

## 研究成果報告書

| 研 究 題 目   |     | 使用材料および配合に基づくフライアッシュの<br>強度発現性予測評価手法 | 実 施 年 度 |
|-----------|-----|--------------------------------------|---------|
|           |     |                                      | 2018 年度 |
| 代 表 研 究 者 | 所 属 | 広島大学 大学院工学研究科                        |         |
|           | 氏 名 | 小川 由布子 印                             |         |

### 1. 研究の目的・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ボゾランであるが、温度や配合条件に反応が大きく影響を受けること、また化学成分が一定でないことから広範囲における利用に至っていない。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とすること”を目標として、「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」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  $k$ （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などが提案されている。

$k$  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。式(1)に示すとおり、 $k$  値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。

$$\frac{C+k \cdot F}{W}=\left(\frac{C}{W}\right)_{eq.} \quad (1)$$

$C$ 、 $F$ 、 $W$  はセメント、フライアッシュ、水の単位量を示し、 $(C/W)_{eq.}$  は図-1 のとおり、フライアッシュを混和していない

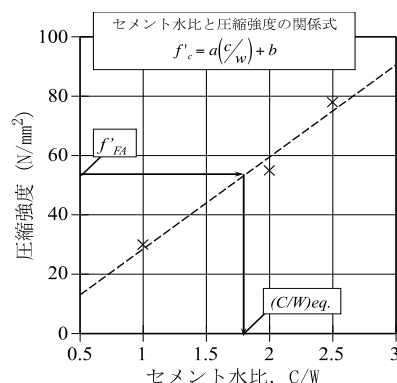


図-1  $(C/W)_{eq.}$  の意味

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。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) が導入されている。

この  $k$  値を用いた検討では、低置換率（15%、25%）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が示され、 $k$  値が置換率によって大きく変化することを明らかにされている。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、 $k$  値は一定値で示されている。

以上の背景より、 $k$  値が結合材の材料構成に基づき変化することを明らかにし、これを定式化することを最終目標とし、本研究ではセメント種類の違いがフライアッシュの強度発現への貢献度に与える影響とともに  $k$  値とフライアッシュの反応率の関係を検討することを目的とした。

## 2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

フライアッシュは JIS A 6201 の II 種に相当するもの（密度  $2.37 \text{ g/cm}^3$ 、ブレン比表面積  $3503 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）、セメントには、JIS R 5210 の普通ポルトランドセメント（OPC 密度  $3.16 \text{ g/cm}^3$ 、ブレン比表面積  $3290 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）、早強ポルトランドセメント（HPC 密度  $3.14 \text{ g/cm}^3$ 、ブレン比表面積  $4590 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）を用いた。水結合材比は 50%とし、フライアッシュの置換率は、20%、30%、40%とした。コンクリート供試体は、これらの材料と細骨材（表乾密度  $2.61 \text{ g/cm}^3$ ）および粗骨材（表乾密度  $2.62 \text{ g/cm}^3$ ）、AE 減水剤および AE 剤を用いて作製し、 $20^\circ\text{C}$  の恒温室にて封緘養生を行なった。なお、空気量は全ての配合において  $5.0 \pm 0.5\%$  の範囲であった。また、k 値を算出する際に使用する圧縮強度とセメント水比の関係を得るため、水セメント比 40%および 60%のセメントのみを使用した供試体も同様に用意した。ペースト供試体は、16 mL のポリプロピレン容器に打込み、コンクリート供試体と同様に  $20^\circ\text{C}$  の封緘養生を行なった。AE 減水剤および AE 剤は使用していない。コンクリート供試体は、材齢 3、7、28、91 日に JIS に従って圧縮試験を行い、k 値を算出した。ペースト供試体は、材齢 3、7、28、91 日に脱型および破碎し、アセトンを用いて水和停止を行い、塩酸および炭酸水素ナトリウムを使用したフライアッシュの反応率試験によりフライアッシュの反応率を測定するとともに、X 線回折解析(XRD)により鉱物組成を定性分析した。

フライアッシュを混和したコンクリートの圧縮強度は、ベースセメントの種類にかかわらず初期強度が低く、長期にかけて強度発現する傾向にあった。OPC をベースセメントとして使用しフライアッシュ置換率が 20%の場合の k 値は、材齢 3 日から 28 日までは約 0.5 であり 91 日に 1.0 となった。これに対し、置換率 30%および 40%の場合は材齢 28 日までは 0.25 以下であり材齢 91 日においても 0.5 までの増加であった。これは、材齢 91 日において置換率 20%の場合、フライアッシュは OPC と同程度強度発現に貢献していることを示しており、置換率が高くなるとこの貢献度が低くなることを示している。一方、HPC をベースセメントとした場合、フライアッシュ置換率にかかわらず k 値は OPC の場合より低くなり、フライアッシュ置換率 20%と低置換率の場合でも、材齢 3 から 28 日では 0.0 付近、材齢 91 日でも 0.5 に留まった。フライアッシュの強度発現への貢献度が HPC と比較して 50%であることを示している。これらより、セメント種類にかかわらず置換率が低い場合にフライアッシュの強度への貢献度が高くなることが明らかとなった。ただし、セメント種類が異なる場合の k 値の評価については今後も検討が必要であると考えられる。フライアッシュの反応率もセメント種類にかかわらず、置換率 30%および 40%と比較して、置換率 20%の場合に著しく高くなった。これは、前述の k 値の傾向と合致した。しかし、OPC をベースとした場合と比較して、HPC にフライアッシュを置換した場合に若干反応率が大きかった。HPC をベースとした場合、フライアッシュの反応率は高いものの、k 値が小さくなっている点については、k 値がフライアッシュの強度発現性能をセメントに対して相対的に表していることが原因のひとつと考えられる。さらに、k 値とフライアッシュの反応率の関係を検討した。

OPC をベースとした場合、原点をとる線形関係が得られ、フライアッシュが反応することによりコンクリートの強度に貢献していることが示された。一方、HPC をベースとした場合、線形関係はあるもののフライアッシュ反応率が 20%程度になるまで  $k$  値は 0 以下を示した。これは、初期材齢においてフライアッシュは反応しているものの強度発現に寄与しない物質を生成している、もしくは、HPC を用いたコンクリートの初期強度が高いためにフライアッシュの強度発現性能が小さく示されてしまっているものと考えられる。

以上のとおり、セメント種類が異なる場合、フライアッシュの強度発現性能を示す  $k$  値は大きく異なるものの、フライアッシュの置換率の  $k$  値に対する影響はそれぞれのセメントにおいて同様であることがわかった。また、フライアッシュの反応率と  $k$  値はセメントの種類ごとに線形関係を示すことが明らかとなった。これらの結果から、フライアッシュの置換率を要因としてフライアッシュの反応率を定式化し、求められるフライアッシュ反応率からフライアッシュの強度発現性能を示す  $k$  値を予測できる可能性が示唆された。この成果は、申請時の計画の 80%の達成度合であると考えている。今後は、本検討により示された成果が他のフライアッシュを用いた場合にも適用できるかを検討するとともに、フライアッシュの材料特性を  $k$  値の予測式に考慮する必要がある。

### 3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

コンクリート材料、供試体作製時消耗品、試薬、実験消耗品等を消耗品費として支出した。また、XRD 装置使用料を予定通り借料損料として支出した。最新情報の収集のため、セメント技術大会および土木学会年次学術講演会へ出席し、この費用を旅費として支出した。供試体処分費はその他の支出とした。助成額が申請額の約 40%であったため、実験規模を大幅に縮小するとともに、不足分は他の経費でまかなった。

### 4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本検討において、フライアッシュおよびセメント種類からそれぞれの材齢におけるフライアッシュの反応率を予測し、フライアッシュの反応率よりフライアッシュの強度発現性能を示す  $k$  値の予測手法へ発展できると考えている。この予測手法確立のためには、多量の既往の研究データを用いてフライアッシュの反応率の予測方法をまとめるとともに、フライアッシュ反応率と  $k$  値の関係を長期材齢も含めて検討する必要がある。これらの検討はセメント種類も考慮するものであり、材料選定段階で既知である材料特性と配合条件である置換率を総合した指標からフライアッシュの強度発現性能を予測手法の確立につなげる。この予測手法により個々のフライアッシュの性能を生かした配合設計が可能になる。

### 5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

フライアッシュの種類を増やすとともに、長期材齢のデータを確保し、精査したのちに、学術雑誌へ投稿する予定である。