

拡散方程式を用いたセメント改良砂の Ca 濃度分布と劣化深度の予測

九州大学大学院 学 ○藤澤拓馬 正 石藏良平 フェロー 安福規之
竹中工務店 正 河野貴穂

1. はじめに

セメント系固化材による固化処理技術は軟弱地盤対策として現在広く用いられている。しかし、長期間海水環境下で曝されると、固化材の種類によっては劣化することが確認されている¹⁾。そのため、高い耐久性、耐海水性を有するセメント系固化材の開発が求められる。本研究では、BB セメントと新たに導入した高炉スラグを高含有する試作セメントで地盤改良体を作製し、海水接触や潮位変動の影響を受ける現場にて養生を行った。所定期間養生した改良体の強度、長期劣化特性、供試体内部の各種元素濃度を調査した。また、水中の Mg 塩と改良体中の Ca 化合物の化学反応による Ca 溶出が劣化の大きな一因とされることから、供試体中の Ca 溶出は物質濃度拡散と同様に進行すると考え²⁾、Ca 濃度分布を拡散方程式で表し、劣化深度を予測した。この劣化深度と力学試験により定義した劣化深度との比較を行う。

2. 実験概要

2-1. 供試体の作製手順

実験に用いたセメントの性状および供試体の作製条件を表-1、表-2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、高炉スラグ、無水石膏の配合割合を変えた 2 種類(BB, 試作)を選定した。表-2 に示す所定のセメントと水を混ぜ合わせ、スラリー状にしたセメントペーストを母材に加え、10 分間攪拌機で練る。次に 2 種類のプラスチック容器(φ 115×h114mm およびφ 50×h100mm)に充填した供試体を約 2 週間気中養生した後、各環境下で養生を開始する³⁾。

表-1 セメントの性状

セメント種類	略記	OPC (%)	高炉スラグ (%)	無水石膏 (%)
高炉セメントB種	BB	55~60	40~45	0
高炉スラグ高含有セメント	試作	30	60~70	0~10

表-2 供試体の作製条件

CASE名	BB70	試作70	BB265	試作265
母材 (質量比)	豊浦砂 : ガイロメ粘土 = 9 : 1			
練り混ぜ水	精製水			
養生日数(日)	90・150・365・730・1095			
供試体寸法	φ 115mm×h114mm		φ 50mm×h100mm	
セメント	BB	試作	BB	試作
セメント添加量	70 kg/m ³		265 kg/m ³	
w/c(%)	100		80	

2-2. 養生条件

供試体(φ 115×h114mm)を現場土中養生、現場海水中養生の 2 つの条件に分けて、福岡市内の現場にて養生した。現場土中養生については、現場の潮位変動域以浅の土中に、供試体を開放面が上向きになるように設置し、実地盤に埋没した。現場海水中養生については、潮位変動する海域で、海水が浸透する土のう内で砂質土を開放面に接

触させた状態で供試体を設置し、養生を開始した。表-2 に示す養生日数が経過した供試体に対して実験を行う。

2-3. EPMA による各種元素濃度分布測定

海水中で 2 年養生した供試体(BB70, 試作 70, 試作 265)と土中で 2 年養生した供試体(試作 70)に対して EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)を用い、試験体内部の各種元素濃度分布を測定した。供試体の接触面から深さ 40mm までを試料として用い、5 元素(Ca(CaO), Mg(MgO), Si(SiO₂), Cl, S(SO₂))の質量濃度分布を測定した。

2-4. 針貫入勾配測定と針貫入強度比

供試体(φ 115×h114mm)を半割にし、供試体上端面からの深さ方向の強度変化を把握するため、図-1 に示す計測位置で、半割面に対して水平方向に針を貫入し、針貫入勾配を求める。針貫入勾配とは貫入量が 10mm 時の貫入力、または貫入力が 100N 時の貫入量を読み取り、貫入量で貫入力を除した値を意味する。また、強度が低下していないと考えられる健全部(接触面からの深さが 60mm および 75mm)での平均貫入勾配を求め、各供試体の深さ方向の貫入勾配を除した値を針貫入強度比とする。

3. 実験結果

3-1. Ca 濃度分布

図 2 に海水中で 2 年養生した試作 265 の針貫入強度比と EPMA で測定した供試体中の Ca 元素濃度分布を示す。

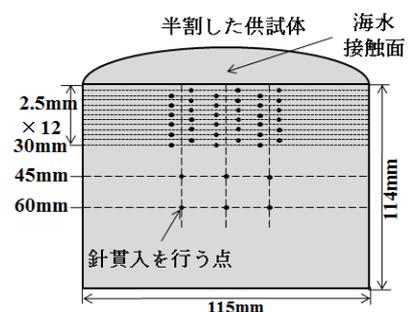


図-1 針貫入試験の計測位置

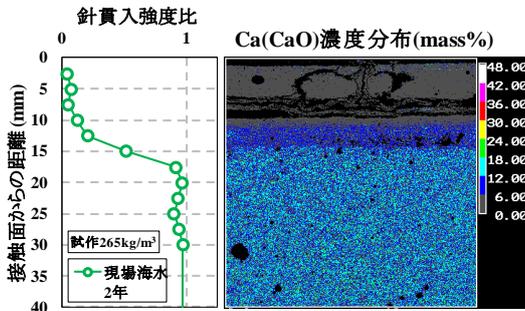


図-2 現場海水中2年養生した試作265の

針貫入強度比(左)とCa濃度分布(右)

Ca濃度が低下している範囲で強度低下が見られ、Caの溶出は劣化の進行に大きく影響している。そこで、改良体のCa溶出は物質濃度拡散と同様に進むと考え、コンクリートの強度分布を表す式を参考に²⁾、改良体中のCa濃度分布を下式で表すことを提案する。

$$C(z,t) = C_0 \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_e t}}\right) \quad (1)$$

$C(z,t)$: 時間 t (年)、接触面からの距離 z (mm)におけるCa濃度(mol/m³)、 D_e : 溶出係数(mm²/年)、 C_0 : 改良体中のCa初期濃度(mol/m³)、 $\operatorname{erf}(x)$: 誤差関数である。

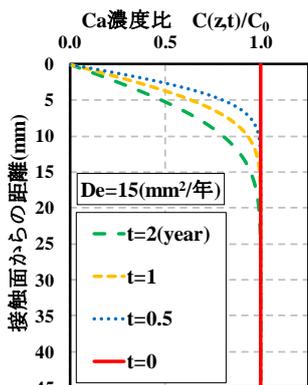


図-3 各養生期間でのCa濃度比(D_e 一定)

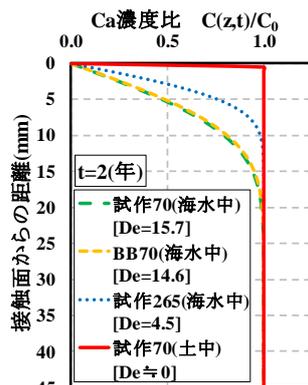


図-4 現場で2年養生した供試体のCa濃度比

図3は式(1)により $D_e=15$ (mm²/年)で各養生期間での供試体中のCa濃度比を示したものである。Ca濃度比は各深度のCa濃度をCa初期濃度 C_0 で除した値である。時間の経過でCa溶出が進行する様子がわかる。図4はEPMA分析の結果から D_e を算出し、現場で2年養生した供試体のCa濃度比を式(1)により表したものである。Ca溶出が大きく進行しているものほど D_e の値は大きくなる。また、実験条件から D_e はセメント添加量や養生環境により変動するものと考えられる。

3-2. 劣化深度予測

式(1)から求まるCa濃度分布から劣化深度の経年変化を予測し、実験値と比較を行う。図5に示すように、開放面から針貫入強度比が増加しない範囲と急激に増

加する範囲を直線で近似し、その2直線の交点を針貫入試験によって得られる劣化深度と定義した。また、図6に示すように、接触面に向かってCa濃度比が減少を始める点をCa濃度分布から得る劣化深度と定義した。

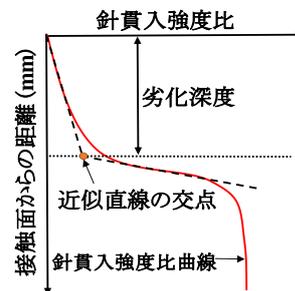


図-5 劣化深度定義

(針貫入試験)

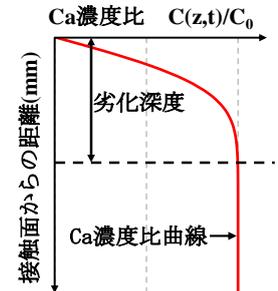


図-6 劣化深度定義

(Ca濃度分布)

図7は劣化深度の経年変化の予測と針貫入試験による劣化深度の実験値の比較を示したものである。予測値と実験値には相関があり、 D_e の値が決定すれば、劣化深度の経年変化予測は可能だと考える。今後、 D_e と相関のあるパラメータを調査していく必要がある。

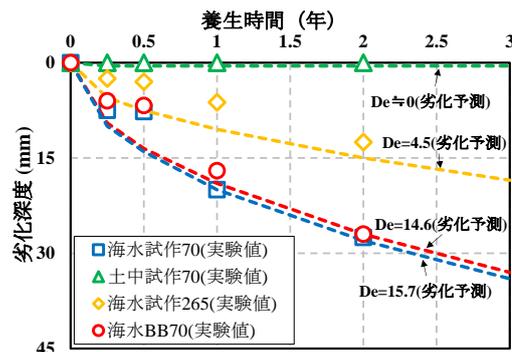


図-7 劣化深度の予測値と実験値の比較

4. まとめ

本研究では、拡散方程式を基礎としたCa濃度分布の算定式を新たに提示し、その有用性を検証した。まず、海水中で養生したセメント改良砂に対して針貫入試験およびEPMA分析を行い、提案する算定式により改良体中のCa濃度分布を求め、改良体の劣化予測を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 供試体のCaが溶出した範囲で強度低下がみられる。
- (2) 劣化深度の予測値と実験値には相関があり、溶出係数 D_e を決定できれば劣化深度を予測でき得る。
- (3) 溶出係数 D_e はセメント添加量や養生環境によって変わると考えられ、その相関を調査する必要がある。

【参考文献】 1) 原弘行ほか:海水中における石灰処理土のカルシウム溶出機構,材料 61(1), pp11-14, 2012 公益社団法人日本材料学会
 2) 山路徹ほか:海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討,土木学会論文集 E Vol.66 No.1, pp21-37, 2010.2
 3) 藤澤拓馬ほか:潮位変動域で養生したセメント固化処理土の長期劣化特性,第51回地盤工学研究発表会, M-05, pp651-652, 2016.9