

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04642

研究課題名(和文) 蒸気養生したコンクリートの品質に対するフライアッシュの貢献度評価と高品質化の提案

研究課題名(英文) Evaluation of fly ash contribution to steam-cured concrete quality and enhancement of the quality

研究代表者

小川 由布子(Ogawa, Yuko)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教

研究者番号：30624564

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)：本研究では、蒸気養生したフライアッシュコンクリートを対象とし、コンクリートの強度発現性および物質移動抵抗性に対するフライアッシュの結合材としての性能についてセメント有効係数を用いて評価した。この結果、表層透気係数についても圧縮強度等と同様にセメント有効係数を用いてフライアッシュの貢献度を評価できることが明らかとなった。また、そのセメント有効係数は0.3から0.7程度であった。蒸気養生したフライアッシュコンクリートは、長期材齢において表層に粗大な空隙が残存していることがわかった。これに対し、規格外瓦により内部養生することで、細孔構造が緻密になり、コンクリートの品質向上の可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業副産物であるフライアッシュを用いたコンクリートに関する検討は多くあるが、コンクリートの物性とフライアッシュ自体の貢献や反応を結びつけた研究は少ない。本成果は、コンクリートの物性に対するフライアッシュの貢献度と反応性を結びつける成果であり学術的に意義がある。また、規格外瓦の内部養生により表層のコンクリート組織を緻密にできることを示唆しており、生産性が高いという長所を有した蒸気養生コンクリートの欠点を解消し高耐久化するという社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The performance of fly ash as a cementitious material on the strength development and mass transfer resistance of steam-cured fly ash concrete was evaluated using the cementing efficiency factor. The results showed that the contribution of fly ash to the surface permeability could be evaluated using the cementing efficiency factor as well as the compressive strength. The cementing efficiency factors ranged from 0.3 to 0.7. The steam-cured fly ash concrete had coarse pores remaining especially in the surface layer even at the long-term age of the material. In contrast, internal curing with off-specification roof tiles resulted in a denser pore structure, suggesting the possibility of enhancing the concrete quality.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：フライアッシュ 蒸気養生 強度発現性 物質移動抵抗性 セメント有効係数

## 1. 研究開始当初の背景

石炭火力発電の副産物であるフライアッシュは、セメントコンクリートに混和するとセメントの水和反応生成物である水酸化カルシウムと反応(ポゾラン反応)し組織を緻密にする。このポゾラン反応は穏やかであり、日本では主に水和熱低減を目的として使用されてきた。しかし、世界規模でフライアッシュの排出量が增大していることおよび環境負荷低減を考慮して、セメントコンクリート分野での活用促進が切望されている。セメントの代替材料としてのフライアッシュの活用は、古くから研究されているが、最近ではアルカリシリカ反応抑制や塩分浸透抵抗性の向上が再認識されつつある。北陸地方ではフライアッシュを分級することにより高品質化およびその品質の安定化を実現させ積極的に使用する体制整備が行われた。また、東北地方においては復興道路に未燃カーボン量を改質除去したフライアッシュの使用が試みられていた。しかし、これらの取組みにおけるフライアッシュは分級や改質が施された特別な品である。

フライアッシュが活用されない原因のひとつに、反応が緩やかであるフライアッシュをセメントに置換することによるコンクリートの初期強度の低下が挙げられる。これに対し、早強ポルトランドセメントや蒸気養生を用いるプレキャストプレストレストコンクリートへのフライアッシュの利用が積極的に検討されている。早強ポルトランドセメントの使用は高い初期強度が得られるほか、反応が早く水酸化カルシウムを早期に生成するため、フライアッシュの反応も活性化させる可能性がある。蒸気養生はセメントのみならずフライアッシュの反応も促進できるとされている。しかし、これらの検討はフライアッシュの反応、フライアッシュコンクリートの性能それぞれに着目している研究が多く、それらを結びつけて議論している研究はほとんどないのが現状であった。さらに、蒸気養生は、高温の供給やその後の早期気中曝露により表層のコンクリート組織が粗大になる可能性がある と報告されている。しかし、その粗大空隙が残存する範囲や物質透過性への影響は明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、フライアッシュを混和したプレキャストプレストレストコンクリートを対象とし、コンクリートの強度発現性および物質移動抵抗性に対するフライアッシュの結合材としての性能についてセメント有効係数を用いて評価するとともに、フライアッシュの反応に対する蒸気養生の効果とコンクリートの品質向上との関係を明らかにすることを目指し、蒸気養生したコンクリートの表層組織について再整理するとともに、内部養生による高品質化を提案することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、フライアッシュを混和したコンクリート供試体を作製した。フライアッシュは JIS A 6201 の II 種に適合するものを、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材および粗骨材は、石英斑岩の砕砂および砕石を使用した。内部養生による高品質化を検討するため、石州瓦の規格外品を 5 mm から 13 mm に破碎したものを内部養生材として使用した。コンクリートの水結合材比は 40%、フライアッシュ置換率は 0%、20%とした。内部養生材は粗骨材体積に対して 20%置換して使用した。セメント有効係数を算出するため、フライアッシュ置換率 0% の配合については、水セメント比を 30%および 60%としたコンクリートも作製した。養生はプレキャストプレストレストコンクリート部材を想定した蒸気養生を行った。具体的には、打込み後 20 の前置きを 3 時間施し、毎時 10 の速度で 50 に昇温し、50 を 5 時間維持した。その後、毎時 5 の速度で 20 まで降温し、24 時間後に脱型した。脱型後は、温度 20、相対湿度 60%の恒温恒湿室に静置した。また、比較のため、蒸気養生後 6 日間(材齢 7 日まで) 20 の水中養生を行なった供試体も用意した。

作製した供試体を対象に圧縮強度試験およびトレント法による透気試験、促進中性化試験を行なった。フライアッシュを混入していない配合について、各種物性と水セメント比(セメント水比)の関係を整理し、これを用いてセメント有効係数を算出した。算出したセメント係数を分析することにより、フライアッシュの貢献度を評価した。さらに、塩酸および炭酸ナトリウムを使用した選択溶解法によりフライアッシュの反応率を定量した。また、表層から内部への組織構造の変化を確認するため、曝露面から 5 mm ごとに試料を採取し、水銀圧入法による細孔径分布試験を行なった。

## 4. 研究成果

(1) 蒸気養生したコンクリートの表層透気係数は、標準的な養生を行なったコンクリートと同様に既往の研究において示されている水セメント比の関数で表すことができることを確認した。この関係を用いることにより、物質移動抵抗性に対するフライアッシュの結合材としての性能を表層透気係数に基づいたセメント有効係数によって評価可能であることが明らかとなった。また、図 1 および図 2 に示すとおり、蒸気養生したコンクリートにおいて、圧縮強度および表層透気係数に関するセメント有効係数は共に 0.3 から 0.7 程度であった。さらに、これらのセメン

ト有効係数はフライアッシュの反応率と相関があることを示した。なお、比較的初期に気中曝露される蒸気養生の場合であっても、表面含水率の低下が安定するまでには時間がかかる場合があり、表層透気係数は長期材齢における評価が必要であることを再確認した。

蒸気養生後に6日間の水中養生を施すことにより、セメント有効係数の長期材齢における増進が大きくなった。これは、蒸気養生直後の急激な水分蒸発を防ぐことができるためと考えられる。蒸気養生後の水中養生期間については、短縮できる可能性がないか今後検討する必要がある。

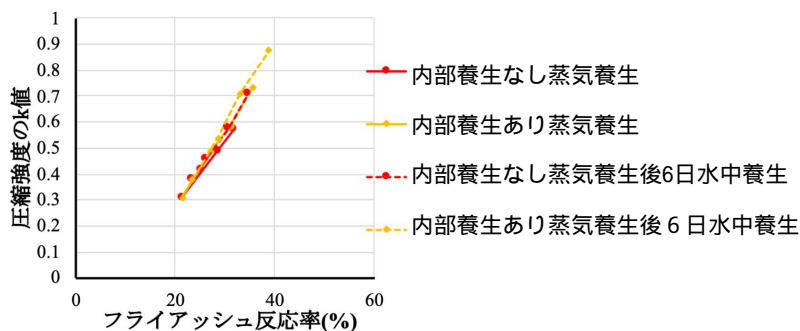


図1 圧縮強度に関するセメント有効係数とフライアッシュ反応率の関係

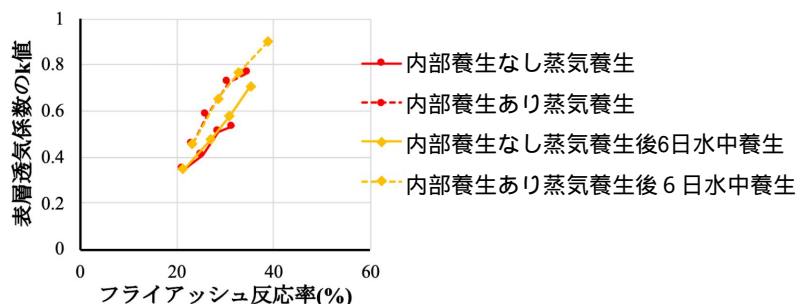


図2 表層透気係数に関するセメント有効係数とフライアッシュ反応率の関係

(2) 蒸気養生したフライアッシュコンクリートの材齢 91 日の細孔径分布試験結果を図 3 に示す。表層には粗大な空隙が多く残存していることがわかった。これに対し、規格外瓦による内部養生した場合、表層および内部の組織が緻密になった。規格外瓦を用いて内部養生した蒸気養生フライアッシュコンクリートは、圧縮強度が向上し、促進中性化抵抗性が向上した。また、同程度の表面含水率における表層透気係数も小さくなる傾向があり、規格外瓦による強度発現性および物質移動抵抗性が向上する可能性が示唆された。一方、規格外瓦の内部養生による表層品質の向上（表層透気係数の低下）は、強度発現と比較して小さかった。

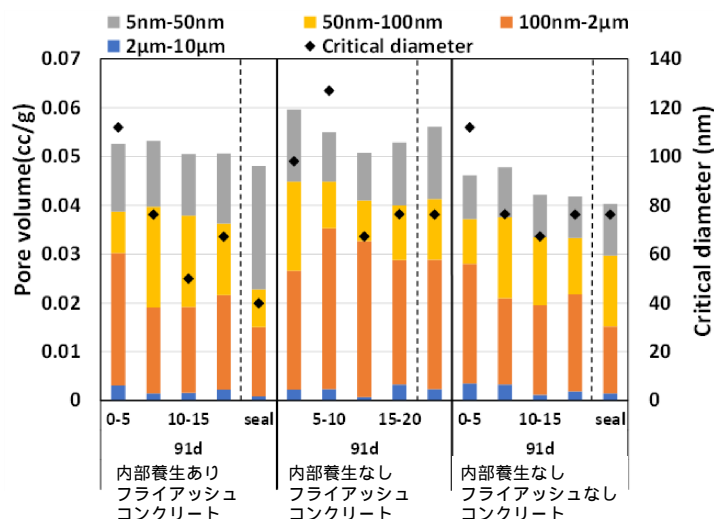


図3 蒸気養生したフライアッシュコンクリートの細孔構造 (0-5 : 暴露面から 0-5mm)

(3) 蒸気養生したフライアッシュコンクリートは、規格外瓦による内部養生により品質が向上する可能性があるものの、この規格外瓦の粒径や混入量による内部養生の影響の違いを明らかにする必要があることがわかった。今後は、内部養生の効果に対する規格外瓦の粒径や混入量の影響をコンクリートの物性、内部養生水の蒸発、セメントやフライアッシュの反応の観点から詳細に検討する必要がある。

#### 参考文献

- 久保哲司、参納千夏男、蟹谷真生、鳥居和之、フライアッシュコンクリートの社会実装を目的とした技術開発 北陸地方での経緯と実績、コンクリート工学、54 巻、9 号、2016、914-919
- 久田真、佐藤嘉昭、新田裕之、磯上秀一、佐藤貴之、檜垣誠、加熱改質フライアッシュを使用したコンクリート、コンクリート工学、57 巻、1 号、2019、46-50
- 向俊成、二戸信和、平尾宙、坂井悦郎、高エーライトセメント-フライアッシュ-石灰石微粉末系の水和反応と硬化体の細孔構造、セメント・コンクリート論文集、71 巻、1 号、2018、

154-160

富山潤、須田裕哉、佐伯竜彦、佐藤道生、蒸気養生を受けるフライアッシュコンクリートの強度発現特性に関する基礎研究、セメント・コンクリート論文集、66巻、1号、2012、359-366

杉木六郎、コンクリートの促進養生、コンクリートジャーナル、12巻、8号、1974、1-14  
Barbara Lothenbach, Frank Winnefeld, Corinne Alder, Erich Wieland, Peter Lunk, Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 27, 2007, 483-491

大沢栄也、坂井悦郎、大門正機、フライアッシュ-セメント系水和におけるフライアッシュの反応率、セメント・コンクリート論文集、53巻、1999、96-101

Roberto J. Torrent, Rui D. Neves, Kei-ichi Imamoto, Concrete permeability and Durability performance from theory to field application, CRC press, 2022, 189-195

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小川由布子、三吉勇輝、河合研至	4. 巻 76
2. 論文標題 強度発現に関するフライアッシュのセメント有効係数に及ぼす養生温度の影響	5. 発行年 2023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 342-348
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14250/cement.76.342	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鈴木慎也、小川由布子、河合研至
2. 発表標題 蒸気養生したフライアッシュコンクリートの表層品質に対する廃瓦細骨材の影響
3. 学会等名 第74回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本洋平、小川由布子、河合研至
2. 発表標題 蒸気養生および内部養生したコンクリートの性能に対するフライアッシュの貢献度評価、
3. 学会等名 第75回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡本和馬、陰迫良、小川由布子、河合研至
2. 発表標題 蒸気養生および内部養生したフライアッシュコンクリートの圧縮強度および表層透気係数に対するフライアッシュの貢献度評価
3. 学会等名 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 Kazuma Okamoto, Ryo Insako, Yuko Ogawa, Kenji Kawai
2. 発表標題 Microscopic Investigation on Interfacial Transition Zone in Fly Ash Cement Hydrates Using Roof-Tile Waste Aggregate
3. 学会等名 The Second International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本和馬、陰迫良、小川由布子、河合研至
2. 発表標題 フライアッシュセメントペースト中の廃瓦粗骨材周辺に形成される遷移帯の微視的検討
3. 学会等名 第74回セメント技術大会
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
---------	---------