

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04348

研究課題名（和文）沿岸部軟弱粘土地盤地帯における深層混合処理地盤の長期耐久性の解明

研究課題名（英文）Durability of the cement-treated clay ground constructed in coastal area

研究代表者

末次 大輔（Suetsugu, Daisuke）

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：30423619

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：セメント処理土に塩分を含む地下水が流入し始めると透水性が低下する。さらに塩分が流入し続けると透水性は高くなっていく。この現象はカルシウム溶脱に伴い処理土中の間隙径が大きくなっていくことによるものである。セメント処理土からカルシウムが溶脱すると膨張性から圧縮性を示す状態へ徐々に変化し、セメント処理土のせん断強さは低下していく。せん断強さが急激に低下する残存カルシウム量が存在し、それは混合処理時のセメント添加量に依存する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水と接触するセメントや石灰で混合処理された土は固化成分のカルシウムの溶脱が促進され劣化が進行する。そのメカニズムはほぼ明らかにされてきたが、劣化の進行に伴う力学的特性の変化はほとんど明らかにされていなかった。本研究では劣化の進行に伴う処理土の透水性と強度変形特性の変化を明らかにした。これらの成果は固化処理工法で安定化された地盤の長期的な安定性の理解ならびに評価手法の開発に資する知見である。

研究成果の概要（英文）：When saline groundwater begins to flow into cement-treated soil, its permeability decreases. As salt continues to flow into the treated soil, the permeability increases. This phenomenon is caused by the improved pore size of the treated soil as calcium leaches out. As calcium is leached from the treated soil, the soil gradually changes from expansive to compressible, and the shear strength of the treated soil decreases. A residual amount of calcium that causes a rapid decrease in shear strength exists, which depends on the amount of cement added when mixing the soil.

研究分野：地盤工学

キーワード：セメント処理土 透水性 強度 劣化 海水

1. 研究開始当初の背景

粘性土地盤中に石灰やセメントで柱体等の構造物造成して地盤を安定化させる技術は、1967年以降様々な工法が開発され、適用事例も飛躍的に増加した。設計・施工法のマニュアルも発刊されるなど、軟弱地盤対策の主要な技術の1つとなっている。一方で、高度経済成長期に建設されたコンクリート橋梁をはじめとした各種構造物等はメンテナンスの時期に差し掛かっており、急ピッチで維持管理技術の研究開発、ならびに維持補修工事が全国的に行われている。混合処理地盤も古いものでは40年以上経過しており、これらの混合処理地盤も例外なく、健全度を評価し、不具合が生じれば適切な方法で維持していかなければならない。沿岸部に位置する低平地の軟弱粘土地盤地帯では、石灰処理地盤の変質・変状に起因する感潮河川堤防からの漏水や堤体内部でのクラック発生など、粘土地盤の圧密や盛土自体の圧縮沈下では説明できない変状が徐々に表面化してきている。これらの現象は海水成分の浸透によるセメントおよび石灰による混合処理土の劣化に起因するもので、そのメカニズムは明らかにされつつある。混合処理した地盤上に構築された土構造物等の長期的な安定性はその地盤の耐力に大きく依存するが、劣化が進行する混合処理地盤の長期的な耐力の低下、それに影響を及ぼす劣化処理土と周辺粘土の力学的相互作用は未解明の部分が多い。

2. 研究の目的

セメントならびに石灰処理土はカルシウムの溶脱に伴い徐々に軟弱化する。軟弱化の速さは地下水中(海水中)のマグネシウム濃度に依存する。沿岸部の軟弱粘土地盤地帯で施工された既設のセメント処理地盤の長期安定性の評価方法は確立されておらず、軟弱化による力学的不安定化メカニズムの解明が必要である。本研究では、セメント混合処理土と周辺地盤との相互作用に着目することにより、処理土-粘土間の海水の浸透特性ならびに処理土-粘土間の軟弱化に伴う力学的相互作用の変化を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)劣化が進行する処理土の浸透特性を調べる実験

本研究で使用した土は佐賀平野を流下する感潮河川の河口域に堆積する高含水比の粘性土 ($\rho_s=2.58\text{g/cm}^3$, $w_L=150\%$, $w_p=49.3\%$, $I_p=101$, 以下、有明粘土と称す) である。使用した固化材は高炉セメントB種(BB)である。セメント混合処理土の作製方法は次のとおりである。有明粘土の含水比を225%(液性限界 w_L の1.5倍)に調整してセメントを添加し十分に攪拌混合した。セメント添加量は 50kg/m^3 と 100kg/m^3 の2ケースである(以下、それぞれBB50およびBB100と称す)。スラリー状の試料を、気泡を除去しながら100mm、高さ200mmの型枠に流し込み、養生中の水分蒸発を防ぐため型枠上端部を高分子フィルムで覆った。その後温度 20°C 、湿度30%の室内で28日間養生した。

本研究では、セメント処理土の劣化に伴う透水性の変化を、図-1に示す三軸セルを用いた柔壁カラム浸透試験機を用いて調べた。浸透試験では劣化促進を図るために塩化マグネシウム(MgCl_2)水溶液を用いた。 MgCl_2 水溶液の濃度は有明海の海水中のマグネシウム(Mg)濃度を基準とした。Mg濃度はBB50では0.12~1.20倍、BB100では1~20倍とする。実験中は流量変化と水質変化を調べるため、一定時間ごとに流量の測定し浸出水を採取した。実験終了後、供試体とその上部から所定の厚さにスライスカットして、蛍光X線分析装置を用いた元素分析とpH試験を行った。浸透実験を表-1に示す。

表-1 浸透試験の条件

	BB50	BB100
供試体の高さ (cm)	5.0	3.0
動水勾配	11	18
平均水温 ($^\circ\text{C}$)	17	21
Mg 濃度 (Mg/Mg_s)	0.12, 0.24, 0.60, 1.20	1, 5, 10, 20
通水時間 (day)	14	39
分析項目	pH, Ca (固) Mg (固)	pH, Ca (固液) Mg (固液)

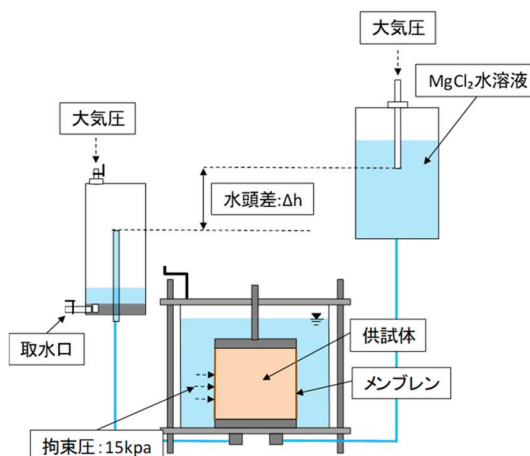


図-1 柔壁カラム定水位透水試験

(2)劣化が進行する処理土の強度特性を調べる実験

劣化が進行するセメント処理土供試体の作製には、前項の浸透試験と同様に塩化マグネシウム(MgCl_2)水溶液をセメント処理土に浸透させて、カルシウム溶脱を促進させる方法を用いた。図-1に示す浸透試験装置を使用し、 MgCl_2 水溶液をセメント処理土に定水位浸透させた。使用し

たセメント処理土は28日間養生したBB100の供試体 ($\phi=100\text{mm}$, $H=30\text{mm}$) である。MgCl₂濃度18.76 g/Lの水溶液を、動水勾配を18として定水位で浸透させた。なお、今回の実験で用いたMgCl₂水溶液の濃度は有明海の海水のMgCl₂濃度(0.938g/L)の20倍に相当する。カルシウム溶脱量ならびに水溶液の浸透量の経時変化を図-2に示す。MgCl₂水溶液を浸透させると供試体からカルシウムが溶脱しながら、浸透量が徐々に増加し、図中に矢印で示すように浸透量の急変点がいくつか観察される。浸透実験の結果を基に、今回の実験では、透水性の急変点を跨ぐように、MgCl₂水溶液の通水時間を設定した。すなわち、上記濃度のMgCl₂水溶液を15, 24, 32, 35, 45および60日間通水した供試体をせん断試験に供した。

劣化が進行する処理土の部分のせん断特性を調べるために、せん断面を固定できる一面せん断試験を適用した。供試体を水平方向にせん断したときのせん断抵抗値とせん断面上の残存カルシウム濃度の関係を求めた。本実験では、せん断中に供試体からの排水を完全に防ぐため、上箱および垂直応力載荷板のポーラストーンに、耐水サンドペーパーを貼り付けて不透水にし、非圧密非排水条件でせん断を行った。前述の方法でカルシウムを溶脱させた供試体から、カッターリング等を用いて、高さH=20mm、直径 $\phi=60\text{mm}$ の一面せん断試験用の供試体を切り出した。垂直応力50kN/m²を加え、定体積状態で2.0mm/minの速度で急速にせん断した。せん断終了後、供試体上部から厚さ5mmごと(4分割)に水平にスライスカットして、それぞれを炉乾燥した後にカルシウム濃度およびpHを測定した。

4. 研究成果

(1) 劣化が進行する処理土の浸透特性

図-3, 4にBB50およびBB100における透水性の変化およびCa累積溶出量と時間の関係を示す。Mg濃度が高いほどCa累積溶出量は大きい。BB100-10, BB100-20はCa累積溶出量がおおよそ400g/m²を超えたとき透水性が大きく増加し始めた。一方、BB100-1, BB100-5は透水性の大きな増加が見られなかった。実験終了時Ca累積溶出量も400g/m²を超えていない。BB100は今回の実験条件では、Ca累積溶出量がおおよそ400g/m²を超えると透水性が大きく増加する。図-5, 6にBB50およびBB100における透水性およびCa溶出フラックスの時間変化を示す。Mg濃度が高いほどCa溶出フラックスは大きい。BB100-20を除いては時間が経つにつれ増加傾向にある。

図-7, 8にBB50とBB100の元素分析の結果を示す。BB50はMg濃度が高いほど大きくCaが溶出している。BB50-1.20において深度15mmまで大きくCaが減少しているが、その他のケースでは各深度約10wt%以内の減少であった。BB100-1は上部10mmでCaの溶出が見られた。pHは全体的にやや減少している。BB100-5はCaの減少は供試体上部でしか見られ、pHは供試体上部から大きく減少している。BB100-10, BB100-20の供試体中のCaがほとんど溶出し、なおかつ供試体の全深度でMg濃度も高いことから全体的に劣化がかなり進行した状態である。BB100-20については図-8における元素分析の結果から、実験終了時のCawt%が、母材の状態と同等になっていた。21日目から溶出フラックスの減少が見られるのは、既に21日目時点で供試体内のCaのほと

表-2 せん断試験に用いた供試体の条件

	初期含水比 w_i (%)	間隙比 e	一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)
BB100	152.3	2.97	845.86
BB75	159.8	3.60	517.89
BB50	172.9	4.15	152.55
BB40	173.0	4.15	33.17
AC-77	96.0	2.53	47.54
AC-50	109.8	2.86	

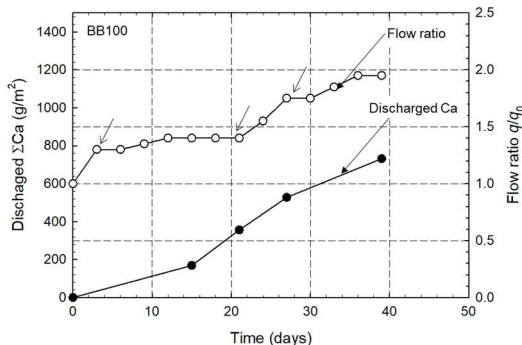


図-2 劣化供試体作製におけるMgCl₂水溶液の通水時間

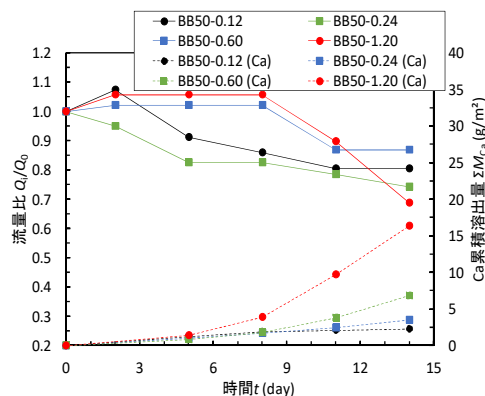


図-3 流量とCa累積溶出量 (BB50)

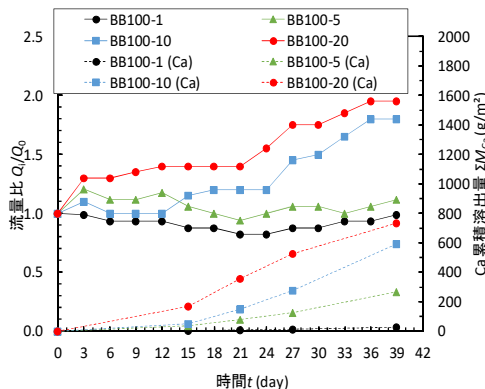


図-4 流量とCa単位時間溶出量 (BB100)

んどが溶出していたためと考えられる。

以上の結果を踏まえると、劣化の進行に伴う透水性の変化は、BB50、BB100-1 および BB100-5 の通水開始後 21 日までが遷移状態が支配的な状態にあり透水性が減少したと考えられる。また BB100-1 および BB100-5 の 21 日目以降は供試体上部は劣化状態となり透水性が増加したと考えられる。一方で、BB100-10、BB100-20 に透水性の低下する段階が見られない。高い Mg 濃度の影響により急速に劣化が進行するため遷移的な現象が現れなくなるためであると考えられる。さらに、Mg 水溶液の濃度が高いときほど劣化の進行が早まるため透水性が大幅に増加すると考えられる。

(2) 劣化が進行する処理土の強度特性

カルシウムを溶脱させたセメント処理土の供試体作製条件を表-2 に、一面せん断試験結果を図-9 に示す。なお、図-9 には再構成した有明粘土の試験結果も併記している。健全なセメント処理土の場合は、ピーク値が明瞭に表れせん断の進行に伴い垂直応力が顕著に増加する傾向を示す。カルシウムが溶脱されたセメント処理土は、カルシウムの溶脱量の増加にともなって、せん断抵抗や剛性が低下し、収縮性を示す状態に変化していく。BB100-15 や BB100-24 では、せん断抵抗がピーク値を示し顕著な膨張性を示す状態であるが、BB100-32 ではせん断抵抗が単調に増加し、膨張性を示すものの先の 2 つの供試体よりも膨張性は小さい。カルシウム溶脱量がさらに増えると、せん断抵抗ならびに膨張性はさらに低下する傾向を示す。最終的には収縮性の挙動を示す未処理の有明粘土 (AC77 および AC50) の挙動に漸近していくと考えられる。これらの結果より、MgCl₂ の浸透による生じるセメント水和物の変質ならびに間隙構造の変化によるダイレイタンス特性の変化がせん断抵抗の低下を引き起こしていると考えられる。

MgCl₂ 水溶液の通水時間が異なる各供試体において、せん断試験終了後に測定した供試体中のカルシウム濃度、マグネシウム濃度および pH の深度分布を図-10 に示す。カルシウム濃度の分布はいずれの供試体においても MgCl₂ 水溶液の浸透方向に増加する分布形状となった。そして、通水時間が長い供試体ほどカルシウム濃度の低下量は大きい。一方、マグネシウム濃度はいずれの供試体においても MgCl₂ 水溶液の浸透方向に向かって減少する分布となる。pH は浸透方向に向かって増加する分布となる。カルシウムが溶脱した範囲において、マグネシウム濃度が増加し pH が低下していることが認められ、浸透時間が長いほどその程度が大きいことが確認できる。これらの結果はセメント処理土の劣化のメカニズムと符合し、MgCl₂ 水溶液の浸透によって劣化が進行していることが確認できる。一面せん断試験におけるせん断面は供試体の中央 10mm 高さになる。カルシウム濃度の測定点はせん断面の上下 5mm の位置である。ここでは、せん断面 (高さ 10mm) のカルシウム濃度をそれらの平均値として以下の考察を行う。せん断強さとせん断面のカルシウム濃度の関係を図-11 に示す。カルシウム濃度の低下に伴ってせん断強さが低下することが確認できる。カルシウム濃度が 34.2%まではせん断強さはやや

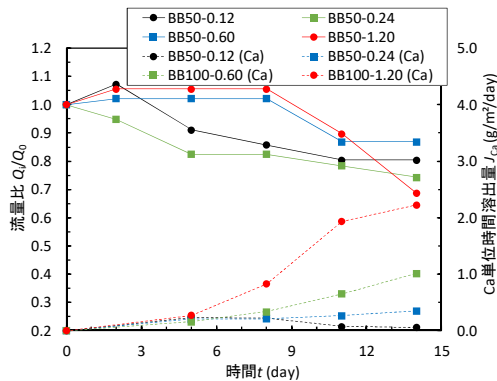


図-5 流量と Ca 溶出フラックス (BB50)

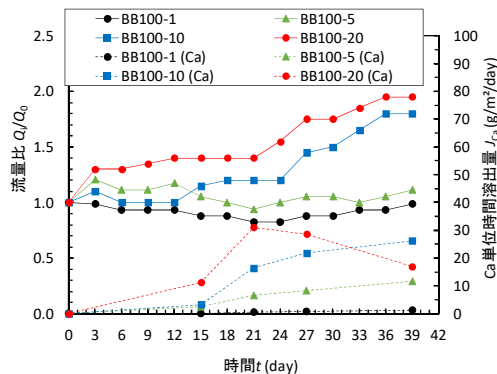


図-6 流量と Ca 溶出フラックス (BB100)

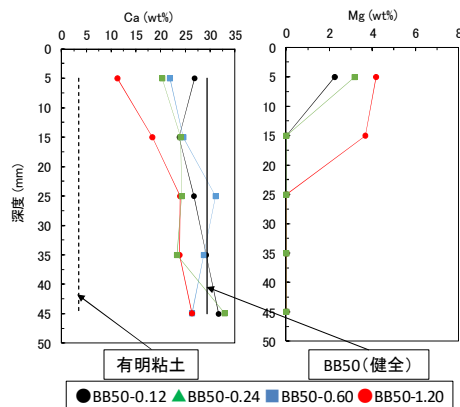


図-7 浸透試験後の Ca, Mg の深度分布 (BB50)

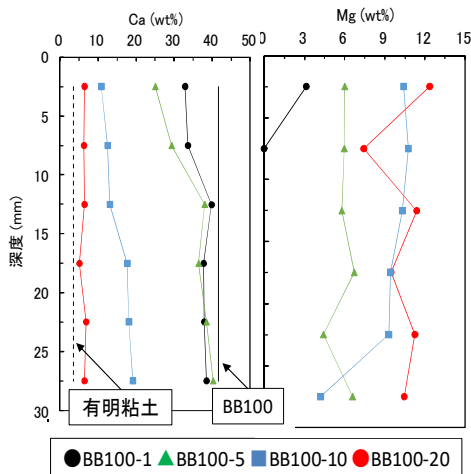


図-8 浸透試験後の Ca, Mg の深度分布 (BB100)

低下するもの大きな変化は見られない。しかし、カルシウム濃度が34.2%よりも小さくなると、せん断強さは急激に低下した。20%程度までカルシウム濃度が低下するとせん断強さの低下割合は小さくなり、徐々に有明粘土のせん断強さに近づいていく傾向を示す。また、カルシウム濃度が20%以下では、せん断強さは健全状態の1/4~1/5程度まで低下することがわかる。セメント処理土の劣化メカニズムやセメント処理土中のカルシウムの存在形態に基づく、今回の実験条件下におけるせん断強さの低下は次のように推察される。すなわち、カルシウム濃度41.7%および34.2%のときは、水酸化カルシウム等の固化に寄与するセメント水和物以外の形態で存在しているカルシウムが溶脱している段階であったため、せん断強さの変化が小さかったと考えられる。カルシウム濃度34.2から12.4%にかけてせん断強さが大きく低下する段階では、セメント水和物からのカルシウム溶脱が起こったために、溶脱量が多い供試体ほどせん断強さが小さくなったと推察される。また、カルシウム濃度が20%より小さい範囲においてせん断強さの低下の割合が小さく傾向を示すのは、カルシウム溶脱に伴い生成される水酸化マグネシウムによる粘土粒子の接着効果やそれに伴う骨格構造の変化による影響が考えられる。健全状態でかつセメント添加量が少ない供試体のせん断強さとカルシウムが溶脱した供試体のそれを比較する。同じカルシウム濃度において両者を比較するとセメント添加量にかかわらず後者が大きい。劣化したセメント処理土のせん断強さは残存するカルシウム濃度に加えて、改良時のセメント添加量に依存すると考えられる。この点についてはセメントと粘土の定量的反応メカニズムについての詳細な検討が必要であると考えられる。

以上、本研究では、セメント混合処理土と周辺地盤との相互作用に着目して、処理土-粘土間の海水の浸透特性ならびに処理土-粘土間の軟弱化に伴う力学的相互作用の変化について検討した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

セメント処理土に塩分を含む地下水が流入すると遷移状態となったときに透水性が低下する。さらに塩分が流入し続け劣化状態になると透水性は高くなる。これは間隙の総量は変わらないが、径の大きい間隙の割合が増えることによる。

セメント処理土からカルシウムが溶脱すると膨張性から圧縮性を示す状態へ徐々に変化し、セメント処理土のせん断強さは低下していく。せん断強さが急激に低下する残存カルシウム量が存在し、それは改良時のセメント添加量に依存すると考えられる。

表-2 MgCl₂ 水溶液の通水条件 (劣化供試体作製条件)

供試体 No.	動水勾配	MgCl ₂ 濃度 (g/L)	通水時間 t (日)	供試体中央高さの Ca 濃度 (wt%)
BB100	-	-	-	41.7
BB100-15	18	18.67	15	37.7
BB100-24			24	34.2
BB100-32			32	29.1
BB100-35			35	22.1
BB100-45			45	18.1
BB100-60			60	12.4

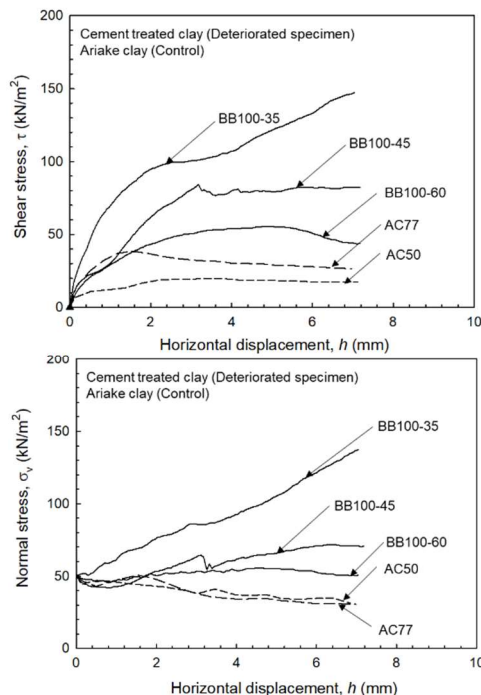


図-9 一面せん断試験結果 (Ca 溶脱および未処理粘土)

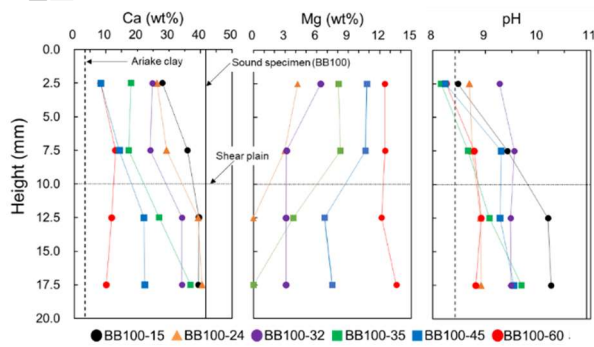


図-10 せん断試験後の Ca 溶脱供試体の元素分析結果

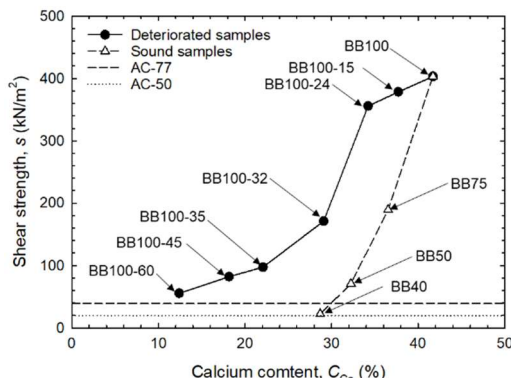


図-11 せん断強さと Ca 濃度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 末次大輔, 井上徹郎, 原弘行	4. 巻 14
2. 論文標題 カルシウム溶脱を受けたセメント処理粘土のせん断強度特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第14回地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 79-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Inoue and D. Suetsugu	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of seawater infiltration on permeability of the cement treated soil	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of Technical forum on mitigation of geo-disasters in Asia	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 皿良和樹, 末次大輔, 神山惇, 福林良典
2. 発表標題 海水に接触するセメント処理土のカルシウム溶出予測の検討
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上徹郎, 末次大輔
2. 発表標題 塩水浸透劣化に伴うセメント処理土の強度特性の変化
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上徹郎, 末次大輔
2. 発表標題 塩水浸透劣化に伴うセメント処理土の強度特性の変化
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	日野 剛徳	佐賀大学・理工学部・教授	
	(Hino Takenori)		
	(20295033)	(17201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------