

蛍光 X 線分析を活用した海水環境下におけるセメント改良砂の劣化進行予測

九州大学大学院 ○学 梅本 尚仁

九州大学大学院 正 石藏 良平 F 安福 規之

九州大学工学部 学 橋本 航太

1.はじめに

日本の沿岸地域では軟弱地盤が広く形成されており、セメント改良技術は、軟弱地盤対策として用いられている。しかし近年、長期間海水環境下で曝されるとセメント改良体が劣化することが報告されている¹⁾。よって、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ている。また、セメント改良体の劣化メカニズムについては研究段階であり、その劣化進行予測についても一般的な手法は確立されていない。本研究では、筆者らのグループによる既往の研究データ²⁾を基に、セメントの種類を変化させ、海水養生した供試体に対する針貫入試験と蛍光 X 線分析(以下 μ XRF 試験)の実験結果を用いて、長期的劣化を予測する方法についての検討を行った。

2.既往の研究

筆者らのグループによる既往の研究²⁾では、スラグ置換率の異なるセメントを 70kg/m^3 混合したセメント改良体を人工海水中で 28 週間養生した後の結果によると、強度が低下している部分では Ca 濃度が小さく、Mg 濃度が大きくなり、強度低下の遷移領域では S 濃度が大きくなることが明らかになっている(図-1)。供試体の作製条件を表-1に、強度試験と元素マッピングの比較を図-1²⁾に示す。Ca と Mg の交換反応と硫酸塩の侵入によるエトリンガイトの生成が強度低下に起因していると考えられる²⁾。

3.試験方法

一定期間養生した供試体について、側面から垂直に針を貫入し貫入力(N)と貫入量(mm)から深度ごとの針貫入勾配を計測する針貫入試験を行った。針貫入強度比は針貫入勾配が最大な点の針貫入強度比を 1 として正規化したものである。図-2 に針貫入試験の計測深度を示す。また、図-3 に示す様に開放面から針貫入強度比が急激に増加する範囲と収束してい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の実験値と定義した。これは、強度低下が始まる深度は S 濃度が大きくなっている層の下端にあると考えられるため、その深度を実験的に求められるように定義している。さらに、供試体についての各元素マッピングを確認することができる μ XRF 試験を行った。

表-1 供試体の作製条件²⁾

母材	豊浦砂 : ガイロメ粘土 = 9 : 1
セメントの種類 (高炉スラグ置換率)	BA(25%)・BB(45%)・BC(65%)・BD(85%)
供試体寸法	$\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$
封緘養生期間	1日
養生環境	人工海水(アクアマリン)
海水養生期間	4・12・28週間
設定含水比	18%
水セメント比	80%
同条件での作成本数	3本

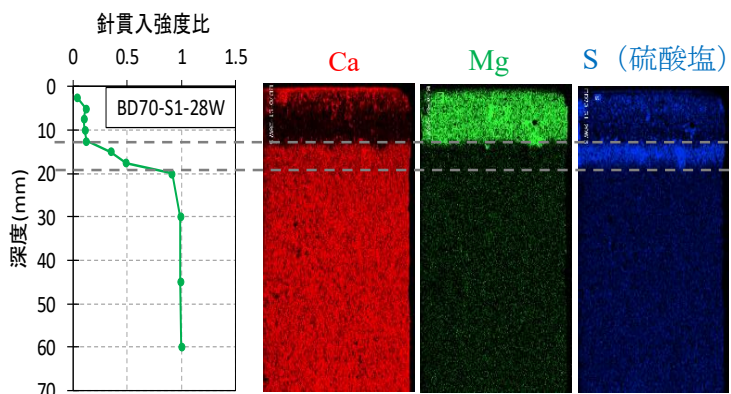


図-1 強度試験と元素マッピングの比較

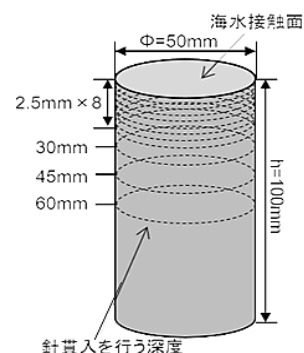
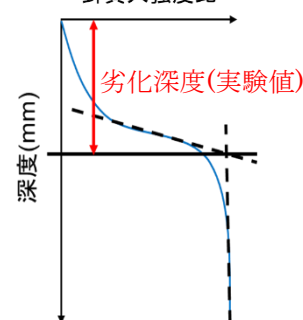
図-2 針貫入試験の計測点
針貫入強度比

図-3 劣化深度の実験値の定義

4. S 濃度分布を示す一次元拡散方程式

本研究では S の供試体内への侵入が劣化に影響を及ぼすと考え、誤差関数を用いて、一般的な一次元拡散方程式から得た式(1)を供試体内部の S 濃度分布を示す式とする³⁾。

$$S(z, t) = S_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right\} \cdots (1)$$

ここに、 $S(z, t)$: S 濃度(mol/m³), S_0 : S 初期濃度(mol/m³), z : 接触面からの距離(mm), t : 時間(年), D_e : S の拡散係数(mm²/年), erf : 誤差関数である。また, μXRF 試験結果から S の相対強度を得る。相対強度とは S 濃度のマッピング結果を数値化し, S 濃度の最大値を 100%としたものである。S 相対強度の深度分布から, S 濃度が増加し始めた深さを劣化深度の予測値と定義する。ここで, 式(1)を用い, S 濃度比($S(z, t)/S_0$)の深度分布を表す曲線の S 濃度が増加し始めた深さが劣化深度の予測値と一致するように D_e を変化させ, フィッティングにより各供試体における D_e を算出する。図-4 に 4 週間海水養生した供試体における S のマッピング, 相対強度と S 濃度比曲線の一例を示す。算出された D_e を再び式(1)に代入し, 各供試体における時間経過に伴う劣化深度の予測を算出した。

5. 劣化深度の実験値と予測値の比較

図-5 に 28 週間養生したセメントの種類が異なる海水養生した供試体の針貫入試験結果を示す²⁾。また, 図-6 に海水養生から 4 週間後の供試体の μXRF 試験結果から D_e を算出して求めた劣化予測曲線と実験値との比較を示す。予測値はいずれの条件においても, 時間の経過とともに劣化深度は収束しない傾向となった。予測値は, 実験値の傾向を概ね捉えることができていると考える。

6. 結論

本研究では, 蛍光 X 線分析を用いて, セメント改良体内の元素マッピングを行い, 劣化の要因として, S (硫酸塩) の供試体内への侵入に着目した。蛍光 X 線分析および一次元拡散方程式に基づく劣化深度の予測値は, 実験結果の傾向を捉えることができることを確認した。

【参考文献】 1) 中村健, 北詰昌樹: セメント安定処理土の耐久性に関する室内試験, 港湾空港技術研究所資料, No.1128, June, 2006. 2) 石蔵良平, 藤澤拓馬, 河野貴徳, 安福規之: 海水浸漬したセメント改良砂の劣化メカニズムの化学的解釈と炭酸塩添加による劣化抑止効果 第 14 回地盤改良シンポジウム論文集 pp.41-46, 2020. 3) 藤澤拓馬: 海水環境におけるセメント改良砂の劣化特性の評価と劣化進行予測への展開, 九州大学大学院工学府修士論文, 2017. 4) 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 Vol63, No1, pp49-54, Jan.2011.

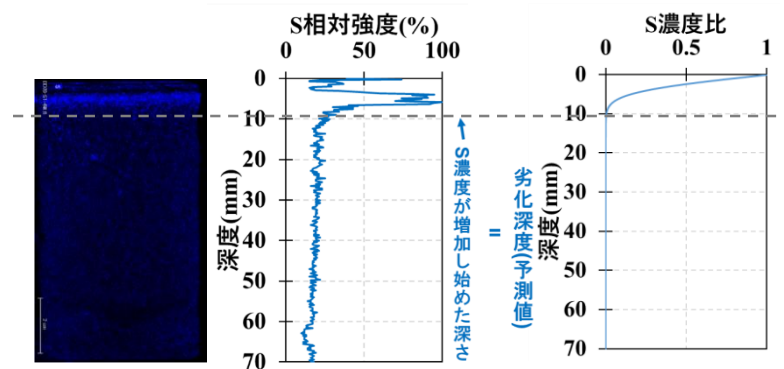


図-4 S のマッピング, 相対強度と S 濃度比曲線の一例

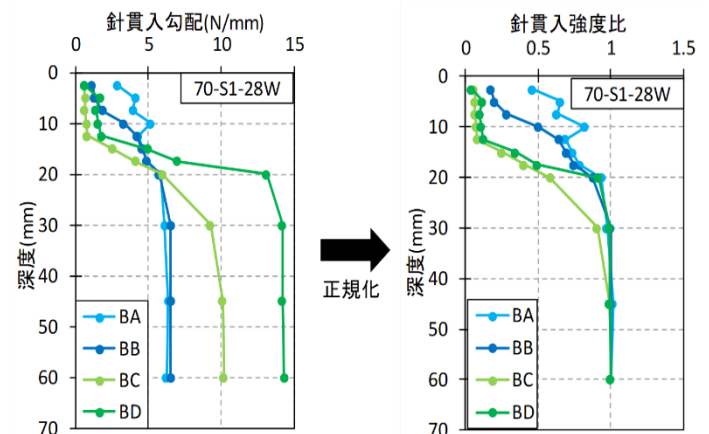


図-5 28 週間養生した供試体の針貫入試験結果²⁾

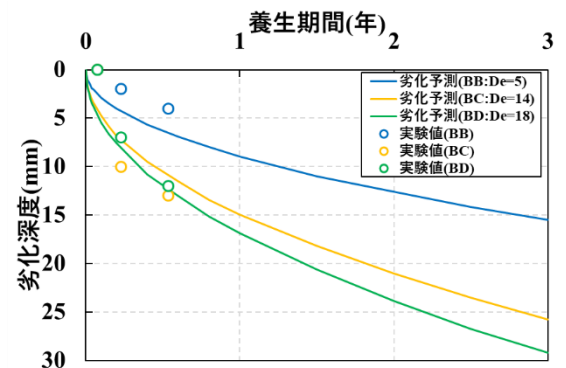


図-6 劣化深度の実験値と予測値との比較