

# セメント固化後のカルシウム溶脱による軟弱粘性土供試体の作製の試み

粘性土, セメンテーション, 溶脱

名古屋大学 ○中井健太郎, 水上孔太, Imran Khan, 野田利弘

## 1. はじめに

新潟地震(1964)やアラスカ地震(1964)で砂質地盤の液状化被害が注目されて以降, 地盤工学分野における地震被害予測という点, 砂質地盤の地震時の不安定現象, すなわち液状化が中心であり, 粘性土地盤はあまり注目されてこなかった. そのため, 粘性土は  $N$  値ゼロの場合や砂/シルト分を多く含む場合であっても, 「粘性土」と分類された途端, その地盤の地震被害は発生しない/考えなくてよいとされ, 粘性土は事実上「弾性体」としてモデル化されてきた. 一方で, メキシコ地震(1957, 1985)やネパール地震(2015), 宮城県沖地震(1978), 新潟県中越沖地震(2007)など, 過去の地震被害を精査していくと, 砂質地盤の液状化被害ほどではないにしても, 国内外で粘性土地盤の地震被害も数多く報告されている. しかしながら, どのような粘性土地盤でも地震被害が発生しているわけではなく, 地震被害が発生した粘性土地盤に共通する点には, 粘性土が「高含水比」「鋭敏」「軟弱」な状態にあったことが挙げられる. したがって, このような軟弱粘性土については, 静的挙動に加えて動的挙動の把握も重要であるが, 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重要である. しかし, 堆積時の元々のばらつき, サンプリング時の乱れの影響や採取コストの問題等の制約から, 軟弱粘性土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, セメンテーション作用に注目し, 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. セメントを粘土試料に直接添加すると, 固化作用が強すぎて脆性的な変形を示すが, 「水和反応を制御したセメント添加」もしくは, セメント固化させた供試体を「カルシウム溶脱」させることで, セメントの固化作用を低減させる. 本報では, カルシウム溶脱がセメント添加粘性土の力学特性に及ぼす影響を検討した結果を述べる.

## 2. 供試体作製方法

本研究では, 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. 以下に供試体作製手順を示す. なお, 母材となる粘性土の物理特性は表-1に示す通りである.

表-1 母材粘土の物理特性

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.70
液性限界 $w_L$ (%)	45.8
塑性限界 $w_p$ (%)	25.4
細粒分含有率 (%)	95.0
粘土分含有率 (%)	46.5
10%粒径 $D_{10}$ (mm)	0.001
20%粒径 $D_{20}$ (mm)	0.003
50%粒径 $D_{50}$ (mm)	0.013

- ① 含水比を 75% (液性限界の 1.5 倍) に調整したスラリー状の試料に, 乾燥質量比で 5% の早強ポルトランドセメントを添加し, よく攪拌する.
- ② 直径 50mm, 高さ 100mm のプラスチックモールドに出来るだけ空気が入らないように試料を投入する.
- ③ 表面は少し多めに盛っておき, ブリーディング作用によって出てきた水分と一緒にヘラで切って, 水平に整える.
- ④ モールドをラップで包んだのち, 2 週間水中養生させる (2 週間の養生でせん断強度はほぼ収束する).
- ⑤ 供試体をモールドから取り出した後, 0.5mol/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).

このように作成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る. 三浦ら<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>によると, 硝酸アンモニウム溶液を用いると水に浸漬させる場合の約 1700 倍速く溶脱が促進されることを示している.

## 3. 物理試験結果

カルシウム溶脱の有無による物理試験結果を表-2 に示す. 自然含水比とは供試体作製時の含水比であり, 物理試験は一度作製した供試体を繰り返してから実施した. カルシウム溶脱によって土粒子密度に変化はないが (ここでは, 水和生成物は土粒子として計算), 液性限界が減少していることがわかる. 特徴的なのは, カルシウム溶脱によって自然含水比が増加しており, 結果として, 液性指数が 4.0 以上と非常に高含水比状態の供試体となっている. 実際, 手で捏ねると自立していた供試体が容易にスラリー状へと変化した.

表-2 Ca 溶脱による物理特性の変化

	Ca 溶脱無	Ca 溶脱有
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.77	2.76
液性限界 $w_L$ (%)	53.2	42.8
塑性限界 $w_p$ (%)	30.2	30.8
塑性指数 $I_p$	23.0	12.0
自然含水比 $w_n$ (%)	70.4	80.6
液性指数 $L$	1.75	4.15

Experimental attempt to produce soft clayey specimen by leaching of calcium followed by cement solidification.

Kentaro Nakai, Imran Khan, Kota Mizukami and Toshihiro Noda (Nagoya University)

## 4. 力学試験結果

### 4.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験結果を図-1に示す。ここでは、硝酸アンモニウム溶液の濃度を0.2, 0.5, 1.0 mol/lと3通りで実施している。カルシウム溶脱によって、一軸強度および初期剛性が著しく低下していることがわかる。一方で、溶液濃度による違いは見られない。このことは、十分な時間浸漬させることで、カルシウム溶脱の程度は溶液濃度によらず同程度に起こることがわかる。

### 4.2 標準圧密試験

標準圧密試験結果を図-2に示す。カルシウム溶脱によって若干の比体積の増加に加えて、セメント添加による高い圧縮性は保ったまま、先行圧密圧力が小さくなっていることがわかる。同図には、カルシウム溶脱した試料を捏ね繰り返して作成した練返し試料の標準圧密試験結果も併記している。カルシウム溶脱供試体は練返し試料に比べて、同じ鉛直応力下で大きな比体積を有する「嵩張った」状態にあり、鉛直応力の増加とともに練返し圧縮線に漸近していく。

### 4.3 非排水三軸圧縮試験

等方圧密圧力30kPaと100kPaで実施した非排水三軸圧縮試験結果を図-3に示す。カルシウム溶脱の有無を同時に示している。カルシウム溶脱無しの場合（セメントを直接添加しただけ）、応力-ひずみ曲線はガタついて脆性的な挙動を示すが、カルシウム溶脱した場合は滑らかな曲線を描く。せん断中の供試体の変形の様子を見てみると、溶脱無しの場合は軸ひずみ3~5%で供試体を縦に貫くクラック/せん断面が入ってしまうが、溶脱有りの場合は樽型に変形し、延性的な挙動を示していた。有効応力パスに目を向けると、カルシウム溶脱した供試体は、若干ではあるが、滑らかな軟化挙動（過剰間隙水圧変化を伴う軸差応力の減少）を示しており、カルシウム溶脱によって、著しくせん断強度が低下する。

## 5. まとめ

セメントを粘土試料に直接添加すると、固化作用が強すぎて脆性的な変形を示すが、セメント固化させた供試体を「カルシウム溶脱」させることにより、自然堆積した軟弱粘性土と類似の以下の挙動を示す供試体を人工的に作製することが可能となった。①液性指数の大きい高含水比状態、②高い鋭敏性、③圧縮挙動において練返し土の正規圧密線の外側（「不可能領域」）に嵩張った挙動、および④せん断挙動における滑らかな応力-ひずみ曲線と（若干の）軟化挙動。

参考文献 1) Imran Khan et al. (2019): Experimental attempt to produce soft clayey specimen by adding hydration reaction controlled cement, 本誌. 2) 三浦泰人, 佐藤靖彦 (2010): NaCl溶液に浸漬したセメントペーストおよびモルタルの引張り軟化特性評価, コンクリート工学論文集, 21(3), 77-86. 3) 青山琢人, 胡桃澤清文, 名和豊春, 村上祐翔 (2012): カルシウム溶脱を考慮したセメント硬化体の物質移動予測モデルの構築, セメント・コンクリート論文集, 66(1), 311-318.

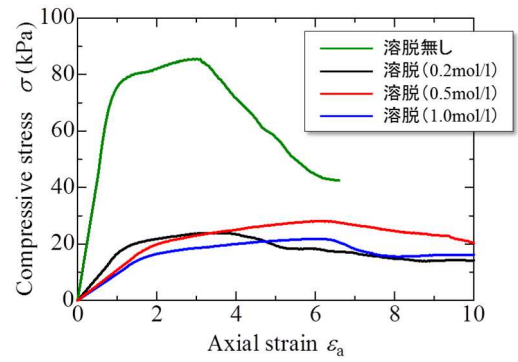


図-1 一軸圧縮試験

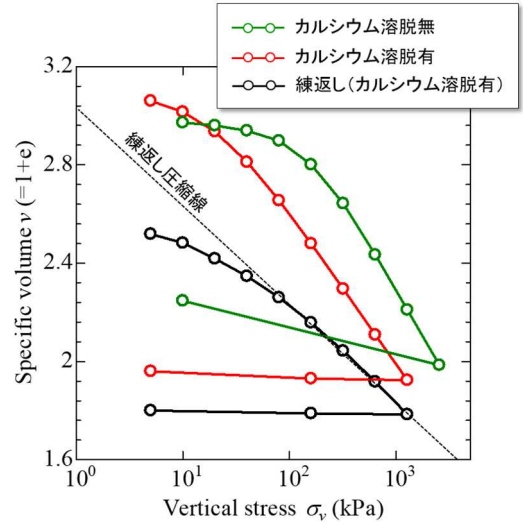


図-2 標準圧密試験

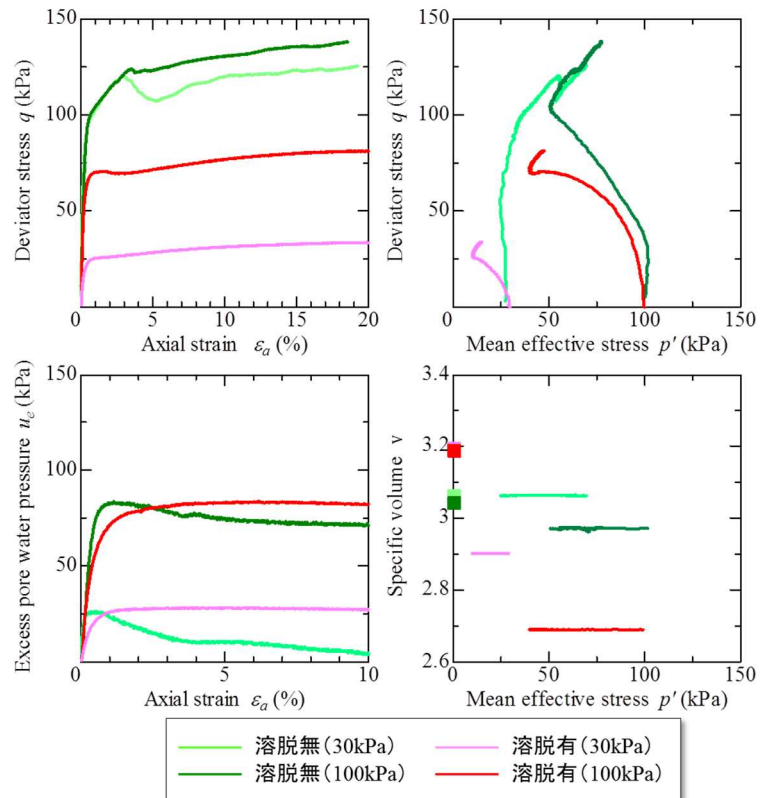


図-3 三軸圧縮試験