

練り返し飽和粘土の小ひずみ域における 変形係数の定式化

川口貴之¹・三田地利之²・澁谷啓³

¹正会員 工修 函館工業高等専門学校助手 環境都市工学科（〒042-8501 函館市戸倉町14番1号）

²フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）

³正会員 Ph.D. 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）

小ひずみ域において粘性土が弾塑性的な挙動を示す領域での変形係数を擬似弾性変形係数と定義し、圧密履歴、排水クリープ、載荷モード等の変形係数に及ぼすいくつかの要因について室内再構成粘土を用いて検討した。実験結果から得られた等方圧密・膨張時の $e \sim \ln p'$ 関係を用いて、これら諸要因の影響を考慮した擬似弾性変形係数の定式化を試み、これによって実験結果をよく説明し得ることを示した。

Key Words : small strain range, modulus of deformation, drained creep, consolidation stress history, loading condition

1. はじめに

近年、長大橋の基礎、大規模・大深度掘削、近接施工時における地盤の変形や構造物の変位が問題となることが多くなり、その際に地盤内で発生するひずみが1%以下（硬質地盤では0.1%以下）であること¹⁾から地盤材料の小ひずみ域における変形特性を把握する必要性が高まっている。

また、ここ十数年における測定機器・室内土質試験技術の向上に伴って、0.001%程度以下の微小ひずみレベルでは地盤材料によらず弾塑性的な挙動を示すことが報告され²⁾、原位置弹性波速度探査等の原位置試験や繰返し・単調載荷試験といった室内試験から得られる地盤のヤング率やせん断剛性率が解析における材料定数として用いられることも多くなつた。しかし、室内試験結果を用いる場合、厳密には排水条件や載荷速度、応力状態等、原位置との条件の違いを考慮しなければならない。

そこで、本研究では履歴や時間依存性の影響が大きい粘性土に対象を絞り、変形係数に及ぼすと考えられるいくつかの要因について検討し、定式化を試みている。また、原地盤挙動を理解する上で一つの足がかりとして室内再構成試料の圧密・せん断特性に及ぼす

排水クリープの影響についても考慮している。

なお、本研究ではこれらの影響を的確に把握することを目的として再現性の高い室内再構成（練り返し）試料を用いている。また、本研究における実験はすべて非排水三軸試験で行ったため、得られる変形係数は非排水条件下におけるヤング率に相当し、本研究ではこれを擬似弾性変形係数と呼んでいる。

2. 試料および試験方法

(1) 試料

本研究では、市販のNSF粘土³⁾を用いている。供試体は粉末乾燥状態にあるNSF粘土に液性限界の2倍程度になるよう蒸留水を加えて十分に攪拌し、真空に近い状態に保った予圧密セル内で十分に脱気した後、鉛直応力150kPaで一次元圧密したものを用いた。

本研究では均質な供試体を数多く得る目的で予圧密試料を用いたが、実際には各供試体の初期含水比にバラツキが生じている。これは一度の予圧密において7つの供試体が作成されるが、本研究で行った実験はこの数をはるかに超えるため、数回にわたる予圧密を行ったことや、予圧密セル内の含水比分布が必ずしも一様でないことによる。本研究に用いた供試体において、

表-1 試料の基本性質

	NSF 粘土	藤の森粘土
液性限界 $w_L(\%)$	55	62
塑性指数 I_p	26	33
土粒子密度 (g/cm^3)	2.78	2.69
粘土分 (%)	99	43
限界状態係数 $M(=q_u/p'_d)$	1.20	1.34

初期含水比は 47.4~49.7%，初期間隙比は 1.34~1.41 の範囲にある。

この試料の基本物性を表-1 に示す。なお、本研究の一部では試料の違いについて検討するために藤の森粘土を用いており、これについても表-1 に示している。また、藤の森粘土の供試体については鉛直応力 70kPa で一次元圧密したものを用いた。

(2) 実験装置

本研究におけるすべての実験は高精度デジタルサーボモーターを用いた三軸試験装置⁹⁾によるもので、データの収録および制御はすべてパーソナルコンピューターによって自動化されている。本試験装置は RS232C 回線を通じてモーターを稼動させ、これに接続されたスプラインボールネジによって軸方向変位に変換している。これにより、最小分解能 $1.53 \times 10^{-7} mm$ で制御することが可能であり、受信したモーターのパルス数によって軸方向変位を計測している。なお、供試体直上部の変位を非接触型変位計によって計測することによって、本研究で対象としている小ひずみ域における荷重計等の圧縮量（システムコンプライアンス）の影響はほとんど無視でき、本測定方法による軸変位が精確であることをあらかじめ確認している。また、軸力についてもセル内の荷重計および高性能ストレインアンプによって最小分解能 0.04N での測定が可能であるため、高精度な応力～ひずみ関係を得ることができる。さらに、圧縮・伸張方向にそれぞれ最大約 17mm の軸変位を連続的に与えることが可能であり、載荷方向反転時のバックラッシュも小さい。また、載荷速度についても 2.81×10^{-4} ~ $2.81 \times 10^{-1} mm/sec$ の範囲で設定可能であるため、繰返しや単調載荷などの様々な載荷試験を実施することができる。

(3) 実験方法

直径 5cm、高さ 10cm に整形した供試体を三軸セル内にセットした後、供試体周辺の余分な水を排除するために 40kPa で初期等方圧密を行っている（藤の森粘

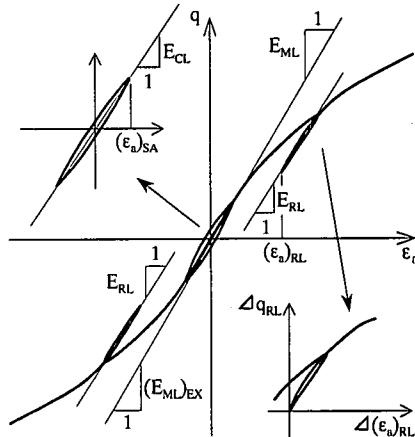


図-1 摂似弾性変形係数の定義

土は 30kPa）。また、飽和度を高めるために 200kPa の背圧を加えている。B 値を測定した実験（3 章(2)節に示している実験以外全て）については、全て 0.95 以上であることを確認している。

圧密時の排水は供試体周面に巻いたろ紙によって半径方向に行われて上部キャップ側に集水され、供試体下部で間隙水圧を測定している。圧密過程ではその応力条件（等方、異方、 K_0 ）によらず、所定の応力まで軸応力増加速度 0.5kPa/min で漸増載荷（膨張時は 1.0kPa/min）している。なお、本研究では小ひずみ領域における変形係数を対象としているため、供試体上下端面に摩擦除去のためのテフロンシート等は一切敷いていない。その他の圧密条件およびせん断条件については後述する。

3. 摂似弾性変形係数に及ぼす諸要因の検討

(1) 摂似弾性変形係数の定義

本研究では弾性的な挙動を示す領域での変形係数を載荷方法の違いによって図-1 のように区別し、これらを総称して摂似弾性変形係数と定義した。

E_{ML} は単調載荷時の偏差応力 $q(=\sigma'_1 - \sigma'_3)$ と軸ひずみ ϵ_a の関係において、 $\epsilon_a \leq 0.005\%$ での線形近似線の傾きとし、 E_{CL} は片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_SA$ を 0.005%とした繰返し載荷試験から得られた q - ϵ_a 関係の頂点を結ぶ傾きとした。また、 E_{RL} については単調載荷中の所定の軸ひずみ $(\epsilon_a)_RL$ において、0.005%の除荷・再載荷を行った際の再載荷時の偏差応力増分 Δq_{RL} と軸ひずみ増分 $\Delta(\epsilon_a)_RL$ の関係における $\Delta(\epsilon_a)_RL \leq 0.001\%$ での線形近似線の傾きとした。また、伸張試験から得られた E_{ML} は特に $(E_{ML})_{EX}$ とし、圧縮試験結果と区別している。ここで、変形係

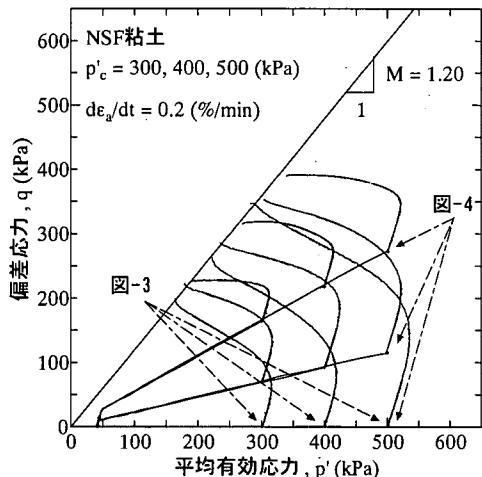


図-2 所定の平均有効応力まで応力比一定で圧密を行った実験の応力経路図

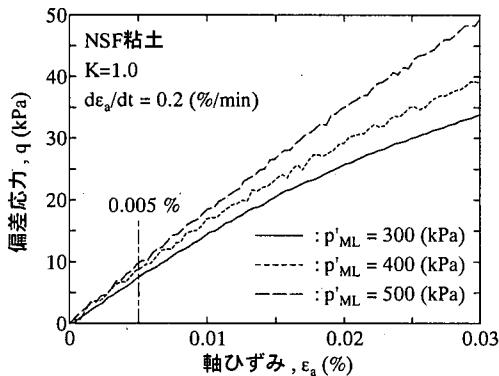


図-3 異なる p'_M における $q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

数を算出したひずみ領域については、測定するひずみおよび軸応力の分解能、採取可能なデータ数、さらには十分に線形性を保持していることを考慮して決定している。また、原位置弾性波速度探査等によって得られる変形係数は 10^6 程度のひずみ領域における値であることが報告されており、本研究にて変形係数を算出しているひずみ領域は 10^5 程度であることから“擬似”という接頭語を付している。

なお、異方および K_0 圧密後の E_{ML} については圧密終了時の応力点からの偏差応力増分 $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係から求めている。また、擬似弾性変形係数を測定した時点での平均有効応力 $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ 、間隙比 e を表す際には、それぞれに該当する添え字を付けて表記している。

(2) 圧密履歴の影響

粘性土の変形挙動は載荷開始時の応力状態（等方、異方、 K_0 圧密）の違いや正規・過圧密の違いによって

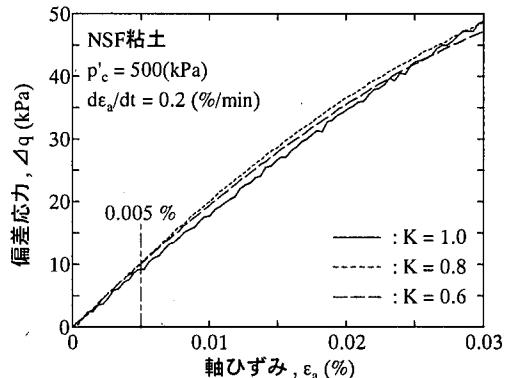


図-4 異なる K 値における $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

大きく左右される。そこで、このような様々な圧密履歴を与えた後に同条件の単調載荷試験を行い、それらが擬似弾性変形係数に及ぼす影響について検討した。

まず、圧密応力の大きさおよび異方圧密履歴の影響について検討するため、所定の平均有効応力 ($p'_c = 300, 400, 500$ kPa) まで応力比一定 ($K = \sigma'_3/\sigma'_{1c} = 1.0, 0.8, 0.6$) で圧密を行う計 9 本の実験を行った。図-2 はこれらの実験結果における応力経路である。

図-3 は等方圧密 ($K=1.0$) 供試体の E_{ML} に及ぼす単調載荷開始時の平均有効応力 p'_{ML} ($=p'_c$) の違いを比較している。 E_{ML} は p'_{ML} とともに大きくなっているが、応力比の異なる実験結果についても同様であった。

図-4 は p'_{ML} が等しいものに対して応力比の違いを比較しており、 E_{ML} は p'_{ML} が等しければ応力比にほとんど影響しないことが分かる。これに関しても、異なる p'_{ML} ($=300, 400$ kPa) で同様の結果が得られた。龍岡らは豊浦砂を用いた繰返し中空ねじり試験⁵⁾、更には kaolin 粘土を用いた三軸試験²⁾において、ここで検討している応力比の範囲では同様な結果を報告している。また、上野・プラダン⁶⁾は東京湾海成粘土を用いた繰返し三軸試験において、同じ p' まで等方、異方圧密した場合の変形係数は、異方圧密状態における値が若干大きいものの変形係数は p' に大きく依存し、応力比の影響は小さいことを報告している。

次に、過圧密履歴の影響について検討するため、同じ鉛直応力 ($\sigma'_{vc} = 400$ kPa) まで K_0 圧密し、所定の過圧密比 ($OCR = 1, 1.25, 2, 4, 8$) まで K_0 膨張させる実験を行った。図-5 はこれらの実験における応力経路である。なお、 K_0 正規圧密終了時の応力比はすべての実験において 0.57~0.58 の範囲にあり、 K_0 膨張終了時の応力比は過圧密比 ($OCR = 1.25, 2, 4, 8$) の順に 0.66, 0.79, 0.99, 1.17 であった。

図-6 はこれらの実験における小ひずみ領域での

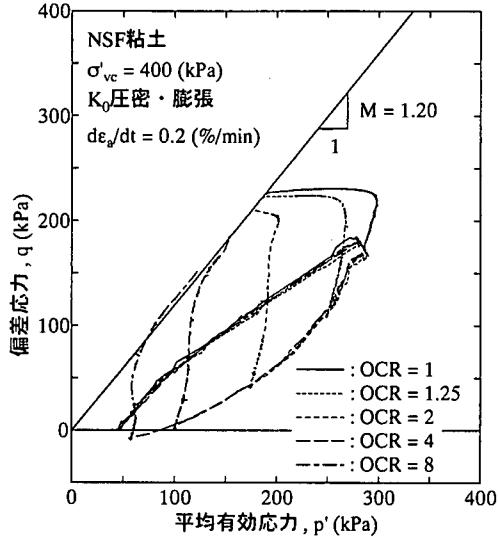


図-5 同じ鉛直応力まで K_0 压密した後、所定の過圧密比まで K_0 膨張させた実験の応力経路図

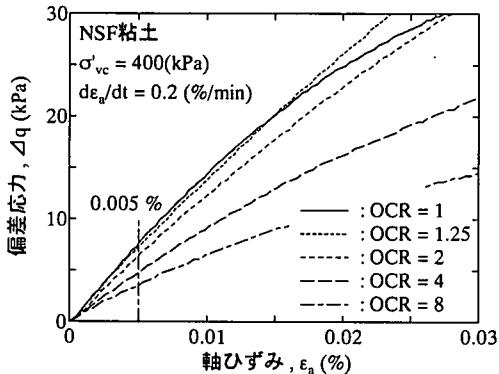


図-6 異なる過圧密比における $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

$\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係を比較したものである。 E_{ML} は過圧密比の増加につれて減少しており、これは過圧密比が大きいほど p'_{ML} が小さくなっていることに起因していると思われる。

図-7 は図-6 に示した OCR=2 の実験結果における p'_{ML} に等しくなるよう等方圧密ならびに K_0 正規圧密を行った実験の応力経路である。なお、図中には OCR=2 の実験結果も示している。

図-8 はこれらの実験における小ひずみ領域での $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係を比較したものであり、先に示した図も含めて考えると、正規圧密状態における E_{ML} は p'_{ML} が等しければ等方、異方、 K_0 といった圧密方法にはほぼよらないこと、同じ p'_{ML} における E_{ML} については過圧密状態にある方が大きいことが分かる。

図-9 はここで示した全ての実験結果における

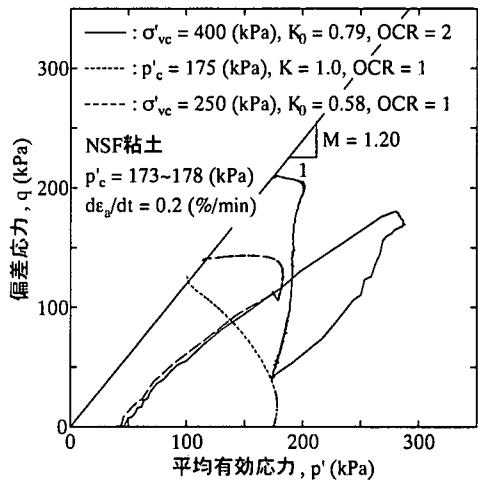


図-7 OCR=2 の実験結果における p'_{ML} に等しくなるよう等方、 K_0 压密を行った実験の応力経路図

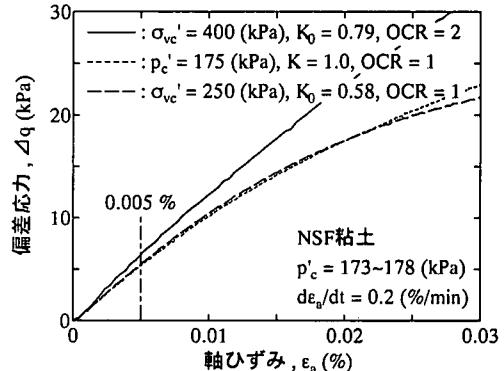


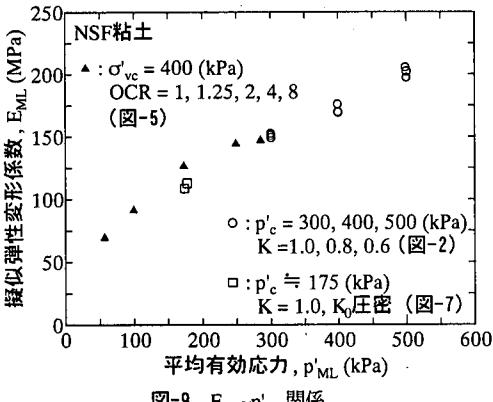
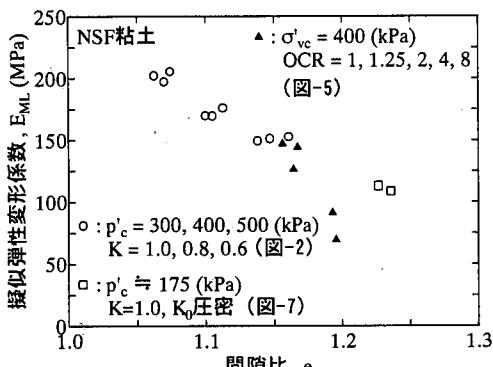
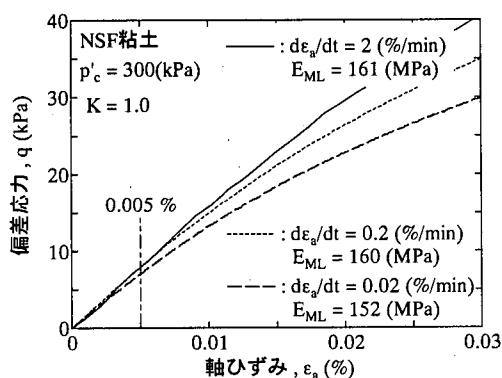
図-8 異なる圧密方法における $\Delta q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

$E_{ML} \sim p'_{ML}$ 関係をまとめたものであり、図-10 は $E_{ML} \sim e_{ML}$ 関係である。正規圧密状態での E_{ML} は p'_{ML} 、 e_{ML} に対してそれぞれ一義的な関係にあることが分かる。一方、過圧密状態ではそれぞれ先行圧密応力に相当する値を起点に正規圧密状態の関係とは異なる挙動を示している。特に図-10においては両者の違いが大きく、過圧密状態時の E_{ML} は e_{ML} のわずかな増加に対して大きく減少している。

(3) 載荷モードの影響

近年の研究において、微小ひずみレベルでの擬似弾性変形係数は単調載荷と繰返し載荷の違いや、載荷周波数、ひずみ速度の違い等の載荷方法によらないことが示されている^{3), 7), 8), 9)}。

図-11 は異なるひずみ速度で単調載荷を行った際の $q \sim \epsilon_a$ 関係の比較である。ひずみ速度の減少に伴い、彈性的な挙動を示す領域が縮小している^{9), 10), 11)}。そこで、

図-9 $E_{ML} \sim p'_ML$ 関係図-10 $E_{ML} \sim e_{ML}$ 関係図-11 ひずみ速度の異なる $q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

$de_a/dt=0.02\%/min$ での実験結果はこの影響を考慮して, $\epsilon_a \leq 0.001\%$ でのデータから E_{ML} を算出している。

また、ここに示した実験では単調載荷開始直前に片振幅軸ひずみ(ϵ_a)_{SA}を0.005%とした、同速度での繰返し載荷を行っており、図-12は繰返し載荷中に発生した過剰間隙水圧の推移を比較したものである。間隙水圧は供試体下端において測定しているため、時間遅れ等の影響を含んでいる可能性があるが、 de_a/dt

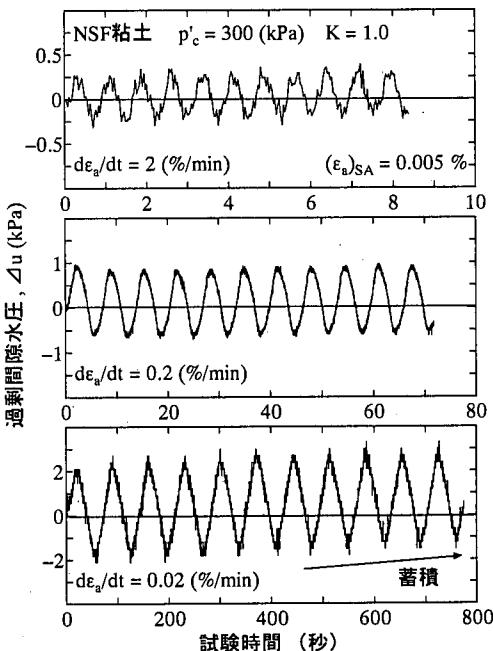
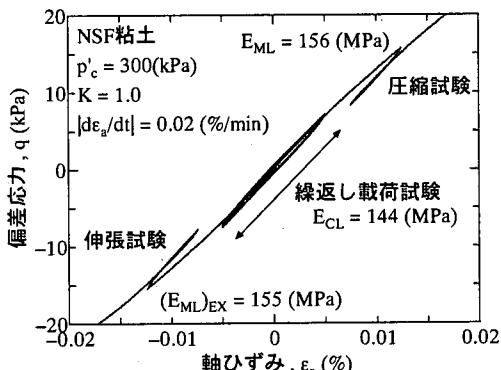


図-12 繰返し載荷中に発生する過剰間隙水圧の推移

図-13 圧縮、伸張、繰返し試験における $q \sim \epsilon_a$ 関係の比較

=0.02%/min での実験結果においてのみ、繰り返し載荷の継続とともに過剰間隙水圧 Δu が蓄積していく傾向が見られる。これらの実験では間隙比の変化を生じさせない目的で両試験間での排水を許していないため、有効応力の低下によって $de_a/dt=0.02\%/min$ における E_{ML} は他に比べて若干減少している可能性がある。

以上のことを考慮すると、ここで検討した軸ひずみ速度の範囲内では本来 0.001%程度までの領域における各々の E_{ML} はほぼ等しく、 E_{ML} は軸ひずみ速度によらないと考えられる。

図-13 は等しいひずみ速度 ($de_a/dt=0.02\%/min$) で行った圧縮、伸張、繰返し試験結果の比較であり、 E_{CL} は E_{ML} (E_{ML})_{EX} に比べてわずかに小さい。しかし、 E_{ML}

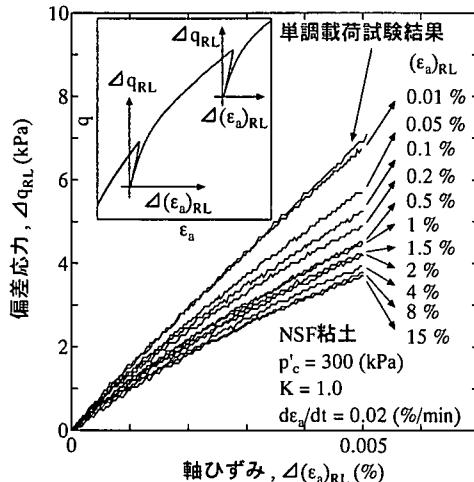


図-14 各(ϵ_a)_{RL}における再載荷時の Δq_{RL} ~ $\Delta(\epsilon_a)_{RL}$ 関係

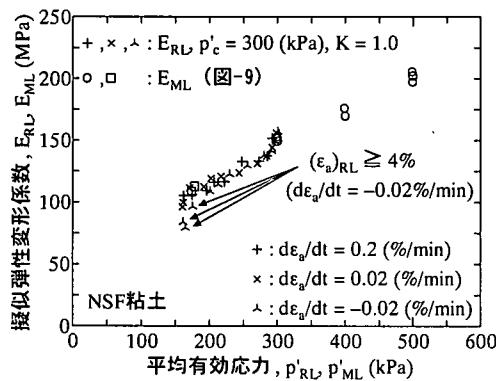


図-15 E_{RL}-p'_{RL}関係ならびにE_{ML}-p'_{ML}関係との比較

および(E_{ML})_{EX}は先に検討した軸ひずみ速度の影響を考慮して $\epsilon_a \leq 0.001\%$ での実験結果から算出しておらず、また繰返し載荷時の(ϵ_a)_{SA}(=0.005%)は弾性的な領域をわずかに超えており、 E_{CL} が過小評価されていることを考慮すると、本来 E_{CL} , E_{ML} , (E_{ML})_{EX}はこのような載荷モードによらず等しいと考えられる。

図-13に示した圧縮、伸張試験はそれぞれ所定の軸ひずみ($(\epsilon_a)_{RL}=0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8, 15\%$)において0.005%の除荷・再載荷を行っており、図-14は図-13中の圧縮試験時において、各(ϵ_a)_{RL}での再載荷時の偏差応力増分 Δq_{RL} と軸ひずみ増分 $\Delta(\epsilon_a)_{RL}$ の関係を比較したものである。図中において、 E_{RL} は(ϵ_a)_{RL}が増加するに従って減少していることが分かる。この種の実験は軟岩やセメント改良土等の硬質地盤材料に対して行われることが多く、本文で定義するところの E_{RL} は一般にせん断の進行に伴い粒子間のセメントーションおよび骨格構造の損傷によって減少することが報告

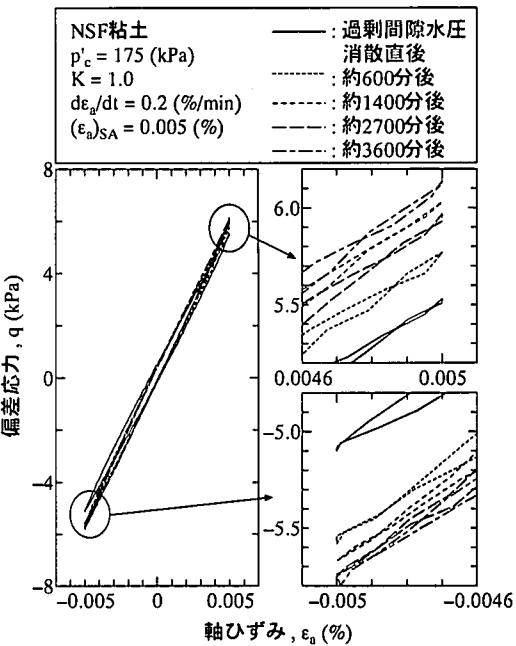


図-16 排水クリープ下における q - ϵ_a 関係の比較

されている^{10), 12)}。しかし、本実験が粘性土を対象とし、かつ練り返し試料を用いていることを考慮すると粘性土における E_{RL} の減少はせん断中に発生する過剰間隙水圧による有効応力の低下に起因していると考えられる。

そこで、図-15に再載荷開始時の平均有効応力 p'_{RL} と E_{RL} の関係を示す。なお、図中には伸張試験ならびに異なるひずみ速度($d\epsilon_a/dt=0.2\%/min$)での圧縮試験から得られた E_{RL} 。更には図-9中における正規圧密試料の E_{ML} - p'_{ML} 関係も示している。図中において、伸張試験における大ひずみ域($(\epsilon_a)_{RL} \geq 4\%$)では、ネッキング等によって供試体内のひずみ分布に不均一が生じ、正確な E_{RL} ならびに p'_{RL} が測定できていない可能性があることを考慮すると、 E_{RL} と p'_{RL} は一義的な関係にあり、その関係はせん断初期において得られる E_{ML} と p'_{ML} の関係にほぼ従っていると考えることができる。さらに、この事実は平均有効応力が粘性土の擬似弾性変形係数における支配要因の一つであることを示唆している。

(4) 排水クリープの影響

一般に、原地盤では長期間にわたるクリープが進行しており、それがaging効果の主要部分として粘性土の変形挙動に大きく影響していると思われる。

そこで、所定の圧密応力を達した後に応力状態を一定に保ったまま排水クリープを許し、その間過剰間隙水圧消散直後を含めた計5回（排水クリープ時間約0,

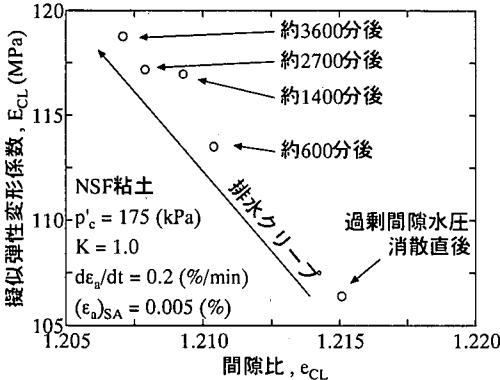


図-17 排水クリープによる ϵ_{CL} の減少に伴う E_{CL} の変化

600, 1400, 2700, 3600 分) の繰返し載荷を行って排水クリープの進行に伴う E_{CL} の変化を検討した。なお、繰返し載荷は非排水条件下で行い、 $(\epsilon_a)_{\text{SA}}$ および繰返し回数はその後の排水クリープ挙動および繰返し載荷に及ぼす影響を考慮してそれぞれ 0.005%，5 回とした。また、図-12 に示した繰返し載荷試験中の過剰間隙水圧挙動から、ひずみ速度はリラグゼーションによると思われる過剰間隙水圧の蓄積が見られない速度 ($d\epsilon_a/dt=0.2\%/\text{min}$) とした。

図-16 は排水クリープ中の各段階における繰返し載荷試験結果を比較したものであり、排水クリープの進行とともに E_{CL} が増加していることが分かる。なお、図中には比較しやすいよう 4 回目の繰返し載荷における関係を示している。

図-17 は排水クリープによる E_{CL} の増加について検討するため、繰返し載荷開始時の間隙比 e_{CL} と E_{CL} の関係を比較したものである。本実験で行った排水クリープ時間は原地盤の堆積期間と比べると非常に短く、また間隙比の減少もわずかであるにもかかわらず、 E_{CL} は明らかに増加しており、排水クリープが擬似弾性変形係数に及ぼす影響の大きさが伺える。また、 E_{CL} の増加が排水クリープによる e_{CL} の減少のみによって生じていると仮定すると、その間の平均有効応力は一定であることから、擬似弾性変形係数の支配要因として平均有効応力と間隙比の両者を同時に考慮する必要があると考え、本研究では粘性土の $e \sim \ln p'$ 特性に着目して変形係数の定式化を試みることにした。

4. 擬似弾性変形係数の定式化に関する検討

(1) 変形係数の定式化に関する在来の研究

本研究では、非排水条件下におけるヤング率に相当する変形係数について検討しているが、各種地盤材料の小ひずみ域におけるせん断剛性率 G については式

(1)のような経験式が提案されており^{13), 14)}、式中の各パラメータについても検討がなされている^{13), 14), 15), 16)}。

$$G = A \cdot f(e) \cdot \left(\frac{p'}{p'_r} \right)^n \cdot (OCR)^k \quad (1)$$

なお、 A は実験定数、 $f(e)$ は間隙比関数、 p' は平均有効応力、 p'_r は基準応力、 n および k は指数である。

また、式(1)中の $f(e)$ を適切に選ぶと k は 1 に等しくなること^{8), 17)} や、せん断波は伝播面に垂直な面の応力には依存しないという実験結果^{17), 18)} から、式(2)のような関係式がより一般的であるという報告もされている¹⁷⁾。

$$G = S_{vh} \cdot f(e) \cdot \sigma_r^{(1-nv-nh)} \cdot \sigma_v^{nv} \cdot \sigma_h^{nh} \quad (2)$$

ここで、 S_{vh} は構造定数、 σ_r は鉛直応力、 σ_v は水平応力、 nv および nh は指数である。

一方、ヤング率については乾燥砂の矩形供試体において鉛直・水平ひずみを直接測定した実験結果から、対応する直応力の大きさのみの関数として表現できることが報告されている^{10), 19)}。

(2) 等方圧密・膨張時の $e \sim \ln p'$ 関係を用いた擬似弾性変形係数の定式化

先の節で説明したように、小ひずみ域における変形係数の定式化に用いる応力は一般に鉛直応力、水平応力をそれぞれ単独、あるいはその一方のみを用いる場合が多い。しかし、先に示した実験結果(図-4、図-8、図-15)を考慮すると、擬似弾性変形係数については応力として平均有効応力を用いる方がより妥当だと考えられる。また、図-17 に示した実験結果から擬似弾性変形係数の支配要因として平均有効応力と間隙比の両者を同時に考慮する必要のあることが確認されており、粘性土の $e \sim \ln p'$ 特性が擬似弾性変形係数に大きく影響していると考えられる。そこで、この特性を用いた擬似弾性変形係数の定式化を試みることにした。

異なる供試体を用いた際、その初期間隙比の違いによってこの関係の正確な把握が困難になる。そこで、一つの供試体に対して所定の圧密応力で一旦応力の載荷を止め、過剰間隙水圧が消散した時点での E_{CL} を測定する方法によって実験を行うことにした。この実験を 3 種類の応力履歴の下で行い、実験結果より得られた $e_{\text{CL}} \sim \ln p'_{\text{CL}}$ 関係を図-18(a)に、 $e_{\text{CL}} \sim \ln E_{\text{CL}}$ 関係を図-18(b)に示す。なお、これらの実験における圧密・膨張はすべて等方応力下で行われており、それぞれの応力履歴は図中に示している。両図からこれらの関係には強い相関があり、正規圧密、過圧密状態における $e_{\text{CL}} \sim \ln E_{\text{CL}}$ 関係は $e_{\text{CL}} \sim \ln p'_{\text{CL}}$ 関係と同様にそれぞれ線形

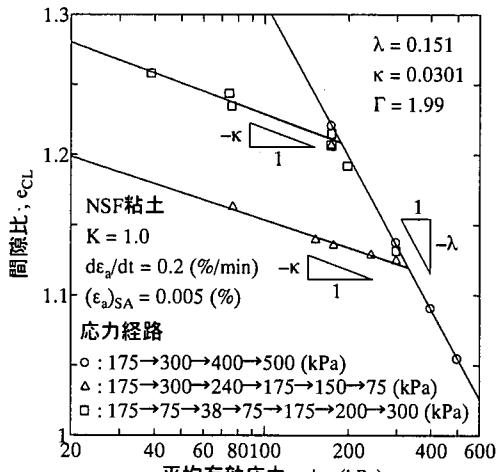
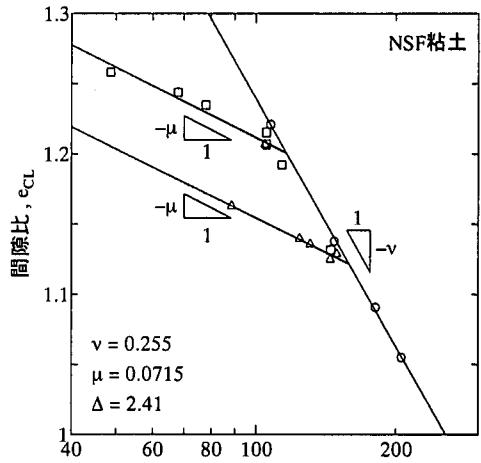
(a) $e_{CL} \sim \ln p'_{CL}$ 関係(b) $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係

図-18 等方圧密・膨張時における擬似弾性変形係数の変化

関係にあることが分かる。なお、 $e_{CL} \sim \ln p'_{CL}$ 関係における正規圧密、過圧密時の傾きをそれぞれ λ 、 κ とし、 $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係における傾きを ν 、 μ とした。また、 $p'_{CL}=1\text{ kPa}$ 、 $E_{CL}=1\text{ MPa}$ に相当する正規圧密時の間隙比をそれぞれ Γ 、 Δ とした。

図中の各パラメータを用いると、正規圧密状態における両関係は式(3)および式(4)のように表現することができます。これらの式において e_{CL} を消去すると、式(5)に示すような p'_{CL} のみの関数として表現することができる。

$$e_{CL} = \Gamma - \lambda \cdot \ln p'_{CL} \quad (3)$$

$$e_{CL} = \Delta - \nu \cdot \ln E_{CL} \quad (4)$$

$$E_{CL} = p'_{CL}^{\frac{\lambda}{\nu}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta - \Gamma}{\nu}\right) \quad (5)$$

次に、過圧密状態における E_{CL} についても同様に間隙比を消去し、先行圧密応力 p'_y を用いた式(6)のように表現できる。

$$E_{CL} = p'_{CL}^{\frac{\kappa}{\mu}} \cdot p'_y^{\frac{\lambda - \kappa}{\nu - \mu}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta - \Gamma}{\nu}\right) \quad (6)$$

図-19は式(5)および式(6)の関係式と実験結果を比較したものである。過圧密状態における E_{CL} において実験結果と若干の相違が見られるものの p'_{CL} に対する E_{CL} の変化がうまく表現されている。なお、過圧密時における実験値と計算値の相違については、実験結果における $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係ならびに $e_{CL} \sim \ln p'_{CL}$ 関係の線形性が若干低いことに起因していると思われる。

(3) 諸要因の影響を考慮した定式化に関する検討 a) 異方圧密履歴を考慮した定式化に関する一考察

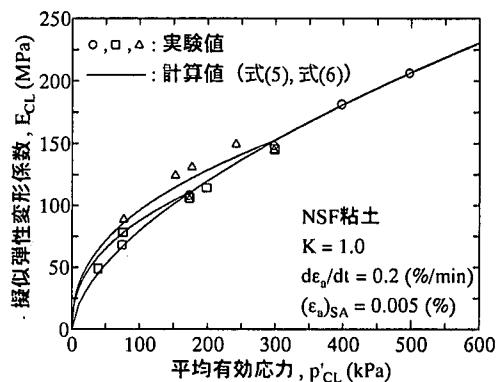


図-19 定式化結果と実験結果の比較

図-4 および図-8において、正規圧密状態における擬似弾性変形係数は載荷開始時の平均有効応力が等しければ等方、異方、 K_0 といった圧密方法によらないことが確認されており、式(5)は載荷開始時の平均有効応力を用いることによってこのような圧密方法によらず擬似弾性変形係数を表現可能であることを示している。

ところが、異方圧密時における $e \sim \ln p'$ 関係は等方圧密時の傾きと等しいものの、同一平均有効応力下における間隙比は等方圧密時に比べて小さいことが知られており、等方圧密時の $e \sim \ln p'$ 関係を用いて誘導された式(5)を異方、 K_0 圧密時の試験結果に用いることには若干の疑問が生じる。そこで、これについて以下に検討する。

図-20は等方(実線)、異方圧密時(破線)の $e_{CL} \sim \ln p'_{CL}$ 関係と $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係の概念図であり、異方圧密時の Γ 、 Δ は等方圧密時に比べてそれぞれ a 、 b だけ小さいとし

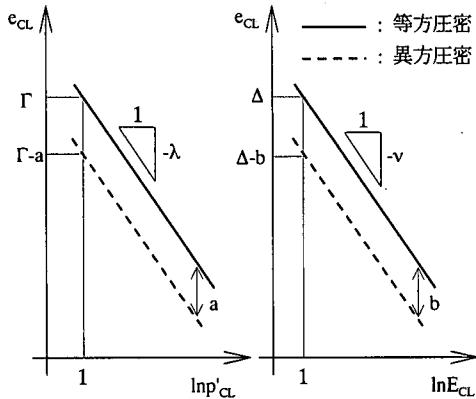


図-20 等方、異方圧密時における e_{CL} - $\ln p'_{CL}$ 関係
ならびに e_{CL} - $\ln E_{CL}$ 関係の概念図

ている。図中における異方圧密時の両関係はそれぞれ式(7)、式(8)のように表現でき、両式より $a=b$ を満たした場合に式(5)と等しい関係を得ることが分かる。

$$e_{CL} = \Gamma - a - \lambda \cdot \ln p'_{CL} \quad (7)$$

$$e_{CL} = \Delta - b - \nu \cdot \ln E_{CL} \quad (8)$$

すなわち、図-4 および図-8 に示した実験結果はこの条件を満たしていると考えられ、このように等方圧密、異方圧密時の e_{CL} - $\ln E_{CL}$ 関係そのものが異なっていると考えると先の疑問は解消される。ただし、 e_{CL} - $\ln E_{CL}$ 関係を異にする原因については供試体が異方圧密中に受けたせん断ひずみ履歴によるものと推測でき、今後この影響について検討する必要があることが分かる。

b) 載荷モードを考慮した定式化

図-11、図-13 より正規圧密状態における擬似弾性変形係数はひずみ速度や単調・繰返し、圧縮・伸張といった違いによらないことが得られており、式(5)はこのような載荷モードによらず同様に用いることができる。

また、図-15において単調載荷中の E_{RL} - p'_{RL} 関係は E_{ML} - p'_{ML} 関係と同様であることが確認されており、式(5)は p'_{RL} を用いることによって E_{RL} をも表現することができる。

ただし、過圧密状態における載荷モードの違いについては検討しておらず、特に E_{RL} については今後検討する必要があると思われる。しかし、ひずみ速度や単調・繰返し、圧縮・伸張の違いについては正規圧密状態と傾向を異にする要因がこれといって見当たらないため、式(6)によって表現可能であると推測される。

c) 排水クリープを考慮した定式化

図-21 は図-18(b)上に図-17 に示した排水クリープ下における E_{CL} と e_{CL} の関係（黒丸）をプロットしたもの

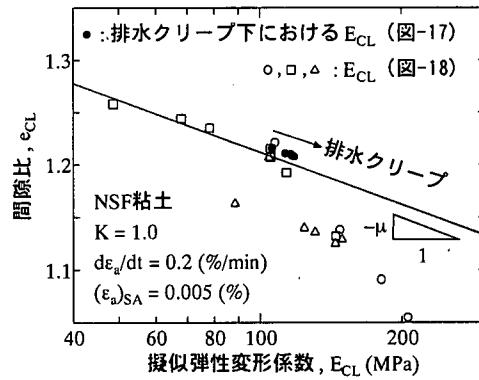


図-21 等方圧密・膨張時と排水クリープ下での e_{CL} - $\ln E_{CL}$ 関係の比較

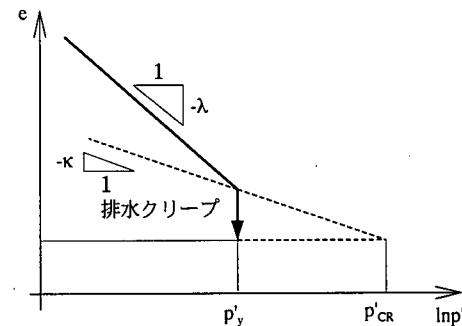


図-22 p'_{CR} の決定方法に関する概念図

のである。この関係がなす傾きは過圧密時における傾き μ にほぼ等しく、過剰間隙水圧消散時の値を起点に擬似弾性変形係数が増加する方向へと進んでいることが分かる。

そこで、この傾向を用いて排水クリープ下の擬似弾性変形係数を表現しうる定式化を行うために、排水クリープ下における E_{CL} の変化が過圧密時の傾き μ に等しいことに対応させ、本来排水クリープ中に一定である平均有効応力を図-22 に示す概念によって補正した。排水クリープ下における E_{CL} を特に E_{CR} とする、 E_{CR} はこの補正した平均有効応力 p'_{CR} を用いることによって、式(9)に示すように過圧密時の関係式である式(6)と同様な形で表現することができる。

$$E_{CR} = p'_{CR}^{\frac{\kappa}{\mu}} \cdot p'_y^{\frac{\lambda \cdot \kappa}{\nu \cdot \mu}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta - \Gamma}{\nu}\right) \quad (9)$$

なお、式(9)における p'_y は過剰間隙水圧消散直後、すなわち排水クリープ開始時の平均有効応力を示している。

図-23 は式(9)と実験結果を比較したものであり、その傾向をうまく表現している。また、図中には式(5)および式(6)の関係も示しており、正規圧密状態のある点

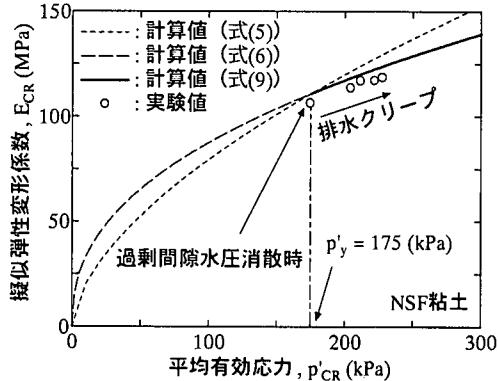


図-23 $E_{CR} \sim p'_{CR}$ 関係における実験値と計算値の比較

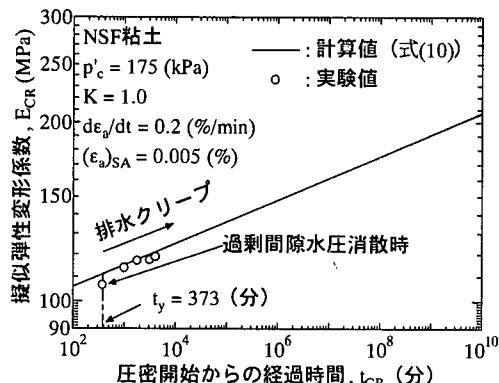


図-24 $E_{CR} \sim t_{CR}$ 関係における実験値と計算値の比較

から膨張ならびに排水クリープを行った場合、 p'_{CR} を用いると両者における擬似弾性変形係数の推移は連続した関数として表現されることが分かる。

さらに、二次圧密下における時間と間隙比は片対数軸上において線形関係にあることが知られており、この関係における傾きを C_a 、圧密開始から過剰間隙水圧消散までの時間を t_y 、この時点での間隙比を e_y 、排水クリープ下のある時点までの時間を t_{CR} とすると、排水クリープによる間隙比の減少量は式(10)のように表現できる。

$$e_y - e = C_a \cdot \ln \frac{t_{CR}}{t_y} \quad (10)$$

また、過剰間隙水圧消散時点での擬似弾性変形係数を E_y とすると、式(10)の左辺は図-21より式(11)のようにも表現できる

$$e_y - e = \mu \cdot \ln \frac{E_{CR}}{E_y} \quad (11)$$

さらに、 p'_y より E_y は式(5)を満たすことを利用し、 e_y ならびに E_y を消去すると、 E_{CR} は式(12)のように表現できる。

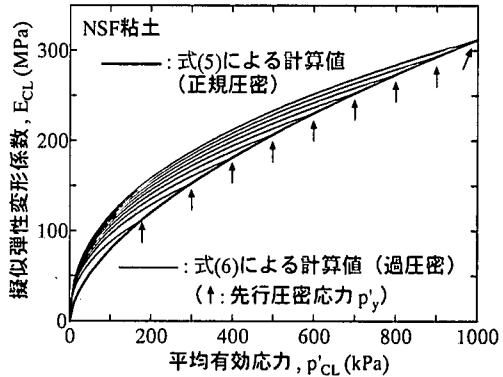


図-25 定式化結果を用いた広範囲な $E_{CL} \sim p'_{CL}$ 関係の予測

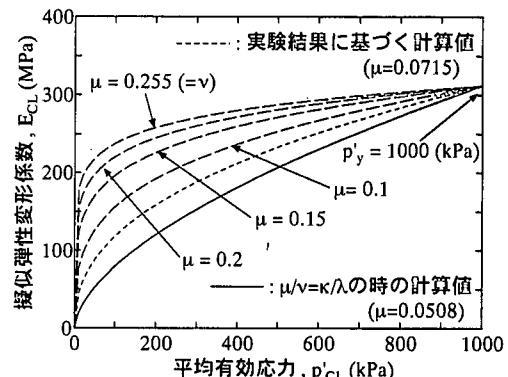


図-26 μ に伴う $E_{CL} \sim p'_{CL}$ 関係の変化

$$E_{CR} = \left(\frac{t_{CR}}{t_y} \right)^{\frac{C_a}{\mu}} \cdot p'_y^{\frac{\lambda}{v}} \cdot \exp \left(\frac{\Delta - \Gamma}{v} \right) \quad (12)$$

図-24 は式(12)による計算値と実験値を比較したものであり、図-23 と同様にその傾向をうまく表現している。室内試験では試験時間に制限があるため、この傾向が長期間にわたって成立することを確認することは不可能であるが、式(12)は E_{CR} と t_{CR} が両対数軸上において線形関係にあることを示しており、図-24 より過剰間隙水圧消散直後の E_{CR} が排水クリープによって倍の値になるには計算上約 19000 年もの時間を要することが分かる。この値が妥当であるかどうかを評価することは困難であるが、乱さない試料を用いた室内試験や、原位置試験との比較・検討を行い、変形係数に及ぼす aging 効果の表現方法、更には aging 効果自体の定量化に関して検討していきたいと考えている。また、過圧密比や応力比が排水クリープ下における変形係数の変化に及ぼす影響についても検討する必要があると考えている。

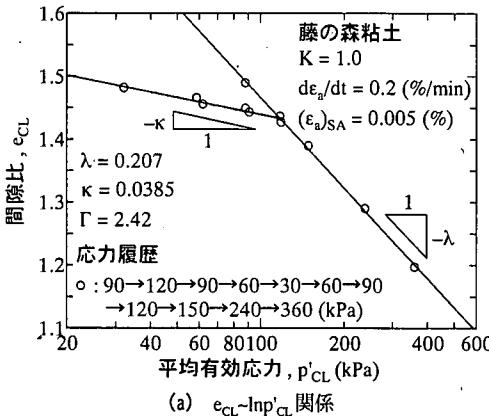
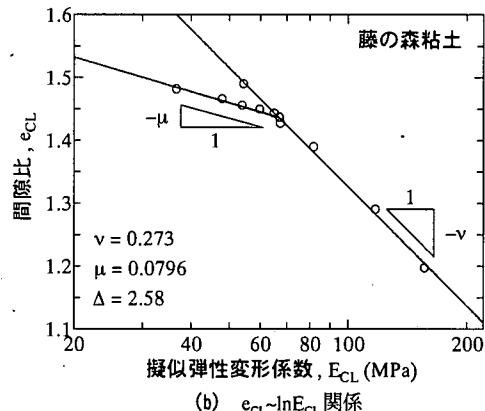
(a) $e_{CL} \sim \ln p'_{CL}$ 関係(b) $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係

図-27 藤の森粘土における等方圧密・膨張時での擬似弾性変形係数の変化

(4) 定式化に用いたパラメータに関する検討

原地盤における擬似弾性変形係数を考慮する際、先の節で提案した関係式におけるパラメータの役割や試料による違いを把握する必要がある。

図-25は式(5)および式(6)によって広範囲な平均有効応力における擬似弾性変形係数を予測したものであるが、等しい平均有効応力における正規圧密、過圧密時の E_{CL} は明らかに異なり、過圧密比が大きいほどその違いは大きくなっている。式(5)および式(6)において、 $\kappa/\lambda = \mu/\nu$ の時には両式が等しくなるためにこのような違いは生じないことが分かるが、図-25の結果は実験から得られた μ/ν が κ/λ のおよそ 1.5 倍程度になっていることによるものである。

これらの値に関して、粘性土の κ/λ は 0.1~0.2 程度の狭い範囲にあることが知られているが、 μ/ν については試料によって大きく異なる可能性がある。そこで、図-26において式(6)中の μ のみを変化させた関係を比較している。なお、 μ の値は ν より大きくなることは考えにくく、 μ/ν が κ/λ より小さくなった場合には等しい平均有効応力下において過圧密状態より正規圧密状態の擬似弾性変形係数の方が大きくなってしまうため、この範囲で変化させている。 μ の値が ν に近づくほど過圧密状態における $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係が正規圧密状態の関係に近づくことは明らかであるが、その一方で $E_{CL} \sim p'_{CL}$ 関係における両者の差は大きくなることが図-26より確認できる。

次に、図-27(a)は藤の森粘土を用いて行った実験における $e_{CL} \sim \ln p'_{CL}$ 関係であり、図-27(b)は $e_{CL} \sim \ln E_{CL}$ 関係である。なお、この実験は等方応力下で行われ、応力履歴は図中に示している。これらの図から分かるように、藤の森粘土についても両関係には強い相関がある。また、図-28は式(5)および式(6)による計算値と実

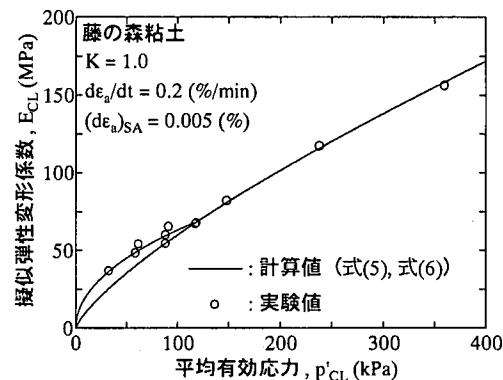


図-28 藤の森粘土における定式化結果と実験結果の比較

表-2 定式化に用いたパラメータのまとめ

	NSF 粘土	藤の森粘土
λ	0.151	0.207
κ	0.0301	0.0385
Γ	1.99	2.42
ν	0.255	0.273
μ	0.0715	0.0796
Δ	2.41	2.58
λ/ν	0.593	0.759

験値を比較したものである。両式はこの実験から得られたパラメータを用いることによって実験値の $E_{CL} \sim p'_{CL}$ 関係をうまく表現しており、適切なパラメータを用いることによって各種粘土試料に使用可能であることが推測される。

表-2 は NSF 粘土および藤の森粘土の各パラメータをまとめたものであるが、両試料における λ 、 κ 、 Γ には

ある程度の違いが見られるものの、 ν , μ , Δ の違いは意外に小さいことが分かる。中でも ν の違いが顕著であり、これによって λ/ν に比較的大きな差が生じている。式(5)から分かるように、このことは藤の森粘土の方が正規圧密状態における E_{cl} の増加率が大きいことを示しており、一般に λ の大きい粘性土は正規圧密状態において p'_{cl} に対する E_{cl} の増加率が大きいことを示唆している。今後、物性の異なる試料に対して同様な実験を重ね、試料の物性が各パラメータに及ぼす影響についての検討が必要であると考えている。

5. まとめ

本研究では、擬似弾性変形係数に影響を及ぼすと思われる諸要因について検討し、これらを考慮した定式化を試みた。得られた結果について以下にまとめる。

- 1) 圧密・膨張に伴う擬似弾性変形係数の変化は粘性土の $e \sim \ln p'$ 関係と強い相関があることが確認され、等方圧密・膨張試験結果から載荷開始時における平均有効応力の関数として定式化することができた。
- 2) 載荷開始時における平均有効応力が等しい場合、擬似弾性変形係数は載荷開始時の応力比にほぼよらず、等方圧密・膨張試験結果から誘導された定式化結果によって推定できることが確認された。
- 3) 載荷開始時における平均有効応力が等しい場合、擬似弾性変形係数はひずみ速度、単調・繰返し、圧縮・伸張の違いによらないことが実験結果から分かり、定式化結果はこのような載荷モードの違いによらず使用できることを確認した。
- 4) 単調載荷中に小ひずみの除荷・再載荷を行うことによって求めた擬似弾性変形係数は過剰間隙水圧の増加による平均有効応力の減少に従っており、再載荷開始時の平均有効応力を用いれば正規圧密時の定式化結果によって表現できることを確認した。
- 5) 排水クリープ下における擬似弾性変形係数は間隙比の減少とともに増加し、本文中に示した補正を行えば過圧密時の定式化結果によって表現でき、更には排水クリープ時間と二次圧密係数を用いた定式化結果によっても表現可能であることを確認した。

今後、乱さない試料を中心とした様々な粘性土を用いて実験を行うことにより、試料間におけるパラメータの関連性を把握し、原地盤における擬似弾性変形係数の推定方法の確立を目指したいと考えている。

謝辞：本研究における実験に関して、当時北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の学生であった大木基裕氏（現東海旅客鉄道株式会社）に多大な協力を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Burland,J.B. : Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture : "Small is beautiful" - the stiffness of soils at small strains, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, pp.499-516, 1989.
- 2) Tatsuoka,F., Sato,T., Park,C.-S., Kim,Y.-S., Mukabi,J.N. and Kohata,Y. : Measurements of Elastic Properties of Geomaterials in Laboratory Compression Tests, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, pp.80-94, 1994.
- 3) Shibuya,S., Mitachi,T., Fukuda,F. and Degoshi,T. : Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.3, pp.365-375, 1995.
- 4) Shibuya,S. and Mitachi,T. : Development of a fully digitized triaxial apparatus for testing soils and soft rocks, *Geotechnical Engineering (Journal of Southeast Asian Geotechnical Society)*, Vol.28, No.2, pp.183-207, 1997.
- 5) Tatsuoka,F., Iwasaki,S., Fukushima,S. and Sudo,H. : Stress conditions and stress histories affecting shear modulus and damping of sand under cyclic loading, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.2, pp.29-43, 1979.
- 6) 上野恭宏, プラダン テージ : 粘性土の繰返し変形特性に及ぼす圧密条件の影響, 第30回土質工学研究発表会概要集, Vol.2, pp.915-918, 1995.
- 7) Tatsuoka,F. and Shibuya,S. : Deformation Characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, *Proceedings of the Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.101-177, 1991.
- 8) Shibuya,S., Tatsuoka,F., Teachavorasinsuk,S., Kong,X.J., Abe,F., Kim,Y.-S. and Park,C.-S. : Elastic deformation properties of geomaterials, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.3, pp.26-46, 1992.
- 9) Shibuya,S., Mitachi,T., Hosomi,A. and Hwang,S.C. : Strain-rates effects on stress-strain behaviour of clay as observed in monotonic and cyclic triaxial tests, *Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behavior, ASCE Geotechnical Special Publication*, No.61, pp.214-227, 1996.
- 10) Tatsuoka,F. and Kohata,Y. : Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Vol.2, pp.947-1063, 1994.
- 11) Di Benedetto,H. and Tatsuoka,F. : Small strain behavior of geomaterials : Modelling of strain rate effects, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.2, pp.127-138, 1997.

- 12) 水本桂輔, 内田武志, 龍岡文夫, 木幡行宏 : 堆積軟岩の変形係数の拘束圧依存性について, 第28回土質工学研究発表会概要集, Vol.2, pp.1369-1370, 1993.
- 13) Hardin,B.O. and Richart,F.E.Jr. : Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.89, No.SM1, pp.33-65, 1963.
- 14) Hardin,B.O. and Black,W.L. : Vibration modulus of normally consolidated clay, *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.95, No.SM6, pp.1531-1537, 1969.
- 15) Shibuya,S. and Tanaka,H. : Estimate of elastic shear modulus of Holocene soil deposit, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.4, pp.45-55, 1996.
- 16) Shibuya,S., Hwang,S.C. and Mitachi,T. : Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Géotechnique*, Vol.47, No.3, pp.593-601, 1997.
- 17) Jamiolkowski,M., Lancellotta,R. and Lo Presti,D.C.F. : Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Vol.2, pp.817-836, 1994.
- 18) Yu,P. and Richart,F.E.Jr. : Stress ratio effects on shear modulus of dry sands, *Journal of Geotech. Engng, ASCE*, Vol.110, No.3, pp.331-345, 1984.
- 19) Kohata,Y., Tatsuoka,F., Dong,J., Teachavorasinsuk,S. and Mizumoto,K. : Stress states affecting elastic deformation moduli of geomaterials, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Vol.1, pp.3-9, 1994.

(1998.12.24 受付)

QUANTIFYING DEFORMATION MODULUS OF RECONSTITUTED CLAYS AT SMALL STRAINS

Takayuki KAWAGUCHI, Toshiyuki MITACHI and Satoru SHIBUYA

It is well known that geomaterials exhibit quasi-elastic stress-strain behaviour at small strains. The stiffness in this small strain region is herewith termed as pseudo-elastic modulus. A laboratory investigation was performed into the pseudo-elastic modulus of reconstituted clays by considering some influencing factors such as consolidation history, drained creep, loading condition (i.e. strain rate, monotonic and cyclic loadings). On the basis of results of a series of undrained triaxial test performed, the variation of the pseudo-elastic modulus with each influencing factor was successfully expressed in a quantitative fashion by examining the $e-\log\sigma'$ relationship of the clays when subjected to both consolidation and swelling.