

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：56401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04564

研究課題名（和文）けい酸塩系表面含浸工法の改質効果と劣化因子侵入阻止性に関する定量的評価

研究課題名（英文）Quantitative evaluation on the reforming effect of the silicate-based surface penetrants and the ability to prevent the invasion of deterioration factors

研究代表者

近藤 拓也（Takuya, Kondo）

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：けい酸塩系表面含浸工の改質効果の定量的評価方法として申請者らが提案しているビッカース硬さ試験法を用いて、けい酸塩系表面含浸工の改質効果に与える各種要因について検討を行った。その結果、けい酸塩系表面含浸工の施工効果として、「ビッカース硬さ増加量」に影響を与えるもの、そして「改質深さ」に影響を与えるものについて整理を行うことができた。また、これを利用して、Cl-浸透阻止性の定量評価方法についても提案を行った。その結果、ビッカース硬さ方法を用いて、けい酸塩系表面含浸材の改質効果、そしてCl-浸透阻止性について定量評価を行える可能性について示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会基盤を構成する土木構造物は、少子高齢化や緊縮財政状況を踏まえ、より効果的かつ省行程による維持管理方法が強く要請される。そのため、補修材料の効果や適用条件の整理を行うことは非常に重要となる。今回申請者らが実施した研究は、けい酸塩系表面含浸工の施工効果に与える影響について、基礎的かつ公平な成果を提供できたものと考えられる。また、Cl-浸透阻止の定量評価も行うことができ、社会に対して非常に有益なデータを公表できたものと考えられる。今後データを積み増すことで、実場面での維持管理計画について大きな役割を果たすことができると考えられる。

研究成果の概要（英文）：As a method for quantitatively evaluating the reforming effect of the silicate-based surface penetrants, the Vickers hardness test method proposed by the applicants was used to examine various factors affecting the reforming effect. As a result, as the reforming effect of the silicate-based surface penetrants, it was possible to sort out those that affect the "Vickers hardness increase amount" and those that affect the "reforming depth". In addition, using this, we also proposed a quantitative evaluation method for Cl- penetration inhibition. As a result, it was shown that the Vickers hardness method could be used to quantitatively evaluate the reforming effect of the silicate-based surface penetrants and the Cl- penetration inhibitory property.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：けい酸塩系表面含浸工 改質効果 ビッカース硬さ試験 Cl-浸透阻止性 定量評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 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、コンクリート中の劣化因子侵入を阻止するために、コンクリート中に含浸材を含浸させる工法である。コンクリート表面の外観を変えないこと、そして工事費が低減されることから、構造物の維持管理上有利になる点が多いため、更なる利用拡大が期待される工法である。

表面含浸工法は、シラン系表面含浸工法とけい酸塩系表面含浸工法に大別される。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メカニズムを持つといわれている。

けい酸塩系表面含浸工法については、これまでに2012年に土木学会コンクリート委員会において指針案が作成され、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。しかし、けい酸塩系表面含浸工法の施工効果や劣化因子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課題もある。

そのため申請者らは、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利用されているピッカース硬さ試験による方法を用いて、劣化因子侵入阻止性の指標作成に関する検討を行ってきた。ここで指標とは、図1に示すように、C-S-H ゲルが生成されることによる含浸層と非含浸層の硬さ差と、改質深さに囲まれる面積（以下「指標面積」）のことを示す。これまでの一連の検討において、本方法の適用性については一定の結果を得ることができている。

しかし、けい酸塩系表面含浸工の効果に与える影響因子は多種存在するが、これらの影響を統一的に評価した事例は、申請者の調査範囲では皆無に近いため、けい酸塩系表面含浸工の改質効果や劣化因子侵入阻止性に関する統一的な評価は行っていない現状がある。

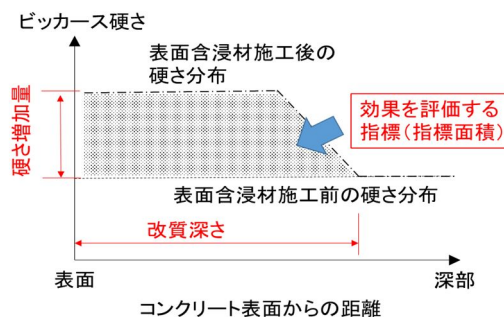


図1 表面含浸材施工前後のピッカース硬さ分布の概念図

2. 研究の目的

そのため本申請では、けい酸塩系表面含浸材の改質効果（硬さ増加量、および改質深さ）に与える要因を定量評価することを目的として、要因を変更させた供試体を作製し、ピッカース硬さ試験を実施した。また、ピッカース硬さ試験から得られた、けい酸塩系表面含浸工による指標面積を算定し、Cl浸透試験から得られたCl濃度分布との相関を算出し、劣化因子侵入阻止性の定量評価についても試みることにした。

3. 研究の方法

試験は大きく分けて下記の2つに大別する。

ピッカース硬さ試験を用いた改質効果の定量評価

けい酸塩系表面含浸工による劣化因子侵入阻止性の定量評価

3-1 ピッカース硬さ試験を用いた改質効果の定量評価

試験要因を表1に示す。母材モルタルのW/C=55%、表面含浸材の使用量 0.4L/m²、表面含浸材の主成分をナトリウム系、表面含浸材のモル比=3.2、そして表面含浸材施工時の表面含水率 7%を基準供試体とし、各試験ケースにおいて要因数を設定した。

基盤材料はモルタルとした。モルタル供試体は40mm×40mm×160mm角柱供試体とした。モルタル配合はセメントと細骨材を質量比で1:3の割合とした。空気量は4.5±1.5%になるように調整した。

モルタル打ち込み後1日で脱型し、材齢7日まで20、60%R.H.の室内環境下で水中養生を行った。その後供試体を取り出し、打込み面を含む5面にエポキシ樹脂被覆を行った。室内環境下で供試体を材齢21日から27日まで存置した。その後、供試体を水中条件に1日間存置し、所定の表面含水率になるまで水分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室内環境下に存置し

表1 試験ケース

試験パラメータ	水準
W/C	40%、55%、70%
使用量	0.2L/m ² 、0.4L/m ² 、0.8L/m ²
主成分の種類	けい酸ナトリウム系 けい酸カリウム系
モル比	2.1、2.5、3.2
施工時表面含水率	5%、7%、9%

た。材齢 28 日で所定量の表面含浸材を施工した。表面含浸材は 1 回あたり $0.20/m^2$ 施工し、1 時間散水養生を行いながら、所定の施工量になるまで繰り返し実施した。その後、さらに 28 日間室内環境下に供試体を存置した。

ビッカース硬さに使用する供試体は、厚さ 20mm 程度に切断し、切断面を測定に供した。硬さ測定は JIS Z 2244 に準拠して実施した。測定はモルタル表面から、図 1 に示す非改質域と硬さが低減する位置まで、1mm 間隔で実施した。1 測定深さにつきビッカース硬さが $\pm 1Hv$ 以内となる 5 個のデータを採用し、その平均値で評価を行った。なお打撃にあたっては、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測定箇所の選定を行った。

3 - 2 ビッカース硬さ試験を用いた改質効果の定量評価

本項での試験パラメータは表 1 に示すうち、W/C および使用量とした。使用した表面含浸材はけい酸ナトリウムを主成分とするもの、表面含浸材のモル比は 3.2、表面含浸材施工時の表面含水率は 7%とした。

劣化因子は Cl^- とし、塩水噴霧試験を実施した。塩水噴霧試験については、所定の期間養生を終えた後、質量濃度 3%の塩水噴霧槽に供試体を設置した。促進試験期間は 56 日間とした。

4 . 研究成果

4 - 1 ビッカース硬さ試験を用いた改質効果の定量評価

けい酸塩系表面含浸工によるビッカース硬さ試験結果の一例を図 2 および図 3 に示す。ここで図 2 は主成分の違いの比較、図 3 は施工時表面含浸材の違いを比較した。

図 2 において、ビッカース硬さについては明確な差は確認できなかった。しかし、改質深さについては差が生じている。けい酸カリウム系では、けい酸ナトリウム系と比較して改質深さが小さくなる傾向を示した。これは、主成分であるカリウムとナトリウムの反応速度によるものと考えられる。反応速度の速いカリウム系では反応が早期に生じたため、改質深さが小さくなったものと考えられる。

図 3 より、施工時の表面含水率では明確な差が生じた。ビッカース硬さについては、表面含水率 9%で最も大きくなる傾向を示し、5%および 7%では差は明確な差は確認できなかった。これは、含水率の増加により、セメントペースト中の $Ca(OH)_2$ が溶出しやすくなったことが考えられる。また、改質深さについても表面含水率 9%で最も大きくなり、表面含水率の低下とともに改質深さが低下する傾向が得られた。これはモルタル中の水分が多いことで、モルタル中に含浸したけい酸塩系表面含浸材が希釈され、粘性が低下したためと考えられる。染谷らの論文で示されているように、表面含浸材の粘性が低下すると含浸深さが増加しやすくなる¹⁾。そのため、今回の結果の一因は、けい酸塩系表面含浸材の粘性が大きく関わっていると考えられる。

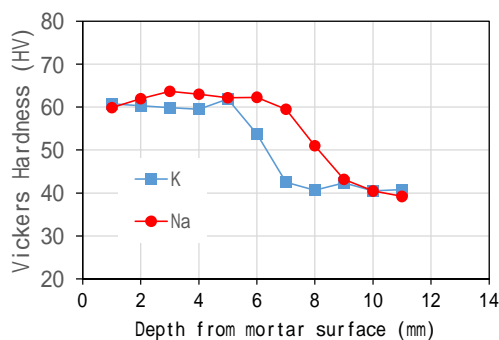


図 2 ビッカース硬さ分布
(主成分の種類による比較)

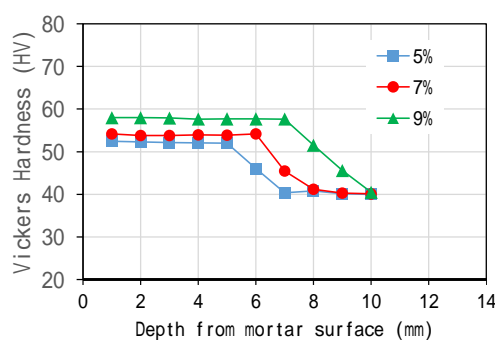


図 3 ビッカース硬さ分布
(施工時表面含水率による比較)

これら一連の結果より、けい酸塩系表面含浸材によるビッカース硬さ増加量について比較したものを図 4、改質深さについて比較したものを図 5 に示す。ここでは、W/C=55%、表面含浸材使用量 $0.4L/m^2$ 、けい酸ナトリウム系を主成分とするもの、モル比 2.5、そして施工時表面含水率 7%を基準として、比較を行った。

ビッカース硬さ増加量において、要因内で明確な差が生じているのは、W/C、モル比、そして施工時表面含水率である。W/Cについては、W/C=40%と 70%で硬さ増加比 0.26 の差が生じた。モルタル中の $Ca(OH)_2$ はセメント量に比例すると考えられるため、硬さ増加比は W/C との関連性があるものと考えられる。モル比については、2.1 と 3.2 で 0.31 の差が生じた。ただし、これについては、モル比と硬さ増加量に明確な相関は確認できない。これは、大嶋らの論文で示されるように、モル比 2.5 付近では、表面含浸材の粘度と反応性が相反する挙動を示す可能性があるためである²⁾。施工時表面含水率については、表面含水率 5%と 9%で 0.38 の差が生じた。これは、モルタル中の水分の増加とともにモルタル中の $Ca(OH)_2$ が溶出し、けい酸塩系表面含浸材との反応性が高まったためと考えられる。一方で、表面含浸材使用量、そして表面含浸材の主成分

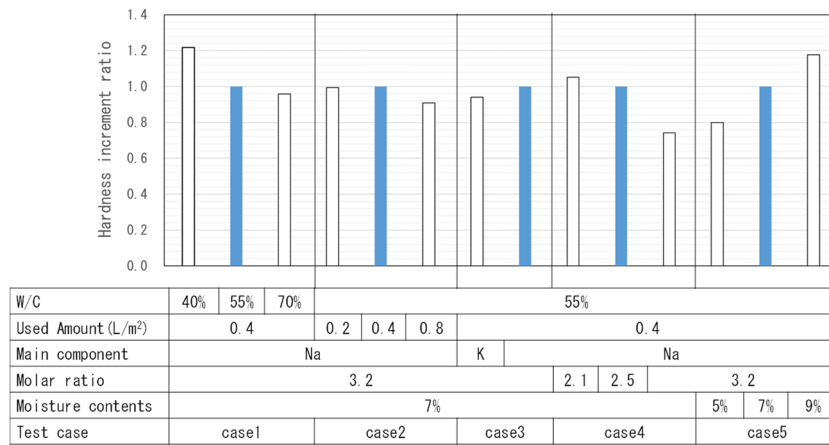


図4 ビッカース硬さ増加量の比較

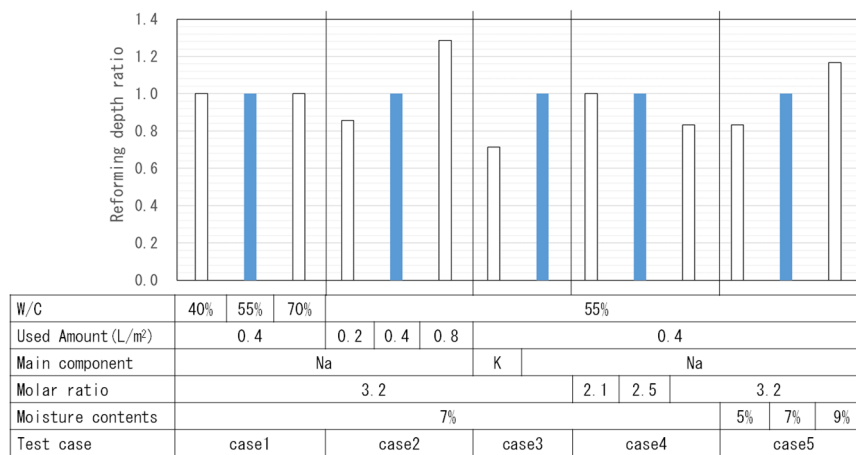


図5 改質深さの比較

については、明確な差を確認できなかった。

改質深さにおいて、要因内で明確な差が生じたのは、表面含浸材使用量、表面含浸材の主成分、そして母材モルタルの含水率である。使用量については、増加とともにモルタル内部に表面含浸材が浸透するためと考えられる。また表面含浸材の主成分については、ナトリウム系の反応速度がカリウム系と比較して遅いため、よりモルタル内部に浸透したと考えられる。母材モルタルの含水率が変化すると、モルタル内に浸透するけい酸塩系表面含浸材の粘性が低下すると考えられる。一方で、母材モルタルのW/Cでは、改質深さ比に変化は確認できなかった。またモル比については、3 - 2で改質深さ比が低下する傾向を示した。これは表面含浸材の粘性が原因と考えられる。今回、表面含浸材の粘性を測定していないが、粘性と改質深さ比の関係を整理すると、一定の関係が得られるものと考えられるため、今後の検討を要する。

4 - 2 ビッカース硬さ試験を用いた改質効果の定量評価

塩水噴霧試験で得られたCl⁻濃度分布から、改質部分のみかけの拡散係数を算出した。算定方法は、黒岩らが提案した等価かぶりの概念³⁾に基づく算定法とした。

改質部分と未改質部分のみかけの拡散係数比を図6に示す。いずれの表面含浸材使用量においても、W/C=55%の拡散係数比が大きくなる傾向を示した。これは、けい酸塩系表面含浸工による改質細孔径の範囲が限られているため、総細孔容積に占める空隙充填割合が大きくなるW/C=55%で、拡散係数比が増加したものと考えられる。

ここで、4 - 1で得られた指標面積と、拡散係数比の関係を図7に示す。いずれの水セメント比においても、面積比の増加とともに拡散係数比が増加する傾向が得られた。また水セメントにより、回帰直線の傾きに差が確認できる。W/C=70%よりW/C=55%において、けい酸塩系表面含浸材の使用量増加により、拡散係数比が増加する傾向を示した。これは上述のように、けい酸塩系表面含浸材が効果を発揮する細孔径の範囲は限られているため、相対的な細孔総容積割合がこの結果に反映されたものと考えられる。

これらのことより、けい酸塩系表面含浸工の改質効果や改質深さに与える影響について定量評価を行うことができた。また、Cl⁻を対象として、改質部分の劣化因子侵入阻止効果について

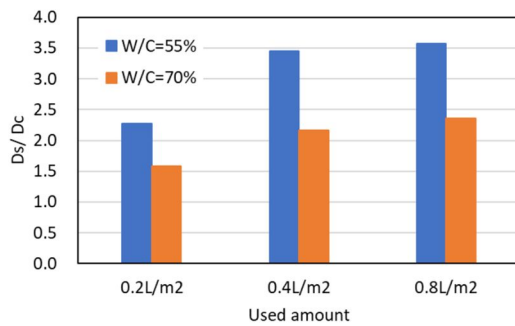


図6 拡散係数比

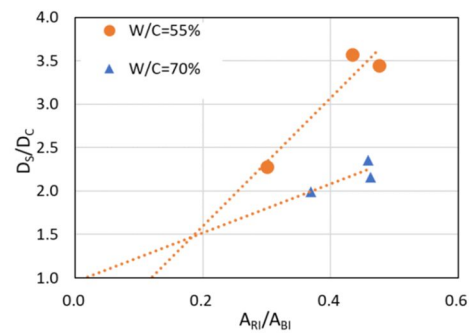


図7 指標面積比と拡散係数比の関係

も定量評価を行うことができた。今回の結果は、けい酸塩系表面含浸工の補修設計や劣化予測、そして品質管理に大きく寄与できるものと考えられる。今後は、特に劣化因子侵入阻止性との関連性についてさらにデータを積み増し、実構造物の維持管理に寄与すべく、検討を進めていきたい。

【参考文献】

- 1) 染谷望，加藤佳孝：けい酸塩系表面含浸材の浸透機構および改質効果に関する基礎的検討，コンクリート工学論文集，Vol.25，pp.181-189，2014.11
- 2) 大嶋俊一，黒岩大地，西野英哉，宮里心一：けい酸塩系表面含浸材におけるけい酸ナトリウムのモル比とモルタル改質効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1557-1582，2019.7
- 3) 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.124-134，2015.5

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 近藤拓也, 宮里心一, 高橋由菜, 横井克則	4. 巻 74
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸工の改質効果とCl-浸透阻止性に関する定量評価方法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 310-317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.74.310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高橋由菜, 近藤拓也, 宮里心一, 黒岩大地	4. 巻 42
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸材の劣化因子侵入阻止性に与えるカルシウム補助材の効果について	5. 発行年 2020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 1402-1407
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 高橋由菜, 近藤拓也, 宮里心一, 黒岩大地, 横井克則	4. 巻 20
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸工のCl-浸透阻止性と改質効果の関係	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 423-428
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 Takuya Kondo, Shin-ichi Miyazato, Daichi Kuroiwa, Katsunori Yokoi, Yukina Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study on Vickers Hardness Distribution of Mortar with Silicate Type Surface Penetrants,	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceeding of the fib Symposium 2020	6. 最初と最後の頁 2408-2413
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 高橋由菜, 近藤拓也, 宮里心一, 西野英哉	4. 巻 28
2. 論文標題 劣化因子侵入阻止性に与えるけい酸塩系表面含浸材の使用量に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第28回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 587-592
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 近藤拓也, 宮里心一, 西野英哉, 横井克則	4. 巻 73
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸工を施工したモルタルのピッカース硬度分布に関する一考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 333-339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.73.333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 高橋由菜, 二神啓, 近藤拓也, 横井克則
2. 発表標題 けい酸塩系表面含浸工法の改質効果がCl-侵入阻止性に与える検討
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukina Takahashi, Takuya Kondo, Shin-ichi Miyazato and Hideki Nishino
2. 発表標題 Investigation on the Amount of Silicate Type Surface Penetrants Affected by Deterioration Factor Penetration Prevention
3. 学会等名 44th our world in concrete & structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋由菜, 近藤拓也, 横井克則, 宮里心一, 西野英哉
2. 発表標題 劣化因子侵入阻止性指標に与えるけい酸塩系表面含浸材の使用量に関する検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019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
研究協力者	宮里 心一 (Miyazato Shin-ichi)	金沢工業大学・工学部・教授	
研究協力者	西野 英哉 (Nishino Hideki)	富士化学(株)・テクニカルセンター	
研究協力者	黒岩 大地 (Kuroiwa Daichi)	富士化学(株)・テクニカルセンター	
研究協力者	横井 克則 (Yokoi Katsunori)	高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授	
研究協力者	高橋 由菜 (Takahashi Yukina)	高知工業高等専門学校・建設工学専攻・学生	

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
---------	---------