

高 C<sub>3</sub>S セメントを用いたフライアッシュセメントの脱型強度に及ぼす蒸気養生条件の影響

太平洋セメント（株） 正会員      ○多田 真人 正会員      久我 龍一郎  
非会員      内田 俊一郎  
（株）デイ・シイ 正会員      二戸 信和

1. 目的

フライアッシュ（以下、FA）セメントの特徴である耐久性に、強度発現性を併せ持たせる目的で、著者らは高エーライト（C<sub>3</sub>S）化したセメントを基材に用いたコンクリート製品向け高 C<sub>3</sub>S 型 FA セメントの開発を行っている。本報では、開発した高 C<sub>3</sub>S 型 FA セメントの蒸気養生特性を確認するとともに、最適な蒸気養生条件を明らかにすることを目的として、蒸気養生を模擬した温度履歴養生における各工程が、高 C<sub>3</sub>S 型 FA セメントを用いたモルタルの脱型強度に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

使用材料を表-1 に、セメントの SO<sub>3</sub>、f.CaO 量と鉱物組成を表-2 にモルタルの配合を表-3 にそれぞれ示す。結合材には高 C<sub>3</sub>S セメントに FA を 18%置換したフライアッシュセメント（以下 AF）と、比較として普通ポルトランドセメント（以下 N）を用いた。

圧縮強度および水銀圧入法による細孔径分布測定用のモルタルは、水粉体比 47%、s/a=45%、スランプ 12±1.5cm、空気量 4.5±0.5%として試し練りを行い定めたコンクリートの配合から粗骨材を除去した配合条件にてφ50×100mmの鋼製型枠に成型した。XRDによる結晶性水和物の同定、およびTG-DTAによる質量減少率の測定に用いたセメントペーストは水粉体比47%にて練混ぜ、φ25×50mmのポリプロピレン製容器に成型した。

実験水準、およびモルタルの脱型強度（後述）を表-4 に示す。前養生

および後養生は20℃-R.H.80%とし、水準1、および水準2の条件を基準に、前養生時間、昇温速度、最高温度、最高温度保持時間、降温速度、および後養生時間を因子として温度履歴を変更した蒸気養生を実施した。モルタル供試体による圧縮強度の測定は脱型直後に実施した。モルタル供試体による細孔分布測定、およびセメントペースト供試体による水和解析は脱型直後に多量のアセトンで水和停止した後に実施した。

表-1 使用材料

| 分類   | 名称                    | 記号  | 概要                                                      |
|------|-----------------------|-----|---------------------------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント          | N   | 密度：3.16g/cm <sup>3</sup><br>比表面積：3170cm <sup>2</sup> /g |
|      | 高C <sub>3</sub> Sセメント | A   | 密度：3.11g/cm <sup>3</sup><br>比表面積：5380cm <sup>2</sup> /g |
| 混和材  | フライアッシュ               | FA  | 密度：2.19g/cm <sup>3</sup><br>比表面積：3490cm <sup>2</sup> /g |
| 細骨材  | 山砂                    | S   | 表乾密度：2.59g/cm <sup>3</sup>                              |
| 混和剤  | 高性能減水剤                | SP  | ポリカルボン酸エーテル系                                            |
|      | AE剤                   | AE1 | アルキルカルボン酸系                                              |
|      |                       | AE2 | アルキルエーテル系                                               |
|      | 消泡剤                   | DA  | ポリアルキレングリコール系                                           |

表-2 セメントの SO<sub>3</sub>、f. CaO 量と鉱物組成

| セメント | SO <sub>3</sub><br>(%) | f.CaO<br>(%) | 鉱物組成(%, Bouge)   |                  |                  |                   |
|------|------------------------|--------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|      |                        |              | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| N    | 2.0                    | 0.2          | 61.6             | 15.1             | 8.2              | 9.1               |
| A    | 3.1                    | 2.1          | 69.3             | 2.9              | 9.4              | 7.7               |

表-3 モルタルの配合およびフレッシュ試験結果

| 配合 | W/B*<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |    |      |      | 混和剤(B*×%) |      |       |  | フレッシュ試験結果  |         |     |
|----|-------------|-------------------------|-----|-----|----|------|------|-----------|------|-------|--|------------|---------|-----|
|    |             | W                       | N   | A   | FA | S    | SP   | AE1       | AE2  | DA    |  | 空気量<br>(%) | フロー(mm) |     |
| AF | 47          | 255                     | -   | 445 | 99 | 1283 | 0.60 | 0.04      | -    | 0.016 |  | 8.0        | 123     | 232 |
| N  |             | 257                     | 550 | -   | -  | 1287 | 0.50 | -         | 0.04 | 0.016 |  | 7.3        | 122     | 237 |

\*B=(A+FA)またはB=N

表-4 実験水準、積算温度および脱型強度

| 水準 | 変更因子                  | セメント | 前養生<br>時間<br>(h) | 昇温速度<br>(℃/h) | 最高温度<br>(℃) | 最高温度<br>保持時間<br>(h) | 降温速度<br>(℃/h) | 後養生<br>時間<br>(h) | 総養生<br>時間<br>(h) | 積算温度<br>(℃・h) | 脱型強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |      |
|----|-----------------------|------|------------------|---------------|-------------|---------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|------------------------------|------|
| 1  | 比較用                   | N    | 2                | 20            | 65          | 3                   | -4.5          | 6.75             | 24               | 891           | 20.7                         |      |
| 2  | 基準                    | AF   | 1                |               |             |                     |               |                  | 23               | 871           | 20.7                         |      |
| 3  | 前養生<br>時間             |      | 4                |               |             |                     |               |                  | 26               | 931           | 23.9                         |      |
| 4  | 昇温速度                  |      | 40               | 22.9          |             |                     |               |                  | 843              | 17.1          |                              |      |
| 5  | 最高温度                  |      | 60               | 22.5          |             |                     |               |                  | 827              | 11.8          |                              |      |
| 6  |                       |      | 50               | 19.9          |             |                     |               |                  | 611              | 16.9          |                              |      |
| 7  | 80                    |      | 28.1             | 1232          |             |                     |               |                  | 25.1             |               |                              |      |
| 8  | 最高温度<br>保持時間          |      | 20               | 65            | 1           | 22.0                |               |                  | 761              | 20.7          |                              |      |
| 9  |                       |      |                  |               | 5           | 26.0                |               |                  | 1021             | 23.2          |                              |      |
| 10 | 降温速度                  |      |                  |               | 3           | -10                 | 18.5          |                  | 657              | 19.5          |                              |      |
| 11 |                       |      |                  |               |             | -20                 | 16.3          |                  | 561              | 19.5          |                              |      |
| 12 | 後養生<br>時間             |      |                  |               |             | 3                   | 20.3          |                  | 816              | 21.3          |                              |      |
| 13 |                       |      |                  |               |             | 17.3                | 756           |                  | 21.4             |               |                              |      |
| 14 | 昇温速度<br>最高温度<br>後養生時間 |      |                  |               |             | 15                  | 55            | -4.5             | 0.5              | 15.6          | 594                          | 21.3 |
| 15 |                       |      |                  |               |             |                     |               |                  |                  |               |                              |      |

キーワード フライアッシュ、エーライト、蒸気養生、圧縮強度、細孔径分布

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント中央研究所 TEL043-498-3841

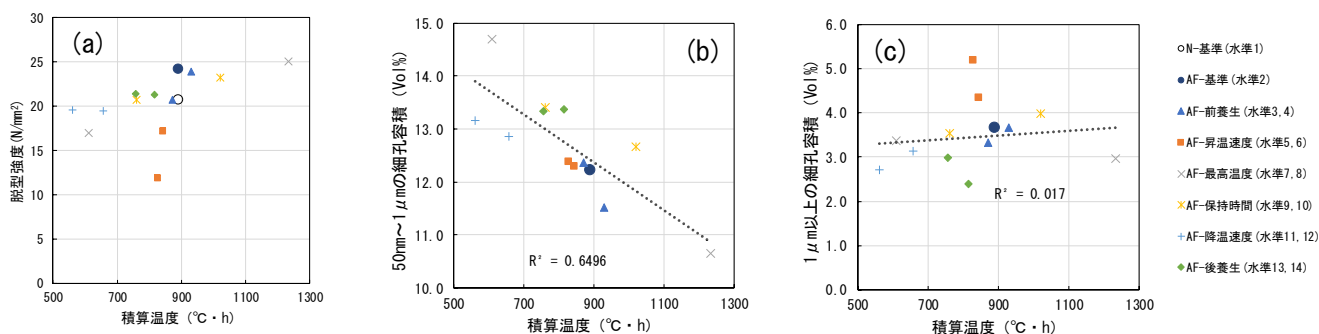


図-1 (a) 脱型強度、(b) 50nm～1 $\mu$ m の細孔容積、および (c) 1 $\mu$ m 以上の細孔容積と積算温度の関係  
(凡例の表記は【セメント種類-変更因子】を表す。)

### 3. 実験結果

脱型強度、50nm～1 $\mu$ m の細孔容積、および 1 $\mu$ m 以上の細孔容積と積算温度の関係をそれぞれ図-1(a)～図 1(c)に示す。図-1(a)より、基準の温度履歴における AF と N (水準1および2)を比較すると、AF の脱型強度は N の場合より 4N/mm<sup>2</sup> 程度高く、AF は N より早期に脱型できることが示唆された。AF の脱型強度は概ね積算温度に比例する傾向がみられたものの、昇温速度が速くなると脱型強度が低下した。このとき、図-1(b)に示すとおり、50nm から 1 $\mu$ m 未満の細孔容積と積算温度には蒸気養生条件によらず相関がみられたのに対して、図-1(c)に示す 1 $\mu$ m 以上の細孔容積は昇温速度を速くした場合のみ 1 $\mu$ m 以上の細孔容積が増加する傾向がみられた。従って、AF の昇温速度が速くなった場合に脱型強度が低下した原因は粗大空隙が増加したためと考えられる。

ここで、AF の基準条件(水準2)および昇温速度が 60°C/h の条件(水準6)における脱型時点の XRD の回折パターンと、TG-DTA の質量減少率を図-2、図-3に示す。両図より、水準2と6は脱型強度や粗大な空隙量に差がみられたにも関わらず、回折パターンや熱重量変化に違いがみられなかった。従って、結晶性水和物の組成やセメントの反応率は昇温速度によらず同程度と考えられ、強度低下の原因解明には微細ひび割れや非晶質水和物等に対する更なる検証が必要である。

昇温速度を 15°C/h、最高温度を 55°C、後養生を 30 分に変更した水準15と基準条件の脱型強度と総養生時間の関係を図-4に示す。水準15において、AF は基準条件(水準1)で養生した N の脱型強度と同等以上であり、かつ総養生時間を 8.4 時間短縮できた。加えて、この水準15では基準条件よりも最高温度が低いため、養生にかかる重油の使用量も低減できると考えられる。

### 4. まとめ

- (1) 基材セメントの C<sub>3</sub>S 量を多くした FA セメント (AF) を用いることで、N の場合と比較して温度履歴養生後の脱型強度を 4N/mm<sup>2</sup> 程度高くすることができた。
- (2) 温度履歴養生後の強度発現性は概ね積算温度に依存する。ただし昇温速度が速い場合は粗大な空隙の増加により強度発現性は悪化する傾向にあった。
- (3) 温度履歴養生を最適化した AF は、昇温速度 20°C/h、最高温度 65°C、後養生時間が 6 時間 45 分とした場合の N の脱型強度と同等で、かつ N よりも早期に脱型が可能であり、重油の使用量も低減できると考えられる。

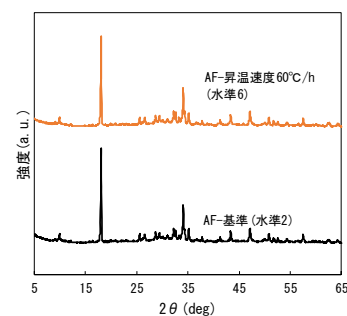


図-2 XRD チャート

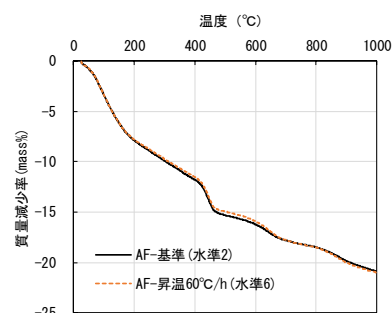


図-3 質量減少率

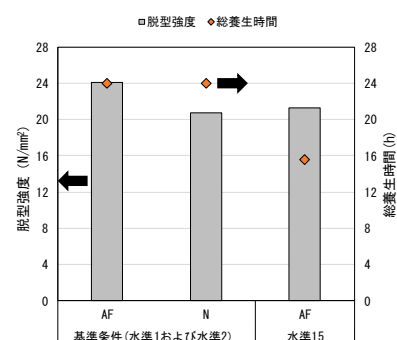


図-4 脱型強度および総養生時間