

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04216

研究課題名（和文）経時による硬化体変化と遷移帯を考慮した物質移動場モデルの形成とその評価手法の確立

研究課題名（英文）Formation of a mass transfer field model that takes into account hardener changes over time and transition zones, and establishment of an evaluation method

研究代表者

伊代田 岳史（Iyoda, Takeshi）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：20549349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：混和材を大量に用いた硬化体における物質移動特性ならびに遷移帯によるその影響を体系的に整理するために、様々な実験を行った。まずは、異なる混和材とその置換率による物質移動抵抗を計測した。その結果、総空隙率では整理が困難であり、空隙構造ネットワークが物質移動抵抗性に反映されていることが明確となった。特に水の浸透においては、その影響が顕著となることが想定された。また、同一総空隙を持つ様々な硬化体においても検討を行ったが、同様の傾向となった。加えて、空気の透過試験では、空隙との相関が得られていても、水分浸透においては、その関係が崩れる傾向も見られた。さらに遷移帯についても検証に、多くの成果を得ている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラル社会を実現するために、多くも混和材を利用する粉体設計がなされている。一方で構造物は強度・耐久性を得られたコンクリートでなければならない。その空隙組成の違いによる物質移動抵抗性を把握することは、今後の材料設計においても非常に重要な役割となる。加えて、遷移帯の形成メカニズムとその物質移動に対する影響を整理することは重要である。申請者らは、さらに再生骨材コンクリートにも目を向け、議論を重ねている。これらを考慮すると、得られた成果は社会的に非常に大きな影響を及ぼすと考える。

研究成果の概要（英文）：In order to systematically organise the mass transfer properties in hardened materials with large amounts of admixtures and their influence by the transition zone, various experiments were carried out. First, the mass transfer resistance of different admixtures and their replacement rates were measured. The results clearly showed that the total porosity is difficult to organise and that the pore structure network is reflected in the mass transfer resistance. It was assumed that the effect would be particularly pronounced in water infiltration. The same trend was also observed in various hardened materials with the same total porosity. In addition, even though a correlation with porosity was obtained in air permeation tests, there was also a tendency for the relationship to break down in water penetration. Furthermore, a number of results have been obtained in the verification of the transition zone.

研究分野：コンクリート材料学

キーワード：高炉スラグ微粉末 物質移動抵抗性 空隙構造 空隙ネットワーク 透気試験 水分浸透試験

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物を長寿命化するためには、コンクリート表層からの劣化要因となりうる物質の浸透を抑制する必要がある。コンクリート内への物質の浸透は、コンクリート中の空隙内を物質が移動していくことに依存する。さらに、浸透する物質によっては水和物との反応に伴う吸着や固定化が認められるため、浸透速度が異なる。このように時間を伴う物質の移動を解明するために、促進試験により当該物質を早期に移動させるのが現状である。しかしながら、申請者のこれまでの検討により、特に吸着や固定化が伴う場合にはそのメカニズムが硬化体ごとに異なることから、移動の駆動力を大きくするだけでは実際と挙動が異なり、正確な物質の浸透をとらえられない事象も発生している。例えば、混合セメントを用いたコンクリートの中酸化では、普通ポルトランドセメントを用いた場合の固定化メカニズムが異なるため、二酸化炭素濃度を高く設定した促進試験では、そのセメントの持つポテンシャルを表現できないことがわかっていいる。一方で、空隙のネットワークにおいても混合セメントは普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して複雑化していることも知られており、物質の透過する空隙ネットワークと固定化などの物理・化学的な現象を分離して考える必要があると考える。加えて時間の経過に伴い、水和や固定化、劣化などによりさらに複雑に変化する。このように混合セメントを用いた場合の物質移動場と固定化を実験的に明確にし、モデルを提案することで、各種セメント系粉体がもつポテンシャルを表現できると考える。

今後、カーボンニュートラル社会実現のために、多くの混和材料を適用し、新たな粉体・結合材を利用していることになることを考え、これらの問題に対して容易に議論できる場所を用いることが必要であると考えます。

2. 研究の目的

本研究では、複雑な物質移動場の解明とそのモデル化を実現するとともに、これまでの研究で申請者が解明してきた固定化や吸着を考慮した、混合セメントのもつポテンシャルを正確に表現できる中酸化と塩害の促進試験を提案することを最終的な目的とする。これにより、今後環境負荷低減を考慮した場合の様々な材料の組み合わせにおけるポテンシャルを正確に表現でき、精度の高い劣化予測を実現する礎を築くことができると確信している。

物質移動場の表現には、各種粉体が生成する水和物が形成する複雑な空間を理解する必要がある。これまで、空隙の計測にはアルキメデス法による総空隙量や水銀圧入式ポロシメータなどを用いた総空隙量とその大きさ、また空隙の連続性などを様々な研究者が測定してきた。例えば高炉コンクリートの場合、総空隙量は普通ポルトランドセメントと同等でも小径の空隙が多いことが計測されてきた。しかし、図-1 に示すようにこの空隙の異なる結果は気体の透過にはほとんど影響がないが、液体の透過やイオンの移動には大きく影響し、差が生じることがわかっていいる。つまり空隙のみの計測ではセメント硬化体の相違を正確に表現できていないということになる。このことからペースト内に存在する毛細管空隙およびゲル空隙や層間空隙の形成するネットワークの特徴をとらえる必要があるといえる。一方で、コンクリートには構成材料に骨材が含まれることで、遷移帯が存在することが知られている。物質移動においては遷移帯領域が非常に大きく影響すると考えられるが、ペースト領域と遷移帯領域のどちらが卓越した移動場になるかは、あまり研究が進められていない。本研究では、物質移動場としてのマトリックス内の空間と遷移帯の影響の大きさを整理してモデル化する。

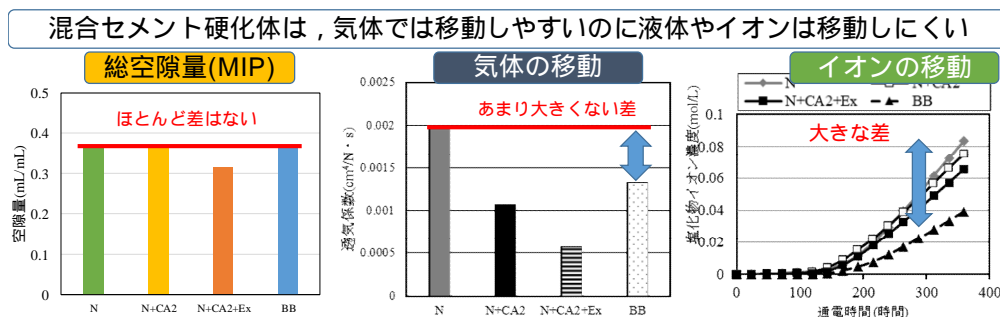


図-1 空隙量と気体・液体・イオンの移動に関するOPCとBBの差 (一例)

そこで、本研究では図-2 に示す大きく次の3点を明確・提案していく。

- 各種粉体を用いた硬化体マトリックス中の物質移動経路としての評価とその表現方法
- 骨材により形成される遷移帯の特徴とその物質移動経路としての役割
- 物質移動経路と化学的吸着・固定化を考慮した促進中酸化および塩分浸透試験の提案

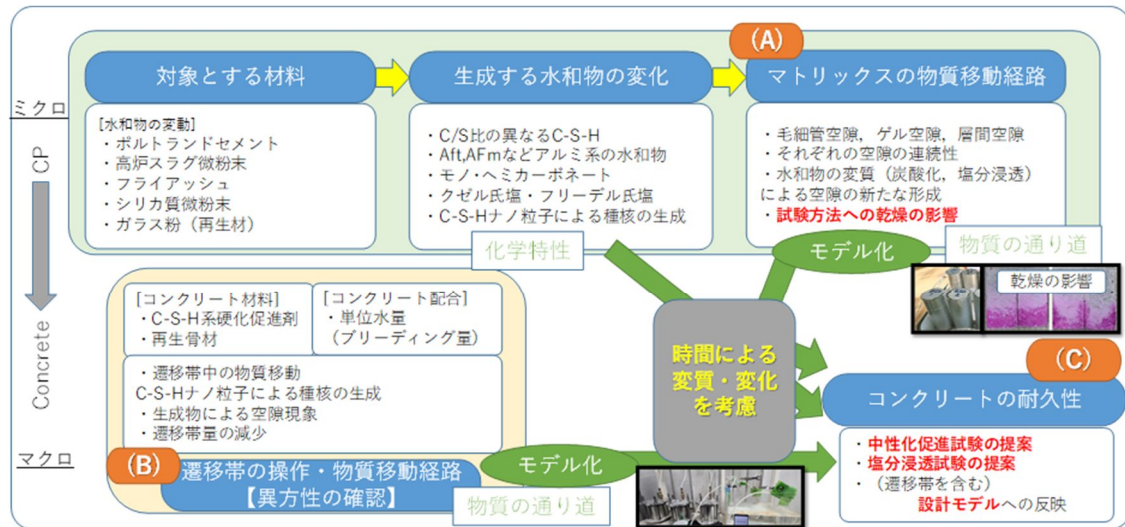


図-2 時間による変質を考慮した物質移動場のモデル化研究

3. 研究の方法

研究の手法として、上記に記述した図-2をもとに、次のように進めていく。

(A) 硬化体マトリックス内の空隙組成の形成と物質移動経路

硬化体マトリックスとして、まずは高炉スラグ微粉末を中心に混和材料を用いた場合の空隙構造形成と物質移動抵抗性を検討する。様々な混和材料、配合を用いたセメント硬化体による水分浸透や透気性能を把握することを目的とした。これは、物質の通り道となりうる空隙ネットワークの相違を表現できるかどうかを検討するものである。セメントペースト及びモルタルを作製し、乾燥条件も考慮したうえで、物質移動抵抗性を評価する。

(B) 遷移帯による物質移動抵抗性の変化と定量化

コンクリートを形成するマトリックス以外の細骨材および粗骨材界面は遷移帯が生成することが知られている。この遷移帯の量や厚さがマトリックスの物質移動抵抗性を卓越するようであれば、すべての物質移動は遷移帯で決定されることとなる。そこで、どのような条件で遷移帯が多く形成され、その影響がマトリックス単体の物質移動を卓越するのかを検討した。意図的に遷移帯が形成されるように、水セメント比を高く設定したコンクリートなどを作製し、遷移帯の影響を大きくした場合の物質移動抵抗性を評価した。

(C) 新たな促進試験の検討

上記を検討したうえで、物質移動抵抗性のみではなく、水和物と透過する物質との反応（例えば二酸化炭素や塩化物イオンとの反応）を踏まえたモデルの構築が望まれる。ここでは、マトリックスの相違による各種固定性能や反応性能が異なることを利用して、物質移動抵抗性および反応性物質との相互作用について検討する。これまで中性化による二酸化炭素の固定化（水和物である水酸化カルシウムおよびCSHによる二酸化炭素の化学的固定）は、マトリックスであるセメント硬化体の種類（使用している粉体の相違）により大きく異なることを明らかにしてきた。また、中性化により水和物の変質・破壊が生じることから、時間経過とともに形成された空隙構造も変化し物質移動抵抗性が変化する。その影響はセメント種類ごとに異なることから、新たな物質移動経路を形成する。同様に塩化物イオンにおいても、水和物表面への吸着や水和物への塩化物イオンの取り込みが生じることで、物質の移動経路も変化する事が明らかである。このような時間経過を考慮した混合セメントや混和材などを用いた硬化体の中性化抵抗性や塩分浸透抵抗性を表現することが、設計においては必要になる。

4. 研究成果

図-3の表に示すような配合（混和材を混入）によるモルタルを作製し、アルキメデス法による総空隙率の結果を図-3に示す。空隙率は混和材の種類により変動し、高炉スラグ微粉末を多量に混和していくと、空隙率が減少していくが、70%以上の置換により逆に空隙率が増加する。これは、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により水和生成物が生成し、空隙を緻密化すると考えられる。その一方で、ある程度より多量置換により水和反応が停滞することで、同一材齢では緻密化が遅延することが考えられる。一方、フライアッシュを用いると、セメント量が減少することで、反応の遅いフライアッシュの置換率が高いほど空隙を残存するものと考えられる。これらのモルタルによる、水分浸透速度係数と透気試験の結果を図-4に示す。水分浸透速度係数試験では、高炉スラグ微粉末の添加が多量になるほど、おそらく乾燥の影響により試験体側面からの水分吸い上げが大きくなり、質量増加だけでは水分浸透を評価することが困難になることが分かったことから、中心部分の吸い上げ高さを用いて算出した速度係数と空隙の関係を図-4aに示す。これより、総空隙率と水分浸透には相関性が認められないことがわかる。次に図-4bに透気試験の結果を示す。こちらは、高い相関とは言えないまでも空隙率の増加に伴い、透気係数が高くなっており、空隙に依存しているように見受けられる。

配合名	配色	W/B (%)	質量割合			
			OPC	GGBFS	FA	SF
N	■	50	100			
B20	■		80	20		
B30	■		70	30		
B50	■		50	50		
B70	■		30	70		
B85	■		15	85		
B90	■		10	90		
FA10	■		90		10	
FA30	■		70		30	
SF10	■		90			10
SF30	■		70			30

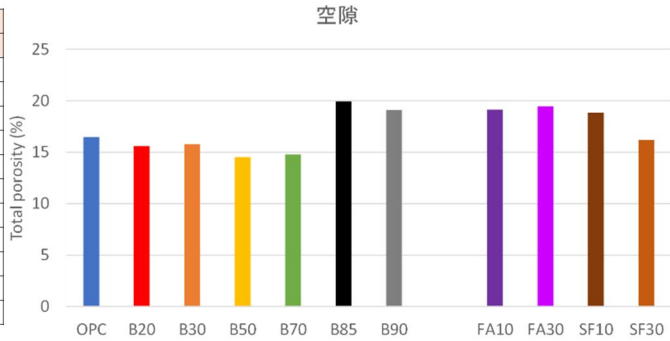


図-3 各種モルタルにおける空隙構造

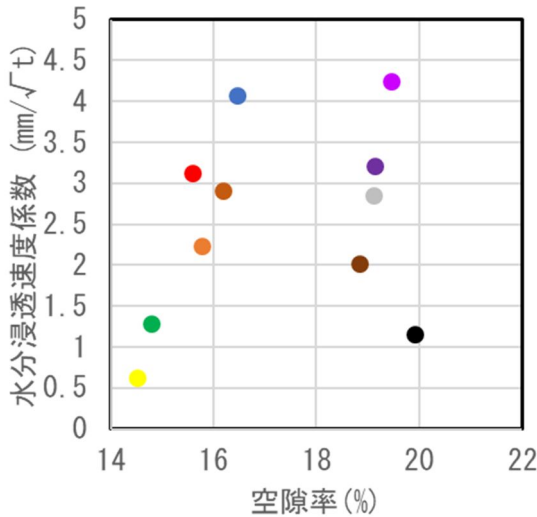


図-4a 空隙率と水分浸透係数の関係

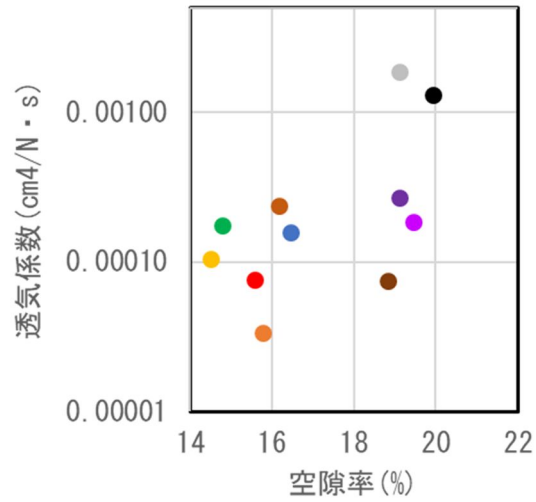


図-4b 空隙率と透気係数の関係

上記の関係を確認するために、さらに同様に混和材を置換したモルタルを作製したが、異なる混和材を用いた試験体にて総空隙率が同程度となるモルタルを作製するために、石こう添加量および養生日数を7,28日と変化させた。図-5は、作製したモルタルの内、同様の空隙率となった異なる養生または配合の異なるものの、透気係数の結果を示している。これより透気係数も空隙率では一義的ではない。

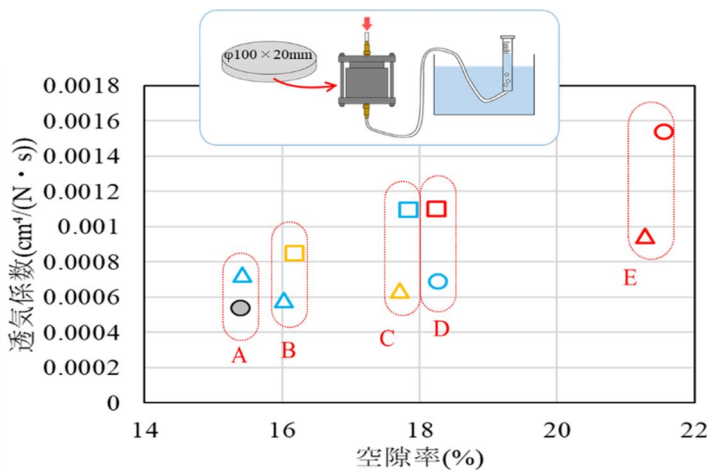


図-5 同一総空隙率を持つ異なる配合・養生の透気係数

		配合	結合材のSO ₃ 含有量 (%)	養生 (日)
A	△	B50	3.36	7
	●	N	2.01	28
B	□	B20	3.11	7
	▲	B50	3.36	28
C	□	B50	4.77	7
	△	B20	2.55	7
D	□	B85	6.71	7
	○	B50	1.95	7
E	○	B85	1.90	7
	△	B85	4.30	7

さらに、空隙率と透気試験ならびに水分浸透試験の結果を図-6a および図-6b に示す。これより、透気係数は空隙率とは相関がとれているものの、混和材により関係性が2つになっている。加えて、水分浸透の結果より、B群にあるものは、空隙率が増加しても水分浸透が増加しないことが認められた。これより、物質移動においては混和材の形成する空隙の特徴により、空気と水の浸透性が異なることを示すことができた。水和物との関連性や生成した空隙との関係につ

いては、現在どのようなことが生じているかのイメージを持っているが確認できないため、今後検討をさらに進めていく予定である。

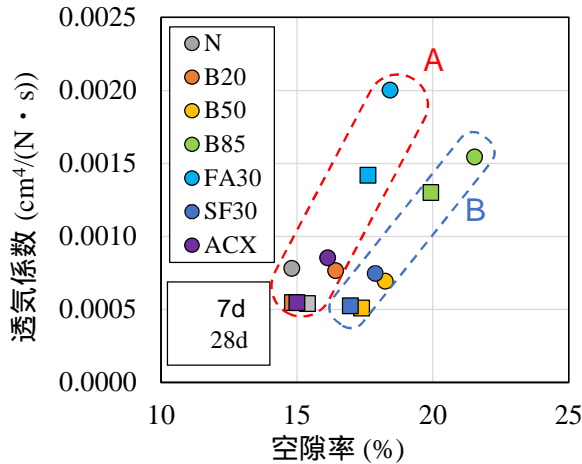


図-6a 空隙率と透気係数の関係

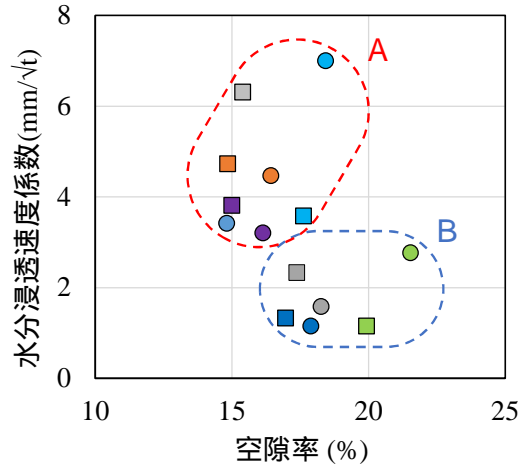


図-6b 空隙率と水分浸透係数の関係

続いて遷移帯の影響について考察を加えた。ここでは、高W/Cでブリーディングを多くすることで作製した試験体を垂直およびその直行方向でコアリングして透気係数を計測した結果が図-7である。これより直行方向では遷移帯の影響が大きく認められることがわかる。一方で、その対策技術としてACX(C-S-H硬化促進剤)を混和することで異方性を緩和できることが分かった。これらを用いて、遷移帯が多く形成される再生骨材を用いた検討も進めており、図-8にその結果を示す。ここでは、圧縮強度試験を実施しているが、再生骨材コンクリートをOPC(紫)とBC(橙)で作製し、一部CRは骨材を炭酸化により改質したもので、ACXは上記の混和剤を用いた結果を示している。ACXを用いることで遷移帯が減少し、強度も上昇することが分かった。また、ベースのセメントの相違により、再生骨材および炭酸化改質骨材を利用した場合で特性が異なることも明確となり、遷移帯形成に影響を受けた結果であるため、さらなる検討を進めている。

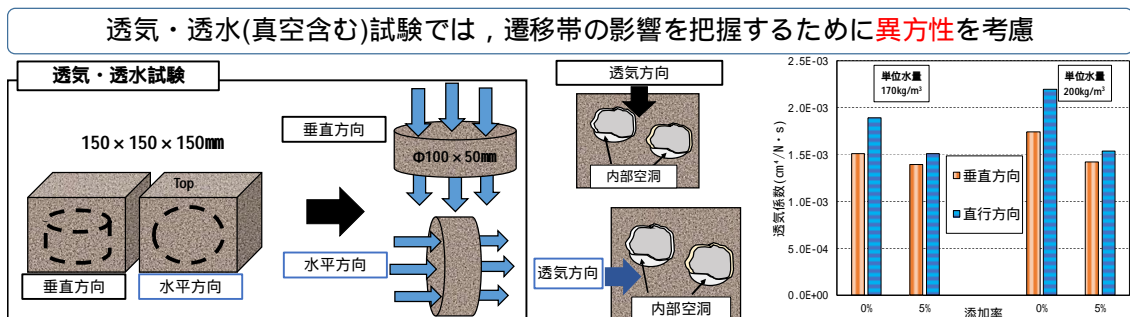


図-7 異方性(垂直・水平方向)に透気試験結果とその対策の効果の検証

このようにマトリックス部の空隙特性と遷移帯による物質移動特性を比較検討したが、まだまだ説明するには至らないところが多く残されている。さらに、耐久性試験である促進試験においては、その結果を整理しているものの、解釈が非常に困難である。特に混和材を高置換した場合、もともとのpHが低くなることから中性化の進行は変化する。さらに高濃度での炭酸化では、その特性が異なることも明確となった。また、塩化物においても固定化による影響および炭酸化した後の空隙特性の変化による塩分浸透の相違なども明確となってきた。

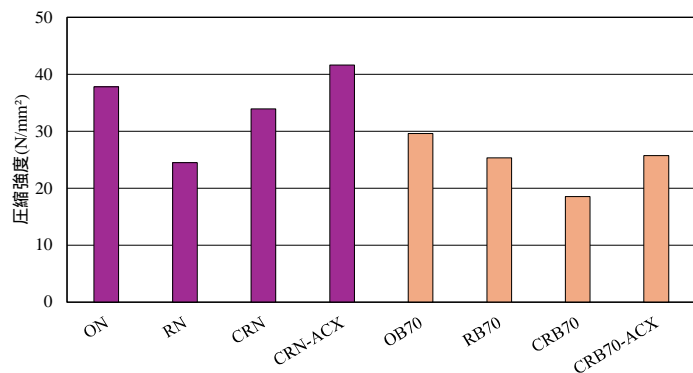


図-8 再生骨材コンクリートの遷移帯による強度比較

以上より、特に混和材の形成する空隙と物質移動特性ならびに反応を伴う物質との関係性について検討してきたが、不明点が多くあることから、今後更なる検討を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 白石 真由奈、伊代田 岳史	4. 巻 44
2. 論文標題 各種水和物が形成する空隙特性の違いが物質移動特性へ与える影響	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 184-189
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 八尋瑠奈、伊代田 岳史	4. 巻 1
2. 論文標題 水分浸透速度係数を利用した硬化体空隙組成の解明に向けた一考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関するシンポジウム講演概要集	6. 最初と最後の頁 245-248
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 無
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 澁谷亜香里 伊代田岳史	4. 巻 43
2. 論文標題 物質移動試験に基づくセメント硬化体の空隙ネットワークの理解	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 335 340
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 白石真由奈 杉山知巳 伊代田岳史	4. 巻 43
2. 論文標題 C-S-H系硬化促進剤の空隙改質メカニズムの検討	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 149 154
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7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 白石真由奈, 伊代田岳史
2. 発表標題 各種水和物が形成する空隙特性の違いが物質移動特性へ与える影響
3. 学会等名 第76回セメント技術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八尋 瑠奈, 白石 真由奈, 伊代田 岳史
2. 発表標題 セメント硬化体の物質移動特性に与える混和材および混和材の影響
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Iyoda
2. 発表標題 Examination of pore characteristics and behavior of gas and water permeability in blast furnace slag concrete
3. 学会等名 The 9th International Conference of Asia Concrete Federation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八尋 瑠奈, 渡邊 健太, 伊代田 岳史
2. 発表標題 養生温度の違いが各種セメントの水和反応および硬化体物性に与える影響
3. 学会等名 第77回セメント技術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Yahiro, T. Iyoda
2. 発表標題 Influence of various admixture materials on pore structure and mass transfer characteristics
3. 学会等名 Eighth International Symposium on Life- Cycle Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田 人瑞, 松田信広, 伊代田 岳史
2. 発表標題 配合条件の異なる原コンクリートを用いた再生粗骨材の炭酸化処理による空隙特性の変化
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Iyoda
2. 発表標題 The character for hardened cement materials using GGBS
3. 学会等名 International Symposium on Life Cycle Maintenance of Concrete Infrastructure (招待講演) (国際学会)
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
---------	---------