

セメント添加・カルシウム溶脱による軟弱粘性土供試体の作製

名古屋大学 学生会員 ○古市実希

名古屋大学 正会員 中井健太郎, 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、このうち後背湿地や三角州、低湿地などの地形では、海成または陸成の粘土や有機質土など、軟らかい層が厚く堆積していることが多く、軟弱地盤と呼ばれる。軟弱地盤上には人為的に重い構造物を造らないことがよいが、国土の狭い日本では、必然的に用地的・環境的側面から、軟弱地盤上への建設も余儀なくされ、地盤工学的問題を生じることも少なくはない。種々の地盤工学的課題に対処するためには、現地に堆積する軟弱粘性土の力学特性を正確に把握することが重要であり、その実現のためには、自然堆積状態のまま乱さず採取した不攪乱試料を用いて、各種計測および系統的な実験を行うことが求められる。しかし、堆積時の元々のばらつき、サンプリング時の乱れや採取コストの問題等の制約から、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。そこで、本研究では自然堆積した軟弱粘性土と同等の特徴を有する供試体を人工的に作製することを試みた。なお、軟弱粘性土に共通する特徴として「高含水比」かつ「鋭敏」な状態にあり、圧縮挙動における「嵩張り」、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¹⁾。

2. 供試体作成方法

海成粘土の形成過程に着目して供試体作成方法を検討した。海成粘土は、細粒土が海水の中に流入して堆積することで形成された間隙の大きな堆積土である。また海底地盤では、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ため、セメンテーション作用が働くことが考えられる。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。溶脱によってせん断強度が低下し、鋭敏で軟弱な粘土が形成されている。以上より「セメンテーション」と「溶脱」が軟弱粘性土形成の重要なポイントと考え、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、カルシウム溶脱させることで軟弱粘性土供試体の作製を試みた。本研究で用いた粘性土試料の物理特性を表1に示すとおりである。

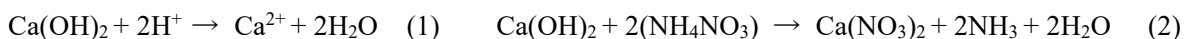
表1 実験に用いた粘性土の物性

土粒子密度 ρ_s	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

- 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。
- 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。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、式(1)、式(2)のように化学反応が進む。三浦ら²⁾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いる。また、青山ら³⁾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場合、式(2)中に示される水和生成物 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ は潮解性が非常に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. 非排水三軸圧縮試験

図 1 に非排水三軸圧縮試験結果を示す。粘性土試料を鉛直応力 200kPa で予圧密して作成した再構成供試体、セメント添加したが溶脱していない供試体、そしてセメント添加後にカルシウム溶脱させた供試体の 3 種類である。いずれも 300kPa で等方圧密した後で 50kPa まで等方除荷して過圧密状態とし、軸ひずみ速度 0.0075%/min で非排水せん断した。実験結果を比較すると、セメント添加によって比体積が大きくなっていることがわかる。また、溶脱によって比体積が若干増加することも見取れる。有効応力パスを見ると、再構成供試体は、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。カルシウム溶脱無しの場合(セメントを添加しただけ)は、ピーク強度が大きくなり、 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を示す。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% で供試体に明確なクラック/せん断面が入る。一方、カルシウム溶脱した供試体は、せん断面が入ることなく樽型に変形し、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) に転じており、軟弱粘性土に典型的な「巻き返し挙動」を示している。

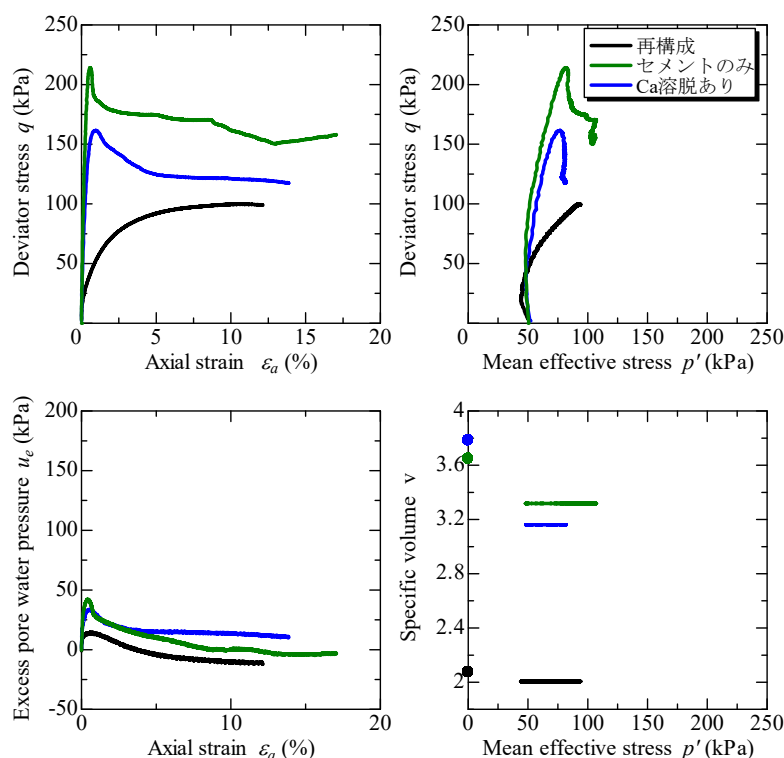


図 1 非排水三軸圧縮試験結果

4. おわりに

海成粘土の形成過程に着目し「セメント添加」、「カルシウム溶脱」を行うことで、自然堆積した軟弱粘性土と同等の特徴を有する供試体の作製を試みた。結果として、軟弱粘性土に特徴的な塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す供試体を作製することができた。紙幅の都合から省略したが、研究発表会では、セメント添加・カルシウム溶脱が圧縮挙動に与える影響についても示す。

参考文献

- 1) Nakano, M., Nakai, K. and Asaoka, A., A description of mechanical behavior of clay..., ASCE Geotechnical Special Publication No.143, pp.136-153, 2003.
- 2) 三浦泰人, 佐藤靖彦, 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.
- 3) 青山琢人, 胡桃澤清文, 名和豊春, 村上祐翔, 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.