

## 海水中のマグネシウムによってセメント処理土表面に 発生する白色析出物の劣化抑制効果

Deterioration Suppression Effect of White Sediments Generated on Surface of  
Cement Stabilized Clay Due to Magnesium Salts in Seawater

原弘行      Hiroyuki HARA      (山口大学大学院創成科学研究科)  
安井賢太郎      Kentaro YASUI      (宮崎大学工学部)

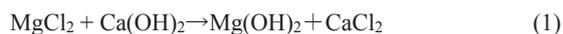
本研究では、有明粘土に普通ポルトランドセメントを添加・混合して作製したセメント処理土を海水を模擬したマグネシウム水溶液へ浸漬させる実験を実施した。浸漬後の処理土供試体の一部においてその表面に白色の析出物が観測された。この析出物の生成状況を経時的に観察すると同時にセメント処理土からのカルシウム溶出特性およびコーン貫入試験による力学的劣化状況を実験的に調べた。その結果、比較的セメント添加量が多いときに、供試体表面に白色の析出物が観測された。この析出物が生成された場合、カルシウムの溶出量や力学的劣化が生じた範囲は析出物が観測されない場合に比べて小さくなることが確認され、当該析出物が海水環境下におけるセメント処理土の劣化の進行を遅延させる効果を持つことが示された。

キーワード：土質安定処理，カルシウム溶出，劣化抑制，マグネシウム      (IGC : D09)

### 1. はじめに

セメントや石灰を土に添加する固化処理工法は、軟弱地盤の強度特性や変形特性を改善させる地盤改良工法として、1970年頃に開発されている<sup>1)</sup>。それ以降、軟弱地盤が広く分布する我が国において主要な地盤改良工法として活用されており、利用方法の拡張や新たな固化材の開発は現在でも精力的に行われている。

しかしながら、自然環境下における固化処理土の長期的な耐久性については十分な調査・研究が行われてきたとは言い難い。近年、九州地方における河川感潮域の堤防において、堤体基礎部を構成する石灰で固化処理された土層の軟弱化がみられ、力学的性質の劣化が確認された<sup>2)</sup>。原ら<sup>3)</sup>は室内試験から海水環境下における固化処理土の劣化現象は以下に示す海水中のマグネシウム(Mg)の影響によって生じることを明らかにしている。すなわち、固化処理土中の水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)と海水中のマグネシウム(Mg)を含む塩分が式(1)、(2)の化学反応を起こす。



この反応によって、Ca(OH)<sub>2</sub>が溶解度の高い塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)や硫酸カルシウム(CaSO<sub>4</sub>)に形態が変わり、カルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)が溶出する。それと同時にブルーサイトと呼ばれる不溶解性の水酸化マグネシウム(Mg(OH)<sub>2</sub>)の生成によってpHが著しく低下する。海水中のナトリウムイオン(Na<sup>+</sup>)やその他の成分でも幾分かCa<sup>2+</sup>の溶出促進効果はあると考えられるがMg<sup>2+</sup>の影

響に比べるとその効果は非常に少ない。つまり、固化処理土の劣化現象は海水中のマグネシウムを含む塩が処理土のCa<sup>2+</sup>を溶出させることによって生じるものである。

また、海水環境で劣化した固化処理土の特性を調べた研究事例も幾つか報告されている。新舎・堤<sup>4)</sup>は、破碎したセメント改良粘性土を人工海水に浸漬させ、圧密排水三軸圧縮試験を実施している。その結果、海水浸漬させると内部摩擦角が減少することを明らかにしている。原ら<sup>5)</sup>は海水浸漬によって劣化させた石灰処理土に対して圧密試験を実施している。海水浸漬後の処理土は健全な場合に比べて圧縮性が著しく大きくなることを示した。

その一方で、海水と固化処理土の反応として次のような現象が報告されている。斎藤ら<sup>6)</sup>と小西ら<sup>7)</sup>は種々の土質試料を母材としたセメント処理土を海水もしくは蒸留水に4年間にわたって浸漬させ、その耐久性を調べる室内試験を実施した。海水浸漬した供試体において、海水とセメント処理土の界面に白い析出物が生成されることを確認し、析出物が生じた供試体はpHおよびCa濃度の低下領域が浅いことを明らかにしている。著者らも石灰処理土を対象に、この析出物に関する検討を行っている<sup>8)</sup>。固化材に石灰を用いた処理土を海水に浸漬させる室内試験を実施した結果、石灰添加量が比較的多い場合に処理土表面に析出物が観測された。析出物は球体状のMg(OH)<sub>2</sub>の集合であり、析出物の生成が確認された供試体は他のものに比べて劣化領域が非常に小さいことを明らかにした。これらのことを鑑みると、処

表-1 試料土の物性

|        |                      |       |
|--------|----------------------|-------|
| 土粒子の密度 | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.64  |
| 液性限界   | (%)                  | 138.0 |
| 塑性限界   | (%)                  | 42.2  |
| 粒度組成   | (%)                  |       |
| 礫      |                      | 0.0   |
| 砂      |                      | 25.8  |
| シルト    |                      | 50.2  |
| 粘土     |                      | 24.0  |

表-2 実験に用いた OPC の主要な化学成分と物性

|                           |                                |       |
|---------------------------|--------------------------------|-------|
| 化学成分<br>(%)               | CaO                            | 64.3  |
|                           | SiO <sub>2</sub>               | 20.4  |
|                           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.8   |
|                           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.9   |
|                           | SO <sub>3</sub>                | 1.9   |
|                           | MgO                            | 1.1   |
|                           | その他                            | 3.6   |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )   |                                | 3.16  |
| 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) |                                | 3,200 |

理土表面に生成される析出物が劣化を抑制する保護膜のような機能を有すると考えられ、このことを考慮した高度な劣化の進行予測手法の開発が期待される。さらに、最近では微生物を利用してセメント処理土の劣化抑制を図る技術<sup>9)</sup>が検討されているが、それとは異なる手法、すなわち劣化の原因物質 (Mg 塩) によって劣化の抑制を図る新たな技術開発の足掛かりとなる可能性もある。しかしながら、現在までにセメント処理土を対象にして、この析出物についての詳細な観察事例や Ca 溶出抑制効果について経時的に調べた研究報告は見当たらない。

そこで、本研究ではセメント処理した粘性土を用いた浸漬実験を実施し、その表面に生じる析出物について経時的な生成状況の観察や析出物生成の有無による処理土からの Ca の溶出挙動および力学的劣化状況の差異を調べることにより、析出物が有する劣化抑制効果を実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体作製方法

本実験では試料土に有明粘土を使用した。試料土の物性を表-1 に示す。固化材は普通ポルトランドセメント (以下、OPC と表記) を用いた。実験に用いた OPC の主要な化学成分と物性を表-2 に示す。

実験に使用する供試体は以下の手順で作製した。まず、試料土とセメントを均一に混合するために試料土の含水比を 207%(液性限界の 1.5 倍) に調整した。次に、試

表-3 供試体作製条件と実験条件

|                             |                      |                                 |
|-----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| セメント添加量                     | (kg/m <sup>3</sup> ) | 70, 100, 130, 150, 200          |
| 試料土の含水比                     | (%)                  | 207.0                           |
| 養生時間                        | (days)               | 28                              |
| 供試体寸法                       | (mm)                 | φ=50, H=50                      |
| 溶液                          |                      | Mg 水溶液,<br>イオン交換水               |
| Mg 水溶液の Mg <sup>2+</sup> 濃度 | (mg/L)               | 938                             |
| 溶液更新時間                      | (days)               | 0.25, 1, 2, 4, 8, 16,<br>32, 66 |

料土に固化材を加えて電動ミキサーで 10 分間攪拌・混合した。固化材は 70, 100, 130, 150, 200kg/m<sup>3</sup> の割合で添加した。混合処理直後にプラスチックモールド(φ=50mm, H=100mm)に詰めて乾燥および酸化を防ぐためフィルムで覆い、温度 20°C 湿度 80% に設定した恒温恒湿器内で 28 日間養生した。養生後、高さを 50mm に成形したものを供試体とした。供試体の作製条件を表-3 に示す。

### 2.2 実験に用いた水溶液

先に述べたとおり、固化処理土の劣化現象を引き起こす主な海水中の成分は Mg を含む塩であり<sup>3)</sup>、現象の単純化ならびに水質分析の精度向上を目的として、本実験では海水の代用として Mg 塩を溶解した水溶液を使用した。海水には塩化マグネシウム (MgCl<sub>2</sub>) と硫酸マグネシウム (MgSO<sub>4</sub>) の 2 種類の塩が含まれている。一般的な海水は MgCl<sub>2</sub> と MgSO<sub>4</sub> の比率が 7:3 程度となっている<sup>10)</sup>。これを参考に、MgCl<sub>2</sub> と MgSO<sub>4</sub> の割合が 7:3 となるように、塩化マグネシウム 6 水和物 (MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O) と硫酸マグネシウム 7 水和物 (MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) の混合試薬を作製する。これをイオン交換水に溶解し、平均的な有明海の海水中の Mg<sup>2+</sup>濃度 (938mg/L<sup>2)</sup>) となるように調整した。供試体を浸漬させる水溶液には上記要領で準備した Mg 水溶液に加え、Mg による Ca 溶出促進効果を考察するための比較対象としてイオン交換水も用いた。

### 2.3 実験の方法と手順

前節の要領で作製した供試体および水溶液を使用して、以下の手順で一面曝露の浸漬実験を実施した。まず、各固化材添加量の供試体上面のみが溶液と接触できるように側面および下部をパラフィルムで覆い、さらにゴムスリーブを被せた。次に、ポリエチレン容器にそれぞれの水溶液 (Mg 水溶液, イオン交換水) を投入し、供試体を浸漬させる。供試体の浸漬状況を写真-1 に示す。所定の期間経過後に浸漬水を全量採水し、水質分析により Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>濃度を測定した。また、採水と同時に供試体表面をデジタルカメラで撮影した後、新たな溶液に供試体を浸漬させた。イオン交換水の場合も同様に行い、水質分析は添加量 70kg/m<sup>3</sup> と 200kg/m<sup>3</sup> のみ Ca<sup>2+</sup>濃度を

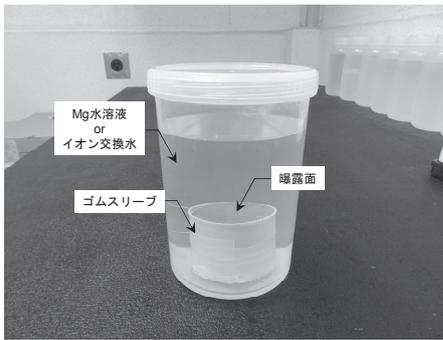


写真-1 供試体の浸漬状況

測定した。ただし、イオン交換水に浸漬した場合については、溶出したカルシウム成分が炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) として一部結晶化し、供試体の側面や容器内面に析出する事例が散見されたため、Mg 水溶液と同様にそのまま浸漬水を採取するだけでは、供試体から溶出したカルシウムの全量が測れない可能性を危惧して、以下のような処置を行った。まず、供試体を取り出し、イオン交換水を全量採取する。次に、新たにイオン交換水を1口投入し、 $0.01\text{mol/L}$  の濃度となるように硝酸を加える。供試体上面（曝露面）は硝酸水溶液と接触しないように高さを調整した土台を入れ、その上に供試体を設置して3分間静置させる。その後、この硝酸水溶液を採取し、供試体側面をイオン交換水で洗い流した後、新たにイオン交換水に浸漬させた。浸漬水にイオン交換水を用いた場合では、最初に取得した浸漬水と硝酸水溶液に含まれるカルシウム量を求めて濃度換算した。浸漬水の量は供試体1本に対し1Lとし、浸漬水の更新は浸漬開始から0.25, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 66日目に実施した。

浸漬開始から66日経過した後、供試体における力学的に劣化した領域を調べるために、小型のコーンを用いた貫入試験を実施した。貫入試験は以下の手順で行った。まず、取り付けていたゴムスリーブとパラフィルムを供試体が乱れないように外す。その後、貫入過程で供試体にクラックが生じないようにマイターボックスに取り付けてステンレス製のバンドで固定する。その後、直径6.0mm、先端角度 $60^\circ$ の小型のコーンを水溶液との接触面から供試体下端付近まで連続的に貫入する。このとき、貫入速度は $3.0\text{mm/min}$ とし、貫入抵抗と深度をロードセルと変位計で毎秒計測した。なお、コーン貫入試験は水溶液に浸漬する直前の供試体に対しても実施している。使用したコーンと貫入試験機の模式図を図-1, 2に示す。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 析出物の生成状況

浸漬開始から0.25, 16, 32日経過したときの供試体の表面写真を写真-2に示す。イオン交換水に浸漬させた場合、いずれの固化材添加量の供試体もほとんど変化が

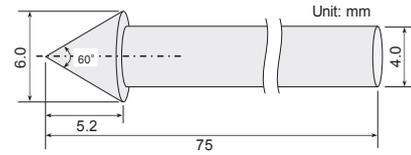


図-1 実験に用いたコーン

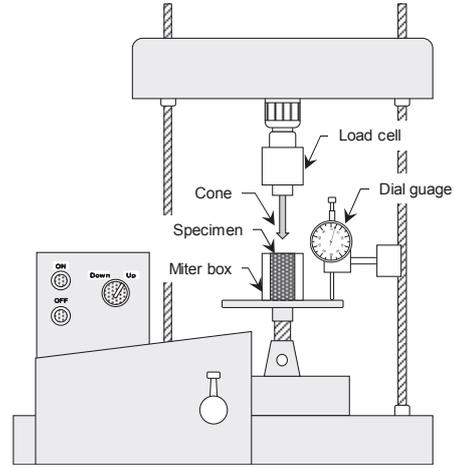


図-2 貫入試験機

みられない。Mg 水溶液に浸漬させた場合についても添加量 $70, 100, 130, 150\text{kg/m}^3$ は浸漬に伴う供試体表面の様子に大きな変化は確認できなかった。それに対して、Mg 水溶液に浸漬した添加量 $200\text{kg/m}^3$ の供試体のみ表面が白く変色している様子がうかがえ、析出物が生じていることが確認できる。

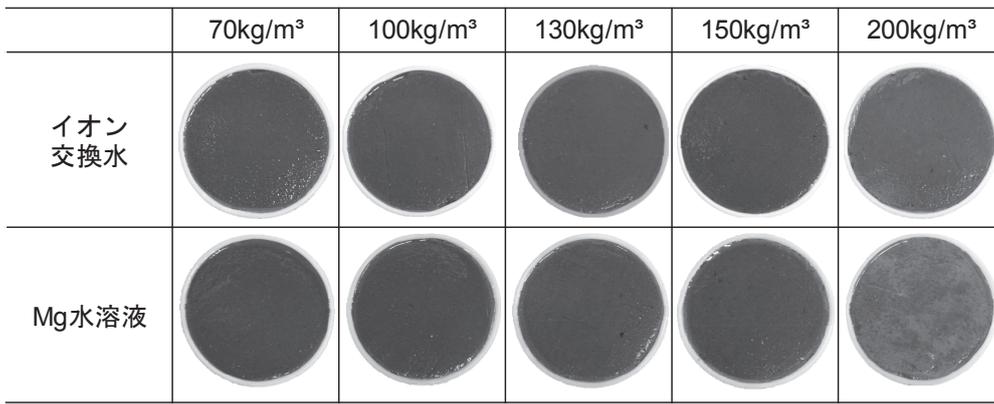
ここで、浸漬前から表面が白色化した面積の比率を白色化域 $S_w$ と定義して、次のような手順で求めた。まず、供試体表面のデジタル画像を各ピクセルが持つRGBの平均値を用いて256階調でグレースケール化する。次に、閾値を設けて二値化する。固化材の添加量によって、浸漬前の状態で既に色調が異なっているため、閾値は添加量毎に設定した。二値化後、それぞれのピクセル数をカウントし、式(3)によって白色化域 $S_w$  (%)を算出した。

$$S_w = \frac{P_{w,n}/P_{a,n} - P_{w,0}/P_{a,0}}{1 - P_{w,0}/P_{a,0}} \times 100 \quad (3)$$

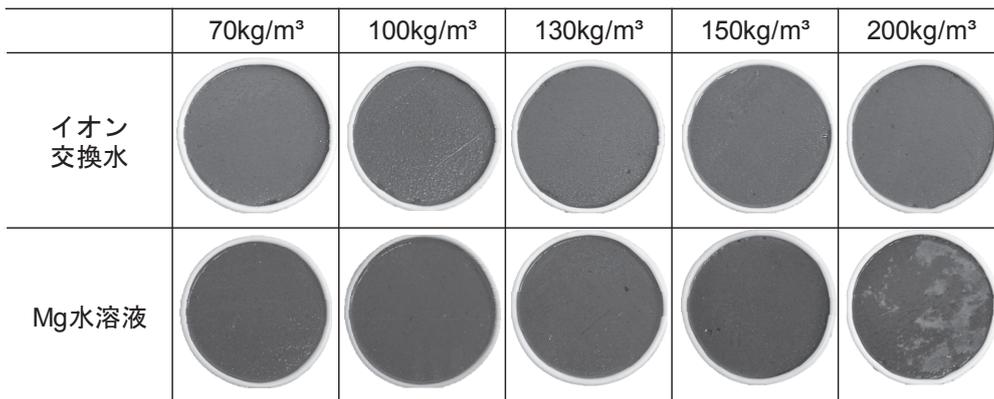
ここに、 $P_{w,n}$ は浸漬 $n$ 日の対象範囲において白にカウントされたピクセル数、 $P_{w,0}$ は浸漬前の対象範囲において白にカウントされたピクセル数、 $P_{a,n}$ は浸漬 $n$ 日の対象範囲全体のピクセル数、 $P_{a,0}$ は浸漬前の対象範囲全体のピクセル数を表す。

画像解析結果の一例として、両水溶液に16日間浸漬させた添加量 $200\text{kg/m}^3$ の供試体の二値化後の画像を図-3に示す。イオン交換水に浸漬させた場合、ほとんど黒にカウントされているのに対して、Mg 水溶液に浸漬させた場合は供試体表面において析出物に覆われている部分がみられ、半分程度が白にカウントされていることがわかる。

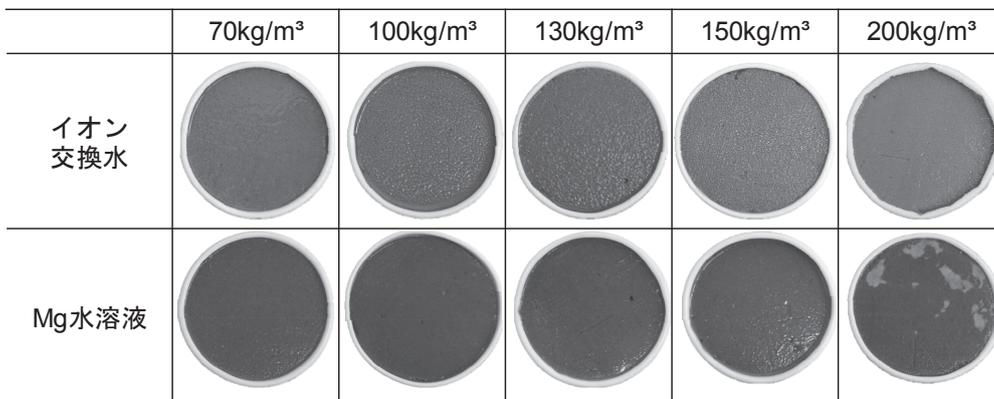
Mg 水溶液とイオン交換水に浸漬させた供試体の白色



(a) 0.25 日浸漬後



(b) 16 日浸漬後



(c) 32 日浸漬後

写真-2 浸漬後の供試体表面写真

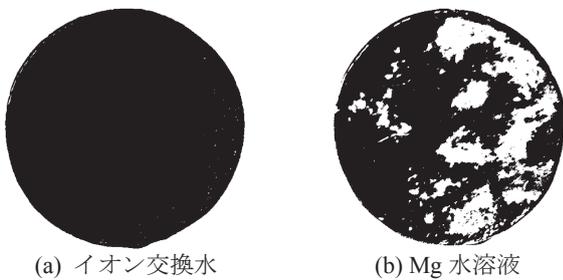


図-3 16 日浸漬後の供試体の画像解析結果

化域  $S_w$  と浸漬時間の関係を図-4 に示す。イオン交換水に浸漬させた場合は添加量によらずゼロ付近を推移している。Mg 水溶液に浸漬した場合も添加量が 150 kg/m<sup>3</sup> 以下のときでは、添加量にかかわらずゼロ付近の値を示

している。それに対して添加量 200kg/m<sup>3</sup> の場合のみ明らかに他の添加量の場合と異なり、供試体表面が白色化していることがわかる。また、処理土表面の白色化は浸漬開始から浸漬 0.25 日までの間に生じていることもわかる。しかしながら、浸漬 0.25 日でピークを示し、徐々に白色化域は減少している。固化材に石灰を用いた場合、このような析出物の剥離はほとんどなかった<sup>8)</sup>が、本研究では、白色析出物が剥離して供試体表面が露呈していくことが確認された。これは、溶液を交換する作業によって、析出物が供試体に十分癒着する前に乱されてしまったことなどが原因と考えられる。

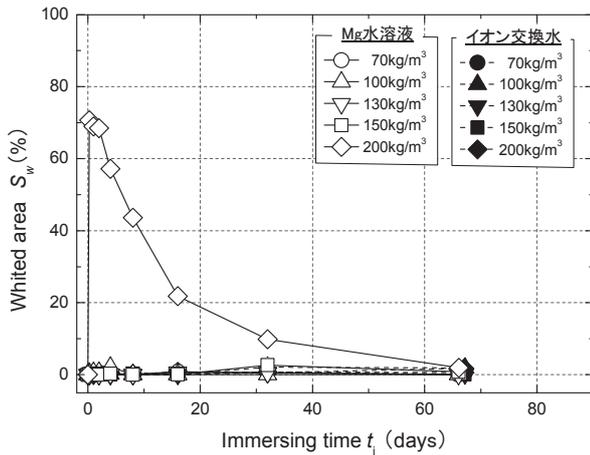


図-4 白色化域の経時変化

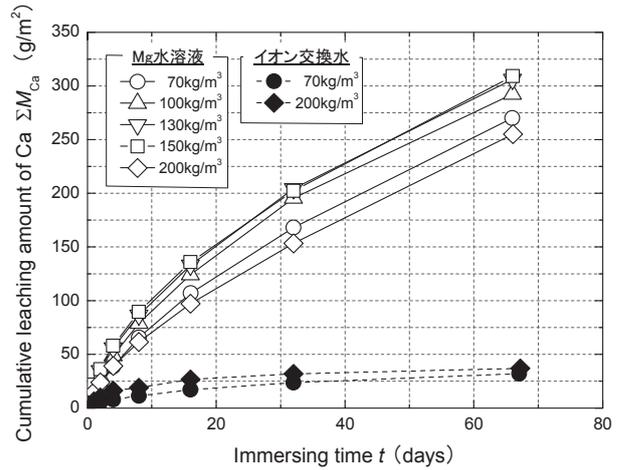


図-6 Ca 累積溶出量の経時変化

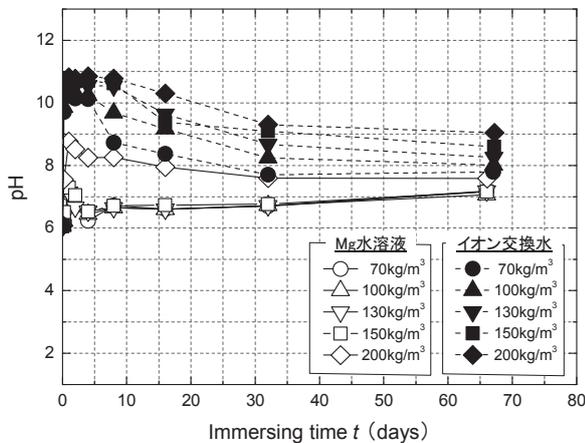


図-5 浸漬水の pH の経時変化

### 3.2 水質分析結果

浸漬水の pH と浸漬時間の関係を図-5 に示す。イオン交換水に浸漬させた場合、浸漬初期で pH=10~11 程度と高い値を示すが、時間の経過とともに低下する傾向がみられる。また、添加量が高い場合ほど pH の値が大きいこともわかる。これは、セメント処理土中の水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) が浸漬水に溶出したためであると考えられる。他方、Mg 水溶液に浸漬した場合、いずれも中性付近を示しており、時間による変化もイオン交換水に比べて小さい。これは、先述した式(1)、(2)の化学反応が起こり、不溶性の水酸化マグネシウム (Mg(OH)<sub>2</sub>) が生成されることで pH の上昇を抑制したためであると考えられる。

倉倉ら<sup>1)</sup>は粒状の廃棄物溶融スラグとそれを骨材に用いたモルタルに対して拡散溶出試験を実施している。その際、溶液の更新時刻間を一つの分画として、各分画における種々のイオンの溶出フラックスの算出方法を示している。これを参考に、本実験における水質分析の結果から、式(4)~(6)を用いて各分画の Ca の実測溶出量  $M_{Ca,i}$ 、Ca 溶出フラックス  $J_{Ca,i}$  および Mg 実測浸透量  $M_{Mg,i}$  を求めた。

$$M_{Ca,i} = \frac{C_{Ca,i} \cdot V_i}{S} \quad (4)$$

$$J_{Ca,i} = \frac{M_{Ca,i}}{t_i - t_{i-1}} \quad (5)$$

$$M_{Mg,i} = \frac{(C_{Mg,0} - C_{Mg,i}) \cdot V_i}{S} \quad (6)$$

ここに、 $C_{Ca,i}$  は分画  $i$  の溶液の  $Ca^{2+}$  濃度 (g/m<sup>3</sup>)、 $V_i$  は分画  $i$  の溶液体積 (m<sup>3</sup>)、 $S$  は溶液と接触する供試体上面の表面積 (m<sup>2</sup>)、 $C_{Mg,0}$  は水溶液の初期  $Mg^{2+}$  濃度 (g/m<sup>3</sup>)、 $C_{Mg,i}$  は分画  $i$  の  $Mg^{2+}$  濃度 (g/m<sup>3</sup>)、 $t_i$  と  $t_{i-1}$  はそれぞれ  $i$  回目、 $i-1$  回目の溶液更新時間(days)を表す。

Ca 累積溶出量の時間変化を図-6 に示す。イオン交換水に浸漬した場合は Mg 水溶液に浸漬した場合に比べ低い値を示しており、Mg の影響によってセメント処理土からの Ca 溶出が促進されていることがわかる。浸漬水に Mg 水溶液を用い、析出物が観測されなかった添加量 70, 100, 130, 150kg/m<sup>3</sup> は、添加量が高いものほど溶出量が大きい傾向がみられるが、析出物の生成が確認された 200kg/m<sup>3</sup> の場合、最も添加量が多いにもかかわらず、それらに比べて溶出量が小さい。

Mg 水溶液に浸漬した場合の Ca 溶出フラックスと平均時間の関係を図-7 に示す。いずれの添加量の場合もフラックスは時間とともに減少している。添加量 70~150kg/m<sup>3</sup> の範囲では、添加量が多いものほどフラックスが大きい傾向が確認できる。しかしながら、析出物が観測された添加量 200kg/m<sup>3</sup> の場合は、最も固化材添加量が多いにもかかわらず、添加量 70kg/m<sup>3</sup> の場合よりも下方に位置しており、溶出フラックスが小さいことがわかる。先に述べたとおり、供試体の表面写真から、添加量 200kg/m<sup>3</sup> の供試体は、時間の経過とともに析出物が剥離していく様子が確認された。しかしながら、Ca 溶出フラックス-時間関係の傾向の大きな変化は確認されず、時間とともに一様に減少している。したがって、供試体の外観としては、剥離して析出物が消失しているように見えるが、表層付近の供試体内部においても析出物

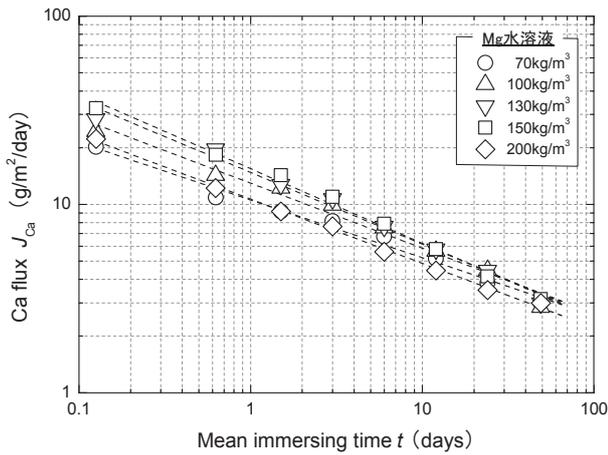


図-7 Ca 溶出フラックスと平均時間の関係

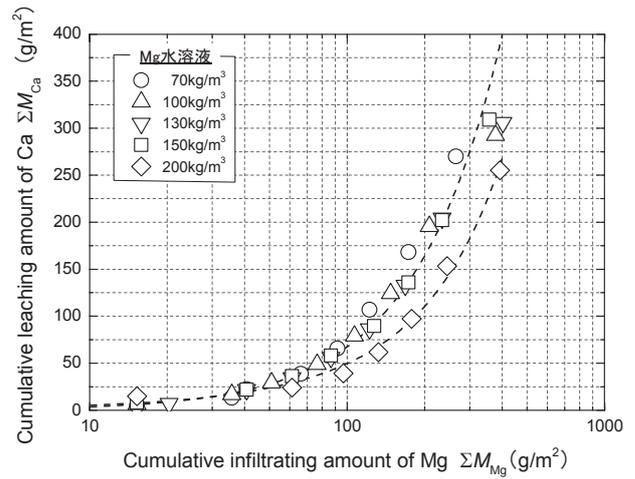


図-8 Ca 累積溶出量と Mg 累積浸透量の関係

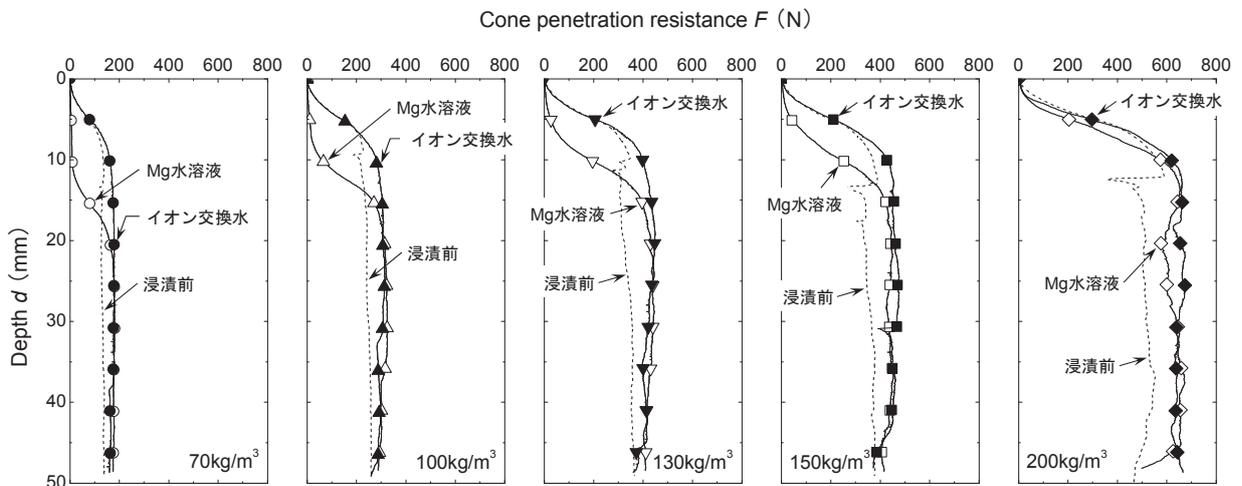


図-9 貫入抵抗の深度分布

が生成されており、それらが間隙を充填するなどして、Ca の溶出抑制効果を維持しているものと推定される。処理土内部における析出物の生成状況については、今後詳細に検証する必要がある。

図-8 は Ca 累積溶出量と Mg 累積浸透量の関係を示したものである。図より析出物が観測された添加量  $200\text{kg/m}^3$  の場合のみ Mg 浸透量に対する Ca 溶出量が他の添加量のものに比べて少ない。また、添加量  $200\text{kg/m}^3$  以外の添加量では Mg 浸透量と Ca 溶出量の間と同様な傾向が確認でき、析出物が生じない場合、処理土からの Ca 溶出量は Mg の浸透量によって一義的に決まることが示唆された。

### 3.3 コーン貫入試験結果

コーン貫入試験の結果を図-9 に示す。いずれの固化材添加量の場合も浸漬前（浸漬 0 日）の場合は貫入の初期段階から貫入抵抗値が大きく増加している。これは、コーンと処理土の接触面積が増加していくことに起因する。また、深度が 10mm 付近に達した以降はほぼ一定の値を示しており、深部における貫入抵抗値は固化材添加量が多い場合ほど高くなっている。イオン交換水に

浸漬した供試体は、貫入初期の貫入抵抗-深度関係がほとんど一致しているのに対して、Mg 水溶液に浸漬している場合、供試体上部において貫入抵抗がほとんど発現しない範囲が確認できる。また、深部における貫入抵抗値はいずれの水溶液に浸漬した場合も浸漬前のそれよりも大きい値を示しており、材齢とともに深部では強度増加していることが確認できる。

浸漬後の供試体において、貫入抵抗が低下した範囲は力学的に劣化していると推察される。そこで、この範囲を劣化深度  $d_n$  と定義して図-10 に示した方法<sup>5)</sup>によって求めた。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、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。添え字の  $n$  は浸漬時間を意味する。

劣化深度と固化材添加量の関係を図-11 に示す。イオン交換水に浸漬させた場合はいずれの固化材添加量の場合においても劣化深度はゼロであった。Mg 水溶液に浸漬させた場合、固化材添加量が少ないものほど劣化した範囲が大きく、添加量が増えるとともに劣化深度が小

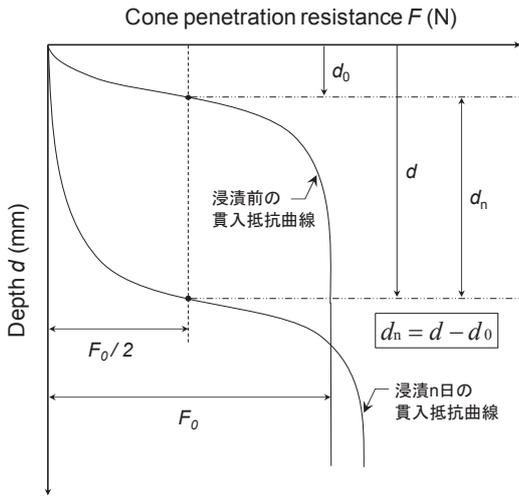


図-10 劣化深度の定量方法の概念図

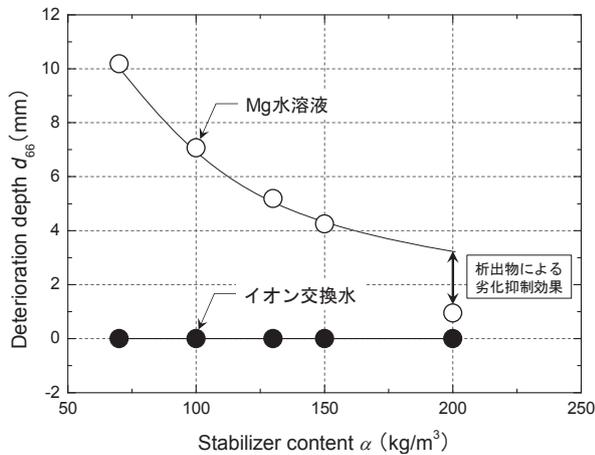


図-11 劣化深度と固化材添加量の関係

さくなっていることがわかる。既往の研究報告でも、固化材添加量が多いときほどセメント処理土の劣化の進行速度が遅くなること<sup>4)</sup>が示されており、今回の実験結果とも符合する。また、析出物が観測された添加量  $200\text{kg/m}^3$  のみ、 $70\sim 150\text{kg/m}^3$  の範囲における固化材添加量の増加に伴う劣化深度の減少傾向から逸脱していることがわかる。これは、水質分析結果において述べたとおり、添加量  $200\text{kg/m}^3$  の供試体表面に生成された析出物が Ca 成分の溶出を抑制し、ひいては力学的劣化の進行を遅延させたことによるものと推定できる。

#### 4. まとめ

本研究では、セメント処理した粘性土に対して Mg 水溶液とイオン交換水を用いた浸漬実験を実施し、処理土表面に生じる析出物の有無による Ca 溶出挙動の差異を調べた。得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 本研究の実験条件では、セメント添加量  $200\text{kg/m}^3$  の供試体表面において、析出物の発生が確認された。また、その析出物は時間の経過とともに徐々に剥離

して減少する傾向が確認された。

- (2) Mg 水溶液に浸漬させた場合、イオン交換水に比べてセメント処理土からの Ca の溶出が促進される。
- (3) 析出物が生じた供試体は、析出物が観測されなかった場合に比べて Ca の溶出量が小さい。また、析出物が生じない場合、Ca の溶出量と Mg の浸透量の間に一義的な関係がみられる。
- (4) Mg 水溶液に浸漬させた場合、固化材添加量が増えるとともに劣化深度は小さくなる傾向がある。添加量  $200\text{kg/m}^3$  の供試体は、Mg 水溶液と曝露面との界面に生成された析出物が Ca 成分の溶出を抑制し、力学的劣化の進行の遅延させたため、著しく劣化した範囲が小さい。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 (16K18150) の補助を受けて実施されたものである。また、本研究の実施にあたり宮崎大学卒業生の渡辺瑛司氏に多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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, Vol.7, No.4, pp.85-132, 1968.
- 2) Hara, H., Suetsugu, D., Hayashi, S. and Du, Y. J.: 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.
- 3) 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.
- 4) 新舎博, 堤彩人：海水曝露環境にある固化処理土と破碎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.
- 5) 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.
- 6) 斎藤聰, 後藤尚, 村谷優, 小西一生, 坂井悦郎：セメント改良土の耐久性に関する基礎的研究, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.327-332, 2010.
- 7) 小西一生, 今井政之, 斎藤聰, 坂井悦郎：セメント改良土の耐久性に関する基礎的研究 (その 2), 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.273-280, 2012.
- 8) 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.
- 9) 三原一輝, 末次大輔, 笠間清伸, 畠俊郎: 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, pp.414-419, 2016.
- 10) 吉田彰: 海水マグネシア, *Journal of the Society of In-organic Materials, Japan*, Vol.9, No.300, pp.294-303, 2002.
- 11) 肴倉宏史, 水谷聡, 田崎智宏, 貴田晶子, 大迫政浩, 酒井伸一: 利用形状に応じた拡散溶出試験による廃棄物溶融スラグの長期溶出量評価, 廃棄物学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.200-209, 2003.

(2017年6月19日 受付)