

セメント添加・カルシウム溶脱によって人工的に年代効果を付加した粘土供試体の力学挙動

粘性土, セメンテーション, 溶脱

名古屋大学大学院

○中井健太郎, 古市実希, 野田利弘

1. はじめに

沖積平野は、第4紀の沖積世に堆積した未固結の層(沖積層)から構成されているが、緩い砂質土や高含水比で間隙比の大きい有機質土・泥炭、鋭敏な粘土・シルトで構成され、軟弱な状態で堆積していることが多い。これら軟弱な地盤では砂質土の液状化や粘性土の圧密沈下など、地盤工学的問題が生じやすいが、国土の狭い日本では、必然的に軟弱地盤上で生活することが必要となる。種々の地盤工学的課題に対処するためには、自然堆積状態にある土の力学特性を正確に把握することが重要であるが、堆積時のばらつき、サンプリング時の乱れや採取コストなどの制約から、自然堆積時と同じ状態で同質な供試体を数多く準備することは難しい。一般的には実験室で作成した再構成試料を用いて室内試験を実施することが多いが、再構成試料の場合、自然堆積土の堆積過程において長い年月をかけて発達した年代効果の影響が考慮できず、自然堆積土が示す複雑な力学挙動とは異なることが知られている。

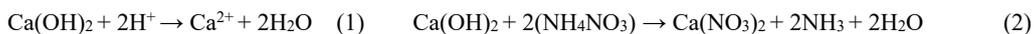
年代効果の再現方法として、これまでに微少量のセメント添加¹⁾などや高温条件下での再圧密²⁾など、様々な取り組みが行われてきている。本報では、海成粘土の形成過程に着目した新たな供試体作成方法を提案する。つまり、海底地盤ではプランクトンの遺骸などからなる炭酸カルシウム等による化学的結合が進展し、炭酸カルシウム含有率の増加とともに固結化が進む。そのため、海底から生じた地盤であればカルシウムを多く含んだ土であることが多く、セメンテーション作用が働く。さらに、長い年月の中で海底地盤は海進・海退作用や地盤隆起によって陸化し、地盤中を地下水がゆっくり流動することで間隙内の塩分やカルシウムが溶脱される。溶脱作用を受けると、せん断強度が低下することが知られている。本報ではこの「セメンテーション作用」と「溶脱作用」に着目し、セメント添加した粘性土供試体を硝酸アンモニウム水溶液に浸漬してカルシウム溶脱させる。また、その供試体を用いて各種室内試験を実施し、軟弱な自然堆積粘性土の特徴と比較した。なお、軟弱粘性土に共通する特徴として「高含水比」な状態にあり、圧縮挙動における「嵩張り」と高い圧縮性、せん断挙動における「ひずみ軟化挙動」を示すことが知られている³⁾。

2. 供試体作製方法

実験用母材として用いた粘性土試料の物理特性を表1に示す。また、本研究における供試体作成手順を以下に示す。

- 1) 含水比が112% (液性限界の2倍)のスラリー状の粘性土試料に、乾燥質量比で5%のセメント(早強ポルトランドセメント)を添加し、10分間しっかりと攪拌する。早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントに比べて、早期に強度発現するため養生期間を短縮できる。
- 2) 攪拌終了後、振動を与えて空気を抜きながら、試料をプラスチックモールドに投入する。
- 3) ブリーディングによって上昇してきた水をヘラで取り除き、表面を平らに整えて2週間水中養生させる。
- 4) 供試体をモールドから取り出した後、1.0mol/lの硝酸アンモニウム水溶液に1週間浸漬させる(1週間の浸漬によって、内部のPH値は均質となり、カルシウム溶脱が供試体内部にまで行きわたる)。

このように作製した供試体に対して、各種物理試験および力学試験を実施した(物理試験結果は別報⁴⁾にて)。なお、ここで言う溶脱現象とは、セメントの水和反応の過程で生成したCH(水酸化カルシウム)とCSH(カルシウムシリケート水和物)中のカルシウムイオンが、水溶液とセメント表面付近の濃度平衡によってカルシウムの濃度の低い水溶液中へ溶け出すことであり、その過程で生じる化学反応は式(1)(2)に示すとおりである。三浦ら⁵⁾はカルシウム溶脱によって、セメントペーストやモルタルが強度低下を示すことを示しており、青山ら⁶⁾は硝酸アンモニウム水溶液を用いると純水に浸漬させる場合の100~300倍速く溶脱が促進されることを示している。なお、硝酸アンモニウム水溶液を使用すると、式(2)中に示される水和生成物Ca(NO₃)₂は潮解性が高く水に溶けやすい特徴を有するため、供試体に結晶として付着して残らないという利点も有する。



3. 実験結果

粘土母材の「再構成試料」、スラリー粘土にセメントを添加して養生した「セメント添加試料」、セメント添加試料をカルシウム溶脱させた「溶脱試料」を用いた標準圧密試験結果を図1に示す。再構成試料とセメント添加試料を比較すると、圧密降伏応力はほぼ等しいが、セメント添加試料の初期比体積が大きいことがわかる。圧密降伏応力以降の圧縮性が増加していることから、セメント添加によって間隙の大きい骨格構造を形成したと考えられる。一方、セメント添加試料

表1 実験に用いた粘性土の物性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68
液性限界 w_L (%)	56.4
塑性限界 w_p (%)	23.7
細粒分含有率 (%)	98.2
粘土分含有率 (%)	87.2

と溶脱試料を比較すると、溶脱によって圧密降伏圧力が減少している。セメントを添加しただけだと、固化作用が強すぎるため、高応力を作用させないと骨格構造が劣化しない（圧密降伏応力に達しない）が、溶脱することによって骨格構造が壊れやすくなり、圧密降伏応力が低下したと考えられる。図中にはそれぞれの供試体の練返し試料の実験結果から求めた正規圧縮線も示しているが、溶脱試料は軟弱粘性土に特徴的な正規圧縮線の外側への嵩張った圧縮挙動を示す。

続いて、非排水三軸圧縮試験結果を図2に示す。拘束圧50kPa（300kPaで等方圧密した後、50kPaまで等方除荷）で3種類の供試体を比較する。有効応力パスを見ると、再構成試料は、塑性膨張を伴う硬化挙動（ p' 増加を伴う q の増加）を示しながら限界状態に達する典型的な過圧密粘土の挙動を示す。セメント添加試料は、ピーク強度が再構成試料よりも増加し、ピーク後に q は減少に転じるが、応力ひずみ曲線はガタついて脆性的な挙動である。実際、せん断中の供試体の変形の様子を観察すると、軸ひずみ3~5%で明確なクラック/せん断面が入る。一方、溶脱試料はピーク強度が低下することに加え、せん断面が入ることなく樽型に変形しながら滑らかな応力ひずみ曲線を描く。また、有効応力パスを見ると、塑性膨張を伴う硬化挙動（ p' 増加を伴う q の増加）の後に、塑性圧縮を伴う軟化挙動（ p' 減少を伴う q の減少）に転じる「巻き返し」を示す。溶脱試料に対しては、正規圧密状態（300kPaで等方圧密）、若干過圧密状態（300kPaで等方圧密した後150kPaまで等方除荷）における非排水三軸圧縮試験結果も同時に示す。正規圧密状態においては塑性圧縮を伴う硬化挙動（ p' 減少を伴う q の増加）から塑性圧縮を伴う軟化挙動（ p' 減少を伴う q の減少）に転じる「拌み」を示す。この「巻き返し」や「拌み」で見られるひずみ軟化は軟弱粘性土に特徴的なせん断挙動である。

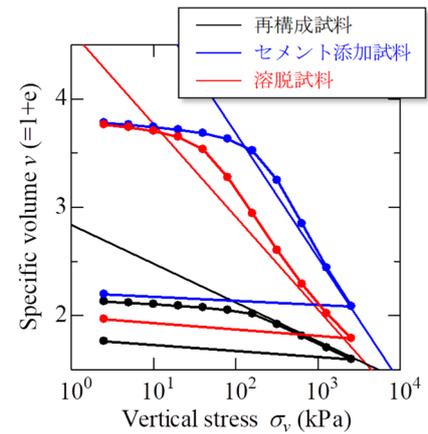


図1 標準圧密試験結果

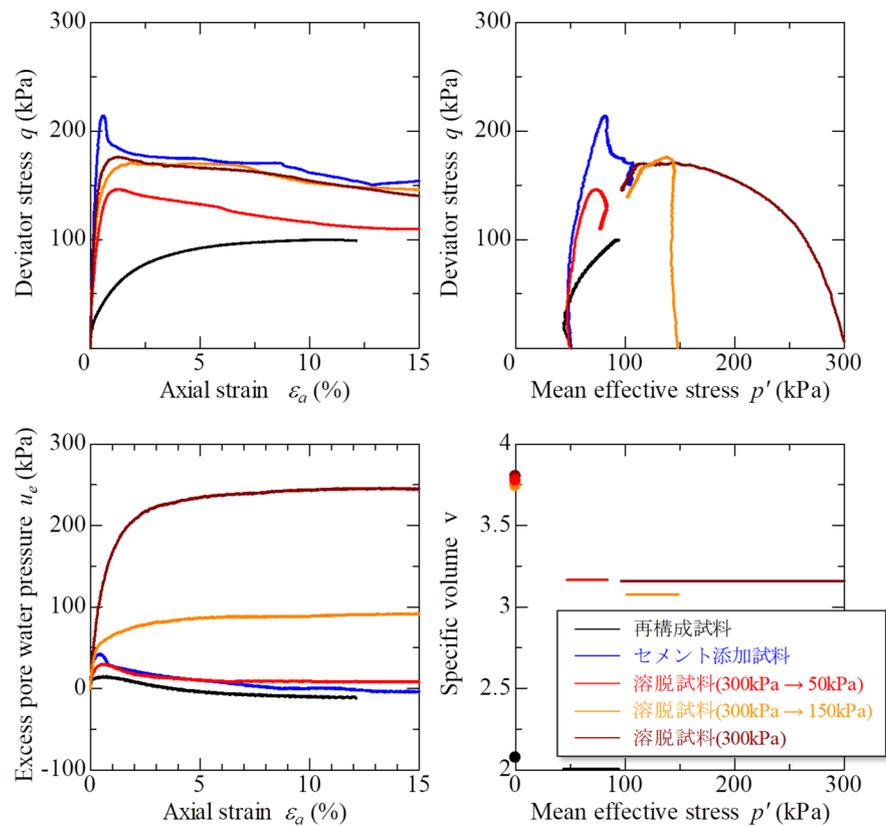


図2 非排水三軸圧縮試験結果

4. おわりに

本報では、海成粘土の形成過程に着目し、「セメント添加」とその後の「カルシウム溶脱」によって人工的に年代効果を付加した粘土供試体の作製方法を提案した。また、提案方法で作成した粘土供試体を用いて標準圧密試験および非排水三軸圧縮試験を実施した。その結果、軟弱粘性土に特徴的な高含水比（大きな比体積）な状態、圧縮挙動における嵩張り高い圧縮性、せん断挙動におけるひずみ軟化挙動を示すことを確認し、人工的に、自然堆積した軟弱粘性土の特徴と類似した供試体の作製に成功した。今後は、粘土母材の物理特性や硝酸アンモニウムの浸漬時間の影響を検討していく。

参考文献 1) 土田孝ら, 少量のセメントを添加し再圧密した..., 地盤工学ジャーナル, 9(1), 71-84, 2013. 2) 土田孝ら, 高温再圧密による海成粘土の..., 港湾技術研究所報告, 28(1), 121-147, 1989. 3) Nakano, M. et al., A description of mechanical behavior of clay..., ASCE Geotechnical Special Publication 143, 136-153, 2003. 4) 中井健太郎ら, セメント添加・カルシウム溶脱による軟弱粘性土供試体..., 第77回土木学会年次学術講演会概要集, 投稿中 5) 三浦泰人ら, NaCl溶液に浸漬したセメントペーストおよびモルタルの..., コンクリート工学論文集, 21(3), 77-86, 2010. 6) 青山琢人ら, カルシウム溶脱を考慮したセメント硬化体の..., セメント・コンクリート論文集, 66(1), 311-318, 2012.