

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04773

研究課題名(和文) 中性化がフライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性と鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響

研究課題名(英文) Influence of carbonation on the resistance of chloride penetration and steel corrosion of concrete containing fly ash

研究代表者

大谷 俊浩 (Otani, Toshihiro)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：00315318

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)：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化が塩分浸透抵抗性および鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、鉄筋位置まで促進中性化した供試体による塩水浸漬試験および塩水浸漬繰返しによる鉄筋腐食試験を行った。その結果、材齢28日養生では、未中性化供試体ではフライアッシュ置換率が高いほど鉄筋腐食抵抗性が高い結果が得られたが、中性化することでそれは低下し、ポゾラン反応によって組織が緻密化する長期養生を行った場合でも同様であることがわかった。この原因として、未中性化領域のフライアッシュの高い塩分浸透抵抗性によって、中性化位置で塩分浸透の停滞による濃縮現象が生じていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フライアッシュは産業副産物としてセメントの使用量を削減し、コンクリートにおける環境負荷低減が可能となる混和材料として期待されている材料の一つである。フライアッシュを混和することでコンクリートの遮塩性が向上することは知られていたが、中性化した場合のその効果は不明であった。本研究によって、内部の未中性化領域における塩分浸透抵抗性の高さにより、中性化付近において浸透してきた塩分の停滞による高濃度化を引き起こすことがわかった。そのため、中性化付近に鉄筋があった場合には鉄筋腐食抵抗性が低下する可能性があり、複合劣化環境では中性化による塩分の濃度変化を考慮する必要があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of clarifying the effect of carbonation of concrete mixed with fly ash on salt penetration resistance and rebar corrosion resistance, a sodium chloride solution immersion test using a specimen that was promoted to the reinforcing bar position and a rebar corrosion test by repeated sodium chloride solution immersion were performed. As a result, in the age of 28-day, the higher the fly ash replacement rate in the uncarbonated specimen, the higher the rebar corrosion resistance, but it decreased by carbonation, and the same was true even when long-term curing, in which the matrix was dense by the pozzolanic reaction. As the cause of this, it was shown that the high sodium chloride penetration resistance of fly ash in the uncarbonated region caused a concentration phenomenon due to stagnation of sodium chloride penetration at the carbonation position.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート フライアッシュ 中性化 塩分浸透抵抗性 複合劣化 鉄筋腐食抵抗性

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

塩害は鉄筋腐食を助長し、RC 構造物の耐久性を著しく低下させる深刻な現象の一つとして認識されている。コンクリートにおける塩害と中性化の複合劣化では、セメント水和物中に固定化されているフリーデル氏塩などが中性化によって細孔溶液中に遊離し、細孔溶液中の塩化物イオン濃度が上昇することで中性化部分より内部に塩化物イオンが濃縮するため、鉄筋腐食が促進される。この複合劣化は実構造物において問題視されているものの、中性化の有無や乾湿繰返しの影響を受ける場合の研究例が少ないのが現状である。

これまで本研究室では未燃カーボンを 1.0%以下に低減させた加熱改質フライアッシュ (以下、MFA) を用いたコンクリートの遮塩性や中性化抵抗性に関する実験を行ってきた。材齢 28 日強度を同等とした条件では、促進試験における中性化抵抗性はプレーンコンクリートと同等か、やや低くなることを明らかにしている¹⁾。一方、塩分浸透抵抗性についてはプレーンコンクリートよりも優れることがわかっているが²⁾、この結果は未中性化供試体によって得られた結果であり、中性化と塩害の複合劣化を受けるコンクリートに対する MFA の効果は明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、塩害と中性化の複合劣化に対する MFA の効果を明らかにすることを目的とし、養生期間や MFA 置換率の異なるコンクリート供試体を用いて中性化前後における塩水浸漬試験による塩分浸透抵抗性および塩水浸漬繰返し試験による鉄筋腐食抵抗性について検討した。ここでは、材齢 28 日まで養生した供試体の結果について報告する。

3. 研究の方法

表-1 に使用材料を、表-2 に調合およびフレッシュ性状を示す。混和材は JIS A 6201 の II 種に相当する MFA を使用した。目標スランブは 18±2.5cm, 目標空気量は 4.5±1.0%とし、単位水量および空気量調整剤で調整した。

各供試体は材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った。中性化有の供試体については、促進中性化試験装置内 (20℃, 60%R. H., CO₂ 濃度 5%) にてかぶり約 20mm まで中性化させた。中性化深さ 20mm に達する促進期間は調合によって異なり、FA 混和のものは 32 週間、PL は 52 週間に要した。その後 24 時間 20℃水中に浸漬した後、塩分浸漬試験 (10%NaCl 溶液) を開始した。開始時に水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った。また、塩水浸漬 15 週後 (中性化無は 13 週) に EPMA による面分析を行った。

塩水浸漬繰返し試験は、試験開始前に 24 時間 20℃水中に浸漬したのち、試験を開始した。塩水浸漬繰返し試験は、24 時間 10%NaCl 溶液浸漬および 6 日間乾燥 (20℃, 60%R. H.) を 1 サイクルとして全 51 サイクル実施した。

表-1 使用材料

	記号	種類
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm ³
混和材	MFA	FA II 種 密度: 2.26g/cm ³ , 比表面積: 4300cm ² /g, 平均粒径: 14.51 μm
細骨材	S	山砂 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 絶乾密度: 2.57g/cm ³ , 吸水率: 2.41%, 粗粒率: 2.43
粗骨材	G	碎石 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 絶乾密度: 2.61g/cm ³ , 実積率: 58.9%, 吸水率: 0.92%
水	W	水道水
混和剤	AD	AE 減水剤 (高性能タイプ)
助剤	AE	空気量調整剤

表-2 調合およびフレッシュ性状

記号	MFA 置換率 (%)	W/C ^{*1} (%)	単位量 (kg/m ³)					AD (B×%)	AE ^{*2}	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/L)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	MFA	S	G						
PL	0	55.0	180	327	0	862	904	0.65	1.0A	18.5	5.5	2.28	33.8
FA15	15	55.0	172	297	52	849	904	0.65	1.5A	19.0	5.2	2.28	31.8
FA30	30	55.0	172	277	119	790	904	0.65	2.0A	20.5	4.8	2.29	30.8

*1 W/C' = W/C+k×MFA, *2 A= (B×0.002%)

4. 研究成果

(1) コンクリートの物性試験

①フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度試験結果を表-2 に示す。フレッシュ性状は、目標値を満足した。圧縮強度は、MFA 置換率の増加とともに、若干低下した。

②細孔径分布

図-1 に累積細孔容積を示す。図より、中性化有は中性化無に比べ、全調合において 0.1 μm から 10 μm の粗大な細孔容積が若干増加しているものの、0.01 μm から 0.1 μm の細孔容積が減少

し、累積細孔容積は減少した。これは、C-S-Hの炭酸化に伴う水分蒸発による多孔化と、Ca(OH)₂の炭酸化により生成されるCaCO₃による細孔組織の緻密化の双方が影響したことが原因と考えられる³⁾。特にMFAを混和した供試体において0.01μmから0.1μmの細孔容積が減少が顕著であったことから、本実験の調査においてはCa(OH)₂の炭酸化による組織の緻密化の影響が大きかったものと思われる。

(2) 塩水浸漬試験

① 塩化物イオン分布 (EPMA 分析)

写真-1に塩水浸漬15週後に行ったEPMA面分析によるClマッピング画像を示す。写真に示す白線は塩水浸漬試験前の中性化深さを示しており、PL, FA15, FA30の順に19.1mm, 21.1mm, 23.5mmであった。

図-2にEPMA面分析結果から求めた塩化物イオン量の分布曲線を示す。塩化物イオン量の算出にあたって、粗骨材の配置に大きな隔たりが生じており、測定値に大きなばらつきが生じていたため、大竹らの研究⁴⁾を参考に、骨材と空隙を除くペースト部分のみで算出した塩化物イオン濃度を用いることとした。塩化物イオン量の算出には、その塩化物イオン濃度にセメントペースト密度と調査上のペースト容積を乗じてコンクリート全体としての値に換算した。図より、中性化有は中性化の境界付近に塩化物イオンの濃縮がみられ、特にFA30ではピークの幅が狭く、高い濃縮がみられる。また、中性化領域の塩化物イオン量は、調査に関わらず濃度勾配が小さく、概ね均等に塩化物イオンが分布している。これは、塩水浸漬後の可溶性塩化物イオンが中性化域の細孔に残存したものと推察される。

② 塩化物イオンの浸透深さ

図-3に塩化物イオンの浸透深さを示す。いずれもMFA置換率の増加とともに塩化物イオン浸透深さが減少しており、中性化有の方がより深くまで浸透していた。

③ 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

拡散係数の算出にあたっては、中性化有無ともにピーク値以深の全データに対してFickの第2法則に基づいた拡散方程式により見掛けの拡散係数を算出した。

図-4に見掛けの拡散係数の比較を示す。拡散係数は中性化有無に関係なくMFA置換率増加に伴い小さくなる結果が得られた。これは、一般的なフライアッシュを用いた場合と同様の傾向であり⁵⁾⁶⁾、MFAもコンクリートの遮塩性を高める効果を有することがわかる。また、中性化有無で比較すると、FA30では明確な差がみられないが、PLおよびFA15では中性化有の拡散係数が大きい結果となった。これは、中性化有の塩化物イオン分布曲線においてPLおよびFA15で未中性化部分に深く塩化物イオンが浸透した結果によるものと考えられる。

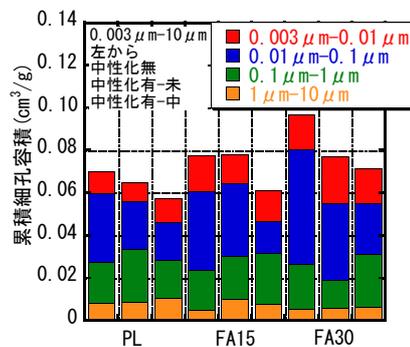


図-1 累積細孔容積

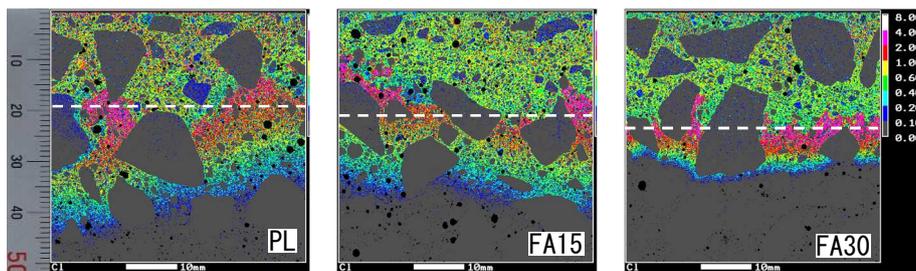


写真-1 EPMA面分析によるClマッピング画像(塩水浸漬試験, 中性化有)

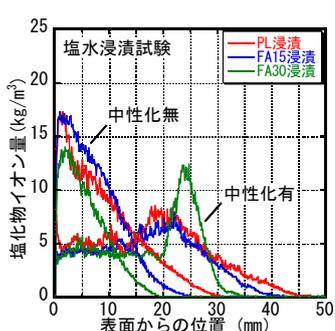


図-2 塩化物イオン量分布

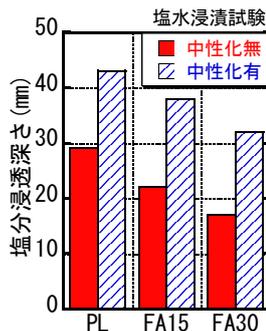


図-3 塩化物イオン浸透深さ

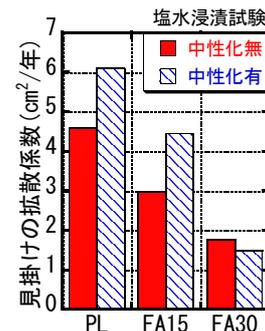


図-4 見掛けの拡散係数

(3) 塩水浸漬繰返し試験

①塩化物イオン分布 (EPMA 分析)

写真-2 に塩水浸漬繰返しを 15 週行った供試体の EPMA 面分析画像を示す。写真に示す白線は塩水試験開始前の中性化深さを示しており、PL, FA15, FA30 の順に 18.5 mm, 21.1 mm, 23.5 mm であった。なお、中性化無の試料は試験期間 13 週である。

図-5 に EPMA 分析結果から求めた塩化物イオン (以下、C1) 量の分布曲線を示す。図より、中性化無は表面付近に C1 量のピーク位置がみられるが、中性化有は中性化フロントより若干内部までピーク位置が移動していることがわかる。これは中性化の影響により固定化されていたフリーデル氏塩が可溶性の C1 となり、未中性化領域に移動・濃縮したことによるものと考えられる⁷⁾。また、中性化有において、FA 置換率の増加に伴い最大 C1 量は増加する傾向がみられた。これは MFA の未中性化領域における塩分浸透抵抗性が高く、中性化領域を通じて浸透した C1 に対して障壁となり、際立ったピークを示したものと考えられる。したがって、中性化位置が鉄筋近傍となり、かつコンクリートの塩分浸透抵抗性が高い場合には C1 の高濃度の濃縮が生じ、鉄筋腐食に対し悪影響を与える可能性が考えられる。

②塩化物イオン浸透深さ

図-6 に EPMA 面分析画像より求めた平均塩分浸透深さを示す。図より、中性化無は MFA 置換率の増加に伴い減少傾向がみられたが、中性化有は PL に比べ FA 混和の割合で塩分浸透深さが減少したものの、FA15 および FA30 で同程度となった。

③塩化物イオンの見掛けの拡散係数

また、図-5 から算出した C1 の見掛けの拡散係数を図-7 に示す。見掛けの拡散係数は、MFA 置換率の増加に伴い減少傾向がみられ、中性化の影響に関わらず MFA による塩分浸透抵抗性の向上が確認された。

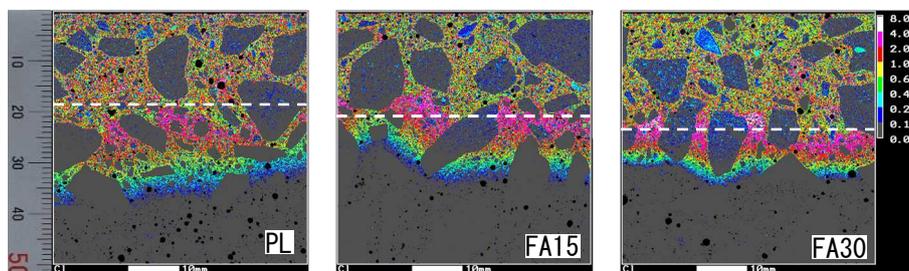


写真-2 EPMA 面分析による C1 マッピング画像 (塩水浸漬繰返し試験, 中性化有)

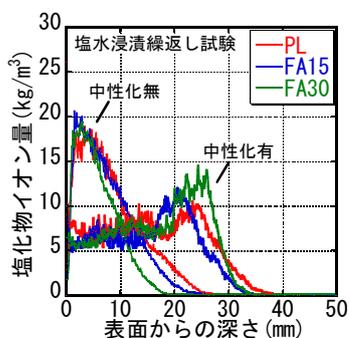


図-5 塩化物イオン量分布

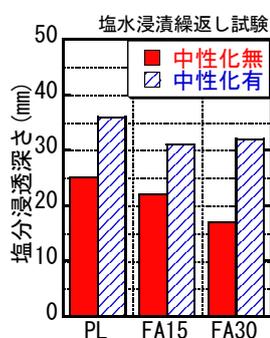


図-6 塩化物イオン浸透深さ

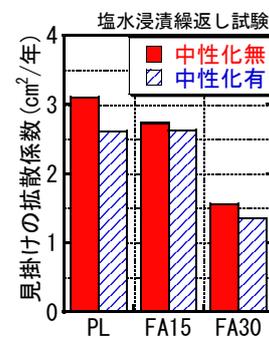


図-7 見掛けの拡散係数

④鉄筋腐食試験結果

図-8 に自然電位および腐食電流密度の経時変化を示す。図中の色分けは各判定基準^{8) 9)}を示している。

自然電位はかぶり 10mm において、中性化有の方が中性化無に比べ初期から -600 ~ -500 mV/CSE 程度を推移しており、鉄筋腐食が進行しやすいことが分かった。また、中性化有ではかぶり 20mm 側においても、MFA 混和による腐食抑制はみられず、一様に腐食確率の高い結果となった。

腐食電流密度はかぶり 10mm において、中性化有では MFA を混和した割合ほど腐食電流密度の増加が見られた。特に FA30 は、中性化無では 51 週時点において $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度だったのに対し、中性化有では $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超える供試体もみられた。中性化有において、特に MFA を混和した割合ほど腐食傾向を示したことについては、C1 の高濃度化が影響していると推察される。

⑤鉄筋の発錆面積率および質量減少率

試験終了後に取り出した鉄筋の発錆面積率および質量減少率を図-9 および図-10 に示す。図中には、目視による鉄筋腐食度の区分¹⁰⁾から判定した腐食グレードの 2 体の平均値を示す。かぶり 10mm においては、中性化前後で腐食グレードに大きな差はなかったが、かぶり 20mm では中性化有の場合に腐食が見られた。図より、かぶり 20mm において、発錆面積率は中性化無の場合

にはFA置換率の増加に伴い減少傾向にあるが、中性化により傾向が逆転した。また、質量減少率は、中性化有で値が大きくなっているが、FA置換率の増加に伴い減少しており、FAによる抑制効果がみられる。

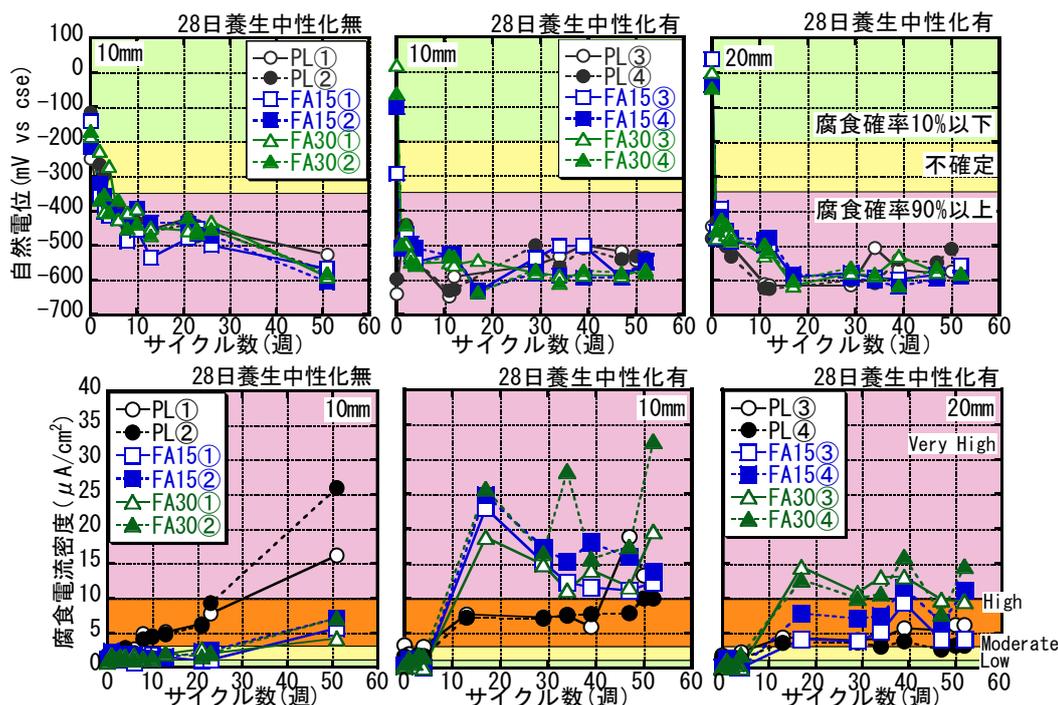


図-8 自然電位および腐食電流密度の経時変化

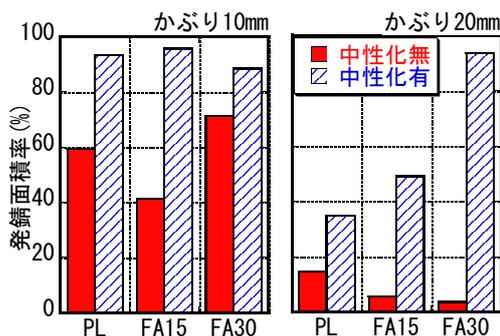


図-9 発錆面積率

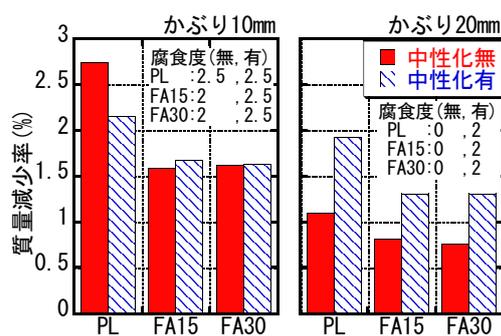


図-10 質量減少率

参考文献

- 1) 伊藤七恵: 改質フライアッシュを混和したコンクリートの強度, 乾燥収縮および中性化に関する研究, 博士論文, 2013
- 2) 三島剛: 加熱改質フライアッシュの混和がコンクリートの耐久性に及ぼす影響, 博士論文, 2016
- 3) 佐伯竜彦ほか: 混和材が塩害と中性化の複合劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 729-734, 2002
- 4) 大竹淳一郎ほか: EPMA によるコンクリート中の塩化物量の定量化に関する検討, 土木学会第 64 回年次学術講演集, V-162, pp. 321-322, 2009. 9
- 5) 古村惇朗ほか: フライアッシュコンクリート中の腐食発錆限界塩化物イオン濃度に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1012-1017, 2012
- 6) 細川佳史ほか: 各種セメント系材料を用いた相組成・空隙構造が異なるコンクリートの各種環境条件下における塩化物イオン拡散係数, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1027-1032, 2009
- 7) 小林一輔ほか: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 2, pp. 69-82, 1990
- 8) ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1999
- 9) Fahim Andrew et al., CEPRA-A new test method for rebar corrosion rate measurement, ASTM Selected Technical Paper, pp. 59-80, 2019. 2
- 10) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針 2022, p. 38, 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 児玉明裕, 大谷俊浩, 秋吉善忠, 古園隆倅	4. 巻 44
2. 論文標題 塩水浸漬繰返しによる加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に関する研究	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 490 - 495
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 児玉明裕, 大谷俊浩, 秋吉善忠, 古園隆倅	4. 巻 45
2. 論文標題 中性化が加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼす研究	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 -
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 児玉明裕
2. 発表標題 中性化が加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に及ぼす研究 (その1 硬化コンクリートの物性)
3. 学会等名 日本建築学会研究報告会 九州支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古園隆倅
2. 発表標題 中性化が加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に及ぼす研究 (その2 塩水浸漬繰返し試験結果)
3. 学会等名 日本建築学会研究報告会 九州支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 児玉明裕
2. 発表標題 加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの複合劣化における鉄筋腐食抵抗性に関する研究（その1 硬化コンクリートの物性）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古園隆倅
2. 発表標題 加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの複合劣化における鉄筋腐食抵抗性に関する研究（その2 未中性化コンクリートによる塩水浸漬繰返し試験結果）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 児玉明裕
2. 発表標題 中性化が加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に及ぼす研究（その3 中性化前後における塩分浸透抵抗性）
3. 学会等名 日本建築学会研究報告会 九州支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古園隆倅
2. 発表標題 中性化が加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に及ぼす研究（その4 中性化前後における塩水浸漬繰返し試験結果）
3. 学会等名 日本建築学会研究報告会 九州支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 児玉明裕
2. 発表標題 加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの複合劣化における鉄筋腐食抵抗性に関する研究（その3 中性化コンクリートによる塩水浸漬試験結果）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古園隆倅
2. 発表標題 加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの複合劣化における鉄筋腐食抵抗性に関する研究（その4 中性化コンクリートによる塩水浸漬繰返し試験結果）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大分大学理工学部創生工学科建築学コース コンクリート工学研究室 研究成果・業績 http://www.arch.oita-u.ac.jp/a-zai/achieve03.html</p>

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	秋吉 善忠 (AKIYOSHI YOSHITADA)	大分大学・理工学部・助教 (17501)	

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