# 海水環境下で劣化した初期固化材量が異なるセメント処理土の強度特性

Strength Properties of Cement-Treated Clay Deteriorated Under Seawater Made with Different Stabilizer Content

弘中稔基	Toshiki HIRONAKA	(山口大学大学院創成科学研究科)
原 弘行	Hiroyuki HARA	(山口大学大学院創成科学研究科)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院創成科学研究科)

セメント処理土の劣化の主要因は海水中のマグネシウムを含む塩である.本研究では, 海水環境下におけるセメント処理土の強度特性の変化を調べるため,Mg水溶液に曝露し た固化材量が異なる4種のセメント処理土に対して定体積一面せん断試験を実施した.そ の結果,セメント処理によって大きく発現した粘着力は,劣化すると著しく減少すること が示された.しかしながら,劣化後も僅かにセメンテーション効果が残存し,その程度は 初期に添加した固化材量に左右されることがわかった.さらに,土壌分析の結果から劣化 後のセメンテーション効果はMg化合物によるものと推定された.

キーワード:セメント安定処理,固化材添加量,劣化,粘着力,内部摩擦角, 土壌分析 (IGC:D-10)

## 1. はじめに

我が国は、沿岸域を中心に軟弱地盤が広く分布してお り、構造物を建設する際などに基礎地盤の改良が必要な 場合が多い.この軟弱地盤対策工法として、セメントや 石灰などを利用した固化処理工法がしばしば利用されて いる. 固化処理工法は 1970 年頃に開発され 1),2) て以降す ぐに実用化に至った経緯があり,耐久性に関して十分に 検討が行われてきていない.しかし,近年では,酸性雨 3),4)や自然地盤内での長期養生 5),6),7)などの特定の環境下 における石灰・セメント処理土の力学的・化学的な性質 変化についての報告が確認できる.また、セメント処理 土の性質は海水の化学的な浸食を受けて大きく変化する ことも明らかにされている<sup>8)</sup>. すでに,海水が遡上する 感潮河川の堤防基礎部に造成された低改良率のセメント 処理土層の著しい軟弱化が確認された事例もみられる %. 海水によるセメント処理土の劣化を抑制する新たな手法 として, 微生物機能を活用した劣化抑制技術に関する検 討<sup>10)</sup>なども進められており、海水によるセメント処理土 の劣化現象は今後重要な課題となり得るという認識が強 まっている.

海水環境下におけるセメント処理土の劣化の主な原因 物質は海水に含まれる塩分のなかで僅か15%程度に過ぎ ないマグネシウム (Mg)塩 (MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>)であり,以 下の(1), (2)の化学反応を引き起こし,処理土の pH を低 下させるとともにカルシウム (Ca)の溶出を著しく促進 させて劣化に至る<sup>8)</sup>.

 $MgCl_{2}+Ca(OH)_{2} \rightarrow Mg(OH)_{2}+CaCl_{2}$ (1)  $MgSO_{4}+Ca(OH)_{2} \rightarrow Mg(OH)_{2}+CaSO_{4} \cdot 2H_{2}O$ (2) 沿岸域に施工されたセメント処理土を含む土構造物の 長期的な安定性を評価するためには、劣化後の処理土の 強度特性を把握する必要がある。新舎ら<sup>11)</sup>は、海水に曝 露された破砕したセメント処理土の強度特性について検 討し、内部摩擦角が低下することを示している。しかし ながら、破砕を伴わない一般的なセメント処理土の土質 特性の変化についての報告は極めて少ないのが現状であ る。そこで、本研究では固化材添加量が異なる劣化前後 のセメント処理土に対し定体積一面せん断試験と土壌分 析を実施し、海水曝露による強度特性や化学特性の変化 を調べた。

### 2. 実験方法

## 2.1 実験に用いた試料

本研究では、試料土に佐賀県小城市の感潮河川河口域 で採取した有明粘土を用いた. 表-1 に有明粘土の物理 的・化学的性質を示す. セメント処理土の劣化には Ca と Mg が関連するため、有明粘土に含まれるそれらの含有 量も示している. 固化材には、地盤改良用としても広く 流通している高炉セメント B 種 (BB)を使用した. 一般 的な濃度の海水を用いた場合、供試体を完全に劣化させ るには非常に長い期間を要する<sup>12)</sup>そのため、高濃度の Mg 水溶液を使用して劣化を促進させた. この水溶液は、 海水環境下におけるセメント処理土の劣化の原因物質で ある Mg<sup>2+</sup>濃度を著しく高めたものである. 試薬には塩化 マグネシウム 6 水和物 (MgCl<sub>2</sub>・6H<sub>2</sub>O)を用い、Mg<sup>2+</sup>濃 度を有明海の海水 (938mg/L)の 25 倍 (23.45g/L) に調製

<b>表-</b> 月明粘土の物理学・化学的性質				
土粒子密度	$(g/cm^3)$	2.64		
液性限界	(%)	138.0		
塑性限界	(%)	42.2		
粒度組成	(%)			
礫		0.0		
砂		3.0		
シルト		58.8		
粘土		38.2		
成分含有量	(mg/g)			
Ca		5.6		
Mg		11.0		

している.海水曝露されたセメント処理土の劣化の進行 速度は Mg<sup>2+</sup>濃度の平方根に比例することが示されてい る<sup>13)</sup>. したがって、本実験における Mg 水溶液を使用し た場合,有明海水を使用した場合の約5倍の劣化促進効 果が期待できる.

#### 2.2 供試体作製方法

#### 2.2.1 準備した供試体について

本実験では固化材添加前の粘性土, Mg 水溶液に浸漬 する前のセメント処理土, Mg 水溶液に浸漬した後のセ メント処理土を用意した.以後,それぞれを母材供試体, 健全供試体,劣化供試体と称し,強度特性の変化を検討 する.

#### 2.2.2 母材供試体

試料土である有明粘土が高含水比であるため, 整形可 能な状態にすることや一面せん断試験を行う際に、圧密 過程において載荷する圧力により圧密量が著しく大きく なり、せん断に必要な供試体高さを確保できなくなるこ とを避けるため, 圧密装置で予圧密して母材供試体を作 製した.予圧密圧力は後述する一面せん断試験時におけ る圧密圧力の 0.6~0.9 倍程度となるように作用させた.予 圧密終了後、乱れないようにステンレス製のカッターリ ングで押しぬき,端面をワイヤーソーで切り落として整 形したものを使用した.

#### 2.2.3 健全供試体

固化材添加量を 50,70,100,120kg/m<sup>3</sup>の4パターンで供 試体を作製した. 固化材添加量 50kg/m<sup>3</sup>の供試体は以下 の要領で作製した.まず,試料土の含水比を液性限界の 1.5 倍に調整し、固化材を 50kg/m<sup>3</sup>で添加し撹拌した.均 ーに撹拌した後 #100mm, H= 200mm のプラスチックモ ールドに詰め、温度 20℃に調整した実験室内で 28 日間 気中養生させた.養生終了後,脱型した供試体をのこぎ りで高さ 5cm 程度の輪切りにした.次に供試体が乱れな いようにステンレス製のカッターリングで押しぬき、端 面をワイヤーソーで切り落とすことで Ø=60mm, H=20mm に整形したものを健全供試体とした. 固化材添加量 70. 100,120kg/m<sup>3</sup>の場合は、供試体が非常に硬く、カッター



写真-1 塩ビモールドの様子



**写真-2** 供試体浸漬状況

リングでの整形が困難であったため、自作した塩ビモー ルドを使用して作製した.写真-1に塩ビモールドの様子 を示す. このモールドはd=60mm, H=30mm で2つ割り 構造にしており, 脱型の際に供試体を傷つけずに取り出 すことが可能になっている. 固化材添加量 50kg/m3 と同 様の条件で養生させた後に脱型した供試体の端面をスト レートエッジで削り取りH=20mmに整形したものを一面 せん断試験に供した.

## 2.2.4 劣化供試体

2.1 で述べた高濃度 Mg 水溶液に, *ф*=100mm, *H*=30mm に整形した各添加量の健全供試体を浸漬させることで, 劣化供試体を作製した.写真-2は供試体浸漬状況を示し たものである. 浸漬期間中は4週間に一度水溶液を交換 した.一面せん断試験を実施する供試体を一様に劣化さ せるため,浸漬期間中に定期的に採水した浸漬水の Ca<sup>2+</sup> 濃度を測定し、本研究に使用した高濃度 Mg 水溶液への 浸漬によって Ca 濃度が平衡状態に達したと判断できた ときに浸漬を終えた. ここで、セメント処理土作製時に 添加したセメントに含まれる Ca 量に対して浸漬期間中 に溶出した Ca 量の比率を Ca 溶出率 LCa と定義する. そ の際,浸漬水の更新時刻間を一つの分画として,式(3)か ら各分画における Ca 溶出量 Ciを求め,式(4)より各分画 の Ca 溶出率 Lca, i を求めた.

$$C_{i} = \frac{I_{i} \times W_{i}}{V} \tag{3}$$

$$L_{\text{Ca,i}} = \frac{C_{\text{i}}}{\alpha \cdot C_{\text{Cao}} \cdot \frac{N_{\text{Ca}}}{N_{\text{Ca}} + N_{\text{O}}}} \times 100 \tag{4}$$

ここに,  $C_i$ : 分画 i における供試体からの Ca 溶出量

(kg/m<sup>3</sup>),  $I_i$ :分画 iにおける浸漬水の  $Ca^{2+}$ 濃度 (kg/L),  $W_i$ :分画 iの浸漬水の体積 (L), V:浸漬した供試体の 総体積 (m<sup>3</sup>),  $L_{Ca,i}$ :分画 i における Ca 溶出率 (%),  $\alpha$ :固化材添加量 (kg/m<sup>3</sup>),  $C_{CaO}$ :セメント (高炉セメン ト B種)の CaO 含有率 (54.6%),  $N_{Ca}$ ,  $N_O$ : Ca, O のモ ル質量 (g/mol)を表す.図-1に Ca 溶出率の経時変化を 示す.いずれの添加量の場合も浸漬開始から  $Ca^{2+}$ が急激 に溶出し,約 60 日以降はほとんど変化がみられなくなっ ている.このように、 $Ca^{2+}$ 溶出率がおよそ一定値を示し た段階で平衡状態に達したと判断できる.浸漬時間は添 加量 50,70,100,120kg/m<sup>3</sup> でそれぞれ 83,140,98,168 日で あった.その後、供試体を取り出し、カッターリングと ワイヤーソーで  $\phi$ =60mm、H=20mm に整形したものを劣 化供試体とした.

#### 2.2.5 各供試体の初期状態

**表-2**に各供試体の初期状態を示す.湿潤密度は固化材 添加量によらずほぼ一定の値を示した.間隙比に関して は,固化材添加量の増加に伴い減少する傾向を示した. これは固化材添加量が増加することで,セメント処理土 内の間隙を埋めるようにしてセメント水和物の析出量が 増加したためと考えられる.

#### 2.3 定体積一面せん断試験

圧密定体積試験は JIS0560-2009 に準拠し,以下の要領 で実施した.供試体に作用させる圧密応力 $\sigma_{c}$ は,母材供 試体の場合, $\sigma_{c}$ =50,100,150,200kPa,健全供試体と劣化 供試体の場合は $\sigma_{c}$ =25,50,100,150kPa の4段階とした. せん断速度は 0.2mm/min とし,7mm 程度せん断を行っ た.

### 2.4 土壤分析

セメント処理土は,海水曝露によって海水中に含まれ る MgCl<sub>2</sub>や MgSO<sub>4</sub>が拡散浸透し,処理土内部の Ca(OH)<sub>2</sub> と反応を起こし,水酸化マグネシウム(Mg(OH)<sub>2</sub>)を析出す る.その結果,pH が低下して Ca 成分が溶出し,土粒子 間の結合の役割を担っていた C-S-H などの水和物による セメンテーション効果が崩壊して力学的劣化に至る<sup>8</sup>. そこで,供試体整形時の削りくずを用いて Ca,Mg 含有量 を調べた.含有量測定は,乾燥試料を用いて酸によって 各成分を分解させた後,ICP 発光分光分析装置により行 った.



図-1 Ca 溶出率の経時変化

表-2 谷供試体の初期状態					
添加量	湿潤密度	間隙比			
$(kg/m^3)$	$(g/cm^3)$				
50	1.29	4.63			
70	1.26	4.52			
100	1.32	4.04			
120	1.33	3.68			

### 3. 実験結果

#### 3.1 一面せん断試験結果

#### 3.1.1 圧密特性

図-2 に一面せん断試験の圧密過程におけるひずみの時間変化の一例(120kg/m<sup>3</sup>)を示す.健全供試体は、いずれの圧密圧力においても載荷直後に変形し、時間経過による大きな体積変化はみられなかった.劣化供試体の場合、時間経過とともにひずみが大きくなっており、健全供試体のときに比べて圧縮性が大きくなっていることがわかる.いずれの添加量の供試体の場合も同様な挙動を示したため、圧密時間は健全供試体は40分、劣化供試体と母材供試体は24時間として打ち切った.

図-3 に圧密終了時のひずみと圧密応力の関係を示す. 健全供試体は,圧密応力が増加してもひずみの増加量は 小さい.セメント処理によって土粒子間にセメンテーシ ョン効果が発揮され,疑似的な過圧密状態となったもの と推察される.しかしながら,数%程度のひずみが観測 されており,一般的なセメント処理土の変形量に対して 大きかった.これは,整形時に端面が乱れてしまったこ とや,圧密開始時に供試体と載荷版の間に僅かに隙間が あったことによって,変形量が多く見積もられてしまっ た可能性がある.他方,劣化供試体は,圧密応力の増加 に伴い変形量が著しく大きくなっていることがわかる. また,いずれの圧密応力の場合も固化材添加量が多いと きほど,ひずみが小さくなっている.したがって,劣化 したセメント処理土の圧縮性は,供試体作製時に添加し





た固化材量に大きく依存すると考えられる.

#### 3.1.2 せん断特性

図-4 にせん断応力-せん断変位関係の一例(母材供試体および120kg/m<sup>3</sup>の健全・劣化供試体)を示す.健全供 試体は、明瞭なせん断応力のピークを示した.これは、 処理土内の硬化体組織が破断されたことによるものと 考えられる.劣化供試体のせん断強さは健全供試体のそ れに比べて1/7~1/10程度まで減少している.しかしな がら、健全供試体に比べると緩やかであるがピークも確 認でき、母材供試体よりも高いせん断応力を発揮してい ることから、一部セメンテーション効果が残存している ものと考えられる.

図-5 に応力経路の一例(母材供試体および 120kg/m<sup>3</sup> の健全・劣化供試体)を示す.健全供試体に関しては, 正のダイレイタンシーが生じていることがわかる.母 材・劣化両供試体に関しては,いずれの圧密応力におい ても負のダイレイタンシーが生じ,せん断とともに垂直 応力が大きく減少している.また,母材供試体と比較し て健全供試体の粘着力が大きく発現していることがわ かる.劣化することで健全供試体が有していた粘着力が 大幅に減少しているが,せん断応力と同様に母材供試体 の値よりもわずかに大きな値を示した.

### 3.1.3 粘着力·内部摩擦角

図-6 に各供試体の*n*-*o*r関係を示す. 母材供試体の粘着 力はゼロであったが, いずれの添加量の場合もセメント 処理を行った健全供試体の粘着力は大幅に増加し, せん 断強さが著しく大きくなっていることがわかる. これは, セメント添加によって処理土中に C-S-H などの水和物 が生成され, それがセメンテーション効果を発揮したた めであると推察される. さらに, 海水曝露させた劣化供 試体では, 健全供試体で大きく発現した粘着力が大幅に 減少した. これは, セメンテーション効果を発揮してい た水和物が海水曝露により崩壊し, 土粒子間の結合力が 低下したためであると推察される. しかしながら, 劣化 供試体も粘着力はゼロにはならず, 固化材添加前の母材 の強度特性に戻ることはなかった. このことから, 劣化 したセメント処理土にもセメンテーション効果が残存 することがわかった.

図-7 に固化材添加量と粘着力, 内部摩擦角の関係を示 す. 健全・劣化供試体共に, 固化材添加量の増加に伴い 粘着力も大きくなる傾向を示した.海水曝露によって劣 化した後も,健全供試体と同様に初期の固化材量が強度 に大きな影響を及ぼすことが示された. 内部摩擦角に関 して, 健全供試体では固化材添加量の増加に伴い大きく なる傾向を示した. セメント水和物が生成されることに よって固体総量が増加したため,内部摩擦角が増加した 可能性もあるが、固化材添加量 50、100kg/m<sup>3</sup>における内 部摩擦角の差は24.6°にもなり、この差は非常に大きい. 一面せん断試験機の性質として, せん断箱端部に変形が 集中し,供試体のせん断面がレンズ上になるという問題 がある. 戸田ら<sup>14)</sup>はセメント添加量が異なる処理土に対 して一面せん断試験と三軸圧縮試験を実施している. そ の結果,両試験とも添加量が増加すると内部摩擦角が大 きくなるが,一面せん断試験による内部摩擦角が三軸圧 縮試験から得られるものに比べて著しく大きいことを 示している.このことから、添加量が比較的多いときは 一面せん断試験機の性質により,内部摩擦角が大きく見 積もられた可能性がある.また,添加量 50,70kg/m3では セメント処理を行うことで微小に減少している.これは, セメント処理を行うことによって圧縮性が改善され, 圧 密圧力の増加による密度増加が小さくなったことが原







因だと考えられる.劣化供試体も同様に,変形量が少な く大きく密度増加しなかった固化材添加量が多い条件 で,内部摩擦角が僅かに小さくなる傾向を示した.

### 3.2 土壤分析結果

図-8 に各供試体の Ca, Mg 含有量を示す. 健全供試体 の Ca 含有量は固化材添加量が多くなると増加している. これは, 固化処理に用いたセメントの主成分が酸化カル シウム(CaO)であることに起因している. 劣化供試体の Ca 含有量はいずれの添加量においても健全供試体の Ca 含有量よりも大幅に低い値を示し,供試体作製時に添加 した固化材量によらずほぼ一定となった. これは, 試料 土である有明粘土が元来有していた Ca 含有量の値であ ると考えられる.このことから,海水曝露により固化成 分である Ca が溶出し,劣化に至っていることがわかる. 他方, Mg 含有量は,健全供試体では添加量によらずほ ぼ一定の値を示している.これは,有明粘土由来のもの と考えられる.劣化供試体の Mg 含有量は健全供試体に 比べて大きく増加しており,固化材添加量が多いときほ ど高くなる傾向を示した.これは,式(1),(2)に示したよ うに,固化材添加量が高い供試体ほど,Ca(OH)2量が多 くなり,生成される Mg(OH)2 も多くなったためと考えら れる.

図-7に示したように、劣化した後も幾分かのセメンテ



ーション効果が残存し、それは初期固化材量に依存する ことが示された.海水曝露によって劣化すると Ca 成分 はほとんどが溶出し、固化材量との相関もみられなかっ た.それに対して Mg 含有量は劣化供試体で高い値を示 し、固化材量が多いときほど高い値を示した.そのため、 劣化したセメント処理土のセメンテーション物質は Mg 系の化合物であることが示唆された.

ここで,健全供試体の CaO 量と劣化供試体の Mg(OH)2 量の算出を試みる. 土壌分析から得られた健全供試体の Ca含有量は,添加したセメントの主成分である CaO と, 母材の有明粘土由来のものの総和と考えることができ る. したがって,健全供試体中の CaO 含有量は健全供試 体と有明粘土の Ca 含有量の差から求められると考えた. 次に,劣化供試体の Mg 含有量は,式(1),(2)で示した化 学反応により生成された Mg(OH)2 と,高濃度 Mg 水溶液 に含まれる Mg 塩が塩化マグネシウム (MgCl2) として 炉乾燥過程で処理土内に析出したものである.以上のこ とから,式(5),(6)により健全供試体の CaO 含有量,劣化 供試体の Mg(OH)2含有量を算出した.

$$M_{\rm CaO} = \left(M_{\rm Ca_{scund}} - M_{\rm Ca}_{\rm original}\right) \times \frac{N_{\rm CaO}}{N_{\rm Ca}}$$
(5)

$$M_{\rm Mg(OH)_2} = \left(M_{\rm Mg} - V_V \times C_{\rm MgCl_2} \times \frac{N_{\rm Mg}}{N_{\rm MgCl_2}}\right) \times \frac{N_{\rm Mg(OH)_2}}{N_{\rm Mg}}$$
(6)

ここに、MCaO は試料の乾燥質量に対する酸化カルシウム 量(mg/g)、MCasound は健全試料の乾燥質量に対するカルシ ウム量(mg/g)、MCaoriginal は母材試料の乾燥質量に対する カルシウム量(mg/g)、NCaO は酸化カルシウム分子量、NCa はカルシウム原子量、MMg(OH)2 は試料の乾燥質量に対す る水酸化マグネシウム量(mg/g)、MMg は試料の乾燥質量 に対するマグネシウム量(mg/g)、Vrは試料の乾燥質量に 対する間隙の体積(m<sup>3</sup>/g)、CMgCl2 は塩化マグネシウム濃度 (mg/m<sup>3</sup>)、NMg はマグネシウム原子量、NMgCl2 は塩化マグ ネシウム分子量、NMg(OH)2 は水酸化マグネシウム分子量 を表す. 図-9 に健全供試体の CaO と劣化供試体の Mg(OH)2のモル質量比を示す. それぞれの関係に相関が みられ、健全供試体に含まれる CaO 含有量と劣化供試体



**図-9** 健全供試体の CaO と劣化供試体の Mg(OH)2 のモル質量比

に含まれる Mg(OH)2含有量は1:1に近い割合であるこ とがわかる. つまり, 添加したセメントに含まれる CaO が全て Mg 水溶液と反応し Mg(OH)2に変化したと推察さ れる. したがって,本研究におけるセメント処理土の劣 化現象も式(1),(2)の反応によって生じたものであると考 えられる.

## 4. 結論

本研究では、海水環境下における劣化前後の強度特性 について調査するために、初期固化材量の異なるセメン ト処理土に対し定体積一面せん断試験および土壌分析 を行った.得られた知見を以下にまとめる.

- (1) Mg水溶液によって劣化すると、健全なときに比べて圧縮性が大きくなる.また、同じ圧密圧力のときの変形量は固化材添加量が多いときほど小さくなる.
- (2) 母材の粘着力は、セメント処理によって大きく発現

する.その後,Mg水溶液によって劣化すると大幅 に減少する.しかし,本実験の条件では劣化しても 粘着力は5.8~24.6kPa 程度発揮され,セメンテーション効果が残存した.

(3) セメント処理土は、劣化すると Ca 含有量が著しく 小さくなる.また、劣化後は Mg 含有量が著しく大 きくなり、その量は固化材量が多いときほど大きく なる傾向が確認され、劣化後に残存するセメンテー ション物質は Mg 化合物によるものであることが 示唆された.

本研究における実験では、MgCl2 のみを使用した Mg 水溶液を使用してセメント処理土を劣化させた.実際の 海水には MgSO4 も含まれているため式(2)に示した二水 石膏(CaSO4・2H2O)が生成されることとなる.したが って、本研究では CaSO4・2H2O の影響は考慮されてい ないことに留意する必要がある.

### 謝辞

本研究を実施するにあたり、山口大学大学院修了生で ある狩生卓玲氏に多大な協力を頂いた.ここに記して謝 意を表する.

## 参考文献

- 柳瀬重靖:生石灰による沖積粘土の安定処理について(第1報),港湾技術研究所報告,第7巻,第4 号,pp.85-132,1968.
- 奥村樹郎,光本司,寺師昌明,酒井正寛,吉田富雄: 石灰による深層混合処理工法(第1報),港湾技術 研究所報告, Vol.11, No.1, pp.67-106, 1972.
- Kamon, M., Ying, G. and Katsumi, T.: Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.4, pp.91-99, 1996.
- 4) Du, Y. J., Jiang, N. J., Shen, S. L. and Fei, J.: Experimental investigation of influence of acid rain on leaching and hydraulic characteristics of cement-based solidified/stabilized lead contaminated clay, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.225-226, pp.195-201, 2012.
- 5) 林宏親,西本聡,大石幹太,寺師昌明:セメント安

定処理土の長期強度特性 その 1—DJM 改良柱体の 現場調査—, 北海道開発土木研究所月報, No.611, pp.11-19, 2004.

- 林宏親,西本聡,大石幹太,寺師昌明:セメント安 定処理土の長期強度特性 その2-室内実験による 検討一,北海道開発土木研究所月報,No.612, pp.28-36, 2004.
- 北詰昌樹,高橋英樹:現地石灰安定処理土の長期特 性調査,土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.144-156, 2008.
- 原弘行,末次大輔,林重徳,松田博:海水に曝露したセメント処理土の劣化機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.4, pp.469-479, 2013.
- 9) H. Hara, D. Suetsugu, S. Hayashi and Y.J.Du.: Calcium Leaching Properties of Lime-treated Soil by Infiltration of Tidal River Water, *Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.810-813, 2008.
- 三原一輝,末次大輔,笠間清伸,畠俊朗:微生物機 能を活用したセメント改良土の劣化抑制技術に関 する検討,土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.72, No.2, I\_414-I\_419, 2016.
- 新舎博,堤彩人:海水曝露環境にある固化処理土と 破砕粒子の劣化特性に関する実験,土木学会論文 集C(地圏工学), Vol. 72, No.3, pp. 265-276, 2016.
- 原弘行,末次大輔,松田博:海水曝露によって劣化した石灰処理土の間隙径分布と圧密特性,土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.3, pp.177-190, 2015.
- 13) 狩生卓玲,原弘行,吉本憲正:塩化マグネシウム水 溶液を用いたセメント処理土の劣化促進実験手法の開発とその再現性,第71回土木学会中国支部研 究発表会,2019.
- 14) 戸田五郎, 三浦真治: フィルダム築堤に適用するソ イルセメントの特性について, 材料, Vol.26, No.291, pp.1225-1231, 1977.

(2021年6月14日 受付)