

# 論文 高強度コンクリートに結合材としてフライアッシュを使用した場合の諸性状

藤崎 明\*1・片岡 義信\*2・森澤 勝弘\*3・島 弘\*4

**要旨**：高強度コンクリート用の混和材として、地方でも入手可能なフライアッシュに着目し、セメントの内割置換で使用した場合、中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントの代替品としての利用が可能かどうか、実験的に検討した。その結果、簡易断熱養生の圧縮強度は、無混和と大差がない傾向であり、構造体強度補正值も JASS 5 の標準値より小さくなる傾向を確認した。また、簡易断熱養生での最高温度は、フライアッシュの置換率が多くなるほど低下する傾向を示し、水和熱低減効果があることを確認した。自己収縮試験では、置換率が多くなるほど、無混和よりも収縮率が小さくなることを確認した。

**キーワード**：高強度コンクリート、フライアッシュ、置換率、水和熱低減、自己収縮

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高強度化が進み高強度コンクリートの需要は地方都市まで普及し、公共建築物や民間マンション等の計画や施工が行われつつある。高強度コンクリートを生コン工場から出荷するには、建築基準法第 37 条第二号の国土交通大臣の認定を取得する必要があるが、ここ数年で認定取得工場が増加する傾向にある。

一方で、フライアッシュの利用に関しては、2011 年 3 月に発生した東日本大震災の影響で、原子力に依存してきた電力供給体制の見直しが迫られ、今後は火力発電所の積極活用に伴ってますますフライアッシュの発生が増大することが予想される。このようなフライアッシュをセメントの代替で用いることによる CO<sub>2</sub>削減効果や、天然骨材の代替材料としての利用など、環境面での利点が多いが、配合条件によっては、コンクリートの水密性や耐久性の向上にも寄与できる潜在能力を持っていると言われている<sup>1)</sup>。

高強度コンクリートでは、単位セメント量の増加によるコンクリートのひび割れが懸念されるため、その対策として、一般的にはセメントの種類として中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントを使用するケースが多い。しかし、それらの特殊セメントを地方で使用することは、生コンプラントの設備改造や輸送コストの上昇を招き、非常に困難であるのが現状である。そこで、比較的安易に入荷可能なフライアッシュに着目し、高強度コンクリートに結合材としてセメントの内割置換し、中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントの代替品としての利用が可能かどうか実験的に検討することを本研究の目的とした。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料

実験に用いた材料を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを用い、結合材として JIS A 6201 に規定するフライアッシュ II 種（以下、FA という）を用いた。なお、FA の品質は、フロー値 112%、活性度指数は材齢 7 日で 81%、材齢 28 日で 97%、比表面積は 3900cm<sup>2</sup>/g である。

表-1 使用材料

| 材料区分    | 記号 | 種類           |     | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|----|--------------|-----|-------------------------|
| 水       | W  | 地下水          |     | 1.00                    |
| セメント    | C  | 普通ポルトランドセメント |     | 3.16                    |
| フライアッシュ | FA | フライアッシュ II 種 |     | 2.30                    |
| 細骨材     | S1 | 砂            | 海砂  | 2.62                    |
|         | S2 | 砕砂           | 石灰石 | 2.68                    |
| 粗骨材     | G  | 砕石2005       | 石灰石 | 2.70                    |
| 混和剤     | SP | 高性能AE減水剤     |     | —                       |
|         | AE | AE剤          |     | —                       |

### 2.2 配(調)合

実験で行った配(調)合条件と単位量を表-2に示す。水結合材比（以下、W/B という）は、27, 36, 46%、FA の置換率は、0, 10, 20, 30%とした。目標スランプフローは、W/B 46%は 45±7.5(cm)、W/B 36%と 27%は 60±10(cm)とした。また、目標空気量は 3.0±0.5(%)とし、コンクリート温度が 20°C前後となる時期に試験練りを行った。

### 2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。

\* 1 東部生コンクリート 株式会社 (正会員)

\* 2 一宮生コンクリート 株式会社

\* 3 高知県生コンクリート工業組合 技術センター 東部試験所 (正会員)

\* 4 高知工科大学 大学院工学研究科基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

表-2 配合条件と単位量およびフレッシュコンクリートの試験結果

| 配合No. | W/B (%) | FA置換率 (%) | スランプフロー (cm) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |      | SP (B×%) | スランプフロー (cm) | 空気量 (%) | 補助AE剤 (A)※ | コンクリート温度 (°C) | 単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 測定単位水量 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------|---------|-----------|--------------|---------|----------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|----------|--------------|---------|------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
|       |         |           |              |         |          | W                       | C   | FA  | S1  | S2  | G    |          |              |         |            |               |                             |                             |
| 1     | 46      | 0         | 45           |         | 52.9     | 175                     | 380 | 0   | 480 | 466 | 859  | 1.00     | 45.5         | 3.2     | -1         | 20.0          | 2.350                       | 182                         |
| 2     |         | 342       |              |         |          |                         | 38  | 472 | 461 | 859 | 0.90 | 47.5     | 3.0          | 0       | 20.0       | 2.343         | 177                         |                             |
| 3     |         | 304       |              |         |          |                         | 76  | 466 | 456 | 859 | 0.85 | 47.5     | 3.1          | 3       | 20.0       | 2.326         | 180                         |                             |
| 4     |         | 266       |              |         |          |                         | 114 | 461 | 448 | 859 | 0.80 | 49.0     | 2.8          | 7       | 20.0       | 2.324         | 179                         |                             |
| 5     | 36      | 0         | 60           | 3.0     | 51.2     | 170                     | 472 | 0   | 448 | 435 | 859  | 0.95     | 61.0         | 3.1     | 3          | 19.0          | 2.388                       | 172                         |
| 6     |         | 425       |              |         |          |                         | 47  | 440 | 430 | 859 | 0.95 | 66.0     | 2.6          | 7       | 19.5       | 2.385         | 170                         |                             |
| 7     |         | 378       |              |         |          |                         | 94  | 431 | 419 | 859 | 0.85 | 64.0     | 2.5          | 15      | 19.5       | 2.375         | 173                         |                             |
| 8     |         | 330       |              |         |          |                         | 142 | 423 | 414 | 859 | 0.75 | 63.0     | 3.0          | 25      | 19.0       | 2.349         | 172                         |                             |
| 9     | 27      | 0         |              |         | 46.1     | 170                     | 630 | 0   | 373 | 362 | 875  | 1.30     | 59.0         | 3.1     | 7          | 24.0          | 2.411                       | 182                         |
| 10    |         | 567       |              |         |          |                         | 63  | 362 | 354 | 875 | 1.25 | 64.0     | 2.8          | 15      | 23.0       | 2.401         | 179                         |                             |
| 11    |         | 504       |              |         |          |                         | 126 | 351 | 343 | 875 | 1.15 | 63.5     | 3.5          | 30      | 22.0       | 2.401         | 182                         |                             |
| 12    |         | 441       |              |         |          |                         | 189 | 340 | 333 | 875 | 1.05 | 62.0     | 2.4          | 40      | 22.0       | 2.385         | 180                         |                             |

※補助AE剤は、(C+FA)×0.01%を1Aとして表す。

表-3 試験項目および試験方法

| 検査項目         | 内容  | 試験方法                              |
|--------------|---|-----------------------------------|
| スランプフロー      | スランプフロー値  | JIS A 1150                        |
| 空気量          | 空気室圧力方法   | JIS A 1128                        |
| コンクリート温度     | 温度計   | JIS A 1156                        |
| 単位容積質量       | 空気量試験器による   | JIS A 1116                        |
| 単位水量         | 電子レンジ法  | 高周波加熱法                            |
| 圧縮強度         | 標準養生供試体 (材齢7,28,56,91日)<br>簡易断熱養生供試体 (材齢28,56,91日)                      | JIS A 1132 ならびに JIS A 1108        |
| 温度履歴         | 簡易断熱養生供試体及び外気 (各W/B)  | 温度測定用データロガー                       |
| コンクリートの静弾性係数 | 簡易断熱養生供試体 (各W/Bの材齢91日)  | JIS A 1149                        |
| 耐久性          | コンクリートの促進中性化試験 (配合No.5とNo.8)  | JIS A 1153                        |
| 自己収縮         | φ10×20cmの簡易モールドにゲージ (東京測器社製 PMFL-60T-3LT) を埋め込み、材齢28日程度まで測定 (W/B 36%配合) | JCI (仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験法に準拠した簡易法 |

簡易断熱養生は、写真-1に示す外寸835×835×566mm、内寸435×435×205mmの発砲スチロール製養生箱を用いて、養生箱の内部温度が外気温度程度まで低下したところで供試体を取り出し、供試体全体をビニール袋で包み密閉し、外気温で所定の材齢まで封かん養生を行った。また、温度履歴測定用供試体は、養生箱の中央部に設置し、供試体の中心に温度センサーを取り付け温度履歴の測定を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表-2に、FA置換率と補助AE剤添加量の関係を図-1に示す。

一般にフライアッシュを使用したコンクリートでは、置換率の増加に伴いAE剤の使用量は増大するといわれているが、今回の実験でも既往の研究と同様に、FA置換率が多くなるとAE剤使用量が増加する傾向にあり、W/B 27%のFA置換率30%の場合40Aが必要な結果となった。



写真-1 簡易断熱養生箱

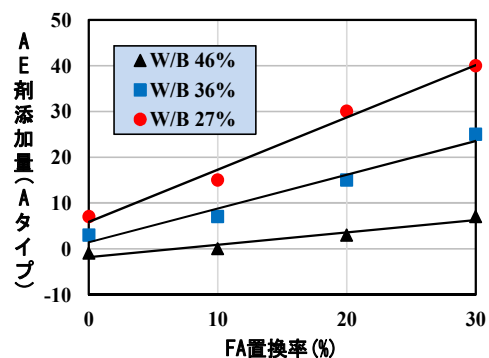


図-1 FA置換率とAE剤添加量

### 3.2 圧縮強度

#### (1) 養生条件別の圧縮強度

養生条件別の圧縮強度試験結果を表-4 および図-2に示す。

表-4 養生条件別圧縮強度と強度補正值

| W/B (%) | FA置換率 (%) | 養生方法 | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |       |       | 強度補正值 (S <sub>m</sub> )       |                               |
|---------|-----------|------|--------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------------------------------|
|         |           |      | 材齢28日                    | 材齢56日 | 材齢91日 | <sub>28</sub> S <sub>56</sub> | <sub>28</sub> S <sub>91</sub> |
| 46      | 0         | 標準   | 52.5                     | 55.1  | 56.3  | 4.1                           | 1.0                           |
|         |           | 簡易   | 43.6                     | 48.4  | 51.5  |                               |                               |
|         | 10        | 標準   | 50.9                     | 54.7  | 58.1  | 3.8                           | 1.1                           |
|         |           | 簡易   | 45.2                     | 47.1  | 49.8  |                               |                               |
|         | 20        | 標準   | 45.8                     | 51.7  | 58.0  | -1.0                          | -4.1                          |
|         |           | 簡易   | 43.2                     | 46.8  | 49.9  |                               |                               |
| 30      | 標準        | 41.0 | 49.8                     | 54.3  | -6.4  | -7.7                          |                               |
|         | 簡易        | 43.0 | 47.4                     | 48.7  |       |                               |                               |
| 36      | 0         | 標準   | 70.9                     | 73.8  | 76.6  | 10.0                          | 7.3                           |
|         |           | 簡易   | 59.2                     | 60.9  | 63.6  |                               |                               |
|         | 10        | 標準   | 71.0                     | 75.9  | 79.2  | 5.8                           | 4.8                           |
|         |           | 簡易   | 62.0                     | 65.2  | 66.2  |                               |                               |
|         | 20        | 標準   | 67.1                     | 74.0  | 81.3  | 5.7                           | 5.5                           |
|         |           | 簡易   | 58.0                     | 61.4  | 61.6  |                               |                               |
| 30      | 標準        | 62.3 | 68.8                     | 75.9  | 3.8   | 2.3                           |                               |
|         | 簡易        | 55.2 | 58.5                     | 60.0  |       |                               |                               |
| 27      | 0         | 標準   | 89.9                     | 94.6  | 100   | 11.6                          | 10.4                          |
|         |           | 簡易   | 74.1                     | 78.3  | 79.5  |                               |                               |
|         | 10        | 標準   | 89.6                     | 98.0  | 103   | 8.8                           | 8.9                           |
|         |           | 簡易   | 77.1                     | 80.8  | 80.7  |                               |                               |
|         | 20        | 標準   | 83.3                     | 91.9  | 103   | 5.3                           | 5.7                           |
|         |           | 簡易   | 73.5                     | 78.0  | 77.6  |                               |                               |
| 30      | 標準        | 86.2 | 95.2                     | 104   | 8.4   | 8.0                           |                               |
|         | 簡易        | 77.7 | 77.8                     | 78.2  |       |                               |                               |

フライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度の一般的な傾向は、無混和のコンクリートに比べて材齢28日以前では小さく、材齢91日以降の長期材齢では条件によっては同等または大きくなる場合がある<sup>2)</sup>とされているが、今回の実験の標準養生供試体強度でも同様な傾向を示し、W/B27%の材齢91日強度は、無混和よりも3~4N/mm<sup>2</sup>大きい結果であった。なお、W/B46%および36%では、FA置換率が多くなると、同等もしくは低下する傾向を示した。

簡易断熱養生では、全材齢を通じてFA置換率の違いによる明確な強度差は見られない傾向を示した。これはフライアッシュを使用した高強度コンクリートは、湿潤養生の影響を大きく受ける<sup>2)</sup>といわれており、養生方法の影響が表れたものと推測する。

#### (2) 強度発現率

材齢28日強度から材齢56日および材齢91日強度への伸び率を図-3に示す。

標準養生では、FA置換率が多くなるほど伸び率は大きくなる傾向を示しており、これはフライアッシュの反応性に関して、内川ら<sup>3)</sup>の研究で、フライアッシュの反応率は、材齢28日以後に開始し、長期材齢では、Ca(OH)<sub>2</sub>の添加量またはCa(OH)<sub>2</sub>の供給可能量が多いほど、フライアッシュは高い反応性を示すとされており、今回の実験でも同様な結果となったものと考えられる。

簡易断熱養生では、FA置換率の違いによる明確な傾向

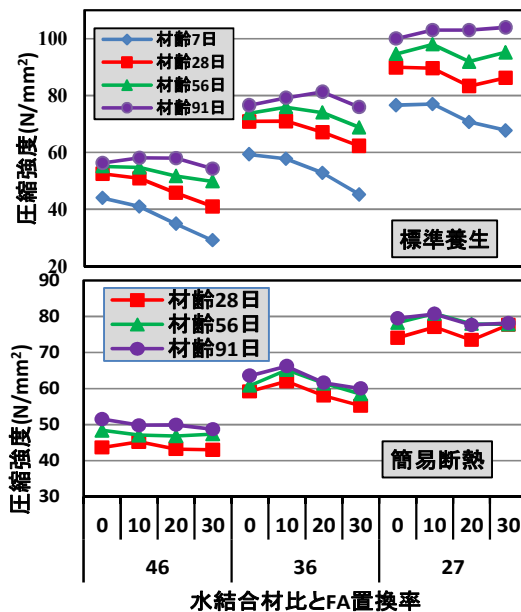


図-2 養生条件別の圧縮強度試験結果

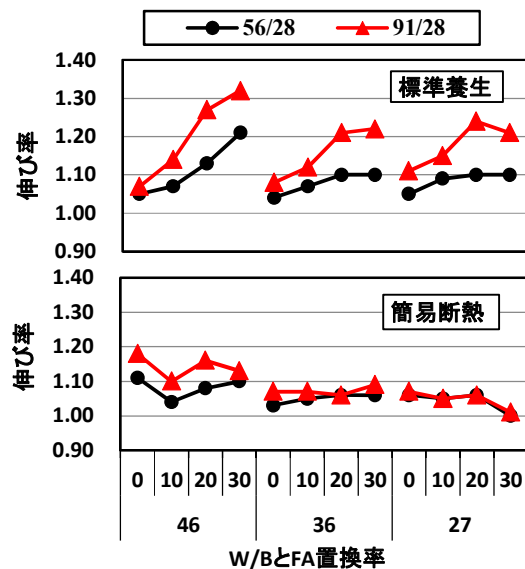


図-3 材齢28日からの強度の伸び率

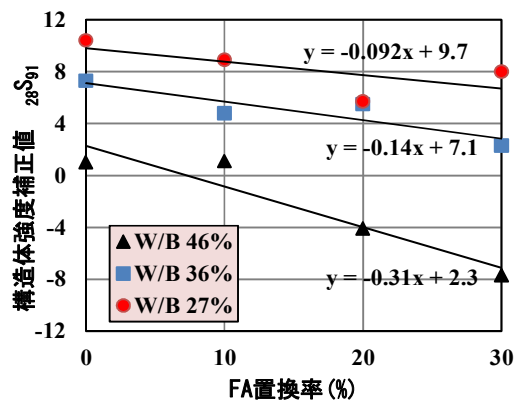


図-4 FA置換率と構造体強度補正值

は認められず、前述<sup>2)</sup>と同様に養生方法の影響によるものと推測する。

### (3) 構造体強度補正值

FA 置換率と構造体強度補正值（以下、S 値という）の関係を図-4 に示す。なお、ここで用いる S 値は、本実験で用いた簡易断熱養生供試体の材齢 91 日強度を用いて求めた。

今回の実験では、S 値は FA 置換率が多くなるほど小さくなる傾向を示し、JASS 5 の高強度コンクリートで普通ポルトランドセメントを用いた場合の設計基準強度の範囲  $48 < F_c \leq 60$  の標準値<sup>4)</sup>である 12 より小さい結果であった。また、簡易断熱養生の圧縮強度は、今回行った FA 置換率 10%~30%の範囲では、無混和と大差がない傾向であり、高強度コンクリートに結合材として FA をセメントの内割置換することは可能であると考えられる。

### 3.3 温度履歴

#### (1) FA 置換率と簡易断熱の最高温度

水結合材比別の簡易断熱養生の温度履歴を図-5 に、FA 置換率と簡易断熱最高温度の関係を図-6 に示す。

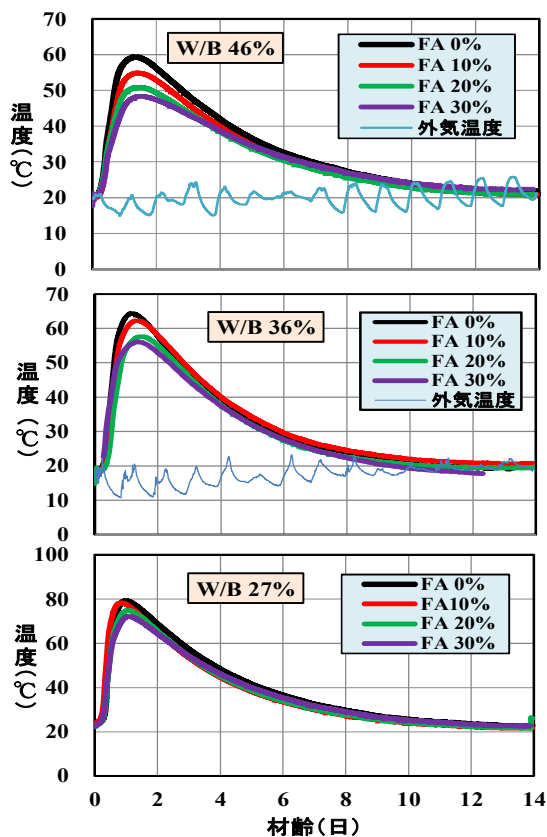


図-5 簡易断熱養生の温度履歴

今回の実験で行った簡易断熱養生の最高温度は、50~80℃に達し FA 置換率が多くなるほど低くなる傾向を示した。FA 置換率と簡易断熱養生最高温度の関係を W/B 別に見れば、両者の関係を示す相関係数はいずれもが

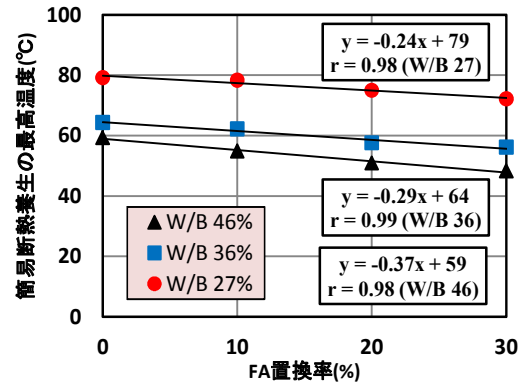


図-6 FA 置換率と簡易断熱養生最高温度の関係

0.98 以上であり、高度な相関関係が認められた。また、水和熱低減効果は FA 置換率 30%が最も大きく、その効果は 7~11℃であることが確認できた。

#### (2) 断熱温度上昇特性

フライアッシュを多量に添加したコンクリートの断熱温度上昇特性については、細川ら<sup>5)</sup>の研究により、単位セメント量に依存していると言われている。そこで、今回の実験の簡易断熱養生の温度測定結果から、コンクリートの断熱温度上昇特性を推定し、学会式との比較を行った。推定は、式(1)の推定式に表-5 の係数を用いて算出し、検討を行った。なお、打込み温度( $T_a$ )は 20℃を用いた。

$$Q_{\infty} = a + b \times Ta \quad (1)$$

ここに、 $Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量,  $a, b$ : 係数,

$T_a$ : 打込み温度(℃)

表-5 終局断熱温度上昇量推定式の係数

| 係数 | 土木学会              | セメント協会 | 土木学会             |
|----|-------------------|--------|------------------|
|    | 普通ポルトランドセメント      |        | フライアッシュセメントB種    |
| a  | 17.5+0.113×C      |        | 3.03+0.138×C     |
| b  | -0.146+0.000308×C |        | 19.0             |
|    |                   |        | 0.0741-0.00016×C |

土木学会<sup>6)</sup>とセメント協会<sup>7)</sup>の終局断熱温度上昇量推定値と実験値の単位セメント量との関係を図-7 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた土木学会推定式では、適用範囲  $250 \text{ kg/m}^3 \leq C \leq 400 \text{ kg/m}^3$  が顕著に表れており、単位セメント量の多い高強度コンクリートの断熱温度上昇量の推定には適さないと思われる。

セメント協会の推定式は、実験値の回帰式とほぼ勾配は類似しているが、実験値が約 5℃高い値となっている。

土木学会のフライアッシュセメント B 種を用いた推定式は、全般に実験値との差が大きい結果となった。特に少ない単位セメント量の配合では、その差が大きい傾向を示している。

フライアッシュセメント推定式のフライアッシュの混

入率は18%を用いているが、今回の実験のFA内割り置換の場合は、この推定式での断熱温度上昇量の推定は難しいと思われる。

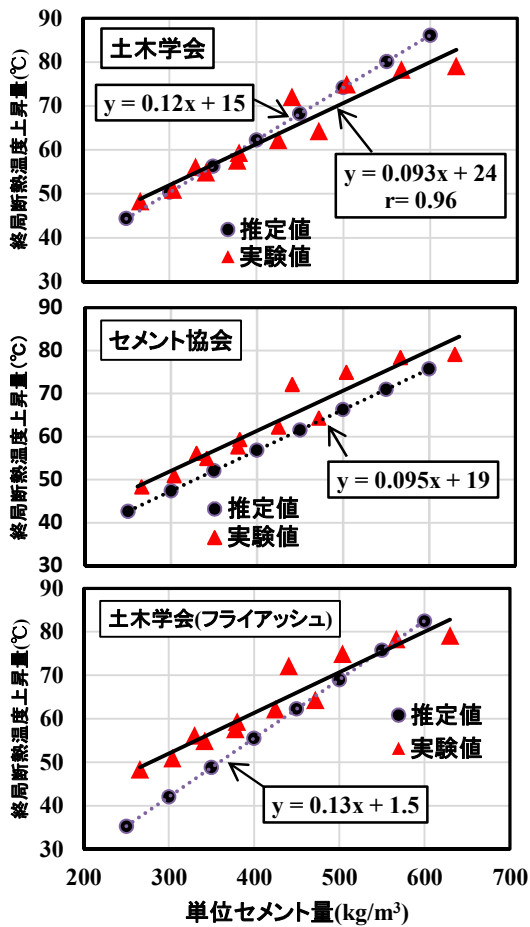


図-7 終局断熱温度上昇量と単位セメント量の関係

普通ポルトランドセメントを用いた、土木学会とセメント協会の推定式と実験結果を比較すると、多少のばらつきはあるものの推定値に近似しており、単位セメント量が影響しているものと推測される。これは、フライアッシュが材齢初期においてほとんど反応しないため、初期発熱に影響しなかったとする報告<sup>5)</sup>と同様な結果と考える。

### 3.4 コンクリートの静弾性係数

材齢91日簡易断熱養生の静弾性係数と材齢28日標準養生の圧縮強度との関係を図-8に示す。

New RC式<sup>8)</sup>は、粗骨材の種類により定まる修正係数k1を1.2、混和材の種類により定まる修正係数k2を1.1をとして計算した。また、コンクリートの単位容積質量rは2.4(t/m<sup>3</sup>)を用いた。

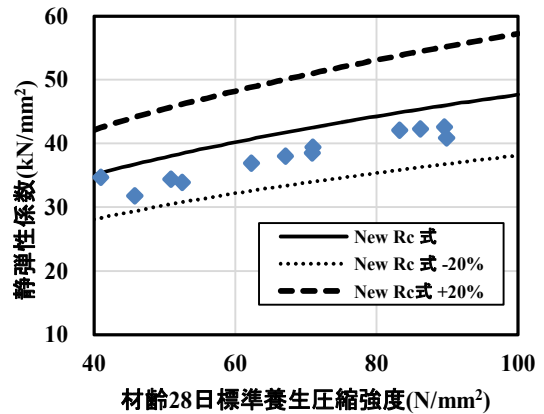


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

今回の実験での静弾性係数は、New RC式の中心を若干下回るが、New RC式の80%は全て上回っていた。

### 3.5 促進中性化試験

W/B36%でFA置換率0%と30%の配(調)合で行った促進中性化試験の促進期間(週)と中性化深さの関係を図-9に示す。

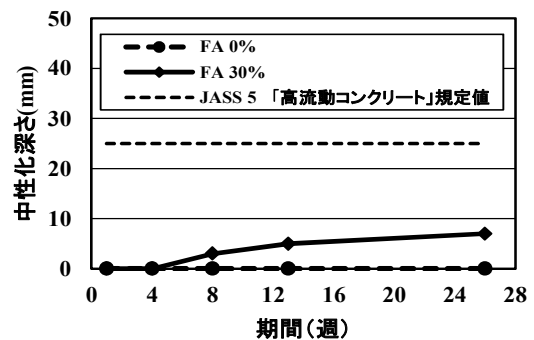


図-9 促進中性化試験結果

FA置換率0%の場合、促進期間を通じて中性化は認められなかったが、FA置換率30%では促進期間8週より中性化が認められ、26週の中性化深さは7.0mmであった。中性化深さ7.0mmは、JASS5高流動コンクリート<sup>9)</sup>の規定値25mm以下を満足する結果であった。また、中性化速度係数(mm/√週)は1.37となり、JASS5高流動コンクリート<sup>9)</sup>解説図3.8.2のフライアッシュ置換率30%の値とほぼ同等となることが確認できた。

### 3.6 自己収縮

経過時間168時間までのW/B36%配(調)合の自己収縮の測定結果を図-10に示す。



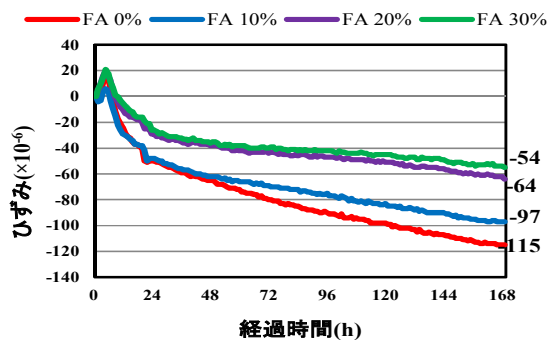


図-10 自己収縮ひずみ測定結果

自己収縮ひずみの算出は、JCI (仮称)高流動コンクリート自己収縮試験法の式(2)の計算式を用いた。

$$\text{自己収縮ひずみ} = \varepsilon_t - \gamma \Delta T \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_t$  : 埋込型ひずみ計から得られた材齢 t 日のひずみ

$\gamma$  : コンクリートの熱膨張係数 ( $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta T$  : 熱電対より得られた材齢 t 日の供試体の温度と打込み温度との差 ( $^{\circ}\text{C}$ )

図-10 から、FA 置換率が多くなれば自己収縮ひずみが小さくなる傾向が確認でき、FA 置換率 20 および 30% では無混和に比べて約 50~60  $\mu$  小さくなる傾向が確認できた。

#### 4. まとめ

高強度コンクリートのセメントに FA を内割置換した本実験の結果から得られたまとめを以下に示す。

- (1) フレッシュコンクリートの AE 剤使用量は、FA 置換率が多くなると AE 剤使用量が増加する傾向にあり、水結合材比 27% の FA 置換率 30% の場合、AE 剤使用量  $(C+FA) \times 0.01\%$  を 1A として表すと、40A が必要な結果となった。
- (2) FA をセメントの結合材として内割置換した場合の簡易断熱養生の圧縮強度は、無混和と大差がない傾向であった。また、S 値は、JASS 5 の標準値より小さくなる傾向が確認できた。従って、今回行った FA 置換率 30% までは、高強度コンクリートへの適用は可能であると考えられる。
- (3) 簡易断熱養生の最高温度は、FA 置換率が多くなるほど低下する傾向を示し、水和熱低減効果は FA 置換率 30% が最も大きく、その効果は 7~11 $^{\circ}\text{C}$  であることが確認できた。また、その特性は単位セメント量が影響しているものと思われる。

- (4) 簡易断熱養生供試体の弾性係数は、New RC 式の 80% を上回っていた。
- (5) 水結合材比 36% の FA 置換率 30% 配(調)合で行った促進中性化試験の促進期間 26 週で、中性化深さは 7.0mm であった。
- (6) 水結合材比 36% 配(調)合で行った自己収縮試験では、FA 置換率が多くなれば自己収縮ひずみが小さくなる傾向が確認でき、FA 置換率 20 および 30% では無混和に比べて約 50~60  $\mu$  小さくなる傾向が確認できた。

**謝辞** : 本研究は、JCI 四国支部「生コン技術力活性化委員会第 II 期」の活動の一環として行ったものである。なお、実験の実施に際し、東部生コンクリート(株)、(株)フローリックの各位に、協力を頂きました。紙面を借りて謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) フライアッシュコンクリートの耐久性評価研究委員会報告書、(社)日本コンクリート工学会四国支部、2013.3
- 2) 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
- 3) 内川浩ほか：混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混和材の効果<その 2>、セメント・コンクリート、No.484, pp.81-93, June, 1987
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.492, 2015.7
- 5) 細川 大介、室野井 敏之、竹内 直也、溝渕 利明：フライアッシュ多量添加によるコンクリートの水和熱抑制効果に関する検討、コンクリート工学、Vol.33, No1, pp179-184, 2011
- 6) (社)土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書「設計編」、pp.316-317, 2012.3
- 7) (社)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-59 各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇に関する研究、pp.39, 2014.3
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1999
- 9) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説、1997.1