

H1-1

## 高炉セメントペーストの水和反応と圧縮強度に及ぼす熱養生履歴の影響

### The Effects of Heat Curing History on to the Hydration Reaction and Compressive Strength of Blast Furnace Cement

○高久雅基<sup>1</sup>, 佐藤正己<sup>2</sup>, 梅村靖弘<sup>2</sup>

\*Masaki Takahisa<sup>1</sup>, Masaki Sato<sup>2</sup>, Yasuhiro Umemura<sup>2</sup>

Abstract: Nowadays, blast furnace slag cement is also being used in precast (PCa) concrete products. In general, steam curing is carried out in curing PCa concrete. However, it is not clear about the appropriate curing pattern in view of the hydration reaction and latent hydraulic properties of blast furnace slag(BS). In this study, the authors examined the effects of heat curing history on BS reaction rate and cement reaction rate, compressive strength development.

#### 1. はじめに

最近の i-Construction に提言されているコンクリート構造物の品質向上や施工効率向上の手段として、工場で生産されるプレキャストコンクリート(PCa)製品が注目されている。通常、PCa 製品の養生は Figure 1.のような 1 日 1 サイクルの蒸気養生(標準養生)が行われているが、繁忙期には経験的に 1 日 2 サイクルの蒸気養生(促進養生)が行われている。しかし、高炉セメント(BSC)を用いた PCa 製品において、内田ら<sup>1)</sup>の研究では最高養生温度 65°C で温度ひび割れが生じ 45°C に変更したことにより改善されたとの報告があり、BSC を用いた PCa 製品に限った課題が存在する。しかし、従来の蒸気養生は経験的に行われてきたため、BSC の水和反応から鑑みた適切な養生パターンの研究が少ない。そこで、本研究では BSC ペーストの水和反応と強度発現に及ぼす熱養生履歴の影響について検討した。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 使用材料および試料作製方法

本試験で使用する材料を Table 1., ペースト配合を Table 2.に示す。セメントペースト(CP)は普通ポルトランドセメント(OPC)に対して、高炉スラグ微粉末(BS)を B 種の想定として 45%内割置換し、水結合材比(W/B)を 50%とした。養生パターンを Figure 1., Table 3.に示す。最高養生温度 65°C, 45°Cの各々における標準養生, 促進養生の計 4 パターンとした。熱養生後、硬化 CP 試料は所定の材齢まで室温 20°Cの封かん養生を行った。測定材齢は練混ぜ直後を始点とし 1, 3, 7, 14, 28 日とした。

##### 2.2 実験項目

硬化した CP の相組成を後述する(1)~(4)の実験により求めた。本研究では非晶質水和物を C-S-H と仮定した。なお、(1), (2)は水和停止前, (3), (4)は水和停止を施した試料を用いた。

(1) 間隙水量の測定: 蒸発皿に試料を量り取り, 105°Cの乾燥炉に入れ, 質量減少量を間隙水量とした。

(2) 未水和セメント鉱物および水和物, 非晶質の定量: 内部標準法( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )を用いて, XRD/リートベルト法により, 各セメント鉱物および結晶質水和物, 非晶質相を定量した。

(3) BS 未反応量の定量: 石川ら<sup>2)</sup>の手法を参考に, 試料と未水和スラグに 900°C, 30 分の加熱処理を行い, 標準添加法を用いて, 未水和スラグを試料に内割 0, 10, 20mass%をそれぞれ添加し, XRD 測定後, XRD/リートベルト法により, スラグ鉱物である Gehlenite, Akermanite の定量合計値と添加量から求めた検量線から BS 未反応量を求めた。

(4)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量および  $\text{CaCO}_3$ 量の定量: TG-DTA を用いて, 吸熱ピークに相当する質量減少量から求めた。

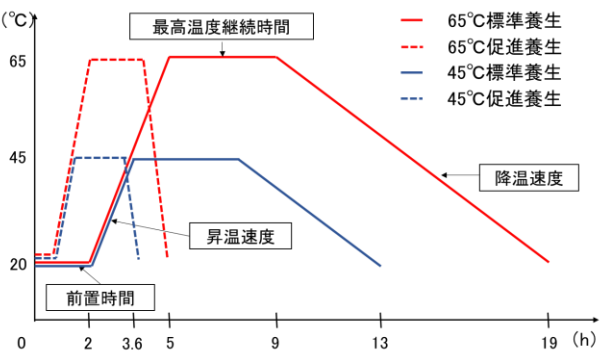


Figure 1. Heat Curing Program

Table 1. Materials

| 材料           | 略号  | 諸元                             |
|--------------|-----|--------------------------------|
| 普通ポルトランドセメント | OPC | 密度 : 3.15 g/cm <sup>3</sup>    |
|              |     | 比表面積 : 3260 cm <sup>2</sup> /g |
| 高炉スラグ微粉末     | BS  | 密度 : 2.89 g/cm <sup>3</sup>    |
|              |     | 比表面積 : 4380 cm <sup>2</sup> /g |
| 水            | W   | 水道水                            |

Table 2. Mix Proportion

| W/B (%) | 単位量(g/m <sup>3</sup> ) |     |     |
|---------|------------------------|-----|-----|
|         | W                      | B   |     |
|         |                        | OPC | BS  |
| 50      | 602                    | 662 | 542 |

Table 3. Heat Curing Program

| 養生パターン   | 最高温度 (°C) | 前置時間 (h) | 昇温速度 (°C/h) | 最高温度継続時間(h) | 降温速度 (°C/h) |
|----------|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|
| 65°C標準養生 | 65        | 2        | 15          | 4           | 4.5         |
| 65°C促進養生 | 65        | 0.5      | 30          | 2           | 急冷          |
| 45°C標準養生 | 45        | 2        | 15          | 4           | 4.5         |
| 45°C促進養生 | 45        | 0.5      | 30          | 2           | 急冷          |

1: 日大理工・院(前)・土木 2: 日大理工・教員・土木

(5) 圧縮強度試験：硬化 CP 試料を 15×15×15mm の立方体に成形し、JIS A 1108 の載荷速度で試験を行った。

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 熱養生履歴が水和に及ぼす影響

セメント反応率、BS 反応率、結合材反応率を Figure 2., Figure 3., Figure 4. に示す。65°C 標準養生と比較して、65°C 促進養生、45°C 標準および促進養生は、セメント反応率、BS 反応率、結合材反応率ともに材齢 1 日(脱型材齢)で約 10% 低下し、材齢の経過に伴いその差が小さくなった。一方、45°C 促進養生を 65°C 促進養生と比較すると、BS 反応率は同等となった。セメント反応率は材齢 3, 7 日で抑制されたが、材齢 14 日(出荷材齢)で同等となった。結合材反応率はセメント反応率と同様の傾向を示した。このことから、促進養生においては、最高養生温度は 45°C でも十分な反応を示した。

#### 3. 2 熱養生履歴が圧縮強度に及ぼす影響

圧縮強度を Figure 5. に示す。圧縮強度は 65°C 標準養生と比較して、65°C 促進養生、45°C 標準および促進養生が材齢 1 日(脱型材齢)で約 60% 低下したが、材齢の経過に伴いその差が小さくなり、材齢 28 日で 65°C 標準養生と同等となった。一方、45°C 促進養生を 65°C 促進養生と比較すると、圧縮強度は材齢 1 日(脱型材齢)で同等となり、材齢 3 日で約 15% 低下したが、材齢 14 日(出荷材齢)で同等となった。このことから、促進養生においては、最高養生温度は 45°C でも十分な強度が確保できたと考えられる。

#### 3. 3 水和反応と圧縮強度との関連性

セメントと BS による結合材反応率と圧縮強度発現性には相関が認められた。結合材反応率は、BS の反応率よりもセメント反応率の影響を受けることから、熱養生の場合の圧縮強度発現性性状は、BS よりもセメントの反応率の影響を受けることが認められた。

### 4. まとめ

- (1) 標準養生では最高養生温度 45°C より 65°C の方が圧縮強度発現が大きく、促進養生では 45°C と 65°C の圧縮強度発現が各材齢とも同程度となった。
- (2) セメントと BS による結合材反応率と圧縮強度発現性には相関が認められた。また、BS よりセメントの反応率の方が圧縮強度に寄与している。

### 5. 参考文献

[1] 内田恵之助ほか：高炉スラグ微粉末を使用した大型セグメント用コンクリートの性質に関する実験的研究，土木学会論文集，No.490/V-23，pp51-60，1994

[2] 石川玲奈ほか：加熱試料を用いた X 線回折-リートベルト法による高炉セメント中のスラグ反応率測定法の検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp76-81，2015

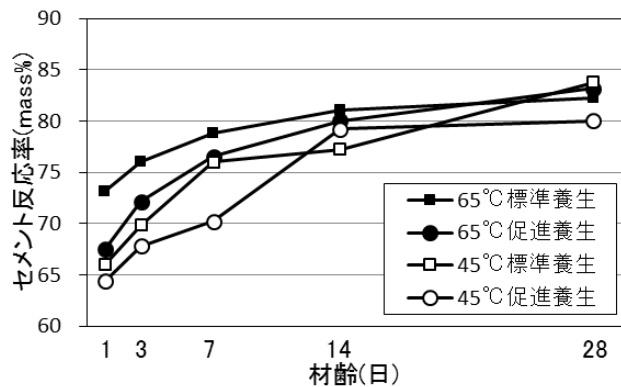


Figure 2. Cement Reaction Rate

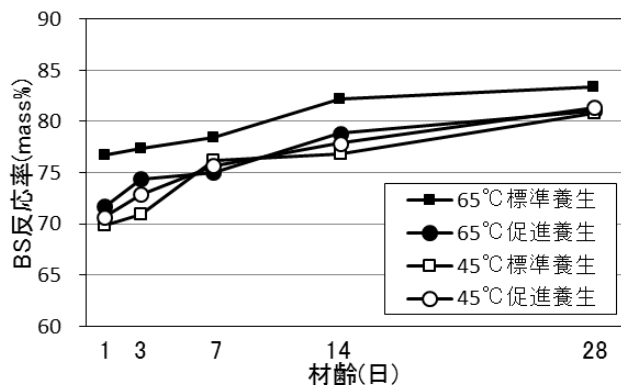


Figure 3. BS Reaction Rate

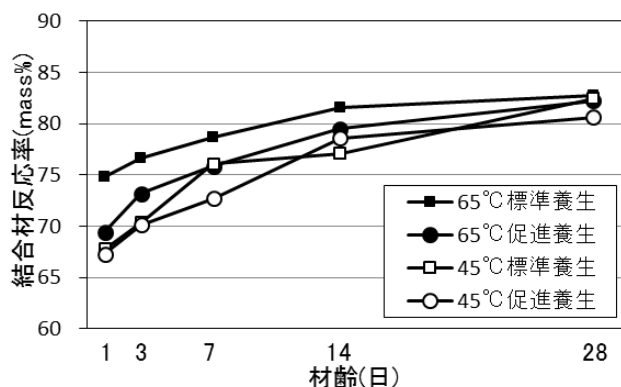


Figure 4. Binder Reaction Rate

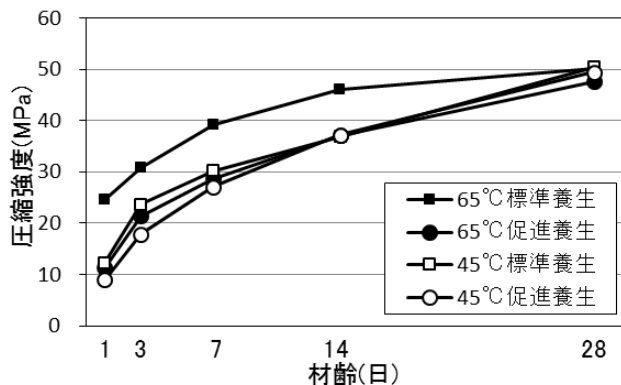


Figure 5. Compressive Strength