

第一セメント (株) 正会員 神崎隆男 第一セメント (株) 反町達也  
第一セメント (株) 広島明男 足利工業大学 依田彰彦

1. はじめに

高炉スラグ微粉末 (BS)、フライアッシュ (FA) を用いた低発熱混合セメントは水密性、海水、薬品などの化学抵抗性に優れているが、気中構造物に使用した場合、同一 W/C では中性化の進行が速く、また BS を用いたセメントは自己収縮が議論されている。以上のことを踏まえ、本研究は低発熱混合セメントを構成する BS の粉末度の影響、SO<sub>3</sub> 量の影響、更に FA を混合した影響について、圧縮強度、耐海水性、(促進・暴露養生)、中性化、耐薬品性、凍結融解、ひび割れ発生試験、乾燥収縮、自己収縮試験を行い総合的に耐久性の再確認を行った。また低熱、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較検討を実施した。本実験のうち乾燥収縮、自己収縮については、宮沢らが報告している。<sup>1)</sup>

今回は、促進耐海水性試験、海水暴露試験の材齢 20 年迄のうち 1 年、凍結融解試験の結果について検討したので報告する。

2. 実験

実験に用いたセメントは、表 1 に示した母体材料をプレミックスした。細骨材は、表乾比重 2.60、吸水率 1.70%、粗粒率 2.67 の君津産山砂、

粗骨材は最大寸法 20mm、表乾比重 2.69、吸水率 0.51%、粗粒率 6.79 の石灰岩質碎石、水は上水道水を使用した。コンクリートの配合を表 1 に示した。普通コンクリートは、材齢 91 日設計基準強度 ( $f'_{ck}$ ) を 27、35N/mm<sup>2</sup>、

| 表 1 実験に使用したセメント・混和材 |       |               |           |                      |      |     |                              |                            |                                                                                                |
|---------------------|-------|---------------|-----------|----------------------|------|-----|------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| セメント種類              |       | 母体材料の混合割合 (%) |           |                      |      |     | BS の粉末度                      | 密度                         | 母体材料の説明と物性                                                                                     |
| No.                 | 記号    | NC            | BS        | SO <sub>3</sub> (AG) | FA   | LC  | ( $\mu\text{m}^2/\text{g}$ ) | ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | NC<br>LC<br>BS<br>AG<br>FA                                                                     |
| 1                   | B4S2  | 38.0          | 2.0 (2.0) | —                    | —    | —   | 4000                         | 3.00                       | 普通ポルトランドセメント 比表面積 3280 $\text{cm}^2/\text{g}$<br>低熱ポルトランドセメント 比表面積 3280 $\text{cm}^2/\text{g}$ |
| 2                   | B6S1  | 40.0          | 60.0      | 0.9 (—)              | —    | —   | —                            | —                          | 高炉スラグ微粉末 4000 比重量 2.90<br>比表面積 4390 $\text{cm}^2/\text{g}$ 塩基度 1.79                            |
| 3                   | B6S2  | 38.0          | —         | 2.0 (2.0)            | —    | —   | 6000                         | —                          | 高炉スラグ微粉末 6000 比重量 2.90<br>比表面積 6150 $\text{cm}^2/\text{g}$ 塩基度 1.81                            |
| 4                   | B6S3  | 36.1          | —         | 3.0 (3.9)            | —    | —   | —                            | —                          | 無水石膏 比表面積 3380 $\text{cm}^2/\text{g}$<br>SO <sub>3</sub> 56.2%                                 |
| 5                   | B4F20 | 29.6          | 48.0      | 2.0 (2.4)            | 20.0 | —   | 4000                         | 2.78                       | フライアッシュ 比表面積 2730 $\text{cm}^2/\text{g}$<br>換算質量 1.94SiO <sub>2</sub> 51.4%                    |
| 6                   | B6F20 | —             | —         | —                    | —    | —   | 6000                         | —                          | フライアッシュ 比表面積 2730 $\text{cm}^2/\text{g}$<br>換算質量 1.94SiO <sub>2</sub> 51.4%                    |
| 7                   | NC    | 100           | —         | 2.2 (—)              | —    | —   | —                            | 3.16                       | —                                                                                              |
| 8                   | LC    | —             | —         | 2.2 (—)              | —    | 100 | —                            | 3.22                       | —                                                                                              |

スランプ 15±2.5 cm、空気量 4.5±1.5% とし、リグニン系 AE 減水剤を使用した。材齢 91 日の高強度コンクリートは  $f'_{ck}$  を 45N/mm<sup>2</sup>、スランプフロー 60±5cm、空気量 4.5±1.5% とし、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した (NC は材齢 28 日を  $f'_{ck}$  とした)。促進耐海水性試験は、フレッシュコンクリートを 5mm のフルイに通してモルタル分を採取し、4×4×16cm の型枠に成型後、翌日脱型の上、28 日間標準養生を行った供試体を 48 時間海水に浸漬後、60℃、48 時間乾燥を 1 サイクルとした試験を 7 サイクル実施した。塩分浸透深さは、促進養生後、供試体を半分に切断し、その断面にフルオレセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧し、白色部を測定した。塩化物イオン濃度は、またもう 1 片の切断面より外周部から 7 mm までを表層、7~14mm までを中層、14mm から中心部までを深層として、105  $\mu\text{m}$  フルイを全通する分析試料を作成し、測定した。海水暴露試験は、コンクリートを 20×20×30cm 型枠に成型後、翌日脱型し、91 日間標準養生を行い川崎市運河にて干満潮の繰り返す場所に材齢 1 年まで浸漬し、 $\phi$ 10×20cm コア供試体を採取後、割裂し、塩分浸透深さおよび表面より 1、3、5cm 付近の塩化物イオン濃度を測定した。凍結融解試験は、コンクリートの打込み温度を 10℃ とし、JIS R 6204 付属書により行った。

3. 実験結果と考察

試験結果を表 3 に示す。

促進海水性試験 BS 粉末度の違いでは、BS 60% の混合セメントは、図 1、2 に示すとおり、BS 4000 から 6000 にすることにより塩分浸透深さが小さくなり、塩化物イオン濃度も中層までは少なくなった。FA を

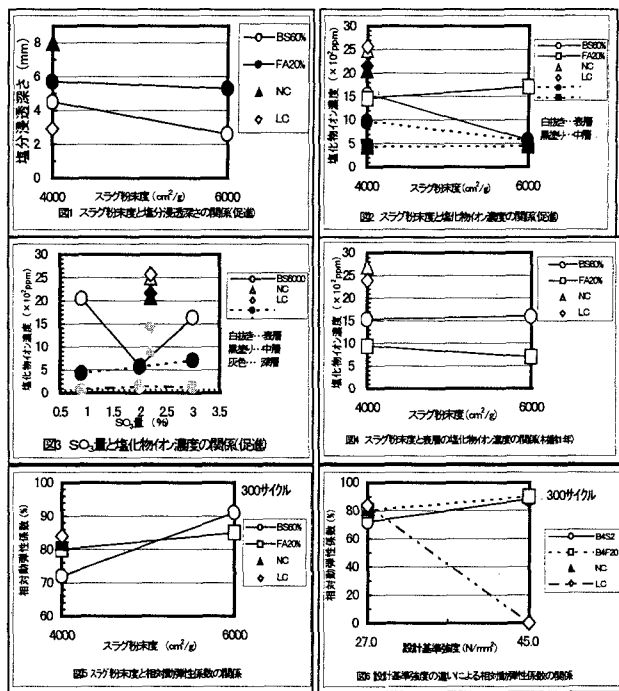
| 表 2 コンクリートの配合 |        |           |         |         |                        |           |           |
|---------------|--------|-----------|---------|---------|------------------------|-----------|-----------|
| 配合 No.        | セメント記号 | $f'_{ck}$ | W/C (%) | S/a (%) | W (kg/m <sup>3</sup> ) | 水和剤 C (%) | 減水剤 C (%) |
| 1             | B4S2   | 27        | 59.5    | 45.7    | 152                    | 0.25      |           |
| 2             | B6S1   |           |         |         |                        |           |           |
| 3             | B6S2   |           |         |         |                        |           |           |
| 4             | B6S3   |           |         |         |                        |           |           |
| 5             | B4F20  |           |         |         |                        |           |           |
| 6             | B6F20  |           |         |         |                        |           |           |
| 7             | NC     | 35        | 47.4    | 43.7    | 154                    | 0.25      |           |
| 8             | LC     |           |         |         |                        |           |           |
| 9             | B4S2   |           |         |         |                        |           |           |
| 10            | B6S2   |           |         |         |                        |           |           |
| 11            | B4F20  |           |         |         |                        |           |           |
| 12            | B4S2   | 45        | 37.8    | 49.0    | 145                    | 1.65      |           |
| 13            | B4F20  |           |         |         |                        |           |           |
| 14            | LC     |           |         |         |                        |           |           |

20%混合したセメントでは、BS粉末度の違いによる塩化物イオン濃度の差は認められなかった。また塩化物イオン濃度は、混合セメントの方が、NC、LCより少なかった。これは塩素浸透性に悪影響を及ぼすと言われている  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量がBSの混和により少なくなり（特に微細なBS）外部から浸透した塩分が供試体表面付近でフリーデル氏塩として固定されるためと思われる<sup>2),3)</sup>。図3に示すとおり  $\text{SO}_3$  量の影響では、中層、深層において僅かに  $\text{SO}_3$  量の増加とともに高くなる傾向を示した。表層においては、 $\text{SO}_3$  量 0.9%、3.0%で高い値を示した。表3に示すとおり  $f'_{ck}$  の違いでは強度の増大に伴い、塩分浸透深さが小さくなり(B6S2 は除く)中層の塩化物イオン濃度も低くなった。

| 表3 試験結果 |      |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                   |     |     |     |     |     |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| No.     | セメント | 促進海水浸透試験結果      |                 |                 | 海水暴露試験結果(1年)    |                 |                 | 凍結融解試験結果(200サイクル) |     |     |     |     |     |
|         |      | 表層塩化物イオン濃度 (mm) | 中層塩化物イオン濃度 (mm) | 深層塩化物イオン濃度 (mm) | 表層塩化物イオン濃度 (mm) | 中層塩化物イオン濃度 (mm) | 深層塩化物イオン濃度 (mm) | 64                | 133 | 200 | 300 |     |     |
| 1       | B4S2 | 4.5             | 1542            | 971             | 81              | 10.7            | 1530            | 30                | 30  | 99  | 98  | 92  | 72  |
| 2       | B6S1 | 3.8             | 2039            | 427             | 83              | 7.0             | 1590            | 30                | 30  | 99  | 98  | 95  | 86  |
| 3       | B6S2 | 2.6             | 581             | 560             | 136             | 8.7             | 1600            | 40                | 40  | 99  | 98  | 96  | 91  |
| 4       | B6S3 | 3.9             | 1638            | 709             | 130             | 8.0             | 1440            | 50                | 40  | 99  | 98  | 95  | 87  |
| 5       | B4F2 | 5.7             | 1451            | 431             | 139             | 10.2            | 940             | 60                | 30  | 96  | 95  | 89  | 80  |
| 6       | B6F2 | 5.3             | 1708            | 442             | 157             | 10.3            | 700             | 70                | 40  | 99  | 99  | 95  | 85  |
| 7       | NC   | 8.0             | 2498            | 2071            | 946             | 18.2            | 2700            | 300               | 40  | 98  | 96  | 90  | 82  |
| 8       | LC   | 2.9             | 2568            | 2157            | 1432            | 13.5            | 2390            | 88                | 40  | 100 | 97  | 90  | 84  |
| 9       | B4S2 | 4.8             | 2617            | 526             | 83              | 7.9             | 1450            | 50                | 30  | —   | —   | —   | —   |
| 10      | B6S2 | 4.3             | 481             | 183             | 82              | 6.9             | 1400            | 40                | 30  | —   | —   | —   | —   |
| 11      | B4F2 | 4.8             | 2049            | 455             | 153             | 8.0             | 900             | 40                | 30  | —   | —   | —   | —   |
| 12      | B4S2 | 2.1             | 2073            | 95              | 29              | 7.8             | 1270            | 55                | 45  | 100 | 100 | 95  | 88  |
| 13      | B4F2 | 4.0             | 1918            | 133             | 16              | 6.0             | 833             | 55                | 15  | 100 | 98  | 94  | 90  |
| 14      | LC   | 1.5             | 2047            | 1129            | 287             | 9.8             | 2305            | 65                | 40  | 94  | 20  | OUT | OUT |

**海水暴露試験** 図4に示すとおり材齢1年の表層におけるの塩化物イオン濃度は、BSの粉末度による影響がみられなかった。またFAを20%混合したセメントは、塩化物イオン濃度が一番低く、NC、LCは高い値を示した。

**凍結融解試験** 普通コンクリート ( $f'_{ck}$  27 N/mm<sup>2</sup> 場合) 200 サイクルまで殆ど差がなく、図5に示すとおり 300 サイクルではBS6000を用いた混合セメントの相対動弾性係数が高くなり、NC、LCと同等以上となった。BS4000を用いた混合セメントは、FAの混合により相対動弾性係数が高くなったが、BS6000を用いた混合セメント系では、FAの混合により低い値となった。図6に示すとおり、混合セメントは、高強度コンクリート (45N/mm<sup>2</sup>) になると相対動弾性係数が高くなり、LCでは、0 (OUT) となった。その原因として①混和剤量が他に比べて多い。②打込み温度が10℃と低い。③凝結時間が遅く、ブリーディング量が多い。④凍結融解を開始する材齢は14日であるため強度が低い。などが考えられる。



#### 4. まとめ

低発熱混合セメントを構成する材料がコンクリートの耐久性に及ぼす影響のうち耐海水性（促進、暴露1年）、凍結融解に及ぼす影響について検討した結果、以下のことがわかった。①BS6000を用いることにより、促進耐海水性、凍結融解作用に対する耐久性は向上したが、材齢1年における海水暴露では、差がみられなかった。② $\text{SO}_3$  量が高くなるにつれ促進耐海水性試験では、中層、深層において塩化物イオン濃度が僅かに高くなる傾向を示した。③FAを20%混合することにより、海水暴露試験では、塩化物イオン濃度が一番低くなり、NC、LCは高い値を示した。④設計基準強度の増大により、耐海水性、凍結融解作用に対する抵抗性は向上した。

#### 参考文献

- 宮沢ら「低熱セメントを用いたコンクリートの収縮」コンクリート工学論文集1997、No1、p739～744
- 鯉利ら、高強度、高耐久性等セメントを用いた高強度コンクリートの実用化研究 (その1) 日本建築学会大会学術講演要集 1999、p867～868
- 依田ら、20年間海水の作用を受けた高セメントコンクリートの耐久性に関する研究 セメント・コンクリート論文集 No.45、1991、p502～507