論文 けい酸塩系表面含浸工法の吸水抑止性および耐凍害性に関する定量 評価方法の検討

近藤 拓也*1・宮里 心一*2・西野 英哉*3・横井 克則*4

要旨:けい酸塩系表面含浸工法の劣化因子抑止性に関する指標について,施工箇所のビッカース硬度増分と 改質深さに囲まれた面積が適用できる可能性を筆者らは過去に提案した。この指標のさらなる適用性を検討 するため,吸水試験による吸水抑止性,および凍結融解抵抗試験による耐凍害性への適用について検討した。 その結果,筆者らが提案する指標は,吸水抑止性については適用できる可能性を示した。耐凍害性について も,提案指標と高い相関を示したものの,物理的意味について更なる検討を促す結果を示した。

キーワード:けい酸塩系表面含浸工,改質深さ,ビッカース硬度,吸水抑止性,耐凍害性

1. はじめに

コンクリート構造物の品質確保の機運の高まりを受けて、近年積極的に研究開発が行われている工法の一つに表面含浸工法がある。このうち、けい酸塩系表面含浸工法は、コンクリート中に含浸させることでコンクリート中に存在する Ca(OH)2 と反応し、C-S-H ゲルを生成することで部分的に緻密化させるものである。しかし、けい酸塩系表面含浸工法を適用したコンクリートに対する劣化因子の侵入抑止性を物理的に評価する手法は、現在においても構築されているとは言い難い状況である。

近年になり、けい酸塩系表面含浸工法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、ビッカース硬度試験による方法が提案されている ¹⁾。本方法は図-1 に示すように、改質層と非改質層の硬度差を利用して改質深さを特定するものである。宮島ら ²⁾,樋口ら ³⁾は本方法を用いることにより得られる改質深さと増加する表面硬度に着目し、改質深さと増加硬度の 2 つに囲まれる面積が、けい酸塩系表面含浸工

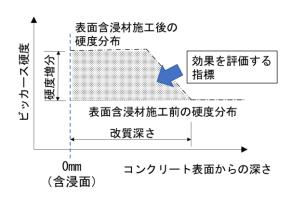


図-1 けい酸塩系表面含浸材施工前後の ビッカース硬度分布の模式図

法の施工による空隙充填量の累積値を示すと考えた。筆者らはこの面積と塩化物イオンの浸透阻止性の相関について検討し、水セメント比が大きい供試体を用いた場合、この2者に相関があることを示した⁴⁾。

そのため本論文では、本面積が塩害以外の劣化因子侵入抑止性になりうることを検討するため、3 水準の W/C モルタルに2 種類のけい酸塩系表面含浸材を施工した。そして、それら供試体から得られたビッカース硬度増分と改質深さに囲まれた面積と、吸水阻止性および耐凍害性の関連性について検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験パラメータ

試験パラメータを表-1に示す。表面含浸材の種類については,反応型の2種類のけい酸塩系表面含浸材を使用した。W/Cについては, $Ca(OH)_2$ の量がけい酸塩系表面含浸工法の効果に影響を与えると考えられるため,3種類と,W/C=70%については予め中性化促進をしたもので計4種類の供試体とした。

2.2 供試体概要

本研究で用いた基板材料はモルタルとした。使用した モルタル材料を表-2に示す。また、使用した表面含浸材

表-1 試験パラメータ

項目	水準	
表面含浸材の	・けい酸ナトリウム系	
種類(2種類)	・けい酸カリウム系	
水セメント比	· 40% · 55% · 70%	
(3 種類)	・70% (事前に中性化)	

- *1 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 博士(工学) (正会員)
- *2 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)
- *3 富士化学(株) チーム 21 リーダー補佐
- *4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 試験モルタル材料

項目	内訳		
セメント	普通ポルトランドセメント		
	(密度 3.16g/cm³)		
細骨材	砂岩系砕砂		
	(密度 2.58g/cm³,吸水率 1.29%)		

表-3 使用した表面含浸材

種類	使用量	全乾燥	
	(ℓ / m^2)	固形分率(%)	
ナトリウム系	0.2×2 回	21.80	
カリウム系	0.2×2 回	23.56	

表-4 モルタル供試体の配合

W/C	単位量(kg/m³)			
	W	C	S	
40%	205	508	1523	
55%	260	471	1408	
70%	308	439	1311	

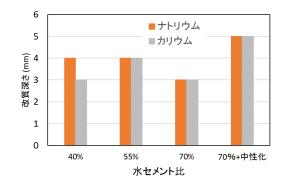


図-2 改質深さの比較

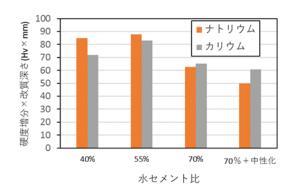


図-3 ビッカース硬度増分と改質深さで囲まれる 面積の比較

を表-3 に示す。表面含浸材は、密度が 1.20g/cm³ となるように全乾燥固形分率を調整した。

本試験で用いたモルタル供試体の配合を表-4に示す。

モルタル供試体は、ビッカース硬度測定および吸水試験 については $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 供試体、凍結融解抵 抗試験については $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 供試体とした。配合はセメントと細骨材を質量比で 1:3 の割合とした。混和剤は無塩化タイプの AE 減水剤を用いた。空気量は $4.5\% \pm 1.5\%$ となるように混和剤量を調整した。

モルタルを打ち込み後 1 日で脱型し、材齢 7 日まで20℃室内で湿潤養生を行った。その後、20℃、60%R.H.の恒温恒湿条件で供試体を材齢 28 日まで存置した。ビッカース硬度測定供試体については打込み面を含む 5 面に、吸水試験供試体については打込み面を含む 4 面にエポキシ樹脂被覆を行った。その後、残りの面に所定の表面含浸材を施工した。表面含浸材施工時には、高周波容量式コンクリート・モルタル水分計を使用しながら、モルタル表面の含水率を 7%程度に保つように散水処理を行い、塗布後はさらに 28 日間室内環境下に供試体を存置した。

なお、事前に中性化を行う供試体については、材齢 28 日から 20° C、 60° R.H.、 CO_2 濃度 5° %環境下に 28 日間供試体を存置し、その後上述の処置を行った。なお、促進中性化 28 日目における中性化深さは 11° mm であった。

2.3 測定方法

ビッカース硬度については、所定の期間養生を行った 供試体を使用し、ビッカース表面硬度計で測定を行った。 測定前に供試体を厚さ 20mm 程度に切断し、切断面を測 定に供した。なお測定にあたっては、目視で切断の影響 で測定面にひび割れが生じていないことを確認した。

硬度測定は JIS Z 2244 に準拠して実施した。測定は試験力が 0.09807N, 試験力の保持時間を 30 秒とした。測定はコンクリート表面から深さ 10mm まで 1mm 間隔で実施し、1 測定深さにつき 5 点測定を行い平均値で評価を行った。また表面硬度計に備え付けの光学顕微鏡を用いて、明らかに骨材と分かる箇所を避けながら、打撃箇所の選定を行った。

吸水試験については、所定の養生期間終了後、角柱供 試体を 40mm×40mm×40mm に切断した。切断面にエポ キシ樹脂被覆を行った後に、JSCE-K 572-2012「18. けい 酸塩系表面含浸材の試験方法(案)」の吸水率試験に従い 試験を行った。試験体数は、各要因 3 体とした。質量測 定は試験開始から 24 時間毎に測定を行い、7 日まで実施 した。供試体質量から試験開始時の供試体質量を差し引 いた値を試験開始時の供試体質量で割ることにより、吸 水率とした。

凍結融解試験については、所定の養生期間終了後、供 試体を 3 日間水中に浸漬した。その後、JIS A 1148:2010 「9. コンクリートの凍結融解試験方法」A 法に従って、 300 サイクルまで実施した。約 30 サイクル間隔で相対 動弾性係数および質量減少率を測定した。試験体数は, 各要因1体ずつとした。

3. 試験結果

3.1 ビッカース硬度試験結果

各供試体を用いて実施したビッカース硬度試験により得られた改質深さ、およびビッカース硬度増分と改質深さに囲まれた面積について検討する。面積の算定は、図-1 で示すように表面含浸材施工により局所的に増加するビッカース硬度と、ブランク供試体から得られるビッカース硬度で囲まれる面積を計算した。

各条件における表面含浸材の改質深さを \mathbf{Z} に示す。 いずれの水セメント比,含浸材料においても,改質深さ は $3\sim5$ mm を示した。

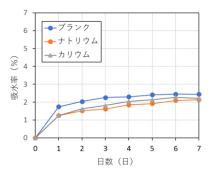
ビッカース硬度増分と改質深さで囲まれる面積について、表面含浸材の種類ごとに分類したものを図-3に示す。表面含浸材を施工したいずれの供試体についても、W/C=55%で面積が最も大きくなり、W/C=70%に中性化させた供試体で面積が小さくなった。これは、モルタル中のCa(OH)2量により、表面含浸材との反応による生成物の量が変化するためだと考えられるが。ただし、W/C=40%と比較し55%の面積が大きい理由は、モルタル中のCa(OH)2と比較し、けい酸塩の供給が少ないためだと考えられる。この結果は、文献4)と同じ傾向を示している。なお、以降ビッカース硬度増分と改質深さで囲まれる面積を「指標面積」と示す。

3.2 吸水率との比較

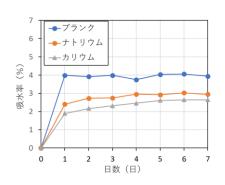
水セメント比毎の吸水率の経時変化を図-4 に示す。 W/C=40%では、いずれの表面含浸工ともに7目間にわたって吸水率が増加する傾向が確認できる。しかし、ブランク供試体では、W/C=55%より W/C の大きい供試体で、吸水後1日からほぼ横ばいの傾向を示している。表面含浸材を施工した供試体では、W/C=55%および70%供試体で材齢5日程度まで吸水量が増加する傾向を示したが、W/C=70%に中性化を行った供試体では、吸水後1日以降の値が横ばいを示しており、表面含浸工による効果が低いことが確認できる。これは、けい酸塩系表面含浸工による空隙充填性が、モルタル中のCa(OH)2に比例していると考えられるためだと考えられる。W/C=70%に中性化を行った供試体では、吸水抑止を行う能力がほぼないため、ブランク供試体とほぼ同等、もしくはそれより大きい吸水率を示したものと考えられる。

図-4より、材齢7日の吸水率では改質層のみでなく、その内部の非改質層の影響を受けると考えられるため、吸水後1日における吸水率を用いて、図-3に示す指標面積との相関について検討する。

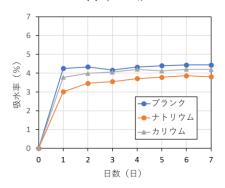
吸水率比と指標面積との関係を図-5に示す。吸水率比



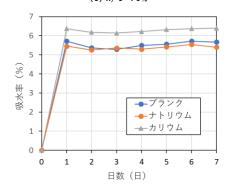
(a) W/C=40%



(b) W/C=55%



(c) W/C=70%



(d) W/C=70%+事前中性化 図-4 吸水率の経時変化

については、各含浸工供試体での吸水1日における吸水率を同一 W/C における吸水1日のブランク供試体の吸水率で割ったものの百分率とした。この結果より、ナトリウム系、カリウム系いずれの表面含浸工を施工した場合でも、面積の増加とともに吸水率比が低下する傾向を

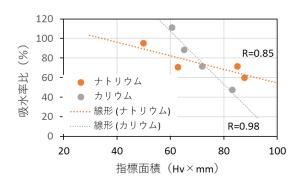


図-5 指標面積と吸水率比の関係

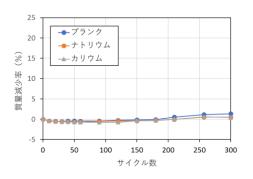
示した。また、それぞれの相関係数も図-5 中に示したが、いずれも R=0.80 以上で、両者に強い相関があると言える。そのため、けい酸塩系表面含浸工の吸水抑止性評価には、本指標での評価が可能であると考えられる。

また既報において 4, けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタル供試体の塩分浸透抑止性について, 圧縮強度が大きい供試体では, 指標面積と塩化物イオンのみかけの拡散係数比に相関関係が見られなくなった。しかしモルタル中の塩分拡散と関係があると言われている水分抑止性については, 指標面積が大きくなっても, 相関関係がみられる結果となった。そのため, けい酸塩系表面含浸材を施工した供試体の拡散係数を検討する場合は, 水セメント比やビッカース硬度増分といった, 細孔構造との関連性を含めて検討する必要性を示唆する結果を示したと考えられる。

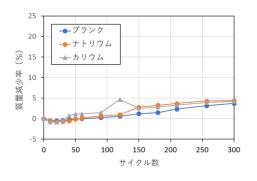
3.3 凍結融解抵抗性との関係

凍結融解抵抗試験における質量減少率の推移を図-6 に示す。ブランク供試体における質量減少率は、水セメ ント比の増加とともに大きくなる傾向が示された。また, 表面含浸材を施工した供試体については、W/C=55%を除 いては、いずれも表面含浸材を施工することにより、300 サイクル時点において, 質量減少率が抑制される傾向を 示した。W/C=55%では、わずかではあるが、ブランク供 試体が最も小さい質量減少率を示した。ブランク供試体 では300サイクル終了時点でスケーリング状の変状のみ が確認できたが、表面含浸材を施工した供試体では直径 20mm 程度のポップアウトに似た局所的な断面欠損が各 面 2~4 個程度確認された。図-3 において、W/C=55%供 試体は、けい酸塩系表面含浸工の効果が最も大きくなっ ており, 改質層より内部の水分による凍結膨張圧により, 改質層が押し出された可能性もある %。そのため、この ような傾向を示したものと考えられる。ただし、ブラン ク供試体と表面含浸工供試体の質量減少率の差は、300 サイクル終了時点で最大でも約3%であり、本試験範囲 内では大きな差は生じなかったものと考えられる。

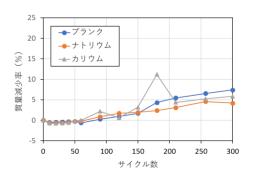
カリウム供試体については、W/C=40%を除く全ての供



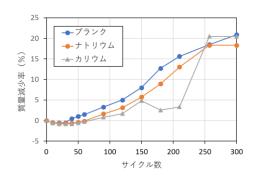
(a) W/C=40%



(b) W/C=55%



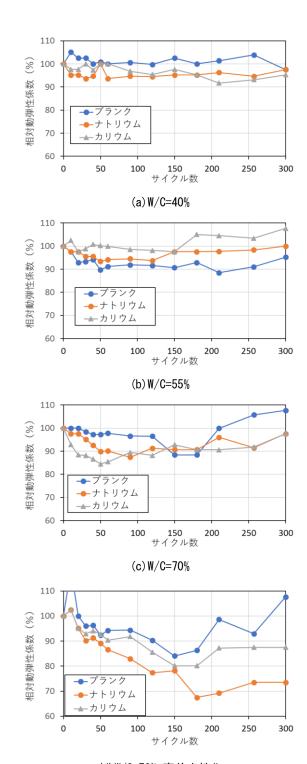
(c) W/C=70%



(d) W/C=70%+事前中性化 図-6 質量減少率の推移

試体で,他2つと異なる傾向を示した。これについては, 今後凍結融解による劣化メカニズムを含め,考察を行う 必要がある。

凍結融解試験における相対動弾性係数の推移を**図-7** に示す。結果にばらつきが認められるものの、W/C=40%



(d) W/C=70%+事前中性化 図-7 相対動弾性係数の推移

供試体では、300 サイクル終了時において、ブランク供 試体と表面含浸工施工供試体に大きな差は確認できなかった。W/C=55%供試体では、300 サイクル終了時でブランク供試体と比較して、相対動弾性係数が大きくなる傾向を示した。W/C=70%供試体では、中性化の有無に関わらず、ブランク供試体と比較し、相対動弾性係数が低下する傾向を示した。この傾向は、図-6 に示す質量減少率

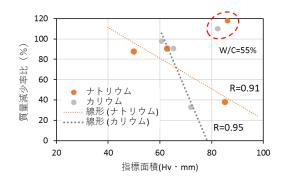


図-8 指標面積と凍結融解抵抗試験における 質量減少率比の関係

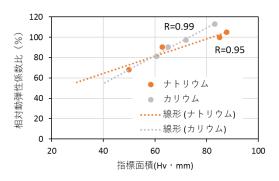


図-9 指標面積と凍結融解抵抗試験における 相対動弾性係数比の関係

とは逆の傾向である。これは、W/C=55%供試体では、改質層より内部の水分による膨張圧により、改質部のモルタルが剥落したため、モルタル内部へひび割れが進展しにくかった可能性が考えられる。一方で、W/C=70%供試体では、改質層の効果は W/C=55%や 40%供試体と比較し小さいが、図-5に示すように吸水抑止効果が低いため、供試体内部に水が貯留されたものと考えられる。遮水効果と吸水効果が相乗効果となり、W/C=70%供試体ではブランク供試体より質量減少率は小さくなるが、相対動弾性係数もブランク供試体より小きくなる傾向を示したと考えられる。

凍結融解抵抗試験で得られた質量減少率比と指標面積の関係を図-8に示す。なお、質量減少率比については、表面含浸材を施工した供試体における300サイクル時の質量減少率を、それぞれに対応するブランク供試体における300サイクル時の質量減少率で除したものの百分率とした。

両表面含浸材を施工した供試体について、W/C=55%供 試体では、質量減少率比が100%を超えるものとなった。 これは、上述のように表面含浸材を施工した供試体では、 コンクリート表面が局所的に剥落を起こした現象により、 質量減少率が大きくなったことによるものと考えられる。 そのため、W/C=55%以外の3点で線形回帰を行い、近 似直線を描いた。その相関係数は、ナトリウム系で R=0.91、カリウム系で R=0.95と、強い相関を示す結果となった。そのため、凍結融解抵抗試験における供試体の劣化性状を確認することにより、提案する指標面積により、けい酸塩系表面含浸工の凍害に対する抵抗性を表現できる可能性を示した。

凍結融解抵抗試験で得られた相対動弾性係数比と指標面積の関係を図-9に示す。なお、相対動弾性係数比については、表面含浸材を施工した供試体における300サイクル時の相対動弾性係数を、それぞれに対応するブランク供試体における300サイクル時の相対動弾性係数で除したものの百分率とした。

いずれの表面含浸材を施工した場合においても、相関係数は 0.95 を超え、強い相関を示した。しかし、相対動弾性係数比が 1 を下回るものは W/C=70%供試体のシリーズであり、表面含浸材を施工することにより供試体内部にひび割れが進展する可能性がある供試体の結果を示したものである。そのため、一概に筆者らが提案する指標面積が耐凍害性に対して適用できるものではないと考える。

けい酸塩系表面含浸工の耐凍害性に関する研究は、遠藤らら、大町らつ、迫井ら8を含めて複数の報告事例があるが、凍結融解による劣化のメカニズムが複雑であるために、統一的な見解が得られていないのが現状である。そのため、けい酸塩系表面含浸材を施工した供試体の凍害による劣化メカニズムの基礎的検討を重ね、本試験結果が示す物理的意味合いについて検討する必要があると考える。

また、今回は反応性けい酸塩系表面含浸材を使用した 結果を示したが、反応メカニズムが異なる固化型けい酸 塩系表面含浸材を使用した場合についても、同様の検討 が必要であると考える。

4. おわりに

けい酸塩系表面含浸工の劣化因子侵入抑止性に関する指標を検討するために、ビッカース硬度試験により得られた硬度増分と改質深さに囲まれた面積(指標面積)に着目した。指標面積と吸水阻止性そして耐凍害性との関係性について検討を行った。得られた結果を下記に示す。

- (1) 劣化因子侵入抑止性として考えられる, ビッカース 硬度試験による硬度増分と改質深さに囲まれた指標 面積については, 今回検討した水セメント比では, W/C=55%で最も大きくなった。これは, 既往の研究 とほぼ同様の結果であった。
- (2) 吸水率試験により得られた吸水抑止性と、提案する

- 指標面積については、強い相関性を示す結果であった。
- (3) 凍結融解抵抗試験により得られた質量減少率比と, 提案する指標面積については,相関性が得られる結 果を示したが,適用に関しては供試体の外観性状の 確認を要する結果を示した。
- (4) 凍結融解抵抗試験により得られた相対動弾性係数比 と,提案する指標面積の関連性については,凍結融解 に関するメカニズムを踏まえて,更なる検討を要す る結果となった。

謝辞

本研究は、科研費若手研究(B)(研究課題:16K18133)の 補助を受けて実施した。また実験については、高知工業 高等専門学校 山崎大智氏に多大なる協力をいただいた。 ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 黒岩大地ら: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, 2015
- 2) 宮島英樹ら: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,アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.15, pp.7-12, 2015.10
- 3) 樋口和朗ら:けい酸塩系表面含浸材施工後のビッカース硬度増分に関する一考察,第 71 回セメント技術大会講演要旨, Vol.71, pp.140-141, 2017.5
- 4) 近藤拓也ら: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) コンクリートライブラリー137: けい酸塩系表面含 浸工法の設計施工指針(案), 土木学会, 2012.7
- 6) 遠藤裕丈ら:ケイ酸塩系表面含浸材を施工したコンクリートのスケーリング抵抗性の基礎的評価,コンクリート工学年次論文集,Vol.29, No.1, pp.1203-1208, 2007.7
- 7) 大町正和ら:表面含浸材の違いがスケーリング抵抗性に及ぼす影響に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.31, No.1, pp.1141-1146, 2009.7
- 8) 迫井裕樹ら:劣化程度の異なるコンクリートへの含 浸材適用とその後の耐久性に関する研究,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.149-155, 2017.10