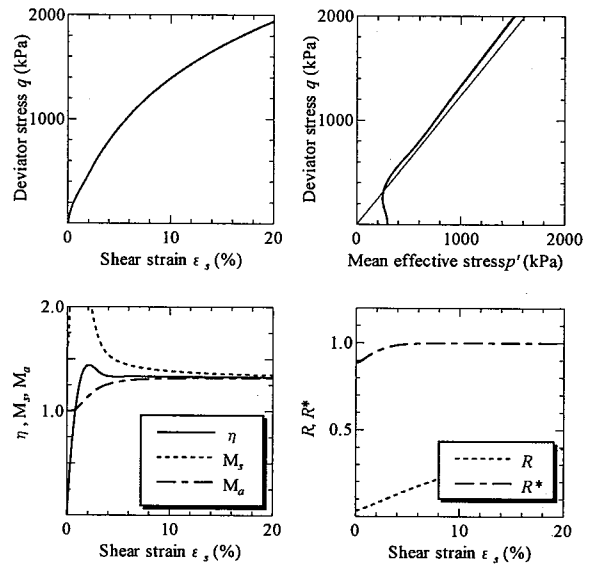


図10 密詰め砂の非排水せん断計算結果

動を示す。図9の中詰め砂は、初期に構造も過圧密も両方有している。砂は構造喪失速度が過圧密解消速度より卓越しているため、最初は過圧密解消よりも構造喪失の影響を強く受ける。つまり、 M_s は最初 M_a よりも小さいが、塑性変形の進展に伴う構造の喪失が主な原因となって M_s は増加し、やがて $M_s > M_a$ となる。この過程において現応力比 η は、 $M_s < \eta < M_a$ の状態から $M_a < \eta < M_s$ の状態に移り、塑性圧縮を伴う軟化挙動を示した後、塑性膨張を伴う硬化挙動を示す。構造が完全に喪失した後は、過圧密解消の影響を受けて M_s は次第に減少してゆく。図10の密詰め砂については、表4からもわかるように、初期に構造が非常に低位で、過圧密比が非常に大きいため、 M_s は最初 M_a よりも大きい ($M_s > M_a$)。構造の喪失が原因となって最初 M_s は増加するが、すぐに構造は喪失してしまい、過圧密の解消が原因となって M_s は次第に減少していく。この過程において現応力比 η は、 $M_a < \eta < M_s$ に応力状態を取り、つまりは塑性膨張を伴う硬化挙動を示す。

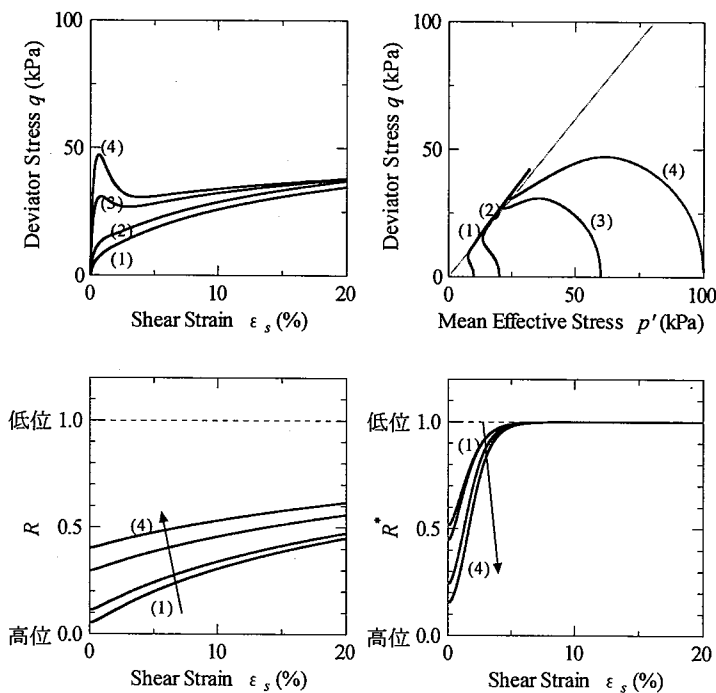


図11 間隙比一定条件 (e=1.01) での非排水せん断計算結果

表5 間隙比一定条件 (e=1.01) での非排水せん断計算初期値

	(1)	(2)	(3)	(4)
n	60	44	22	16
p' (MPa)	0.01	0.02	0.06	0.1
$1/R_0$	18.68	8.87	3.36	2.47
$1/R_0^*$	1.93	2.22	4.10	6.45
ζ_0	0.0	0.0	0.0	0.0

緩詰め砂であっても密詰め砂であっても、塑性変形が進んで構造も過圧密も完全になくなると、最終的には $M_s = M_a$ となる。

4.3. 同じ間隙比のもとでの有効拘束圧の異なる砂の非排水せん断計算結果

図 11 と表 5 は 4.2. と同じ材料定数を用いて、繰り返し回数と等方圧密圧力を変えることによって、せん断前間隙比を 1.01 にそろえた時の、有効拘束圧の異なる砂の非排水せん断試験の計算結果である。材料定数が異なるため、図 2 の実験結果と比べると完全な一致はないものの、3.2. で得られた特徴を再現できている。 $q \sim \epsilon_s$ 関係において、実験結果とは異なり $\epsilon_s = 30\%$ でも全ての試験結果が重なっていないが、これは過圧密がまだ残っているためであり、さらにせん断を行って過圧密が完全に解消すると一致する。表 5 を見てみると、同じ間隙比で比べた場合、有効拘束圧が大きい時は、構造の程度が高位で過圧密比は小さい。逆に有効拘束圧が小さいときは、構造の程度が低位で過圧密比が大きくなる。これは有効拘束圧 10kPa の緩い状態から締固めと等方圧密によって間隙比を揃える場合、有効拘束圧が小さいほど、締固め過程の繰り返し回数を多くしないとならないからである。この挙動を図 12 に示した。

図 13 は有効拘束圧が大きい (0.1MPa) ときの計算結果を抜き出したものである。表 5 からわかるように、初期に構造と過圧密両方とも有している。せん断に伴って応力比 η は、 $M_s < \eta < M_a$ の状態から $M_a < \eta < M_s$ に移る。つまり塑性圧縮を伴う軟化挙動を示した後、塑性膨張を伴う硬化挙動を示している。この挙動は 4.2. で示した中詰め砂の挙動と同じである。図 14 は有効拘束圧が小さい (0.01MPa) 時の計算結果を抜き出したものである。初期値を見てみると、大きな過圧密比と低位な構造を有していることがわかる。応力比 η は、 $M_a < \eta < M_s$ にあり、塑性膨張を伴う硬化挙動を示している。この挙動は 4.2. で示した密詰め砂の挙動と同じである。

図 15 と表 6 はせん断前間隙比を 0.85 にそろえた時の、図 16 と表 7 はせん断前間隙比を 0.79 にそろえた時の非排水せん断試験の計算結果である。せん断前間隙比を 1.01 にそろえた図 11 同様、実験結果の傾向をよく再現できている。

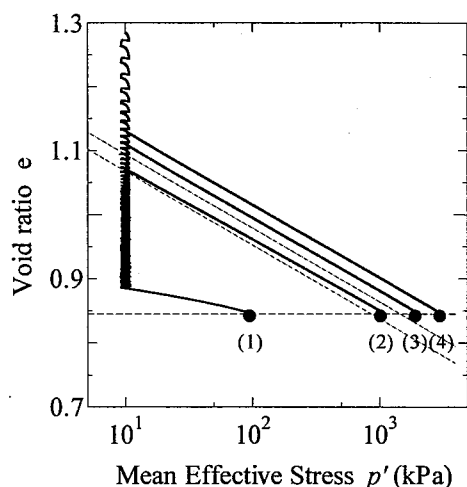


図 12 拘束圧を揃える方法

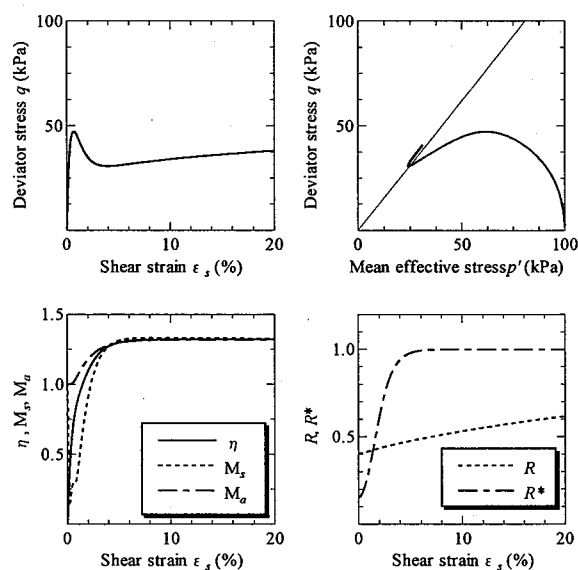


図 13 有効拘束圧が大きいときの非排水せん断計算結果

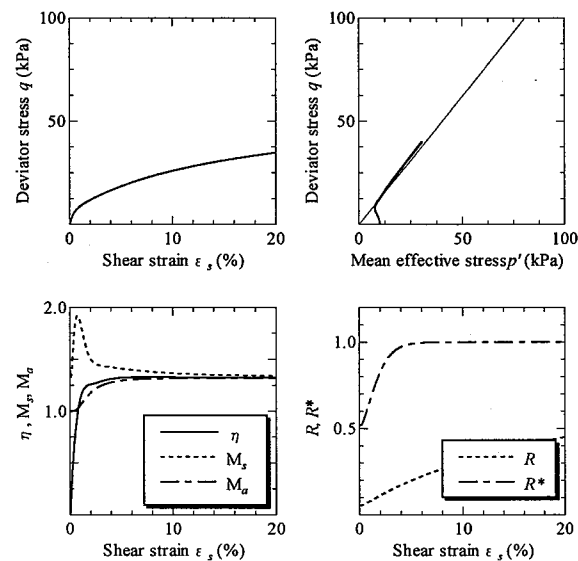


図 14 有効拘束圧が小さいときの非排水せん断計算結果

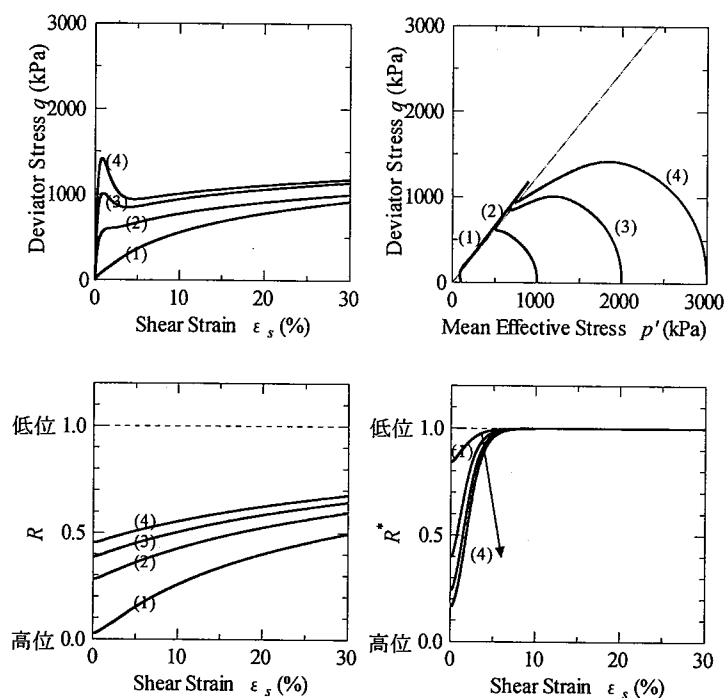


図15 間隙比一定条件 ($e=0.85$) での
非排水せん断計算結果

表6 間隙比一定条件 ($e=0.85$) での
非排水せん断計算初期値

	(1)	(2)	(3)	(4)
n	500	30	20	16
p' (MPa)	0.1	1.0	2.0	3.0
$1/R_0$	37.15	3.55	2.58	2.21
$1/R_0^*$	1.19	2.51	4.13	6.06
ζ_0	0.0	0.0	0.0	0.0

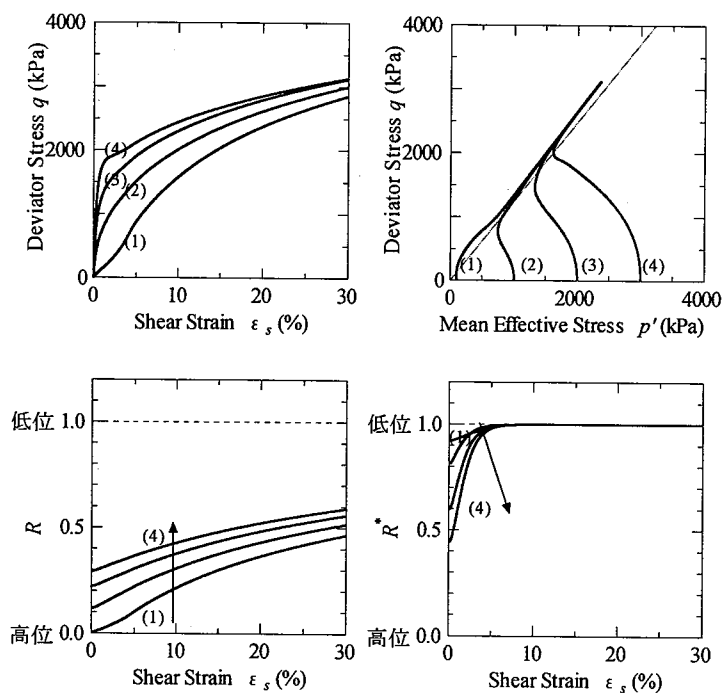


図16 間隙比一定条件 ($e=0.79$) での
非排水せん断計算結果

表7 間隙比一定条件 ($e=0.79$) での
非排水せん断計算初期値

	(1)	(2)	(3)	(4)
n	3000	200	50	32
p' (MPa)	0.1	1.0	2.0	3.0
$1/R_0$	160.6	8.51	4.52	3.42
$1/R_0^*$	1.08	1.23	1.67	2.26
ζ_0	0.0	0.0	0.0	0.0

4.4. まとめ

SYS カムクレイモデルを用いて、締め固め・等方圧密過程をシミュレートすることによって、間隙比や有効拘束圧の異なる砂の挙動をただ1組の材料定数群を用いて統一的に表現することができた。その際のせん断前初期値は、同じ初期状態から締め固め回数と等方圧密圧力を変えることによって、それぞれ計算から自動的に求まる。初期値については、砂は初期間隙比が大きいほど、あるいは有効拘束圧が大きいほど、高位な構造を有していて過圧密比が小さいことがわかった。逆に、初期間隙比が小さいほど、あるいは有効拘束圧が

小さいほど、低位な構造を有していて過圧密比が大きいことがわかった。また、高位な構造を有する砂は、構造の喪失が主な原因となって塑性圧縮を伴う軟化現象を示し、大きな過圧密比を有する砂は、過圧密の解消が主な原因となって塑性膨張を伴う硬化現象を示すことがわかった。

5. おわりに

砂は微小なせん断応力の繰り返しによって容易に間隙比を変えること（締固め）ができる材料であり、そのため、①同じ有効拘束圧のもとで様々な間隙比を有する、②同じ間隙比のもとで様々な有効拘束圧を有する、ことができる。そして、間隙比や有効拘束圧の違いによって、たとえ同じ砂であってもせん断挙動が異なる。本研究では①、②の状態にある砂の非排水三軸圧縮試験結果から、間隙比や有効拘束圧の異なる砂の非排水せん断挙動を把握し、さらにSYSカムクレイモデルを用いてその挙動の記述および解釈を試み、以下の結論を得た。

- 1) 同じ有効拘束圧のもとで間隙比が異なる場合、非排水せん断挙動は、間隙比が小さいほど p' の減少を伴う q の減少の程度（塑性圧縮を伴う軟化挙動）が小さくなり、その後起こる p' の増加を伴う q の増加の程度（塑性膨張を伴う硬化挙動）は大きくなる。このことは、間隙比が小さいほど、低位な構造を有していて、過圧密比が大きいことを意味する。
- 2) 同じ間隙比のもとで有効拘束圧が異なる場合、非排水せん断挙動は、有効拘束圧が大きいほど p' の減少を伴う q の減少の程度（塑性圧縮を伴う軟化挙動）が大きくなり、その後起こる p' の増加を伴う q の増加の程度（塑性膨張を伴う硬化挙動）は小さくなる。このことは、同じ間隙比であっても有効拘束圧が大きいほど、高位な構造を有していて、過圧密比が小さいことを意味する。

砂の緩詰め・密詰めの定義は、相対密度から間接的に求めている。しかし、単に相対密度から決められるものではなく、有効拘束圧に応じて定義すべきであることは従来から言われていることである⁷⁾。SYSカムクレイモデルを用いることによって、有効拘束圧と間隙比によって決まる初期構造の程度と過圧密比から、緩詰めと密詰めの定義を行い、その挙動を説明することができた。

参考文献

- 1) Ishihara, K. (1993): "Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes", *The 33rd Rankine Lecture, Geotechnique*.
- 2) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968): "On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, in J. Heyman and F. A. Leckie (eds.)", *Engineering plasticity (Cambridge: Cambridge University Press)*, pp.535-609.
- 3) Sekiguchi, H. and Ohta, H. (1977): "Induced anisotropy and time dependency in clays", *Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9)*, Tokyo, pp.229-238.
- 4) Hashiguchi, K. and Chen, Z.-P. (1998): "Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.22, pp.197-227.
- 5) Hashiguchi, K. (1989): "Subloading surface model in unconventional plasticity", *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.25, pp.917-945.
- 6) Asaoka A., Noda T., Yamada E., Kaneda K. and Nakano M. (2002): "An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils", *Soils and Foundations*, No.42, Vol.5, pp.45-57.
- 7) 八木則男(1972)：砂の相対密度に関する一考察，土木学会第27回年次学術講演会概要集，pp111-112