

## 海水のマグネシウム濃度と温度によるセメント固化処理土の劣化促進効果

Deterioration-Acceleration Effect of Cement Stabilized Soil Due to Magnesium Concentration and Temperature of Seawater

安井賢太郎 Kentaro YASUI (鹿児島工業高等専門学校都市環境デザイン工学科)  
原弘行 Hiroyuki HARA (山口大学大学院創成科学研究科)

本研究では、海水との接触により力学的に劣化するセメント固化処理土について、劣化進行速度の評価、および劣化時の土質特性等の調査の際に必要な劣化供試体を短期間で準備することを目的に固化処理土の劣化促進実験を試みた。実験では固化処理土を浸漬させる水溶液のマグネシウムイオン濃度と温度を変化させ、浸漬後の力学的劣化領域を経時的に調査した。実験結果から、水溶液のマグネシウム濃度と温度が高くなるにつれて固化処理土の劣化速度が大きくなることを明らかにし、劣化の進行速度を評価するための実験式を提案した。

キーワード：固化処理土、海水曝露、劣化促進実験、マグネシウム塩、海水温度  
(IGC : D-10)

## 1. はじめに

軟弱地盤が広く分布する我が国において、セメントや石灰を用いて軟弱地盤の強度や変形特性を改善させる固化処理工法は、主要な地盤改良工法として活用されている。また、その用途に応じた工法が数多く開発されており、その利用用途は現在も拡大している。

一方で、曝された環境下における固化処理土の有する長期的な耐久性に関して、例えば、酸性雨<sup>1), 2)</sup>や長期にわたる地盤内養生<sup>3)-5)</sup>などの自然環境下において力学的・化学的な性能が低下することが報告されている。さらに、沿岸域、および河川の感潮域などの海水に曝される環境下において固化処理土層が力学的に劣化することが明らかになってきており<sup>6)</sup>、これら劣化に関する問題の解決に向けて研究成果を蓄積することの意義は非常に大きい。

海水の影響による固化処理土の劣化現象について、以下のような研究内容が報告されている。海水に浸漬したセメント固化処理土の力学的劣化は海水中のマグネシウムを含む塩が拡散によって処理土内部に移動し、水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)と化学反応を起こすことによって、pHの低下やカルシウム成分の溶出を促進して劣化すること<sup>7)</sup>や力学的劣化に至った石灰処理土はセメンテーション物質の崩壊および間隙径分布の変化に起因して圧縮性が増大する<sup>8)</sup>。その一方で、固化材の添加量を増加させることで劣化の進行が減少することも報告されている<sup>9)</sup>。

海水環境に曝された固化処理土の耐久性を評価するにあたって、中長期にわたる力学的劣化の進行プロセスを

十分な精度で予測する手法の開発が重要となる。また、処理土の劣化時の土質特性等を検討するためには、劣化させた処理土供試体を作製する必要がある。しかしながら、上記のような研究を遂行するためには、長期間の実験を要するため、固化処理土の劣化を促進させる実験手法の開発が望まれる。

ここで、固化処理土の劣化促進実験の基盤となる研究として、セメント固化処理土の劣化の進行に関する報告がある<sup>10)</sup>。これによれば、セメント固化処理土の劣化の進行速度は海水中のマグネシウムイオン(Mg<sup>2+</sup>)濃度などに大きく依存していることが示されている。しかしながら、上記の知見は通常の海水の濃度の範疇で検討されたものであり、高濃度の海水を使用した場合の適正については検証されていない。また、接触させる海水の温度によっても劣化の進行速度を大きく促進させることができるものと推定できる。すなわち、海水曝露した固化処理土の劣化速度は、Mg<sup>2+</sup>の浸透速度や処理土内部でのマグネシウム塩とカルシウム成分との反応速度に依存すると考えられるため、アレニウスの法則で知られているように、それらの現象が接触する海水の温度によって促進されるものと推察される。

以上の背景から、本研究では海水環境に曝されたセメント固化処理土に関する劣化促進実験の手法を開発するために、処理土と接触させる水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度、および温度を変化させた浸漬実験を実施し、力学的劣化領域の経時変化について調査した。得られた試験結果から、水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度と温度による劣化促進効果を定量的に明らかにし、セメント固化処理土の劣化速度の実験式を提案する。

## 2. 実験方法

### 2.1 原材料

#### 2.1.1 供試体の作製方法

試料土には、佐賀県小城市の感潮河川の河床から浚渫した有明粘土を用いた。表-1 に試料土の物性を示す。固化材には普通ポルトランドセメント(OPC)を用いた。

供試体を作製する際には、試料土と固化材が均一に混合できるように、試料土の含水比を液性限界の1.5倍 ( $w=207.0\%$ ) に調整した。含水比を調整した試料土に固化材を加え、電動ミキサーで10分間攪拌・混合した。固化材の添加量は $50 \text{ kg/m}^3$ とした。試料土と固化材の混合試料を直径50 mm、高さ100 mmのプラスチックモールドに空気が混入しないようにタッピングしながら充填した。このとき、供試体表面の乾燥や酸化を防ぐため、余盛りしてフィルムで覆う処置を行った。その後、温度 $20^\circ\text{C}$ 、湿度80%に調整した恒温恒湿器内で28日間養生した。養生後、余盛りした部分を削り取り、モールドから取り出したものを供試体として実験に使用した。

#### 2.1.2 水溶液の作製方法

第3章で詳述するが、固化処理土の劣化現象を引き起こす海水中の主な成分は塩化マグネシウム ( $\text{MgCl}_2$ ) と硫酸マグネシウム ( $\text{MgSO}_4$ ) である。本実験では、海水の代用としてマグネシウム塩の濃度を高く調整した水溶液（以下、単に水溶液と表記）を使用した。そのため、水溶液の濃度調整には、水への溶解度が高い $\text{MgCl}_2$ を選択した。具体的には、塩化マグネシウム6水和物 ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) の試薬をイオン交換水に溶解させ、 $\text{Mg}^{2+}$ 濃度が0.94, 3.75, 8.44, 15.01, 23.45g/Lとなるように作製した。これは、有明海の海水の $\text{Mg}^{2+}$ 濃度 (0.938g/L) <sup>7)</sup>のそれぞれ1, 4, 9, 16, 25倍に相当するものである。以下、水溶液の $\text{Mg}^{2+}$ 濃度は、有明海の海水濃度の倍率 (1~25倍) で表記する。

### 2.2 浸漬実験方法と実験条件

2.1節の要領で作製したセメント固化処理土供試体を以下の手順で水溶液に浸漬させた。

- (1) 供試体の側面と下面をパラフィルムで覆い、ゴムスリーブを被せて上面のみを開放し曝露面とした。
- (2) 各 $\text{Mg}^{2+}$ 濃度 (1, 4, 9, 16, 25倍) の水溶液それぞれをポリエチレン製の容器に注入し、それぞれの容器に対して供試体5本を浸漬させた。水溶液の量は供試体5本に対して5Lとした。
- (3) 水溶液の温度を10, 20, 30,  $40^\circ\text{C}$ の4段階に変化させた。 $10^\circ\text{C}$ の場合は庫内の温度を調整した冷蔵ショーケース内に、 $20^\circ\text{C}$ の場合は空調を調整した実験室内に、 $30^\circ\text{C}$ の場合は温度を調整した恒温水槽内に、そして $40^\circ\text{C}$ の場合は庫内の温度を調整した恒温機内にポリエチレン製容器を設置し、それぞれの水溶液が目標温度で保持された状態で浸漬させた。浸漬期間中は水溶液の温度をモニタリングし、所定の温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ と

表-1 試料土の物性

|        |                     |       |
|--------|---------------------|-------|
| 土粒子の密度 | ( $\text{g/cm}^3$ ) | 2.64  |
| 液性限界   | (%)                 | 138.0 |
| 塑性限界   | (%)                 | 42.2  |
| 粒度組成   | (%)                 |       |
| 礫      |                     | 0.0   |
| 砂      |                     | 25.8  |
| シルト    |                     | 50.2  |
| 粘土     |                     | 24.0  |

表-2 供試体の浸漬条件

|                            |                     | 水溶液の $\text{Mg}^{2+}$ 濃度 (g/L) |              |              |                |                |
|----------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
|                            |                     | 1倍<br>(0.94)                   | 4倍<br>(3.75) | 9倍<br>(8.44) | 16倍<br>(15.01) | 25倍<br>(23.45) |
| 温度<br>( $^\circ\text{C}$ ) | 10                  |                                |              |              |                | ●              |
|                            | 20                  | ●                              | ●            | ●            | ●              | ●              |
|                            | 30                  |                                |              |              |                | ●              |
|                            | 40                  |                                |              |              |                | ●              |
| 浸漬期間<br>(days)             | 0, 4, 9, 16, 25, 36 |                                |              |              |                |                |

● : 浸漬実験を実施

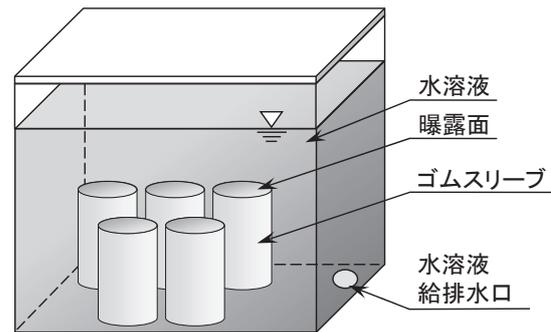


図-1 浸漬実験の模式図

なっていることを確認した。

表-2に供試体の浸漬条件を示す。浸漬期間は0, 4, 9, 16, 25, 36日に設定した。表中に網掛けで示したとおり、水溶液の $\text{Mg}^{2+}$ 濃度を変化させるケースは温度 $20^\circ\text{C}$ のみで実施し、温度を変化させるケースは $\text{Mg}^{2+}$ 濃度25倍のみで実施した。なお、水溶液の $\text{Mg}^{2+}$ 濃度を一定に保つために、1週間に1回の頻度で水溶液の交換を行った。図-1に浸漬実験の模式図を示す。

### 2.3 コーン貫入試験の方法

水溶液に浸漬した供試体は曝露面である上部から下方に向かって劣化が生じる。そこで、供試体が力学的に劣化した範囲を調べるために小型のコーンを使用した貫入試験を実施した。貫入試験は以下の手順で実施した。

- (1) 所定の期間水溶液に浸漬させた供試体を取り出し、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した。
- (2) マイターボックスを取り付け、貫入過程において供

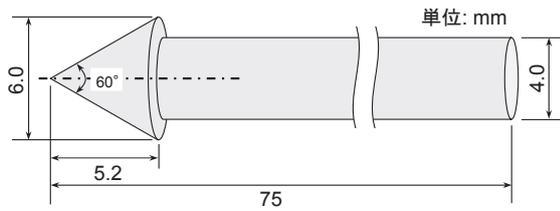


図-2 貫入コーン

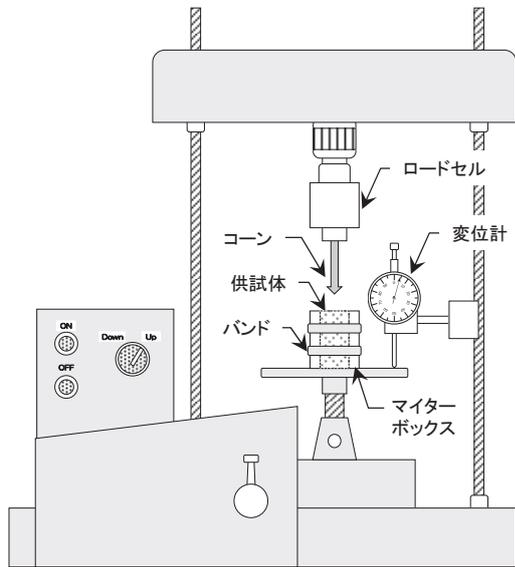


図-3 貫入試験機

試体にクラックが生じないようにステンレス製のバンドで固定して直径6.0 mm、先端角度60°の小型のコーンを3.0 mm/min.の速度で供試体上面から70～80 mm貫入した。このときの貫入抵抗と深度を、ロードセルと変位計を用いて毎秒計測した。図-2, 3に使用したコーンと貫入試験機の模式図を示す。

## 2.4 pHの測定方法

コーン貫入試験を実施した後の供試体のpHを以下の手順で測定した。

- (1) 試験後の供試体をマイターボックスに取り付けたまま、厚さ5 mmのゲージ盤をマイターボックス下部から挿入する。
- (2) 押し出された5 mmの供試体をスライスカットし、分取した試料に対してpH試験を実施した。
- (3) pHの測定にはガラス電極式のpH計を用い、測定方法は土懸濁液のpH試験 (JIS A 1226) に準拠した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 コーン貫入試験および pH 試験の結果

#### 3.1.1 貫入抵抗の深度分布

図-4にコーン貫入試験結果として、水溶液の濃度別、および温度別に比較した貫入抵抗の深度分布を示す。まず、浸漬前の供試体は深度約10mmまで貫入抵抗値が急

激に増加し、それ以深ではほぼ一定値を示している。次に、所定の期間水溶液に浸漬させた供試体は、貫入の初期段階の深度において、浸漬前と比べて貫入抵抗の低下が著しく、浸漬期間が長くなるにつれて貫入抵抗が低下している範囲（深度）も拡大している。また、それ以深では、浸漬期間によらずほぼ同様の变化傾向を示している。

同じ浸漬期間で比較すると、貫入抵抗の低下範囲は水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度および温度が高い場合ほど大きいことが確認できる。また、最終的に示す貫入抵抗値は、浸漬期間が長くなるにつれて大きくなっている傾向がみられ、浸漬後も材齢とともに強度が僅かに増加していることも確認できる。

#### 3.1.2 pHの深度分布

図-5に水溶液の濃度別、温度別に比較した pH の深度分布を示す。浸漬前の供試体の pH は 11 程度の値を示しているが、浸漬後の供試体は水溶液との接触面付近で pH が低下している範囲が確認でき、貫入抵抗の場合と同様に、浸漬期間が長くなるにつれてその範囲は拡大していることが確認できる。

### 3.2 海水環境下における固化処理土の劣化メカニズム<sup>7)</sup>

固化処理土の劣化現象は以下に述べるカルシウム成分の溶出によって引き起こされる。すなわち、固化処理土が海水と接触すると、処理土の水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>)と海水に含まれるマグネシウム (Mg)を含む塩分が式 (1), (2)の化学反応を起こす<sup>1)</sup>。



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>)に形態を変えて溶出する。それと同時にブルーサイトと呼ばれる不溶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。したがって、海水環境下における固化処理土の劣化の進行は接触する海水の Mg<sup>2+</sup>濃度に大きく左右される。

本実験の結果においても、水溶液に浸漬させた供試体は水溶液との接触面付近で pH が大きく低下し、pH の低下領域で貫入抵抗値の低下が確認されており、上記の劣化メカニズムと一致している。

### 3.3 水溶液の Mg<sup>2+</sup>濃度と温度による固化処理土の劣化促進効果

#### 3.3.1 劣化深度の定量方法

水溶液に浸漬した後の供試体は、その上部において浸漬前に比べて大幅な貫入抵抗値の低下が確認でき、力学的に劣化していることが推察される。貫入抵抗が著しく低下した範囲を劣化深度と定義して、図-6に示す原ら<sup>8)</sup>が提案した方法を用いて定量する。具体的には、浸漬前の供試体において貫入抵抗の最大値 F<sub>0</sub>の半分の値 (F<sub>0</sub>/2) を示すときの深さを抽出し、これを d<sub>0</sub>とする。同様に、

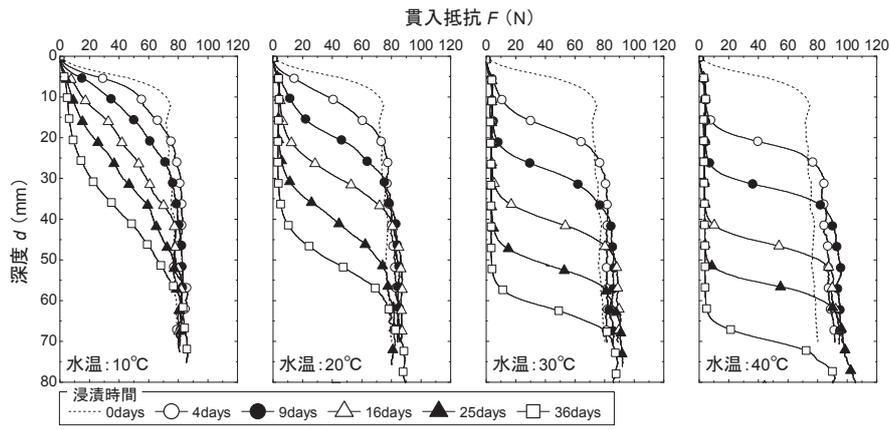
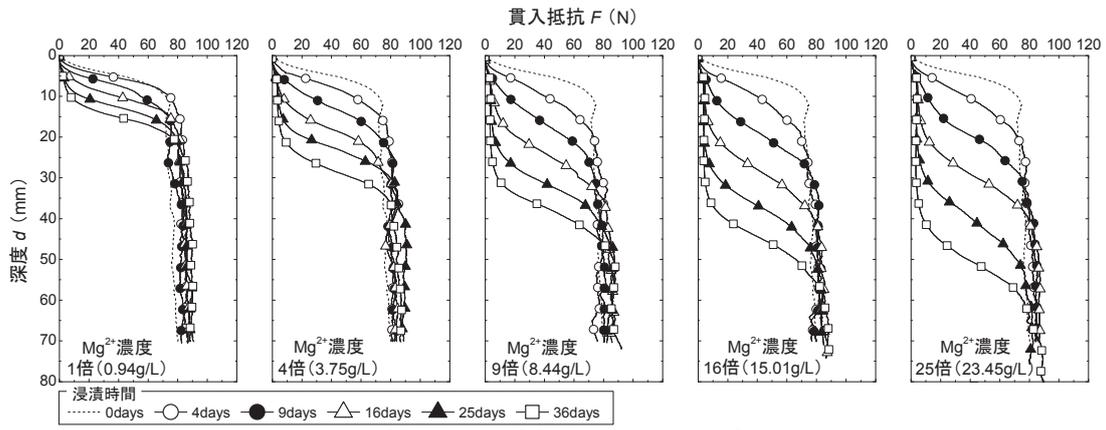


図-4 貫入抵抗の深度分布

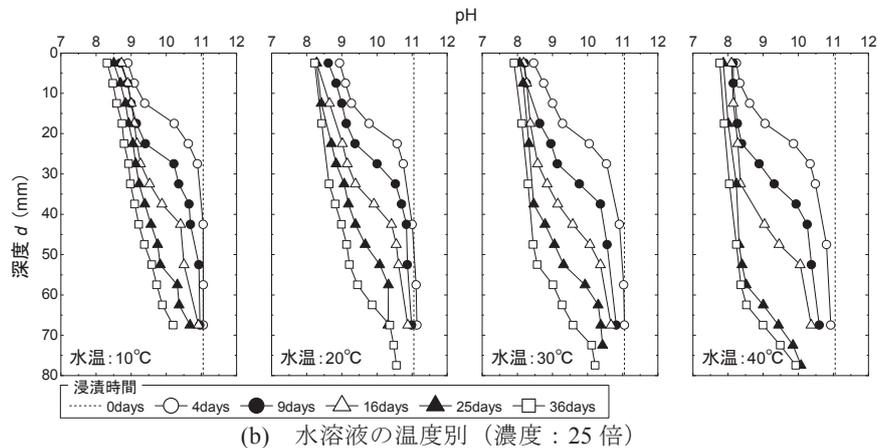
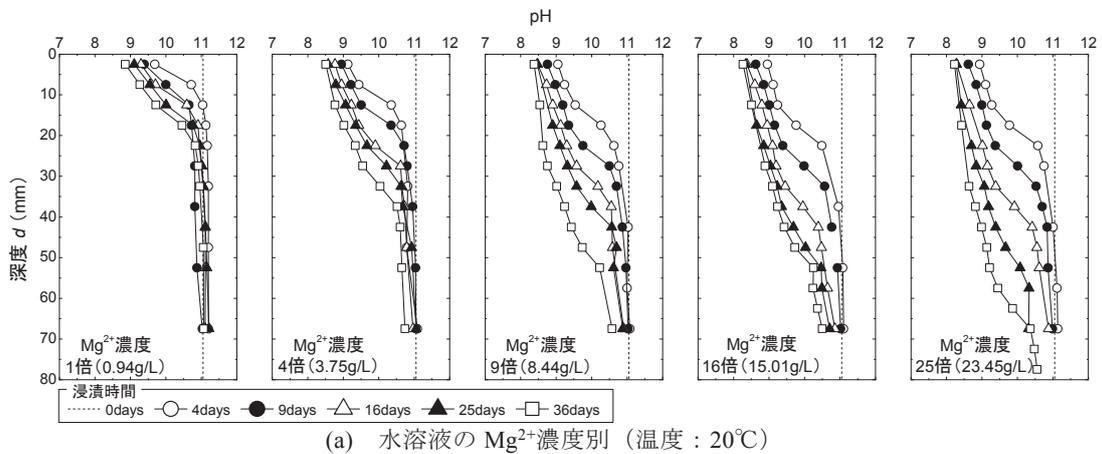


図-5 pHの深度分布

海水に浸漬した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 $n$ は浸漬期間を意味する。

### 3.3.2 海水に浸漬させた固化処理土の劣化の進行挙動

図-7に貫入試験の結果から求めた劣化深度の経時変化を示す。ここで、図の横軸は浸漬期間の平方根を示している。 $Mg^{2+}$ 濃度別、温度別による比較のいずれの場合においても、浸漬期間が長くなるにつれて劣化深度も大きくなっている。同じ浸漬期間においては、水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度が高くなるにつれて劣化深度が大きくなり、また、水溶液の温度が高くなるにつれて劣化深度が大きくなること確認できる。図中の直線は下式を用いて実験値を最小二乗法で近似した結果である。

$$d_n = A\sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、 $A$ は劣化速度係数( $mm/\sqrt{days}$ )、 $t$ は浸漬期間(days)を表す。

水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度や温度にかかわらず、いずれの実験ケースにおいても劣化深度は水溶液への浸漬期間の平方根に比例して拡大している。しかし、浸漬期間が短いときの劣化深度の実験値は近似直線よりも下方に位置しているケースが多くみられる。これは、海水中の $Mg^{2+}$ 濃度の変動によるものと考えられる。すなわち、固化処理土は海水中の $Mg^{2+}$ の浸透によって力学的劣化が進行するが、浸漬初期において $Mg^{2+}$ の消費が著しく、1週間あたり1回の海水交換頻度では、 $Mg^{2+}$ 濃度を厳密な定常状態に保つことができなかつたものと推察される。ただし、全ての実験ケースにおいて、決定係数 $R^2$ は1に近いことから、水溶液の交換頻度の影響は大きくないと考えられる。

### 3.3.3 劣化の進行に及ぼす海水中の $Mg^{2+}$ 濃度の影響

図-7に示した劣化深度の経時変化を式(3)で近似し、各実験条件における劣化速度係数 $A$ を抽出した。図-8に水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度と劣化速度係数の関係を示す。横軸は平方根で表示している。図より、劣化速度係数は $Mg^{2+}$ 濃度の平方根に比例して大きくなっている。最小二乗法で近似した結果、以下の式を得た。

$$A = 1.52\sqrt{C_{Mg}} \quad (4)$$

ここに、 $C_{Mg}$ は水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度(g/L)を表す。

### 3.3.4 劣化の進行に及ぼす水溶液の温度の影響

海水に浸漬させた固化処理土の劣化は、海水中のMg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<sup>1)</sup>。すなわち、処理土の劣化速度にはMg塩の拡散速度とMg塩と $Ca(OH)_2$ との反応速度が関係しているものと推察される。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た事例がみられる<sup>12)</sup>。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-9に示す。温度が高い場合ほど劣

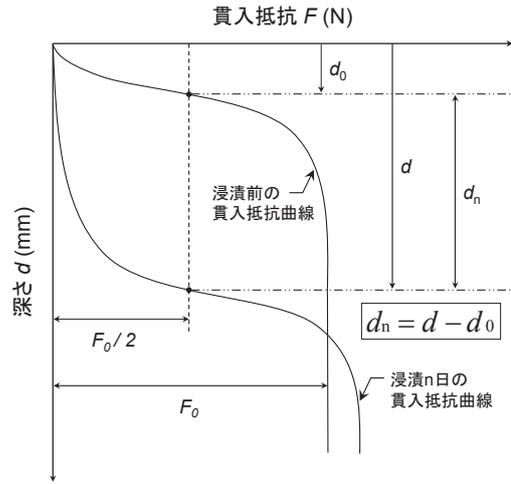


図-6 劣化深度 $d_n$ の定量方法の概念図<sup>8)</sup>

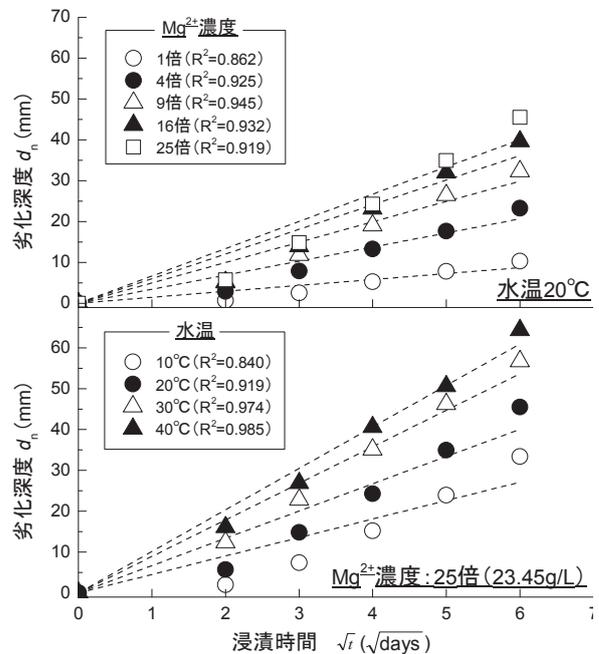


図-7 劣化深度の経時変化

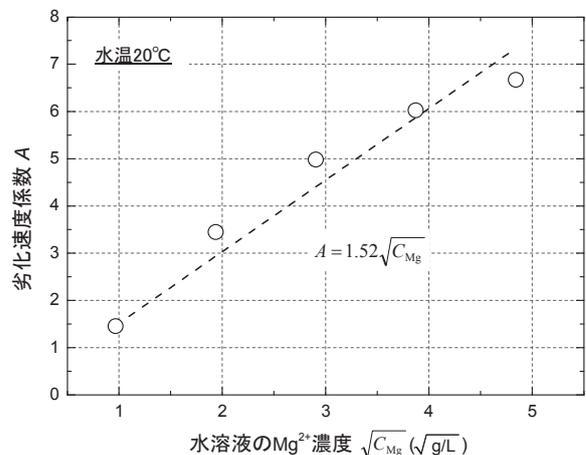


図-8 水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度と劣化速度係数の関係

化速度は大きくなる傾向が確認でき、劣化速度係数の自然対数と絶対温度の逆数の間に概ね直線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い、温度が高くなるにつれて速く進むものと考えられる。この結果を最小二乗法で近似したところ、以下の式を得た。

$$\ln A = 10.14 - 2428 \left( \frac{1}{T} \right) \quad (5)$$

#### 4. 劣化速度を評価する実験式

前章までに、水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度と温度を上昇させることによるセメント固化処理土の劣化促進効果を定量的に検討した。ここでは、それらの結果を用いて劣化速度を評価する簡易な実験式の提案を試みる。

既往の研究において、海水に浸漬させたOPC固化処理土の劣化の進行は、式(6)で表現できることが示されている<sup>10)</sup>。本式はMg<sup>2+</sup>濃度が定常状態のとき、Mg<sup>2+</sup>が固化処理土中に拡散移動して劣化が進行すると考え、炭酸ガスによるコンクリートの中性化の進行予測式<sup>13)</sup>を参考に導出したものである。

$$\frac{dd_n}{dt} = k \cdot C_{Mg} / d_n \quad (6)$$

ここに、 $k$ は比例定数、 $C_{Mg}$ は海水のMg<sup>2+</sup>濃度 (g/L) を表す。この微分方程式を解き、浸漬期間がゼロのとき劣化は生じていない ( $d_0=0$ ) とすると次式で表される。

$$d_n = k \sqrt{C_{Mg} \cdot t} \quad (7)$$

この式は、 $C_{Mg}$ を定数とするとき式(3)と同形となる。したがって、式(3)、(7)より劣化速度係数 $A$ は次のように表すことができる。

$$A = k \sqrt{C_{Mg}} \quad (8)$$

上記の式は、海水中のMg<sup>2+</sup>濃度が0.24~0.72g/Lの範囲で適用できることが示されているが、式(4)と式(8)は同様の形式で表せており、本実験で使用した高濃度のMg<sup>2+</sup>濃度 (0.938~23.45g/L) の範囲でも適用できることが示唆された。式(8)を変形すると $k$ は次式で表される。

$$k = A / \sqrt{C_{Mg}} \quad (9)$$

ここで、式(9)中の比例定数 $k$ は様々な外的・内的要因によって変化すると考えられるが、本実験では、水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度および温度以外は変化させていないため、Mg<sup>2+</sup>濃度 ( $k_{Mg}$ ) と温度 ( $k_T$ ) によって定まると考えられる。したがって、比例定数 $k$ は以下のように表される。

$$k = k_{Mg} \times k_T \quad (10)$$

水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度のみを変化させたケースは、すべて温度20°Cで実験を実施している。20°Cのとき $k_T=1$ とする

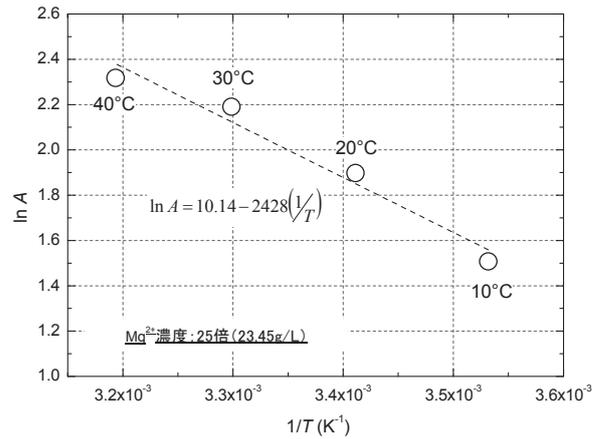


図-9 劣化速度係数のアレニウスプロット

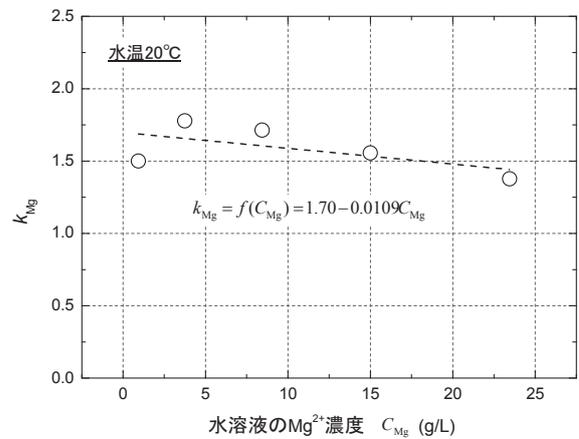


図-10  $k_{Mg}$ とMg<sup>2+</sup>濃度の関係

と、上式は $k=k_{Mg}$ となる。劣化速度係数を水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度の平方根で除して求めた $k_{Mg}$ とMg<sup>2+</sup>濃度の関係を図-10に示す。原因については不明であるが、Mg<sup>2+</sup>濃度0.938g/Lのみ全体の傾向から逸脱している。しかし、それよりも高い濃度の範囲では、Mg<sup>2+</sup>濃度が増加すると $k_{Mg}$ の値は若干減少する傾向がみられる。セメント処理土は、高濃度のMg<sup>2+</sup>と接触すると含水比が低下することが報告されている<sup>14)</sup>。すなわち、水溶液のMg<sup>2+</sup>濃度が高い場合ほどMg(OH)<sub>2</sub>が多く生成され、それが間隙を充填し、Mg<sup>2+</sup>の移動を遅延させたことなどが原因と考えられる。また、一般的な海水のMg<sup>2+</sup>濃度以下の範囲内で検討した報告<sup>10)</sup>においても同様な傾向が示されている。最小二乗法で近似してMg<sup>2+</sup>濃度の関数として得られた $k_{Mg}$ の式は以下ようになる。

$$k_{Mg} = f(C_{Mg}) = 1.70 - 0.0109C_{Mg} \quad (11)$$

次に、水溶液の温度について検討する。温度を変化させた実験ケースの $k_T$ を次式より算出した。

$$k_T = A / (k_{Mg} \cdot \sqrt{C_{Mg}}) \quad (12)$$

温度に関する比例定数 $k_T$ のアレニウスプロットを図-11に示す。前章で示したときと同様に、 $k_T$ の自然対数は

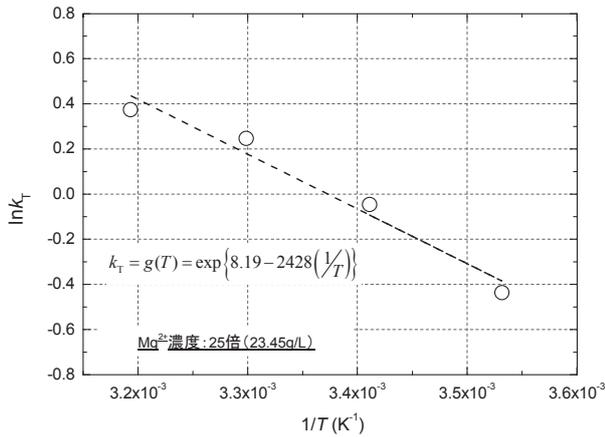


図-11  $k_T$ のアレニウスプロット

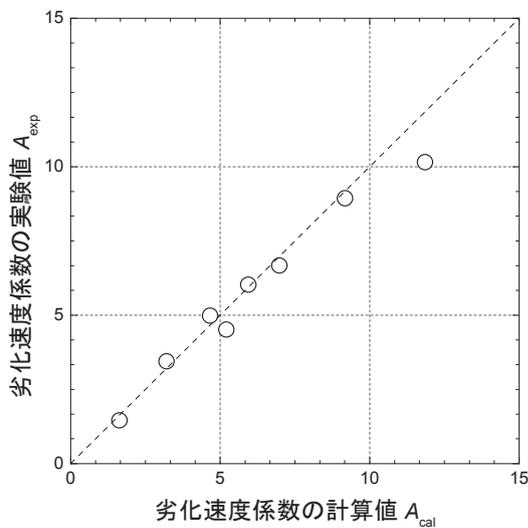


図-12 劣化速度係数の実験値と計算値の比較

アレニウスの法則に従って絶対温度の逆数に反比例する傾向が確認できる。この結果から得られた最小二乗法による回帰式は次式ようになる。

$$k_T = g(T) = \exp\left\{8.19 - 2428\left(\frac{1}{T}\right)\right\} \quad (13)$$

以上より、海水浸漬させたセメント固化処理土において、水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度および温度による劣化促進効果を考慮した劣化速度係数の実験式は次式で表すことができる。

$$A = f(C_{Mg}) \times g(T) \times \sqrt{C_{Mg}} \quad (14)$$

コーン貫入試験の結果から抽出した劣化速度係数と上式より求めた計算値の相関図を図-12に示す。計算で求めた値は実験値と大きな乖離はみられず比較的精度よく評価できているといえる。なお、本論文における実験式はOPCを $50\text{kg/m}^3$ 添加した有明粘土に対して適用されるものである。したがって、今後、本研究と同様な手法で固化材の種類・添加量、母材等の影響を検討し、種々の土質や施工条件に合わせて劣化速度を推定できるように予測式の汎用性を高くすることが望まれる。それにより、

あらゆる条件において劣化促進効果を評価することが可能となり、劣化させた固化処理土供試体の作製や劣化の進行予測に有用なものになると考える。

## 5. 結論

本研究では、海水環境に曝されたセメント固化処理土の劣化促進実験手法を開発するために、処理土と接触させる水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度、および温度を変化させた浸漬実験を実施し、水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度および温度による劣化促進効果について調査した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 海水環境下におけるセメント固化処理土の力学的劣化は接触する水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度や温度にかかわらず、浸漬期間の平方根に比例して拡大する。
- (2) 海水に浸漬させたセメント固化処理土の劣化速度は海水中の $Mg^{2+}$ 濃度の平方根に比例して大きくなる。
- (3) 海水に浸漬させたセメント固化処理土の劣化速度はアレニウスの法則に従って、温度上昇に伴って大きくなる。
- (4) 水溶液の $Mg^{2+}$ 濃度と温度を関数とした海水環境下におけるセメント固化処理土の劣化速度の実験式を提案した。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、宮崎大学卒業生の白石郷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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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2—室内実験による検討—, 北海道開発土木研究所月報, No.612, pp.28-36, 2004.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Yang, J., Yan, N., Liu, Q. and Zhang, Y.: Laboratory test on long-term deterioration of cement soil in seawater environment, Transactions of Tianjin University, Vol.22, pp.132-138, 2016.
- 10) 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.
- 11) Buenfeld, N. R. and Newman, J. B.: The permeability of concrete in a marine environment, Magazine of Concrete Research, Vol.36, No.127, pp.67-80, 1984.
- 12) 榎本悠, 宮本慎太郎, 皆川浩, 久田真: 環境温度がセメント硬化体の硫酸劣化に及ぼす影響に関する基礎的検討, コンクリート年次論文集, Vol.31, No.1, 2009.
- 13) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.119-128, 1992.
- 14) 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, 土木学会中国支部第 71 回研究発表会, pp.184-185, 2019.

(2020年6月14日 受付)