

令和元年6月25日現在

機関番号：56401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18133

研究課題名(和文) けい酸塩系表面含浸材の物質浸透阻止性を評価するための物理的指標に関する研究

研究課題名(英文) Mechanical index to evaluate the substance permeation inhibition property of silicate type surface penetrants

研究代表者

近藤 拓也 (KONDO, Takuya)

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

研究者番号：70758672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：けい酸塩系表面含浸工の劣化因子侵入阻止性を評価する手法の開発を目的として、けい酸塩系表面含浸材の反応部分の強度が増加することを利用して、ビッカース硬度試験を実施した。得られた硬度増分と改質深さの面積が劣化因子侵入阻止性になりうるか検討を行った。吸水試験による吸水阻止性や、塩分浸透試験による阻止性を評価した結果、けい酸塩系表面含浸材の劣化因子侵入阻止性として、本指標は適用できる可能性を示した。しかし、課題についても明確となったため、検討を行っていく必要性についても明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(成果の学術的意義) けい酸塩系表面含浸材の施工によるビッカース硬度分布を明らかとしたことは、今まで諸説あったけい酸塩系表面含浸材の浸透プロセスの解明に大きく寄与できたものと考えられる。また、本評価手法と各方法を組み合わせることにより、劣化因子侵入阻止性評価手法がさらに検討されることになると考えられる。

(成果の社会的意義) けい酸塩系表面含浸材の開発や適用検討について、一つの目標を提示することができたと考えられる。よって、適用時の費用負担の軽減や効率化を図ることが可能になったと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a method to evaluate the degradation factor penetration prevention property of silicate type surface penetrants, the Vickers hardness test was conducted by utilizing the increase in the strength of the reaction part of the silicate type surface penetrants. Then, it was examined whether the area of hardness increment and modification depth could be deterrent to deterioration factor penetration. Water absorption inhibition by the water absorption test and the inhibition by the salt penetration test were evaluated. As a result, this index has shown the possibility of being applicable as a deterioration factor penetration prevention property of the silicate type surface penetrants. However, as the issues were clarified, the need to consider was also clarified.

研究分野：維持管理工学

キーワード：けい酸塩系表面含浸工 ビッカース硬さ試験 劣化因子侵入阻止性 定量評価 Ca(OH)₂

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し、C-S-Hゲルを生成することでコンクリート表面を緻密化させる工法である。これにより、中性化、塩害、凍害などの低減に効果があるとされている。土木学会コンクリート委員会において、「けい酸塩系表面含浸材設計施工研究小委員会」が構成され、2012年には報告書が作成されるなど、けい酸塩系表面含浸工法の設計や施工、品質管理方法および性能評価に関する試験方法等がオーソライズされた。特に、性能評価に関する試験方法については、土木学会コンクリート標準示方書〔規準編〕において規定化され、一定の整理がされたところである。しかし、けい酸塩系表面含浸工法の物質侵入阻止性を物理的に評価する手段が構築されていないため、けい酸塩系表面含浸材の適用や材料開発が苦慮している現状もある。

近年になり、けい酸塩系表面含浸工法の含浸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検討された。本方法はFig.1に示すように、含浸層と非含浸層の硬度差を利用して含浸深さを特定するものである。申請者は、本試験で得られる含浸深さと増加する表面硬度に着目し、この2つに囲まれる面積がけい酸塩系表面含浸工法の効果を物理的に評価する指標になると考えた。

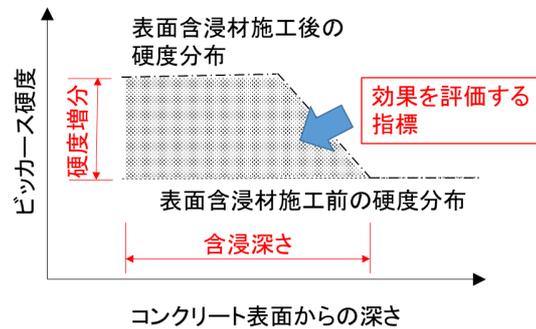


Fig.1 けい酸塩系表面含浸工法施工
前後のビッカース硬度分布の模式図

2. 研究の目的

けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタル供試体の物質侵入阻止効果を物理的に評価する指標として、Fig.1に示すビッカース硬さ試験の硬度増分と改質深さに囲まれた面積を用いる方法の確立を目的として、下記に示す項目を実施した。

(1) けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタルのビッカース硬さ分布

水セメント比や事前に中性化を促進させたモルタル供試体に、異なる量のけい酸塩系表面含浸材を施工した。その後、ビッカース硬さ試験を実施し、ビッカース硬さ分布の傾向について考察を行い、けい酸塩系表面含浸材の反応および浸透プロセスについて考察を行った。また、硬度増分と改質深さに囲まれる面積についてもその傾向について考察を行った。

(2) 各種けい酸塩系表面含浸工法供試体の劣化因子侵入阻止性の確認

(1)で作成したものと同じ供試体を用いて、塩水噴霧試験、吸水試験を行った。これより、けい酸塩系表面含浸工を実施したモルタルの劣化因子侵入阻止性について把握を行った。

(3) 劣化因子侵入阻止性と硬度増分-含浸深さ面積の相関

(1)で得られた硬度増分と改質深さの面積、そして、(2)で得られた劣化因子侵入阻止性との相関関係を把握した。これらの結果より、硬度増分-含浸深さ面積と劣化因子侵入阻止性との関連性について定量評価を行い、けい酸塩系表面含浸工法の劣化因子侵入阻止性の指標となりうるか整理を行った。

3. 研究の方法

研究については、上記を達成するため下記について実施した。

(1) けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタルのビッカース硬さ分布

けい酸塩系表面含浸材の使用量を一定とし、水セメント比の異なるモルタル、および事前に中性化したモルタルに対してけい酸塩系表面含浸材を施工した試験をシリーズ¹、けい酸塩系表面含浸材の使用量を変化させた試験をシリーズ²と呼ぶ。シリーズ¹については、試験要因を水セメント比とし、W/C=40%、55%、70%および70%に事前に中性化を行ったものの4種類とした。また、シリーズ²については、水セメント比および表面含浸材の使用量をパラメータとした。水セメント比はW/C=40%、55%、70%の3種類とした。また、使用量は0.2L/m²、0.4L/m²、そして0.8L/m²の3種類とした。また、いずれのシリーズにおいても、使用した表面含浸材はナトリウム系およびカリウム系（一部試験ではリチウム系を含む）とした。

ビッカース硬さ試験機によりビッカース硬さ試験を行った。なお測定にあたっては、切断の影響で測定面にひび割れないことを目視で確認した後に実施した。ビッカース硬さ試験は、JIS Z 2244に準拠して実施した。測定は試験力を0.09807N、試験力の保持時間を30秒とした。測定はモルタル表面から深さ最大15mm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した。なお、ばらつきについては±1Hvに収まる値を採用した。また、ビッカース硬さ試験機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。

(2) 各種けい酸塩系表面含浸工法供試体の劣化因子侵入阻止性の確認

(1)で作成したモルタル供試体を活用し、劣化因子侵入阻止性の検討を実施した。なお、試験は塩分浸透試験および吸水試験を行った。

塩分浸透試験は、けい酸塩系表面含浸材施工後 28 日間の養生を終えた後、質量濃度 3% の塩水噴霧槽に供試体を設置した。塩水噴霧期間 28 日および 84 日においてそれぞれ供試体を塩水噴霧槽から取り出した。その後、4mm 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、全塩化物イオン量を測定した。

吸水試験については、所定の養生期間終了後、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。

4. 研究成果

(1) けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタルのビッカース硬さ分布

シリーズにおいて、ビッカース硬さ試験により得られた深さ方向硬度分布から算定した、けい酸塩系表面含浸材施工による、硬度増分の分布を Fig.2 に示す。ここでビッカース硬さ増加量は、表面含浸材を施工した供試体のビッカース硬さから、同一供試体の非改質域におけるビッカース硬さの平均値を引いたものとした。

ビッカース硬さ増加量については、事前に中性化を行っていない供試体では、硬さ増加量と水セメント比の間に明確な相関関係を示さなかった。これは、水セメント比 70% 供試体と 40% 供試体の単位セメント量が、約 13% 程度の差であることに起因するものと考えられる。今回の試験結果において、表面含浸材を施工することによる硬さ増加量が約 20Hv であった。Ca(OH)₂ 量がセメント量に比例し、全てがけい酸塩系表面含浸材に反応すると仮定すれば、この 13% は約 3Hv の差となる。しかし、水セメント比による硬さの差は深さ 2mm 程度までにおいて、ナトリウム系で 3~5Hv 程度、カリウム系で 2~3Hv 程度であり、明確な硬さの差が表れていないと言える。

一方で、水セメント比 70% 供試体におけるビッカース硬さの増加量は、いずれの表面含浸材においても事前に中性化した供試体で減少する傾向を示した。本試験では Ca(OH)₂ 量の測定を行っていないが、促進中性化により相当の Ca(OH)₂ を消費しているため、硬さ増加量に明確な差が生じたものと考えられる。

また深さ方向については、中性化した供試体において、供試体のより深い位置で硬度差が生じる傾向を示した。これは、渡辺らが考察しているように、けい酸塩系表面含浸材により改質を行うことができる細孔径が限られていることが一因として挙げられる。そのため、同一量を施工した場合、中性化が生じていない供試体では、より表面に近い部分で表面含浸材とけい酸塩系表面含浸材が反応するため、このような傾向を示すものと考えられる。

シリーズにおいて、ビッカース硬さ試験により得られた改質深さ一覧を Fig.3、そして各水セメント比において、使用量 0.2L/m² による改質深さと、各施工回数により得られた改質深さの比を Fig.4 に示す。

使用量の増加とともに改質深さが増加する傾向が示された。しかし水セメント比 40% では、使用量 0.2L/m² と 0.8L/m² において、改質深さの比は約 1.5 倍程度、水セメント比 55% では 1.3~1.8 倍程度であった。これは、使用量が 4 倍に対して半分以下の数字であった。一方で、水セメント比 70% では 2.5 倍から 3.0 倍の数値を示しており、改質深さが増加する傾向を示した。

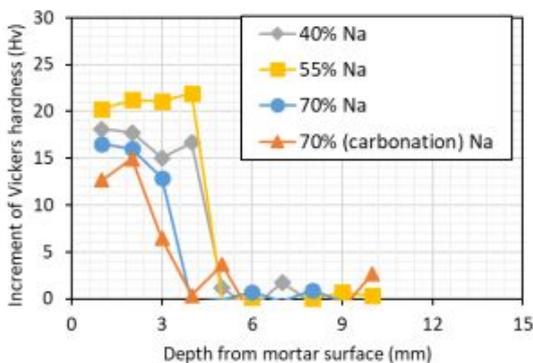


Fig.2 ビッカース硬度増分の分布 (ナトリウム系)

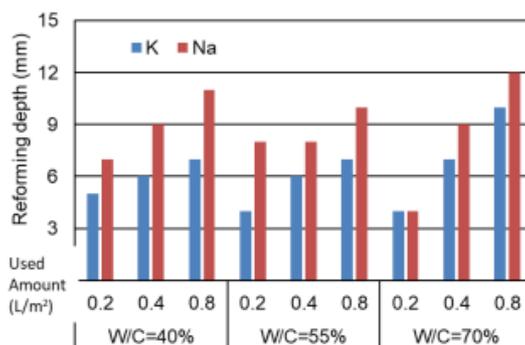


Fig.3 改質深さ

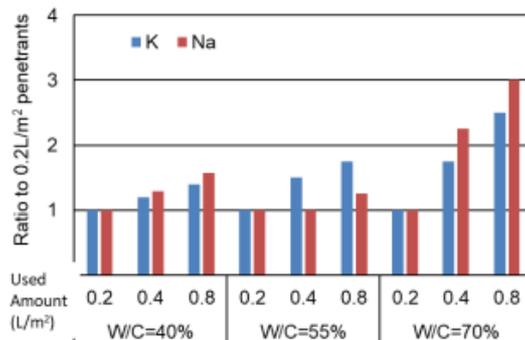


Fig.4 使用量0.2L/m²と比較した改質深さの比

一方で、水セメント比およびけい酸塩系表面含浸材の使用量の違いによる、ピッカース硬さの増加量には明確な差は確認できなかった。これは、今回の試験における水セメント比 40%と 70%において、単位セメント量の差が約 13%であるため、ピッカース硬さ試験による測定値に差が大きく表れなかったものと考えられる。また、シリーズ はけい酸塩系表面含浸材の使用量が一定であったが、硬さ増加量に差がみられなかった。もし、差が生じない原因の一因が、モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量と比較し、供給されるけい酸塩系表面含浸材量の不足であれば、供給量を増加させたシリーズ では、使用量の増加とともにピッカース硬さが増加傾向を示すと考えられる。しかし、今回の試験範囲については、そのような傾向は示されなかった。

(2) 各種けい酸塩系表面含浸工法供試体の劣化因子侵入阻止性の確認

ここでは、各種けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタルの劣化因子侵入阻止性について検討を行う。なお、検討についてはシリーズ のみについて行った。

塩水噴霧を行ったモルタルの塩化物イオン量の深さ方向分布を Fig.5 に示す。けい酸塩系表面含浸材を施工することによる劣化因子侵入阻止性を発揮していることが確認できる。また、けい酸塩系表面含浸材を施工したモルタルの吸水阻止性についても、塩化物イオン量と同じく、施工することによる効果を示した。

(3) 劣化因子侵入阻止性と硬度増分-含浸深さ面積の相関

(1) で得られた、けい酸塩系表面含浸材を施工することにより得られる硬度増分と、改質深さで囲まれた面積と、(2) で得られた劣化因子侵入阻止性の関係について検討を行った。

表面含浸材による劣化因子侵入阻止性の定量評価については、塩化物イオンの見かけの拡散係数を用いることにより実施した。ブランク供試体の見かけの拡散係数の算出は、JSCE-G572-2013 に基づき実施した。改質部分の見かけの拡散係数については、黒岩らが提案した、等価かぶりを考慮し改質部を表層モルタルとして増厚する方法により算定した。

ブランク供試体での見かけの拡散係数、および黒岩らの方法により算定した改質部分の見かけの拡散係数を Fig.6 に示す。いずれの W/C および表面含浸材を使用した場合においても、表面含浸材を施工した場合で見かけの拡散係数が低下した。また W/C=70%の供試体では、改質部分の見かけの拡散係数が、W/C=40%の供試体と比較して大きくなる傾向を示した。これは W/C=70%ではけい酸塩と反応するモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少ないため、塩化物イオンの侵入阻止性が W/C=40%と比べて小さくなったと考えられる。

Fig.6 で得られた各条件でのブランク供試体における見かけの拡散係数と、同一 W/C で施工した各表面含浸材施工による改質部分の見かけの拡散係数との比(以下「拡散係数比」と呼ぶ)を Fig.7 に示す。拡散係数比は式(1)で算定した。

$$\text{拡散係数比} = D_c/D_s \quad \text{式 (1)}$$

ここに D_c : ブランク供試体の見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_s : 改質部分の見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

いずれの表面含浸材を用いた場合においても、W/C=70%の方が W/C=40%と比較して、拡散係数比が小さく、塩化物イオンの浸透抑制性が小さいことが確認できる。これは、上述のように $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応量が小さいことに起因するものと考えられる。また、ピッカース硬度増分と改質深さで囲まれる面積と Fig.6 を比較すると、この面積が大きいほど、拡散係数比が大

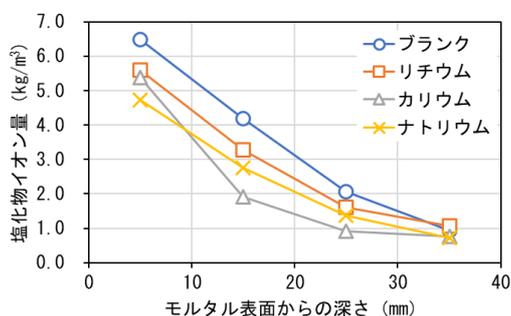


Fig.5 塩化物イオン量の分布 (W/C=70%)

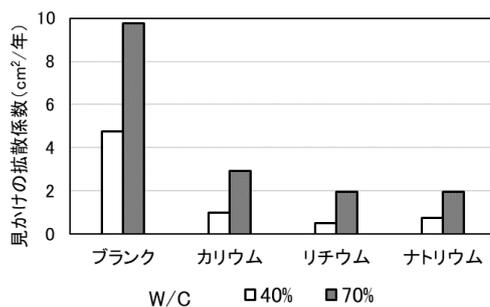


Fig.6 モルタル中の塩化物イオンの見かけの拡散係数

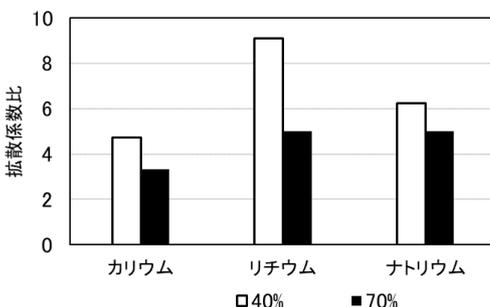


Fig.7 拡散係数比(ブランク供試体 / 各供試体)

きくなる傾向が示された。

ピッカース硬度試験で得られた劣化因子侵入抑止性を示すと考えられる指標（硬度増分×改質深さ）と、塩分促進試験により得られた、けい酸塩系表面含浸材施工有無による見かけの拡散係数比の関係を Fig.8 に示す。この図より、硬度増分と改質深さの面積の増加とともに、拡散係数比が増加することが確認され、硬度増分と改質深さの積が塩化物イオン侵入抑止を示す指標になる可能性を示した。また、今回検討を行った全データを用いた、硬度増分と改質深さの面積と拡散係数比の寄与率は 0.60(相関係数で 0.77) となり、今回検討を行った試験範囲においては、この 2 つの関係について相関性を示す結果となった。

Fig.8 の中で、硬度増分×改質深さの面積が 90Hv・mm 以下のもの (Fig.8 中、点線で囲まれていないデータ) について線形回帰を行った (Fig.9 中実線で表示)。この範囲における寄与率は 0.89 となり、本試験における全データでの線形回帰より、高い相関性を示した。そのため、硬度増分と改質深さの面積が 90Hv・mm 以上では、2 つの関係がばらつくということを示している。

前田らの検討事例では、W/C の低下とともに見かけの拡散係数の減少率が低下する式が提示されている。そのため、大きな改質効果を示した供試体では、ピッカース硬度の増加率と比較して、塩化物イオンの侵入抑止効果が得られにくい状態になっていると考えられる。そのため、硬度増分×改質深さの面積が 90Hv・mm を超える範囲では、2 つの相関性にばらつきが生じたものと考えられる。

続いて、ピッカース硬度増分×改質深さの面積と、吸水阻止性の関係について検討を行う。

吸水率比と指標面積との関係を Fig.9 に示す。吸水率比については、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示した。また、それぞれの相関係数も図中に示したが、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。

以上の結果より、今回の研究の目的であった、ピッカース硬度試験を行うことにより得られた硬度増分と改質深さで囲まれる面積が、けい酸塩系表面含浸工を実施することによる劣化因子侵入阻止性を定量的に表すことができる可能性を示した。

しかし、けい酸塩系表面含浸工の施工効果については、母材中の含水状況などにも大きく左右される可能性が考えられる。また、既設構造物では中性化が進行することにあるため、けい酸塩系表面含浸材による効果が得られにくいことを本検討で示すことができたが、このような構造物に対しては、カルシウム溶液を供給することにより、効果が得られる可能性がある。そのため、ピッカース硬度試験を行うことにより、けい酸塩系表面含浸工による劣化因子侵入阻止性を定量的に評価できる可能性があるため、さらに検討を行っていく必要があると考えられる。

【参考文献】

- ・ 渡辺晋吾ほか：けい酸塩系表面含浸材によるセメントペーストの微視的構造の変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1606-1611，2012.7
- ・ 宮島英樹ほか：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
- ・ 黒岩大地ほか：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
- ・ 前田聡ほか：コンクリート中への塩化物浸透過程に関する既往調査の整理と分析，コンクリ

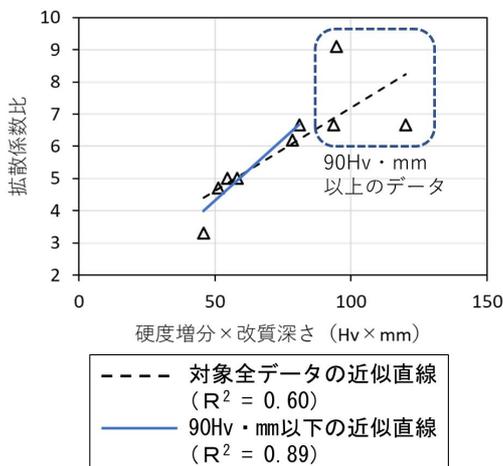


Fig.8 硬度増分×改質深さの面積と拡散係数比の関係

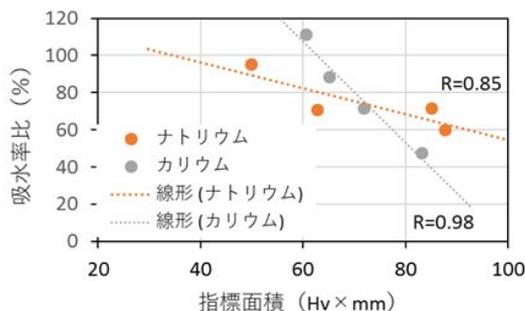


Fig.9 指標面積と吸水率比の関係

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

近藤拓也, 宮里心一, 西野英哉, 横井克則: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1587-1592, 2018.7

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阻止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

Takuya Kondo, Shinichi Miyazato, Katsunori Yokoi and Yuji Yamada : QUANTITATIVE EVALUATION ON CHLORIDE ION PENETRATION RESISTANCE INDEX OF SILICATE TYPE SURFACE PENETRANTS, 42nd Conference on Our World in Concrete & Structures, pp.247-253, 2017.8

近藤拓也, 樋口和朗, 宮里心一, 横井克則: けい酸塩系表面含浸材の Cl-侵入阻止を示す指標に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1645-1650, 2017.7

〔学会発表〕(計 2件)

高橋由菜, 近藤拓也, 横井克則, 門田悠伽, 小松桃子: 使用量がけい酸塩系表面含浸工のビッカース硬度分布に与える影響, 2019 年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, jsce7-048-2019, 2019.5

樋口和朗, 近藤拓也, 宮里心一, 横井克則: けい酸塩系表面含浸材施工後のビッカース硬度分布に関する一考察, 第 71 回セメント技術大会講演要旨, Vol.71, pp.140-141, 2017.5

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 宮里 心一

ローマ字氏名 : (MIYAZATO , shin-ichi)

研究協力者氏名: 横井 克則

ローマ字氏名 : (YOKOI , katsunori)

研究協力者氏名: 西野 英哉

ローマ字氏名 : (NISHINO , hideki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。