

助成番号

2022-1

けい酸塩系表面含浸工の Cl⁻ 浸透阻止に関する定量評価法の開発

高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授 近藤拓也

1. はじめに

けい酸塩系表面含浸工は、けい酸塩系表面含浸材をコンクリート中に含浸することでコンクリート中に存在する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応させ、C-S-H ゲルが生成されることで部分的に緻密化させる工法である。その結果、劣化因子侵入阻止性が向上するため、Cl⁻を中心とした劣化因子侵入阻止性に関して各種検討が行われている¹⁾。けい酸塩系表面含浸工を実施したコンクリートの Cl⁻浸透阻止性に関しては様々な研究事例が存在するが、定性的な評価を行ったものが多く、定量的な評価については一般化できていないのが現状である。

近年になり、けい酸塩系表面含浸工の改質深さを特定する手段として、C-S-H ゲルの生成に伴う強度増加特性を利用した、ビッカース硬さ試験による方法が提案されている²⁾。本方法は

図-1 に示すように、改質深さと非改質層の硬さの差を利用して改質深さを特定するものである。この方法を利用して求めた、図-1 に示す改質部分と非改質部分の硬さ増加量と改質深さで囲まれる面積（以下「面積」と示す）が、けい酸塩系表面含浸材の Cl⁻浸透阻止性に関係している可能性について定性的に示すことができた³⁾⁴⁾。しかし、けい酸塩系表面含浸工による Cl⁻浸透阻止性に関する定量的な効果については依然として確立されていない。

そのため本研究課題では、はじめに 3 種類の水セメント比モルタルに 5 種類の使用量の異なるけい酸塩系表面含浸材を施工した。そしてビッカース硬さ試験により改質深さそして改質効果を測定した。これらの実施により、けい酸塩系表面含浸工のモルタル中への浸透特性について検討を行った。また、同一諸元で作製した供試体を塩水浸漬し、Cl⁻濃度のプロファイリングを測定した。得られたビッカース硬さ増加量と含浸深さで囲まれた面積と、塩水浸漬試験により得られた表面含浸工施工有無による見かけの拡散係数比の関係を示し、けい酸塩系表面含浸工の施工効果に関する定量評価方法について検討を行った。

なお本研究は、一般社団法人四国クリエイト協会の「2022 年度建設事業に関する技術開発支援制度」による助成を受けて実施したものである。

2. 試験方法

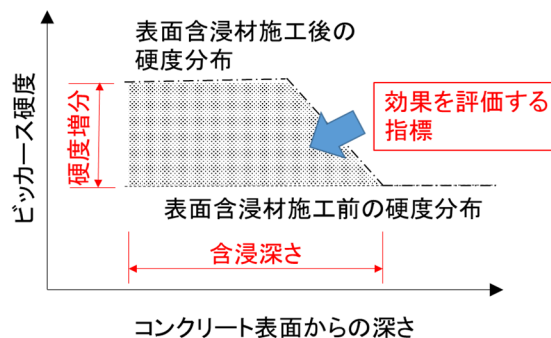


図-1 けい酸塩系表面含浸材施工前後のビッカース硬度分布の模式図

表-1 試験要因および水準

試験要因	試験水準
水セメント比	W/C=40%、55%、70%
表面含浸材 使用量	ブランク) 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8L/m ²

試験要因および水準を表-1に示す。水セメント比は3種類とした。また、表面含浸材の使用量がそれぞれに与える影響を検討するため、無施工供試体（blank）および5種類の合計6種類で比較することとした。

供試体はモルタルを使用した。また表面含浸材はけい酸塩ナトリウム系表面含浸材（比重1.20、全乾燥固形分率21.82%）とした。供試体は材齢28日に所定量の表面含浸材を施工し、材齢56日以降に各試験を実施した。

試験はビッカース硬さ試験および塩水浸漬試験を行った。ビッカース硬さ試験はJIS Z 2244に基づき、微小硬さ試験機を用いてモルタル切断面の表面硬さを測定した。測定は表面含浸材の含浸面とし、基本的に供試体は深さ方向に1mm間隔で最大15mmまで測定した。ただし、blank供試体と同じ硬度に達しない供試体については、blank供試体と同じ硬さになる深さまで試験を実施した。

塩水浸漬試験は、所定の期間養生を終えた後、質量濃度3%の塩水中に供試体を設置した。塩水浸漬期間は180日間とした。供試体を塩水噴霧槽から取り出した後に、φ4mmの電動ドリルを用いて深さ10mm毎にモルタル粉を採取した。その後、電量滴定法を用いて、全塩化物イオン濃度を測定した。

3. 試験結果

3-1 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験によるビッカース硬さの深さ方向分布について、W/C=40%を図-2に、W/C=55%を図-3に、W/C=70%を図-4に示す。いずれの水セメント比においても、けい酸塩系表面含浸材を施工するとビッカース硬さが増加している様子が確認できる。これはけい酸塩とセメントペースト中のCa(OH)₂が反応しC-S-Hが生成されたため、ビッカース硬さが増加したものと考えられる。

ビッカース硬さ増加量に着目すると、W/C=70%における使用量0.1L/m²において、モルタル表面から5mm以内におけるビッカース硬さは55Hv程度であった。それ以外の使用量では表面含浸域と考えられるモルタル表面から5~10mm程度付近では62~63Hvを示した。

続いて深さ方向に着目する。W/C=40%では、表面含浸材の供給量を変化させても、改質深さに大きな変化は見られなかった。施工量0.1L/m²と0.8L/m²には2~3mm程度の差しか確認できなかった。一方で、W/C=55%、70%と増加するとともに改質深さに明確な差が生じており、W/C=70%

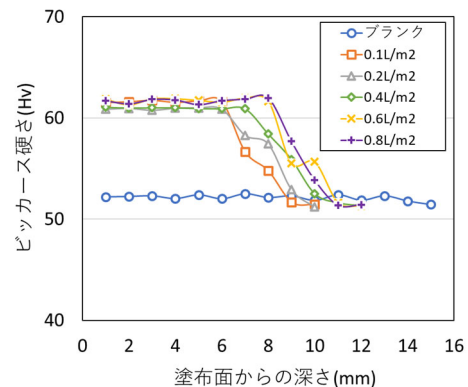


図-2 ビッカース硬さ分布 (W/C=40%)

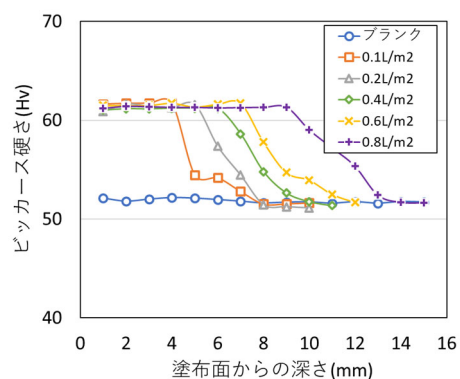


図-3 ビッカース硬さ分布 (W/C=55%)

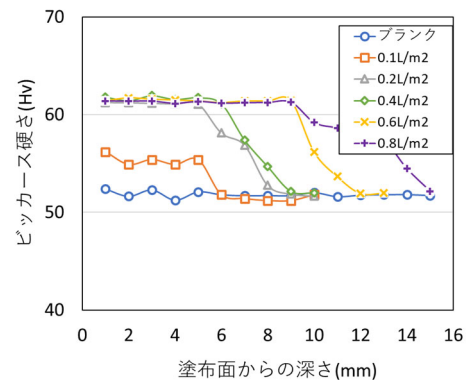


図-4 ビッカース硬さ分布 (W/C=70%)

では約 5mm の差が生じている。また、改質域以降、ブランク供試体のビッカース硬さと交わるまでの距離についても、W/C=40%ではいずれの使用量においても 2~3mm でブランク供試体のビッカース硬さと交わっている。しかし W/C=70%については、改質深さからブランク供試体に交わるまで 6mm 程度要している。そのため、表面含浸材の含浸特性は水セメント比によって変化することが考えられる。

3-2 Cl⁻浸透特性

質量濃度 3%の塩水中に 180 日間浸漬した供試体の Cl⁻濃度プロファイリングを、W/C=40%について図-5、W/C=55%について図-6、W/C=70%について図-7に示す。

いずれの水セメント比においても、表面含浸材施工量が 0.2L/m² 以下では、顕著な塩分浸透阻止性を示さなかった。これはけい酸塩系表面含浸工によりビッカース硬さ増加量は確保できているものの、Cl⁻浸透阻止に必要な改質深さが得られていないため、Cl⁻浸透阻止性に明確な差が確認できなかったものと考えられる。使用量の増加に従い、Cl⁻濃度が低下する傾向を示した。

4. ビッカース硬さ試験を用いた Cl⁻浸透阻止性評価法の提案

3において、Cl⁻濃度の分布を求めた。この結果よりけい酸塩系表面含浸工により改質された部分の見かけの拡散係数について同定を行う。同定方法は、土木学会「表面保護工法設計施工指針 (案)」⁵⁾に基づき、表面含浸工法による劣化因子浸透遮断効果を、モルタル厚さの増加とみなす、等価かぶりの考え方に基づいた。等価かぶり厚さ C_i は、式(1)で表現できる。

$$C_i = C_s \times (D_c / D_s)^{0.5} \quad \text{式 (1)}$$

ここに C_s : 表面含浸材による改質深さ(mm)

D_c : モルタルの見かけの拡散係数(cm²/年)

D_s : 改質部分の見かけの拡散係数 (cm²/年)

具体的には、黒岩らが提案する方法に基づき²⁾、ブランク供試体の Cl⁻濃度分布と、表面含浸材を施工した供試体の Cl⁻濃度分布を、等価かぶりを考慮しながらフィッティングさせ、改質部の見かけの拡散係数を同定した。

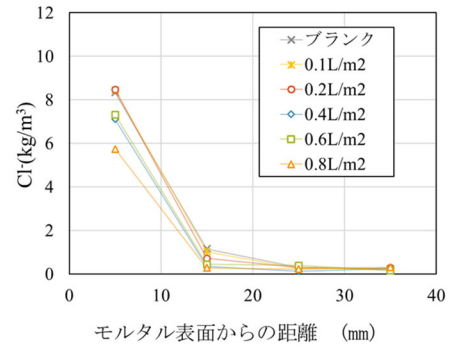


図-5 Cl⁻濃度分布 (W/C=40%)

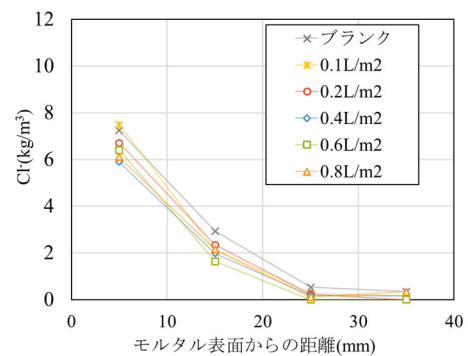


図-6 Cl⁻濃度分布 (W/C=55%)

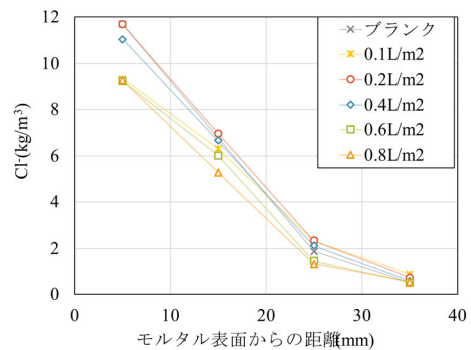


図-7 Cl⁻濃度分布 (W/C=70%)

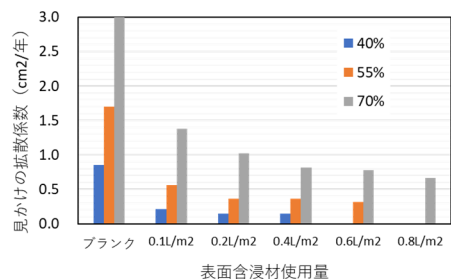


図-8 改質部のみかけの拡散係数

改質部分のみかけの拡散係数を図-8に示す。表面含浸材を施工した供試体について、W/C=70%では、表面含浸材の使用量の増加とともに改質部のみかけの拡散係数が低下している状況が確認できる。一方で、W/C=55%および40%については、ブランク供試体と比較して改質部分のみかけの拡散係数が低下することが示されている。

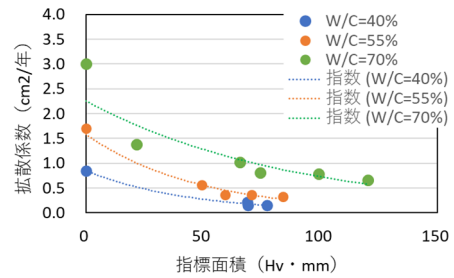


図-1に示す指標面積と、図-8で得られた改質部分のみかけの拡散係数の関係を図-9に示す。ここで、ブランク供試体におけるみかけの拡散係数は、指標面積0Hv · mmとしてプロットした。いずれの水セメント比においても、指標面積の増加とともにみかけの拡散係数が低下している状況が確認できる。

W/C	回帰式	R ²
70%	$2.26e^{-0.011x}$	0.85
55%	$1.58e^{-0.021x}$	0.99
40%	$0.85e^{-0.023x}$	1.00

図-9 指標面積と改質部みかけの拡散係数の関係

このように、けい酸塩系表面含浸工による改質効果および劣化因子侵入阻止性について、ピッカース硬さ試験を用いて、かた等価かぶりの概念を用い、さらに指標面積の考え方を提案して、定量評価を行うことができた。図-9に示す結果に示すように、水セメント比により近似曲線が変化するため、水セメント比により基準線を作成する必要があるものの、けい酸塩系表面含浸工の劣化因子侵入阻止性について定量評価を行うことができる手法を開発できたと考えられる。

【謝辞】

本検討は、金沢工業大学 宮里心一教授、および富士化学（株）とともに検討を行った。ここに謝意を表す。

【参考文献】

- 1)土木学会：けい酸塩系表面含浸工法的设计施工指針(案)，コンクリートライブラリー137，2012.6
- 2)黒岩大地，宮里心一：けい酸塩系表面含浸材の改質部における見かけの拡散係数の推定方法の提案と発錆遅延期間の試算，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.71，No.2，pp.124-134，2012.1
- 3)宮島英樹，近藤拓也，佃洋一，宮里心一：13年暴露したけい酸塩系表面含浸材の性能に関する一考察，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.15，pp.7-12，2015.10
- 4)近藤拓也，樋口和朗，宮里心一，横井克則，山田悠二：けい酸塩系表面含浸工法の塩分浸透抑制指標に関する定量的評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp.137-142，2017.10
- 5)土木学会：表面保護工法 設計施工指針 (案)，コンクリートライブラリー119，2005