

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15626

研究課題名（和文）けい酸塩系表面含浸材の汎用的利用に向けた実験的検討

研究課題名（英文）Experimental study for versatile use of silicate-based surface penetrant

研究代表者

長谷川 雄基（Hasegawa, Yuki）

香川高等専門学校・建設環境工学科・講師

研究者番号：70797092

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）：本研究の成果として、普通セメント以外のセメント種および混和材を添加した場合のセメントを対象として、けい酸塩系表面含浸材の改質効果を明らかにした。具体的には、高炉セメントとフライアッシュセメントともに、含浸材の改質効果は得られるものの、普通セメントと比較すると改質効果は小さくなることが確認できた。水路コンクリートにおける主要な劣化である溶脱と摩耗の複合劣化に対する含浸材の改質効果についても検証を行い、溶脱によるカルシウムの消失が進んでいても、含浸材の改質効果は発揮されることが確認できた。しかしながら、溶脱層における含浸材の改質メカニズムについては、今後、詳細に分析していく必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農業水利施設に対する表面含浸工法の適用性については、近年、データ蓄積が進んでいるところである。本研究成果は、今後、けい酸塩系表面含浸材の水路コンクリートへの適用を検討するにあたって、実務上、有益な情報である。加えて、高炉セメントやフライアッシュセメントにおける含浸材の改質効果については、既往研究等では十分な成果が蓄積されているとはいえず、本研究成果は、広くコンクリート工学の分野において、意義深いデータを蓄積できたといえる。

研究成果の概要（英文）：As a result of this study, the modification effect of silicate-based surface penetrant was clarified for cement types other than ordinary cement and cement with admixtures. Specifically, it was confirmed that modification effect of the penetrant material was shown for both blast-furnace cement and fly ash cement, but the modification effect was smaller than that for ordinary cement. The modification effect of the penetrant material on the combined deterioration of Calcium leaching and abrasion, which is the major deterioration of canal concrete, was also verified, and it was confirmed that the modification effect of the penetrant material could be demonstrated even when calcium loss due to leaching was advanced. However, the modification mechanism of the penetrant material in the leaching layer needs to be analyzed in detail in the future.

研究分野：農業農村工学，材料施工

キーワード：表面含浸材 表面含浸工法 改質 ビッカース硬さ フライアッシュ 高炉スラグ 溶脱 摩耗

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

表面含浸工法は、図-1 に示す通り、農業用水路の補修工法において表面処理工法の一つに位置づけられる。同工法は、液体材料である表面含浸材をコンクリートの表面に塗布することで、含浸材の種類や特性に応じて、水分・各種劣化因子の侵入抑制やアルカリ性の付与などの改質効果を発揮するものである。表面含浸工法は、橋梁などの土木コンクリート構造物の表面保護工法や屋上防水などにおいて多数の施工実績を有しており、コンクリート水路の補修工法としての適用性についても、基礎研究や実施工の事例が蓄積されているところである。

表面含浸工法に適用される表面含浸材は、主成分によりシラン系、けい酸塩系（けい酸リチウム系・けい酸ナトリウム系）、その他、の三種類に分類される。このうち、けい酸塩系表面含浸材は、含浸材の乾燥固化物や水酸化カルシウムとの反応生成物がコンクリートの微細空隙を充填することで、コンクリート表層が緻密化する材料である。これにより、コンクリートの水密性や耐久性などの性能が向上する。けい酸塩系表面含浸材は無機系材料であり、塗布後のコンクリートには水層などの特殊な被膜を形成するものではないことから、表面含浸材のなかでも農業用水路の補修に適用性が高く、予防保全・事後保全として以下の①～③の利用用途が想定できる。

- ① コンクリート水路・無機系表面被覆材の表面保護材
- ② コンクリート水路・無機系表面被覆材に生じた微細ひび割れの補修材
- ③ 断面修復工法や表面被覆工法における下地処理・強化材

先述の通り、けい酸塩系表面含浸材の水路補修への適用性については、種々のデータが蓄積されているところであるが、それらの成果は主に普通ポルトランドセメント（以下、PC）を使用したコンクリートに対するものである。一方、実務的には、環境条件や構造物寸法による制約、あるいは施工性や耐久性の向上、さらには環境配慮などの観点から、中庸熱 PC や早強 PC ならびに高炉セメントやフライアッシュセメント等の混合セメントが選択されるケースもある。近年の建設業における生産性向上や環境配慮・持続可能性に対する意識向上を踏まえると、今後、特に混合セメントが採用されるケースは増加していくものと予想される。加えて、農業用水路の補修に使用される無機系表面被覆材（以下、PCM）は、ベースは普通 PC であっても、ポリマーや繊維補強材が添加されているのが一般的である。

上記に鑑みると、当然のことではあるが、普通 PC 以外のセメントを使用したコンクリートや補修材に対してけい酸塩系表面含浸材を塗布した場合であっても、含浸材の改質効果が適切に発揮されるのかを確認しておく必要がある。例えば、図-2 は、申請者らのこれまでの研究で、市販の様々な PCM とけい酸塩系表面含浸材とを組合せて表層透気係数を測定した結果であるが、使用する製品ごとに表層透気係数には大きく差異があり、なかには含浸材無塗布の場合よりも表層透気係数が大きくなる、すなわち緻密性が劣ってしまうものも確認された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、普通 PC 以外のセメントを使用したコンクリートや補修材に対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果の検証を通して、同材料の汎用的な適用可能性を示すことである。本研究目的を達成するために、主成分が異なる複数のけい酸塩系表面含浸材、普通 PC 以外の混合セメントや中庸熱 PC 等、添加ポリマーの種類や繊維混入の有無等が

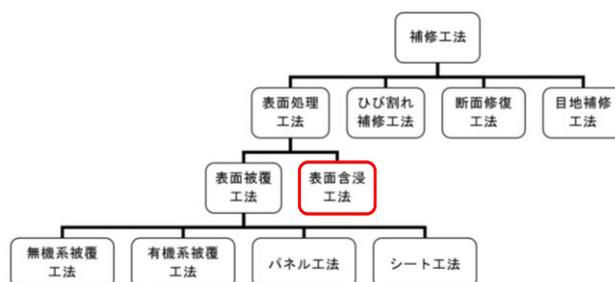


図-1 補修工法における表面含浸工法の位置づけ

引用：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)

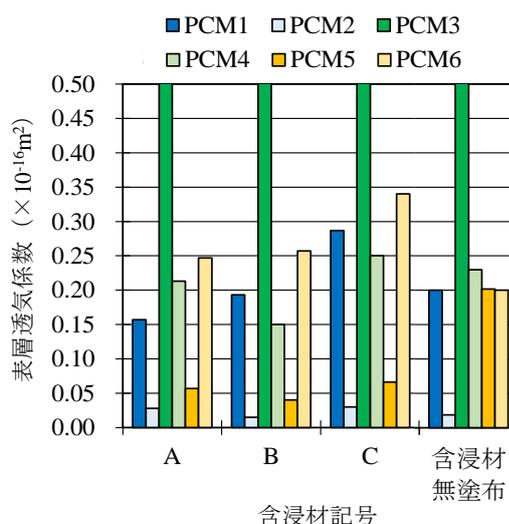


図-2 けい酸塩系表面含浸材を塗布したPCMの表層透気試験結果

異なる複数の PCM をそれぞれ準備して室内実験を実施する。

本研究の学術的独自性は、普通 PC 以外のセメントのなかでも、特に PCM に対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果に着目している点である。なぜなら、PCM に対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果およびそれに伴う改質メカニズムを解明することができれば、PCM とけい酸塩系表面含浸材を併用した、農業用水路の新たな長寿命型補修工法を提示できるためである。先述のマニュアル（図-1）では、補修工法の効果が発揮される期間を 20 年と想定して工法の要求性能などを規定しているが、将来的に、補修工法においても更なる長寿命化が求められる時代が来ると考える。PCM とけい酸塩系表面含浸材の併用工法は、従来の無機系表面被覆工法と比較して、含浸材の塗布という比較的簡易な施工を加えるのみで、長寿命化が実現できる補修工法となる可能性を秘めている。本工法を確立することができれば、学術的な面のみならず、広く今後の社会的要求にも対応できる可能性を秘めており、この点が、既往研究等にはない本研究の独自性と創造性である。

3. 研究の方法

本研究では、以下の二つを大きな柱として、実験を進める。

- ① 中庸熱 PC や早強 PC および混合セメントに対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果の検証
- ② PCM に対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果の検証

①では、PC のなかでも実務上使用されることが多い中庸熱 PC と早強 PC ならびに混合セメントであるフライアッシュセメントと高炉セメントを対象として各種実験を進める。②では、以下のように添加ポリマーの種類や繊維混入の有無を調整した PCM を使用して実験を進める。

PCM の実験水準

- ・ポリマー種類：アクリル系，SBR 系，酢酸ビニル系【3 水準】
- ・ポリマーセメント比 (P/C)：0，5，10%【3 水準】
- ・繊維種類：アラミド系，ビニロン系【2 水準】
- ・繊維の体積混入率：0，0.5，1.0%【3 水準】

けい酸塩系表面含浸材は、主成分がナトリウム単独，リチウム単独，両者の複合，の 3 種類を用意する。けい酸塩系表面含浸材の改質効果の評価では、実際に各種の要求性能を確認可能な試験を通した検証が必要である。本研究では、[I] 表層部の緻密性評価（表層透気試験，加圧透水性試験），[II] 耐久性評価（農業用水路で普遍的に生じる中性化と摩耗に対する抵抗性試験）を通じて、改質効果を評価する。これらに先立ち、反応性確認試験（JSCE-K 572-2012）を実施し、含浸材と各セメント種との反応性の有無や反応速度を確認する。

4. 研究成果

本研究開始当初の研究の目的や方法については、先述の 2 章および 3 章に記載した通りである。一方、本研究期間において、COVID-19 による移動制限等が生じたことにより、材料の調達や実験の実施など、大きな制約を受けてしまった。これにより、当初計画を一部変更し、研究を遂行した。具体的には、中庸熱 PC や早強 PC および混合セメントに対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果の検証、含浸材の改質効果の評価方法の詳細検討、水路コンクリートの普遍的な劣化である摩耗・溶脱が生じた際の含浸材の改質効果の評価、という三点について、重点的な検討を行った。

(1) 種々のセメントにおける反応性確認

普通 PC，早強 PC，高炉 C を用いて作製したセメントペーストを対象に、JSCE-K 572 に準拠して反応性確認試験を実施した。結果は図-3 に示すとおりである。なお、14 日目以降は大きな状態変化は確認されなかった。

すべての試験体で全体的に白濁が確認されたため、含浸材との反応性を有すると言える。しかし、白濁が確認されるまでの反応速度はセメント種類ごとに異なり、普通 PC と早強 PC がほぼ同時に 2 日目で白濁が確認され、その 2 日後に高炉 C の白濁が確認された。普通 PC と早強 PC で同時に白濁が確認された理由として、使用したセメントペーストの材齢が試験開始時点で 8 日経過しており、含浸材との反応に必要な水酸化カルシウム量がほとんど同じになっていたためと考えられる。一方、高炉 C の潜在水硬性による反応は、他の二種類と比較して反応速度が遅いことから、白濁反応までの日数

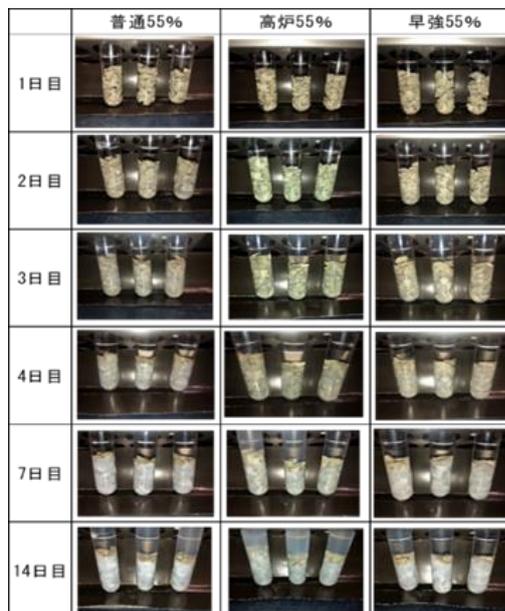


図-3 種々のセメントの反応性確認試験の状況

が長かったと考えられた。

(2) ビッカース硬さ試験による混合セメントにおける改質効果の確認

微小硬さ試験機を用いて、モルタル供試体断面のビッカース硬さを測定した。試験条件は表-1のとおりである。測定においては、まず含浸材塗布面から深さ方向に 20mm 以上となる位置で測定した値を非改質層のビッカース硬さと判断した。次に、含浸材塗布面から深さ方向に 1.0mm 間隔ごとに順次測定を行い、非改質層と同等のビッカース硬さが確認された位置で測定終了した。試験力は 4.903N、保持時間は 15 秒とし、各測定深さにつき 15 点測定を行い、その平均値で評価を行った。

普通 PC、高炉 C、フライアッシュ C のビッカース硬さの測定結果を図-4 に示す（フライアッシュ C については、一例として、フライアッシュの置換率が 10% の結果のみを示す）。まず、普通 PC と比較して、高炉 C のビッカース硬さは全体的に小さく、非改質層のビッカース硬さに対する改質層のビッカース硬さの増加量も小さい。加えて、最大でも 4mm の測定深さで非改質層と同等のビッカース硬さとなることが確認された。したがって、高炉 C は普通 PC に比べて含浸材の改質効果は小さいと考えられた。また、気中養生の高炉 C については、改質効果が得られていないと判断した。これらの原因としては、高炉スラグのセメント置換により、含浸材と反応するための $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在量が相対的に少ないため反応速度が遅くなり、明確な改質効果が表れにくかったためと推察された。

次に、フライアッシュ C については、いずれの置換率・養生条件においても、普通 PC と比較してビッカース硬さは小さく、非改質層のビッカース硬さに対する改質層のビッカース硬さの増加量も小さくなった。置換率の違いに着目すると、置換率が小さい方が、全体的にビッカース硬さやその増加量は大きく、同一養生・材齢条件の場合、改質深さはそれぞれ 1mm 程度大きくなることが確認できた。これは、先述の高炉 C の場合と同様にセメント置換による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の差異とフライアッシュのポズラン反応の影響が考えられた。フライアッシュの硬化反応であるポズラン反応では、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されるため、普通 PC と比較して内部の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在量が材齢の経過とともに少なくなるため、含浸材の改質効果が発揮されにくくなったと推察された。

表-1 供試体の条件

セメント種類	略称	28日			56日			84日			備考
		打設	塗布	Hv試験	打設	塗布	Hv試験	打設	塗布	Hv試験	
N	N-SS, N-SA	打設	塗布	Hv試験							記号 F10: F置換率10%
	N-LS, N-LA	打設	塗布	Hv試験							
B	B-SS,B-SA	打設	塗布	Hv試験							F30: F置換率30% SS: 水中28日養生 SA: 気中28日養生
	B-LS,B-LA	打設	塗布	Hv試験							
F10	F10-SS,F10-SA	打設	塗布	Hv試験							LS: 水中56日養生 LA: 気中56日養生
	F10-LS,F10-LA	打設	塗布	Hv試験							
F30	F30-SS,F30-SA	打設	塗布	Hv試験							
	F30-LS,F30-LA	打設	塗布	Hv試験							

■: 水中養生および、気中養生 □: 含浸材塗布、散水、気中養生

※セメント種の N は普通 PC, B は高炉 C, F はフライアッシュ C を指す

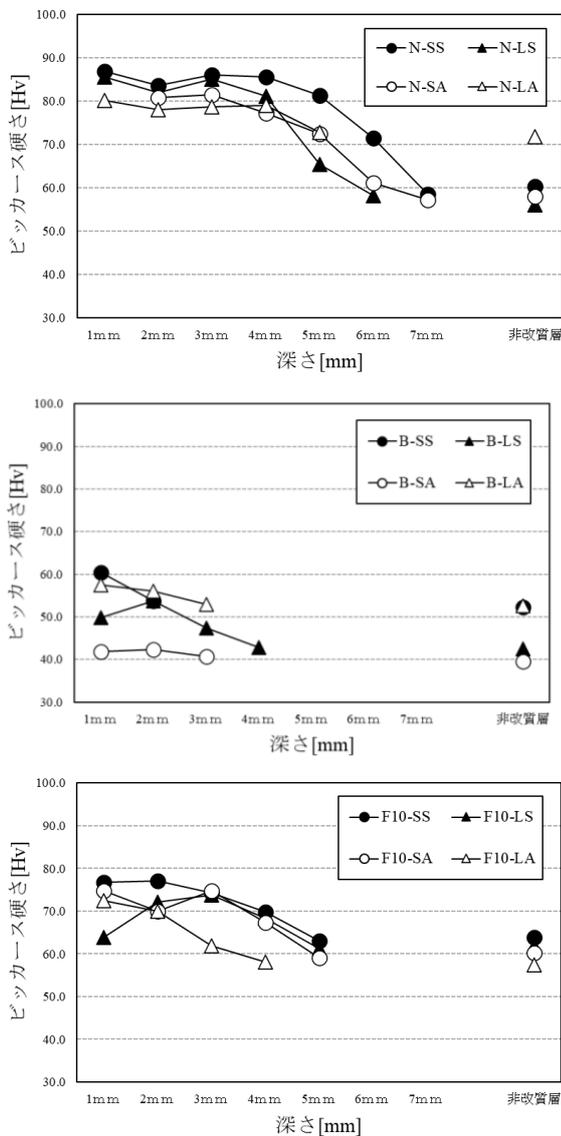


図-4 ビッカース硬さ試験の結果

(3) 溶脱が生じたモルタルにおける含浸材塗布による摩耗抵抗性の向上効果の評価

水路コンクリートの普遍的な劣化である摩耗・溶脱が生じた際の含浸材の改質効果の評価を行うことを目的とし、溶脱を促進させた供試体において含浸材を塗布し、摩耗抵抗性を評価した。

具体的には、促進溶脱供試体、無溶脱供試体に含浸材を塗布した供試体、溶脱後に含浸材を塗布した供試体、という3条件の促進摩耗試験の結果を比較し、溶脱後における含浸材の改質効果について考察した。促進溶脱は電気泳動による方法を採用し、摩耗抵抗性の評価には、サンドブラスト法を用いた。結果を図-5に示す。

結果として、いずれのW/Cにおいても実験条件ごとの摩耗量の差異は同様の傾向を示した。具体的には、溶脱供試体の摩耗量が最も大きく、無溶脱供試体に含浸材を塗布した供試体が最小となり、その間に溶脱後に含浸材を塗布した供試体となった。この結果に鑑みると、促進溶脱試験を経てCa溶脱が生じたモルタルにおいても、含浸材による改質効果は発揮されると言える。しかしながら、結果を比較すると分かるように、溶脱後に含浸材を塗布した場合に期待できる改質効果は、無溶脱のモルタルに含浸材を塗布する場合に期待できる改質効果よりも劣ることが確認できた。

ここで、溶脱したペーストを含浸材に浸漬させて生成物の発生の有無を確認した結果を図-6に示す。W/C=40%の溶脱ペーストのみ生成物の発生が確認できた。これにより、溶脱後の改質効果についてはW/C=40%の条件については明らかとなったが、W/C=50%、60%については引き続き検証が必要といえる。

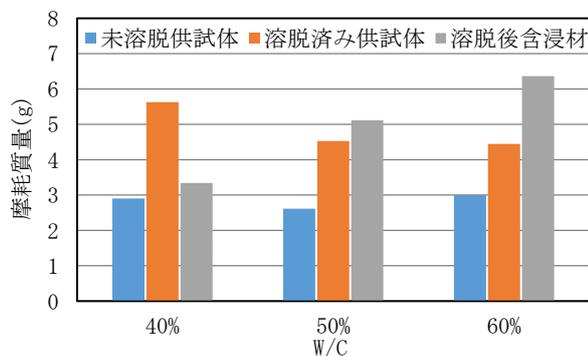


図-5 各条件におけるサンドブラスト法の結果



図-6 溶脱したペーストの反応性確認の状況

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 長谷川雄基, 大浦美雨, 喜多あおい, 松本将之, 林和彦	4. 巻 20
2. 論文標題 表層引張強度試験によるけい酸塩系表面含浸材の改質効果の確認手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 441-446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 長谷川雄基, 佐藤周之, 上野和広, 長束勇	4. 巻 88
2. 論文標題 水砂噴流摩耗試験の代替試験としてのサンドブラスト法の適用性に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 11_29-11_34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 二神啓, 近藤拓也, 黒岩大地, 長谷川雄基, 横井克則	4. 巻 21
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸材を施工した高炉スラグ微粉末混入モルタルの物性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 313-318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 敷地泰成, 長谷川雄基, 松本将之, 林和彦	4. 巻 45
2. 論文標題 摩耗と溶脱が進行した水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸材の適用性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1522-1527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 敷地泰成, 荻田綾花, 長谷川雄基, 林和彦, 松本将之
2. 発表標題 セメント種類がけい酸塩系表面含浸材の改質効果に及ぼす影響の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会四国支部第28回技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 敷地泰成, 高石地晴, 長谷川雄基, 松本将之, 林和彦
2. 発表標題 摩耗と溶脱が進行する水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸工法の適用性
3. 学会等名 2022年度（第71回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川雄基
2. 発表標題 水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸材の適用
3. 学会等名 2021年度（第70回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻田綾花, 長谷川雄基, 林和彦
2. 発表標題 けい酸塩系表面含浸工法における改質効果と改質深さの評価方法に関する検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会四国支部第27回技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川雄基, 大浦美雨, 周藤将司, 松本将之, 林和彦
2. 発表標題 けい酸塩系表面含浸材の改質評価における超音波法の適用性に関する基礎検討
3. 学会等名 第69回農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高石地晴, 大島弘道, 長谷川雄基, 松本将之, 林和彦
2. 発表標題 簡易サンドブラスト機を用いた促進摩耗試験の検討
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻田綾花, 長谷川雄基, 松本将之, 林和彦
2. 発表標題 セメント種類がけい酸塩系表面含浸材の改質効果に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 敷地泰成, 長谷川雄基, 林和彦
2. 発表標題 水路コンクリートの溶脱部における物性の評価方法の検討
3. 学会等名 令和5年度土木学会四国支部第29回技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 敷地泰成, 長谷川雄基, 松本将之, 林和彦
2. 発表標題 摩耗および溶脱とコンクリートの深さ方向の物性の関係
3. 学会等名 2023年度(第72回)農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 敷地泰成, 長谷川雄基, 林和彦
2. 発表標題 カルシウム溶脱の生じた水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸材の適用性に関するこれまでの研究成果と今後の展望
3. 学会等名 第78回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻井洋都, 平井陸, 長谷川雄基, 林和彦
2. 発表標題 けい酸塩系表面含浸材の改質評価への適用に向けた超音波法の特性把握
3. 学会等名 第78回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------