

# 論文 高温環境下の高強度・高流動コンクリートにおけるフライアッシュの強度寄与率および構造体強度補正值に関する研究

船本 憲治\*1

**要旨：** フライアッシュ（FA）コンクリートにおける FA の強度寄与率（K 値）の検討は、通常、標準養生供試体での検討であり、構造体コンクリートでの知見は得られていない。そこで、本論文では、FA と水を事前混合した FA スラリーを用い FA を 120kg/m<sup>3</sup>セメント外割使用している生コン工場での試験結果を基に、高温環境下の高強度・高流動コンクリートの FA スラリーにおける FA の K 値の検討を行った。その結果、高温環境下で K 値が大きくなり、FA が暑中期で優位性を発揮することを確認した。また、構造体強度補正值（S 値）の検討を行い、S 値は、夏期および標準期とも FA 有の方が FA 無の場合より小さくなることを確認した。

**キーワード：** 高温環境、フライアッシュ、圧縮強度、強度寄与率、構造体強度補正值

## 1. はじめに

フライアッシュコンクリートにおけるフライアッシュ（以下、FA）の強度寄与率 K 値は、式(1)により定義され、日本建築学会および土木学会でそれぞれ示されている<sup>1),2)</sup>。また、筆者により、水和熱寄与率又は中性化寄与率と比較した報告<sup>3)</sup>も行われている。

$$C_{eq} = C + K \times FA \quad (1)$$

ここで、 $C_{eq}$ ：等価セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)

C：単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)

K：FA の強度寄与率

FA：単位 FA 量 (kg/m<sup>3</sup>)

しかし、それらの強度寄与率は、一部封緘養生や気中養生供試体の試験結果もあるが、ほぼ標準養生供試体の試験結果であり、構造体コンクリートでのデータは得られていない。一方、暑中期に FA を普通ポルトランドセメントの内割で 20%置換した構造体コンクリートは、長期材齢における強度の増進の鈍化が小さく、材齢 91 日の強度は材齢 28 日の管理材齢用供試体強度よりも大きくなるとの報告<sup>4)</sup>もある。

そこで、本論文は、既に九州・沖縄・北海道地区で国土交通大臣認定を取得し、FA と水を事前混合した FA スラリーを用い FA を 120kg/m<sup>3</sup>セメント外割使用している生コン工場における実験結果<sup>5)</sup>を基に、高温環境下の FA 構造体コンクリートにおける FA スラリーの FA の強度寄与率（K 値）および構造体強度補正值（S 値）の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントで、密度 3.15g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3220cm<sup>2</sup>/g である。

FA は、石炭火力発電所より発生した分級細粉の JIS

II 種品で、比表面積 4150cm<sup>2</sup>/g、強熱減量 1.9%、フロー値比 106%、91 日活性度指数 109%であり、事前に水と混合し重量比濃度 65%のスラリー<sup>6)</sup>として使用している。なお、FA スラリーは、槽内で発生させたマイクロバブルで未燃カーボンを浮上分散させて製造している。

細骨材は海砂を使用し、表乾密度 2.59g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.09%、粗粒率 2.55 である。粗骨材は碎石（石灰石）を使用し、表乾密度 2.70g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.34%、粗粒率 6.60 である。また、混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤およびアニオン界面活性 AE 剤を用いている。

### 2.2 コンクリートの調合

コンクリートの試験は、標準養生供試体による室内試験および模擬柱試験体による実機試験を実施しており、コンクリートの調合を表-1 に示す。

すべての調合で、空気量 3%、単位水量 170kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量 891kg/m<sup>3</sup>は同じであるが、FA を使用しない場合は、スランブフロー45～60 cm、水セメント比 27～45%とし、FA スラリーを使用する場合は、スランブフロー60～65 cm、水セメント比 40～60%とし、FA は 120kg/m<sup>3</sup>とセメント外割で一定としている。

FA スラリーは、FA120kg/m<sup>3</sup>と水 65 kg/m<sup>3</sup>で事前混合された重量比濃度 65%のスラリーであり、コンクリート製造時に残りの単位水量 105 kg/m<sup>3</sup>を添加しており、

表-1 コンクリートの調合

| NO | スランブ<br>フロー<br>(cm) | 空気<br>量<br>(%) | W/C<br>(%) | W/<br>(C+FA)<br>(%) | FA/<br>(C+FA)<br>(%) | 単位量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |
|----|---------------------|----------------|------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
|    |                     |                |            |                     |                      | W                           | C   | FA  | S   | G   |
| 1  | 45±7.5              | 3<br>±1        | 45         | 45                  | 0                    | 170                         | 378 | 0   | 907 | 891 |
| 2  | 55±10               |                | 36         | 36                  | 0                    |                             | 472 |     | 829 |     |
| 3  | 60±10               |                | 27         | 27                  | 0                    |                             | 630 |     | 699 |     |
| 4  | 60±10               |                | 60         | 42                  | 30                   |                             | 283 | 850 |     |     |
| 5  |                     |                | 50         | 37                  | 26                   |                             | 340 | 120 | 803 |     |
| 6  | 65±5-10             |                | 40         | 31                  | 22                   |                             | 425 | 733 |     |     |

\*1 西日本工業大学 デザイン学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

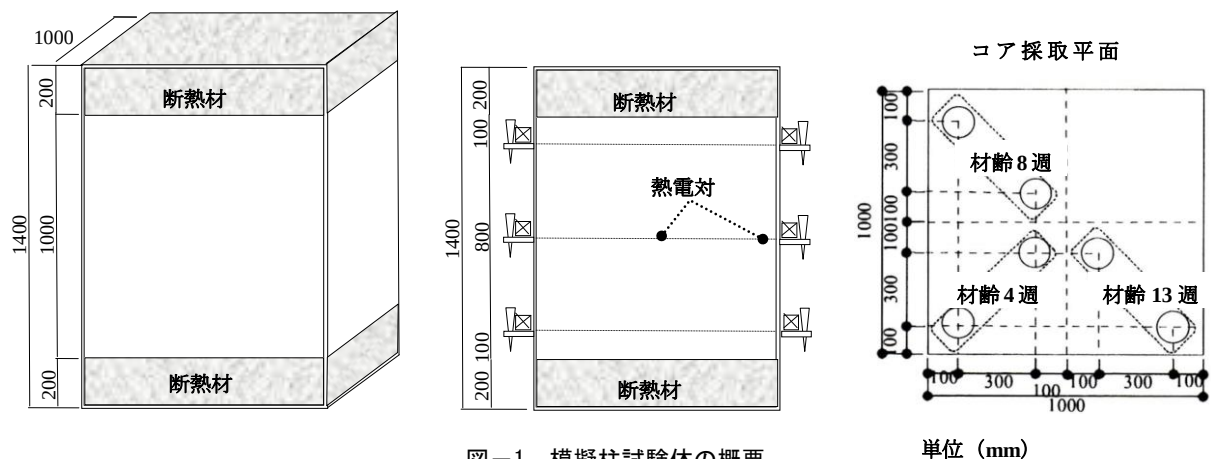


図-1 模擬柱試験体の概要

単位 (mm)

表-3 コンクリートの圧縮強度試験結果

| NO | 28日コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |      |           |      |      |      | 91日コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |       |           |      |           |      |
|----|----------------------------------|------|-----------|------|------|------|----------------------------------|-------|-----------|------|-----------|------|
|    | 標準養生供試体                          |      | 模擬試験体コア強度 |      |      |      | 標準養生供試体                          |       | 模擬試験体コア強度 |      | 模擬試験体コア強度 |      |
|    | 標準期                              | 夏期   | 標準期       |      | 夏期   |      | 標準期                              | 夏期    | 標準期       |      | 夏期        |      |
|    |                                  |      | 中央部       | 外周部  | 中央部  | 外周部  |                                  |       | 中央部       | 外周部  | 中央部       | 外周部  |
| 1  | 58.6                             | 56.9 | 46.1      | 48.3 | 47.1 | 49.3 | 65.0                             | 62.7  | 55.6      | 57.3 | 52.8      | 53.9 |
| 2  | 74.8                             | 74.4 | 62.5      | 64.0 | 58.9 | 62.2 | 80.8                             | 83.0  | 71.2      | 73.8 | 66.4      | 69.7 |
| 3  | 94.7                             | 93.3 | 82.6      | 85.4 | 79.2 | 82.3 | 102.0                            | 105.0 | 90.9      | 92.7 | 84.1      | 86.8 |
| 4  | 44.2                             | 46.8 | 41.3      | 42.7 | 45.9 | 50.0 | 57.4                             | 61.4  | 53.4      | 55.6 | 52.6      | 55.2 |
| 5  | 57.7                             | 59.6 | 51.8      | 50.6 | 59.8 | 61.5 | 70.1                             | 74.8  | 60.8      | 66.1 | 63.3      | 66.0 |
| 6  | 75.0                             | 75.1 | 65.0      | 64.3 | 62.7 | 66.2 | 88.6                             | 91.6  | 72.3      | 73.6 | 71.5      | 75.8 |

表-2 コンクリートの温度測定結果

| NO | コンクリート温度 (°C) |             |      |      |             |      |
|----|---------------|-------------|------|------|-------------|------|
|    | 標準期           |             |      | 夏期   |             |      |
|    | 練上り時          | 模擬試験体(最高温度) |      | 練上り時 | 模擬試験体(最高温度) |      |
|    |               | 中心          | 外側   |      | 中心          | 外側   |
| 1  | 23            | 63.3        | 53.0 | 34   | 79.1        | 66.2 |
| 2  | 25            | 74.2        | 59.4 | 35   | 89.7        | 74.3 |
| 3  | 26            | 87.3        | 68.1 | 35   | 99.7        | 80.4 |
| 4  | 25            | 52.2        | 43.6 | 32   | 70.5        | 57.9 |
| 5  | 25            | 60.4        | 48.3 | 35   | 79.3        | 64.5 |
| 6  | 26            | 73.3        | 56.4 | 35   | 87.8        | 70.8 |

FA 置換率 (FA/(C+FA)) と見なした場合、その値は 22 ~30% (FA セメント C 種) に相当している。

なお、ここで、FA を使用しない場合と FA スラリーを使用する場合は、同一生コン工場における別々の実務に即した評価試験結果を比較したものであり、スランプフローおよび水セメント比の水準が異なっている。

### 2.3 試験項目および方法

実機試験では、標準期および夏期に、図-1 に示す模擬柱試験体 (1000mm×1000mm×H1400mm) に対して上下 2 層に分けてコンクリートを打設し、模擬柱試験体の中央部および外周部の温度を図-1 のように熱電対にて測定した。また、コアボーリング (φ100mm) を図-1 のように鉛直方向に行い、圧縮強度を測定した。

なお、模擬柱試験体の上面および下面には厚さ 200 mm の断熱材を巻きその上から木製型枠を設置した。一方で、通常の強度管理で用いられている標準養生における圧縮強度試験 (φ100mm×H200mm) を行った。

### 3. 実験結果

スランプフローおよび空気量が所定の範囲に入ることを確認できた。なお、FA を使用した場合には一般的に空気量の確保が難しいと言われているが、今回は未燃カーボンが少なく安定的に空気量が確保できた。

コンクリートの練上り時の温度および模擬柱試験体の最高温度の測定結果を表-2 に示す。また、標準養生供試体の圧縮強度試験および模擬柱試験体のコア供試体強度試験結果を表-3 に示す。

### 4. 標準養生供試体の強度寄与率 K 値の検討

FA 無調合 (No.1~3) における供試体のセメント水比と圧縮強度の関係を図-2 に、FA 有調合 (No.4~6) における供試体の結合材水比と圧縮強度の関係を図-3 示す。

FA 無調合におけるセメント水比と圧縮強度の関係 (図-2) は、一次関数で良い相関が得られ、その相関式により図-3 の外割 FA の強度寄与率 K を前述の式(1)により求め、単位セメント量との関係を図-4 に示す。

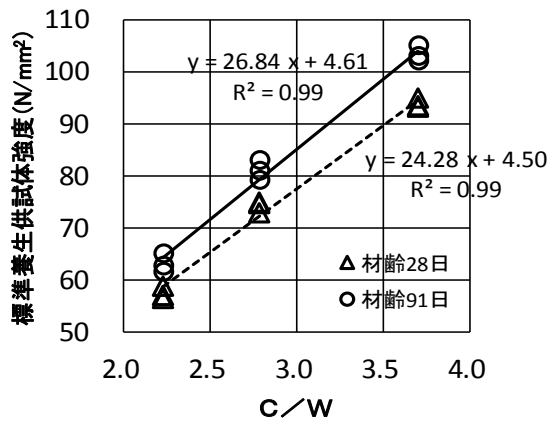


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係 (FA 無)

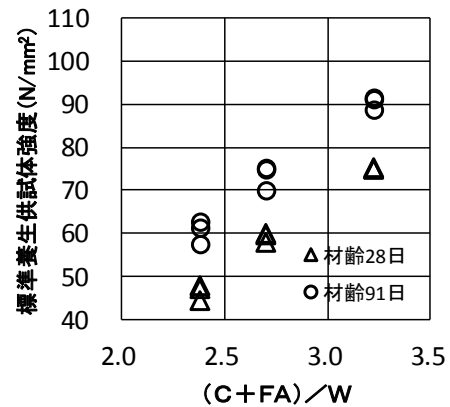


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係 (FA 有)

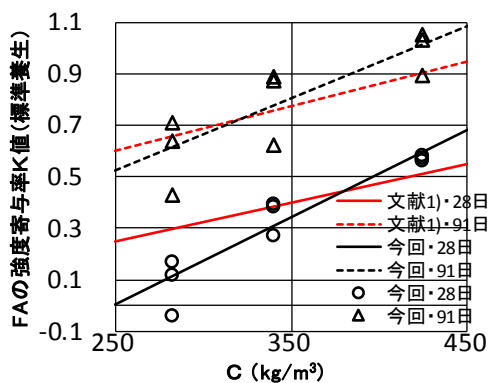


図-4 単位セメント量と FA の強度寄与率 K 値の関係  
(標準養生供試体)

今回得られた FA の強度寄与率 K 値は、文献 1) とほぼ同等であり、単位セメント量が大きくなるほど大きく、また、ポズラン反応により材齢 91 日の方が材齢 28 日の値より大きくなっている。

## 5. 構造体コンクリートの最高温度

夏期および標準期における模擬柱試験体の中央部および外周部のコンクリートの最高温度を、練上り温度とともに単位セメント量との関係として図-5 に示す。また、その時のコンクリートにおける温度上昇量を単位セメント量との関係として図-6 に示す。

図-5 によると、コンクリート最高温度は夏期の方が高くなるとともに、夏期と標準期の最高温度の差は、練上り時 7~11℃、外周部 12~16℃、中央部 12~19℃と、練上り時<外周部<中央部の順となっている。

図-6 によると、セメントの水和熱により単位セメント量が多くなるほど練上りからの温度上昇量は大きくなり、その温度上昇量は夏期>標準期となり、外気温の影響によりセメントの反応が促進されている。

また、同一環境・同一コア採取場所で同一単位セメント量の場合、中央部では、FA 有(破線)が FA 無(実線)より若干大きく温度上昇量が大きくなっているが、

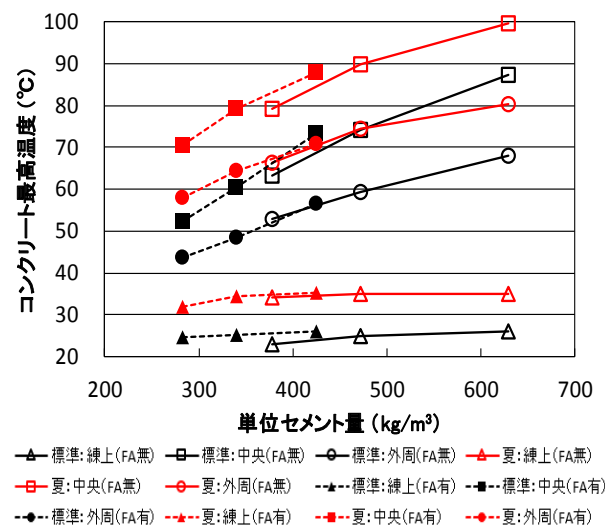


図-5 単位セメント量とコンクリート最高温度の関係

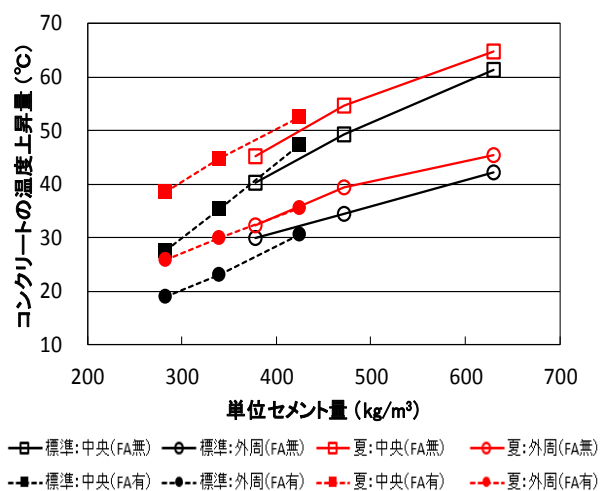


図-6 単位セメント量とコンクリート温度上昇量の関係

外周部ではほぼ同等となっており FA の水和発熱の影響は小さいと考えられる。なお、この中央部と外周部の違いは FA の反応がより温度の高い中央部で進んだのではないかと推察される。

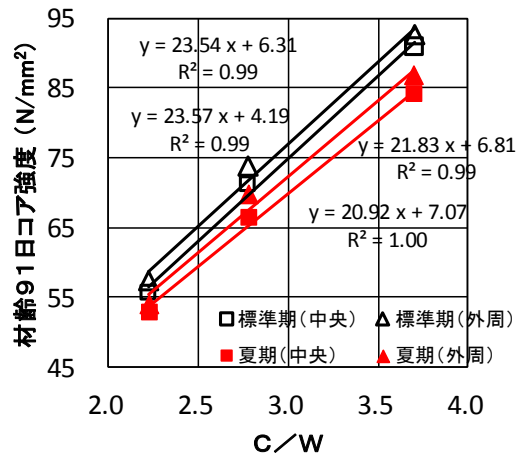


図-7 セメント水比とコア強度の関係 (FA 無)

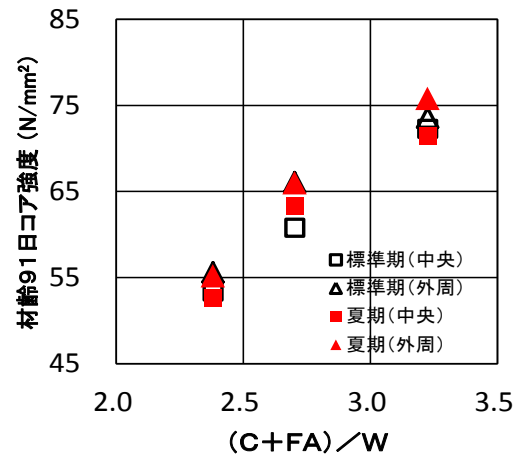


図-8 結合材水比とコア強度の関係 (FA 有)

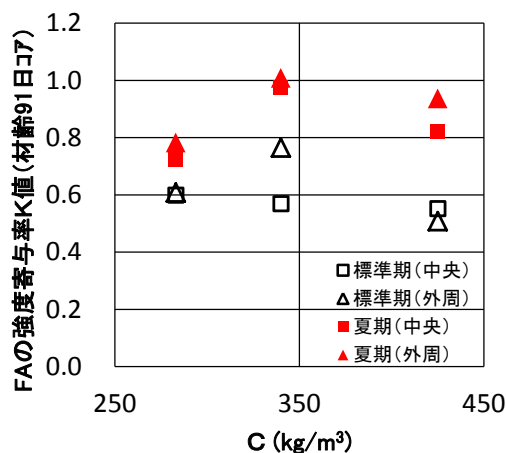


図-9 単位セメント量と FA の強度寄与率 K 値の関係 (模擬柱試験体)

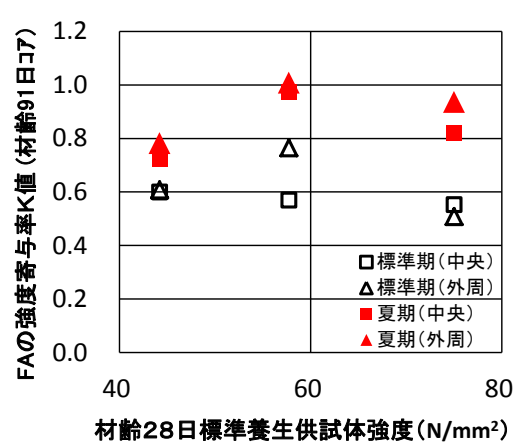


図-10 材齢 28 日標準養生供試体強度と FA の強度寄与率 K 値の関係 (模擬柱試験体)

## 6. 構造体コンクリートの強度発現性状

FA 無調合におけるセメント水比と材齢 91 日コア強度の関係を図-7に、FA 有調合における結合材水比と材齢 91 日コア強度の関係を図-8に示す。

図-7の FA 無調合では、セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係は一次関数として良い相関が得られている。また、コア強度は、中央部<外周部、夏期<標準期となり、夏期と標準期の差は 3~6N/mm²程度となっている。これは、外気温やセメント水和熱の影響によりコンクリートの長期材齢での構造体強度の増進が鈍化することを示すものである。一方、図-8の FA 有調合では、材齢 91 日コア強度は、中央部<外周部となっているが、夏期と標準期ではほぼ同程度で、文献 4)の指摘のように FA の使用により長期材齢における構造体強度の増進の鈍化が小さくなっている。

## 7. 構造体コンクリートの強度寄与率 K 値の検討

図-7の相関式により図-8の外割 FA の強度寄与率 K を前述の式(1)により求め、単位セメント量との関係を図

9に示す。なお、図-7と図-8とは異なる日に実施した実験データであるが、表-2の練上り時のコンクリート温度から両実験の外気温に差はほぼ無かった。その結果、図-4の標準養生供試体のように単位セメント量が多くなると K 値も大きくなる関係は見られなかった。その一方で、FA の強度寄与率 K 値は、単位セメント量に関係なく、標準期で 0.5~0.8 程度、夏期で 0.7~1.0 程度で、夏期の値が標準期の値よりも 0.2~0.3 程度大きく、夏期での FA の強度寄与率 K 値の優位性が確認できた。

また、材齢 28 日標準養生供試体強度と FA の強度寄与率 K 値 (材齢 91 日) の関係を図-10に示すが、こちらも図-9と同様に相関関係が見られなかった。

次に、FA の強度寄与率 K 値 (材齢 91 日) におけるコンクリート練上り温度との関係を図-11に、また、コンクリートの最高温度との関係を図-12に示す。その結果、コンクリートの練上り温度および模擬試験体の最高温度が高くなるほど FA の強度寄与率 K 値は大きくなっており、このことは、FA は、夏期に優位性を発揮することを意味している。

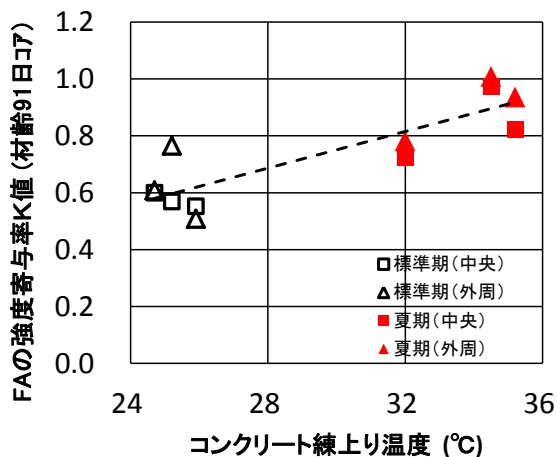


図-11 コンクリート練上り温度とFAの強度寄与率K値の関係（模擬柱試験体）

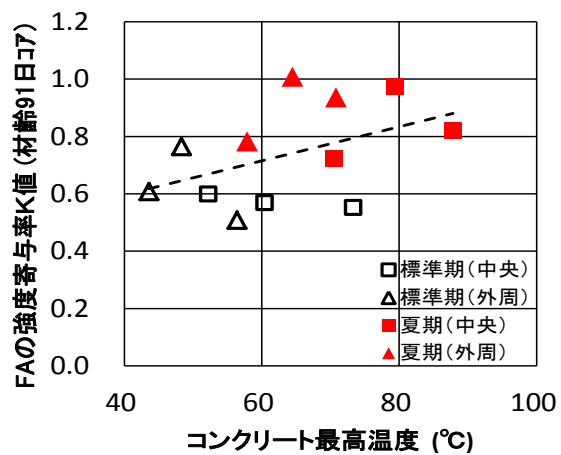


図-12 コンクリート最高温度とFAの強度寄与率K値の関係（模擬柱試験体）

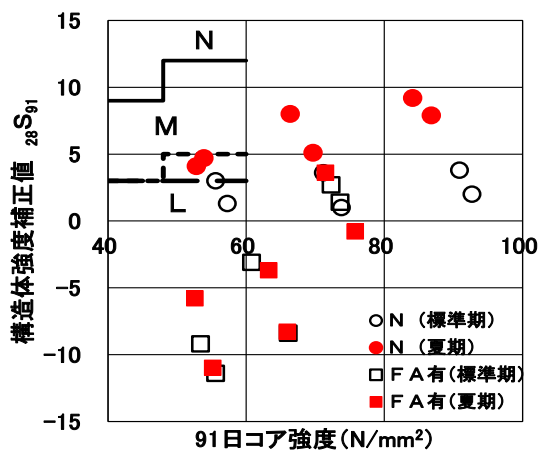


図-13 材齢91日コア強度と構造体強度補正值 $_{28S_{91}}$ の関係

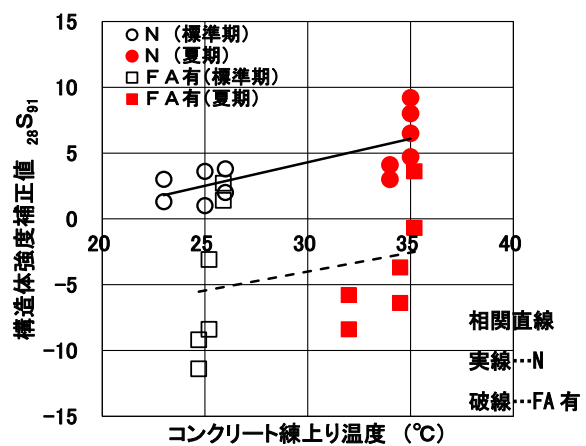


図-14 コンクリートの練上り温度と構造体強度補正值 $_{28S_{91}}$ の関係

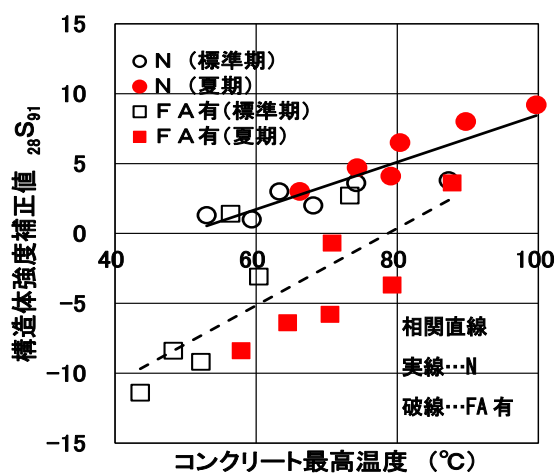


図-15 コンクリートの最高温度と構造体強度補正值 $_{28S_{91}}$ の関係

## 8. 構造体強度補正值S値の検討

建築の調査設計では構造体強度補正值S値が用いられ、構造体強度補正值 $_{mS_n}$ とは、コンクリートの品質基準強

度からコンクリートの調査管理強度を求めるための補正值であり、標準養生した供試体の材齢m日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢n日における圧縮強度の差である。

高強度FAコンクリートのS値は建築学会等で示されていないが、今回、材齢91日コア強度と構造体強度補正值 $_{28S_{91}}$ の関係を普通ポルトランドセメント(N)の場合も含め図-13に示す。なお、日本建築学会のJASS5の「17節高強度コンクリート」で示されている普通ポルトランドセメント(N)、中庸熱ポルトランドセメント(M)、低熱ポルトランドセメント(L)の場合の $_{28S_{91}}$ の設計基準強度の範囲に対する標準値を追記した。

図-13によると、構造体強度補正值 $_{28S_{91}}$ は、材齢91日コア強度が大きくなるほど大きくなる傾向にある。また、今回の冬期を除いた標準期と夏期だけのデータではあるが、Nの結果はJASS5のNの標準値より小さく、FA有の結果はJASS5のM・Lの標準値より小さい値となっている。

また、構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  は、FA の有無で有意な差が見られ、夏期および標準期とも、FA 有の方が FA 無 (N) の場合より小さい。そして、FA 有の場合の構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  は、標準期では材齢 91 日コア強度が  $70\text{N/mm}^2$  程度以下で負の値となり、夏期では材齢 91 日コア強度が  $80\text{N/mm}^2$  程度以下で負の値となっている。

次に、季節別の影響を見るために、コンクリートの練上り温度と構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  の関係を図-14 に、コンクリートの最高温度と構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  の関係を図-15 に示す。

構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  は、FA 無 (N) の場合は、夏期の方が標準期より大きくほぼ正の値となっているが、FA 有の場合は、夏期が標準期とほぼ同じか大きくなる傾向にあるもののその値はほぼ負の値となっている。これは、FA 無 (N) の場合は夏期に長期強度の鈍化が大きい (図-7) が、FA 有ではその鈍化が小さい (図-8) ことによるものと考えられる。

## 9. 結論

今回、FA と水を事前混合した FA スラリーを用い FA を  $120\text{kg/m}^3$  セメント外割使用した配合で国土交通大臣認定を取得している生コン工場における試験結果を基に、高温環境下の FA 構造体コンクリートの FA スラリーにおける FA の強度寄与率 (K 値) および構造体強度補正值 (S 値) の検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 標準養生供試体による FA の強度寄与率 K 値は、既往文献とほぼ同等であり、単位セメント量が大きくなるほど大きく、また、ポゾラン反応により材齢 91 日の方が材齢 28 日の値より大きくなる。
- (2) 構造体コンクリートにおける練上りからの温度上昇量は、夏期 > 標準期となり、セメントの水和熱により単位セメント量が多くなるほど大きくなるが、FA の水和発熱の影響は小さいと考えられる。
- (3) FA 無 (N) 調合の場合の材齢 91 日の構造体コンクリートのコア強度は、中央部 < 外周部、夏期 < 標準期となり、夏期と標準期の差は  $3\sim 6\text{N/mm}^2$  程度となり、これは、外気温やセメント水和熱の影響によりコンクリートの長期材齢での構造体強度の増進が鈍化することを示すものである。
- (4) FA 有調合の場合の材齢 91 日の構造体コンクリートのコア強度は、中央部 < 外周部となり、夏期と標準期でほぼ同程度で、FA の使用により長期材齢における構造体強度の増進の鈍化が小さくなる。
- (5) 構造体コンクリートにおける FA の強度寄与率 K 値は、単位セメント量に関係なく、標準期で  $0.5\sim 0.8$  程度、夏期で  $0.7\sim 1.0$  程度で、夏期の値が標準期の

値よりも  $0.2\sim 0.3$  程度大きい。また、コンクリートの練上り温度又は模擬試験体の最高温度が高くなるほど FA の強度寄与率 K 値は大きくなり、このことは FA の夏期での優位性を示すものである。

- (6) 構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  を材齢 91 日コア強度で評価すると、FA の有無で有意な差が見られ、夏期および標準期とも FA 有の方が FA 無 (N) の場合より小さく、今回の場合は、FA 有の場合の構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  は、標準期では材齢 91 日コア強度が  $70\text{N/mm}^2$  程度以下で負の値となり、夏期では材齢 91 日コア強度が  $80\text{N/mm}^2$  程度以下で負の値となっている。
  - (7) 構造体強度補正值  $_{28}S_{91}$  をコンクリート温度で評価すると、今回の場合は、FA 無 (N) の場合は、夏期の方が標準期より大きくほぼ正の値となるが、FA 有の場合は、夏期が標準期とほぼ同じか大きくなるもののその値はほぼ負の値となっている。これは FA 無 (N) の場合は夏期に長期強度の鈍化が大きい、FA 有ではその鈍化が小さいことによるものである。
- なお、今回の検討は FA を  $120\text{kg/m}^3$  スラリーとして使用したものであり、現在、FA を  $120\text{kg/m}^3$  乾燥灰として使用したものを実験中であり、更に多くのデータで FA の K 値、S 値を明らかにして行きたい。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説、2007
- 2) 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、コンクリートライブラリー132、2009
- 3) 船本憲治：フライアッシュのセメント有効係数に基づいたフライアッシュコンクリートの特性評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.38, No.1, pp.105-110, 2016
- 4) 小山智幸ほか：暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 (その 6 : 柱試験体の強度性状)、日本建築学会九州支部研究報告、第 52 号, pp.201-204, 2013.3
- 5) 船本憲治ほか：フライアッシュをスラリーとして  $120\text{kg/m}^3$  セメント外割使用した高強度・高流動コンクリートの強度発現および発熱特性、Cement Science and Concrete Technology, Vol.69, pp.319-326, 2016.3
- 6) 高巢幸二ほか：浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素除去およびそのフライアッシュスラリーの特性に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.697, pp.331-340, 2014