

土の骨格構造の働きに着目した「擬似過圧密効果」の一考察

A study on "pseudo-overconsolidation effect" of clay in terms of active soil structure

田代むつみ*・野田利弘**・中野正樹**

Mutsumi TASHIRO, Toshihiro NODA and Masaki NAKANO

*学生員 工修 名古屋大学大学院博士後期課程 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻

"Pseudo-overconsolidation effect" of saturated clay is investigated using SYS Cam-clay model. The model describes the decay of soil structure, loss of overconsolidation and evolution of anisotropy with ongoing plastic deformation of soil. The model suggests that if soil structure in clay is formed during the sedimentary environment due to chemical effect such as cementation, the soil is possible to acquire overconsolidation without stress history. The higher the degree of the soil structure, the higher the clay displays sensitivity and compressibility. In addition, the soil can display rewinding behavior in undrained shear test and exhibit delayed consolidation in one-dimensional consolidation test.

Key Words : pseudo-overconsolidation, soil structure, SYS Cam-clay model

1. はじめに

過去に地盤変動や侵食、地下水位の変動、氷河の移動・溶解などの応力履歴が無いにもかかわらず、自然堆

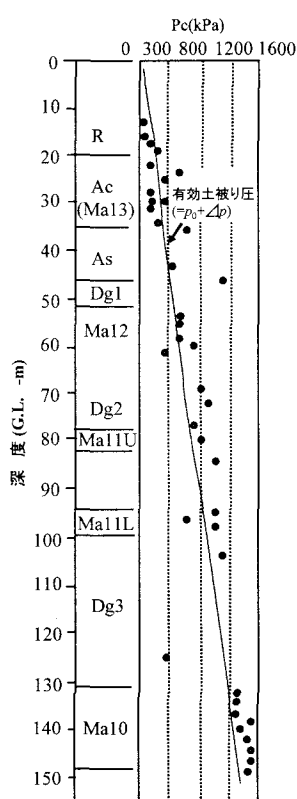


図-1 大阪湾洪積粘土の土性図¹⁾

積土では圧密降伏応力 p_c が現在の土被り圧以上の値を示し過圧密土的な挙動を示すことがある。例えば、大阪湾洪積粘土は、氷河・間氷期の海進・海退と基盤の沈降作用によって生成された海成粘土であり、過去に現在の上載荷重よりも大きな荷重を経験したことが無いにもかかわらず、図-1の土性図¹⁾が示すように上記の特徴を示すことが知られている。また人工的にセメントを混合した粘土でも、圧密過程で応力履歴が全く無いにもかかわらず、見かけの圧密降伏応力が観測され、せん断挙動において初期に過圧密状態にあった土と同じ挙動を示すことがある²⁾。これらは応力履歴による過圧密と区別して、

「擬似過圧密効果」と呼ばれ、年代効果やセメンテーションなどの言葉で説明されることが多い。セメンテーションとは、間隙水中の溶存物質や懸濁物質が土粒子間の間隙や接触点に長年月に亘って沈殿して、土粒子を結合させる作用を言う³⁾。例えば貝殻を多く含む有明粘土は、塩分溶脱の影響と併せて貝殻の溶解によりアルカリ性が増し、珪藻遺骸が溶解することによって、間隙水中には Si^{4+} や Al^{3+} のといった、化学的地盤改良メカニズムに認められるものと同種のものが存在する。この結果、乱さない有明粘土では、間隙径の小さな土粒子の集合体により大きな間隙径が形成されており、これが高圧縮性・高鋭敏性の原因と考えられている。また乱した有明粘土では、大きな間隙径は減少し、圧縮性が低下することも確認されている⁴⁾⁵⁾。このように化学的・生物化学的作用によりセメンテーションが発達した土は、高位な構造を形成した土として捉えられている。

本論文では、このような擬似過圧密効果のある土の力学挙動を、土の「骨格構造」の働きを記述する弾塑性構成式に基づき表現し、考察することを目的とする。骨格構造とは、三笠(1964)⁶⁾により定義された言葉で、土の「状態」を説明する因子として、密度・含水比以外の全ての因子を指す。飽和土を考える場合は、密度と含水比は同義であるため、土の状態は密度と骨格構造の2つにより説明されることになる。本論文では、三笠と同様の立場から、応力状態が与えられたとき、密度だけで負荷(弾塑性)挙動が決まる土、すなわち骨格構造のない土の力学挙動を Cam-clay モデルが表現できるとしながら、骨格

構造として構造・過圧密・異方性の3つを定義し、塑性変形に伴う骨格構造の働き／作用を表現できる SYS Cam-clay モデル (Super/subloading Yield Surface Cam-clay model) ⁷⁾を用いて考察する。そして、セメンテーションなどの作用により土の構造が高位化したと仮定したときに、その土には過圧密が発現し、応力履歴無しに過圧密的な挙動(「擬似過圧密効果」)が現れる可能性があることを示す。ただしこのモデルは、基本的に塑性変形によって構造が高位な状態から低位な状態への非可逆な遷移過程を記述する弾塑性モデルであるため、構造が高位化する過程、すなわち構造を生み出す過程を記述していないことに注意する。

2. SYS Cam-clay モデルの概要

2.1 構造・過圧密・異方性の定量化表現とそれらの発展則

自然堆積土は、粘性土でも砂質土でも大抵「構造」が発達した過圧密状態にあり、そのせん断挙動は異方性を示す。この状態にある土の変形挙動を表すために、構造をなくした練返し状態でおかつ正規圧密状態の土の弾塑性モデルを「土台」とする。このとき、構造がなく正規圧密状態にある土にも異方性は存在するので、本論文では関口・太田(1977)⁸⁾による異方性を表す応力パラメータ η^* とその発展を記述した回転硬化概念⁹⁾を修正 Cam-clay モデルに導入してその土台とする。構造の程度は上負荷面概念¹⁰⁾を、過圧密の程度は下負荷面概念¹¹⁾を導入し定量化する。すなわち、構造が発達した土は同じ間隙比でも Cam-clay モデルが表現する練返し土よりも大きな力を支えることができるので、構造の程度は Cam-clay 面(正規面)の外側に相似な上負荷面を導入し、相似中心を原点 $p'=q=0$ として大きさの相似率を R^* ($0 < R^* < 1$)で定義する。一方、過圧密状態にある土はこの上負荷面よりも内側に応力状態があるので、過圧密状態には上負荷面の内側に下負荷面を導入し、相似中心を原点 $p'=q=0$ としてその大きさの相似率を R ($0 < R < 1$)で定義する。ここに、 p' は平均有効応力、 q はせん断応力で、有効応力 T' (引張:正)を用いて、 $p' = -\text{tr} T' / 3$, $q = 3/2 \|S\|$ ($S = T' + p'I$, I : 等方テンソル, $\|\cdot\|$: ノルムを示す)で与えられる。 R^* は0に近いほど構造が高位で、塑性変形が進むにつれ、構造が低位化(喪失)し1に近づく(R^* の発展則)。 R も0に近いほどより過圧密な土で、塑性変形の進展によって増加し、正規圧密状態へと近づくに従い、1に近づく(R の発展則)。したがって塑性変形が進んで構造が低位化すると同時に過圧密が解消(正規圧密状態へ移行)し、最終的 Cam-clay 面に一致すると仮定する。これら3つの負荷面の位置関係は、軸対称条件を仮定すれば図-2のように描くことができるが、Cam-clay 面

と現有効応力がある下負荷面を式示すと、次式になる。

Cam-clay 面:

$$MD \ln \frac{\tilde{p}'}{p'_0} + MD \ln \frac{M^2 + \eta^{*2}}{M^2} + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau = f(\tilde{p}', \eta^*) + \int_0^t J \text{tr} D^p d\tau = 0 \quad (1)$$

下負荷面:

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

ここに、 $D = (\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) / M / (1 + e_0)$ はダイレイタンシー係数、 M , $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\kappa}$ および e_0 は限界状態定数、圧縮指数、膨張指数および初期間隙比で $J = (1 + e) / (1 + e_0)$ (e は時刻 $t = t$ の間隙比)である。 $-\int_0^t J \text{tr} D^p d\tau$ (圧縮:正)は塑性体積ひずみに相当する。また、異方性を表す η^* は、有効応力、回転硬化変数 β などを用いて次式で表される。

$$\eta^* = \sqrt{3/2} \|\hat{\eta}\|, \quad \hat{\eta} = \eta - \beta, \quad \eta = S / p' \quad (3)$$

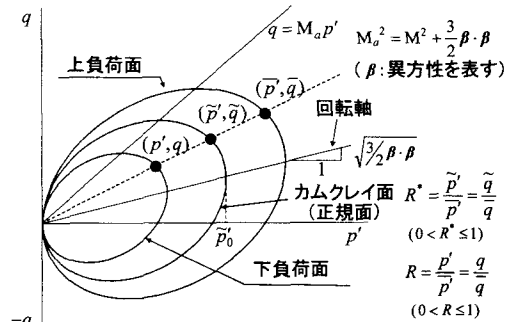


図-2 3つの負荷面

本論文では、塑性変形の進展に伴う、構造(R^*)、過圧密(R)、異方性(β)の発展則を次式で与える。

$$R^* \text{の発展則: } \dot{R}^* = JU^* \|D^p\|, \quad U^* = \frac{a}{D} R^* (1 - R^*) \quad (4)$$

$$R \text{の発展則: } \dot{R} = JU \|D^p\|, \quad U = -\frac{m}{D} \ln R \quad (5)$$

$$\beta \text{の発展則: } \dot{\beta} = J \frac{br}{D} \sqrt{\frac{2}{3}} \|D_s^p\| \|\hat{\eta}\| \left(m_b \frac{\hat{\eta}}{\|\hat{\eta}\|} - \beta \right) \quad (6)$$

ここに、 D^p は塑性ストレッチングでストレッチング D の和分解したときの塑性成分、 D_s^p はその偏差成分を表す。また、式(6)中 $\dot{\beta}$ は β の Dienes 速度¹²⁾である。式(4)~(6)の発展則パラメータ群 a, m, br, m_b はすべて定数で、各々の「役割」から a を構造低位化指数、 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。なお室内試験と構成式の応答比較から、典型的な粘土の発展則パラメータの値は、構造低位化と異方性の進展が遅く過圧密解消が速くなるような値⁷⁾であることが分かっている。

2.2 関連流れ則と構成式

現有効応力は常に下負荷面（式(2)）上にあるので、下負荷面について、関連流れ則・Prager の適応条件など、通常の弾塑性諸法則を適用すると、負荷時の塑性乗数は次式となる。

$$\text{関連流れ則: } D^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial T'},$$

$$\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial T'} \cdot \dot{T}'}{J \frac{MD}{p'(M^2 + \eta^{*2})} (M_s^2 - \eta^2)} > 0 \quad (7)$$

ここに、

$$M_s^2 = M_a^2 + br \frac{4M\eta^{*2}}{M^2 + \eta^{*2}} (m_b \eta^* - \sqrt{\frac{3}{2}} \hat{\eta} \cdot \beta) - \left(\frac{U^*}{R^*} - \frac{U}{R} \right) \sqrt{6\eta^{*2} + \frac{1}{3} (M_a^2 - \eta^2)^2} \quad (8)$$

で、 $M_a^2 = M^2 + \zeta^2$ 、 $\zeta = \sqrt{3/2} \|\beta\|$ である。

一方、有効応力変化は弾性変形によって生じるとして、非線形 Hooke 則を仮定すると構成式は、次式となる。

$$\dot{T}' = E D - \Lambda E \frac{\partial f}{\partial T'} \quad (9)$$

ここに、 E は弾性係数テンソル、 $\dot{T}'$ は T' の Dienes 速度¹²⁾、 Λ は塑性定数 λ のストレッチング D による表現である。詳細は文献 7) に譲るが、負荷条件 $\lambda > 0$ から得られる硬化・軟化の敷居線 $q = M_s p'$ の傾き M_s は、構造低位化、過圧密解消（と除荷時の過圧密の増加）、異方性の発達・消滅および現有効応力によって変化し、塑性圧縮・膨張の敷居線 $q = M_a p'$ の傾き M_a は異方性の発達・消滅に応じて変化する。

2.3 構造が高位な過圧密粘土の力学的な特徴

この硬化・軟化の敷居線 $q = M_s p'$ ならびに塑性圧縮・膨張の敷居線 $q = M_a p'$ の動きに着目して、構造が高位な過圧密な粘土の特徴について説明する。過圧密な粘土では、初期状態において硬化・軟化の敷居線 $q = M_s p'$ が塑性圧縮・膨張の敷居線 $q = M_a p'$ の上側に位置する。これは式(8)に式(4)~(6)を代入すると分かる。例えば、次章の表-2[2]で示す若干過圧密な粘土は、原位置において $M_s = 9.53$ 、 $M_a = 1.45$ である。そのため、始め等方応力状態など低応力比にある土は「塑性圧縮を伴う硬化」を示す。せん断が進み応力比が増して、有効応力がこの2つの敷居線で囲まれる領域に入ると、「塑性膨張を伴う硬化」を示すことになる。すなわち、過圧密粘土に特有の限界状態線の上側での硬化が生じる。

しかし粘土は過圧密の解消が早いからこの状態は長くは続かず、塑性変形の進展に伴い M_s は減少を始め、やがて $M_a < M_s < q/p'$ の領域に入り「塑性膨張を伴う軟化」に転じる。このとき粘土は正規圧密土となったが、まだ構造が高位な状態にあるので、 M_s が M_a よりも小さくなる。すなわち応力状態は $M_s < q/p' < M_a$ の領域に入り「塑性圧縮を伴う軟化」を示すことになる。これがより顕著

な場合には、圧縮を伴う平均有効応力の減少さえも生ずる「二次圧密」の原因となるが、これは文献 13)などを参照されたい。

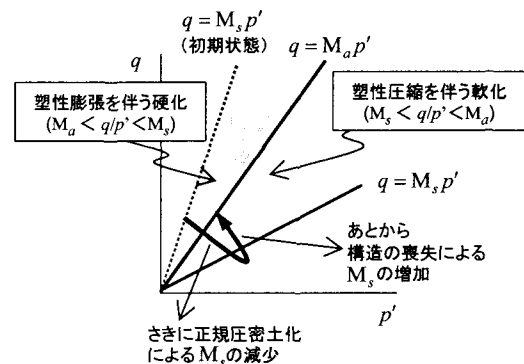


図3 粘土における $q = M_s p'$ の変動

3. SYS Cam-clay モデルに基づく「擬似過圧効果」の表現

3.1 構造の高位化と過圧密の発現

SYS Cam-clay モデルでは、初期状態において異方性の程度・過圧密・構造・有効応力・比体積の5つの状態は互いに関連しており、他の4つの状態を与えると、残りの1つの状態は自ずと決まる。例えば、初期過圧密比 ($1/R_0$) は次式で求めることができる。

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R^*} \exp \left(\frac{N - v_0 - \tilde{\lambda} \ln p'_0}{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}} - \ln \frac{M^2 + \eta^{*2}}{M^2} \right) \quad (10)$$

式(10)は、応力状態・比体積（含水比）及び異方性が一定であれば、セメンテーションなどの作用により土の構造が高位化した場合、それに応じて自ずと過圧密比が増大することを意味する。つまり「構造」の定義から構造の高位化は土の嵩張りの増加を意味し、間隙比の増大や高強度化をもたらすが、堆積環境などにおいて間隙比や応力状態が変化しないと考えられる場合には、その分過圧密が発現すると捉えることができる。図4は簡単のため、初期に練り返し正規圧密状態にある粘土を想定し、構造の高位化とそれに伴う過圧密の発現を概念的に示したものである。 $v - \ln p'$ 空間において土は常に NCL 上にいるが、構造の高位化によりその分だけ過圧密比が大きくなる。なお、図中に実線と破線で示した矢印は、土が

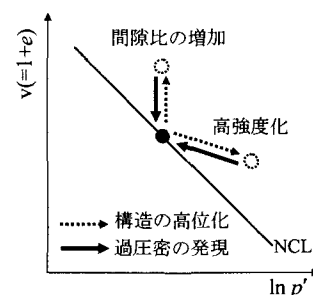


図4 構造の高位化と過圧密の発現の概念図

実際にたどる応力経路を示したものではないので注意が必要である。

3.2 SYS Cam-clay モデルの応答による「擬似過圧密効果」の表現

堆積環境においてセメンテーションなどの化学的作用により構造が高位化した自然堆積粘土を想定し、「擬似過圧密効果」を表現する。地中から自然堆積粘土供試体をサンプリングし、鋭敏比及び「圧密降伏応力」を求める室内試験（非排水三軸試験・一次元圧縮試験）を計算により記述した。ただし、供試体の挙動は簡単のため、一様変形場における SYS Cam-clay モデルの応答により示した。

計算に用いた粘土の材料定数、及び原位置における初期状態を表-1 に示す。深さ約 10m における骨格構造が発達した自然堆積粘土を想定した。

表-1 粘土の材料定数と原位置における初期値

<弾塑性パラメータ>

圧縮指数 λ	0.1
膨潤指数 κ	0.05
限界状態定数 M	1.4
正規圧密線の切片 N	2.0
ボアソン比 ν	0.1

<発展則パラメータ>

構造低位化指数 a	0.95
正規圧密土化指数 m	5.0
回転硬化指数 b_r	0.001
回転硬化限界定数 m_b	1.0

<初期値>

鉛直有効土被り圧 σ'_{v0} (kPa)	98.1
比体積 $v_0 (=1+e_0, e: \text{間隙比})$	2.043
異方性の程度 $\zeta_0 = \sqrt{3/2} \ \beta_0\ $	0.375
応力比 $\eta_0 = q_0 / p'_0$	0.375
(側圧係数 K_0)	0.7

本計算では、地中からのサンプリング、及び標準圧密試験機への供試体設置までの過程を、図-5 に示す応力経路（等方応力状態まで非排水除荷→一次元条件による吸水除荷）により表現した¹⁴⁾。詳細は付録 A2 に示す。図中の各点は、(A)原位置、(B)地表面までのサンプリング完了時、(C)標準圧密試験機への設置完了時（標準圧密の初期状態）である。鋭敏比を求める非排水三軸試験は、サンプリング完了時の状態で即時行うことを想定し、(B)の状態から行った。

原位置においてセメンテーションなどの化学的作用によって構造が発達したことを仮定して、応力・間隙比・異方性の程度は等しいが（表-1）、構造の発達度合いが異

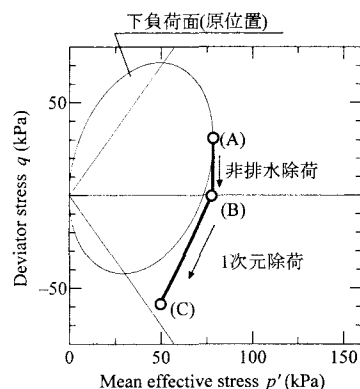


図-5 試料採取から標準圧密試験機設置までの経路（一次元条件による吸水除荷）

なる 5 種類の粘土を想定した。表-2 には各々の粘土に対して初期状態(A)における構造の程度 $1/R^*$ と、異方性が一定と仮定して式(10)に基づいて得られる過圧密比 $1/R$ の値を示す。また(B),(C)各段階における値も併せて示す。粘土[1]は原地盤において構造低位な正規圧密粘土であり、[2]→[5]と構造が高位な状態にある粘土ほど、それに応じて過圧密比も大きくなる。また除荷中は、下負荷面を大きくしていることから、(弾性除荷ではなく)弾塑性負荷が生じ、この時構造も若干ではあるが低位化している。

表-2 各段階における $1/R^*$, $1/R$ の値

	(A) 原位置		(B)地表面へのサンプリング時		(C)標準圧密試験開始時	
	$1/R^*$	$1/R$	$1/R^*$	$1/R$	$1/R^*$	$1/R$
[1]	1.500	1.000	1.481	1.000	1.360	1.001
[2]	2.000	1.322	1.981	1.277	1.814	10.83
[3]	3.000	1.984	2.982	1.868	2.847	14.15
[4]	5.000	3.306	4.985	3.077	4.890	22.49
[5]	9.000	5.950	8.988	5.515	8.921	40.11

3.3 構造の「高位化」を想定した粘土における力学特性の変化

図-6 は、上記 5 種類の状態にある粘土について、(B)のサンプリング後から非排水せん断応答を調べた結果で、表-3 は繰返し正規圧密土との非排水せん断強度の比から求めた鋭敏比 S_t である。また、図-7 は、(C)の状態から標準圧密試験を想定した一次元圧縮応答の結果で、表-4 は、Casagrande 法¹⁵⁾から求めた圧密降伏応力 p_c および見かけの OCR を示す。見かけの過圧密比 OCR は、SYS Cam-clay モデルの定義する過圧密比 $1/R$ とは、その定義が異なることに注意する必要がある。詳細は付録 A1 に示した。

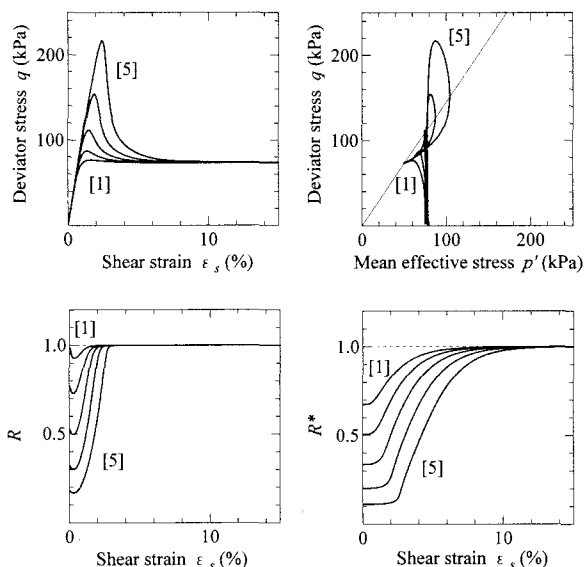


図-6 構造の発達度合いが異なる粘土の
非排水せん断応答

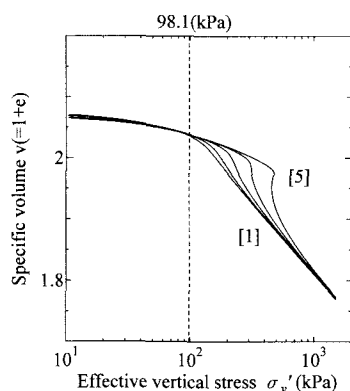


図-7 構造の発達度合いが異なる粘土の一次元圧縮応答

表-3 鋭敏比の比較

	鋭敏比 S_t
[1]	1.040
[2]	1.186
[3]	1.516
[4]	2.080
[5]	2.917

表-4 p_c と見かけの
OCR の比較

	p_c	見かけの OCR
[1]	128	1.31
[2]	156	1.59
[3]	211	2.15
[4]	309	3.15
[5]	474	4.84

これらの図から、原位置でセメンテーションなどの作用により構造が高位化した場合は、粘土は鋭敏になり、塑性膨張を伴う硬化挙動といった過圧密粘土に特有の挙動を示す。また、圧密降伏応力 p_c は大きくなり、見かけの OCR が大きくなる。

次に、ここで想定した5種類の状態にある粘土のうち、構造の高位化が著しい[4]と[5]の粘土に対し、 $\dot{\sigma}_v = 0.981$ (kPa/sec) で定率漸増載荷後、鉛直圧を一定放置した場合

の沈下挙動を比較する。放置鉛直圧は、各粘土における圧密降伏応力 p_c を跨ぐ2点 ($p_c \pm 10$ kPa) で設定した。計算は水～土連成の有限変形計算¹⁶⁾で、図-8に示す有限要素メッシュと境界条件を用いて行った。透水係数は $k = 7.8 \times 10^{-8}$ (cm/sec) とした。図-9は $e - \ln \sigma_v$ 関係を、図-10は鉛直圧を一定にした後の時間～沈下量関係を示す。

圧密降伏応力 p_c は「圧縮曲線」の勾配が大きく変化する点であるため、どちらの状態の粘土も p_c 以上の荷重を載荷すれば大きな沈下量が発生し、沈下の収束が遅れる。特に構造の高位化が著しい[5]の粘土では、沈下量は大きく発生している。図-7からも、構造が高位な土ほど、圧密降伏応力以後（過圧密領域後）の直線の傾きが大きくなり、構造の高位化により高圧縮性の土へとその性質が変化する様子が記述できている。

図-11は、図-10中の(a)～(e)の時間における、過剰間隙水圧の等時曲線を示す。粘土[4]は時間の経過と共に過剰間隙水圧は消散に向かう、「通常の」圧密沈下挙動を示す。しかし[5]の状態にあった粘土は過剰間隙水圧の上昇（湧出し）が図中の矢印の箇所で生じさえしている。水圧の湧出しのメカニズムは参考文献¹³⁾¹⁴⁾に譲るが、このような粘土から成る地盤では長期に亘る大沈下の危険性もあると考えられる。

以上から、セメンテーションなどの生物化学的な作用により構造が高位化したと仮定すれば、鋭敏で圧縮性の高い粘土へとその力学特性が変化し、過圧密土的な挙動（「擬似過圧密効果」）を示す可能性があることが明らかとなった。

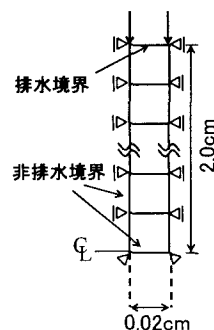
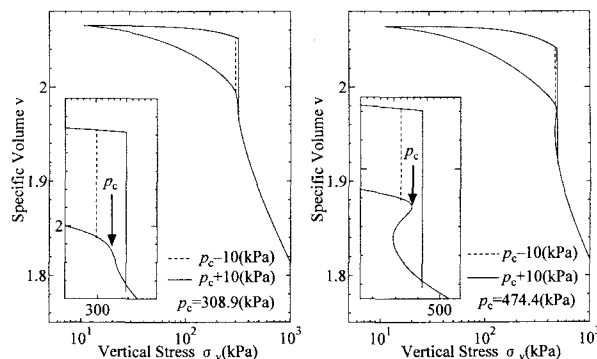
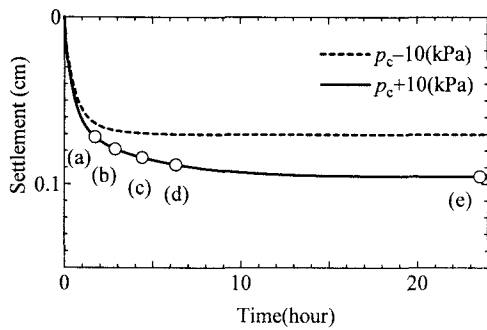


図-8 有限要素メッシュと境界条件

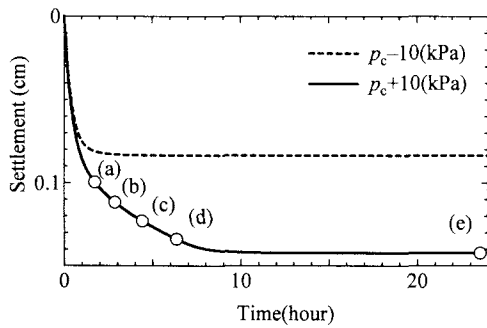


①粘土[4] (原位置 $1/R_0^* = 5.0$) ②粘土[5] (原位置 $1/R_0^* = 9.0$)

図-9 $e - \ln \sigma_v$ 関係

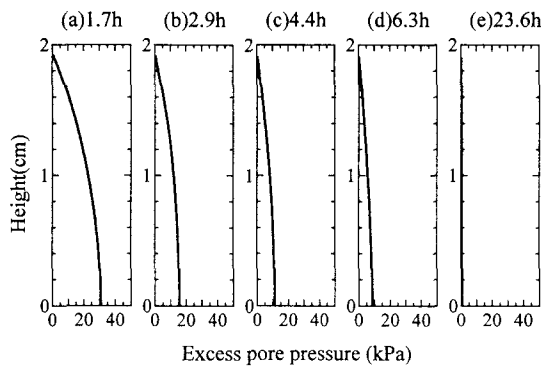


①粘土[4] (原位置 $1/R^*_0=5.0$)

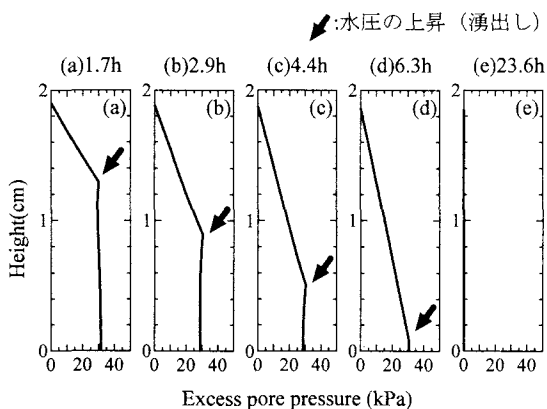


②粘土[5] (原位置 $1/R^*_0=9.0$)

図-10 時間～沈下量関係



①粘土[4] (原位置 $1/R^*_0=5.0$)



②粘土[5] (原位置 $1/R^*_0=9.0$)

図-11 過剰間隙水圧の等時曲線

4 結論

骨格構造の働きを表現する弾塑性構成式である SYS Cam-clay モデルに基づき、擬似過圧密効果の表現を試み考察を行った。すなわち堆積環境でセメンテーションなどの生物的・化学的作用により土の構造が高位化したと仮定すると、それに応じて過圧密が発現し、応力履歴が無くても過圧密土的な挙動を示すことを、構成式の応答により示した。また構造の高位化が著しい粘土は、鋭敏で圧縮性が高く、沈下の収束が遅い、遅れ圧密の危険性のある土へと変化することが推論できることがわかった。

付録

A1 過圧密比の定義

SYS Cam-clay モデルで定義される過圧密比 $1/R$ とは別に、通常地盤工学では一次元的な p_c を用いて定義される「見かけの過圧密比(OCR)」を用いることが多い。以下では両者の過圧密の違いについて比較を示しておく。

一般に原位置での過圧密状態は、通常、不攪乱試料を用いた標準圧密試験から求めた圧密降伏応力 p_c により判定され、過圧密比は次のように定義されることが多い。

$$\text{過圧密比} = \frac{\text{圧密降伏応力 } p_c}{\text{原位置での有効土被り圧}} \quad (\text{A1})$$

これは、土の除荷・再載荷経路は「弾性的な挙動」とであるとする立場から、圧縮曲線の勾配が大きく変化する圧密降伏応力 p_c は、その土が過去に受けた最大の応力（先行圧密応力）を表現すると考えることに基づく。一方、本論文で用いた SYS Cam-clay モデルでは、過圧密土の再負荷時の挙動は下負荷面に従うが、上負荷面と下負荷面の相似率 R の逆数 $1/R$ が過圧密比に相当する。また、除荷は純粋な弾性挙動であり過圧密は増大するが、再負荷は弾塑性挙動であり過圧密は解消（正規圧密土化）する。

本章では簡単のため、人工的な室内試験で得られるような構造の無い練り返し土を対象にして、両者で定義される過圧密比にどのような相違点があるのかを示す。なお、以下では圧密降伏応力 p_c に基づく過圧密比を「見かけの OCR」、SYS Cam-clay モデルに基づく過圧密比を「 $1/R$ 」と表記する。

もっとも簡単な状態として、等方的な応力状態で鉛直荷重を受けている練返し粘土供試体が一次元的な除荷後に一次元的な再載荷を受ける条件を考える。用いた粘土の材料定数は表-1 と同じであり、初期に十分に練り返された正規圧密状態にある粘土を想定して表 A-1 の初期値を用いた。この条件下での SYS Cam-clay モデルの応答として、見かけの OCR と $1/R$ の比較を図 A-1 に示す。A 点 ($\sigma'_v = 1500 \text{ kPa}$) を先行圧密応力として $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow$

D → E と除荷過程を、E → D' → C' → B' → A' と再載荷を示す。表 A-2 は、図中の A ~ A' において見かけの OCR と 1/R の具体的な数値を示す。また、再載荷時の挙動において Casagrande 法¹⁴⁾から圧密降伏応力 p_c を求めると $p_c=1650\text{kPa}$ であった。

表 A-1 初期値

鉛直有効土被り圧 σ'_{v0} (kPa)	9.81
比体積 $v_0 (=1+e_0, e: \text{間隙比})$	2.23
構造の程度 $1/R^*$	1.0
過圧密比 $1/R$	1.0
異方性の程度 $\zeta_0 = \sqrt{3/2} \ \beta_0\ $	0.0
応力比 $\eta_0 = q_0 / p'_0$	0.0
(側圧係数 K_0)	1.0

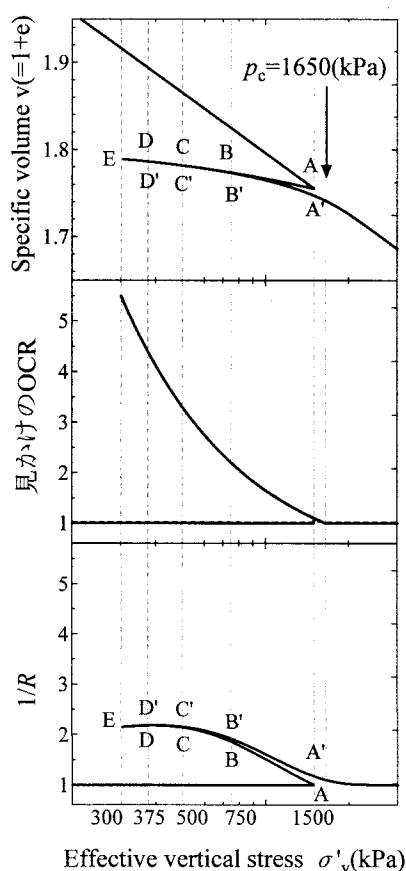


図 A-1 標準圧密試験の除荷・再載荷経路

表 A-2 見かけの OCR と 1/R の比較

	除荷					再載荷			
	A	B	C	D	E	D'	C'	B'	A'
σ'_{v0} (kPa)	1500	750	500	375	300	375	500	750	1500
見かけの OCR	1.10	2.20	3.30	4.40	5.50	4.40	3.30	2.20	1.10
1/R	1.00	1.85	2.18	2.17	2.15	2.18	2.15	1.92	1.17

図 A-1 の鉛直有効応力～比体積関係では、除荷時 (A → E) と再載荷時 (E → A') の経路が一致せず、圧密降伏応力 p_c は先行圧密応力 ($\sigma'_{v0}=1500\text{kPa}$) よりも大きな値となる。この結果、圧密降伏応力 p_c による見かけの OCR は先行圧密応力より大きく、圧密降伏応力 p_c より小さな応力状態にある土は、先行圧密応力以上の応力履歴が無いにもかかわらず、過圧密比が 1 よりも大きくなり「過圧密状態」として判断されることになる。すなわち、見かけの OCR を用いる場合は、サンプリングなどにより除荷され再び同じ応力状態まで再載荷されても、より過圧密土的な挙動を示すことになる。

また、見かけの OCR は、圧密降伏応力 p_c に基づいて算定されるため、除荷中は過圧密は常に増大し、再載荷すれば過圧密は解消する。しかし 1/R は、表 A-2 に示すように、除荷と再載荷で同じ値をとらず、先行圧密応力まで再載荷して応力状態を戻しても 1/R=1 に戻らない。また、1 次元除荷が十分進むと、(弾性変形だけではなく) 塑性変形も進展するため、過圧密 1/R の解消さえ進む。

このように、見かけの OCR はその定義の違いから、SYS Cam-clay モデルの定義する過圧密比 1/R にはそのまま適用できないことに注意が必要である。

A2 構成式の応答によるサンプリングの表現

不攪乱試料であっても、地盤からのサンプリング、及び供試体設置までの両過程において、骨格構造の乱れは不可避であり、室内試験で忠実に原位置での状態を再現するのは困難である¹⁴⁾。ここでは、骨格構造の乱れが少ないと考えられる 2 つのサンプリング経路を SYS Cam-clay モデルの応答として表現し、サンプリングがその後の圧縮挙動、特に圧密降伏応力に及ぼす影響を示す。

地中からのサンプリングでは、粘土の透水係数は小さく比較的瞬時の採取が行われるため、粘土試料の含水比が一定に保たれ、また土被り圧が開放された状態で等方応力状態になると考えられる。この仮定に基づき、原位置の状態から等方応力状態まで非排水除荷によりサンプリング過程を表現する。

次に、供試体を標準圧密試験機へセットするまでの過程は、段階載荷試験における 1 段階目の荷重値 ($\sigma'_{v0}=9.81\text{kPa}$) まで供試体が吸水除荷されると考え、この除荷過程を①等方応力条件と②一次元条件の 2 つの条件で与えた。この①は、圧密リングに試料を設置するまでに、吸水を許して十分応力開放を行う除荷仮定に相当する。一方②は、サンプリング瞬時に圧密リングに設置してから吸水を許す除荷過程に相当する。各条件における応力経路を図 A-3、及び図-5 に示す。

表-2 の[2]の粘土に対し、①②の各条件でサンプリング後の圧縮挙動を図 A-4 に示す。図中には比較のため、原位置の状態からの圧縮挙動も併記した。

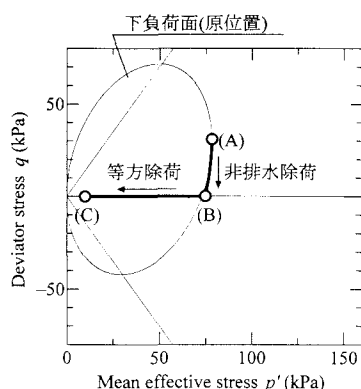


図 A-3 試料採取から標準圧密試験機設置までの経路
(等方応力条件による吸水除荷)

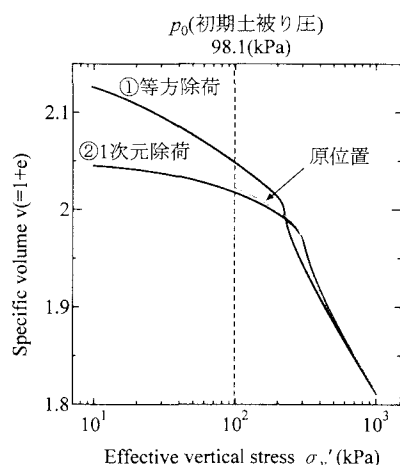


図 A-4 圧縮挙動の比較

骨格構造の乱れにより、サンプリング後の圧縮挙動は原位置の圧縮挙動とは異なるが、圧密降伏応力については、②一次元条件の場合、①等方条件に比べ原位置で得られる値に近い。①では、原位置に比べ小さな値となる。このことは、サンプリング後の吸水を許した応力開放過程では、圧密リングに供試体を設置した上で一次元的に除荷を与えると、室内試験でも原位置の見かけの OCR をよく再現できることを示唆している。

参考文献

- 1) 三村衛, 小田和広, 武田弘一, 山本浩司, 藤原照幸: 大阪湾擬似過圧密洪積粘土の圧縮特性と長期沈下について, 第46回地盤工学シンポジウム論文集, pp.99-102, 2001.
- 2) 李徳建, 澁谷啓, 三田地利之, 富田泰史: 人工的にセメンテーションを付加した粘性土の圧密及びせん断

- 挙動, 第38回地盤工学研究発表会, pp.591-592, 2003.
- 3) 土質工学用語辞典編集委員会: 土質工学用語辞典, 土質工学会, pp.40-41, 1985.
- 4) 日野剛徳, 根上武仁, 山寺彰, 西田耕一, 鶴田健太郎, 小柳晋太郎: 佐賀低平地における沖積粘土層の地盤特性に関する物理化学的考察, 有明粘土の建設分野における有効利用に関するフォーラム資料集, 佐賀大学, pp.5-11, 2001.
- 5) 日野剛徳, 三浦哲彦: 乱さない土の地盤工学的性質の検討における水銀圧入型ポロシメーターの利用, 講座「土の構造とメカニクス〜ミクロからマクロへ〜」, 土と基礎, Vol.50, No.5, pp.36-40, 2002.
- 6) 三笠正人: 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, Vol.12, No.4, pp.17-24, 1964.
- 7) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), pp.47-57, 2002.
- 8) Sekiguchi, H. and Ohta H.: 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, 1977.
- 9) Hashiguchi, K. and Chen, Z. -P.: Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* 22, pp.197-227, 1998.
- 10) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, 40(2), pp.99-110, 2000.
- 11) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, *Inter. Journal of Solids and Structures* 25, pp.917-945, 1989.
- 12) Green, A.E. and Naghdi, P.M.: A general theory of an elastic-plastic continuum, *Arch. Rat. Mech. and Anal.*, 18, pp.251-281, 1965.
- 13) Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. & Kaneda, K.: Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure, *S & F*, 40(3), pp.75-85, 2000.
- 14) Noda, T., Yamada, S. and Asaoka, A.: Elasto-plastic behavior of Naturally deposited clay with destruction and overconsolidation during/after sampling, *Soils and Foundations*, to be accepted., 2004.
- 15) 地盤工学会 土試験実習書編集委員会: 土質試験 - 基本と手引き -, 社団法人地盤工学会, pp.112, 2000.
- 16) Asaoka, A., Nakano, M., and Noda, T.: Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, 37(1), pp.13- 28, 1997.

(2004年4月16日受付)