

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14708

研究課題名(和文)材料構成に基づいたフライアッシュの強度発現性能評価と高耐久コンクリートへの応用

研究課題名(英文)Evaluation of fly ash performance on strength development based on material composition and its application to highly durable concrete

研究代表者

小川 由布子(Ogawa, Yuko)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：30624564

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、石炭火力発電の副産物であるフライアッシュの強度発現性能を表すセメント有効係数(k値)について、早強ポルトランドセメントをベースとして再整理し、さらに養生環境の影響を検討した。この結果、早強ポルトランドセメントを用いた配合におけるk値は、普通ポルトランドセメントの場合よりも小さいこと、また蒸気養生を行った場合に小さくなるが、これは内部養生により補うことができる可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

石炭火力発電の副産物であるフライアッシュは良質なポゾランであるが、養生環境や配合条件に反応が影響を受けること、また化学成分等品質が一定でないことから汎用されていない。本研究では、フライアッシュの強度発現性能を表すセメント有効係数(k値)について、生産性向上において着目されているプレキャストプレストレストコンクリートへの適用を念頭に、早強ポルトランドセメントをベースとして再整理した。さらに蒸気養生により低下する性能を内部養生により回復できる可能性を示し、これらの成果により高耐久コンクリートへのフライアッシュ利用の促進が期待される。

研究成果の概要(英文):The present study aimed to utilize fly ash for cementitious material in precast prestressed concrete, and the cementing efficiency factor of fly ash on the strength development of concrete using high-early-strength Portland cement (HPC) and the effect of curing condition on it were investigated. The results indicated that the k-values in HPC concrete were lower than that in ordinary Portland cement concrete. Additionally, it was found that the internal curing can solve the problem that the k-values under the steam curing condition cannot increase at later ages.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：フライアッシュ 早強ポルトランドセメント セメント有効係数 圧縮強度 置換率 蒸気養生 内部養生

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した場合、セメントの水和生成物である水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) とポズラン反応し、組織を緻密にする良質なポズランの一種である。このポズラン反応が穏やかであるため、日本では主に水和熱の低減を目的として使用されていたが、近年、国内外問わず排出量が増加していること、また環境負荷低減の観点から有効利用が切望されている。セメントの代替材料としてのフライアッシュの利用については、フライアッシュの混和による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して高品質化および品質を安定化させ積極的に使用する体制が整われたり、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が使用されたりと、各地方において改良されたフライアッシュを用いた取組みが盛んに行われてきている。しかし、これらの取組みもフライアッシュは分級や改質が行われており、JIS A 6201 を満足するフライアッシュ II 種を汎用するには至っていない。

フライアッシュが広範囲に使用されない理由として、(1)セメントに置換して用いた場合のコンクリートの初期強度が低いこと、(2)湿潤養生がより長く必要であること、(3)フライアッシュの品質が不安定であることなどが挙げられる。最近では、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 (PCaPC) へのフライアッシュの利用が勃勃と検討されており、生産性向上および高耐久コンクリートとして活用範囲を広げている PCaPC へのフライアッシュの利用[例えば 1、2 等]が広範囲に行われれば、課題(1)は解決される可能性が高い。課題(2)は、コンクリートの表層品質の向上を目的とした撥水シール等による長期封かん養生により解決できる。また、報告者らは多孔質である規格外屋根瓦を吸水させて内部養生材として混入することにより、フライアッシュコンクリートの強度および塩分浸透抵抗性が向上することが示しており[3、4]、内部養生によっても解決できると考えられる。課題(3)について、フレッシュコンクリートにおける課題については専用の混和剤が開発されており解決される可能性が高い。硬化コンクリートの性能については、セメント有効係数 (k 値) の整備により解決できると考えられる。

k 値は、国内外で単位量のフライアッシュの性能を表す指標として検討されてきた。k 値は $(C+k \cdot F)/W=(C/W)_{eq}$ で表される[5]。ここで、C、F、W はセメント、フライアッシュ、水の単位量を示し、 $(C/W)_{eq}$ はフライアッシュを混和していない場合の圧縮強度とセメント水比の関係から、フライアッシュを混和した場合の強度を発揮するために必要なセメント水比を示している。これは、フライアッシュの強度発現性能をポルトランドセメントの強度発現性能に対する比率で表した値である。ISO 22965 においても、フライアッシュの強度発現性能を考慮した配合設計を行うために k 値 (k-value) が導入されており、最近でも k 値に関する実験的検討およびデータ収集と整備が試みられている[例えば、6、7 等]。報告者らは、低置換率使用におけるフライアッシュの強度発現効果について k 値を用いて検討し[8]、低置換率で混和した場合に、フライアッシュが強度発現性能を顕著に発揮することを示した。また、置換率が大きい場合 (35%) は、長期材齢においても k 値が小さい値に留まることを示し、k 値が置換率によって大きく変化することを明らかにした。しかし、前述の ISO における k 値の数値は各国の裁量に任されており、日本における k 値の導入に際しても、材齢ごとに、k 値は一定値で提案されている[9]。このように日本では k 値を用いた配合設計手法が確立されていないため、高耐久 PCaPC へのフライアッシュ利用の促進を加速できていない現状にあった。

2. 研究の目的

上記のとおり石炭火力発電の副産物であるフライアッシュは良質なポズランであるが、養生環境や配合条件に反応が影響を受けること、また化学成分等品質が一定でないことから汎用されていない。そこで本研究では、フライアッシュの強度発現性能を表すセメント有効係数 (k 値) について、早強ポルトランドセメントをベースとして再整理し、置換率のほかフライアッシュおよびセメントの材料特性を総合した指標で定式化することを目的とした。さらに k 値の変化に対する養生環境の影響を検討し、フライアッシュ使用における材料構成面での問題点を解決する設計手法を応用することにより、高耐久コンクリートへのフライアッシュ利用を促進することを最終目標とした。

3. 研究の方法

(1) 早強ポルトランドセメントコンクリートにおけるフライアッシュの k 値に関する実験

コンクリートを対象とし、早強ポルトランドセメントをベースとした場合の k 値を算出し、k 値とフライアッシュの反応率との相関を確認するため、ペースト部を対象として反応率等の検討を要素実験として行った。フライアッシュは、JIS A 6201 の II 種に適合するものを使用した。コンクリートの配合は、単位水量を $170\text{kg}/\text{m}^3$ 、水結合材比を 50% とし、フライアッシュの置換率は、セメント質量に対し 0%、20% および 40% とした。セメント有効係数を算出するため、ポルトランドセメントのみを使用した場合については水セメント比 40% および 60% の配合も用意した。空気量は、 $5.0\% \pm 0.5\%$ となるように混和剤を使用して調整した。打込み後、すべての供試体の養生は 20°C の封かん養生とした。なお、比較のため、普通ポルトランドセメントを用いた場合についても同様に検討した。試験材齢は、3 日、7 日、28 日、91 日、半年、1 年とした。さら

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

に、ペーストを対象とした要素実験では、前述のコンクリートと同じ配合条件および養生条件のペースト供試体を準備し、フライアッシュのポズラン反応による水酸化カルシウム消費量を求めるほか、選択溶解法を用いたフライアッシュの反応率試験[10]、水銀圧入法を用いた細孔径分布試験を行った。コンクリート供試体を用いて得られた圧縮強度試験結果より、強度発現に対するフライアッシュの k 値を算出し、ペースト供試体を対象とした要素実験によって得られた結合材（特にフライアッシュ）の反応と共に考察した。

(2)PCaPCを対象としたモルタルにおけるフライアッシュの k 値に関する実験

PCaPCを想定したモルタルを対象とし、早強ポルトランドセメントフライアッシュモルタルにおけるフライアッシュの k 値に対する養生環境の影響を検討した。検討した養生環境は、(a)フライアッシュの反応促進および初期強度の確保の観点から適用が検討されつつある蒸気養生、(b)蒸気養生の温度履歴を与えた封かん養生、(c)20°Cの封かん養生に加え、(d)長期湿潤養生を目的とした内部養生とした。(a)蒸気養生および(b)温度履歴養生には、3時間の20°C前養生の後、最高温度50°Cまで速度10°C/時で昇温し、細孔温度を5時間維持し、その後20°Cまで速度5°C/時で降温する、一般的なPCaPCに与えられる温度履歴を採用し、材齢1日後に脱型し、温度20°C、相対湿度60%に試験材齢まで静置した。内部養生は、廃瓦細骨材を細骨材の20%混入することにより行なった。水結合材比は40%とし、フライアッシュは、セメント質量に対し0%、20%および40%置換した。(1)と同様に、 k 値を算出するため、早強ポルトランドセメントのみを使用した場合については水セメント比40%および60%の配合も用意した。作製したモルタル供試体は各養生後、7日、28日および91日に圧縮強度試験を行い、 k 値を算出した。ペーストを対象とした要素実験では、フライアッシュのポズラン反応による水酸化カルシウム消費量を求めるほか、選択溶解法を用いたフライアッシュの反応率試験、水銀圧入法を用いた細孔径分布試験を行った。モルタル供試体を用いて得られた圧縮強度試験結果より、強度発現に対するフライアッシュの k 値を算出し、ペースト供試体を対象とした要素実験によって得られた結合材（特にフライアッシュ）の反応と共に考察した。

4. 研究成果

(1)早強ポルトランドセメントコンクリートにおけるフライアッシュの k 値

図1に実験より得られたすべての配合におけるコンクリートの強度発現に対するフライアッシュの k 値を示す。なお、横軸は材齢の対数表示とし、土木学会により発刊された指針試案において提案されている値[9]も付記している。早強ポルトランドセメントを使用した場合の k 値は、普通ポルトランドセメントをベースとした場合より小さく、土木学会指針試案[9]により提案されている値よりも小さいことが明らかとなった。これは早強ポルトランドセメントコンクリートが普通ポルトランドセメントコンクリートよりも特に初期に高い強度を発現しているため、セメントに対する性能である k 値に反映されていると考えられる。

普通ポルトランドセメントを用いフライアッシュ置換率20%の場合を除いたすべての配合において、材齢7日まで k 値はほとんど0でありフライアッシュはコンクリートの強度発現に貢献していないことが確認された。普通ポルトランドセメントをベースのセメントとした場合、材齢7日以降に k 値が材齢の対数値に対して直線的に大きくなった。これに対し、早強ポルトランドセメントフライアッシュコンクリートの場合、材齢28日以降にこの傾向が見られた。この傾きは、フライアッシュ置換率によって異なるものの、セメント種類の相違による違いはほとんど見られなかった。

普通ポルトランドセメントフライアッシュコンクリートおよび早強ポルトランドセメントフライアッシュコンクリートの両者においても、フライアッシュ置換率20%の場合の k 値がそのほかの置換率(30%および40%)と比較して大きくなった。また、置換率の影響はセメント種類に寄らないことが明らかとなった。

図2にフライアッシュの反応率と k 値の関係を示す。普通ポルトランドセメントフライアッシュコンクリートの場合、フライアッシュの反応率が5%程度以上であれば k 値が0より大きい値を示したが、早強ポルトランドセメントフライアッシュコンクリートの場合、フライアッシュの反応率が20%以上となって k 値が0以上となった。これはフライアッシュのポズラン反応による強度貢献は反応率が20%以上の場合に発揮され、普通ポルトランドセメントを用いた場合のそれより小さい範囲の貢献はフィラーとしての効果またはセメントの反応促進の効果によるものであることが示唆している。示差熱質量分析試験による水酸化カルシウム量およびフライアッシュのポズラン反応による水酸化カルシウム消費量の結果はこれを支持するものであった。 k 値がベースのセメントの性能に対する値であるため、セメント種類を包含した指標で定式化できないことが明らかになったものの、フライアッシュの反応率20%以上の範囲では、セメント種類ごとに k 値がフライアッシュ反応率の一次式で表現できる可能性がみられた。これは、フライアッシュ反応率を予測もしくは把握できれば、フライアッシュの強度発現性能を表す k 値を予測することができる可能性があること示している。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

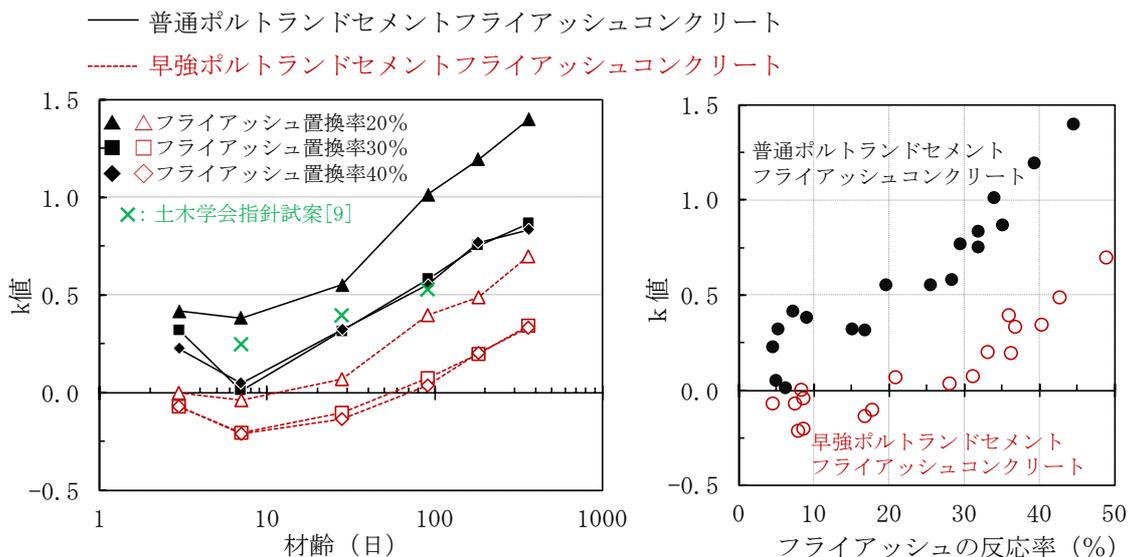


図1 フライアッシュのセメント有効係数k値

図2 フライアッシュの反応率とk値の関係

(2) PCaPC を対象としたモルタルにおけるフライアッシュのk値

PCaPC を対象とした早強ポルトランドセメントフライアッシュモルタルの各養生環境におけるk値を図3に示す。(a)蒸気養生、(b) 蒸気養生の温度履歴を与えた温度履歴養生、(c) 20℃封かん養生において、フライアッシュ置換率が20%の配合において40%よりもk値が大きくなった。これは、(1)の結果と整合するものであり、水酸化カルシウム消費量等、各種化学分析結果からも説明できるものであった。また同様に、すべての養生の場合に、廃瓦骨材を用いた内部養生を施した場合にk値が大きくなった。これは、内部養生によりセメントの水和だけではなく、フライアッシュの反応が促進され、強度発現に貢献していることを示している。特に蒸気養生の場合にこの効果が大きい、これは蒸気養生後、供試体から蒸散する水分を内部養生により補い、長期材齢におけるフライアッシュのポゾラン反応を促進していると考えられる。温度履歴養生と比較して蒸気養生の場合に効果が高いことから、内部養生により特にPCaPCの表層品質を向上できる可能性があることが示唆された。一方、20℃封かん養生の場合、コンクリートを用いた実験(1)よりも全体としてk値は高くなったが、この原因については明らかにできなかった。

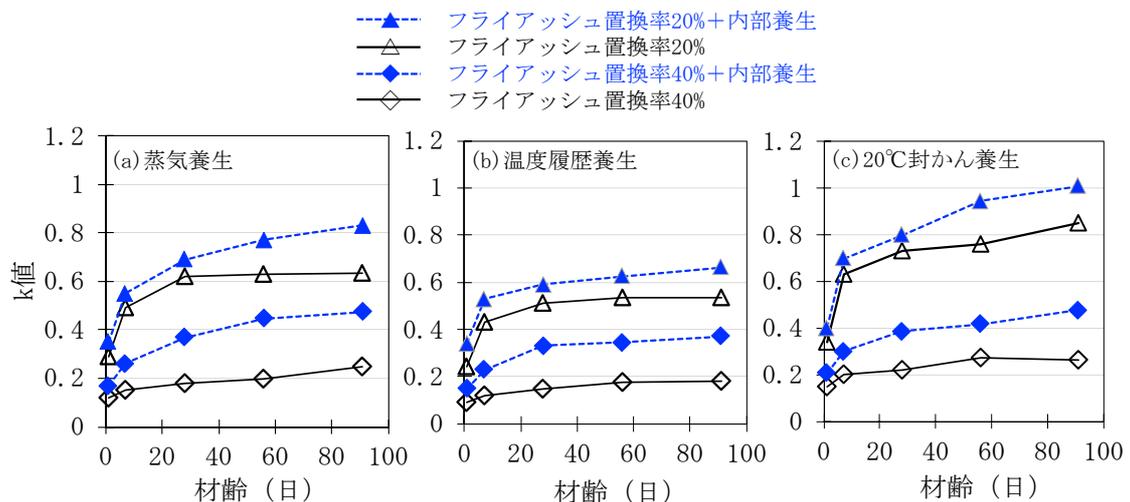


図3 各養生環境における早強ポルトランドセメントフライアッシュモルタルのk値

以上のとおり、フライアッシュの強度発現性能を表すセメント有効係数(k値)は、早強ポルトランドセメントをベースとした場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも小さくなることを明らかにした。k値がベースのセメントの性能に対する値であるため、セメント種類を包含した指標による定式化に至らなかったものの、フライアッシュの反応率が20%程度よりも高い範囲で、置換するセメント種類ごとにフライアッシュの反応率の一次式で表現できる可能性があることを明らかにした。さらに、PCaPCを想定した蒸気養生を行った場合、蒸気養生後の気中曝露によりフライアッシュの反応は滞りk値が長期材齢に増進しないこと、さらに内部養生によりこの問題を解決し、より高耐久とできる可能性があることを明らかにした。

<引用文献>

- [1] Tarun R. Naik, Bruce W. Tamme: High Early Strength Concrete Containing Large Quantities of Fly Ash, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 2, pp. 111-116, 1989.
- [2] 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、Vol. 66、pp. 359-366、2012
- [3] Phuong Trinh Bui, Yusuke Muragishi, Yuko Ogawa, Kenji Kawai and Ryoichi Sato: Effects of Porous Ceramic Waste Aggregate as an Internal Curing Agent on Steam-Cured High Strength Fly Ash Concrete, Proceedings of the International Conference on Sustainable Structural Concrete, pp. 66-76, 2015. 9.
- [4] 村岸祐輔、小川由布子、河合研至、佐藤良一: 蒸気養生したフライアッシュコンクリートの耐久性に対する廃瓦粗骨材の内部養生効果、セメント・コンクリート論文集、Vol. 68、pp. 337-344、2015. 3.
- [5] Iran A. Smith: The Design of Fly-ash Concretes, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 36, pp. 769-790, 1967.
- [6] K. Ganesh Babu, G. Siva Nageswara Rao: Efficiency of fly ash in concrete with age.” Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 3, pp. 465-474, 1996.
- [7] Katherine Kuder, Dawn Lehman, Jeffery Berman, Gudmundur Hannesson, Rob Shogren: Mechanical Properties of Self Consolidating Concrete Blended with High Volumes of Fly Ash and Slag, Construction and Building Materials, Vol. 34, pp. 285-295, 2012.
- [8] 小川由布子、寺川麻美、宇治公隆、上野敦: モルタルの強度発現性状におけるフライアッシュの性能評価、土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集、部門 V、V-486、pp. 971-972、2010. 9.
- [9] 土木学会: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術-利用拡大に向けた設計施工指針試案-、コンクリートライブラリー132、pp. 84-87、2009.
- [10] 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、No. 53、pp. 96-101、1999.

※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、研究者個人に帰属されます。

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 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogawa Yuko、Bui Phuong Trinh、Kawai Kenji、Sato Ryoichi	4. 巻 236
2. 論文標題 Effects of porous ceramic roof tile waste aggregate on strength development and carbonation resistance of steam-cured fly ash concrete	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 117462 ~ 117462
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117462	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 該当する

1. 著者名 Huyhn Tan Phat、Miyoshi Yuki、小川由布子、河合研至	4. 巻 41
2. 論文標題 An investigation on correlation between fly ash reaction and cementing efficiency factor for strength development of concrete	5. 発行年 2019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 245 ~ 250
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 陰迫 良
2. 発表標題 蒸気養生・内部養生を施したフライアッシュモルタルの強度発現性能に対するセメント有効係数の検討
3. 学会等名 第74回土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Miyoshi Yuki
2. 発表標題 Effect of Curing Temperature on Degree of Fly Ash Reaction and Contribution of Fly Ash to Strength Development of Mortar
3. 学会等名 The 3rd ACF Symposium on Assessment and Intervention of Existing Structures (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----