

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820215

研究課題名(和文)河川感潮域における固化処理地盤の軟化の進行予測に関する研究

研究課題名(英文) Estimation of deterioration progress of stabilized soil in tidal area of river

研究代表者

原 弘行 (HARA, HIROYUKI)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号：00588709

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)：河川感潮域における固化処理土の耐久性評価の基盤となる知見を得るため、固化処理土の劣化の進行に及ぼす固化材の種類・添加量、海水濃度、温度の影響を実験的に調べた。実験結果から、それらの影響を単純な関数で表示し、簡易な劣化の進行予測式を示した。さらに、条件次第で観測される固化処理土表面に現れる変質は、その緻密な構造に起因して処理土からのカルシウムの溶出、ひいては力学的劣化を抑制する効果を持つことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to contribute the development of durability estimation method for chemical stabilized soil in tidal area, effects of types and adding the amount of stabilizer, salinity concentration and temperature of tidal river water on deterioration rate of stabilized soil were investigated by laboratory tests. An empirical prediction formula of deterioration rate of cement and lime treated clay under marine environment considering above factors was proposed according to experimental results. In addition, it was verified that the alteration which is generated at boundary between seawater and the stabilized soil has a protection effect against calcium leaching and mechanical deterioration of stabilized soil due to its intricate structure.

研究分野：地盤工学

キーワード：土質安定処理 セメント処理土 石灰処理土 海水 劣化 温度 変質 カルシウム

1. 研究開始当初の背景

九州地方における海水が遡上する感潮河川域において、約 20 年前に建設された堤防基礎部の固化処理土層が著しく軟化している箇所が数多く確認された。問題個所の調査を実施したところ、当該河川において海水が遡上する河口から約 25km 地点までの感潮域の中でも、特に塩濃度が高い河口付近に多くの問題個所が分布していることが明らかになった。このことから、堤体の固化処理土層が海水成分を含む河川水の影響を受けて軟化した可能性が強く示唆された。堤体における固化処理土層の軟化問題は、構造物の沈下や堤体の不安定化を引き起こす。その結果、本来構造物の持つ機能を著しく低下させることとなる。固化処理土はコンクリートと類似した機構で硬化するにも関わらず、建設材料分野のように積極的に耐久性について議論されてきていない。固化処理土の劣化は、類似した研究事例や調査事例が極端に少なく、未解明の部分が多い課題である。数十年前から我が国のあらゆる沖積平野地域で、固化処理工法を用いた土構造物が数多く建設されているが、近い将来、地球規模の気候変動に起因した海面上昇によって、地下水や河川水の塩水化が促進され、当該軟化現象が各地で顕在化してくることも考えられる。今後、感潮域においてセメントや石灰を使用して建設された固化処理地盤を長期に亘り供用していくためには、海水環境下における固化処理土の劣化現象を詳細に把握しておく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、河川感潮域における石灰・セメントで固化処理した地盤の耐久性評価の基盤となる知見を得るため、固化処理土の劣化の進行に影響する主な要因を抽出し、それらの影響を定量的に評価して、簡易な劣化の進行予測式を提案することを目的とする。さらに、条件次第で海水-処理土の界面付近に生じる“変質”が劣化の進行に及ぼす影響についても検討した。

3. 研究の方法

(1) 研究内容の構成

本研究では、以下の 2 つの実験を実施した。

- ① 海水浸漬による促進劣化実験
  - ② Mg 水溶液を用いた一次元拡散溶出試験
- 促進劣化実験では、劣化に影響すると考えられる固化材の種類・添加量、海水の濃度、温度をパラメータとして長期間海水に浸漬させた固化処理土供試体の力学的性質の空間分布を経時的に調べ、上記要因が劣化の進行に及ぼす影響を定量的に調べた。一次元拡散溶出実験では、条件次第で固化処理土表面に生じる変質に着目し、変質の有無と Ca の溶出挙動から変質部が有する劣化に対する抑制効果について調べた。

(2) 実験に用いた材料

海水に含まれる成分とその濃度は、季節や天候によって変動するため、長期間の実験において、安定した濃度で海水を供給することは難しい。そのため、本研究における実験では、実際の海水の代用として人工海水を使用した。人工海水は、海水の組成を模して人工的に調整された市販の粉末をイオン交換水に溶解したものである。実験に使用した人工海水は劣化の原因物質であるマグネシウムイオン ( $Mg^{2+}$ ) 濃度が実際の海水の半分程度の濃度であった。なお、海水の濃度は、その海水の NaCl 濃度 (g/L) で表記する。また、一次元拡散溶出試験では、水質分析の精度向上のため、Mg 水溶液を使用した。海水の塩類組成および  $Mg^{2+}$  濃度を参考に  $MgCl_2$  と  $MgSO_4$  の割合が 7:3、 $Mg^{2+}$  濃度が 938mg/L となるように調整したものを Mg 水溶液とした。

試料土は、佐賀県小城市の感潮河川の河口域に堆積した有明粘土である。試料土の物性を表-1 に示す。

固化材は高炉セメント B 種 (BB)、普通ポルトランドセメント (OPC)、生石灰 (QL) を使用した。

表-1 試料土の物理的性質

Soil particle density	(g/cm <sup>3</sup> )	2.62
Liquid limit	(%)	140.7
Plastic limit	(%)	45.3
Grain size distribution	(%)	
Gravel		0.0
Sand		1.5
Silt		27.1
Clay		71.4

(3) 供試体作製方法

① 促進劣化実験

BB、OPC、QL の 3 種の固化材を使用した処理土供試体を作製した。固化材の添加量はそれぞれ、OPC、BB は 50、70、100kg/m<sup>3</sup>、QL は 35、50kg/m<sup>3</sup> とした。供試体を作製するときは、含水比を液性限界の 1.5 倍に調整した試料土に固化材を添加し、電動ミキサーで約 10 分間混合した。それを  $\phi=50$ mm、 $H=100$ mm のプラスチックモールドに空気が入らないように充填し、温度 20°C、湿度 80% に調整した恒温恒湿器内で 28 日間養生したものを供試体として実験に供した。

② 一次元拡散溶出試験

固化材は QL のみを使用した。固化材の添加量は 35、50、70、100kg/m<sup>3</sup> とした。①のときと同様な含水比調整で固化材と試料土を混合し、28 日養生した後高さを 50mm に整形したものを供試体とした。

(4) 実験方法と手順

① 促進劣化実験

作製した供試体を NaCl 濃度 10, 20, 30g/L に調整した人工海水に浸漬させた。このとき、供試体の上面以外をパラフィルムで覆い、さらにその上からゴムスリブを被せて供試体の上面のみが海水と接触するようにした。海水の量は供試体 1 本当たり 1L としている。海水への浸漬時間は 0, 28, 56, 112, 168, 252 日とした。海水浸漬後、供試体の力学的劣化領域を調べるために、小型のコーン (径 6mm, 先端角度 60°) を用いた貫入試験を実施した。貫入試験は、供試体の上面からコーンを 3mm/min の速度で 50mm 程度貫入する方法で行った。

温度の影響を調べる実験では、固化材を BB, 海水の濃度は NaCl 濃度 20g/L のみとし、浸漬させる海水の温度を冷蔵ショーケースや恒温水槽を用い、水温を 10, 20, 30°C に調整して上記と同様な手法で実験を行った。

② 一次元拡散溶出試験

作製した石灰処理土供試体と Mg 水溶液を用いて、次の要領で一次元拡散溶出試験を実施する。まず、溶液をポリエチレン製の容器に注ぎ、各石灰添加量の供試体を溶液へ浸漬させる。このとき、供試体上部以外はパラフィルムで覆い、さらにその上からゴムスリブを被せて供試体上面のみが溶液と接触するようにした。溶液の量は供試体 1 本に対して 1L とした。浸漬後、所定の期間経過した後に浸漬水を全量採水して、新たな溶液に供試体を浸漬させる。採取した浸漬水に対して水質分析を実施し、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>濃度を測定した。溶液の更新時刻は開始から 0, 0.25, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 日目とした。64 日経過後、①で記した促進劣化実験と同様にコーン貫入試験を実施した。

4. 研究成果

(1) 劣化の進行に及ぼす要因とその評価

① 固化材の種類・添加量、海水濃度の影響

コーン貫入試験結果の一例として、OPC 処理土の貫入抵抗の深度分布を図-1 に示す。いずれの添加量の場合においても、浸漬前 (浸漬 0 日) の供試体は貫入の初期段階で貫入抵抗が急激に増加し、深度約 10mm から一定の値を示している。それに対して、海水浸漬後の供試体は表層付近で貫入抵抗がほとんど発現しない範囲がみられる。また、その範囲は浸漬時間とともに拡大していることがわかる。ここで、貫入抵抗が著しく低下している範囲を劣化深度  $d_0$  として図-2 に示す方法で定量した。すなわち、浸漬前の供試体において貫入抵抗の最大値  $F_0$  の半分の値 ( $F_0/2$ ) を示すときの深さを抽出し、これを  $d_0$  とする。同様に、海水浸漬後の供試体の貫入抵抗曲線において  $F_0/2$  を示すときの深さ  $d$  を取り出し、先に求めた浸漬前の  $d_0$  を差し引いて劣化深度  $d_n$  と定義した。

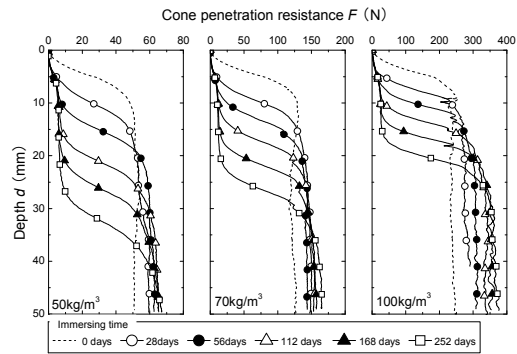


図-1 コーン貫入抵抗の深度分布 (OPC)

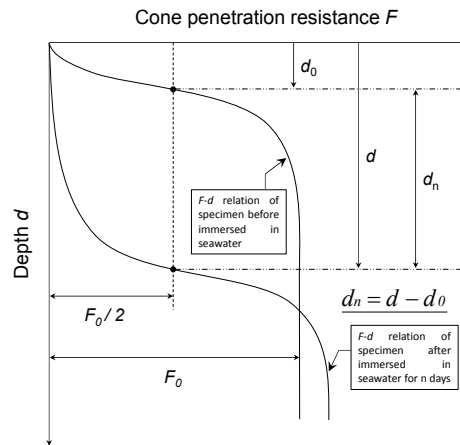


図-2 劣化深度の定量方法

一例として、NaCl 濃度 20g/L の海水に浸漬させた混合処理土供試体の劣化深度の経時変化を図-3 に示す。横軸は浸漬時間の平方根を採用している。固化材の種類にかかわらず、劣化深度は浸漬時間の増加に伴って大きくなっている。また、固化材添加量が少ない方が劣化深度が大きい。図中の破線はコンクリートの中酸化の進行予測に用いられるモデルを参考に、本実験で得られた劣化深度について、式(1)を用いて近似したものである。

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

ここに、 $A$  は劣化速度係数、 $t$  は浸漬時間を表す。得られた回帰直線はいずれも実験値と大きな乖離はみられず、決定係数  $R^2$  も 1 に近い値を示している。このことから、固化処理土の力学的劣化は海水との接触時間の平方根に比例して進行することが示された。得られた劣化速度係数  $A$  と固化材添加量の関係を図-4 に示す。固化材別にみると、添加量が多い場合ほど劣化速度係数は小さくなる傾向が確認できる。しかしながら、同じ添加量でも固化材が異なれば劣化速度係数も異なっていることがわかる。

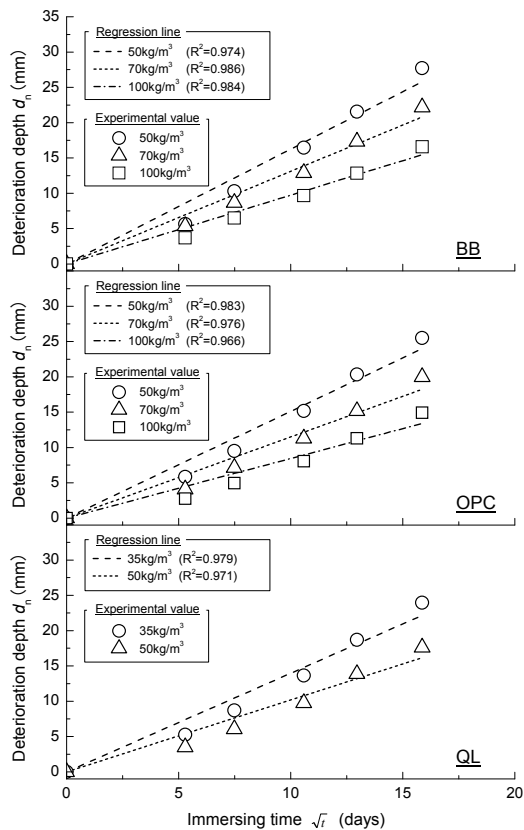


図-3 劣化深度の経時変化 (NaCl 濃度 20g/L)

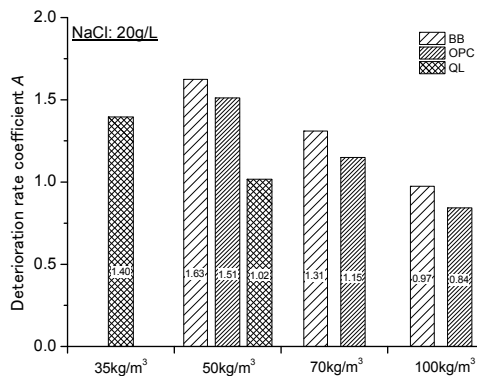


図-4 セメント・石灰処理土の劣化速度係数 (NaCl 濃度 20g/L)

ここで、固化処理土に含まれる CaO 量に着目し、劣化速度に及ぼす影響について検討する。表-2 は各固化材の CaO 含有率を示したものであり、CaO 含有率は、QL, OPC, BB の順に大きい。これを用いて、固化材添加量から試料土の乾燥質量に対する CaO 量を求め、これを CaO 添加率とした。劣化速度係数と CaO 添加率の関係を図-5 に示す。劣化速度係数は、固化材の種類によらず CaO 添加率の増加に伴い低下する傾向がみられた。このことから、セメント・石灰処理土の劣化の進行速度は固化材の種類にかかわらず、CaO 添加率が影響することが示された。

表-2 固化材に含まれる CaO 含有率

Stabilizer name	CaO content (%)
Blast-furnace slag cement type B (BB)	54.49
Ordinary Portland cement (OPC)	64.30
Quick lime (QL)	96.89

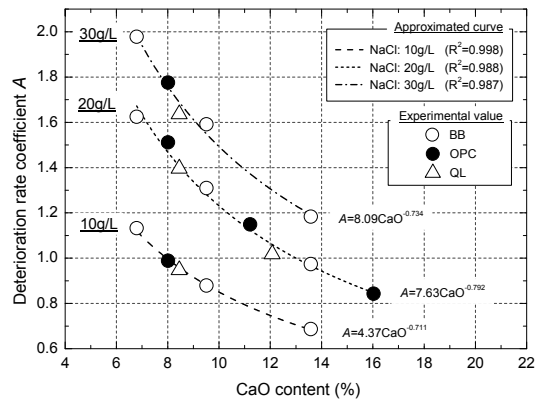


図-5 劣化速度係数と CaO 添加率の関係

## ② 温度の影響

10, 20, 30°Cの海水に浸漬させた BB 処理土の劣化深度の経時変化を図-6 に示す。先述の式(1)で近似した結果、得られた回帰直線はいずれも実験値と大きな乖離はなく、温度にかかわらず、劣化深度は浸漬時間の平方根に比例して拡大することが示された。

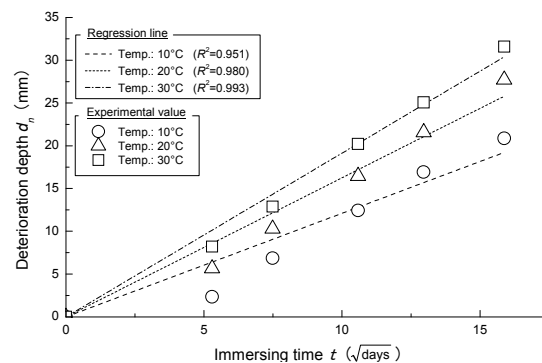


図-6 劣化深度の経時変化 (固化材: BB, 温度: 10, 20, 30°C)

海水環境下における固化処理土の劣化は、海水中の Mg を含む塩が処理土中に浸透し、水酸化カルシウム ( $Ca(OH)_2$ ) と反応することによって進行する。物質の拡散や化学反応の速度は、絶対温度の逆数に反比例して大きくなるというアレニウスの法則に従うとされており、コンクリートの中酸化などにも適用されている。ここで、得られた劣化速度係数についてアレニウスプロットした結果を図

-7に示す. 概ね直線的な関係がみられることから, 固化処理土の劣化はアレニウスの法則に従って, 温度が高い場合ほど速く進むと考えられる.

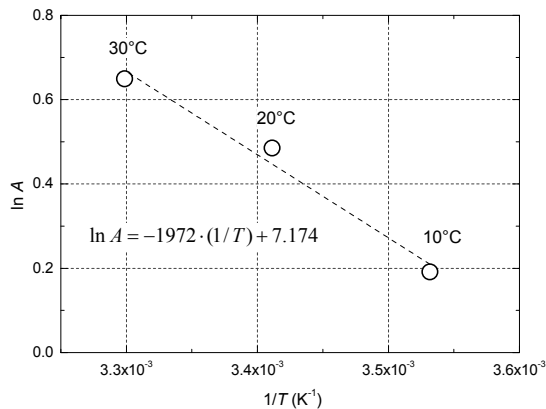


図-7 劣化速度係数のアレニウスプロット

### ③ 簡易な劣化の進行予測

前節までに示したように, 劣化深度と海水への浸漬時間の関係は式(1)で近似することができ, 劣化速度係数  $A$  は  $\text{CaO}$  添加率や温度の簡単な関数として表すことができた.

ここで, 定常状態において,  $\text{Mg}^{2+}$  がセメント処理土中へ拡散移動して劣化が進行していくと仮定すると次式が成り立つ.

$$dd_n / dt = k \cdot C_{Mg} / d_n \quad (2)$$

ここに,  $k$  は比例定数,  $C_{Mg}$  は  $\text{Mg}^{2+}$  濃度を示す. この微分方程式を解き, 浸漬時間  $t=0$  のとき劣化深度  $d_n=0$  とすると次式で表される.

$$d_n = k \sqrt{C_{Mg} \cdot t} \quad (3)$$

$k$  は式(1), (3)より次式で表すことができる.

$$k = A / \sqrt{C_{Mg}} \quad (4)$$

ここで, 比例定数  $k$  はセメント処理土の外的・内的要因に起因して劣化に作用するものとして, 海水中の  $\text{Mg}^{2+}$  濃度 ( $k_{Mg}$ ),  $\text{CaO}$  添加率 ( $k_{CaO}$ ), 温度 ( $k_T$ ), 母材の種類 ( $k_S$ ) によって次式のように表すことができると仮定する.

$$k = k_{Mg} \cdot k_{CaO} \cdot k_T \cdot k_S \quad (5)$$

本研究では, 母材の影響は調べておらず考慮できないため,  $k_S=1$  とした. 詳しい計算過程等は省略するが, その他の要因を実験結果からフィッティングして次の形で表示した.

$$d_n = f(Mg) \cdot f(CaO) \cdot f(T) \cdot \sqrt{C_{Mg} \cdot t} \quad (6)$$

得られた劣化深度の実験値と式(6)より求めた計算値の相関図を図-8に示す. 実験値との乖離は小さく, 比較的精度良く評価できた.

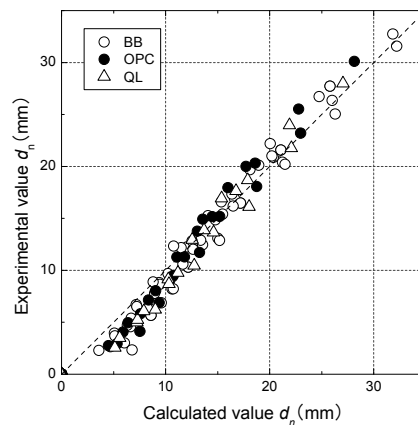


図-8 劣化深度の実験値と計算値の比較

## (2) 石灰処理土の変質とその劣化抑制効果

### ① 表面変質の観察・分析結果

浸漬 64 日後の添加量 35, 100kg/m<sup>3</sup> の供試体の表面写真を写真-1に示す. 100kg/m<sup>3</sup> の供試体のみ表面が白く変色していることが確認された. この供試体の表層部を採取して SEM 観察, 蛍光 X 線分析を行った. 写真-2に SEM 画像を示す. 写真から, 白色析出物は 3~4μm の球状を呈する物質の集合であり, これが処理土表面を被覆している様子が確認できる. さらに, 元素分析に供した結果, Mg と酸素 (O) が全体の 90%以上を占めていることがわかった. これより, 処理土表面の白色析出物は Mg による劣化の化学反応によって生成された水酸化マグネシウム ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) と推察される.

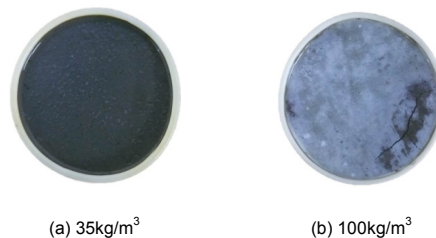


写真-1 供試体表面写真 (64 日後)

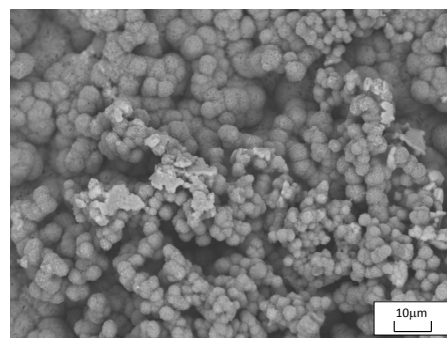


写真-2 白色析出物の SEM 画像 (1,000 倍)

### ② 変質による劣化抑制効果

水質分析の結果から, 式(7), (8)を用いて各分画の  $\text{Ca}$  の実測溶出量  $M_{Ca, i}$  と溶出フラックス

クス  $J_{Ca, i}$  を求めた。

$$M_{Ca, i} = \frac{C_{Ca, i} \cdot V_i}{S} \quad (7)$$

$$J_{Ca, i} = \frac{M_{Ca, i}}{t_i - t_{i-1}} \quad (8)$$

ここに、 $C_{Ca, i}$  は分画  $i$  の Ca 溶出濃度、 $V_i$  は分画  $i$  の溶出液体積、 $S$  は溶液と接触する供試体上面の表面積、 $t_i$  と  $t_{i-1}$  はそれぞれ  $i$  回目、 $i-1$  回目の溶液更新時刻、 $C_{Mg, 0}$  は溶液の初期  $Mg^{2+}$  濃度、 $C_{Mg, i}$  は分画  $i$  の  $Mg^{2+}$  濃度を表す。

Ca 溶出フラックスの時間変化を図-9 に示す。添加量 35, 50, 70kg/m<sup>3</sup> の供試体は、いずれも同様な減少傾向を示す。白色析出物が観測された 100kg/m<sup>3</sup> の場合、初期のフラックスは他のケースよりも高い値を示すものの、その後時間とともに著しく減少していることがわかる。

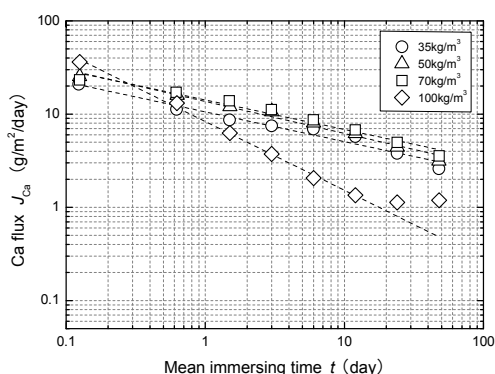


図-9 Ca 溶出フラックスと平均時間の関係

貫入試験結果から求めた供試体の劣化深度を図-10 に示す。35, 50, 70kg/m<sup>3</sup> でそれぞれ  $d_{64}$ =11.6, 8.7, 7.5mm を示しており、溶液との界面から 10mm 前後の領域で力学的な劣化が進行していることがわかる。他方、白色析出物が観測された 100kg/m<sup>3</sup> の供試体の場合、劣化深度はゼロであった。このことから、石灰処理土表面に析出した  $Mg(OH)_2$  とみられる析出物はその緻密な構造によって Ca の溶出、ひいては力学的劣化を抑制する効果を持つと考えられる。

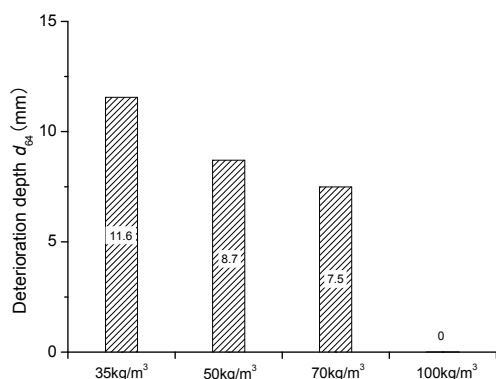


図-10 劣化深度の定量結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 原弘行, 末次大輔, 林重徳, 松田博, 海水環境下におけるセメント処理した有明粘土の劣化の進行に関する検討, 材料, Vol. 63, No. 1, pp. 49-54, 2014, 査読有.
- ② H. Hara, D. Suetsugu and H. Matsuda, Progress speed of deterioration of cement and lime treated soil immersed in seawater, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Lowland Technology, pp. 169-173, 2014, 査読有.
- ③ 原弘行, 末次大輔, 松田博, 海水環境下における石灰処理土の表面変質とその劣化抑制効果, 第 11 回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 145-150, 2014, 査読有.

〔学会発表〕(計3件)

- ① 原弘行, 海水環境下におけるセメント・石灰混合処理土の劣化の進行に関する検討, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014. 9. 12. 大阪府豊中市 大阪大学豊中キャンパス
- ② 原弘行, 海水中の Mg による石灰処理土の表面変質とその Ca 溶出抑制効果, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014. 7. 17. 福岡県北九州市 北九州国際会議場ほか
- ③ 原弘行, 海水環境下における石灰処理土の表面変質がカルシウムの溶出に及ぼす影響, 第 66 回土木学会中国支部研究発表会, 2014. 5. 31. 島根県松江市 松江工業高等専門学校

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 弘行 (HARA, HIROYUKI)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：00588709