

# 論文 高炉セメントにシリカフェームを混合した3成分系結合材コンクリートの材齢5年における性状

井貝 武史\*1・佐伯 竜彦\*2・斎藤 豪\*3

**要旨:** 高炉セメント B 種に少量のシリカフェームを混和した 3 成分系結合材を用いることにより、塩分浸透抵抗性が大きく向上することが報告されている。本研究では、3 成分系結合材コンクリートの普及に向け、海岸構造物を対象に、標準養生供試体と実構造物(防波壁)から採取したコア供試体の試験結果から、3 成分系コンクリートの諸特性について検討を行った。その結果、3 成分系結合材コンクリートは、材齢 5 年においても圧縮強度、静弾性係数および電気抵抗率の増進が確認できた。また、高炉スラグ微粉末の置換割合が高いほど中性化速度係数が大きくなる傾向が見られた。

**キーワード:** 3 成分系結合材コンクリート, シリカフェーム, 高炉スラグ微粉末, 実構造物

## 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 排出量の削減や環境負荷低減の観点から、環境配慮コンクリート<sup>1)</sup>など、高炉スラグ微粉末やシリカフェーム、フライアッシュといった産業副産物をコンクリートの混和材料として利用する取組みが進んでいる。

高炉セメント B 種に少量のシリカフェームを混合した 3 成分系結合材(セメント - 高炉スラグ微粉末 - シリカフェーム)を用いることにより、コンクリートの塩分浸透抵抗性が大きく向上することが報告<sup>2)</sup>されており、塩害劣化の激しい地域ではその普及が望まれている。他方、混和材の置換により中性化速度係数が増加することが指摘されている<sup>3)</sup>。3 成分系結合材コンクリートを実構造物へ適用した事例<sup>4),5),6)</sup>はいまだ少なく、系統立った試験結果の報告は少ないのが現状である。

そこで本研究は、3 成分系結合材を用いたコンクリートの諸特性を明らかとするため、材齢 5 年における標準養生供試体と実構造物から採取したコア供試体を用いて行った各種試験結果を追加して、3 成分系結合材コンクリートの材齢 5 年までの諸特性を報告するものである。なお本研究は、筆者らが以前に報告<sup>5),6)</sup>した構造物の追跡調査となる。

物に近い気象庁の観測点(福岡県八幡地点)において測定された気象条件を示す。施工は春季(3月)に行った。



図-1 対象構造物の位置



写真-1 構造物の外観

## 2. 実験概要

### 2.1 構造物の概要

対象となる構造物は、福岡県北九州市に建設する港湾防波壁の一部であり、北東方向の海側壁面を調査した。構造寸法は、壁厚 0.2m, 壁高 1.80m である。壁延長 2.7m ごとに目地材により区分けを行った。配合ごとに 2 区画 (5.4m)分を打込み、比較を行った。図-1 に位置図を、写真-1 に構造物の外観を示す。また、表-1 に対象構造

表-1 気象条件(5年間)

| 項目         |     | 福岡県八幡地点 |
|------------|-----|---------|
| 気温<br>(°C) | 年平均 | 17.1    |
|            | 年最低 | -3.2    |
|            | 年最高 | 36.6    |
| 平均風速(m/s)  |     | 2.2     |
| 年間降水量(mm)  |     | 1655.7  |

\*1 (株)福田組 土木部技術部 担当課長 博士(工学) (正会員)

\*2 新潟大学 工学部工学科 教授 博士(工学) (フェロー会員)

\*3 新潟大学 工学部工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

## 2.2 使用材料・配合

表-2 に使用材料およびその物性を、表-3 にコンクリートの配合を示す。配合は、水結合材比を 45%、55% とし、混和材の置換率は、2 成分系配合では高炉スラグ微粉末を 40、65、85% の 3 種類とし、シリカフェームを 4、8% の 2 種類とした。3 成分系配合では、シリカフェーム置換率を 3% と固定し、高炉スラグ微粉末を 40、65、85% の 3 種類とした。

目標スランプは 18±2.5cm、目標空気量は 4.5±1.5% とし、必要に応じて AE 剤を用いて調整した。

## 2.3 施工方法および試験方法

構造物コンクリートは、打込み完了後、湿らせた養生マットにて材齢 10 日まで養生を行ったのち脱枠を行った。同時に作製した φ100×200mm の円柱供試体は、材齢 3 日に脱型し、標準養生(20±3°C、水中)を所定材齢まで行った。

コンクリートの試験項目は、フレッシュ性状については、スランプ試験(JIS A 1101)、空気量試験(JIS A 1128)、塩化物含有量試験(モール法)およびブリーディング量の測定を行った。なお、ブリーディング量の測定は、18L 容器(蓋付き)に 12L の試料を採取し、5 時間後のブリーデ

ィング量をスポイトで採取し、メスシリンダにて測定を行った。

標準養生を行った硬化コンクリートについては、圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)および四電極法(Wenner 法)による電気抵抗率の測定を行った。圧縮強度試験および静弾性係数試験は、材齢 7、14、28、91 日、1、3 年および 5 年にて、電気抵抗率の測定は、材齢 28、91、182 日、1、3 年および 5 年にて行った。図-2 に、四電極法による電気抵抗率の測定で使用した電極間隔および設置位置を示す。電極間隔は L=50mm とした。電気抵抗率 ρ は電極間隔・設置位置および供試体の寸法・形状により変化することから、セル定数を用いて換算する必要がある<sup>7)</sup>。本研究では、JSCE-G581-2018 附表 1-1 より、円柱供試体(φ100×200mm)・電極間隔 50mm の場合のセル定数 k=8.41m<sup>1</sup>を用い、式(1)により算出した。

$$\rho = \frac{1}{k} \cdot R \quad (1)$$

ここに、ρ：電気抵抗率(Ω・m)、k：セル定数、R：電気抵抗(Ω)である。

実構造物コンクリートについては、材齢 1 年、3 年および 5 年が経過した段階で、図-3 に示す構造物の天端

表-2 使用材料

| 材料名 |               | 記号              | 適用  |          |
|-----|---------------|-----------------|---|----------|
| 結合材 | 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 3,480 cm <sup>2</sup> /g                  |          |
|     | 高炉スラグ微粉末      | BFS             | 密度 2.91 g/cm <sup>3</sup> 、比表面積 4,290 cm <sup>2</sup> /g、塩基度 1.82         |          |
|     | シリカフェーム       | SF              | 密度 2.20 g/cm <sup>3</sup> 、SiO <sub>2</sub> 割合 92.0 %                     |          |
| 細骨材 | 海砂            | S <sub>1</sub>  | 表乾密度 2.60 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.31 %                                   | 粗粒率 2.55 |
|     | 混合砂           | S <sub>2</sub>  | 表乾密度 2.61 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.72 %                                   |          |
| 粗骨材 | 碎石            | G               | 表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.46 %<br>実積率 57.5 %、粗粒率 6.72、最大寸法 20 mm |          |
| 混和剤 | AE 減水剤 高機能タイプ | Ad <sub>1</sub> | リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテル  |          |
|     | AE 剤          | Ad <sub>2</sub> | 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤   |          |

表-3 コンクリートの配合表

| 水準      | W/B (%) | BFS/Binder (%) | SF/Binder (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |     |      |                |                | Ad <sub>1</sub> (B×%) | Ad <sub>2</sub> (A <sup>*1</sup> ) |     |
|---------|---------|----------------|---------------|---------|--------------------------|-----------|-----|------|----------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|-----|
|         |         |                |               |         | W                        | Binder: B |     |      | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> |                       |                                    | G   |
|         |         |                |               |         |                          | OPC       | BFS | SF   |                |                |                       |                                    |     |
| 45-0-0  | 45      | 0              | 0             | 44.0    | 175                      | 389       | 0   | 0    | 451            | 302            | 993                   | 0.90                               | 7.0 |
| 45-40-0 | 45      | 40             | 0             | 44.0    | 175                      | 233       | 156 | 0    | 448            | 300            | 987                   | 0.80                               | 7.0 |
| 45-65-0 | 45      | 65             | 0             | 44.0    | 175                      | 136       | 253 | 0    | 446            | 299            | 983                   | 0.75                               | 7.0 |
| 45-85-0 | 45      | 85             | 0             | 44.0    | 175                      | 58        | 331 | 0    | 445            | 298            | 980                   | 0.70                               | 7.0 |
| 45-0-4  | 45      | 0              | 4             | 44.0    | 175                      | 373       | 0   | 15.6 | 449            | 301            | 989                   | 1.20                               | 7.0 |
| 45-0-8  | 45      | 0              | 8             | 44.0    | 175                      | 358       | 0   | 31.1 | 448            | 300            | 986                   | 1.60                               | 7.0 |
| 45-40-3 | 45      | 40             | 3             | 44.0    | 175                      | 222       | 156 | 11.7 | 447            | 299            | 984                   | 1.00                               | 7.0 |
| 45-65-3 | 45      | 65             | 3             | 44.0    | 175                      | 124       | 253 | 11.7 | 445            | 298            | 980                   | 1.05                               | 7.0 |
| 45-85-3 | 45      | 85             | 3             | 44.0    | 175                      | 47        | 331 | 11.7 | 444            | 297            | 977                   | 0.90                               | 7.0 |
| 55-0-0  | 55      | 0              | 0             | 47.0    | 175                      | 318       | 0   | 0    | 498            | 333            | 972                   | 1.10                               | 9.0 |
| 55-40-0 | 55      | 40             | 0             | 47.0    | 175                      | 191       | 127 | 0    | 495            | 332            | 967                   | 0.90                               | 9.0 |
| 55-0-4  | 55      | 0              | 4             | 47.0    | 175                      | 305       | 0   | 12.7 | 497            | 332            | 969                   | 1.30                               | 7.0 |
| 55-40-3 | 55      | 40             | 3             | 47.0    | 175                      | 181       | 127 | 9.5  | 494            | 331            | 965                   | 1.10                               | 7.0 |

※1 1A=B×0.001%

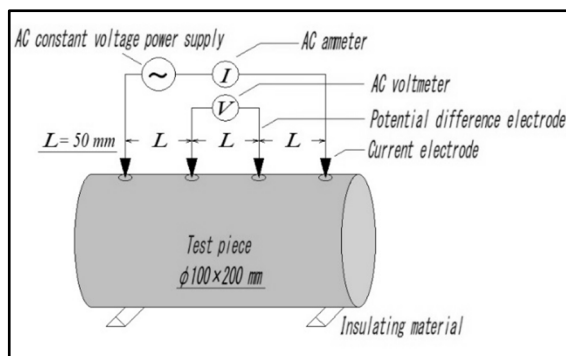


図-2 四電極法の電極間隔

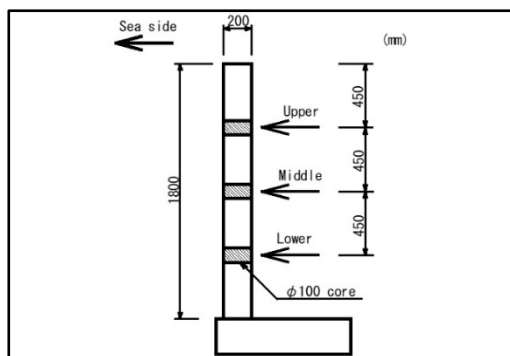


図-3 構造物断面図およびコア採取位置

表-4 試験結果(フレッシュ性状試験)

| 水準      | SL<br>(cm) | AC<br>(%) | CT<br>(°C) | Cl量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Br<br>(%) |
|---------|------------|-----------|------------|-----------------------------|-----------|
| 45-0-0  | 18.5       | 5.1       | 13.0       | 0.05                        | 1.0       |
| 45-40-0 | 17.0       | 5.4       | 14.0       | 0.04                        | 1.4       |
| 45-65-0 | 17.0       | 5.2       | 14.0       | 0.04                        | 2.6       |
| 45-85-0 | 17.0       | 5.0       | 14.0       | 0.02                        | 1.4       |
| 45-0-4  | 16.0       | 6.0       | 14.0       | 0.05                        | 0.2       |
| 45-0-8  | 16.5       | 5.8       | 14.0       | 0.06                        | 0.0       |
| 45-40-3 | 17.0       | 5.0       | 14.0       | 0.04                        | 0.5       |
| 45-65-3 | 17.5       | 4.7       | 14.0       | 0.05                        | 0.8       |
| 45-85-3 | 17.0       | 4.4       | 14.0       | 0.02                        | 0.4       |
| 55-0-0  | 16.5       | 5.8       | 13.0       | 0.04                        | 2.1       |
| 55-40-0 | 18.0       | 5.9       | 13.0       | 0.04                        | 2.9       |
| 55-0-4  | 18.5       | 5.7       | 14.0       | 0.04                        | 0.7       |
| 55-40-3 | 20.0       | 5.5       | 14.0       | 0.03                        | 1.7       |

より 450mm, 900mm, 1350mm の高さから φ100mm の貫通コアを採取した。上・下段のコア 2 本を用いて、圧縮強度試験(JIS A1107)、静弾性係数試験および四電極法による電気抵抗率の測定を行った。なお、上・下段のコア 2 本は、飽水状態とするため、試験前 48 時間以上の水中浸漬を行った。

また、混和材の置換率が高く、中性化に対する懸念があったため、材齢 3 年および 5 年の中段のコア 1 本を用いて、中性化深さ試験(JIS A 1153)を行った。併せて、中性化深さ試験を行った材齢 3 年および 5 年のコア供試体を用いて、全塩化物イオン量の測定を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

表-4 に、スランプ(SL)、空気量(AC)、練上がり温度(CT)および塩化物含有量(Cl 量)を示す。また、式(2)および式(3)により算出したブリーディング率(B<sub>r</sub>)を表-4 に併せて示す。

$$B_r = \frac{W_B}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

$$W_s = \frac{W}{M_c} \times M_s \quad (3)$$

ここに、B<sub>r</sub>:ブリーディング率(%), W<sub>B</sub>:ブリーディングによる水の容積(cm<sup>3</sup>), W<sub>s</sub>:試料中の水の容積(cm<sup>3</sup>), M<sub>c</sub>:コンクリートの単位容積質量(kg/m<sup>3</sup>), W:コンクリートの単位水量(kg/m<sup>3</sup>), M<sub>s</sub>:試料の容積(cm<sup>3</sup>)である。

測定結果より、すべての配合でスランプおよび空気量は目標値を満足していることが確認できた。

表-3 の配合表より、所定のフレッシュ性状を確保するための化学混和剤添加量は、0.70~1.60wt%程度であった。使用した AE 減水剤高機能タイプの標準的な使用量範囲は、0.6~1.5wt%とされており、3 成分系結合材コンクリートにおいても、概ね標準的な使用範囲内でフレッシュ性状の調整が可能であることが示された。また、シリカフュームを添加したコンクリートでは、所定のフレッシュ性状を確保するため、消泡剤が用いられる場合<sup>8)</sup>があるが、本実験の範囲では、消泡剤を用いずに所定のフレッシュ性状を確保することが可能であった。

ブリーディング率の結果より、2 成分系配合では、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するとブリーディング率が上昇する傾向が見られた。これは、高炉スラグ微粉末の置換率が増加することにより、凝結反応が遅くなること<sup>3)</sup>に起因していると考えられる。しかしながら、高炉スラグ微粉末の置換率 65%と比較し、置換率 85%ではブリーディング率が低下する傾向が見られ、凝結反応の遅延以外の影響が考えられることから、今後更なる検討行いたい。また、シリカフュームの置換率が増加するとブリーディング率が低下する傾向が見られた。シリカフュームは超微粒子であり、セメントと比較し比表面積の大きいことに加え、シリカフュームと水酸化カルシウムが練混ぜ後極めて短時間の間に反応してゲル相を形成し、水分の移動を拘束する作用が生じたため<sup>9)</sup>と考えられる。3 成分系配合では、シリカフュームの添加により、ブリーディング率の低減傾向が見られるが、概ね OPC のみの配合と同程度であった。

#### 3.2 硬化コンクリートの特性(標準養生供試体)

##### (1) 圧縮強度

図-4 に、標準養生を行った供試体の圧縮強度の経時

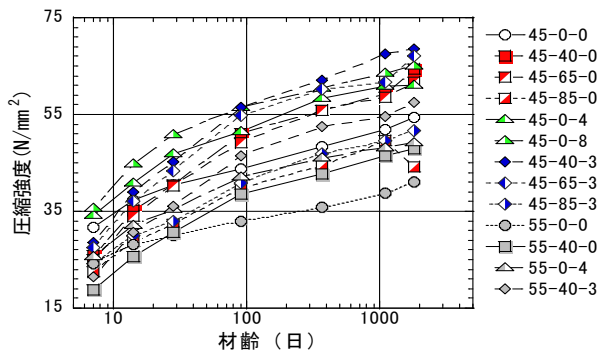


図-4 圧縮強度試験結果(標準養生)

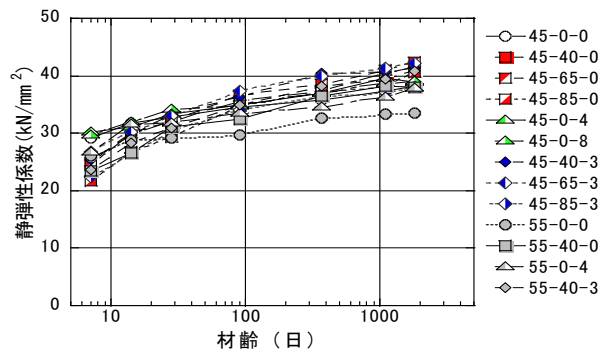


図-5 静弾性係数試験結果(標準養生)

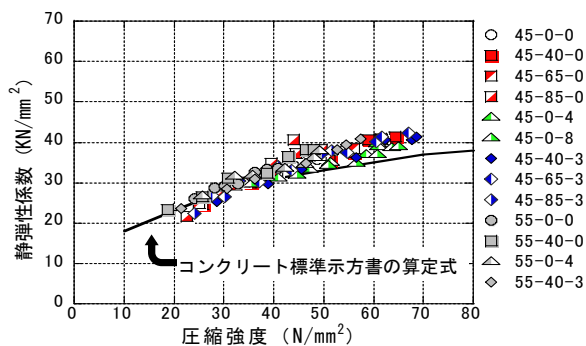


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

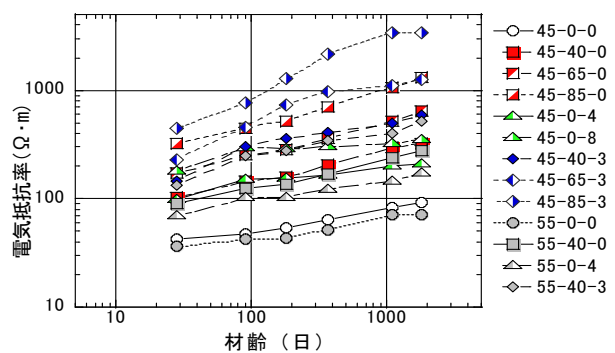


図-7 電気抵抗率試験結果(標準養生)

変化を示す。図より、各配合ともに材齢の経過に伴い圧縮強度の増進が見られ、材齢5年においても圧縮強度の増進が確認できた。混和材を用いることにより長期材齢の強度増進が大きいことが確認された。特に3成分系結合材では、高炉スラグ微粉末のみを置換した2成分系結合材が普通セメントのみに比べ初期強度(材齢7日および14日)が低下していることに対し、普通セメントのみと同程度の初期強度発現が見られ、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性およびシリカフェームのポズラン反応による長期強度の増進も確認された。高炉スラグ微粉末を高置換した配合(45-85-0, 45-85-3)の圧縮強度が、混和材を置換した同水結合材比の配合と比較し低くなる傾向が見られた。江口ら<sup>10)</sup>によると、高炉スラグを80%以上置換すると材齢14日以降高炉スラグが反応していない、あるいは反応はするが生成物の強度が低く、コンクリートの強度への貢献度が小さくなる可能性があることが報告されており、本研究においても同様に、圧縮強度が低くなったと考えられる。なお、45-85-0配合の材齢5年における圧縮強度が材齢3年より低下しているが、コア供試体において、圧縮強度の増進が見られることから、測定の不具合によるものと考えられる。

## (2) 静弾性係数

図-5に、静弾性係数の経時変化を示す。静弾性係数の試験結果においても、圧縮強度試験結果と同様に、材齢の経過に伴う増進が確認された。図-6に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。併せてコンクリート標準示

方書<sup>11)</sup>の算定式を示す。図より、算定式のあてはまりが良いことから、3成分系結合材を用いたコンクリートに対し、構造設計等において、算定式を用いた材料設計が可能であることが示された。

## (3) 電気抵抗率

図-7に、電気抵抗率の経時変化を示す。水結合材比が低いほど電気抵抗率が高いことがわかる。また、混和材を用いることにより電気抵抗率が增加することがわかる。これは混和材を使用することで電気抵抗率が增加するという榎原ら<sup>12)</sup>の研究と一致する結果である。また、混和材を用いた配合では長期の電気抵抗率の増加傾向が大きいことがわかった。

## 3.3 硬化コンクリートの特性(コア供試体)

### (1) 圧縮強度および静弾性係数

材齢5年において実構造物コンクリートより採取したコンクリートコア供試体と標準養生供試体の結果を比較した。図-8に圧縮強度を、図-9に静弾性係数を比較した結果を示す。一般にコア供試体は、標準養生供試体と比べ圧縮強度の低下傾向<sup>13)</sup>が見られるが、本実験では標準養生供試体とコア供試体とで、圧縮強度に大きな差異は見られなかった。なお、コア供試体のコア採取位置(上下段)による差異は見られなかった。また、静弾性係数においても圧縮強度試験結果と同様に、標準養生供試体とコア供試体とでは大きな差異は見られなかった。

### (2) 中性化深さ

図-10に、材齢3年および5年における供試体の中性

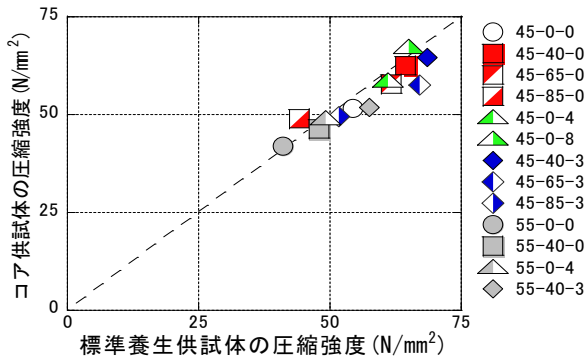


図-8 圧縮強度の比較(材齢 5年)

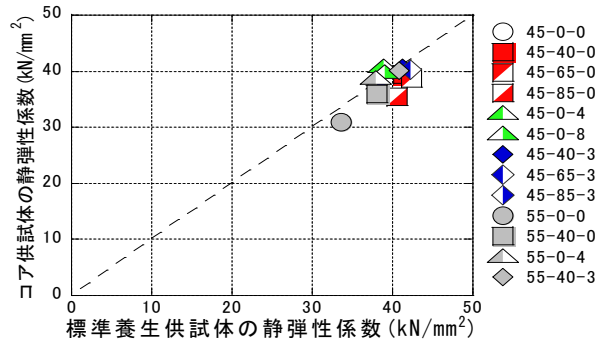


図-9 静弾性係数の比較(材齢 5年)

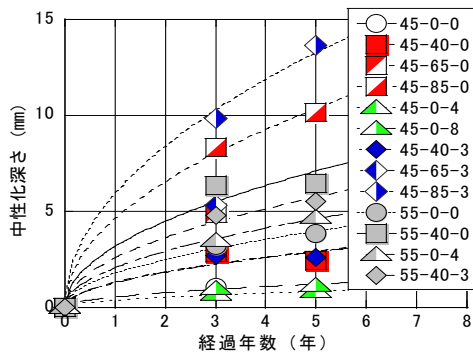


図-10 中性化深さ試験結果

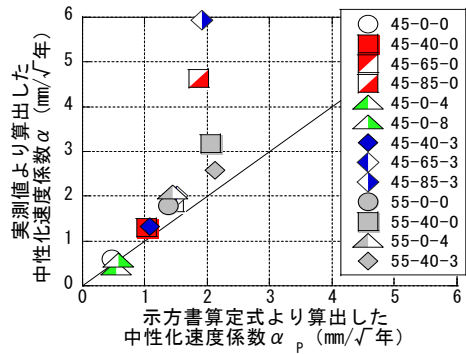


図-11 中性化速度係数の比較

化深さの測定結果を示す。併せて、式(4)に示す経過時間の平方根に比例する式より回帰した線を示す。

$$D_c = \alpha \sqrt{t} \quad (4)$$

ここに、 $D_c$ ：中性化深さ(mm)、 $t$ ：経過材齢(年)、 $\alpha$ ：中性化速度定数(mm/√年)である。

次に、式(5)に示すコンクリート標準示方書<sup>14)</sup>に示されている中性化速度係数予測値  $\alpha_p$  の算定式との比較を行った。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \cdot W/B \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}}) \quad (5)$$

ここに、 $W/B$ ：有効水結合材比  $= W/(CP+k \cdot Ad)$ 、 $W$ ：単位体積あたりの水の質量、 $B$ ：単位体積あたりの有効結合材の質量、 $CP$ ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量、 $Ad$ ：単位体積あたりの混和材の質量、 $k$ ：混和材種類により定まる定数(フライアッシュの場合、 $k=0$  高炉スラグ微粉末の場合、 $k=0.7$ )である。

シリカフェュームの  $k$  は、コンクリート標準示方書では示されていないことから、高炉スラグ微粉末と同等の  $k=0.7$  と仮定して算出した。

図-11に、示方書の算定式より算出した中性化速度係数と実測値より算出した中性化速度係数の関係を示す。図より、高炉スラグ微粉末の置換率が低い配合や OPC のみ、シリカフェュームのみ置換した配合においては、概ね標準示方書の算定式と実測値から算出した値が一致していた。しかしながら、高炉スラグ微粉末の置換率が高い配合(45-85-0、45-85-3)において、示方書算定式より実測値より算定した中性化速度係数が高い傾向が見られた。

江口ら<sup>10)</sup>は、表層透気試験および電気泳動試験の結果から、高炉スラグを70%以上高置換した場合、水を媒体とする物質の移動は抑制するが、気体は通過できる程度の空隙が多く存在していることが考えられると報告しており、本研究においても同様に、気体が通過できる程度の空隙が多く存在している可能性が考えられる。また、シリカフェュームを含む配合(45-85-3)において、45-85-0配合より乖離した一要因として、シリカフェュームのポゾラン反応により水酸化カルシウムが消費されたことが考えられる。

### (3) 塩化物イオン浸透量

塩化物イオン浸透量の測定試料の採取は、コンクリートコア供試体の海側表面から、5mmごとにコンクリートカッターにより切削し、ボールミルを用いて粉砕した後、90 $\mu\text{m}$ ふるいを通過したものを110 $^{\circ}\text{C}$ 乾燥炉にて絶乾状態にしたものを試料とした。全塩化物イオン量の測定は、エネルギー分散型蛍光 X線分析装置を用いた。測定は、全ての配合において深さ20mmまで行った。

測定の結果、材齢5年において、各配合の塩化物イオン濃度が1.0 $\text{kg}/\text{m}^3$ 未満と低く、濃度分布に明瞭な差が見られなかった。

田村ら<sup>15)</sup>によると、飛来塩分量は4 $\text{m/s}$ 以上の風速の二乗の積算値と相関があることが報告されている。そこで、対象構造物近い気象庁の観測点(福岡県八幡地点)の暴露期間(5年間)における1時間毎の風況データ(風速、風向)を取り出し、風向毎の風速4 $\text{m/s}$ 以上の頻度を図-

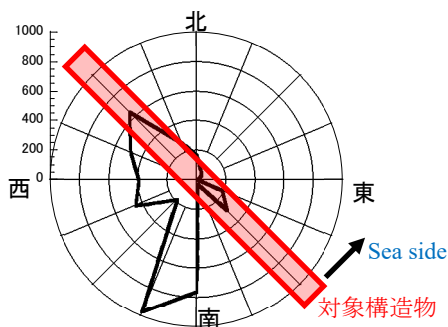


図-12 風向毎の風速 4m/s 以上の頻度

12 に示す。図より、風速 4m/s 以上の頻度が大きい風向は、南南西方向および北西方向であり、陸側または対象構造物に対して平行な風向であり、塩化物イオン濃度分布に明瞭な差が見られなかった要因として、構造物に対して飛来塩分量が少ない可能性が考えられた。

今後も本構造物の長期的なモニタリングを継続する予定である。風向の影響を考慮すると、塩化物イオンの浸透速度は遅いものの陸側(南西方向)からの塩化物イオンの浸透が考えられることから、今後の測定では、海陸両側の測定により、3 成分系結合材コンクリートの評価を行っていきたい。

#### 4. まとめ

本研究では、3 成分系結合材コンクリートの普及に向け、実構造物への適用を行い、標準養生供試体ならびに実構造物から採取したコア供試体を用いて各種試験を実施した。本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 3 成分系結合材を用いたコンクリートでは、シリカフェュームの混和によりブリーディング率の低下が見られたが、標準的な化学混和剤の使用量で所要のフレッシュ性状を確保することができた。
- (2) 3 成分系結合材コンクリートでは、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性やシリカフェュームのポズラン反応により圧縮強度の増進が見られた。
- (3) 3 成分系結合材を用いたコンクリートの静弾性係数も、コンクリート標準示方書の算定式が適用できることが示唆された。
- (4) 3 成分系結合材を用いたコンクリートでは、材齢の経過に伴い、電気抵抗率の増進が見られた。
- (5) 3 成分系結合材を用いたコンクリートでは、材齢 5 年において、高炉スラグ微粉末の置換割合が増加するに従い、中性化速度係数の増加が見られた。

謝辞：本研究の実施にあたっては、戸畑物流株式会社、エルケムジャパン株式会社、高藤建設株式会社よりご協力を頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 大脇英司: 高炉スラグ微粉末を利用した環境配慮コンクリートの炭酸ガス排出抑制から炭素の有効利用への進化, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.819-826, 2021.9
- 2) 佐伯竜彦, 真島耕平, 菊地道生, 斎藤 豪: 各種シリカフェュームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.352-359, 2014.3
- 3) 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末を大量に使用したコンクリート, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.409-414, 2014.5
- 4) 陣内 浩, 佐伯竜彦, 長瀬重義: シリカフェューム, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.399-404, 2014.5
- 5) 井貝武史, 佐伯竜彦, 斎藤 豪, 本間 健: 高炉セメントにシリカフェュームを混合した 3 成分系結合材の実構造物への適用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.19, pp.301-306, 2019.10
- 6) 井貝武史, 佐伯竜彦, 斎藤 豪: 材齢 3 年を経過した 3 成分系結合材コンクリートの諸特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.218-224, 2022.3
- 7) 皆川 浩, 駒井道哉, 藤田 亮, 宮本慎太郎, 久田 真: 4 プローブ法をコンクリート供試体に適用した時のセル定数の数値解析による算定とその検証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.447-452, 2017.10
- 8) 佐藤正己, 梅村靖弘, 小泉公志郎: シリカフェュームと高性能減水剤を用いた超高強度セメント硬化体の水和反応, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.442-449, 2010.3
- 9) Hjorth L.: Microsilica in Concrete, Nordic Concrete Research, Publ., No.2, 1983
- 10) 江口康平, 加藤佳孝, 池添弘規, 伊藤篤史: 高炉スラグ微粉末で高置換したコンクリートの物理的特性および物質移動抵抗性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.177-182, 2018.7
- 11) 公益社団法人土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, p.43, 2018.3
- 12) 榎原彩野, 皆川 浩, 久田 真: モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.789-793, 2008.7
- 13) 蓮尾孝一, 松田 拓: コア採取がコンクリート強度試験結果に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.409-414, 2013.7
- 14) 公益社団法人土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, pp.148-164, 2018.3
- 15) 田村勇斗, 佐伯竜彦, 斎藤 豪: 風況と周辺地形を考慮した飛来塩分量予測手法に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 33 巻, pp.1-13, 2022.1