

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04552

研究課題名（和文）コンクリートの物質透過性および劣化抵抗性の早期推定手法に関する研究

研究課題名（英文）Early Estimation Method for Material Permeability and Deterioration Resistance of Concrete

研究代表者

藤井 隆史（Fujii, Takashi）

岡山大学・環境生命科学学域・准教授

研究者番号：10537236

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、JIS等で規格化されている方法では、半年以上の期間を必要とするような試験を、比較的短時間で実施可能な方法を検討を行った。凍結融解試験では、寸法の小さい 75×150mmの供試体を用いることで、半分程度の期間で劣化を確認できることを示した。また、塩化物イオン浸透性試験では、モルタルであれば、厚さ2mmの薄片を用いることで、遮塩性の高いものであっても見掛けの拡散係数を、推定可能なことを示した。一方で、コンクリートでは、薄片で見掛けの拡散係数を求めることは難しく、非定常電気泳動法が有効であることを示した。今後もデータの収集を行いながら、関係性を明確にしていくことが必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート構造物の耐久性設計では、実際のコンクリートの結果がない場合には、種々の予測式や推奨値を利用される。一方で、多くの高耐久を実現する材料が開発されており、これらを用いて構造物を設計する場合には、予測式や推奨値の適用外となるため、耐久性に関する値が必要となる。迅速に使用するコンクリートの浸透や劣化の抵抗性が把握できれば、より適切で経済的な構造物の設計が可能になる。

研究成果の概要（英文）：In this study, it was investigated that a method that can perform the test in a relatively short time, which requires more than half a year with the method standardized by JIS. In the freeze-thaw test, it was shown that deterioration can be confirmed in about half the period by using a small specimen of 75×150mm. In addition, the chloride ion permeability test showed that it is possible to estimate the apparent diffusion coefficient of mortar by using a thin piece of 2 mm thickness, even if the mortar has high salt barrier properties. On the other hand, in concrete, it is difficult to obtain the apparent diffusion coefficient from a thin piece, and the unsteady electrophoresis method is effective. It is necessary to clarify the relationship while collecting data in the future.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：早期推定試験 凍結融解試験 小型供試体 塩化物イオン浸透性 薄片 非定常電気泳動法 飽和塩化物イオン量

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の耐久性設計の際、構造物に用いられるコンクリートの試験を行い、その結果を用いて設計することが望ましい。コンクリートの耐久性試験は、促進方法を用いたとしても、3ヶ月以上の期間を要する。とくに、水セメント比の小さいコンクリートにおいては、1年以上の長期にわたる時間が必要となり、時間をかけても検出限界以下であるなどして、適切な値を得ることが難しい場合もある。本研究では、JIS等で規格化されている方法では、半年以上の期間を必要とするような試験を、比較的短時間で実施可能な方法を検討する。中性化試験、塩化物イオン浸透性試験、凍結融解抵抗性試験を対象とする。

2. 研究の目的

小さな供試体を用いることで、中性化、塩化物イオン浸透性および凍結融解抵抗性を早期に試験できないかどうかを検討する。JISや学協会が定める方法との相関性を調べ、短時間に、かつ、簡易にできる方法を提案する。本研究では、それぞれの劣化現象を、間接的な方法で評価するのではなく、直接的な方法で短時間に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体1本およびφ75×150mmの円柱供試体3本を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法(A法)に準拠して行い、比較を行った。凍結水には、劣化を促進させるために、質量パーセント濃度5%の塩化ナトリウム水溶液を用いた。相対動弾性係数および質量減少率の測定は、凍結融解36サイクルを超えない間隔で行った。なお、円柱供試体の試験結果は、3本の平均値を試験結果とした。

凍結融解試験に用いたコンクリートの配合を表1に示す。セメントには、早強ポルトランドセメント(密度:3.13g/cm³、ブレン値:4,600cm²/g)を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂(表乾密度:2.65g/cm³、吸水率:1.53%、粗粒率:2.93)を、粗骨材には、硬質砂岩砕石(最大寸法:20mm、表乾密度:2.75g/cm³、吸水率:0.45%、粗粒率:6.86)を用いた。化学混和剤には、高性能減水剤、AE剤およびアルキルアリルスルホン酸塩とアルキルアンモニウム塩の二つを主剤とした増粘剤を用いた。コンクリートの水セメント比は35%、単位水量は155kg/m³とした。ポリプロピレン短繊維には繊維度が2,000dtで長さが30mmのもの繊維度が30dtで長さが12mmの2種類を用いた。ポリプロピレン短繊維の密度は0.91g/cm³でコンクリートの体積に対して外割りで添加した。

表1 凍結融解試験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)			PP繊維(V×%) ^{※2}		材齢7日 圧縮強度 (N/mm ²)	空気量 (計測値) (%)
			W	C	S	G	高性能減水剤	AE剤 ^{※1}	増粘剤 ^{※1}	2,000dt	30dt		
35.0	49.0	4.5	155	443	856	924	0.85	0.25	0.0	0.00	0.00	51.2	4.2
										0.50	0.00	51.5	4.1
										0.00	0.05	55.4	3.1
										0.00	0.00	55.7	3.8
										0.50	0.00	47.3	4.6
										0.00	0.05	55.8	4.2

^{※1}100倍希釈液で使用、^{※2}外割りで添加



写真1 薄片供試体を用いた塩水浸漬試験の様子

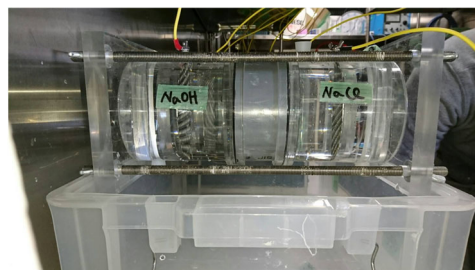


写真2 電気泳動法の試験の状況

(2) 塩化物イオン浸透性

浸漬による方法は、JSCC-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して行った。モルタルは、材齢7日まで水中養生を行った後、成形およびエポキシ樹脂の塗布を行った後、材齢14日より10%塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。

薄片による方法は、厚さ 2mm のモルタル薄片を用いた。モルタル薄片は、浸漬による方法に用いたモルタルのうち、塩化物イオンが浸透していない最深部のものから成形して用いた。浸漬中の薄片供試体を写真 1 に示す。モルタル中の塩化物イオン量の定量は、JIS A 1154 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に従って測定を行った。また、土木研究所で考案された非定常電気泳動法による急速塩分浸透性試験も行った。実験装置は、写真 2 に示すものを用いた。

実験には、水結合材比が 50% のモルタルおよびコンクリートを用いた。結合材には、普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³、プレーン値：3.350cm²/g）および高炉スラグ微粉末 4000（密度：2.89 g/cm³、プレーン値：4,150cm²/g）を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.64g/cm³、吸水率：1.78%）および高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.72g/cm³、吸水率：0.58%）を用いた。粗骨材には、硬質砂岩砕石（最大寸法：20mm、表乾密度：2.74g/cm³、吸水率：0.49%）を用いた。

(3) 中性化

水セメント比が 40% および 25% の普通ポルトランドセメントを用いたモルタルおよび水結合材比が 25% で結合材に高炉スラグ微粉末を 60% 用い、さらに細骨材の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルを用いて、実験を行った。温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の条件で促進中性化を行った。

4. 研究成果

(1) 凍結融解抵抗性

図 1 および図 2 は、それぞれ、JIS A 1148 で標準とされている 100×100×400mm の角柱供試体およびφ75×150mm の円柱供試体を用いて、表 1 に示す 6 種類の配合のコンクリートの凍結融解試験を行った結果である。2 つの図で、同じコンクリートは同じマークで表示している。いずれの試験体を用いた場合も、4 種類のコンクリートが、凍結融解を 300 サイクル繰り返すまでに、相対動弾性係数が低下した。相対動弾性係数が低下した凍結融解のサイクル数は、100×100×400mm の角柱供試体の場合は、□で示したものを除くと 220 サイクル以降であるのに対し、φ75×150mm の円柱供試体では、200 サイクルよりも早い段階で、4 種類のコンクリートの相対動弾性係数が低下している。一辺が 100mm の角柱供試体の断面積と、直径 75mm の円柱供試体の断面積を比較すると、約 2.3 倍の差があり、断面の小さいφ75×150mm の円柱供試体に対しては凍結融解作用の影響が大きくなっていると推察される。

凍結融解抵抗性を示す指標として用いられる耐久性指数は、以下の式で表される。

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (1)$$

ここに、DF は耐久性指数、P は N サイクルのときの相対動弾性係数 (%), N は相対動弾性係数が 60% になるサイクル数または M サイクルのいずれか小さいもの、M は 300 サイクルである。

図 3 は、式 (1) で図 1 および図 2 に示した凍結融解試験結果から算出した耐久性指数の関係を

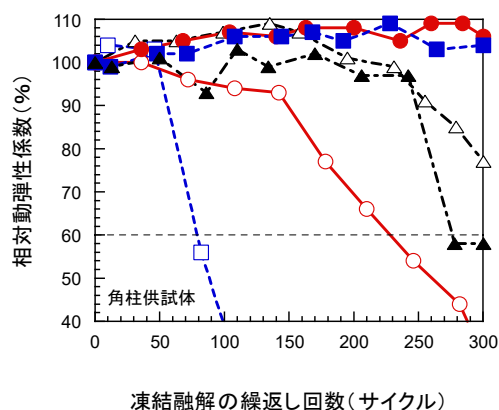


図 1 角柱供試体の凍結融解試験結果

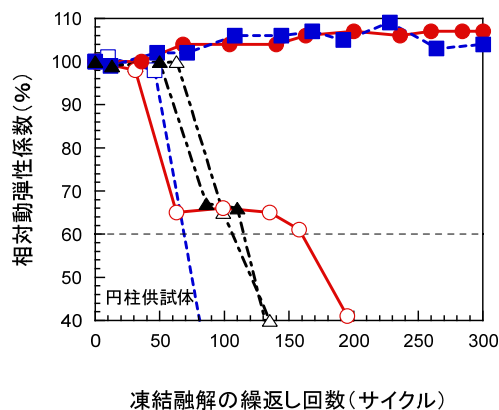


図 2 円柱供試体の凍結融解試験結果

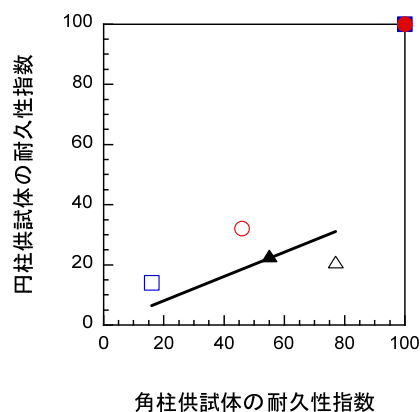


図 3 角柱供試体と円柱供試体の耐久性指数の関係 (300 サイクルを基準とした場合)

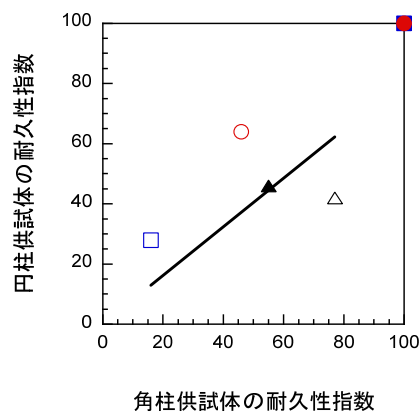


図 4 角柱供試体と円柱供試体の耐久性指数の関係 (150 サイクルを基準とした場合)

示したものである。100×100×400mmの角柱供試体の耐久性指数と、φ75×150mmの円柱供試体の耐久性指数の間には相関関係がみられ、円柱供試体の耐久性指数は、角柱供試体の耐久性指数に比べて小さい。

図4は、式(1)中のMを150サイクルとして計算したφ75×150mmの円柱供試体の耐久性指数と、式(1)中のMを300サイクルとして計算した100×100×400mmの角柱供試体の耐久性指数の関係を示したものである。この図から2つの耐久性指数は、概ね同程度の数値を示している。円柱供試体は、角柱供試体に比べて断面積が半分以下であり、1サイクルでコンクリートが受ける影響が大きいが、φ75×150mmの円柱供試体を用いれば、100×100×400mmの角柱試験体よりも、半分程度の試験期間で凍結融解抵抗性が確認できるものと思われる。

(2) 塩化物イオン浸透性

図5は、3年間塩水に浸漬させたモルタルの塩化物イオン量の分布を示したものである。図中の■および□は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いた結果を、○および●は、結合材に高炉スラグ微粉末を質量比で60%用いた結果を示している。普通ポルトランドセメントのみと砕砂を用いたものが最も塩化物イオンが浸透している。一方、高炉スラグ微粉末もしくは高炉スラグ細骨材を用いたものは、塩化物イオンの浸透が抑制されており、両者を併用したものは、最も塩化物イオンの浸透が抑制されている。図6は、塩水に浸漬させた薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化を示したものである。普通ポルトランドセメントおよび砕砂を用いたものは、比較的早期に塩化物イオン量が増加しているのに対し、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたものは、塩化物イオン量の増加が遅くなっている。いずれのモルタルも、28日程度の浸漬期間で、塩化物イオン量が飽和に近付いていることが分かる。図7は、図5に示した3年間の塩水に浸漬したモルタルの塩化物イオン量の分布をフィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて求めた塩化物イオンの見掛けの拡散係数と、図6に示した薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化から差分法を用いて求めた塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較し示したものである。浸漬による方法で求めたものと薄片で求めたもの間には、相関関係が認められる。一方、図8は、種々のコンクリートを用いて、円柱供試体の浸漬によって求めた見掛けの拡散係数と薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化から求めた見掛けの拡散係数を比較したものである。コンクリートの場合、モルタルの場合に比べてばらつきが大きく、薄片を用いて見掛けの拡散係数を求めることは難しいと考えられる。以上のことから、モルタルであれば、厚さが2mmの薄片供試体から求めた見掛けの拡散係数は、3年間の塩水浸漬によって求めたものと相関関係が見られ、薄片供試体を用いれば、高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材を用いた塩化物イオン浸透性の小さいモルタルであっても、1ヶ月程度で見掛けの拡散係数を求めることが可能である。一方で、コンクリートの場合は、ばらつきが大きく、薄片によって見掛けの拡散係数を求めることは困難である。

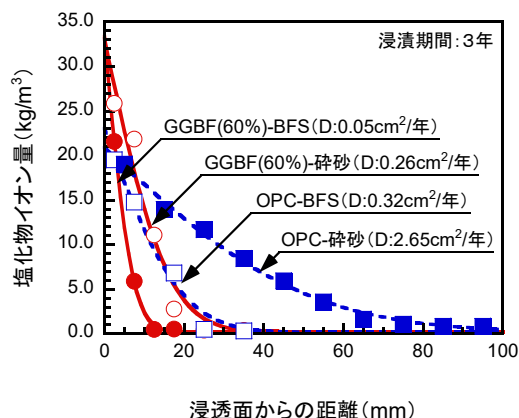


図5 塩水に浸漬したモルタルの塩化物イオン量分布

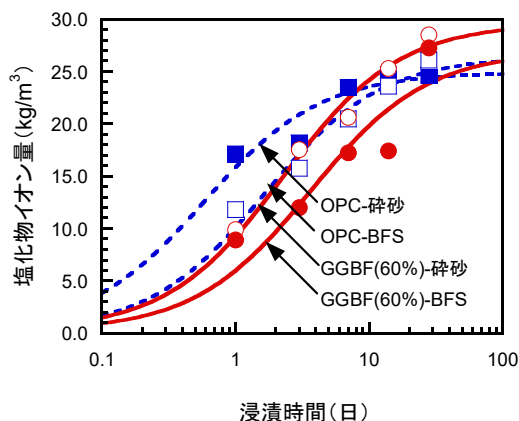


図6 薄片供試体の塩化物イオン量の経時変化

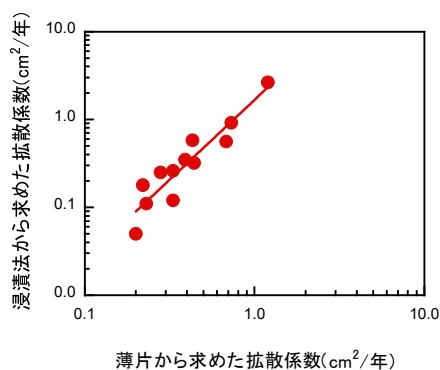


図7 浸漬法と薄片法の見掛けの拡散係数の比較 (モルタルの場合)

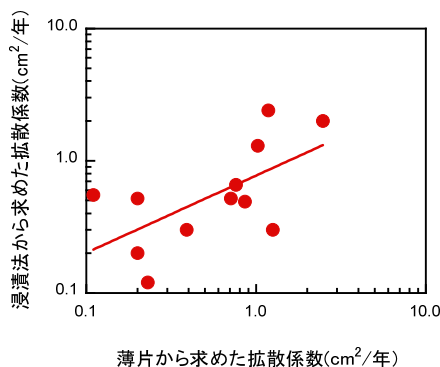
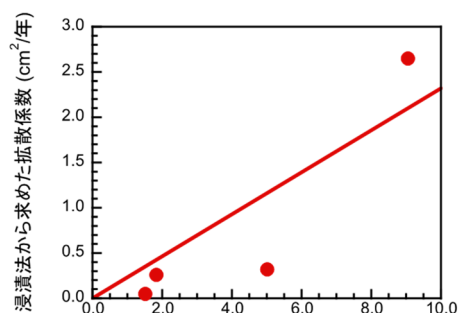
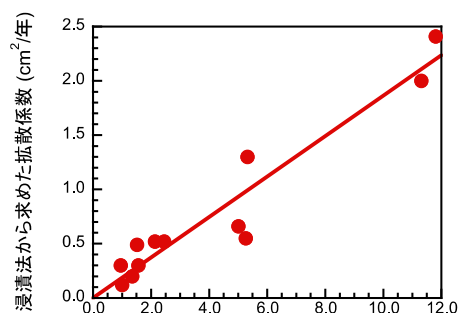


図8 浸漬法と薄片法の見掛けの拡散係数の比較 (コンクリートの場合)

図9は、モルタル供試体を用いて、非定常電気泳動法によって求めた見掛けの拡散係数と、円柱供試体の浸漬によって求めた見掛けの拡散係数を比較したものである。また、図10は、コンクリートの供試体を用いて、非定常電気泳動法によって求めた見掛けの拡散係数と、円柱供試体の浸漬によって求めた見掛けの拡散係数を比較したものである。非定常電気泳動法で求めた見掛けの拡散係数は、浸漬によって求めた見掛けの拡散係数と良い相関関係にあることが分かる。コンクリートを用いた場合でも、薄片を用いて求めた見掛けの拡散係数よりもばらつきも小さい。したがって、コンクリートで塩化物イオンの拡散係数を迅速に求めたい場合は、非定常電気泳動法を用いることがばらつきも小さく迅速に求めることが可能であると思われる。一方で、モルタルであれば、厚さ2mmの薄片を浸漬させることでも、見掛けの拡散係数を求められる。また、フィックの第2法則に基づいた拡散方程式を用いて、塩化物イオン量の将来予測を行う場合には、拡散係数と表面塩化物イオン量の2つの値が必要である。表面塩化物イオン量は、その環境におけるモルタルやコンクリートの飽和塩化物イオン量であるが、この値は、薄片を用いることで、浸漬であれば2カ月ほどで求めることが可能と考える。



非定常電気泳動法から求めた拡散係数(cm²/年)
 図9 浸漬法と非定常電気泳動法の見掛けの拡散係数の比較 (モルタルの場合)



非定常電気泳動法から求めた拡散係数(cm²/年)
 図10 浸漬法と非定常電気泳動法の見掛けの拡散係数の比較 (コンクリートの場合)

(3) 中性化

写真3は、2年7カ月間、促進中性化を行ったモルタルの中性化の状況である。ごく表面に着色しない箇所が見受けられるが、ほとんど中性化は生じていなかった。中性化においては、促進環境においても、中性化が生じなかった。これは、実環境では200年経過しても中性化が生じないことになる。このような材料であれば、中性化の照査は行わなくてもよいと考える。



写真3 2年7カ月間促進中性化したモルタルの中性化状況

(4) まとめ

凍結融解試験では、寸法の小さいφ75×150mmの供試体を用いることで、半分程度の期間で劣化を確認できることを示した。また、塩化物イオン浸透性試験では、モルタルであれば、厚さ2mmの薄片を用いることで、遮塩性の高いものであっても見掛けの拡散係数を、推定可能なことを示した。一方で、コンクリートでは、薄片で見掛けの拡散係数を求めることは難しく、非定常電気泳動法が有効であることを示した。また、中性化は、低水セメント比のものは2年7カ月間、促進中性化しても中性化がほとんど生じなかった。凍結融解試験および塩化物イオン浸透性は、今後もデータの収集を行いながら、関係性を明確にしていくことが必要である。

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 2件）

1. 著者名 岡崎佳菜子, 森脇拓也, 藤井隆史, 綾野克紀	4. 巻 44
2. 論文標題 モルタルの塩水中での凍結融解抵抗性に与える凍結速度および凍結時間の影響	5. 発行年 2022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 580-585
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 森脇拓也, 大西豊, 藤井隆史, 綾野克紀	4. 巻 43
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸材のスケーリング抑制効果に及ぼす施工方法の影響	5. 発行年 2021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 1433-1438
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 藤井隆史, 瀧口響, 能勢幸太郎, 森脇拓也, 綾野克紀	4. 巻 21
2. 論文標題 高炉スラグを用いたコンクリートの物質透過性に関する研究	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 115-120
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 河中涼一, 田中湧磨, 藤井隆史, 綾野克紀	4. 巻 42-1
2. 論文標題 ポリプロピレン短繊維を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究	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 185-190
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀧口響, 森脇拓也, 藤井隆史, 綾野克紀
2. 発表標題 母材と塗布後の養生方法がけい酸塩系表面含浸材のスケーリング抑制効果に及ぼす影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎佳菜子, 藤井隆史, 綾野克紀
2. 発表標題 凍結融解作用によるモルタルの劣化メカニズムの検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 能勢幸太郎, 藤井隆史, 綾野克紀
2. 発表標題 高炉スラグがコンクリートの物質透過抵抗性に与える影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021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
---------	---------