

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月21日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360228

研究課題名（和文）海水環境下で生じる石灰・セメント混合処理土軟化現象の解明と評価に関する研究

研究課題名（英文）Deterioration phenomenon of lime and cement treated soils under seawater and its evaluation

研究代表者

林 重徳（HAYASHI SHIGENORI）

佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・客員研究員

研究者番号：80112308

研究成果の概要（和文）：本研究では海水環境下における石灰・セメント処理土の軟化現象を解明するために、海水に浸漬させた処理土の特性を詳細に分析した。その結果、処理土は劣化の進行に伴って水和物の溶解や変質に起因した間隙径分布の変化が生じる。さらに完全に劣化すると固化処理前の母材に類似した構造となることを明らかにした。また、固化処理土の軟化速度は固化材量や海水の濃度に左右される。この軟化速度は、コンクリートの中性化進行モデルと類似しており、シンプルな近似式で表示できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to investigate the deterioration phenomenon of lime and cement treated soil, laboratory tests which used the treated soil immersed in seawater were performed. It was found that the total pore volume scarcely changed and the pore size at the maximum volume in the pore size distribution becomes large gradually with progress of deterioration. Furthermore, the pore size distribution of lime-treated soil deteriorated by seawater is much similar to that of Ariake clay before adding the lime. Deterioration progress is influenced by stabilizer content and Mg concentration of seawater. Deterioration speed of treated soil can be predicted in the same way as predicting the concrete neutralization, and it can be expressed by a simple approximation formula.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 12,100,000 | 3,630,000 | 15,730,000 |
| 2010年度 | 1,000,000  | 300,000   | 1,300,000  |
| 2011年度 | 1,300,000  | 390,000   | 1,690,000  |
| 年度     |            |           |            |
| 年度     |            |           |            |
| 総計     | 14,400,000 | 4,320,000 | 18,720,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土質安定処理，石灰，セメント，劣化，間隙径分布，予測

## 1. 研究開始当初の背景

固化処理工法はわが国の主要な軟弱地盤対策として盛んに利用されており，土木工事への応用分野は広範囲に及んでいる。しかしながら，固化処理土は曝される環境次第では，

その性状が劣化することが明らかになってきており，長期的な耐久性についての検討が望まれている。さらに，塩分を含んだ海水が遡上する有明海沿岸低平地域の感潮河川では，約20年前に建設された堤防基礎部の石

灰処理土層が著しく軟化し、周囲一帯が湿地化している箇所が数多く確認されており、処理土の軟化（劣化）現象 についての調査・研究が望まれる。

## 2. 研究の目的

現在までに、室内試験から固化処理土は海水と接触すると処理土の固化成分であるカルシウム (Ca) が著しく溶出し、軟化することや Ca の溶出機構について明らかにした。しかし、未だ不明な点も多く詳細な調査が必要である。

本研究では、海水に浸漬した固化処理土に対して各種試験を実施し、処理土の物理的な視点での劣化機構や劣化の進行予測について明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 本研究の構成

本研究は以下の2つの検討項目から構成される。

#### ① 固化処理土の間隙径分布の変化

本実験では、主にコンクリートにおいて、水和物の生成やそれに伴う密実化などの現象を把握するために水銀圧入法を用いた細孔径の測定を固化処理土に対して適用し、海水との接触によって生じる固化処理土の間隙の総量や分布特性の変化を調べ、処理土の物理的な劣化機構について検討した。

#### ② 軟化速度に関する検討

本実験では、固化材添加量の異なるセメント処理土を人工海水に浸漬し、軟化した範囲を経時的に測定し、それらの実験結果から軟化の進行速度について検討した。

### (2) 使用した海水、試料土ならびに固化材

天然の海水は採取する場所や深度等によって、その濃度が大きく変化する。そのため、本研究では、安定した海水濃度で実験するために人工海水を使用した。人工海水の主要な成分組成を表-1に示す。また、本文における海水濃度は、その海水の NaCl 濃度 (g/L) で表示する。

表-1 人工海水 (NaCl 濃度 20g/L) の成分表

| 分析項目 (単位)        | 人工海水   |
|------------------|--------|
| カルシウムイオン (mg/L)  | 280    |
| ナトリウムイオン (mg/L)  | 8,600  |
| カリウムイオン (mg/L)   | 230    |
| マグネシウムイオン (mg/L) | 480    |
| 塩化物イオン (mg/L)    | 15,000 |
| 炭酸水素イオン (mg/L)   | 130    |
| 溶解性シリカ (mg/L)    | 0.1    |
| 硫酸イオン (mg/L)     | 2,100  |

試料土は、佐賀県小城市の感潮河川の河口域から採取した有明粘土である。試料土の物性を表-2に示す。固化材は生石灰 (以下石灰) ならびに普通ポルトランドセメント (以下セメント) である。

表-2 試料土の物性

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.65  |
| 液性限界 (%)                   | 158.1 |
| 塑性限界 (%)                   | 51.4  |
| 粒度組成 (%)                   |       |
| 礫                          | 0.0   |
| 砂                          | 0.0   |
| シルト                        | 21.9  |
| 粘土                         | 78.1  |

### (3) 供試体作成方法

供試体を作製する際には、まず試料土と固化材を均質に混合するために試料土の含水比を液性限界  $w_L$  の 1.5 倍 ( $w=237.2\%$ ) に調整した。次に、固化材を加えてミキサーで混合した。固化材の添加量は石灰の場合 35, 50, 70kg/m<sup>3</sup>、セメントの場合 50, 70, 100kg/m<sup>3</sup> である。その後、プラスチック製の円筒型モールド ( $\phi=50\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$ ) に詰めて上部をラップで覆い、20℃に調整した恒温器内で 28 日間養生した。養生終了後、脱型した供試体を実験に供した。

## 4. 研究成果

### (1) 化学的な知見に基づく固化処理土の劣化機構に関する既往の研究成果

著者らの既往の研究成果より、以下のような海水の影響による石灰・セメント処理土の化学的な劣化機構を明らかにした。海水に浸漬した石灰・セメント処理土は軟化した範囲において、土中の pH の低下や Ca 濃度の減少、Mg 濃度の増加、供試体表面層における硫酸カルシウム (CaSO<sub>4</sub>) の堆積を確認した。これらことから、石灰処理土を海水に浸漬した場合、海水中の Mg イオンが処理土内に移動して水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) と反応し、塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>)、CaSO<sub>4</sub> ならびに水酸化マグネシウム (Mg(OH)<sub>2</sub>) が生成され、それらが溶解・析出する。その結果、処理土内の Ca 濃度が減少すると同時に pH も低下する。さらに、土中の pH が著しく低下した状態では、セメンテーション物質である珪酸カルシウム水和物 (C-S-H) やアルミン酸カルシウム水和物 (C-A-H) が溶解・変質して固化処理土の強度が著しく低下する。

### (2) 間隙径分布からみた固化処理土の劣化機構

#### ① 実験方法と手順

作製した石灰処理土供試体のうち固化材添加量 35kg/m<sup>3</sup> の供試体を NaCl 濃度 30g/L に

調整した人工海水に 38 日間浸漬させた。このとき、供試体にはゴムスリーブを被せた。なお、ゴムスリーブの下部は密閉し、海水との接触は供試体上面のみとなるようにした。なお、4 (1) で述べたように、固化処理土の劣化は海水中の Mg を消費しながら進行する。そこで、処理土の劣化を促進させるために、浸漬期間中は人工海水を 1 回/週の頻度で交換した。

間隙径分布を測定する試料の採取位置を決めるために、海水に浸漬した供試体に対して小型のコーン (径: 6mm, 先端角度: 60°) を使用した貫入試験ならびに蛍光 X 線分析による土中の元素濃度の測定を実施し、貫入抵抗およびカルシウム (Ca), マグネシウム (Mg) 濃度の深度分布を調べた。

図-1 に 38 日間海水に浸漬した供試体 (固化材添加量: 35kg/m<sup>3</sup>) と浸漬前の供試体の貫入抵抗, Ca および Mg 濃度の深度分布を示す。浸漬前の供試体は、貫入の初期段階から急激に貫入抵抗が発現し始める。それに対して、海水に浸漬した供試体は、海水との接触面である表層付近において貫入抵抗が発現が認められず、表層部の軟化が確認できる。貫入抵抗の深度分布において、貫入抵抗がほとんど発現しない範囲と急激に発現し始める範囲が確認できる。これら 2 つの範囲をそれぞれ直線で近似し、2 直線の交点の深さを劣化深度  $d_n$  とする。この供試体の劣化深度は  $d_{38}=7.0\text{mm}$  であった。劣化深度以浅では浸漬前に比べて固化材の主成分である Ca と処理土の劣化を引き起こす原因物質である Mg の著しい濃度変化がみられる。また、劣化深度以深でも 17.5mm 付近まで Ca および Mg 濃度の変化がみられる。17.5mm 以深の Ca, Mg 濃度は浸漬前とほぼ同じ濃度であり、深さ方向にもほとんど変化がみられない。ここで、以下に記す方法で海水に浸漬した供試体を 3 つの状態に区分する。貫入抵抗が発現がほとんど認められず、著しく軟化していると考えられる劣化深度以浅の範囲を劣化状態と定義する。劣化深度以深において、貫入抵抗が発現は認められるが、浸漬前に比べて Ca 濃度の

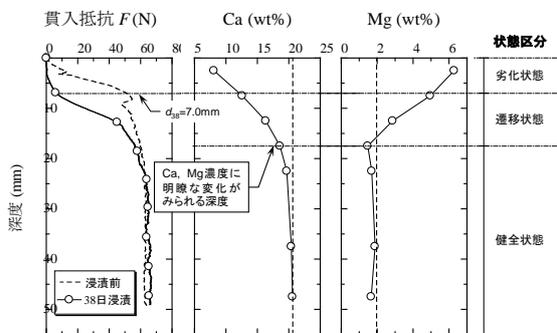


図-1 貫入抵抗および Ca, Mg 濃度の深度分布に基づく状態区分

減少および Mg 濃度の増加が確認できる範囲を劣化状態への遷移段階にあると考え、遷移状態と定義する。貫入抵抗が発現がみられ、Ca および Mg 濃度の変化がみられない範囲は浸漬前から大きな性質変化はないものと考え、健全状態と定義する。それぞれの状態の範囲からワイヤソー、直ナイフ、ピンセット等を用いて間隙径測定用の採取した。採取した試料を 5mm 角程度に整形した後、速やかに液体窒素に浸して瞬間凍結し、真空乾燥機を使用して乾燥させた。乾燥終了後、それぞれの試料に対して水銀圧入式ポロシメーターを使用して間隙径分布の測定を実施した。また、海水に浸漬する前の供試体 (固化材添加量: 35, 50, 70kg/m<sup>3</sup>), 石灰を添加する前の有明粘土についても同様の検討を行った。水銀の表面張力  $\sigma$  は  $484 \times 10^{-3}\text{N/m}$ , 接触角  $\theta$  は  $140^\circ$  とした。間隙径は  $0.006 \sim 210 \mu\text{m}$  の範囲で、130 点測定した。

## ② 石灰処理によって生じる有明粘土の間隙容積と間隙径分布の変化

有明粘土および海水浸漬前の石灰処理土の累積間隙容積  $\Sigma V_p$  と間隙径  $d_p$  の関係を図-2 示す。固化材を添加していない有明粘土の間隙容積は  $d_p=1 \mu\text{m}$  付近から急激に増加し始め、累積間隙容積  $\Sigma V_p$  は 2.3mL/g 程度であった。海水浸漬前の石灰処理土は  $d_p=0.7 \mu\text{m}$  以下では固化材添加量が多いものほど間隙容積が大きいが、それ以降はその傾向が逆転し始める。最終的な累積間隙容積  $\Sigma V_p$  は固化材添加量 35, 50, 70kg/m<sup>3</sup> でそれぞれ 1.78, 1.64, 1.59mL/g であり、添加量が少ないものほど大きい。固化処理を行った試料の累積間隙容積  $\Sigma V_p$  は有明粘土に比べて小さい。

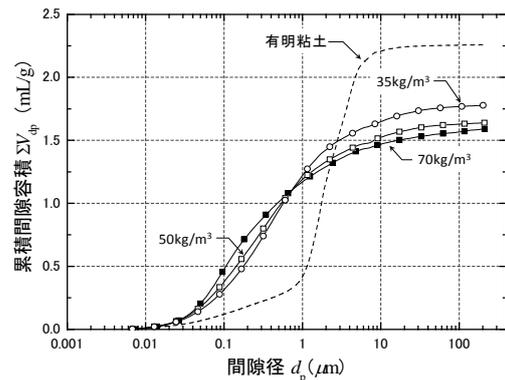


図-2 有明粘土, 石灰処理土の累積間隙曲線

有明粘土および海水浸漬前の石灰処理土の間隙径の増分に対する水銀の圧入容積の増分の比  $dV/d \log d_p$  と間隙径  $d_p$  の関係を図-3 に示す。有明粘土の場合、 $d_p=2 \mu\text{m}$  付近で鋭いピークを示している。石灰処理土の場合、35, 50, 70kg/m<sup>3</sup> でそれぞれ 0.5, 0.4, 0.1  $\mu\text{m}$  付近にピークがみられ、固化材添加量の増

加とともにピークを示す間隙径が小さくなっている。

有明粘土は固化処理を施すと、その固化材の添加量によって間隙の総量が減少し、ピークを示す間隙径が小さくなることがわかった。これらの結果は、ポズラン反応による水和物の生成に起因するものと考えられる。すなわち、固化処理によって生成された水和物が有明粘土の間隙の大部分を占めていた1~10 $\mu\text{m}$ の間隙を充填・細分化したため、総間隙容積が減少し、固化材を添加する前の有明粘土に比べて小さな径の間隙が卓越する構造になったと推察される。

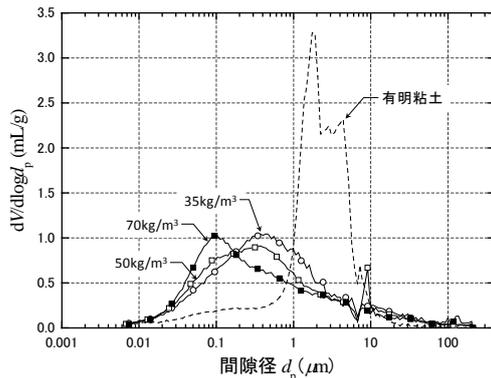


図-3 有明粘土，石灰処理土の間隙径分布

③ 海水浸漬によって生じる石灰処理土の間隙容積と間隙径分布の変化

海水浸漬前および浸漬後の各状態における石灰処理土の累積間隙容積  $\Sigma V_{dp}$  と間隙径  $d_p$  の関係を図-4 に示す。浸漬前、健全状態、遷移状態、劣化状態の累積間隙容積  $\Sigma V_{dp}$  は1.7mL/g程度であった。遷移状態は他の状態の試料に比べ、若干小さな値を示したが大きな差異はみられなかった。

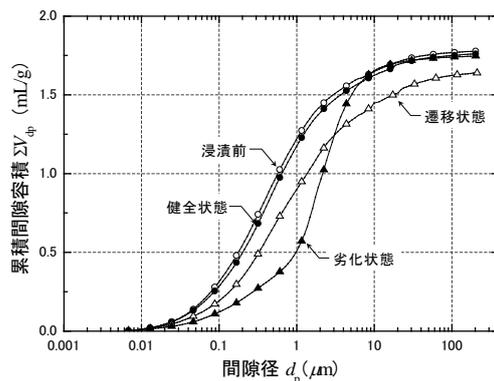


図-4 各状態の石灰処理土の累積間隙曲線

海水浸漬前および浸漬後の各状態における石灰処理土の  $dV/d\log d_p$  と間隙径  $d_p$  の関係を図-5 に示す。健全状態の場合、 $d_p=0.4\mu\text{m}$  付近でピークを示し、浸漬前の間隙径分布と

ほぼ一致している。遷移状態の場合、健全状態や浸漬前と同じ間隙径の付近でピークを示すが、ピーク値が減少していることがわかる。また、 $d_p=2\mu\text{m}$  付近でもう一つのピークが観測される。劣化状態の場合、他の状態の試料においてみられた  $d_p=0.4\mu\text{m}$  付近ではピークは現れず、遷移状態の第2のピークが観測された  $d_p=2\mu\text{m}$  付近で鋭いピークを示し、健全状態や浸漬前と比較すると、ピーク値を示す間隙径が大きい方へシフトしていることが分かる。

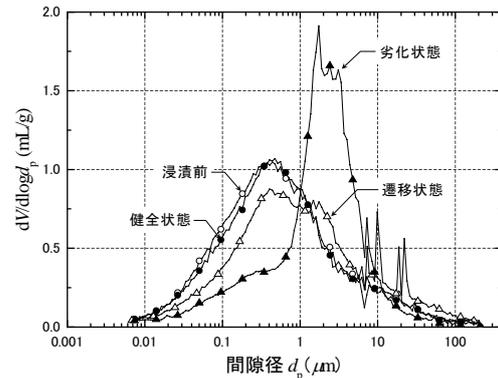


図-5 各状態の石灰処理土の間隙径分布

有明粘土および劣化状態の石灰処理土の  $dV/d\log d_p$  と間隙径  $d_p$  の関係を図-6 に示す。ピーク値は異なるものの、両試料とも  $d_p=2\mu\text{m}$  付近で鋭いピークを示しており、非常に類似した分布形状を示していることがわかる。

石灰処理土は海水の影響を受けると、間隙の総量をほぼ一定に保った状態で間隙径分布が変化することが明らかになった。これは、図-1 に示した元素分析の結果から、処理土中の化学組成の変化とともに固化処理によって供試体中の間隙を充填した水和物が海水の影響によって溶解したことや、Mgを含む水和物が生成されて逆に間隙を充填したことが原因と考えられる。

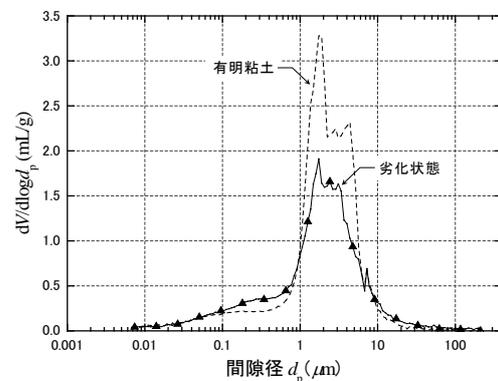


図-6 有明粘土，劣化状態の石灰処理土の間隙径分布

(3) 劣化の進行予測に関する検討

① 実験方法と手順

固化材添加量 50, 70, 100kg/m<sup>3</sup> のセメント処理土供試体を NaCl 濃度を 10, 20, 30g/L に調整した人工海水にそれぞれ浸漬した。浸漬時間は 28, 56, 84, 168 日である。本実験では、浸漬水である海水の交換を実施する場合としない場合の両条件浸漬を行った。なお、海水の交換頻度は 1 回/週とした。所定の期間浸漬後の供試体に対して小型コーン貫入試験を実施した。

② 浸漬条件が劣化に及ぼす影響

NaCl 濃度を 20g/L に調整した人工海水に浸漬させた固化材添加量 50, 70, 100kg/m<sup>3</sup> の供試体の貫入抵抗  $F$  の深度分布を図-7 に示す。浸漬前の供試体は貫入の初期段階で貫入抵抗が急激に発現し始め、深度 10mm 前後で一定の値を示し始める。それに対して、海水に浸漬した供試体は表層付近において貫入抵抗の発現はほとんどみられない。さらに、浸漬時間に伴って貫入抵抗の発現がみられない範囲が広がっていることがわかる。劣化深度の経時変化を図-8 に示す。劣化深度は浸漬時間が長く、セメント添加量が少ないものほど深い傾向がある。同じ固化材添加量の供試体で比較すると海水の交換を実施したケ

ースの方が劣化深度が深い。さらに、海水交換の有無による劣化深度の差は浸漬時間とともに次第に大きくなるのがわかる。これは、海水交換を実施しないケースでは、浸漬時間とともに浸漬水中の Mg イオン濃度が減少したことが原因と考えられる。

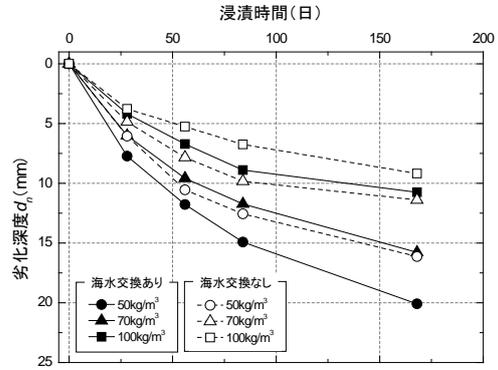


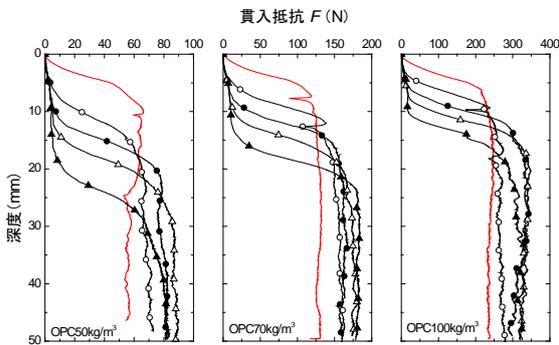
図-8 劣化深度の経時変化(NaCl 濃度 20g/L)

③ 劣化の進行予測に関する検討

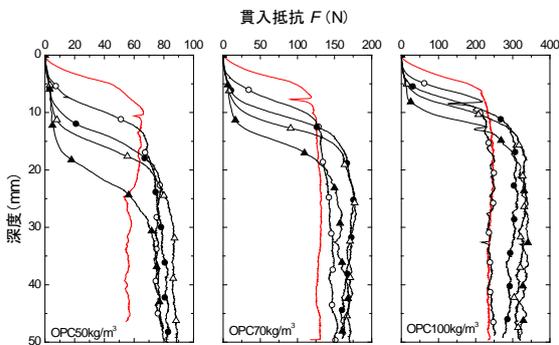
セメント処理土の劣化が、浸漬水中のMgイオンの拡散によって生じると考え、大気中の炭酸ガスの拡散によるコンクリートの中酸化進行予測モデルを基に、海水交換を実施したケースにおいて、実験で得られた劣化深度に対して次式で近似化を試みた。

$$d_n = A\sqrt{t} \quad (1)$$

近似曲線を図-9 に示す。いずれの固化材添加量および海水 (NaCl) 濃度についても近似曲線と実験値の間に大きな乖離はみられず、非常に良い近似となる。このことから、セメント処理土の劣化は海水への浸漬 (接触) 時間の平方根に比例して進行すると考えられる。式 (1) 係数  $A$  は、固化材添加量や海水の濃度など多くの内的および外的要因によって定まる関数であると考えられる。これに関する検討は今後の課題としたい。

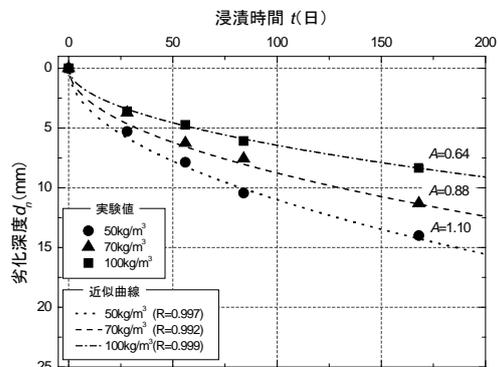


(a) 海水交換実施

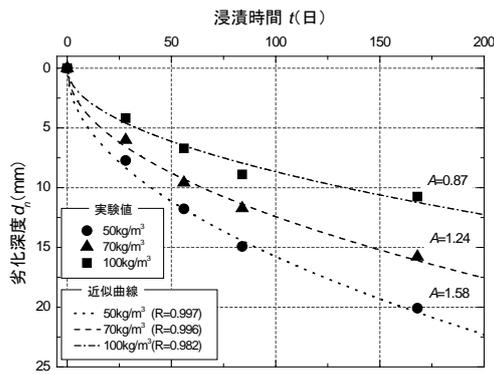


(b) 海水交換未実施

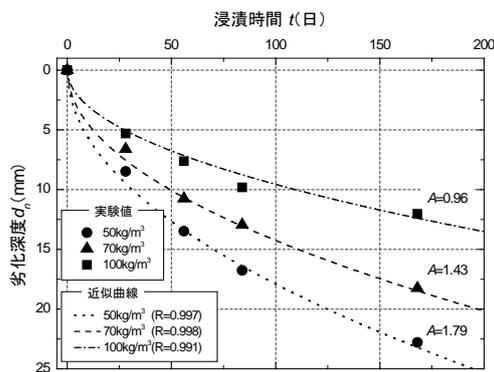
図-7 貫入抵抗の深度分布(NaCl 濃度 20g/L)



(a) NaCl 濃度 10g/L



(b) NaCl 濃度 20g/L



(c) NaCl 濃度 30g/L

図-9 劣化深度の近似曲線

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 海水環境下における石灰処理土のカルシウム溶出機構, 材料, Vol. 61, No. 1, pp. 11-14, 2012.
- ② 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 地下水の塩水化が石灰処理土の間隙径分布に及ぼす影響, 環境地盤工学シンポジウム論文集 Vol. 9, pp. 227-230, 2011.
- ③ H. Hara, D. Suetsugu and Yoshihisa Miyata: Long Term Performance of Lime Treated Soil near Seaside, International conference on advances in geotechnical engineering, pp. 537-542, 2011.
- ④ 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 石灰処理土の固化成分の溶出に及ぼす海水の影響, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, Vol. 9, pp67-70, 2010. 11.
- ⑤ H. Hara, D. Suetsugu, S. Hayashi: Effects of lime content on deterioration of lime-treated soil immersed in seawater, Proc. of International Symposium on Lowland

Technology, pp. 147-151, 2010.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 鈴木裕美, 末次大輔, 原弘行, 渡辺江美: 「セメント処理土の海水劣化促進実験における海水交換の影響について」, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp357-358, (鹿児島 2012 年 3 月).
- ② 渡辺江美, 末次大輔, 原弘行, 鈴木裕美: 「バンダーエレメント試験による海水浸漬した石灰処理土の剛性率分布の測定」, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp349-350, (鹿児島 2012 年 3 月).
- ③ 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 「海水環境下におけるセメント混合処理した有明粘土の間隙径分布の変化」, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp25-26, (松山 2011 年 9 月).
- ④ 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 「海水環境下における石灰処理土の間隙径分布の変化」, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp5-6, (神戸 2011 年 7 月).
- ⑤ 大坪桂子, 原弘行, 末次大輔: 「海水に浸漬させた石灰処理土の間隙径分布の変化」, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp477-478, (北九州 2011 年 3 月).
- ⑥ 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 「海水浸漬により軟化した石灰処理土の圧密特性」, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp1047-1048, (北海道 2010 年 9 月).
- ⑦ 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 「石灰処理土の含水比に及ぼす海水の影響」, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp. 607-608, (松山 2010 年 8 月).
- ⑧ 原弘行, 末次大輔, 林重徳: 「海水に浸漬したセメント処理土の物性変化」, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp433-434, (熊本 2010 年 3 月).
- ⑨ 水城正博, 末次大輔, 林重徳, 原弘行: 「海水に浸漬させ軟化した固化処理土の圧密特性について」, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp435-436, (熊本 2010 年 3 月).

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 重徳 (SHIGENORI HAYASHI)

佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・客員研究員

研究者番号: 8 0 1 1 2 3 0 8

(2) 研究分担者

末次大輔 (SUETSUGU DAISUKE)

佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・准教授

研究者番号: 3 0 4 2 3 6 1 9