

弾塑性定数同定のための練返し試料作製方法の確立

名古屋大学 国際会員 田代むつみ 中野正樹 野田利弘 浅岡顕
NEXCO 中日本 国際会員 稲垣太浩

1. はじめに

自然堆積粘土は、たとえ水を加えずに含水比一定の状態であっても、練返しなどの人工的な「乱れ」を受けると、強度を失い軟らかくなる。また、自然堆積粘土は、十分に練り返した粘土に比べて、「乱れ」に伴い大きな間隙比変化(大圧縮)を起こす。このような、乱れに伴う粘土の強度・変形特性の変化は、特に軟弱な自然堆積粘土における力学挙動の把握を困難にしており、様々な工学的問題を引き起こしている。例えば、旧日本道路公団による軟弱粘土地盤上への高速道路用盛土の施工例は、これまでに約 50 地区あるが、そのうち約 2 割の現場において、建設前の予測沈下量を 1m も上回る大きな残留沈下が観測されており、大きな問題となっている¹⁾。

「乱れ」は、粘土の「状態」は変化させるが、その「種類」は変えないので、自然堆積粘土と練返し粘土の力学特性の差は、その「状態」の違いに起因する。三笠(1964)は、土の

「状態」を決める要素のうち、含水比・密度を除くすべてのものを包括的に「骨格構造」として定義した。これに従えば、十分に練り返した粘土は骨格構造を完全に失った状態に、また自然堆積粘土は骨格構造が発達した状態にあると捉えることができる。よって、両者の力学挙動を直接比較することで、自然堆積土がその堆積環境に応じて獲得した、骨格構造の量やその変化の仕方を把握することが可能となる。

実務でも多く用いられる「鋭敏比」は、その一つの指標であり、乱れに伴う強度低下率から、自然堆積粘土が持つ初期骨格構造の量を推定することができる。一方、図-1 のような標準圧密試験では、一次元に限定されるものの、広範囲な応力変化に伴う圧縮特性を比較することができるため、自然堆積粘土が持つ骨格構造の量とその変化の仕方を求めることができる。

いずれにせよ、ここで重要なのは、『自然堆積粘土をできるだけ原位置の状態から乱さないようにサンプリングし、試験を行うこと』、また『(土台となる)練返し粘土が、完全に骨格構造を喪失した状態にあること』である。前者に対しては、一般に細心の注意が払われ、近年のサンプリング技術の発達も目覚ましい。しかし後者については、たとえば地盤工学会編集の「土質試験 基本と手引き³⁾」にも、練返し試料の作製方法として“試料の含水比を変えないように、試料をビニールシートなどに入れて回転させながら手で押しつけ、固形物がなくなるまで十分に練り返す”と示されているに過ぎず、本当に十分な練返しが行われているのか、これまで疑われることはなかった。

そこで本研究では、土の骨格構造の働きを定量的・定性的に記述するために土台となる、練返し正規圧密曲線(NCL)を規定する傾き $\tilde{\lambda}$ と切片N($p'=98.1\text{kPa}$ における比体積)に着目し、これらを正確に得るための試験方法の確立を目的とする。そして、複数地区の練返し粘土に対する標準圧密試験結果を元に、(1)練返し粘土は、液性限界よりも大きな含水比で練返すと嵩張った挙動を、また液性限界よりも小さな含水比で練

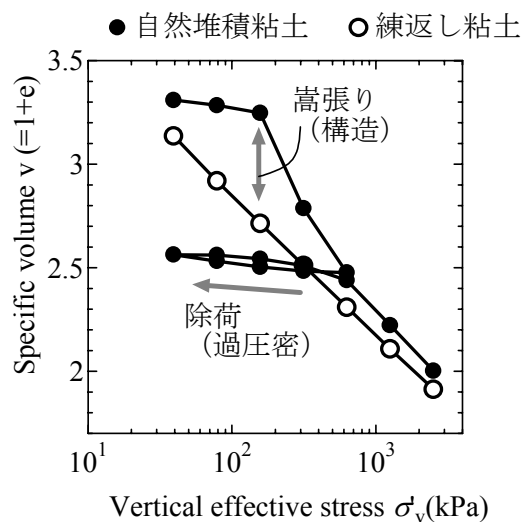


図-1 標準圧密試験結果

Evaluation of optimum condition of remolded samples for the determination of the elasto-plastic parameters :

Tashiro, M.(mutsumi@civil.nagoya-u.ac.jp), Nakano, M., Noda, T., Asaoka, A.(Nagoya Univ.), and Inagaki, M.

(Central Nippon Expressway Company Limited)

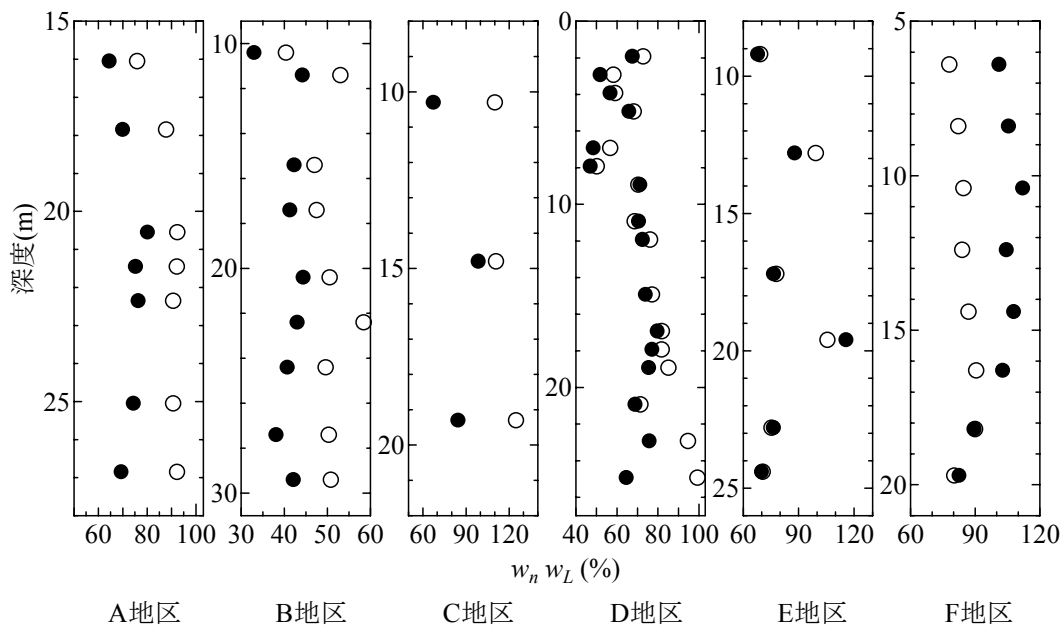


図-2 対象地区の自然含水比 w_n と液性限界 w_L の深度方向分布 (●:自然含水比, ○:液性限界)

り返すと過圧密土的な挙動を示す傾向があること、また(2)練返し粘土の作製に最も適した含水比は液性限界であることを示す。

なお、本研究では土の弾塑性構成式である SYS カムクレイモデル⁴⁾に基づき、骨格構造をさらに「構造(嵩張り)」「過圧密」「異方性」の3つで定義している。粘土は異方性の発達が非常に遅いため、図-1のような自然堆積粘土と練返し粘土の力学挙動の差は、主に「構造」と「過圧密」によるものが大きい。

2. 練返し粘土の「練返し不足」の現状

「土質試験 基本と手引き³⁾」によれば、標準圧密試験(JIS A 1217)の目的は、「実地盤から採取した乱さない試料を用いて、実地盤の沈下量や沈下時間の推定に必要な圧縮性と圧密速度などの圧密定数および圧密降伏応力を求めること」とされている。よって、試験の対象はあくまで乱さないように採取した自然堆積粘土であり、練返し粘土に対して圧密試験が実施されることはあまり無かった。

しかし、近年の名古屋大学地盤力学講座の研究成果により、自然堆積粘土の力学挙動の把握のためには、骨格構造概念が不可欠であること、そして骨格構造の働きを定量的・定性的に記述するためにも、練返し粘土による圧密試験が必要であることが認識されつつある。その結果、旧日本道路公団試験研究所においても、複数地区の軟弱な自然堆積粘土に対して、練返し粘土による標準圧密試験が、近年多く実施されてきた^{5), 6)}。しかし、せっかく蓄積されつつあるこれらの試験結果も、現時点では設計に活かされていないのが現状である。また、練返し粘土による試験方法が明確に定義されていないため、試験結果の精度そのものを確認する方法がない。そこで本論文では、まず始めに、当試験研究所が行った、練返し粘土の標準圧密試験結果を整理し、「練返し」の現状を把握することを目的とする。

図-2は、対象とした地区の、自然含水比 w_n と液性限界 w_L の深度方向分布を示す。A, B, C地区は、自然含水比 w_n の方が液性限界 w_L より小さいが、D, E, F地区では $w_n \cong w_L$ または $w_n > w_L$ の状態にある粘土が多い。どの地区も、軟弱な粘土層が厚く堆積し、盛土載荷に伴う遅

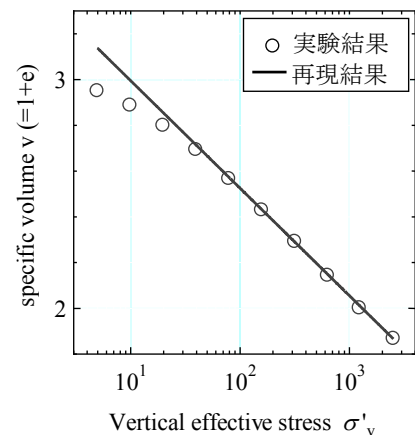


図-3 練返し粘土の試験結果に対する SYS カムクレイモデルの再現例

れ圧密大沈下が問題となっている。

本研究では、これらの地区の練返し粘土の標準圧密試験結果に対し、**図-3**のように、SYS カムクレイモデルの応答により再現することで、NCLの傾き $\tilde{\lambda}$ と切片Nを決定した。なおここでは、練返し粘土は初期に異方性は無くその後も異方性の発達は非常に遅いこと、また十分大きな圧密応力においては構造の無い正規圧密状態にあること、を仮定した。**図-4**は、決定した $\tilde{\lambda}$ とNについて、それぞれ液性限界 w_L と自然含水比 w_n との関係を示したものである。各図中には、相関係数 r の値を併記した。また、(a) $\tilde{\lambda} \sim w_L$ 関係図には、以下のSkempton(1944)の実験式⁷⁾を破線で示した。

$$\tilde{\lambda} = 0.4343 C_{cr}, \quad C_{cr} = 0.007 \{w_L - 10(\%) \} \quad (1)$$

自然含水比 w_n は「状態量」であるが、液性限界 w_L は土の種類に固有の値である。 $\tilde{\lambda}$ とNは材料定数であるから、 w_L との相関性が高いはずである。しかし、実際には、**図-4**の(a),(c)よりもむしろ(b),(d)の方に線形関係が見られ、実験から求めた $\tilde{\lambda}$,Nはどちらも w_n との相関性が強いことが分かる。

同じ含水比であれば、Nが大きい粘土はより強度が大きいことになるので、上記の傾向は w_n が大きいほど強度が大きいことを意味する。しかし、練返し正規圧密土であれば、含水比が大きい粘土の方が強度は小さいはずである。よって、 w_n が大きい粘土ほど、練返しが進まず嵩張った状態（構想を有した状態）に

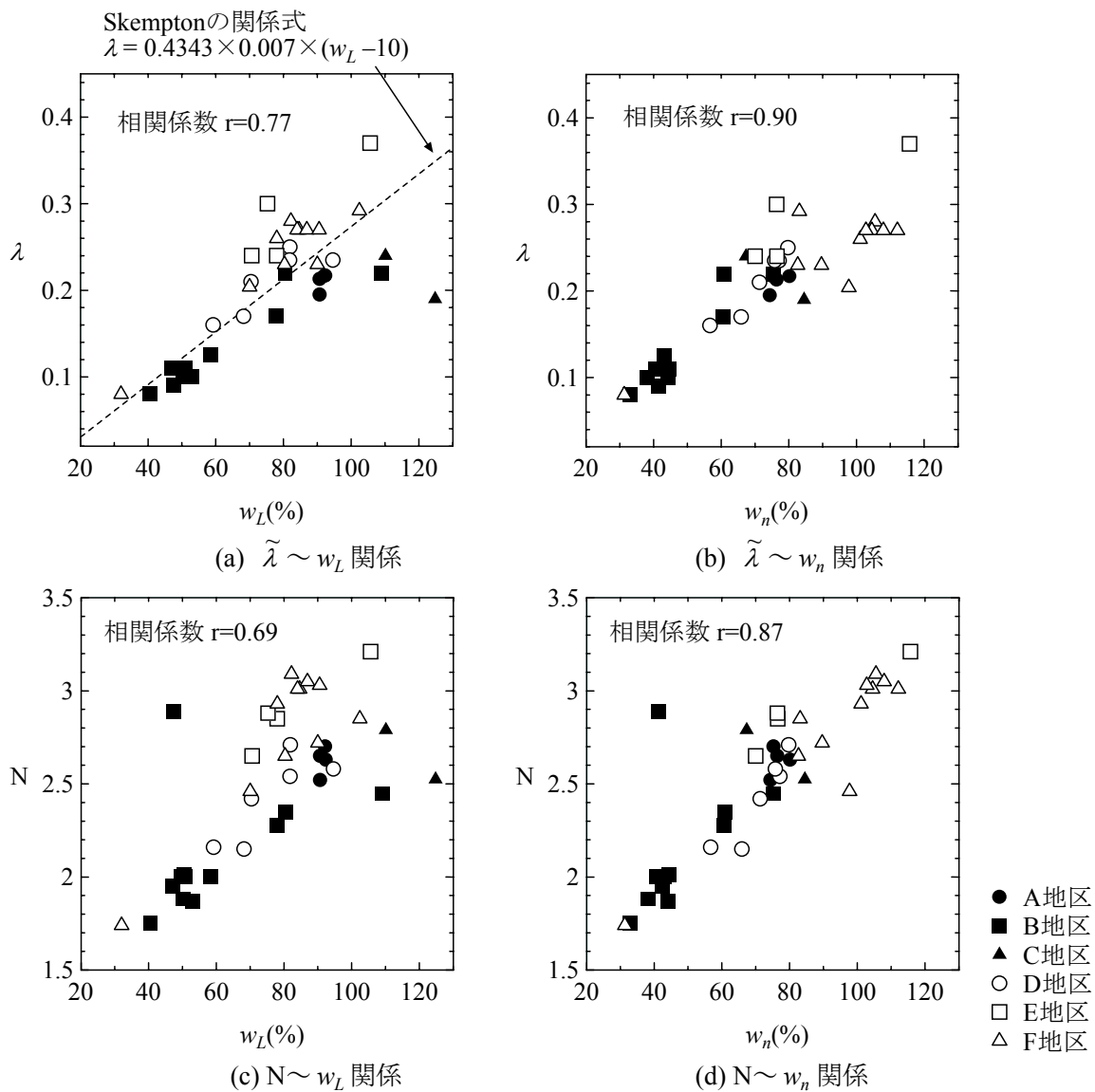


図-4 自然含水比 w_n と液性限界 w_L に対する $\tilde{\lambda}$,Nの相関性（自然含水比で練り返した結果）

あることが予想される。

また、実験から得られた $\tilde{\lambda}$ と Skempton の式から換算した $\tilde{\lambda}$ の大小関係は、地区毎に異なることが分かる。すなわち、 $w_n < w_L$ の A, B, C 地区では、実験から得られた $\tilde{\lambda}$ は Skempton の式から換算した $\tilde{\lambda}$ より小さく、逆に $w_n \cong w_L$ または $w_n > w_L$ の D, E, F 地区では、実験から得られた $\tilde{\lambda}$ の方が Skempton の式から換算した $\tilde{\lambda}$ より大きい傾向がある (図-4(a))。圧縮曲線は一般に、過圧密状態であれば傾きが小さく、構造が高位なほど傾きが大きくなる。よって、自然含水比 w_n が液性限界 w_L よりも大きい高塑性な粘土では、練返し時の含水比 (=自然含水比) が大きいほど、練返し後に残存する構造の程度が大きいと考えられる。また逆に、自然含水比 w_n が液性限界 w_L よりも小さい低塑性な粘土は、自然含水比では粘土が固いため、練返しに大きな力を必要とした結果、練返し後に過圧密が残存しているものと予想される。

このように、粘土を一律に自然含水比で練り返すと、液性限界と自然含水比の大小関係に応じて、骨格構造が残存した状態あることが分かった。

ところで、名古屋大学地盤工学研究室では、「骨格構造概念」の導入以降 (例えば文献4) など、自然堆積粘土の力学特性を把握する際には、練返し粘土を作製して数々の標準圧密試験を実施してきた。当研究室における、供試体作製および試験までの流れを順に示す。まず、原位置から採取された試料は、サンプリングチューブから抜き出して適当な大きさに分割し、目に見える貝殻などの大きな不純物を取り除いた後、強度の強いビニール袋に入れて真空パック機で密閉する。真空パックする際には、空気が入らないように試料を手でもみほぐして平らな状態につぶすが、この時、試料が固くて練り返しが困難な場合には、適当な量の水を加えてからもみほぐす。なお、加水量の目安は経験的であるが、液性限界が「へらに付いた試料を勢いよく振り落とした時に剣先状になる⁸⁾」ことを考えると、加水後の試料は、液性限界程度かそれよりも低い含水比状態にあるものと考えられる。次に、真空パック内の粘土を、固形物がなく全体が均一な状態になるまで、両手で十分に練りつぶす (おおよそ2時間程度)。十分な練返しが済んだら、空気が入らないように圧密リングをセットした圧密箱に円状に絞り出す。その後、ヘラなどで試料表面を整え、上部に多孔板と加压板を載せ、水浸容器の中で一日放置し、完全飽和状態にしてから载荷を開始する。圧密応力は、圧縮曲線が直線になる十分大きな圧密応力まで、段階的に载荷する。練返し試料では特に、加压板を載せる程度の応力増分に対しても体積変化が起こり、その量は無視できない。よって、当研究室では、圧密試験終了時の最終高さを測定し、そこから各载荷段階における供試体高さを逆算することにより、間隙比を算定している。

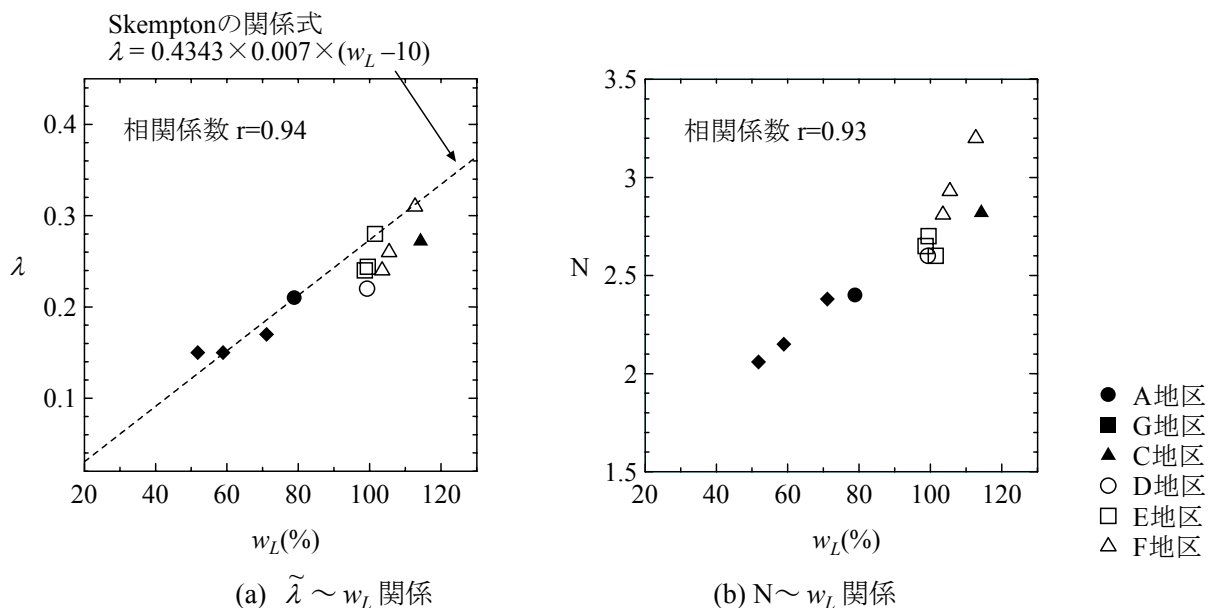


図-5 液性限界 w_L に対する $\tilde{\lambda}$, N の相関性 (練返しやすい適当な含水比で練り返した場合)

上記の試験方法に基づく、名古屋大学地盤工学研究室による試験結果を、**図-5**に示す。なお、**図中 A, C, D, E, F 地区**は、**図-4**と同じ地区を指す。**図-4**の自然含水比で練り返した場合と比べると、練り返しやすい適当な含水比で練り返した場合は、実験から求めた $\tilde{\lambda}, N$ がどちらも、材料に固有な w_L と強い相関性を持っており、骨格構造をよく喪失した練返し粘土が作製できたことが分かる。**図-5(a)**には、Skemptonの式(式(1))を破線で示したが、**図-5(b)**においても同様に、 $N \sim w_L$ 関係が1本の直線で表現できそうである。今後、さらに種々の粘土による試験結果を蓄積し、将来的には w_L による N の算定式も求めていきたい。

図-6は、**図-4**のように自然含水比で練り返した場合(黒丸)と、**図-5**のように練り返しやすい適当な含水比で練り返した場合(白丸)の、圧縮曲線の代表例を示す。**(a), (b)**各図で比較した2本の圧縮曲線は、ほぼ同じ液性限界の粘土試料によるものである。適当な含水比で練り返した場合には、圧縮曲線はほぼ一本の直線として得られ、骨格構造を十分に喪失した練返し正規圧密状態にあることが分かる。一方、自然含水比で練り返した場合は、**(a)** $w_n < w_L$ の粘土であれば、圧縮曲線は初期の傾きが小さく、圧密の進行に従い傾きが大きくなっていく。適当な含水比で練り返した場合の圧縮曲線には、下側から漸近しており、過圧密土であることが読み取れる。逆に、**(b)** $w_n > w_L$ の粘土では、適当な含水比で練り返した場合の圧縮曲線よりも、初期に上側に位置し傾きも大きく、構造がまだ残っていることが分かる。

以上から、名古屋大学地盤工学研究室のように、練り返しやすい適当な含水比で練り返すことによって、より骨格構造を喪失した練返し粘土が作製できることが分かった。しかし、**図-5**の試験結果において、 $\tilde{\lambda}$ はSkemptonの式にまだ完全には一致しておらず、また $\tilde{\lambda}, N$ と w_L との相関係数がそれぞれ0.94, 0.93なのに対し、 w_n との相関係数は0.96, 0.93(図省略)と依然として高いことから、まだまだ骨格構造の喪失が不十分な場合もあることが分かる。練返しに適した含水比を、「適当な」という感覚的・経験的な方法ではなく、定量的な方法で求めることについて、次章で述べる。

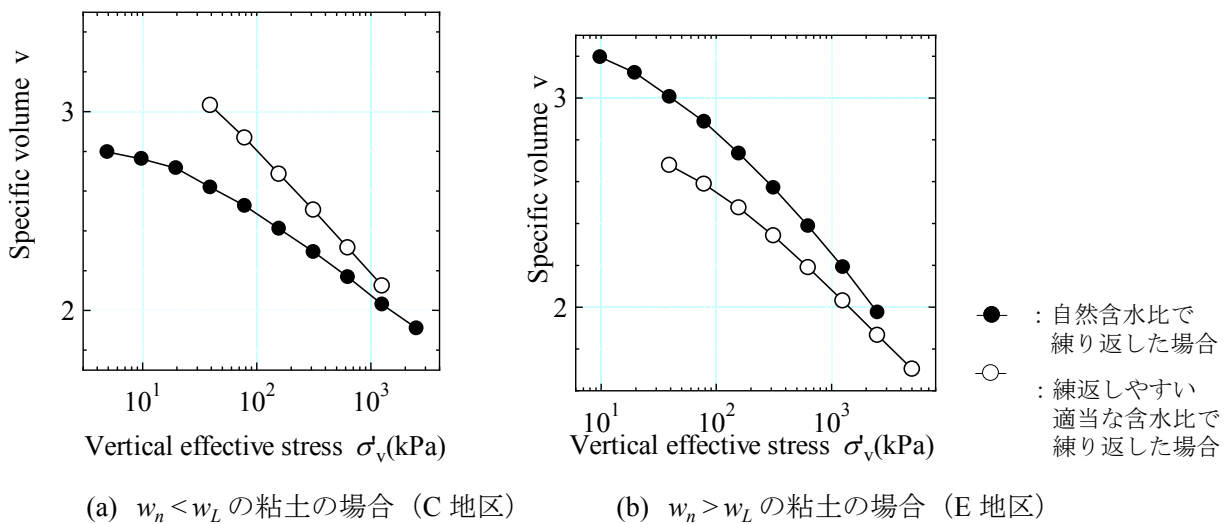


図-6 練返し時の含水比の違いによる圧縮曲線の比較

3. 練返し粘土の標準圧密試験結果に及ぼす「練返し時の含水比」の影響

練返し試料の定義は、「地盤工学用語辞典⁹⁾」によれば、“粘性土試料を室内においてその含水比を変えることなく十分にこね返した後に、モールドに詰めて作製した室内試験用の試料”とされている。これは、一軸圧縮試験において「同じ含水比における非排水条件下での強度比(鋭敏比)」を求めるためである。しかし、前章までに述べたように「骨格構造を完全に喪失した状態の圧縮曲線」を唯一に求めることが目的であれば、統一的に自然含水比で練り返す必要はなく、むしろ練返しに適した含水比を適宜選択する必要がある。

そこで本章では、練返し時の初期含水比を、4種類に調整した練返し粘土を作製し、初期含水比の影響を

調べた。試験に用いた試料は、E 地区において深度 27m から採取された海成沖積粘土で、自然含水比 $w_n=67\%$ 、液性限界 $w_L=103\%$ である。初期含水比として、67% (自然含水比 w_n)、94.5%、122.1%、150.5% で練返しを実施し、同じ応力条件で試験を実施した (含水比が中途半端な値なのは、湿潤試料に加水をする過程で含水比調整が困難であったためである)。なお、自然含水比の試料は非常に固く、練返し時に試料の上から全体重をかけるなど、大きな力が必要であった。

試験結果を図-7 に示す。練返し時の初期含水比が大きいほど、圧縮曲線の傾きは大きく上側に位置する (構造高位)。また、自然含水比のように、初期含水比が低い場合は、圧縮曲線の傾きは小さく下側に位置する (過圧密土的)。十分大きな圧密応力においては、ほぼ同じ比体積になり、骨格構造が圧密応力の増加とともに喪失していく様子が分かる。今回の試験では、試験機の都合上、最大 2508.8kPa までの圧密応力しか載荷できなかったが、さらに大きな圧密応力まで載荷を続ければ、4 つの試験結果は 1 つの曲線になるものと予想される。

図-7 中の点線は、4 つの試験結果の交点を通り、Skempton の式に基づき液性限界から求めた $\tilde{\lambda}$ の直線であるが、この線を基準に、試験により求めた圧縮曲線が上下から漸近していく様子が分かる。すなわち、練返し時の含水比が液性限界よりも小さい 67%、94.5% の場合には下側から、逆に液性限界よりも大きい 122.1%、150.5% の場合には上側から、Skempton の式へと漸近する。今回の試験では、液性限界に完全に等しい含水比を作り出すことができなかったが、液性限界で練り返した粘土は Skempton の式に一致し、傾き一定の圧縮曲線を示すことが予想される。つまり、『液性限界の練返しは、骨格構造を完全に喪失させるのに最も適した含水比である』といえる。

なお、Skempton の実験は、液性限界で統一的に練返し試料を作製している。半世紀以上も前に、このような実験が行われていたことは、偉大な功績として改めて注目すべきものである。

4. 練返し粘土の標準圧密試験結果に及ぼす「初期圧密応力」の影響

「土質試験の方法と解説¹⁰⁾」によれば標準圧密試験における「初期圧密応力」は 9.8kPa であり、以降は 2 倍ずつ 19.6, 39.2, 78.5, 157, 314, 628, 1256kPa と計 8 段階で載荷することが標準とされている (ただし、目的に応じて始めまたは終わりの幾つかの段階を省略したり、上記範囲外の圧密応力を加えても良いことになっている)。初期圧密応力がこのように低いのは、乱れの少ない粘土の圧密試験を行う場合に、原位置の力学特性をより正確に把握するために圧密に伴う乱れを極力少なくする必要があること、また圧密降伏応力を求めるためと考えられる。

しかし、練返し粘土に対しては、乱れは十分に与える必要があり、また試験機内での試料の浮き上がりなどを防ぐためにも、より高応力下での圧密が望ましい。そこで、練返し粘土の圧縮曲線に対して「初期圧密応力」が及ぼす影響を調べた。

試験に用いた試料は、E 地区において深度 10m から採取

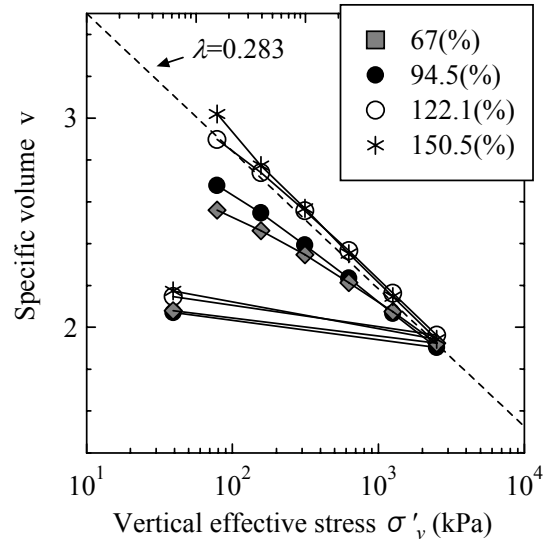


図-7 練返し時の初期含水比の影響

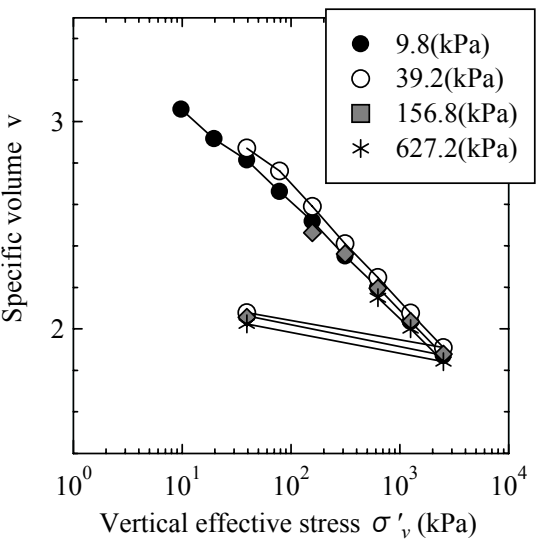


図-8 初期圧密応力の影響

された海成沖積粘土で、自然含水比 $w_n=70.8\%$ 、液性限界 $w_L=99.5\%$ である。本研究では、初期圧密応力として、9.8, 39.2, 156.8, 627.2kPa の 4 種類を想定し、それぞれ 2508.8kPa まで載荷した。4 つの試験で用いた試料の初期状態がすべて等しくなるように、極少量加水した粘土を真空のビニール袋の中で十分に練り返した後、4 分割して各圧密容器に流し込み、練返し試料を作製した（なお、加水後の含水比は $w=78.4\%$ であり、前章の結論からすれば、やや加水量が少なかったことが分かる）。

表-1 練返し粘土の圧縮曲線の傾きと切片

初期圧密応力 σ_{v0} (kPa)	$\tilde{\lambda}$	N
9.8	0.24	2.64
39.2	0.24	2.7
156.8	0.23	2.62
627.2	0.23	2.59

図-8 に試験結果を示す。また表-1 には、十分大きな圧密応力下では骨格構造は完全に喪失した状態にある、と仮定して、SYS カムクレイモデルの応答により求めた $\tilde{\lambda}$, N の値を示す。初期圧密応力によらず、練返し粘土の圧縮曲線はほぼ唯一に得られることが分かる。すなわち、練返し粘土の標準圧密試験では、小さな圧密応力から試験を行う必要はなく、骨格構造を完全に喪失させるためにも、大きな圧密応力まで十分に圧密を行うことが重要である。このことは、載荷段階、すなわち試験期間の短縮も可能であることを示唆している。

5. 結論

自然堆積粘土の力学挙動把握のためには、「骨格構造」概念が重要であり、骨格構造の働きを定量的・定性的に記述するためには、土台となる練返し粘土による正確な試験が必要不可欠である。本研究では、練返し粘土の圧縮曲線 NCL を規定する、傾き $\tilde{\lambda}$ と切片 N の二つの材料定数に着目し、これらを正確に求めるための練返し粘土の作製方法の提案を目的とした。以下に、本論文で得られた知見を示す。

- ・ NCL は本来、土の「種類」で決まり「状態」には依存しない。
- ・ 練返し不十分で骨格構造が残存する場合は、 $\tilde{\lambda}$ や N が「状態」量である自然含水比 w_n に依存してしまい、土の「種類」で一意に決まらない。
- ・ 液性限界 w_L より高い含水比で練り返すと、練返しによる構造の喪失が十分に進まず、練返し粘土の圧縮曲線は嵩張った挙動を示す。その結果、Skempton の実験式により $\tilde{\lambda}$ は大きな値となる
- ・ 液性限界 w_L より低い含水比で練り返すと、練返しに大きな力を必要とした結果、練返し粘土の圧縮曲線は過圧密土的となる。その結果、Skempton の実験式により $\tilde{\lambda}$ は小さな値となる
- ・ 完全に骨格構造を喪失した練返し粘土の作製に、最も適した含水比は、「液性限界」である
- ・ 練返し粘土の圧縮曲線は、初期圧密応力によらずほぼ唯一に得られる。
- ・ 練返し粘土の試験が実施できない、または試験結果が無い場合には、Skempton の実験式は $\tilde{\lambda}$ の簡易同定法として有効である。
- ・ N ~ w_L 間にも線形関係が見られるため、さらなる試験結果の蓄積により関係式を導出することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 財団法人 高速道路技術センター(2004)：軟弱地盤工の設計・施工に関する検討報告書，道路公団委託。
- 2) 三笠正人(1964)：土の工学的分類表とその意義，土と基礎，Vol.12, No.4, pp.17-24.
- 3) 社団法人 地盤工学会(2001)：土質試験 基本と手引き。
- 4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002) : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57.
- 5) 日本道路公団試験研究所(2005)：平成 16 年度 軟弱粘性土の動的特性と変形に関する検討。

- 6) 中日本高速道路株式会社中央研究所(2006)：平成 17 年度 粘性土地盤の物性に関する土質調査.
- 7) A, W, Skempton (1994) : Notes On The Compressibility of clays, Quart. J. Geol. Soc., London, C, pp119-135.
- 8) 社団法人 地盤工学会(1991)：土の試験実習書－第二改訂版－, pp.44.
- 9) 社団法人 地盤工学会(2006)：地盤工学用語辞典.
- 10) 社団法人 地盤工学会(2000)：土質試験の方法と解説.
- 11) 黒田信司, 柴原友樹, 橋本麻以, 酒井宏和, 田代むつみ, 中野正樹, 浅岡顕(2007):練返し粘土の圧縮曲線の決定方法, 平成 18 年度土木学会中部支部研究発表会, pp.235-236.