

名古屋大学工学部 (正) 野田利弘 浅岡顕 中野正樹 金田一広
 名古屋大学工学部 (学) 水野和憲

1 はじめに

自然堆積粘土の「乱さない」試料は、それを繰り返した（「乱した」）再構成試料と異なり、大きな非排水せん断強度を有することがよく知られている。このような特徴を有する自然堆積粘土など、いわゆる「構造を有する」土の複雑な力学挙動は、次の三つの事項から議論されることが多い。(1) 低応力比レベルでの軟化等いわゆる「構造」に由来する事項、(2) 2次圧密、非排水せん断強度のひずみ速度依存性など、いわゆる「時間効果」、(3) 異方性。

著者らはオリジナルカムクレイモデル¹⁾を基礎にして、(1),(2)に対応する弾塑性モデルとして、上負荷面カムクレイモデル²⁾を提案しているが、本文では、まずその概要について述べる。次に、この弾塑性モデルに基づく簡単な数値シミュレーションにより、構造「低位化」(劣化)の観点から、構造を有する自然堆積粘土の「鋭敏比」とサンプリング時の「応力解放」や「機械的操作」に伴う「乱れ」について考察する。そして、最後に鋭敏な過圧密粘土の場合には、繰り返し粘土と異なり、一旦破壊させた後、圧密によって密になった粘土が以前よりも弱くなる場合があることを示す。

2 上負荷面カムクレイモデルの主な特徴と負荷基準

この章では上負荷面カムクレイモデル(図2.1)の概要を述べる。

(1) 基本コンセプトの概要、用語の定義、飽和土の分類

(a) 完全繰り返し土と構造を有する土：

オリジナルカムクレイモデルは正規圧密状態にある完全繰り返し土の負荷時の挙動を表わす。自然堆積粘土のような「構造」を有する飽和土はオリジナルカムクレイモデル、すなわち完全繰り返し土にとって「不可能領域」(Impossible state)にあることが多い。上負荷面カムクレイモデルでは、この状態を表現するためにRoscoe surfaceの外側に、カムクレイ降伏面と相似形の「上負荷面」(Superloading yield surface)をとり、「構造の程度」を表す指標として R^* (カムクレイ降伏面に対する上負荷面の相似率)を定義する。相似中心は原点 $q = 0, p' = 0$ である。

なお、 T' と I をそれぞれ有効応力(引張を正)テンソルと単位テンソルとして、 $p' = -\frac{1}{3}\text{tr}T', q = \sqrt{\frac{3}{2}}S \cdot S, S = T' + p'I$ である。構造を有する土は、塑性変形が生じると構造が低位化して R^* は増加し、最終的には R^* が1になって完全繰り返し土になる。

(b) 正規圧密土：

上負荷面上に応力状態をとる土を「正規圧密土」(Normally consolidated soil)と呼ぶ。構造を有する正規圧密土の負荷時の挙動は、上負荷面に関連流れ則と後続負荷面に関するPragerの適応条件を適用して定める。後続負荷面を定めるために、橋口の「下負荷面」^{3),4)}の考え方にならって、「 R^* の発展則」(後述)を設ける。この発展則によって、塑性変形に伴う構造の低位化を表現する。つまり、カムクレイ降伏面は塑性体積変化の圧縮、膨張によって拡大・縮小するが、上負荷面は塑性体積変化および R^* の発展則(後述)によってやはり拡大・縮小し、両者は塑性変形の進展によって、やがて一致し、それ以降は土は完全繰り返し土として、カムクレイの挙動に従う。

(c) 過圧密土：

応力状態が上負荷面上にある土(正規圧密土)が、弾性除荷を受けると、その土を「過圧密土」(Overconsolidated soil)と呼ぶ。この過圧密状態を表すために、橋口^{3),4)}に従って、現応力点を通る、上負荷面と相似形の「下負荷面」(Subloading yield surface)をとり、「過圧密比の逆数」を表す指標として R (上負荷面に対する下負荷面の相似率)を定義する。相似中心は、ここでも原点 $q = 0, p' = 0$ である。この過圧密土の再負荷時の挙動は、現応力がある下負荷面に対して関連流れ則を適用して定める。このとき、後続負荷面を定めるために、「 R の発展則」(後述)を設ける。これによって、「塑性変形が生じると、土は次第に過圧密状態から正規圧密状態に戻り最後に下負荷面は上負荷面に一致する」こと、すなわち正規圧密土化($R \rightarrow 1$)を表現する。なお、もし上負荷面がカムクレイ降伏面に一致している完全繰り返し土の時は、上負荷面をカムクレイ降伏面に読みかえればよい。

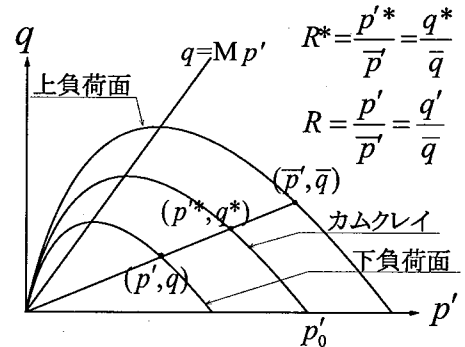


図2.1 3つの負荷面の関係図

A Discussion on Sensitivity and Sampling Disturbance of Natural Clays based on the original Cam-clay with super-subloading yield surfaces: Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T., Kaneda, K. and Mizuno, K. (Nagoya Univ.)

(d) 飽和土の4状態：

以上(a)~(c)によって、土は表2.1の4つのカテゴリーのどれかに属し、さらに塑性変形が進めばどの土も(B)の土にかえることがわかる。

表2.1 土のカテゴリー

	構造を残した土	繰り返しの土
正規圧密土	(A)	(B)
過圧密土	(C)	(D)

(2) 構成式

(a) 降伏関数：

上述のように、上負荷面、カムクレイの降伏面、下負荷面はそれぞれ相似(図2.1)で、一般に土は過圧密状態にある(すなわち現応力は下負荷面上にある)ことを考慮して、三つの負荷面を表わす応力に、 (q, p') 、 (q^*, p'^*) 、 (\bar{q}, \bar{p}') の記号を用いる。まず、カムクレイモデルの降伏関数は次式で与えられる。

$$MD \ln \frac{p'^*}{p_0'^*} + D \frac{q^*}{p'^*} + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau = f(p'^*, q^*) + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau = 0 \quad (1)$$

ここに、 $D = \frac{\dot{\lambda} - \dot{\kappa}}{M(1+e_0)}$ はダイレイタンシー係数、 M 、 $\dot{\lambda}$ 、 $\dot{\kappa}$ 、および e_0 は限界状態定数、圧縮指数、膨潤指数および初期空隙比である。また、 D を速度勾配の対称部分(ストレッチング)とすると、 D^p は D の塑性部分($D = D^e + D^p$, D^e : D の弾性成分)で、 $J = (1+e)/(1+e_0)$ (e : 時刻 $t = t$ での空隙比)、 $p_0'^*$ は、「塑性」体積ひずみ $-\int_0^t J \text{tr} D^p d\tau$ を計量し始める時($t = 0$)のカムクレイ降伏面の位置を特定する平均有効応力である。さらに、上負荷面に対するカムクレイ降伏面の相似率 R^* ($0 < R^* \leq 1$) と上負荷面に対する下負荷面の相似率 R ($0 < R \leq 1$) には、 $(q^*, p'^*) = (R^* \bar{q}, R^* \bar{p}')$ と $(q, p') = (R \bar{q}, R \bar{p}')$ なる関係があるので、式(1)から上降伏面と下負荷面はそれぞれ次式で表すことができる。

$$f(\bar{p}', \bar{q}) + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau + MD \ln R^* = 0, \quad f(p', q) + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau + MD \ln R^* - MD \ln R = 0 \quad (2)$$

従って、弾塑性構成式の誘導には、 $f(p', q)$ を含む下負荷面の降伏関数(式(2)₂)を用いる。なお、下線部が塑性履歴パラメータとなっており、「塑性」体積変化 $\int_0^t J \text{tr} D^p d\tau$ が応力状態だけでなく、 R, R^* によっても決まるため、体積変化に応力履歴依存性が現れてくる。

(b) 関連流れ則と等方弾性則：

有効応力速度として Green-Naghdi の速度 $\overset{\circ}{T}' (= \dot{T}' + T' \Omega - \Omega T', \Omega = \dot{R} R^T, R$: 変形勾配テンソルの極分解時の回転テンソル)を用い、 $\overset{\circ}{T}' \sim D^e$ 関係には等方弾性フック則、 D^p には 関連流れ則 を仮定し、それぞれ次式で表す。

$$\overset{\circ}{T}' = E D^e, \quad D^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial T'} \quad (\lambda > 0) \quad (3)$$

ここに、 E は弾性係数テンソル、 λ は塑性乗数である。

(c) R と R^* の発展則と塑性乗数 λ ：

乗数 λ は式(2)₂ の物質時間微分をとること(Pragerの適応条件)により与えられる。このとき、 R および R^* の増加と塑性変形の発生とが1対1に対応し、しかも塑性変形の進展速度は橋口が示したように、一般には $\|D^p\|$ の大きさではかるのがよい。しかし、カムクレイ型の降伏関数では、 $\|D^p\|$ はいつも $\|D_s^p\|$ ($D_s^p = D^p - \text{tr} D^p / 3 I$) を伴うことから、

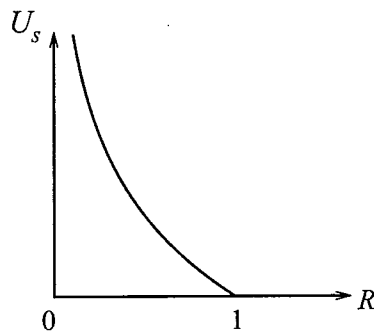


図2.2 U_s の関数の形

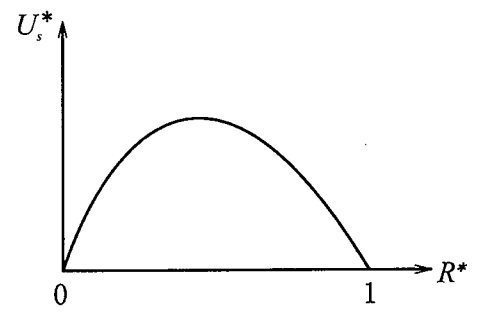


図2.3 U_s^* の関数の形

しかも式が著しく簡略化されるという理由から、 $\|D_s^p\|$ が塑性変形の進展速度に寄与すると仮定する。ここに、 $\|A\| = (A \cdot A)^{1/2}$ (A : 任意のテンソル)である。そこで、 R については橋口の説明に従い、 $R \rightarrow 0$ (相似中心である原点近傍)のときは塑性変形を生じない弾性応答のみで、 $R = 1$ (下負荷面と上負荷面とが一致する)のときは R

が1を超えない条件から、

$$\dot{R} = J\sqrt{\frac{3}{2}}U\|D_s^p\| = JU\frac{\partial f}{\partial q} \quad (4)$$

と書く。ここに U は $0 < R < 1$ で正で、 $R \rightarrow 0$ のとき $U \rightarrow \infty$ 、 $R=1$ のとき $U=0$ で与える (図 2.2)。一方、 R^* については、 R^* の発展則を

$$\dot{R}^* = J\sqrt{\frac{3}{2}}U^*\|D_s^p\| = JU^*\frac{\partial f}{\partial q} \quad (5)$$

と書く。ここに、 U^* は、負荷時に正の増加関数だが、さらに $R^* \rightarrow 0$ のとき $R^* \rightarrow 0$ (すなわち、 $U^* \rightarrow 0$)、 $R^* = 1$ のとき $R^* = 0$ (すなわち、 $U^* = 0$) となるように定める (図 2.3)。後者の条件は自明 (完全に繰り返されればもはやカムクレイ) で、前者の条件はカムクレイ降伏面と上負荷面が無限に離れている、あるいはカムクレイ降伏面が $q \sim p'$ の原点に限りなく近いときも構造が劣化しにくいことを示す。この U^* の条件については、次の (3)(b) で詳述する。この2つの発展側に従い、降伏面 f を用いて一部を具体的に計算すれば、塑性乗数 λ は、 \dot{T}' あるいは D を用いて次のように表現される。

$$\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot \dot{T}'}{J\frac{D}{p'^2}(M_s p' - q)}, \quad \Lambda (= \lambda) = \frac{\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot ED}{\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot E \frac{\partial f}{\partial T'} + J\frac{D}{p'^2}(M_s p' - q)} \quad (6)$$

ここに、 $M_s = M(1 - \frac{DU^*}{R^*} + \frac{DU}{R})$ で、 M を M_s にかえるだけで形式上はオリジナルカムクレイと同じである。

(d) 構成式：

最終的に上負荷面カムクレイモデルの構成式は、式 (3)、 Λ 等を用いることによって次式で計算される。

$$\dot{T}' = ED - \Lambda E \frac{\partial f}{\partial T'} \quad (7)$$

(3) 負荷状態の分類と負荷基準

(a) 負荷状態の分類 (図 2.4)：

$M_s > 0$ とする制約を U^* に課することはすぐ後に述べるが、これにより、負荷状態 ($\lambda \geq 0$) にあるときは、 $q = M_s p'$ が硬化軟化の数居線となって

- (i) $q > M_s p'$ のとき軟化 ($\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot \dot{T}' < 0$)、
- (ii) $q < M_s p'$ のとき硬化 ($\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot \dot{T}' > 0$)、
- (iii) $q = M_s p'$ のとき中立負荷ないし完全塑性 ($\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot \dot{T}' = 0$)

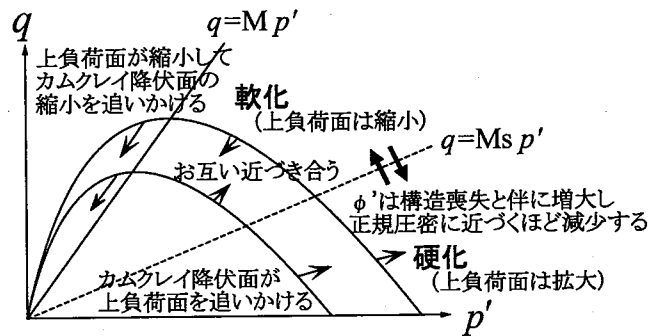


図 2.4 限界状態線下での硬化と軟化

の3つに大別される。もちろん、 $-\text{tr} D^p = -\lambda \text{tr} \frac{\partial f}{\partial T'} = -\lambda \frac{D}{p'^2}(q - M p')$ だから、 $q > M p'$ のとき塑性膨張が、 $q < M p'$ のとき塑性圧縮が伴う。よって、たとえば、 $R=1$ で $M_s < M$ のとき $M_s p' < q < M p'$ では、土は「塑性圧縮を伴いつつ軟化」できる。

(b) M_s の制約および U^* と U の形の決定：

今、 $R=1$ (下負荷面=上負荷面、つまり正規圧密土) で $R^* \rightarrow 0$ の場合を考える。 $R=1$ だから $U=0$ なので、 $R=1$ 、 $R^* \rightarrow 0$ というのはいわゆる「コロイド状態」だが、このときは q がかかると硬化することなく直ちに軟化するとして、 $M_s > 0$ なる制約を与える。すなわち、 $0 < R^* \leq 1$ で $\frac{DU^*}{R^*} < 1$ かつ $\lim_{R^* \rightarrow 0} \frac{DU^*}{R^*} = 1$ とし

て、 U^* を、例えば $U^* = \frac{1}{D} R^* (1 - R^{*m^*})$ で与える。ここに、 D はダイレイタンス係数、 m^* は構造劣化の程度を表す材料パラメータで「構造劣化指数」と呼ぶ。一方、 U の形は、前述 ((2) 構成式の (b)) の条件を満足する簡単なものとして、例えば、 $U = -\frac{m}{D} \ln R$ で与える。ここに、 m は正規圧密状態へのなりやすさを表す材料パラメータで、「正規圧密土化指数」と呼ぶ。

(c) 負荷基準：

$M_s > 0$ の制約から得られる、 $0 < R^* \leq 1$ で $\frac{DU^*}{R^*} < 1$ の条件から、通常の土の材料定数の場合、いかなる応力

状態に対しても、式 (6)₂ の Λ の分母を正となるようにとることができる。したがって、負荷 (弾塑性) 状態 $\Lambda > 0$ は、硬化・軟化の区別に関係なく、 Λ の分子が正、すなわち $\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot ED > 0$ で与えられる。

(d) 構造の低位化に伴う硬化域の拡大:

具体的に U と U^* が決まると、 M_s が $M_s = M(R^{*m^*} - m \frac{\ln R}{R})$ として表される。構造が卓越した土が正規圧密状態あるいは若干過圧密状態にあるときは、右辺第 2 項はほぼゼロとなって $M_s < M$ で、負荷 (塑性変形) によって、 $M_s \rightarrow M$ となる (図 2.5)。このことは、構造がきわめて卓越したコロイド状態 ($R^* = 0+$) にあるときは、 $M_s = 0+$ だが、構造の低位化 (劣化) に伴い、 M_s が大きくなって硬化域が拡大し、土は次第に、せん断応力を発揮できるようになることを意味する。また、構造を有した正規圧密土の「摩擦角」 ϕ' は、練り返し土のそれよりも小さくなることもわかる。一方、構造があっても超過圧密な土は、右辺第 2 項は大きな正の値となって、 $M < M_s$ であるが、負荷 (塑性変形) によって、 $M_s \rightarrow M$ となる (図 2.6)。

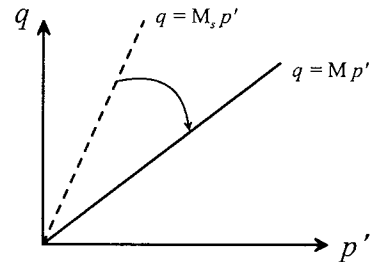
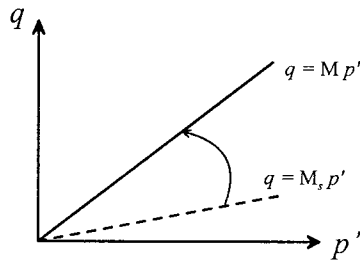


図 2.5 高位な構造から低位な構造へ

図 2.6 過圧密から正規圧密へ

3 「鋭敏比」について

自然堆積粘土 (鋭敏な「乱さない」粘土) 試料は、同じ含水比のまま練り返した (「乱した」) 試料と異なり、非排水せん断強度が大きい。これは、含水比 (比体積) だけでなく、土骨格が有する (骨組) 構造が影響しているためであると考えられている。

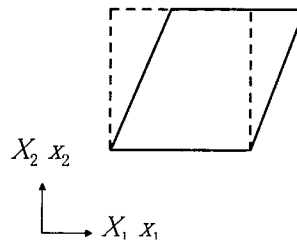


図 3.1 単純せん断試験

圧縮指数 λ	0.181
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.049
限界状態定数 M	1.35
ポアソン比 ν	0.30
構造劣化指数 m^*	0.8
正規圧密土化指数 m	10
初期比体積 v_0	1.70

この章では、初期構造に差異によって土の挙動にどのような違いが見られるかを調べるために、初期の比体積が同じで構造の程度が異なる土 (初期等方応力状態) に

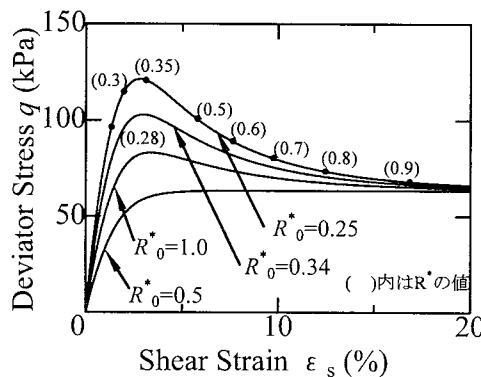


図 3.2 正規圧密土の $q \sim \epsilon_s$ 関係

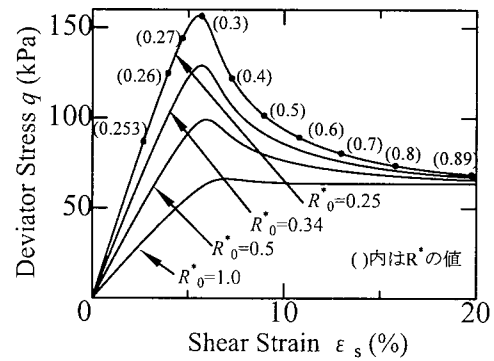


図 3.3 $1/R_0=10.0$ での $q \sim \epsilon_s$ 関係

に対し、単純せん断を想定した構成式の数値積分を行った (図 3.1)。計算に用いた材料定数は表 3.3.1 に示す。初期過圧密比 ($1/R_0$) が 1 と 10 の場合のせん断応力 $q \sim$ せん断ひずみ ϵ_s 曲線を図 3.2 と図 3.3 に示す。こ

に、 ϵ_s は Euler ひずみ e の偏差成分 $e' = e - \frac{1}{3}(\text{tr } e)I$ を用いて、 $\epsilon_s = \sqrt{\frac{2}{3}e' \cdot e'}$ である。また、両図には初期構造 R_0^* が 0.25 の場合の R^* の遷移も示している。初期構造が卓越するに従い、明確な軸差応力のピークが見られる。また、完全練り返しの土 ($R_0^*=1$) に対する各土のピーク「強度」比はまさしく鋭敏比となる。すなわち、例えば、図 3.2 では初期構造 R_0^* が 0.25 の粘土は、鋭敏比が 1.91 の土と読みとれる。また、鋭敏比が大きい土は $q \sim \epsilon_s$ 曲線の初期剛性が大きく、(この場合は) ピークが早く表れることがわかる。なお、両図で、過圧密比 ($1/R_0$) 10 の方が 1 の場合よりも q にピークが表れる時の ϵ_s が大きい。これは初期比体積を両者で揃えているので、初期構造の程度が同じでも、過圧密比 10 の方は

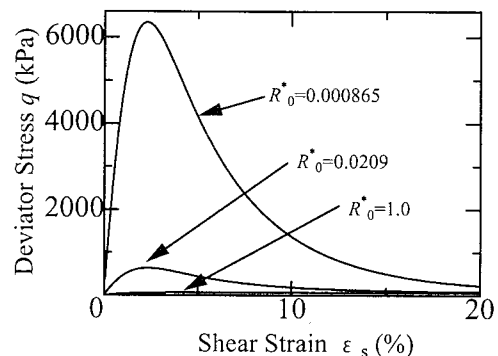


図 3.4 鋭敏比 10 と 100 の $q \sim \epsilon_s$ 関係

初期拘束圧がより小さくなるためである。北欧諸国やカナダで見られるクイッククレイ (quick clay) では、ときに 100 以上の高鋭敏比を持つものが知られているが、鋭敏比が 10 と 100 となるよう R_0^* をそれぞれ 0.0209, 0.000865 とするときの $q \sim \epsilon_s$ 関係を図 3.4 に示しておく。

4 サンプリングに伴う「乱れ」について

土のサンプリングに伴う「乱れ」は「圧密降伏応力」の劣化とせん断「強度」の低下などとして顕れるが、この原因は、次の二つに大別される。

- (a) 「応力解放」：現位置の粘土に作用していた拘束圧の解放、
- (b) 「機械的操作」：サンプラーの押し込み・試料の押し出し、運搬・保管時の振動、トリミング等の繰り返し載荷履歴等。

そこで、1要素を用いた水～土連成計算により、この二つの過程をシミュレートし、上負荷面カムクレイモデルによりサンプリングに伴う「乱れ」を再現する。計算で用いる土は採取前に地表面から深さ 20m の位置で表 4.1 の構造を持った過圧密状態にあるものとし、図 4.1 に示す上下・軸対称性を仮定した 4 分の 1 断面を用いて計算する。また (a),(b) の操作後、「圧密降伏応力」の値の変化を調べるための一次元載荷に伴う過程を次のように 4 段階で再現した。

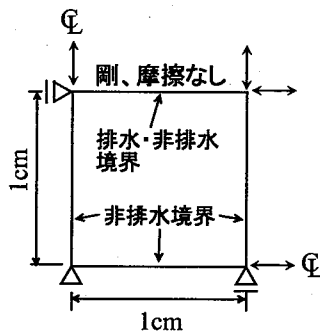


図 4.1 3軸供試体 (1要素)

表 4.1 材料定数

圧縮指数 λ	0.131
膨潤指数 $\bar{\epsilon}$	0.075
限界状態定数 M	1.53
ポアソン比 ν	0.30
正規圧密土化指数 m	10.0
構造劣化指数 m^*	0.8
透水係数 k (cm/sec)	7.8×10^{-9}
土の比重 G_s	2.6
初期過圧密比 $1/R_0$	1.2
初期構造の程度 R_0^*	0.025

- (1) 応力解放過程：上端を排水にして、深さ 20m 分の土被り圧を等方除荷する。
- (2) 繰り返し非排水せん断過程：上端を非排水にし、側圧一定で鉛直変位を与えてせん断後、鉛直方向を応力境界で側方変位を与える。この一連の操作を 3 回繰り返す。
- (3) 排水圧縮過程：上端を排水にし、変位と荷重の両制御で土が初期の受けていた応力状態に戻す。
- (4) 一次元圧縮過程：側方変位を固定して、載荷速度 3.0×10^{-2} kPa/sec で定率鉛直載荷を行う。

(1)~(4) の過程を経た「乱された」土と、「乱さない」まま (4) の試験を行った土の比較を図 4.2(a)~(c) に示す。

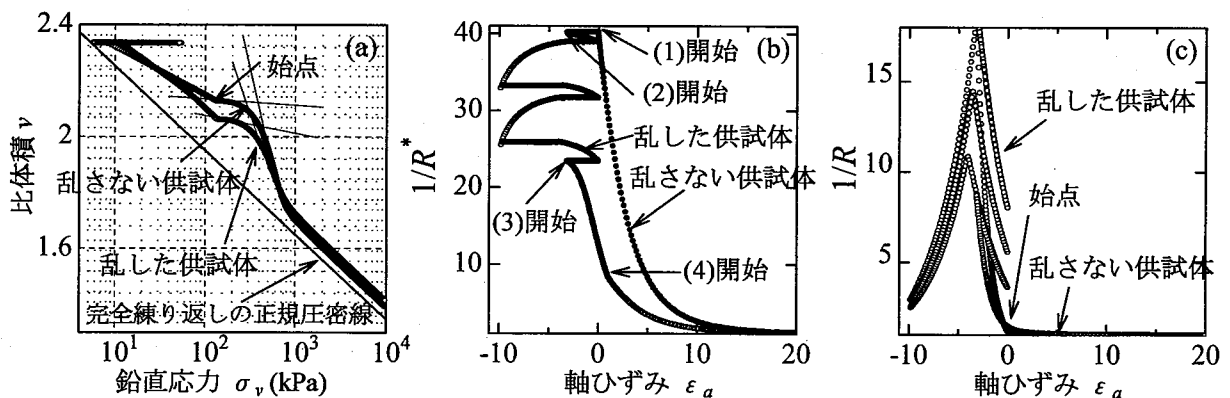


図 4.2 圧密降伏応力の劣化

また Casagrande の $\log t$ 法を用いて、図 4.2(a) の「圧密降伏応力」を求めた結果、「乱さない」土と「乱した」土では、それぞれ 393kPa と 348kPa となり、サンプリングに伴う構造低位化によって「圧密降伏応力」が劣化した。

次に、サンプリングに伴うせん断「強度」低下を見るために、上記 (2) の過程後、次の (5),(6) の過程を与えた。

- (5) 排水圧縮過程：上端を排水にし、変位と荷重の両制御で初期と（ほぼ）同じ比体積に戻す。
- (6) 非排水せん断過程：上端を非排水にし、側圧一定で軸ひずみ速度 4.0×10^{-4} %/sec でせん断する。

(1),(2),(5),(6)の過程を経た「乱された」土と、「乱さない」まま(6)の試験を行った土との比較を図4.3(a)~(c)に示す。せん断「強度」(q のピーク値)は、「乱さない」土と「乱した」土で、それぞれ54kPaと44kPaとなり、サンプリングに伴う構造低位化によって低下した。

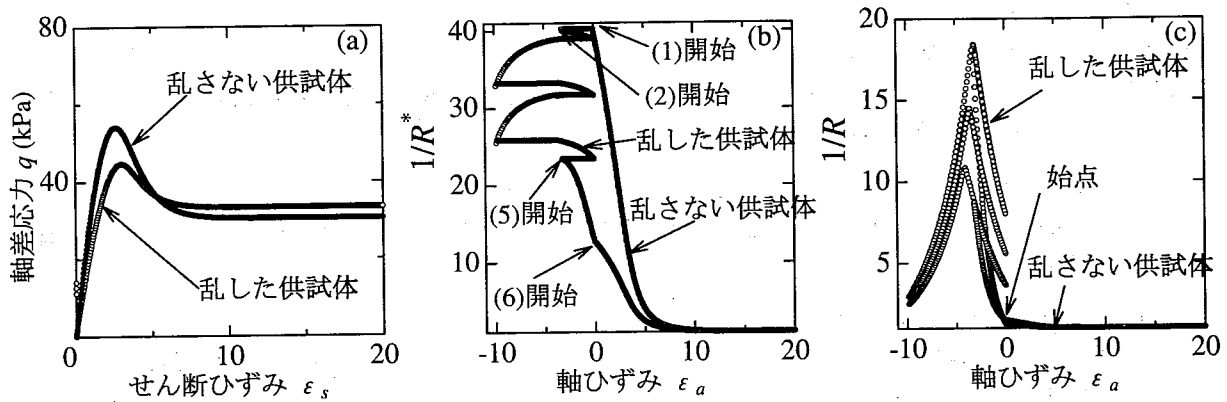


図 4.3 せん断強度の低下

5 鋭敏な粘土の破壊後挙動

5.1 はじめに

鋭敏な粘土はせん断強度が間隙比と構造の程度で決まることについて、3章で触れた。この章では、これに関連して、鋭敏な粘土の破壊後挙動について調べ、鋭敏な粘土は、破壊後に圧密排水により密な状態になっていても、破壊前よりも弱くなる場合があることを述べる。

5.2 シミュレーションの方法

有限要素計算は、上下・軸対称性を仮定し、図4.1と同じ4分の1断面の1要素および境界条件を用いて行う。計算に用いた材料定数は表5.1に示す。また、鋭敏な土の初期条件は、比体積を同じにするように初期圧密圧力を選び、以下に示す3段階に分けて側圧一定の水～土連成計算を行う。

(1) 非排水せん断過程 (A → B)

上端を非排水境界にし、軸ひずみ速度 1.5×10^{-6} cm/sec で、軸「ひずみ」6%まで圧縮する。これによって(正の)過剰水圧が発生する。ただし、1要素で摩擦なしで計算しているため、この軸「ひずみ」速度は過剰水圧の発生・供試体の変形挙動等に関係しない。

(2) 圧密過程 (B → C)

軸変位を固定し、上端のみを排水境界として、その境界での水圧を初期水圧と同じゼロに保つ。この過程によって、供試体内の過剰水圧を消散させながら、供試体から間隙水が排出され、密になる。

(3) 非排水せん断過程 (C → D)

再び上端を非排水境界に変更し、(1)の非排水せん断過程と同じ速度でさらに軸「ひずみ」7%圧縮せん断する。

5.3 シミュレーション結果

一般に、繰り返し正規圧密粘土の場合、非排水的に壊した後に圧密排水させると、以前よりも強くなると言われるが、まずこれを確かめる。このときのシミュレーション結果を図5.1に示す。図中、 ϵ_a と u はそれぞれ鉛直ひずみ、過剰水圧を示し、 $\eta = q/p'$ である。

図5.1を見ると、非排水せん断時 (A → B) に発生した正の過剰水圧 u が圧密排水 (B → C) により次第にゼロとなり、それに伴い比体積 v が減少し密な状態になることが分かる。そして、再び非排水せん断 (C → D) を行なうと以前 (A → B) よりも強くなっていることが分かる。これは繰り返し粘土は密になるほど強くなるという事実に一致する。

次に自然堆積した鋭敏な粘土のように構造を有し、過圧密状態にある粘土について調べてみる。初期構造 $R_0^* = 0.1$ で初期 OCR=1.2(すなわち $R_0 = 0.83$) の状態にある粘土を想定したときのシミュレーション結果を図??に示す。また、この粘土と同一の初期構造の程度 $R_0^* = 0.1$ で初期 OCR=2.0(すなわち $R_0 = 0.5$) の状態にある粘土を想定したときのシミュレーション結果を図5.3に示す。

初期 OCR=1.2 の粘土の場合は、繰り返し粘土の場合 (図5.1) と同様に非排水せん断 (A → B) 時に発生した正

表 5.1 材料定数

圧縮指数 λ	0.182
膨潤指数 κ	0.049
限界状態定数 M	1.35
初期比体積 v_0	2.389
ポアソン比 ν	0.3
正規圧密土化指数 m	10.0
構造劣化指数 m^*	0.8

の過剰水圧 u が圧密排水 (B → C) 時に消散することで密な状態になってピーク強度 q も大きくなっている。他方、初期 OCR=2.0 の粘土の場合は、過剰水圧消散時の密になるものの、ピーク強度 q が破壊前より小さくなり弱くなっている。なお、排水量は初期 OCR=1.2 の場合よりも少なくなる。

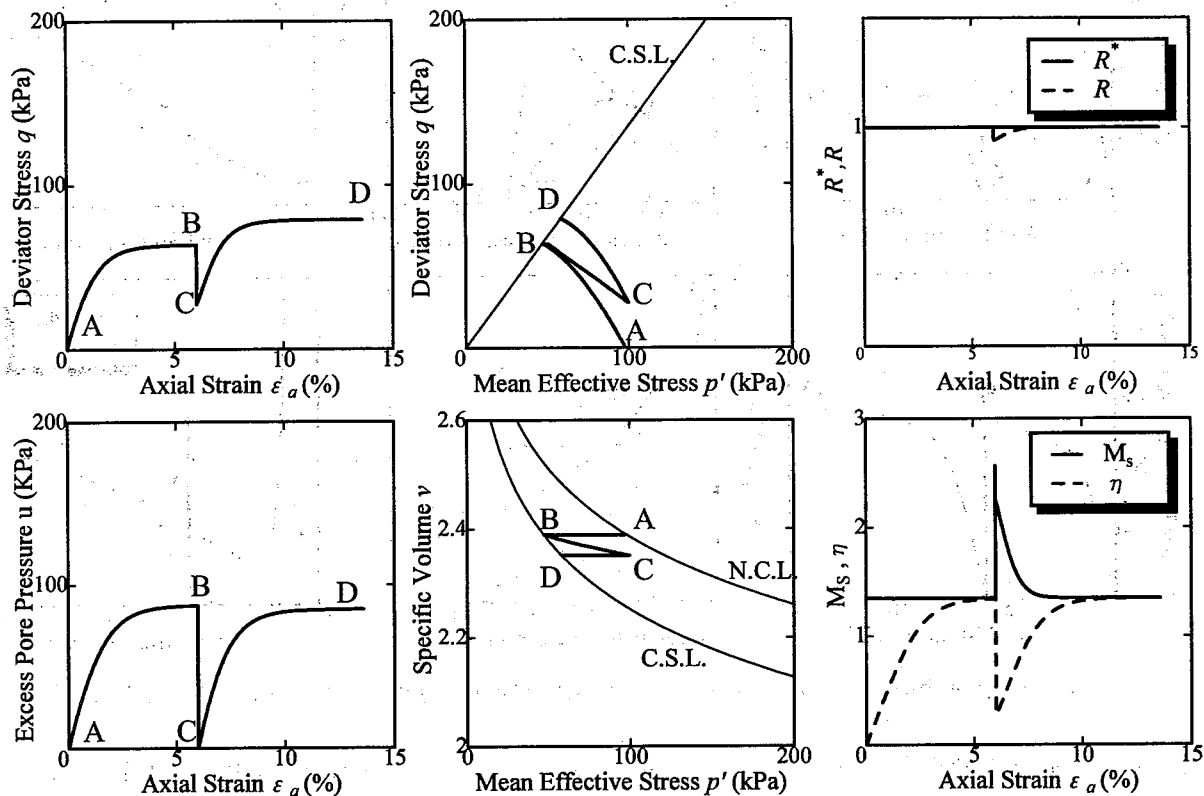


図 5.1 繰り返し正規圧密粘土のシミュレーション結果

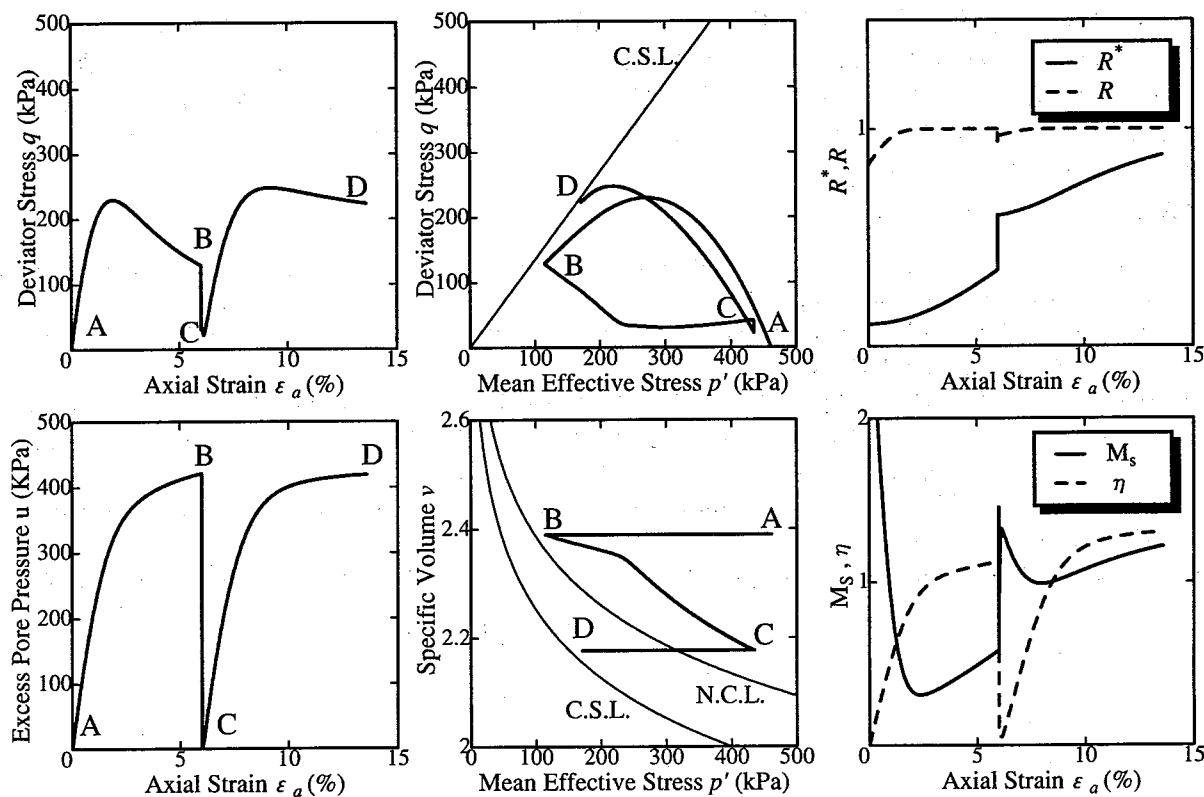


図 5.2 初期構造の程度 $R_0^* = 0.1$, 初期過圧密比 (OCR)=1.2 でのシミュレーション結果

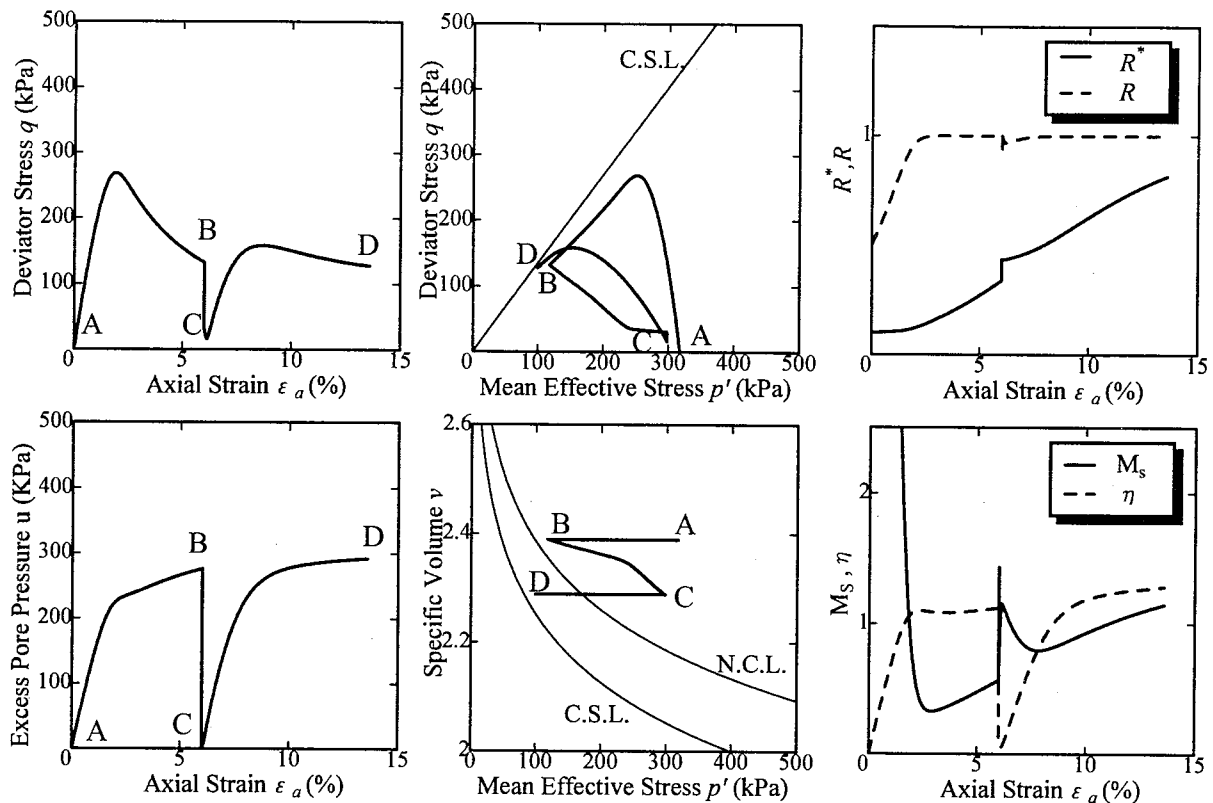


図 5.3 初期構造の程度 $R_0^* = 0.1$, 初期過圧密比 (OCR)=2.0 でのシミュレーション結果

このように同じだけ構造を有していても、過圧密状態の違いによって、排水量が変化し、超過圧密な状態になるにしたがって、排水よりも吸水が生じやすく、粘土が吸水膨張を示してせん断強度を小さくすることになる。

6 おわりに

上負荷面カムクレイモデルによって、構造が卓越した土の限界状態線下側での「塑性圧縮を伴う軟化・硬化」が、過圧密が卓越した土の土の限界状態線上側での「塑性膨張を伴う硬化・軟化」が表現可能となる。

サンプリングに伴う粘土の「乱れ」は「圧密降伏応力」の劣化として捉えられている(例えば、文献5)が、本文では、この弾塑性モデルに基づいて、塑性変形に伴う構造低位化の観点から説明できることを示した。

さらに、せん断して圧密後、排水に伴う空隙比増加があっても、構造低位化によって、ピーク「強度」が小さくなることもあることも示した。

参考文献

- 1) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.(1963): Yielding of clays in state wetter than critical state, *Geotechnique*, Vol.13, pp.211-240.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, to be submitted.
- 3) Hashiguchi, K.(1978): "Plastic constitutive equations of granular materials", *Proceedings of US-Japan Seminar on Continuum Mechanics and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials* (Cowin, S.C. and Satake, M. eds.), Sendai, JSSMFE, pp.321-329.
- 4) Hashiguchi, K.(1989): "Subloading surface model in unconventional plasticity", *International Journal of Solids and Structures*, Vol.25, pp.917-945.
- 5) 奥村樹郎 (1974): "粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究", 京都大学学位申請論文.