

粘土の微視構造の S_m 値による解析とその力学挙動への影響に関する研究

芝浦工業大学 (正) 足立 格一郎 (学) 小熊 真吾 (現 前田建設工業株式会社)
 (学) 京野 功 (現 川田工業株式会社) 児玉 潤 古山 貴義

1. はじめに

粘性土の工学的性質は多くの要因に左右され、有効応力概念のみでは説明し得ない現象や挙動を生じる(年代効果など)。その多くは粘性土の微視的な構造に起因しており、粘性土の微視的構造の定性的・定量的評価や、構造と挙動との関係について明らかにすることは重要なテーマになっている。しかし、これまでの研究では力学試験による巨視的挙動の比較検討が主であり、また近年、電子顕微鏡を使用して微視的構造の観察を行なっているが、その多くは構造形態の写真観察と形状の把握にとどまっている。本研究では、不攪乱試料(N試料)、室温再構成試料(R試料)、高温再構成試料(H試料)の3試料に関して、超深度形状測定顕微鏡を使用し粘性土の微視的構造を定量的に評価し、さらに段階載荷による圧密試験を行ない、粘性土の微視的構造が力学的性質に与える影響について考察する。

2. 試験および解析方法

1) 試料について：N試料は、東京都江東区若洲で深度 28~32.85m より採取された有楽町層下部層粘土である。この試料の物理試験結果を表 1 に示す。また、この試料を $d_p = 425 \mu m$ のふるいで裏ごししたスラリー試料から、表 2 のような条件で再構成することにより R 試料、H 試料を作製した。

2) 段階載荷による圧密試験：圧縮性と圧密速度に関する特性を求め、また、圧密による試料の構造変化を考察する目的で実施した。載荷は 10 段階で行なった。試験は N・R・H 試料について、堆積面に対して水平な断面を最大主応力面として圧密する H サンプルと、鉛直な断面を最大主応力面として圧密する V サンプルを 3 つずつ作製して行なった(図 1)。

3) 形状測定顕微鏡観察および表面形状解析：本研究では「超深度形状測定顕微鏡 VK-8500」(キーエンス製)を使用する。この顕微鏡は、走査型電子顕微鏡(SEM)とは違い、蒸着などのサンプル表面処理の必要がないため、対象物本来の状態での観察や計測ができることと表面形状をデジタル化できることが特徴である。測定分解能(Pitch)は $0.01 \mu m$ に設定する。観察は、N・R・H 試料の圧密前および圧密後に対して行なう。観察する際、試料はナイフで 1mm 程度の切り込みを入れた後、含水比 10% 前後になるまで自然乾燥させ、その切り込みに沿って手で割ることとする。表面形状解析は、粘土試料の水平断面および鉛直断面の顕微鏡写真を PC に取り込み、形状解析ソフト「VK Viewer」を使用して行なう。本研究では、観察画面上で指定した 2 点間の直線(長さ $10 \mu m$ に設定)についてプロファイル計測と線粗さ計測(各断面 5 枚の写真より 20 測線のデータを取る)を行ない、粘土の微視的構造を評価した。

3. 結果・考察

1) 圧密試験結果：図 2 に各試料の H サンプルの $e-\log p$ 曲線、図 3 に V サンプルの $e-\log p$ 曲線を示す。図のデータは各試料 3 箇の試験を行ない、それを平均したものである(注：3 試料の結果に大きな差異はない)。初期間隙

表 1 不攪乱試料の物理試験結果

液性限界 $w_L(\%)$	塑性限界 $w_P(\%)$	塑性指数 I_P	土粒子密度 $s(g/cm^3)$	含水比 $w(\%)$
95.2	40.9	54.3	2.680	78.8

表 2 再構成試料の作製

	R 試料	H 試料
載荷装置	ベロフラムシリンダー	
圧密圧力の荷重段階	10 30 70 140 280kPa	20 40 70 140 280kPa
圧密終了確認	段階的に載荷を行なう。ただし、最終荷重は原地盤の圧密降伏応力。 3 t 法によるが、試料の均一性を考慮し、3 t の 1.67 倍の時間とする。	
温度(°C)	24	75
初期含水比(%)	142.8 (不攪乱試料の液性限界の 1.5 倍)	
圧密後含水比(%)	61.0	68.2
総沈下量(mm)	93.06	86.96
圧密時間(min)	10020 (280kPa 時)	4110 (280kPa 時)

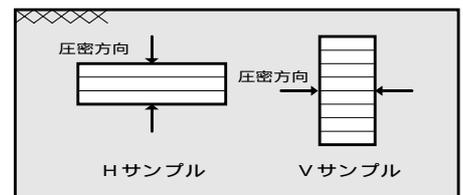


図 1 圧密する試料

キーワード：粘土の微視構造、顕微鏡観察、画像解析、凹凸の平均間隔 S_m 、圧密、再構成試料
 連絡先：〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14 芝浦工業大学土木工学科地盤工学研究室
 TEL 03-5476-3048 FAX 03-5476-3166

比は N 試料が最も大きく、R 試料が低いことがわかる。圧密挙動に着目すると、H サンプルでは、N・H 試料は圧密降伏応力（約 280kPa）付近で降伏し、その後大きな圧縮性を示している。一方、R 試料には降伏点が顕著には現れず、正規圧密領域での圧縮性も小さい。V サンプルでは、どの試料にも降伏点は明確には現れず、漸増的に圧密されている。H サンプルと V サンプルとで挙動が異なることは、水平方向と鉛直方向とで微視的な構造が違うこと（構造の異方性）を示している。挙動が類似している N 試料と H 試料は微視的な構造も類似していると考えられる。

2) 観察・解析結果による粘土の微視的構造：図 4 に N 試料の顕微鏡写真と凹凸の 3 次元表示図を示した。図 5 は、凹凸の平均間隔 S_m の計測結果を図化したものである。 S_m とは JIS に定義されている表面粗さを表すパラメータである。N 試料の水平断面は不規則な方向に凹凸が存在しその数も多い（ S_m の値が低い）。鉛直断面もほぼ同じような表面形状になっている。これは、水平断面と鉛直断面の構造がほぼ同じであることを示している。この結果から、N 試料はベッド（あるいは粘土粒子）が特定な方向の配列を示さない「綿毛構造的」と言える。H 試料の水平断面と鉛直断面は、N 試料と同様の傾向を示すが、凹凸の間隔は N 試料よりもやや大きい。したがって、H 試料はベッドが特定な方向に配列していないが、あまり密な接触をしていない状態の「ランダム構造的」と言える。R 試料の水平断面は、鉛直断面に比し凹凸が少ないことから（ S_m の値が大きい）、R 試料はベッドが水平方向に配列した状態の「配向構造的」と言える。

3) 圧密による構造変化：図 6 は H サンプルの 1254.4kPa での圧密後の S_m 計測結果を図化したものである。図 5 の自然状態時と比較すると、N 試料と H 試料の水平断面は凹凸の平均間隔が大きくなっている。逆に鉛直断面は粗くなっていることがわかる。このことは、ベッドの配向性が高まったことを示している。R 試料は水平断面で粗さが増しているが（ベッドに細かいヒビが入った可能性が考えられる）、配向性は保持されていると判断される。

4. まとめ

表面形状測定顕微鏡での観察および解析（線粗さ・プロファイル計測）によって、粘土の微視的構造を定量的に表すことが可能であることがわかった。H 試料はこれまでに報告されているような巨視的な挙動だけでなく、微視的にも自然粘土に近い構造を再現していると言える。さらに、圧密した試料を解析した結果、高い応力で圧密されるとどの試料も配向性が高まることが明らかになった。圧密試験による各試料の力学的性質は、微視的構造の定量的解析結果を反映しており、両者の間に相関性があると言える。

【参考文献】 JIS B 0601 表面粗さ - 定義及び表示

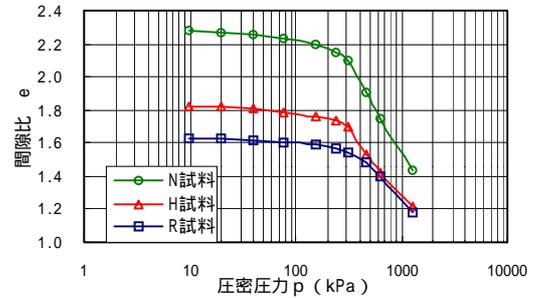


図 2 e-log p 曲線 H サンプル

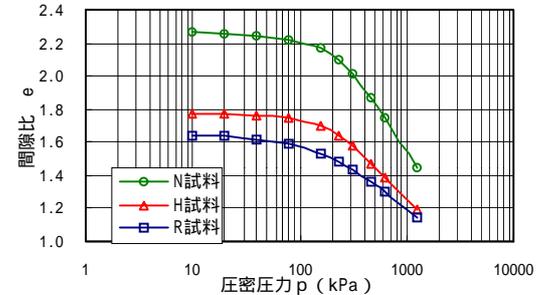


図 3 e-log p 曲線 V サンプル



図 4 (a) 顕微鏡写真(N 試料:水平断面)

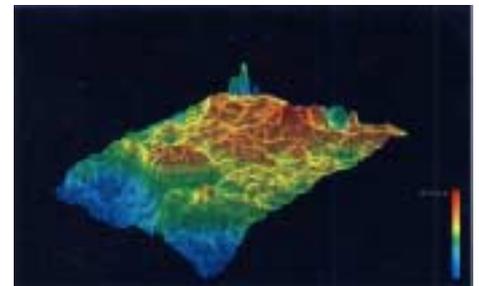


図 4 (b)3 次元表示(N 試料:水平断面)

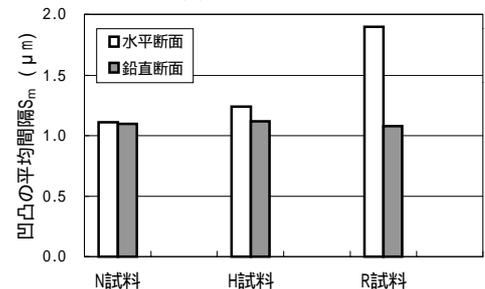


図 5 凹凸の平均間隔 S_m : 自然状態

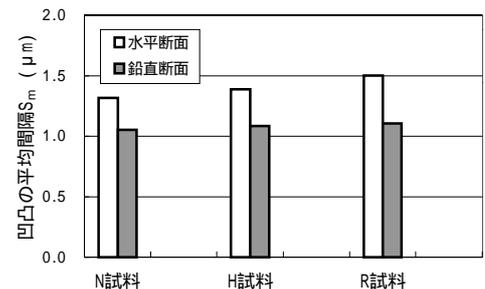


図 6 凹凸の平均間隔 S_m : H サンプル (圧密後)