

間隙溶液の種類を変化させた飽和膨潤性粘土の一次元圧密挙動

東京大学 学生会員 ○平賀 美沙

東京大学 正会員 京川 裕之, 古関 潤一

1. はじめに

不飽和試料の浸水時挙動として議論される膨潤性粘土の力学特性(膨潤挙動)は、本質的には間隙溶液による粘土鉱物の浸透現象に起因することが知られており、飽和土の力学現象として説明することができる。一般的に、膨潤性粘土は間隙溶液のイオン強度が増加すると圧縮、減少すると膨張を生じ、それぞれ浸透圧密、浸透膨潤と呼ばれている。これら膨潤性粘土の浸透現象に着目した既往の検討は少ないうえ、その透水係数が低く、試験に長期間を要するため、浸透現象を含めた膨潤性粘土の力学理論は体系化されていない。本報告では、飽和ベントナイト試料を用い、間隙溶液の浸透による圧密/膨潤試験と通常の荷重載荷による圧密試験を組み合わせて実施し、間隙溶液の種類による一次元圧密特性への影響について調べた。

2. 試料・試験方法

試験装置の概要図を図1に示す。モンモリロナイト含有率の高い粉末状ベントナイト(クニピアF)に含水比 $w=500\%$ 程度になるよう精製水を加え、十分に練返した後、裏ごしと減圧脱気を行ってペースト状の試料を作製した。これを直径60mm、高さ5mmの円盤型に整形して供試体とし、圧密容器に設置した。試料の流出を防ぐため、圧密容器のポーラスメタルと供試体との間に、上下2枚のメンブレンフィルターを挿入した。なお、圧密試験中にフィルターにも微小な圧縮が生じていたため、フィルターの圧縮性を別途試験で計測し、その値を用いて供試体の圧縮量を補正した。

供試体設置時に、排水経路と圧密容器を精製水で満たし、供試体を飽和状態とした。その後、所定の圧密圧力を加える通常の段階載荷による圧密試験と、間隙溶液を精製水から1mol/Lの食塩水に置換する浸透圧密試験、1mol/Lの食塩水から精製水に置換する浸透膨潤試験を組み合わせて実施した。載荷/浸透圧密の各段階の終了判定は、変位計の値が一定時間(概ね6時間)以上変化しないことを基準とした(載荷過程では、すべての段階で \sqrt{t} 法による一次圧密終了時間の倍以上の載荷時間となった)。各ケースの試験条件をそれぞれ表1に示す。

3. 試験結果と考察

3.1 圧縮曲線

各試験ケースの圧縮曲線を図2に示す。膨潤性粘土の圧縮曲線は、圧密圧力が增大すると、正規圧密曲線の途中で変曲点を生じ、圧縮性を低下する特徴をもつ。図中の0→1(Case2, 3)は浸透圧密過程、3→4'(Case3)は浸透膨潤過程を表す。浸透圧密過程では著しい圧縮が生じたのに対し、浸透膨潤過程は間隙比の変化としては小さい(3.2参照)結果となった。

次に、浸透圧密が圧密・膨潤特性に与える影響について考える。Di Maio (1996)¹⁾によると、浸透圧密の影響で、ベントナイトの圧縮特性が変化することが示されている。一方、本

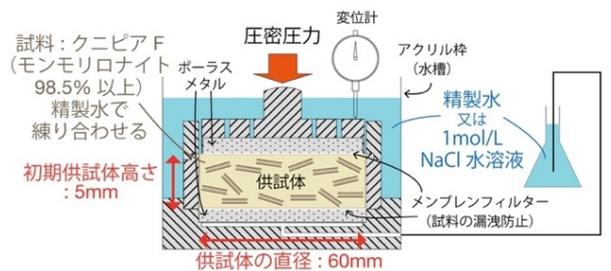


図1 試験装置の概要

表1 各試験ケースの試験条件

Case	試験条件
Case1	載荷→除荷→再載荷 (精製水のまま圧密試験)
Case2	浸透圧密→載荷→除荷→再載荷
Case3	浸透圧密→載荷→除荷→浸透膨潤

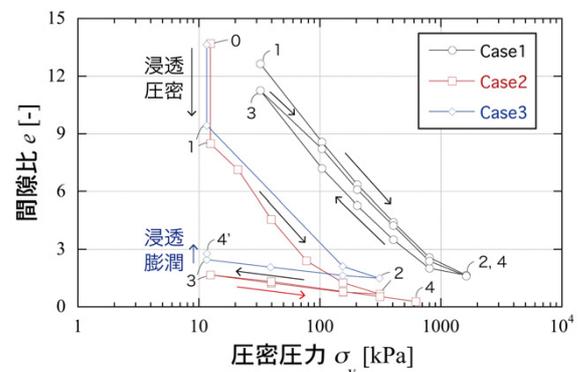


図2 各試験ケースの圧縮曲線

キーワード ベントナイト, 圧密, 膨潤, 間隙溶液

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学 土質/地盤研究室 TEL:03-5841-6137

報告では、間隙溶液が精製水のまま通常の圧密試験を実施した Case1 と、初期段階で間隙溶液を食塩水に置換した Case2, 3 の荷重過程 (1→2) の圧縮曲線の傾きがほぼ等しく、荷重過程の圧縮性は変化していない。

浸透圧密過程では、ナトリウムイオン濃度の上昇により供試体は鉛直方向だけでなく、側方方向にも収縮する。このとき、一次元圧密試験では側壁が固定されているため、側方収縮によって供試体側方では壁面からの剥離が生じると考えられる。その後の荷重過程 (初期) では、側方拘束のない土試料の鉛直沈下量を計測することになり、得られた結果はその圧縮性を過大評価する可能性がある。以上から、本報告においても浸透圧密によって圧縮性は小さくなるが、側方収縮の影響を受けてその圧縮性の減少がキャンセルされたと考えられる。圧密容器解体時には、浸透圧密を行って取り出した供試体のみ、圧密リングがスムーズに外れ、供試体が容器内に残った (図3) ことから、側方収縮が実際にも確認できた。

除荷時 (2→3) では、一般に膨潤性粘土は著しい膨潤性を示す (Case1) のが特徴だが、間隙溶液を食塩水にした Case2, 3 で顕著に減少した。これは、間隙溶液イオン濃度の上昇による浸透圧密の結果、粘土鉱物粒子が凝集した構造を形成することで、膨潤性粘土自体の土粒子骨格の剛性と強度が増加した (ポアソン比や限界応力比の変化) と説明できることを既報²⁾で示している。

3.2 供試体変位・圧密度の経時変化

図4は、各時刻における変位を各段階の最終沈下量で割った値を圧密度として定義し、各圧密過程について圧密度の経時変化を比較した図である。荷重圧密では荷重開始直後から沈下が生じ始めるのに対し、浸透圧密では溶液置換直後から100分程度までの変位は僅かであり、沈下の発生が遅れている。荷重圧密では荷重直後から供試体全体の過剰間隙水圧が上昇するのに対し、浸透圧密では溶液置換後まず陽イオンの拡散・移流が生じた後、粘土鉱物と接する間隙溶液の濃度に応じて体積収縮が生じるので、圧縮が生じるまでに時間を要するためと考えられる。また、荷重圧密の段階同士を比較すると、溶液浸透を行ったケースのほうが沈下が遅い。これは、間隙比が低下したことに加えて、粘土鉱物粒子の凝集によっても透水性が低下し、より排水に時間がかかるようになったためと考えられる。

図5に浸透圧密/膨潤過程の体積ひずみ (正が圧縮) の経時変化を示す。いずれも溶液置換後数100分で圧密/膨潤が始まる。一方、浸透圧密は10,000分経過後には変形が収束するのに対して、浸透膨潤は100,000分経過後も変形は収束しておらず、最終変位 (間隙比) は確定していない。

4. まとめ

予圧密を省略し供試体高さを小さくすることで、試験時間を短縮して膨潤性粘土の浸透圧密/膨潤、荷重圧密を実施した。溶液浸透の有無は主に除荷・再荷重過程に影響し、ナトリウムイオン濃度の上昇は除荷時の膨潤性を低下させる。浸透圧密や荷重圧密によって粘土粒子が凝集している場合、体積変化に長時間を要する傾向がある。側方収縮量の評価や、経過の観察に長時間を要する浸透膨潤過程の考察は、今後の課題である。

参考文献 1) Di Maio C., Geotechnique, 46(4), 695-707, 1996. 2) 平賀ら, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.

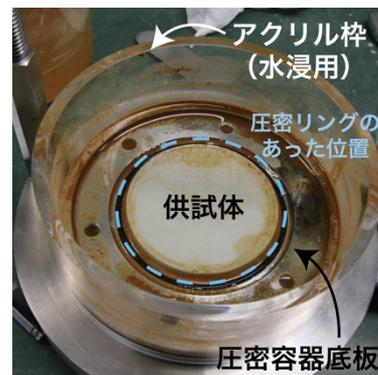


図3 浸透圧密後の圧密容器解体時の様子

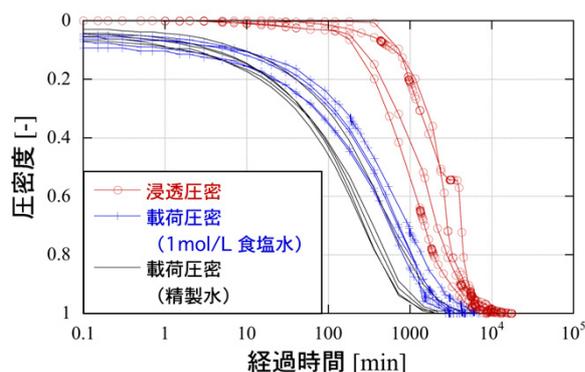


図4 各圧密過程の圧密度の経時変化の比較

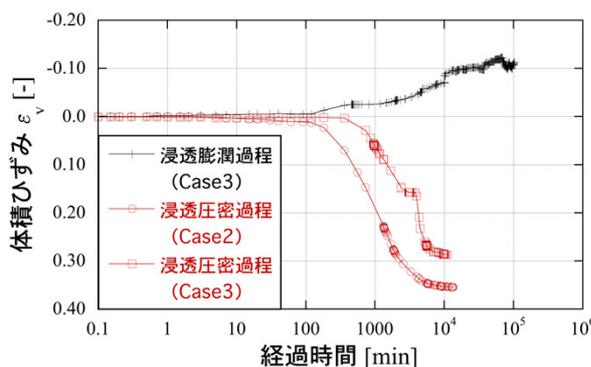


図5 浸透圧密/膨潤過程の体積ひずみの経時変化