

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01480

研究課題名（和文）水硬性を有しない副産粉体を大量利用したコンクリートの耐久性向上理論

研究課題名（英文）Improving the durability of concrete by using large quantity of by-product powders without hydraulic properties

研究代表者

小山 智幸（KOYAMA, TOMOYUKI）

九州大学・人間環境学研究院・准教授

研究者番号：50215430

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、代表者らが提案した方法により副産粉体を大量混合したコンクリートの耐久性向上を、実環境での暴露実験や実験室での促進試験により確認するとともに、硬化体組織の空隙構造との関係について検討を行った。その結果、中性化、塩害、化学劣化などコンクリートの硬化体組織の緻密化により抑制可能な劣化に関しては、大量混合による効果が顕著に確認された。また、中性化においては40-120nmの空隙量との相関が高いことが明らかとなった。さらに分担者が考案した表面吸水試験方法による耐久性評価の有用性が示された。一方、凍害に関しては一般的なコンクリートと同様、空気連行が不可欠であることも確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

石炭火力発電所で発生するフライアッシュやコンクリート用砕石を製造する際に生じる砕石粉などは、セメントとは異なり水と練り混ぜても硬化しないのでコンクリートに混合すると種々の性能低下の原因となる。このことがこれらの粉体の有効利用における障害となるが、本研究で検討した方法でコンクリートに混合することによりコンクリートの耐久性能を損なうことなく、むしろ向上させながら大量に有効利用可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the research team investigated the improved durability of concrete mixed with large quantity of by-product powders using the method proposed by the representatives through exposure experiments in real environments and accelerated tests in the laboratory, and also the relationship with the pore structure of the hardened concrete. As a result, it was confirmed that the concrete mixed large quantity of by-products has a significant effect on the deterioration that can be suppressed by densification of the hardened concrete structure. It was also revealed that carbonation has a high correlation with the amount of voids in the 40-120 nm range. Furthermore, the usefulness of durability evaluation using the surface water absorption test method devised by the co-author was demonstrated. On the other hand, it was also confirmed that air entrainment is essential in terms of frost damage, as is the case with general concrete.

研究分野：建築材料学

キーワード：副産粉体 有効利用 コンクリート 耐久性 外割混合

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする副産粉体の一つであるフライアッシュを例に述べると、発生量は我が国で約 1000 万トンを超え、全世界では確実なデータの得られた 2000 年頃すでに 5 億トンに達している。現在、国内のフライアッシュの大半はセメント原料の一つである粘土の代替として使用されており、その利用率も高い。しかし、セメントの生産量自体が減少傾向にあり、将来的に飛躍的な増大は期待できない。一方、残りはほとんどが埋立処分されているが、灰捨場の確保が年々難しくなりつつある現状を考慮すると、今後は埋め立て以外の方法に移行せざるを得ない。本来、フライアッシュはポゾラン活性など種々の優れた性質を具備しており、埋立てや単なる粘土の代替使用ではなく、より有効な活用が望まれる。このような中で最も注目されているのが、コンクリート混和材としての利用であるが、現状はフライアッシュをセメントの一部として、いわゆる内割使用するか、細骨材の一部として利用することが前提となっている。前者ではフライアッシュの混合量が大きくなるとセメントの使用量が減少するため強度や耐久性が損なわれる。

そのため、コンクリート 1m³ 当たりのフライアッシュの使用量に限度があり、現在 100kg 前後の混合が一般的となっている。後者の場合もフライアッシュの混合による強度や耐久性の向上は考慮されておらず、そのポテンシャルを活かした利用がなされているとは言いがたい。研究代表者らは、フライアッシュをはじめとする副産物のコンクリートへの大量混合を目的として研究を行い、単位体積当たりの混合量を大きくするためには、従来の内割混合ではなく、セメント量を一定として粉体を混合する外割混合の方が適していることを見出した。

図 1-1 に概念図を示すように、内割混合では粉体量が多くなると無混合の場合に比してセメント量が減るため、とくに初期材齢における強度低下が問題となる。一方、外割混合の場合は必要なセメント量を確保しながら粉体を混合するため強度低下がないと考えた。しかも実際には、図 1-2 に示すように外割混合したコンクリートは、無混合の場合よりも強度が高くなること明らかになった。後述するように、反応性を有さない砕石粉や石灰石粉を用いた場合でも若材齢時からこの強度性能向上は生じるので、この現象は、フライアッシュのポゾラン反応によるものではなく、別の物理的作用によるものであると判断された。一般に強度が高いコンクリートは耐久性も高くなる傾向にあることから、上記現象を応用することによりフライアッシュのみならず反応性を有しない他の副産粉体、例えば砕石を製造する際に副産する砕石粉などの産業廃棄物の有効活用を、コンクリートの重要な要求性能である耐久性を向上させながら、可能にすることができると考えこの研究を行った。

2. 研究の目的

一般に、ある副産物を別の製品の原材料として使用する場合には、図 2-1 の概念図のように、新材を用いる場合と比較して、①のように性能が新材と同じで製造コストが上がる場

内割混合	水	セメント	粉体	砂・砂利
一般の調査 (粉体無混合)	水	セメント		砂・砂利
外割混合	水	セメント	粉体	砂・砂利

図 1-1 粉体の内割混合と外割混合

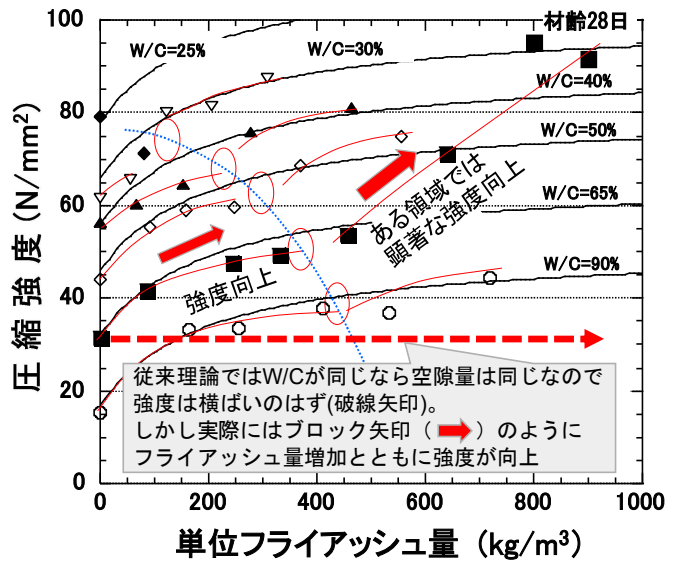


図 1-2 粉体混合量とコンクリートの圧縮強度

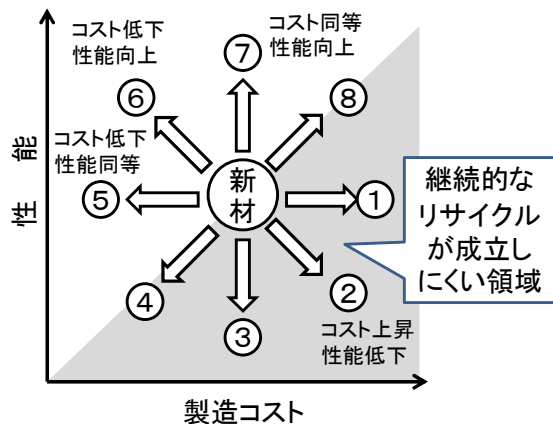


図 2-1 リサイクルにおける性能と製造コストの関係

合や、⑥のように性能が向上しコストも下がる場合などが想定される。資源循環においては後者が望ましいのは自明であり、前者は古紙の場合のようにグリーン購入法などの政策的、経済的な補助がなければ継続的なリサイクルとして成立しにくい。

コンクリートの製造量は年間1億m³近くあり、副産物を混和材料として受け入れるのに十分なキャパシティを有している。ただし、コンクリートは都市における重要なインフラ材料であり、その性能を損なうことは将来にわたって負の財産を遺すこととなる。フライアッシュは、コンクリートに一般に用いられるポルトランドセメントのような水硬性、すなわち水と化学反応を生じて硬化する性質を有していない。そのため通常は図2-1の③～④のパターンにおいて、混合による性能（具体的には強度や耐久性など）の低下が許容できる範囲でのみ使用され、現状ではごく一部がコンクリート用混和材として使用されているに過ぎない。本研究は、フライアッシュをはじめとする種々の非水硬性副産粉体を、コンクリートの性能を損なうことなく、むしろ向上させながら大量に有効利用するために不可欠な耐久性理論を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

図3-1に示すように、ある物質の性能はその内部に存在する空隙（＝欠陥）の量が多いほど低下する。空隙の量が多いと、強度においては、外力に耐える固体部分の体積が相対的に減少することのほかに、悪影響を及ぼす致命的な欠陥の存在確率が高くなるためであり、耐久性においては劣化原因となる物質の侵入や移動を遮断して劣化に耐える固体部分の体積が相対的に減少するためである。このような性質はコンクリートにおいても同様であり、実用上は、調合時の水とセメントの質量比、すなわち「水セメント比」によって性能がコントロールされる。

コンクリートの結合材として一般的な普通ポルトランドセメント（以下NPC）のみを用いる場合にはこの理論で支障ないが、NPCとは異なり反応性を有しない種々の副産粉体を混合する場合には、別の要因が加わる。例えばコンクリート内部の空隙の総量が同じであっても、使用する副産粉体の混合方法によっては空隙のサイズが細かくなり、圧縮強度や耐久性が向上することが代表者らによって確認されている。

図3-1に代表

される従来の性能理論によれば、強度や耐久性への影響は空隙のサイズとは無関係で空隙の量のみ支配されることになり、空隙構造の微細化による性能向上現象は従来の理論によっては説明できない（図3-2）。代表者らが提案した方法によれば、図3-1において空隙量が実線のパターンと同じでありながら、空隙が微細化されるため強度や耐久性が高くなる破線の状況が実現できる。

本研究では、実環境での暴露実験に実験室での促進試験を併用しながら、提案法により副産粉体を大量混合したコンクリートの耐久性向上を確認するとともに、空隙構造との関係について検討を行った。また長期にわたる実験において、定量的かつ連続的に劣化の状況の評価するため、各種非破壊試験方法の適用を試み、一部試験方法の提案を行った。なお、耐久性に関する本研究では劣化の評価に長期間を要することから、代表者らの先行研究で得られたデータも活用しながら上記の検討を行った。

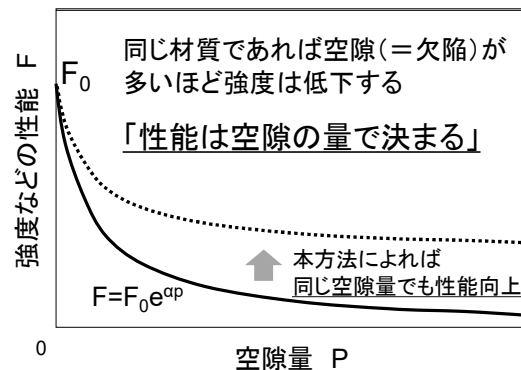


図3-1 物質の空隙量と性能の関係

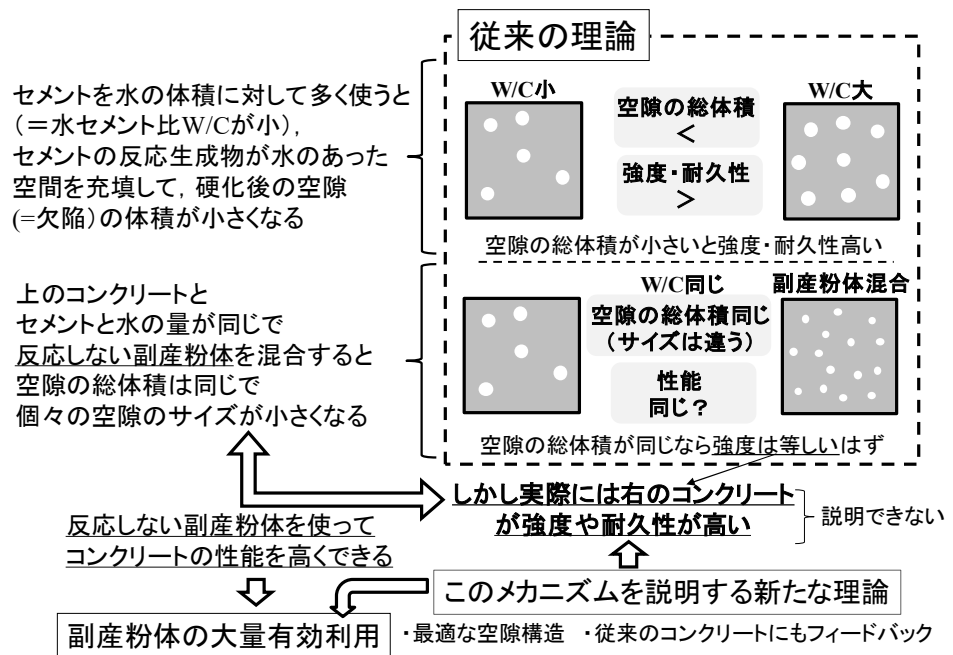


図3-2 本研究の着目点と目的

4. 研究成果

本研究に関連して得られた成果のうち、中性化、塩害、化学劣化、および凍害に対する検討結果について以下に示す。

1) 中性化抑制効果に関する検討

一般的な環境下において鉄筋コンクリート構造物の寿命を左右する中性化に関して、従来の内割混合では粉体の置換率が大きくなるほど中性化は大きくなってしまふのに対し、代表者らの方法により大量混合した場合には、副産粉体の混合量が向上するほど中性化が抑制されることが明らかである（図 4-1-1、各プロットは、上から W/C が 90, 65, 50, 40%）。また、中性化に関しては、40-120nm の細孔量が最も相関が高いことが明らかとなった（図 4-1-2）。

なお、中性化速度係数を非破壊で測定する方法として分担者が考案した表面吸水壊試験について、種々の粉体を用いたコンクリートに関して評価方法を提案し、その妥当性を確認した（図 4-1-3）。

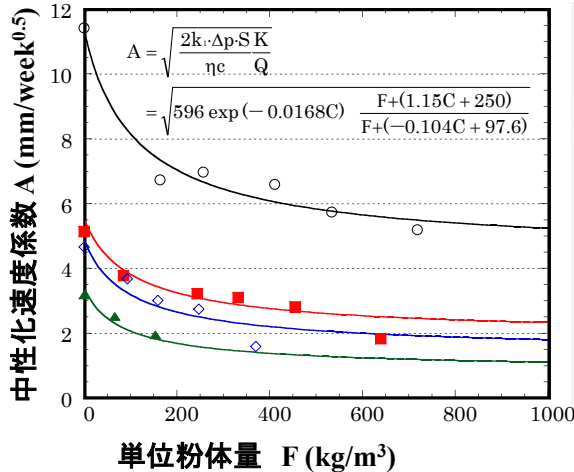


図 4-1-1 粉体量と中性化速度係数

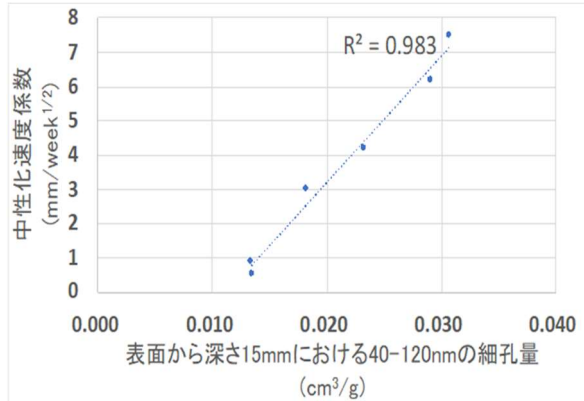


図 4-1-2 中性化速度係数と 40-120nm の細孔量の関係

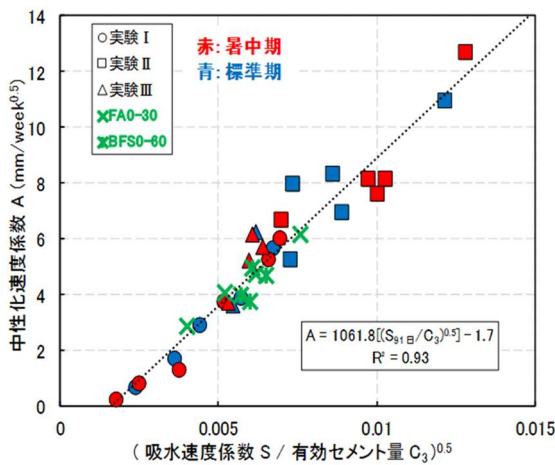


図 4-1-3 吸水速度係数による中性化速度の評価

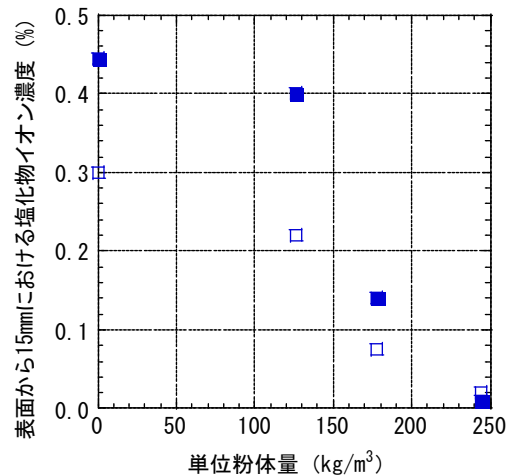


図 4-2-1 粉体量と塩分濃度

2) 塩分浸透抑制効果に関する検討

塩害環境において外部から飛来する塩分がコンクリート内部に浸透することを抑制するためには、コンクリートを緻密化することが効果的である。本方法で粉体を混合することにより、今回検討を行った混合量の範囲（945kg/m³まで）では比較的少量混合（244kg/m³）の範囲で検討を行った結果でも顕著な塩分浸透抑制効果が確認されている。図 4-2-1 は実験室での乾湿繰返し試験の結果であるが、実環境での暴露実験も継続して行っている。

3) 硫酸および硫酸塩による化学劣化に関する検討

代表的な化学劣化のひとつである硫酸環境に関して、まず、弱酸性の硫酸酸性環境における暴露状況と試験体の劣化過程の一例を図 4-3-1 に示す。同環境においては外部からの硫酸イオンの侵入を抑制することが劣化抑制において効果的であるが、右側写真や図 4-3-2 のように、粉体の混合量が大きくなるほど劣化が抑制されていることが明らかである。弱酸性の硫酸環境に関しては試験体を追加し、継続して暴露性状の観察を行っている。

強酸性の硫酸環境に関しては、一般に、水セメント比を低くして組織を緻密化させた高強度のコンクリートの方が劣化を生じやすいことがわかっている。ポルトランドセメントのみで緻密化を図っても硫酸によって浸食されやすいカルシウム化合物の体積割合が増加するためと考えられるが、本方法によりセメントではなく副産粉体によって組織を緻密化すると強酸性の硫酸環境にも有効であることが、図 4-3-4、図 4-3-5 から明らかである。



粉体量 945 640 455 332 244 85 0 (kg/m³)

図 4-3-1 弱酸性の硫酸環境における暴露実験の状況(左)と試験体の劣化状況(右)

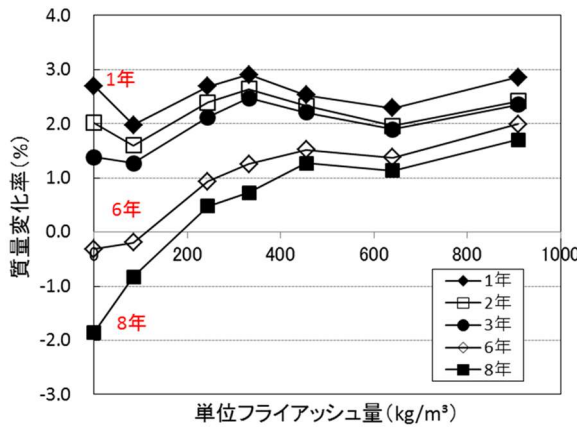


図 4-3-2 弱酸性の硫酸環境における質量減少

図 4-3-3 強酸性の硫酸環境における劣化状況

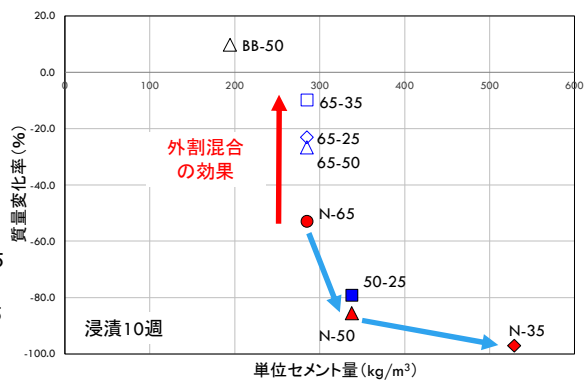
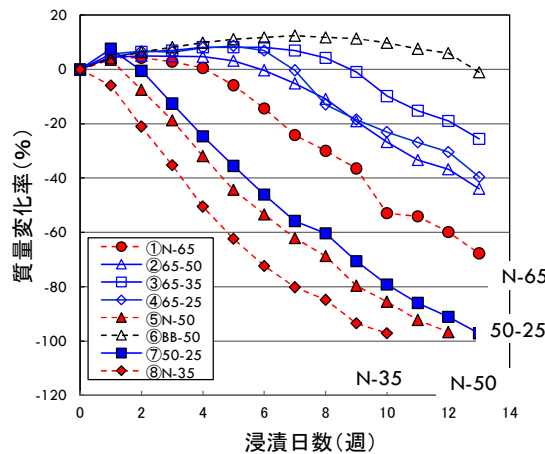


図 4-3-4 強酸性の硫酸環境における質量減少

図 4-3-5 強酸性の硫酸環境における粉体の外割混合による劣化抑制効果

酸性以外の化学劣化で代表的な硫酸塩による劣化に関しても、粉体の外割混合による組織の緻密化により抑制可能であることを確認している。

4) 凍害抑制効果に関する検討

凍結融解によるコンクリートの劣化に関しては、水セメント比の低減による組織の緻密化のみでは抑制効果が低く、エントレインドエアの連行によるクッション作用の利用が不可欠である。今回行った促進試験の結果からは、粉体の外割混合による組織の緻密化によっても耐凍結融解性の向上は見られず、本方法による場合でも空気連行は不可欠であることが確認された。

実環境においても早期に結果が得られるように形状を工夫した試験体を用いて凍害環境における暴露実験を継続している。

本研究では、代表者らが提案した方法により副産粉体を大量混合したコンクリートの耐久性向上を、実環境での暴露実験や実験室での促進試験により確認するとともに、空隙構造との関係について検討を行った。その結果、コンクリート組織の緻密化により抑制可能な劣化に関しては、大量混合による効果が顕著に確認され、また、例えば中性化においては40-120nmの空隙量との相関が高いことが明らかとなった。さらに分担者が考案した表面吸水試験の有用性が示された。一方、凍害に関しては一般的なコンクリートと同様、空気連行が不可欠であることも確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 徐 元遇, 白川 敏夫, 小山 智幸	4. 巻 819
2. 論文標題 表面吸水試験による種々のコンクリートの中性化予測	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本建築学会論文集	6. 最初と最後の頁 482-488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.89.482	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 Wonwoo Seo, Tomoyuki Koyama, Toshio Sirakawa, Daisuke Yamamoto, Gyuyong Kim	4. 巻 -
2. 論文標題 Rebar Corrosion of Fly-Ash Mixed Concrete according to the Placing Environment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 60th Anniversary of IBST 2023 International Conference	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) 10.59382/pro.intl.con-ibst.2023.ses2-14	査読の有無 無
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 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Wonwoo Seo, Tomoyuki Koyama, Toshio Sirakawa, Daisuke Yamamoto, Gyuyong Kim
2. 発表標題 Rebar Corrosion of Fly-Ash Mixed Concrete according to the Placing Environment
3. 学会等名 The 60th Anniversary of IBST 2023 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤是清, 小山智幸, 湯浅昇
2. 発表標題 フライアッシュ外割コンクリートの各種環境下における耐久性に関する研究 その4 弱酸性の硫酸環境における長期曝露実験 4
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小山智幸, 伊藤是清, 山本大介, 湯浅昇, 濱幸雄, 阿武稔也
2. 発表標題 九州におけるコンクリート構造物の凍害に関する研究 - 暴露実験の概要と途中経過 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 王寒冰, 伊藤是清, 小山智幸, 湯浅昇
2. 発表標題 フライアッシュ外割コンクリートの各種環境下における耐久性に関する研究 その4 弱酸性の硫酸環境における長期曝露実験 4
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倪楚淇, 小山智幸, 伊藤是清, 山本大介, 湯浅昇, 濱幸雄, 阿武稔也
2. 発表標題 九州におけるコンクリート構造物の凍害に関する研究 - 暴露実験の概要と途中経過 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長田武尚, 小山智幸, 白川敏夫, 山本大介, 徐元遇
2. 発表標題 フライアッシュを内割置換したコンクリートの内部鉄筋の腐食性状 コンクリートの表層品質が鉄筋腐食に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白川敏夫, 小山智幸, 前田禎夫, 彌永育代
2. 発表標題 混和材を使用したコンクリートの中酸化特性と表面吸水試験による中性化進行予測
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥村龍人, 小山智幸, 白川敏夫, 徐元遇
2. 発表標題 コンクリート表層性状の非破壊試験による評価に関する検証 中性化に影響を及ぼす細孔特性との比較
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倪楚淇, 小山智幸, 伊藤是清, 山本大介, 湯浅昇, 濱幸雄, 阿武稔也
2. 発表標題 九州におけるコンクリート構造物の凍害に関する研究 - 暴露実験の途中経過と凍害限界温度に関する検討 -
3. 学会等名 日本建築学会
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
研究 分担 者	湯浅 昇 (YUASA NOBORU) (00230607)	日本大学・生産工学部・教授 (32665)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	山本 大介 (YAMAMOTO DAISUKE) (40398095)	大分工業高等専門学校・都市・環境工学科・准教授 (57501)	
研究分担者	伊藤 是清 (ITO KOREKIYO) (50380663)	東海大学・文理融合学部・教授 (32644)	
研究分担者	白川 敏夫 (SHIRAKAWA TOSHIO) (60623387)	九州産業大学・建築都市工学部・教授 (37102)	

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