

面積ひずみにもとづく状態境界面の概念の再考

福田文彦¹・三田地利之²・澁谷啓³

¹正会員 工修 北海道大学助手 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²フェロー会員 工博 北海道大学教授 同 (同)

³正会員 Ph. D. 工博 北海道大学助教授 同 (同)

再構成粘土の力学特性を調べる目的で一連の三軸圧縮試験を行った。実験は等方正規圧密および等方過圧密粘土の平均有効主応力一定排水せん断試験、等方正規圧密粘土の非排水せん断試験、等方応力とせん断応力が複合した載荷履歴を与えた粘土の平均有効主応力一定排水せん断試験から構成されている。これまで弾-塑性状態にある粘土の間隙比、平均有効主応力、主応力差の間には一義的な関係が存在すると考えられてきたが、実験からそのような関係を確認することはできなかった。一方、新たなひずみパラメータである σ_3 軸を法線とする面の面積ひずみと平均有効主応力および主応力差の間の一義的な関係が存在しており、この関係にもとづいて粘土のいくつかの力学特性が説明できることを示した。

Key Words: clay, consolidated drained shear, consolidated undrained shear, overconsolidation, stress history, stress-strain relation, triaxial test, void ratio, yielding

1. はじめに

(1) 状態境界面の概念

Roscoe¹⁾は、非可逆な塑性ひずみの発生が卓越する弾-塑性状態にある粘土の間隙比 e 、平均有効応力 $p'=(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')/3$ 、および主応力差 $q=\sigma_1'-\sigma_3'$ の間には一義的な関係が存在すると仮定した。言い換えれば、弾-塑性状態にある粘土の e の値は載荷履歴や有効応力経路、あるいは排水条件などには依存せず、 p' と q の値のみに依存すると仮定した。次にこれらの間の関係を、 e 、 p' 、 q を独立した座標軸に選んだ三次元空間の中の曲面として表し、この曲面を状態境界面と名付けた。そして状態境界面の外部を粘土が到達できない状態、状態境界面上を弾-塑性状態、状態境界面の内部を可逆的な弾性ひずみの発生が卓越する弾性状態と仮定することにより、粘土の降伏挙動や非排水せん断中の有効応力経路、排水せん断中の e の変化などの統一的な説明を行った。なお、状態境界面から弾-塑性論の降伏曲面を導き、適合条件と関連流れ則を適用することによってカムクレイモデル²⁾が導かれている。

(2) 状態境界面の概念の実験的な検討

状態境界面の概念の妥当性を実験的に検討したいいくつかの研究が行われているが、それらの結果を見る限り、この概念によって粘土の実際の挙動を十分

に説明することは難しいようである。例えば等方過圧密粘土の排水せん断特性に関する清水³⁾の研究から、状態境界面の概念によって等方過圧密粘土の降伏や降伏後の間隙比の変化を十分に説明できないことが明らかである。また正規圧密粘土の非排水および排水せん断特性に関するGens⁴⁾の研究によって、弾-塑性状態にある粘土の e が p' および q のみならずその応力状態に至るまでの有効応力経路にも依存することが明らかにされている。

状態境界面の概念は粘土の力学挙動を理解する上で基本になる概念であると考えられており、またカムクレイをはじめとする多くの構成モデルがその基礎をおいているにもかかわらず、上記のように粘土の実際の挙動を十分には説明できない。そこで本論文では、まず再構成粘土を試料とした一連の三軸圧縮試験結果を用いて、この概念を改めて詳細に検討している。その結果、 e と p' および q の間には状態境界面の概念の前提となる一義的な関係が必ずしも成立しないことを示している。次いで筆者らは、新たなひずみパラメータである面積ひずみと p' および q を座標軸とする空間の中に状態境界面に相当する境界面を考えることによって、粘土の降伏挙動などがよく説明できることを示した。

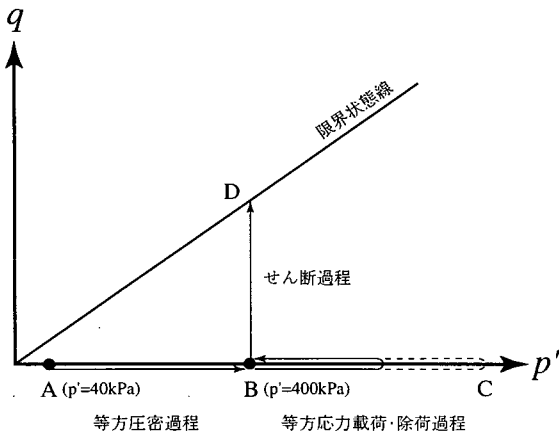
表-1 実験一覧

(a) IおよびU試験

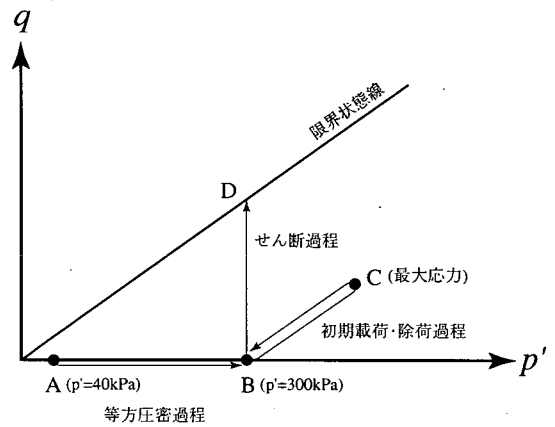
Test No.	圧密応力 (点B, 図-1(a)) (p' , kPa)	等方応力 載荷過程の 最大応力 (点C, 図-1(a)) (p' , kPa)	過圧密比	初期 間隙比
I - 1	400	500	1.25	1.31
I - 2		600	1.50	1.31
I - 3		700	1.75	1.28
I - 4		800	2.00	1.31
U		-----	1.00	1.31

(b) C試験

Test No.	圧密応力 (点B, 図-1(b)) (p' , kPa)	初期載荷過程の 最大応力 (点C, 図-1(b))		初期 間隙比
		p' (kPa)	q (kPa)	
C - M	300	-----	-----	1.28
C - 1		350	100	1.30
C - 2		350	200	1.31
C - 3		400	100	1.29
C - 4		400	200	1.34



(a) I試験



(b) C試験

図-1 各試験の有効応力経路

2. 三軸圧縮試験

表-1(a)(b)は行った実験の一覧であり、図-1(a)(b)は各実験の有効応力経路図である。実験U以外の全ての実験は応力制御による排水せん断試験であり、Uのみがひずみ制御による非排水せん断試験(U試験)である。また表-1(a)・図-1(a)にまとめたI試験は等方過圧密粘土(0. C. R.=1.0~2.0)の p' 一定排水せん断試験であり、表-1(b)・図-1(b)にまとめたC試験は p' と q が同時に変化する応力経路に沿って載荷履歴を与えた粘土の p' 一定排水せん断試験である。

(1) 試料・三軸試験機

試料は予圧密法によって作成したNSF-CLAY⁵⁾であ

る。この試料の物性値は $\rho_s=2.75\text{g/cm}^3$, $LL=55\%$, $I_p=23$, 粘土分の含有率100%であり、予圧密応力(鉛直応力)150kPa, 予圧密期間10日間, 予圧密終了点の平均含水比は46.7%であった。

三軸試験機は本体とコンピュータによる自動制御装置から構成される。供試体の寸法は高さ12cm, 直径5cmであり、供試体の上下両方の端部にはシリコングリースを塗布したメンブレインとテフロンシートを設置し、供試体内の応力とひずみの分布の同一性を向上させている⁶⁾。また供試体に載荷される軸力, セル圧, 背圧, および供試体の軸圧縮量と排水量をもとに応力とひずみの算出を行った。

(2) 等方過圧密粘土の p' 一定排水せん断試験(I試験)

実験I-Mは等方圧密(経路AB, 図-1(a))とせん断(経

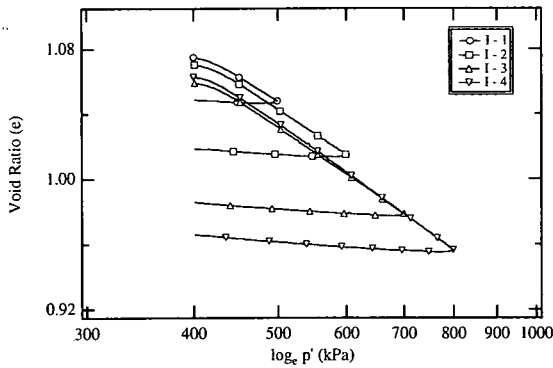


図-2 等方圧縮・膨張特性 (I試験)

路BD)の二つの載荷過程から構成されているのに対し、実験I-1~I-4は等方圧密(経路AB), 等方応力載荷・除荷(経路BCB), せん断(経路BD)の三つの過程から構成されており、各過程とも排水条件の下で載荷・除荷を行った。

等方圧密過程の圧密応力は400kPaであり、40kPaの初期等方応力状態から応力載荷速度 $\dot{p}=dp/dt=1.0$ kPa/minで載荷を行い、3t法によって圧密を打ち切った。等方応力載荷・除荷過程の応力は500~800kPaであり、 $\dot{p}=\pm 0.087$ kPa/minで載荷・除荷を行い、除荷終了点の p' は等方圧密過程終了点の p' と同じ400kPaである。せん断過程の p' は400kPaで一定であり、せん断応力の載荷速度($\dot{q}=dq/dt$)は0.087kPa/minである。供試体には200kPaの背圧を加えており、予備実験の結果によれば等方応力載荷・除荷過程とせん断過程で発生する過剰間隙水圧の最大値は1kPa未満であった。

(3) 等方正規圧密粘土の非排水せん断試験(U試験)

実験Uは応力制御による等方圧密過程とひずみ制御による非排水せん断過程から構成されている。等方圧密過程の圧密応力は400kPaである。また非排水せん断過程の拘束圧(全応力)は400kPaで一定であり、軸圧縮ひずみ速度は0.01%/minである。上記以外の実験条件はI試験と同一であり、供試体には200kPaの背圧を加えた。

(4) 複合載荷履歴を与えた粘土の p' 一定排水せん断試験(C試験)

実験C-Mは等方圧密(経路AB, 図-1(b))とせん断(経路BD)の二つの載荷過程から構成されているのに対し、実験C-1~C-4は等方圧密(経路AB), 初期載荷・除荷(経路BCB), せん断(経路BD)の三つの過程から構成されており、各過程とも排水条件の下で載荷・除荷を行った。

表-2 等方圧密過程終了点での間隙比(e_0), 圧縮指数(λ), 膨張指数(κ) (I試験)

Test No.	e_0	λ	κ
I-M	1.08	-----	-----
I-1	1.08	0.147	0.003
I-2	1.07	0.154	0.010
I-3	1.06	0.158	0.013
I-4	1.06	0.165	0.014
U	1.07	-----	-----
平均	1.07	0.155	0.010

等方圧密過程の圧密応力は300kPaである。初期載荷・除荷過程の有効応力経路と最大載荷応力($p' \cdot q$)は表-1(b)・図-1(b)にまとめた通りであり、応力の載荷・除荷の速度は $\sqrt{\dot{p}^2 + \dot{q}^2} = \pm 0.087$ kPa/minであり、除荷終了点の p' は等方圧密過程終了点の p' と同じ300kPaである。またせん断過程の p' は300kPaで常に一定である。上記以外の実験の諸条件はI試験と同一であり、供試体には200kPaの背圧を加えている。

3. 実験結果

(1) 等方応力載荷・除荷過程での $e - \log_e p'$ 関係

図-2はI試験の等方応力載荷・除荷過程(経路BCB, 図-1(a))における e と自然対数をとった p' の関係を示したものである。図-2の等方正規圧密線の初期部分には実験にかかわらず傾きの緩い部分が存在する。等方圧密過程では3t法によって圧密打ち切り時間を決定しているため、圧密圧力が規定の400kPaに到達して排水が収束した後も、しばらくの間、400kPaの応力状態が維持されることになる。一方、等方応力載荷・除荷過程では、過剰間隙水圧の発生がないような緩速($dp/dt=0.087$ kPa/min)で連続的に載荷しているため、一定応力が載荷されている時間の長さでみれば、等方圧密過程の400kPaのそれとは異なることになる。このことが、等方応力載荷過程の400kPa付近にのみ、傾きの緩い部分が生じた理由であると考えられる。表-2は等方圧密過程終了点(B点)における間隙比(e_0), 圧縮指数(λ), 膨張指数(κ)をまとめたものであり、それぞれの平均値は $e_0=1.07$, $\lambda=0.155$, $\kappa=0.01$ であった。圧密線の初期部分には傾きの緩い部分が存在するため、 p' の値が450kPaに達した点における p' および e の値と等方

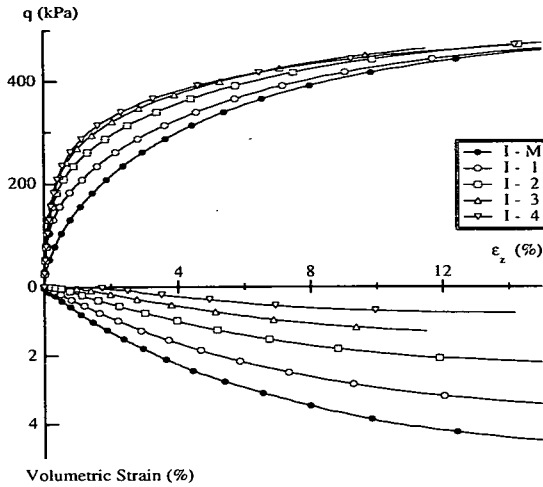


図-3 排水せん断特性 (I試験)

力載荷過程の終了点における p' および e の値を利用し λ を求めた。また図-2から等方膨潤線が曲線になることは明らかである。そこで膨潤線を除荷過程の開始点と終了点の二点を通る直線と仮定し κ を求めた。 λ , κ とも、等方応力載荷過程の最大載荷応力の増加に伴い、それぞれの値が増加する傾向が認められる。

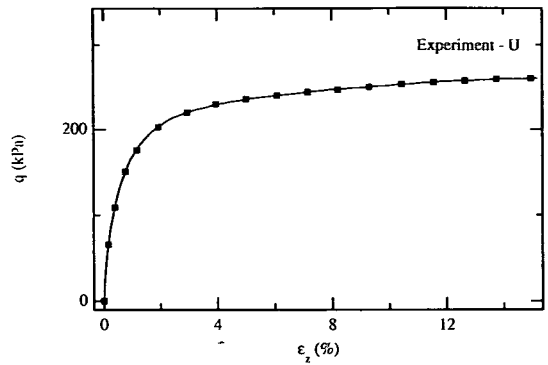
(2) せん断特性

図-3はI試験のせん断過程(経路BD, 図-1(a))における主応力差(q)-軸ひずみ(ϵ_x)関係, および体積ひずみ(v)-軸ひずみ(ϵ_x)関係である。過圧密比の増加に伴ってせん断中に発生する体積ひずみ(負のダイレンタンス)は減少している。図-4(a)はU試験のせん断過程における q - ϵ_x 関係であり, 図-4(b)は有効応力経路である。表-3はI, C, U試験のせん断過程において q が最大となった点における限界状態パラメータ $M(=q_f/p'_f)$ と同点の間隙比(e_f)をまとめたものであり, 载荷履歴にかかわらず M の値はほぼ一定である。なおI, C, Uの全ての試験においてひずみ軟化挙動は観察されなかった。

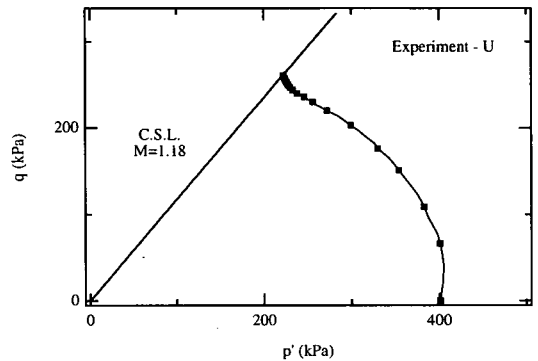
4. 間隙比と粘土の力学特性

(1) p' 一定条件下の間隙比の変化

図-5は p' - q - e 空間内におけるI試験の状態経路の模式図である。点 I_0 は等方圧密過程終了点(B点, 図-1(a)), 点 I_p は等方応力載荷過程終了点(C点), 点 I_u は除荷過程終了点(B点)に対応する状態点である。平面Pは $p'=400\text{kPa}$ の平面であり, p' が 400kPa であるI試



(a) 主応力差-軸ひずみ関係



(b) 有効応力経路

図-4 非排水せん断特性 (U試験)

表-3 強度特性

Test No.	限界状態 パラメータ M	破壊時の間隙比 e_f
I-M	1.19	0.98
I-1	1.20	0.97
I-2	1.22	0.97
I-3	1.16	0.96
I-4	1.17	0.95
C-M	1.21	1.06
C-1	1.21	1.05
C-2	1.22	1.06
C-3	1.22	1.04
C-4	1.19	1.06
U	1.18	1.07

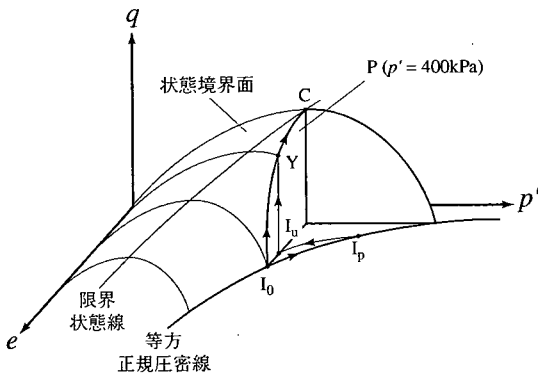
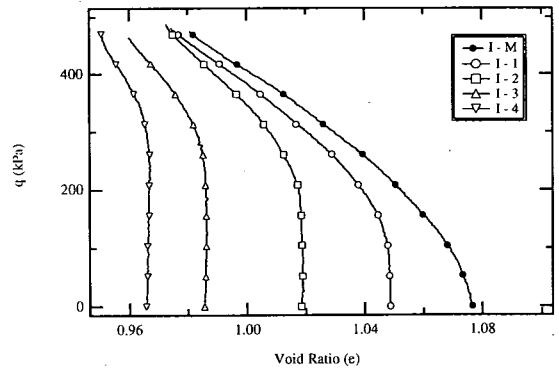


図-5 状態境界面とI試験の状態経路

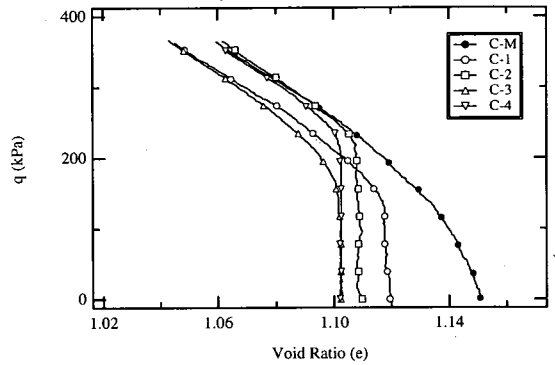
験のせん断過程(経路BD)の状態点はこの平面上のみを移動することになる。

ここで仮に状態境界面の概念によって粘土の e の変化が説明できると仮定すれば、実験I-Mのせん断過程の状態点は状態境界面と平面Pの交線(曲線 I_0YC , 図-5)上を進むことになる。また実験I-1~I-4のせん断過程の状態点はP面上の状態境界面(線)を表すことになる実験I-Mの状態経路に到達することになり(経路 I_0Y)、状態点が実験I-Mの状態経路に到達した点(点Y)が降伏点であり、降伏後の状態点は実験I-Mの状態経路上を進みながら限界状態¹⁾に至り(経路YC)、粘土試料の q と e は一定の値を示すことになる(点C)。図-6(a)は $q-e$ 平面に示したI試験のせん断過程の実際の状態経路である。実験I-1~I-4の状態点が実験I-Mの状態経路に到達することはなく、実験I-1~I-4の状態点が実験I-Mの状態経路上を進む挙動も認められず、経路終点における e の値は等方応力載荷過程の最大載荷応力(過圧密比)の増加に伴って減少している(e_r , 表-3)。

図-6(b)は p' が300kPaに固定されているC試験のせん断過程の $q-e$ 関係である。ここでも状態境界面の概念によって粘土の e の変化が説明できるとすれば、実験C-1~C-4の状態点もまた実験C-Mの状態経路に必ず到達することになり、到達後の状態点は実験C-Mの状態経路上を進むことになり、限界状態に至った試料は一定の q と e の値を示すことになる。それに対し図-6(b)に示した実際のC試験の状態経路は、初期載荷・除荷過程とせん断過程の有効応力経路が最も近接している実験C-2(図-1(b)・表-1(b))を除き、そのような挙動を示していない。また初期載荷過程で載荷する q の最大値が200kPaである実験C-2・C-4の破壊点における e の値は実験C-Mの値とほぼ一致するものの、初期載荷過程の q の最大値が100kPaである実験C-1・C-3の e の値は実験C-Mの値と



(a) I試験



(b) C試験

図-6 せん断過程の間隙比の変化

一致していない(e_r , 表-3)。

(2) q, p' ともに変化する載荷条件下の間隙比変化

a) 等価圧密応力と有効応力経路

Burland⁷⁾は、弾-塑性状態にある粘土の e が p' および q のみに依存するとすれば、弾-塑性状態にある粘土の任意の有効応力経路を等価圧密応力(p_e')で正規化することにより、正規化前の応力経路には依存しない一本の曲線が得られることを示した。

等価圧密応力(p_e')とは e に対応する等方正規圧密応力である。弾-塑性状態にある粘土の等方正規圧密中における e と p' の関係は式(1)によって表せることから、

$$e = e_0 - \lambda \log_e \frac{p'}{p_0'} \quad (1)$$

式(2)によって p_e' が求められる。

$$p'_c = p'_0 \exp\left(\frac{e_0 - e}{\lambda}\right) \quad (2)$$

式(1)および(2)において p'_0 および e_0 は等方正規圧密線
上の任意の点に設定することができる基準状態の
 p' と e であり、 λ は e - $\log_e p'$ 面上における等方正規圧
密線の傾きである。

b) q - p' 面と e - p' 面上の状態経路

図-7(a)は圧密応力が異なる等方正規圧密粘土の
非排水せん断試験の有効応力経路群と p' 一定排水せん
断試験の有効応力経路を示した模式図であり、図
-7(b)は各々の e - p' 面上の経路を示した模式図であ
る。 q - p' 面および e - p' 面上の経路は p' - q - e 空間内の状
態経路を各々の面に投影したものに相当する。図-
7(a)上の点 a_i は圧密応力が p'_i である非排水試験の応
力経路 $I_i F_i$ と p' 一定排水試験の応力経路 $I_i F_n$ の交点で
あり、図-7(b)上の点 a'_i は非排水経路 $I_i' F_i'$ と排水
経路 $I_i' F_n'$ の交点である。点 a_i に対応する非排水試験の
 e - p' 面上の状態点は常に点 a'_i に位置するのに対し、
点 a_i に対応する排水試験の e - p' 面上の状態点は $I_i' F_n'$
上のいずれかの点に位置することになる。

c) 等方圧密応力と等価圧密応力

ここで弾-塑性状態にある粘土の e が p' および q の
みに依存すると仮定すれば、点 a_i に対応する排水試験
の e - p' 面上の状態点もまた点 a'_i に位置することにな
り、点 a_i に対応する非排水試験の等方圧密応力 p'_i
と点 a_i に対応する排水試験の等価圧密応力 $p_{e,i}$ が一致
することになる。同様にして図-7(a)上の点 a_i 以外の
応力経路の交点においても非排水試験の等方圧密応力
と排水試験の等価圧密応力が一致することになり、
等方正規圧密粘土の非排水せん断試験の応力経
路を圧密圧力で正規化することにより圧密圧力には
依存しない一本の応力経路が得られることから、排
水せん断試験の応力経路を等価圧密応力で正規化す
ることにより、圧密圧力で正規化した非排水せん断
試験の応力経路と一致する一本の応力経路が得られ
ることになる。

d) q , p' ともに変化する荷荷条件下の間隙比変化

図-8は等方圧密過程を経て弾-塑性状態になった
試料に対して最初の荷荷が行われる実験C-Mのせん
断過程、実験C-1~C-4の初期荷荷過程、および実験U
のせん断過程の有効応力経路を p'_e により正規化した
ものである。図-1(b)・表-1(b)および図-4(b)に示
したとおり、実験C-1~C-4の初期荷荷過程と実験Uの
せん断過程では、 q , p' ともに変化する有効応力経路
に沿って荷荷が行われている。したがって、図-6は
 p' 一定条件下における e と q の関係であるのに対し、
図-8の p'_e で正規化した有効応力経路により e と p' お

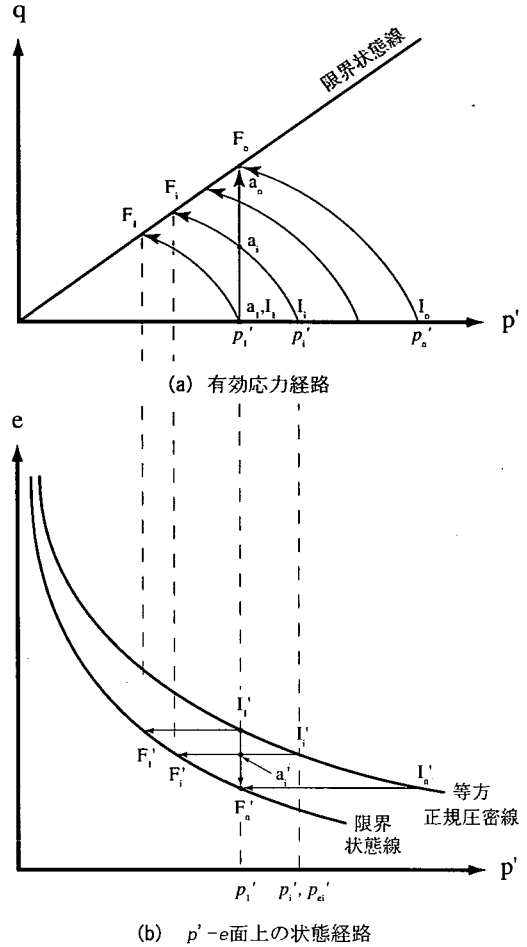


図-7 状態経路の二次元表示

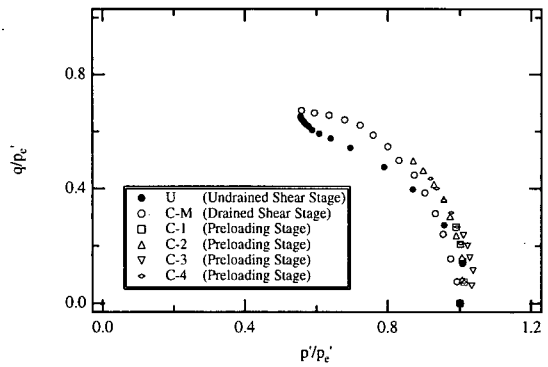
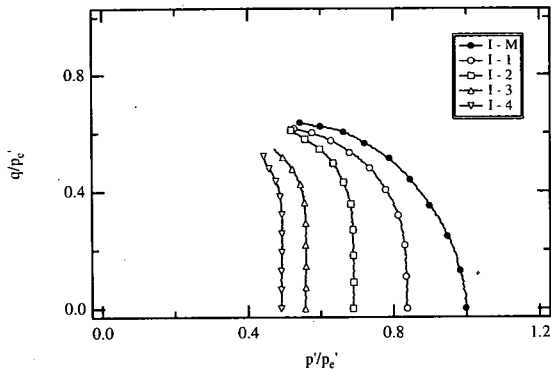
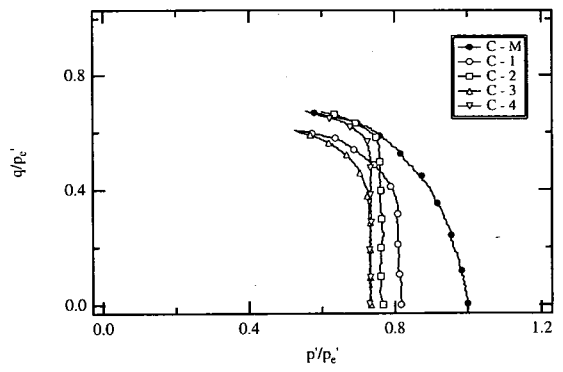


図-8 等価圧密応力(p'_e)で正規化した有効応力経路
(実験U・C-Mのせん断過程、
実験C-1~C-4の初期荷荷過程)



(a) I試験



(b) C試験

図-9 等価圧密応力 (p'_c) で正規化された有効応力経路 (実験I・Cのせん断過程)

よび q 三者の関係が調べられることになる。図-8において有効応力経路が一本の曲線にならないことから、 e が p' および q によって一義的に決まるとは言い難い。

図-9(a) は I 試験のせん断過程の p'_c により正規化した有効応力経路であり、図-9(b) は C 試験についてのものである。図-6と同様に、図-9もまた状態境界面の概念によって載荷履歴を受けた粘土の降伏挙動や間隙比の変化が説明できないことを示している。

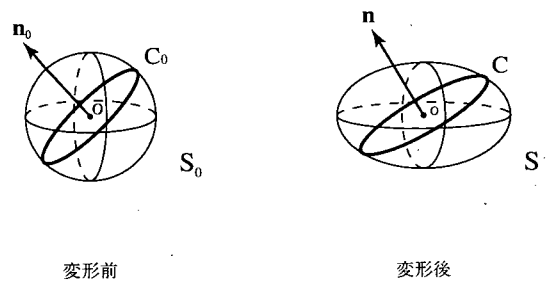


図-10 ひずみ楕円体と面積ひずみ

5. 面積ひずみと粘土の変形挙動

4. に示した実験結果から $e-p'-q$ 空間における状態境界面の概念によって粘土の変形挙動を十分には説明できないことが明らかである。そこで筆者らは e に代わるパラメータとして面積ひずみを導入し状態境界面の概念の再検討を行った。

(1) 面積ひずみ

図-10はひずみ楕円体を利用して面積ひずみ(例えば文献⁸⁾)の概念とその特性を説明したものである。変形前の物体内に図-10に示す微小球 S_0 を設定したとすれば、変形によって微小球 S_0 は楕円体 S に変換され、 S_0 の中心 O を通る切断円 C_0 は S の中心 O を通る楕円 C に変換される。ここで面 C_0 を基準にした面 C の面積ひずみ ω を式(3)によって定義する。

$$\omega = \frac{da_0 - da}{da_0} \quad (3)$$

da は面 C の面積、 da_0 は面 C_0 の面積である。面積ひずみは、 S_0 から S への変換を定めるひずみテンソルの他に、図-10の法線ベクトル n_0 あるいは n によって示さ

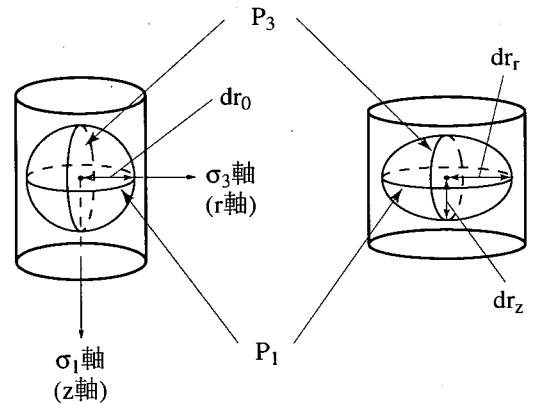


図-11 変形前・後の三軸供試体

れる面 C_0 あるいは C の向きにも依存することになり、ひずみ誘導異方性を示すことになる。

図-11は変形前・後の三軸供試体である。変形が微小であり、図-11の $z-r$ 座標系を利用してひずみを測定したとすれば、体積ひずみ (v) は

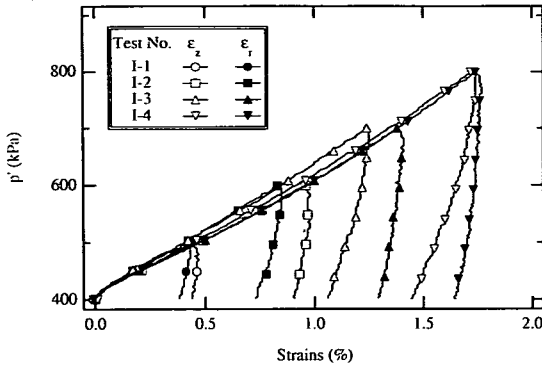


図-12 等方応力載荷・除荷過程における軸方向(ε_z)および半径方向(ε_r)の直ひずみ挙動 (I試験)

$$v = \frac{\pi dr_0^3 - \pi dr_z dr_r^2}{\pi dr_0^3} \quad (4)$$

$$= 1 - (1 - \varepsilon_z)(1 - \varepsilon_r)^2 \cong \varepsilon_z + 2\varepsilon_r$$

によって求められる。 dr_0 は変形前の三軸供試体の内部に設定された微小球の半径であり、 dr_z は変形後の微小球の z 軸方向の半径、 dr_r は r 軸方向の半径である。一方、 σ_1 軸を法線とする面 (P_1 、図-11) の面積ひずみ (ω_1) は

$$\omega_1 = \frac{\pi dr_0^2 - \pi dr_r^2}{\pi dr_0^2} \quad (5)$$

$$= 1 - (1 - \varepsilon_r)^2 \cong 2\varepsilon_r$$

によって求められ、 σ_3 軸を法線とする面 (P_3) の面積ひずみ (ω_3) は

$$\omega_3 = \frac{\pi dr_0^2 - \pi dr_z dr_r}{\pi dr_0^2} \quad (6)$$

$$= 1 - (1 - \varepsilon_z)(1 - \varepsilon_r) \cong \varepsilon_z + \varepsilon_r$$

によって求められる。

(2) 等方応力載荷・除荷過程の面積ひずみ挙動

図-12は実験I-1～I-4の等方応力載荷・除荷過程における p' - ε_z 、 ε_r 関係である。等方圧密過程(経路AB、図-1(a))を経ることによって試料の変形特性が等方性を示すようになるとすれば、等方応力載荷・除荷過程(経路BCB)の ε_z と ε_r の挙動は一致する。図において載荷・除荷過程で載荷する p' の値が最も大きい実験I-4の等方応力載荷中の ε_z と ε_r の挙動はほぼ一致し

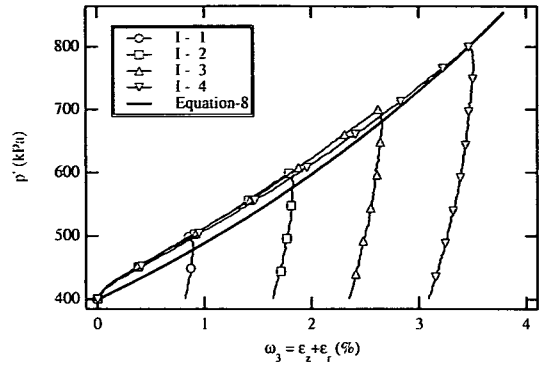


図-13 等方応力載荷・除荷過程における面積ひずみ (ω_3) 挙動 (I試験)

ている。しかしI-2・I-3の載荷中における ε_z と ε_r の挙動は一致していない。また実験にかかわらず除荷中の二つのひずみの挙動は一致しない。式(7)は二つのひずみの挙動が一致する場合の ω と e の関係式であり、

$$\omega_1 = \omega_3 = \frac{2}{3} v = \frac{2(e_0 - e)}{3(e_0 + 1)} \quad (7)$$

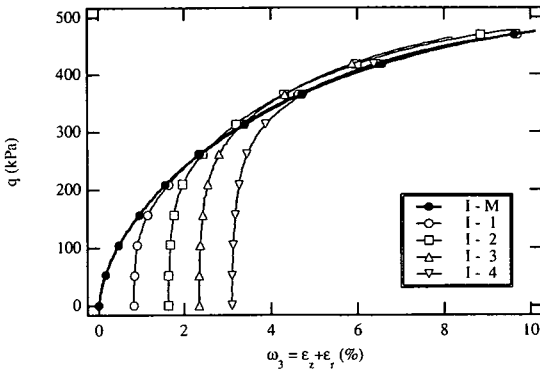
式(1)および式(7)から弾-塑性状態にある粘土の等方圧縮中の p' - ω 関係は次のように表される。

$$\omega_1 = \omega_3 = \frac{2\lambda}{3(e_0 + 1)} \log_e \frac{p'}{p'_0} \quad (8)$$

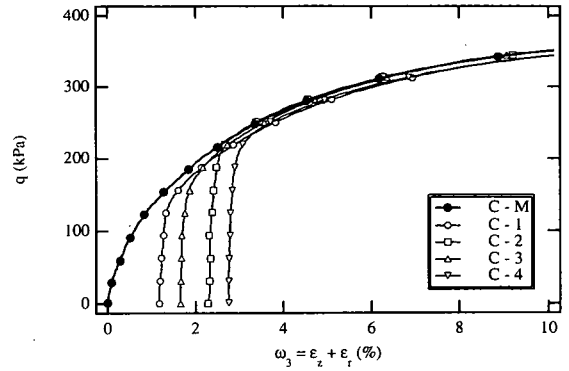
図-13は等方応力載荷・除荷過程における p' - ω_3 関係であり、図中の実線は表-2に示した $\lambda \cdot e_0$ の平均値を使用し式(8)から求めた p' - ω_3 関係である。図-12に示したとおり等方応力載荷過程における実験I-2・I-3の ε_z と ε_r の挙動は一致していない。しかしこれらも含め等方応力載荷過程の ω - p' 関係が式(8)によって比較的よく定式化できるようである。

(3) p' 一定条件下の面積ひずみ挙動

図-14(a)はI試験のせん断過程の q - ω_3 関係である。 $\omega_3=0\%$ の点は等方圧密過程終了点(点B、図-1(a))であり、実験I-1～I-4に対するせん断開始点のひずみは除荷過程(経路BCB、図-1(a))の終了点での非可逆ひずみに相当する。図-14(a)において実験I-1～I-4の各々の経路は実験I-Mの経路に到達しており、到達後の経路と実験I-Mの経路はほぼ一致している。図-14(b)はC試験のせん断過程における q - ω_3 関係である。図-14(b)の $\omega_3=0\%$ の点もまた等方圧密過程終了点であり、実験C-1～C-4の経路は実験C-Mの



(a) I試験



(b) C試験

図-14 せん断過程における面積ひずみの(ω_3)挙動

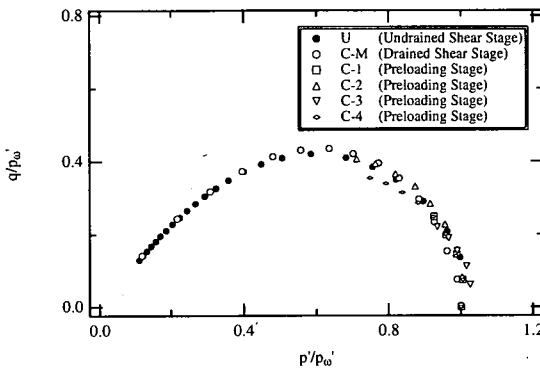


図-15 等価圧密応力(p'_{w0})で正規化した有効応力経路
(U・C-M試験のせん断過程,
C-1~C-4試験の初期荷重過程)

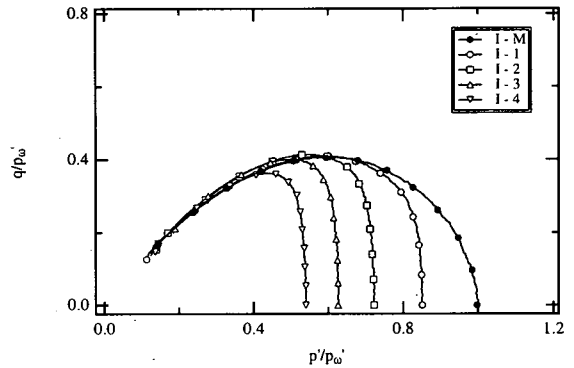
経路に到達し、到達後の経路と実験C-Mの経路はおおよそ一致している。なお、 q と ε_z 、 ε_r 、および ω_3 の関係についても検討を行ったが、図-14と同様な挙動を観察することはできなかった。

(4) q 、 p' ともに変化する荷重条件下の面積ひずみ挙動

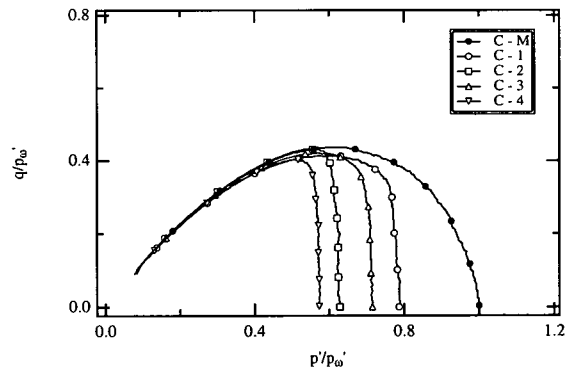
e に対応する等方正規圧密応力として等価圧密応力(p'_w)が定義されたのと同様に、 ω_3 に対応する等方正規圧密応力として新たな等価圧密圧力(p'_w)を定義する。弾-塑性状態にある再構成粘土の等方圧密中の p' - ω_3 関係は式(8)によって表せることから、式(9)によって p'_w が求められる。

$$p'_w = p'_0 \exp\left\{\frac{3(e_0 + 1)}{2\lambda} \omega_3\right\} \quad (9)$$

4. (2)の議論から、弾-塑性状態にある粘土の ω_3 が p' と q のみに依存するとすれば、任意の有効応力経路



(a) I試験



(b) C試験

図-16 等価圧密応力(p'_{w0})で正規化された有効応力経路 (I・C試験のせん断過程)

を p'_{w0} で正規化することにより、正規化前の応力経路には依存しない一本の曲線が得られることになる。

図-15は実験C-Mのせん断過程、実験C-1~C-4の初期荷重過程、および実験Uのせん断過程について、それぞれ p'_{w0} により正規化した有効応力経路である。図

-15において各々の応力経路が完全に一致するとは言い難いものの、 p_e' により正規化した有効応力経路(図-8)と較べれば、そのばらつきは小さなものとなっている。

図-16(a)はI試験のせん断過程についての p_{0v}' による正規化有効応力経路であり、図-16(b)はC試験についてのものである。図-15と図-16、あるいは図-15と図-14は、弾-塑性状態にある粘土の ω_3 が p' と q によって一義的に決まることを示しており、 ω_3 - p' - q 空間内に状態境界面に相当する境界面を考えることによって、粘土の降伏挙動や ω_3 の変化を統一的に説明できることを示している。

6. 結 論

再構成粘土を試料とした一連の三軸圧縮試験を行い以下の結論を得た。

- 1) 弾-塑性状態にある粘土の e が p' および q のみに依存することを前提とした状態境界面の概念によって、粘土の降伏挙動や、排水せん断中の間隙比の変化、あるいは非排水せん断中の有効応力経路を説明することは難しい。
- 2) 弾-塑性状態にある粘土の面積ひずみ(ω_3)と p' および q の間に一義的な関係が存在する。
- 3) ω_3 と p' および q を座標軸とする空間内に状態境界面に相当する境界面を考えることにより、粘土の降伏挙動や ω_3 の変化を統一的に説明することができる。

粘土の降伏挙動の説明手段として面積ひずみ ω_3 の有効性を示したが、本研究における実験データは軸対称三軸圧縮条件に限られている。今後の課題として、初期載荷過程とせん断過程における主応力軸方向が異なる場合など、一般的な条件下での ω_3 の有効性の検証が必要である。

謝辞：この研究の実験を行うにあたり、元本学大学院生藤原かさね君の助力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Roscoe, K. H., Schofield, M. A. & Wroth, C. P.: On the yielding of soils., *Géotechnique*, Vol.8, No.1, pp.22-53, 1958.
- 2) Schofield, A. N. & Wroth, C. P. : Critical State Soil Mechanics., McGraw-Hill, 1968.
- 3) Shimizu M.: Effect of overconsolidation on dilatancy of a cohesive soil., *S & F*, Vol.22, No.4, pp.121-135, 1982.
- 4) Gens, A.: A state boundary surface for soils not obeying Rendulic's principle., *Proc. 11th ICSMFE*, Vol.2, pp.473-476, 1985.
- 5) Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. & Degoshi, T.: Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay., *Geotechnical Testing J.*, Vol.18, No.3, pp.365-375, 1995.
- 6) Bishop, A. M. & Green, G. E.: The influence of end restraint on the compressional strength of a cohesionless soil., *Géotechnique*, Vol.15, No.3, pp.243-266, 1965.
- 7) Burland, J. B.: The yielding and dilation of clay., *Correspondence*, *Géotechnique*, Vol.15, No.1, pp.211-214, 1965.
- 8) Л. И. Седов: 連続体力学, 大橋義夫訳, 培風館, 1970.

(2001. 3. 16 受付)

RECONSIDERATION OF THE STATE BOUNDARY SURFACE BASED ON AREAL STRAIN

Fumihiko FUKUDA, Toshiyuki MITACHI and Satoru SHIBUYA

A series of triaxial compression test was conducted to examine characteristics in mechanical behaviour of reconstituted clay. The drained shearing under conditions of constant mean effective stress was applied to samples subjected to isotropic over-consolidation history resulting in the O.C.R. ranging from 0 to 2, and also to samples experienced by drained pre-shearing histories. An undrained test on isotropic normally consolidated sample was also conducted. It is clearly demonstrated that the void ratio was not the unique function of the mean effective stress and principal stress difference. Alternatively, a newly proposed strain parameter; *i.e.*, areal strain on the plane being normal to σ_3 -axis, is the unique function of these stress parameters.