

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820191

研究課題名(和文)材料構成に基づくフライアッシュの強度発現性能評価手法の提案

研究課題名(英文)Evaluation of cementing efficiency of fly ash on strength development based on material composition

研究代表者

小川 由布子(Ogawa, Yuko)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・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、モルタルおよびコンクリートの強度発現に対するフライアッシュの結合材としての性能を表すセメント有効係数 k が、フライアッシュの置換率によって変化することを示した。また、この変化するセメント有効係数を配合選定段階で把握することを目的に、結合材の成分により評価を行い、フライアッシュ中の SiO_2 とセメント中の C_3S と C_2S の和の比によって評価できることがわかった。さらに、内部養生によりフライアッシュの強度発現性能が向上することも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The present study shows that an equivalent factor (k -value) of fly ash, which indicates the contribution of fly ash as cementitious material to the strength development of mortar or concrete, can vary with the replacement ratio of fly ash. The k -value was investigated by composition of cementitious material in order to design a mix proportion of fly ash concrete by evaluating water to cement ratio with k -value. As a result, the k -value can be evaluated by the amount ratio of SiO_2 in fly ash to C_3S and C_2S in cement. In addition, the performance of fly ash can be improved by curing internally.

研究分野：土木工学

キーワード：フライアッシュ コンクリート 圧縮強度 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、良質なポゾランであり、これまで主に水和熱低減を目的にマスコンクリート構造物に使用されてきた。環境負荷抑制の観点から、今後は広範囲にフライアッシュをセメントの代替材料として使用していく必要がある。日本では、2009年に土木学会コンクリート委員会から、フライアッシュコンクリートの性能を定量化し設計および施工に活用可能にすることを目的として、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[1]が発刊され、配合設計においては、フライアッシュの長期強度発現性を活かすため材齢91日の圧縮強度を標準とした設計基準強度を用いること、およびセメント有効係数(以下、k値とする)を用いてフライアッシュの強度発現性能を数値化することが提案されている。この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おり[2]、フライアッシュの反応は、配合条件によって変化し、これに伴う強度発現性への貢献も変化すると考えられる。すなわち、k値は材料構成によって変化する。一方、ISO22965におけるk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、材齢ごとに一定値で示されており、フライアッシュの有効利用に向けた配合設計法はさらなる発展の余地を残している。フライアッシュの性能をよりの確に評価し、さらなる有効利用が望まれている。

参考文献

- [1]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
- [2]A.HASSABALLAH and H.WENZEL: A Strength Definition for the Water to Cementitious Materials Ratio, Proceedings of 5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-153, Vol.1, pp.417-437, 1995

2. 研究の目的

本研究では、配合条件および化学成分に基づいた材料構成に着目し、フライアッシュの強度発現性能の変化を配合選定段階で把握し、フライアッシュの有効利用を促進することを目標としている。置換率に加え、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によ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を定式化し、フライアッシュしよにおける材料構成面での問題を解決することを目的とする。

3. 研究の方法

モルタルを対象とした基礎実験データの採取を行った。セメントには、研究用セメン

ト、フライアッシュはJIS A 6201のII種に適合するもの、細骨材は表乾密度2.63g/cm³、吸水率1.45%の砕砂を使用した。セメントとフライアッシュの化学組成を表-1に示す。配合は、水結合材比を50%、ペーストと細骨材の容積比を1:1の一定とした。フライアッシュの置換率は、セメント質量に対し、0%、15%、25%および35%とした。

k値を実験に基づき算出するため、フライアッシュを混和していない水セメント比40%および60%の配合も用意した。

打込み後、20℃水中養生し、材齢3日、7日、14日、28日、91日にて圧縮強度試験を行い、圧縮強度およびこれに基づくk値について検討した。さらに、同材齢における試料を用いて水銀圧入による細孔径分布試験を行い、細孔構造との対応を確認した。

また、上記と同様の試験を単位水量は、165kg/m³のコンクリートにおいても行った。

4. 研究成果

(1) フライアッシュモルタルおよびコンクリートの強度発現に対する置換率の影響

図-1にフライアッシュを混和したモルタルの強度発現性状を示す。フライアッシュを混和していないモルタルは、56日以降ほとんど強度増進していないが、フライアッシュモルタルは強度増進を続け、置換率15%および25%の場合に無置換モルタルと同等の強度となった。置換率35%の場合、強度増進は継続するが、置換率15%および25%と比較して強度が小さい。このことから、フライアッシュの圧縮強度への貢献度が置換率の影響を受けることがわかった。

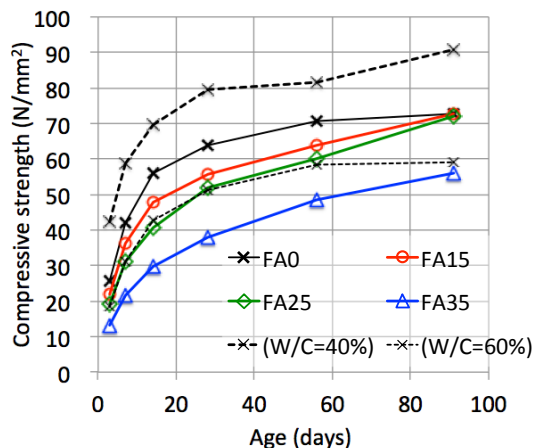


図-1 研究用セメントを使用したフライアッシュモルタルの強度発現性状

材齢7日、28日、91日に着目し、水セメント比で整理すると図-2のとおりとなる。材齢7日および28日では、フライアッシュモルタルの強度発現が無置換のセメント水比と強度の直線近似式上にあり、圧縮強度発現に対するフライアッシュの貢献が見られない。一方で、材齢91日となると、置換率に関わらず、セメントモルタルにおけるセメン

ト水比と圧縮強度の直線近似式に対して、フライアッシュモルタルは高い強度を示しており、フライアッシュがモルタルの強度に寄与していることが示された。

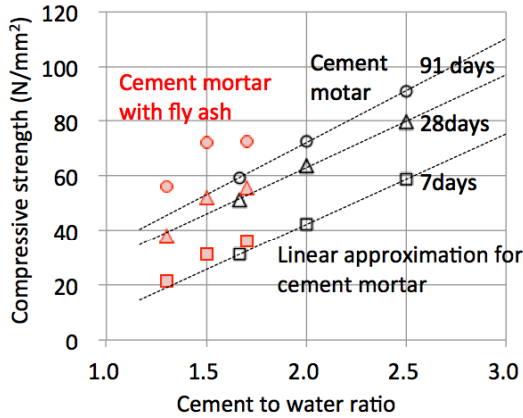


図-2 圧縮強度とセメント水比の関係

これらの結果は、コンクリートにおいても同様の結果であった。

(2) セメント有効係数 (k 値) の定式化

セメント有効係数 (k 値) の定式化を試みた。本実験で得た k 値および既往の研究データ [3]~[9] を含め検討した。

材齢 7 日、28 日、91 日におけるセメント有効係数 k と結合材中の $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ 比の関係を図-3 から図-5 に示す。 $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ 比は、フライアッシュ中の主反応成分である SiO_2 と、これと反応する $Ca(OH)_2$ を生成するセメント中の鉱物 C_3S と C_2S の和の比率であり、フライアッシュの反応を表すのに適切であると考えた指標である。なお、 C_3S および C_2S は、Bougue 式より近似的に算出した。図-3 および図-4 に示すとおり、 $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ 比が 0.5 より小さい範囲でばらつきがあるものの、材齢 28 日までは、ほとんどかわらない。一方で、材齢 91 日においては、図-5 に示すとおり、 $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ 比の減少にともない、セメント有効係数 k が顕著に増大していることがわかった。これは、置換率および水結合材比を含む材料構成が、モルタルの強度発現に対するフライアッシュの貢献度に大きく影響することを示している。

ここで、材齢 91 日におけるセメント有効係数を結合材中の $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ 比で定式化すると、式(1)のとおりとなった。

$$k_{91} = -0.37 \ln \left(\frac{SiO_2}{C_3S + C_2S} \right) + 0.42 \quad (1)$$

この近似式の決定係数は 0.42 であり、概ね定式化できたといえるものの、データの蓄積や実測による C_3S および C_2S 量の考慮による高精度化が必要と考えている。

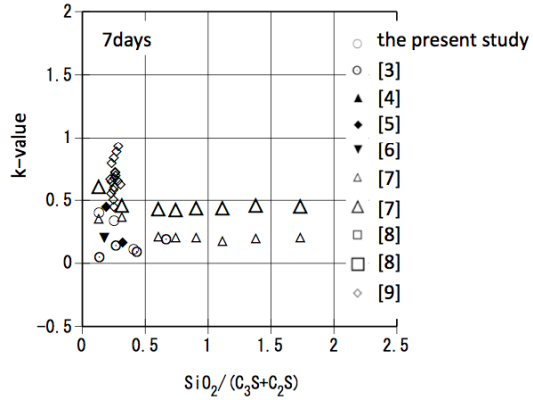


図-3 k 値に対する $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ の影響 (材齢 7 日)

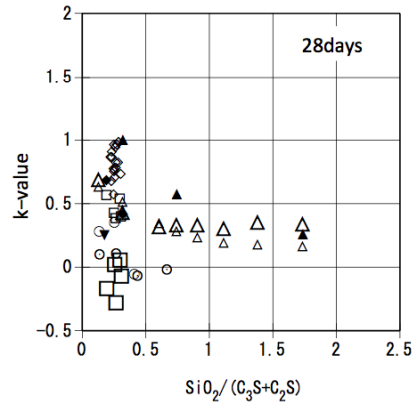


図-4 k 値に対する $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ の影響 (材齢 28 日)

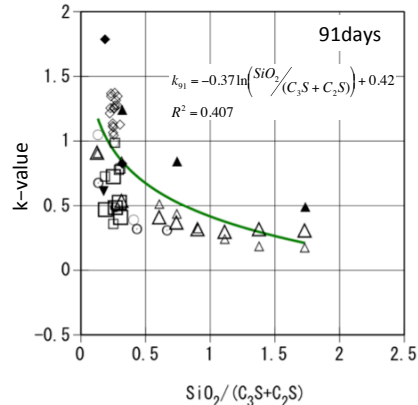


図-5 k 値に対する $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ の影響 (材齢 91 日)

上記で使用したデータのうち、使用材料の化学成分が明記されているもののみを抽出して、材齢 91 日のセメント有効係数を置換率、 $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ 比で示すとそれぞれ図-6 および図-7 のとおりとなる。それぞれの式および決定係数をみると、置換率による定式化の方が決定係数が大きく、 $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ と比較して良好にセメント有効係数を表している結果となった。置換率 40%以上のデータ数が少ないことが原因と考えている。フライアッシュのポズラン反応を考えると、 $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ での評価が本質を捉えていると考えている。この点は、高い置換率の範囲

における検討を要することとなる。

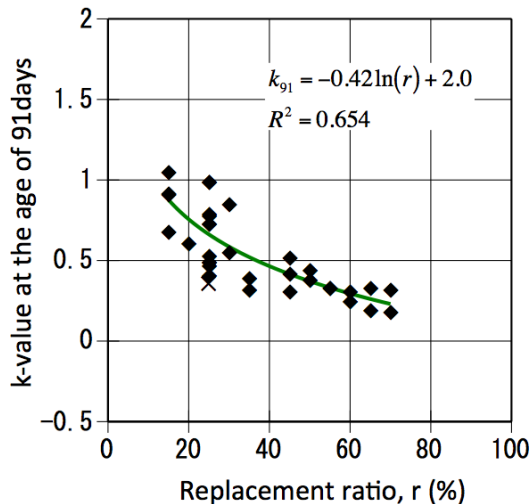


図-6 材齢 91 日の k 値とフライアッシュ置換率の関係

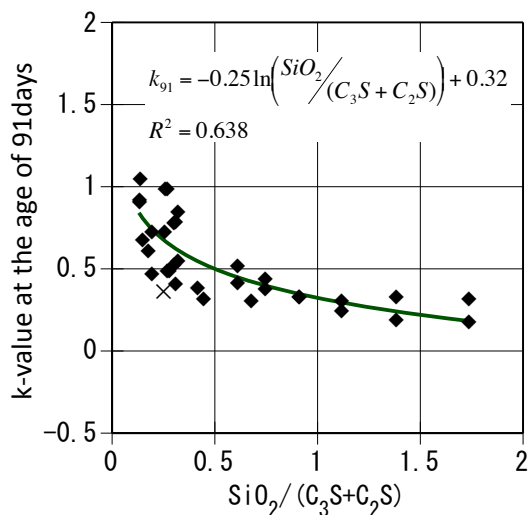


図-7 材齢 91 日の k 値と $SiO_2 / (C_3S + C_2S)$ の関係

参考文献

- [3]小川由布子ほか：モルタルの強度発現正常におけるフライアッシュの性能評価、土木学会第 65 回年次学術講演会概要集、第 V 部門、pp. 971-972、2010
- [4]梅村靖弘、露木尚光、原田宏：モルタル硬化体の塩化物イオンの透過に及ぼす混和材の影響、コンクリート工学年次論文集、Vo. 19、No. 1、pp. 991-996、1997
- [5]小早川真ほか：フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20、No. 2、pp. 739-744、1998
- [6]齊藤伸明、山本泰彦：各種フライアッシュの活性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24、No. 1、pp. 159-164、2002
- [7]鍵本広之ほか：フライアッシュ置換率を 60%まで高めたダムコンクリートの諸特性、土木学会論文集、No. 781/V66、pp. 45-56、2005

- [8] 田野崎隆雄ほか：石炭灰フライアッシュのポズラン活性について、コンクリート工学年次論文集、Vol. 28、No. 1、pp. 155-160、2006
- [9] 羽俊祐ほか：最近のフライアッシュのキャラクター（品質）変動と圧縮強度への影響、セメント・コンクリート論文集、No. 63、pp. 120-125、2009

(3) フライアッシュの有効利用における内部養生の効果

(2) までの検討に加え、本研究の最終目標であるフライアッシュの有効利用に向けて、内部養生を用いた高品質フラアッシュコンクリートの実現を検討した。セメントに早強ポルトランドセメント、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。水結合材比は 30%とし、フライアッシュ置換率は、0、20 および 40%とし、内部養生材として廃瓦を粗骨材に 10%置換して、この効果を検討した。打込み後蒸気養生を行い、プレストレストコンクリート部材に使用できるコンクリートを目指した。

この結果、圧縮強度は図-8 に示すとおり、内部養生の効果により若干大きくなり、特にフライアッシュを 40%混和した場合にこの効果が大きかった。

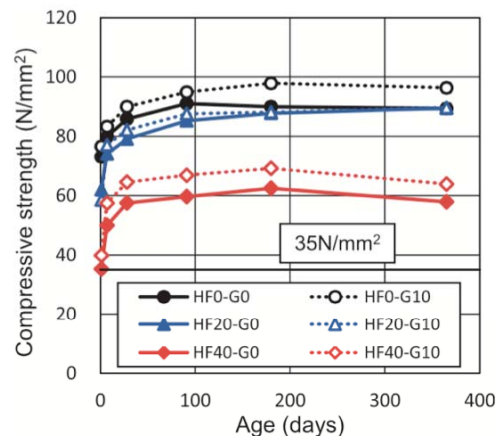


図-8 フライアッシュコンクリートの圧縮強度に対する内部養生の影響

塩化物イオン拡散係数においては、フライアッシュ置換率が 0%と 20%においては、内部養生の効果がないものの、置換率 40%において、中性化抵抗性を抑制する効果が得られた。この傾向は、中性化性状においても同様であり、廃瓦の内部養生により中性化速度係数が小さくなった。

これらにより、廃瓦による内部養生により、フライアッシュの性能をより発揮できるようになる可能性が示された。この実績をフライアッシュの有効利用につなげるためにも、今後、これらの性能をセメント有効係数 k により評価できるかどうか検討する必要があると考える。

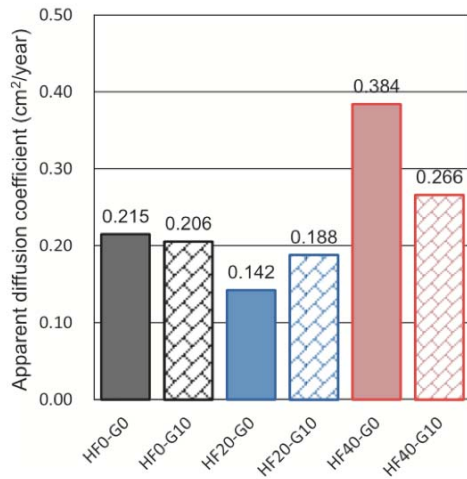


図-9 フライアッシュコンクリートの塩化物イオン拡散係数に対する内部養生の影響

(4) 成果のまとめと今後の展開

本検討において、コンクリートの強度発現に対するフライアッシュの貢献度を示すセメント有効係数 k が、フライアッシュの置換率によって異なることが示された。

また、このセメント有効係数 k は、フライアッシュがコンクリートの圧縮強度に寄与する材齢 91 日におけるセメント有効係数 k は、置換率の他に、 $\text{SiO}_2/\text{C}_3\text{S}$ および $\text{SiO}_2/(\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S})$ の関数によって示すことができることが明らかになった。

さらに、廃瓦を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品質を向上できることがわかった。

今後は、上記 2 点について、データを蓄積し定式化することにより、配合設計段階において、材料構成を考慮したフライアッシュの活用方法を提案できる方法を検討していく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 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、査読有、2015、pp. 337-344、<http://doi.org/10.14250/cement.68.337>
2. 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に対する廃瓦粗骨材の内部養生効果、コンクリート工学年次論文集、Vol. 36、No. 1、査読有、2014、pp. 670-675、

[学会発表] (計 8 件)

1. Bui Phuong Trinh, Muragishi Yusuke, Ogawa Yuko, Kawai Kenji and Sato Ryoichi, Effects of porous ceramic waste aggregate as an

internal curing agent on steam-cured high strength fly ash concrete, International Conference on Sustainable Structural Concrete, 15-18 Sep. 2015, La Plata (Argentina)

2. Bui Phuong Trinh, Ogawa Yuko, Kawai Kenji and Sato Ryoichi, Effect of Porous Ceramic Aggregate on Mechanical Properties and Durability of Steam-Cured Fly Ash Concrete, The 13th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, 12-15 Jul. 2015, Ottawa (Canada)
3. Muragishi Yusuke, Ogawa Yuko, Kawai Kenji and Sato Ryoichi, Effect of Porous Ceramic Waste Aggregate on Properties of Steam Cured Fly Ash Concrete, The 6th International Conference of Asian Concrete Federation, 21-24 Sep. 2014, Seoul (Korea)
4. 村岸祐輔、土居直樹、小川由布子、半井健一郎、河合研至、佐藤良一、廃瓦粗骨材を用いたフライアッシュコンクリートが受ける蒸気養生後の乾燥の影響、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014 年 9 月 10-12 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
5. 小川由布子、村岸祐輔、半井健一郎、河合研至、佐藤良一：廃瓦粗骨材を混入したフライアッシュコンクリートの内部相対湿度に関する実験的検討、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014 年 9 月 10-12 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
6. 村岸祐輔、土居直樹、石森慎一郎、小川由布子、河合研至、佐藤良一：蒸気養生した高強度フライアッシュコンクリートに対する廃瓦粗骨材の影響、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013 年 9 月 4-6 日、日本大学生産工学部津田沼キャンパス (千葉県習志野市)
7. Ogawa Yuko, Doi Noki, Kawai Kenji, Sato Ryoichi and Ishimori Shinichiro: Effect of Porous Ceramic Coarse Aggregate on Strength Development of High-Strength Fly Ash Concrete, The 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 18-21 Aug. 2013, Kyoto Research Park (Kyoto, Japan)
8. Ogawa Yuko, Kawai Kenji, Sato Ryoichi, and Ishimori Shinichiro, Effect of Porous Ceramic Aggregate Produced from Roof Tile Waste on Carbonation of Fly Ash Concrete, The 1st International Conference on Concrete Sustainability, 27-29 May, 2013, Toshi Center Hotel (Chiyoda-ku, Tokyo)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 由布子 (OGAWA YUKO)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：30624564