

# 報告 浸せき試験および暴露試験による混和材を用いたコンクリートの塩分浸透抵抗性の評価

櫻庭 浩樹<sup>\*1</sup>・中村 英佑<sup>\*2</sup>・鈴木 雅博<sup>\*3</sup>・古賀 裕久<sup>\*4</sup>

**要旨**：混和材の置換率を B 種相当とし、水結合材比 35%, 40%, 50%としたコンクリートを用いて、浸せき試験および塩害環境下での暴露試験を行い、塩分浸透抵抗性が特に高くなる配合条件等を検討した。浸せき試験では、いずれの水結合材比でも、混和材の使用により塩分浸透抵抗性が高くなることを確認した。暴露試験では、暴露 20~90 ヶ月での中性化の進行は緩慢であり、水結合材比 40%以下では塩化物イオンの濃縮現象は確認されなかった。さらに、水結合材比 35%の場合および各水結合材比でフライアッシュを用いた場合は、暴露 20 ヶ月以降の塩分浸透の明確な進行が認められず、特に高い塩分浸透抵抗性を有すると考えられた。

**キーワード**：浸せき試験、暴露試験、混和材、塩分浸透、中性化

## 1. はじめに

外部からの塩化物イオンの浸透による塩害劣化は、1970 年代後半頃から顕在化した。沿岸部に位置するコンクリート構造物の塩害対策を講じるために、1984 年に塩害対策指針（案）が制定され、塩害対策が必要な地域を海岸線からの距離で示し、これに応じたかぶりが規定された。その後、道路橋示方書の改訂に向けて、設計供用期間の標準として 100 年を目安とし、これを満足するための必要かぶりが土木研究所で検討された<sup>1),2)</sup>。この検討を基に、2002 年の道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編には、耐久性能を確保するためのかぶりが規定された。

設計供用期間を 100 年とした時の必要かぶりの検討は、沿岸部における屋外暴露試験の結果<sup>3)</sup>に基づいて行われた。屋外暴露試験には、早強ポルトランドセメントで水セメント比が異なる試験体が用いられた。その後、屋外暴露 2~3 年後の全塩化物イオン量の分布から得られた見掛けの拡散係数と水セメント比の関係式が提案され、この関係式に基づいて 3 種類の水セメント比のコンクリートについての試算が行われた<sup>2)</sup>。なお、当時は橋梁上部構造に混和材を用いることはほとんど行われていなかったため、混和材を活用した場合については試算が行われていない。

近年、土木研究所では、かぶりコンクリートをさらに高耐久化するため、上部構造への混和材の活用を検討している<sup>4),5)</sup>。混和材の使用が塩分浸透や中性化等に及ぼす影響を検討するため、促進試験や屋外暴露試験等を行い、耐久性に関するデータを蓄積している。例えば、混和材を用いたコンクリートを用いて、浸せき試験<sup>4),5)</sup>や沖縄県沿岸部での暴露試験<sup>6),7)</sup>を実施し、塩分浸透性状

を検討している。このようなデータを活用することで、混和材を使用した場合の高耐久化の効果についての評価が可能になると考えられる。

本報告では、混和材を用いたコンクリートについて、浸せき試験および沖縄県沿岸部での 90 ヶ月の暴露試験を行った結果を報告する。この結果を基に、塩分浸透抵抗性が特に高くなる配合条件等を検討した。

## 2. 浸せき試験および暴露試験の方法

### 2.1 試験体

試験体の製作に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。試験体の種類は、普通ポルトランドセメントを用いて水結合材比（以下、W/B とする）を 35%または 50%とした配合（N35 または N50 シリーズ）、早強ポルトランドセメントを用いて W/B を 40%とした配合（H40 シリーズ）の 3 種類である。W/B50%は鉄筋コンクリートを想定した配合、W/B40%はプレストレストコンクリートを想定した配合である。配合の記号は、セメントの種類（N, H）、W/B（35, 40, 50）、混和材の種類および置換率（高炉スラグ微粉末 50% : B50、フライアッシュ 20% : F20）で表す。

高炉スラグ微粉末には JIS A 6206:2013 の高炉スラグ微粉末 4000 または高炉スラグ微粉末 6000、フライアッシュには JIS A 6201:2008 のフライアッシュ II 種に適合するものを用いた。高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの置換率は混合セメント B 種相当とし、それぞれ 50%および 20%とした。なお、過去の検討<sup>4)</sup>では、置換率を混合セメント C 種相当以上とした場合も含めて 26 配合の結果を報告したが、本報告ではそのうち中性化の進行が

\*1 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 研究員 (正会員)

\*2 国土交通省 (元土木研究所 主任研究員) (正会員)

\*3 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 (正会員)

\*4 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

| 配合     | W/B (%) | 単位量 (kg/m³) |     |     |     |    |     | スランプ (cm) | 空気量 (%)  |
|--------|---------|-------------|-----|-----|-----|----|-----|-----------|----------|
|        |         | OPC         | HPC | BS4 | BS6 | FA | S   |           |          |
| N35    | 35      | 471         | —   | —   | —   | —  | 713 | 968       | 14.5 4.7 |
| N35B50 |         | 236         | —   | 236 | —   | —  | 695 |           | 14.5 4.3 |
| N35F20 |         | 377         | —   | —   | —   | 94 | 684 |           | 12.0 3.5 |
| H40    | 40      | —           | 413 | —   | —   | —  | 758 | 968       | 11.5 4.6 |
| H40B50 |         | —           | 206 | —   | 206 | —  | 745 |           | 14.5 4.8 |
| H40F20 |         | —           | 330 | —   | —   | 83 | 734 |           | 14.0 4.5 |
| N50    | 50      | 330         | —   | —   | —   | —  | 827 | 968       | 14.0 5.2 |
| N50B50 |         | 165         | —   | 165 | —   | —  | 815 |           | 13.5 4.3 |
| N50F20 |         | 264         | —   | —   | —   | 66 | 807 |           | 11.5 4.4 |

※OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm³, 比表面積=3300cm²/g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³, 比表面積=4,490cm²/g), BS4: 高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm³, 比表面積=4,440cm²/g, SO₃=2.19%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末6000(密度=2.91g/cm³, 比表面積=5,950cm²/g, SO₃=2.85%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュII種(密度=2.30g/cm³, 比表面積=4,280cm²/g)

※S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産碎石6号(密度=2.67g/cm³, 吸水率=0.43%)と5号(密度=2.67g/cm³, 吸水率=0.46%)を均等に混合)

※化学混和剤: スランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう高性能 AE 減水剤と空気連行剤の使用量を調整

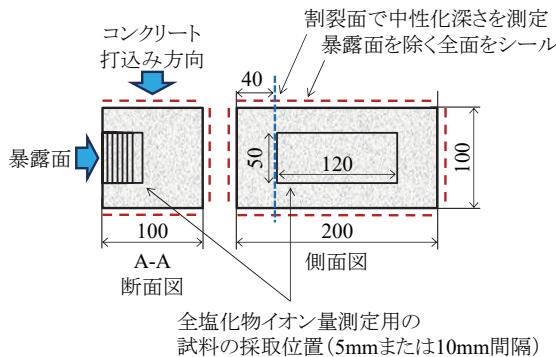


図-1 試験体の形状と解体調査の方法

顕著でなかった置換率がB種相当の9配合に着目した<sup>7)</sup>。

## 2.2 浸せき試験

浸せき試験は、JSCE-G572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して行った。浸せき期間は、6ヶ月、12ヶ月および20ヶ月とし、試験数量は、各配合条件および各浸漬期間で1体とした。全塩化物イオン量は、厚さ10mmごとに試料を切断して0.15mm以下に微粉碎し、JIS A 1154:2012に準拠して電位差滴定法により定量した。

## 2.3 暴露試験

試験体の形状と解体調査の方法を図-1に示す。暴露試験に用いた試験体の形状は、100×100×200mmの角柱である。材齢28日まで水中養生を行った後、実験室内に保管して、コンクリート打込み方向に対して片側の側面（暴露面、100×200mm）以外を塗装材料でシールした。材齢44～69日で、暴露面を海側に向けて試験体を暴露試験場に静置して、暴露を開始した。2012年2月から2019年8月までの90ヶ月間を暴露期間とした。

試験体の暴露状況を図-2に示す。暴露試験場は、雨がかりのある屋外の沿岸部（沖縄県国頭郡大宜味村）に位置し、道路橋示方書IIIコンクリート橋編の地域区分A



※左側の写真に供試体の暴露地点を破線で表示  
※最寄りの気象観測地点の気象データ<sup>8)</sup>: 平均気温 23.1°C, 平均湿度 76.6%, 積算降水量 16519mm

図-2 試験体の暴露状況

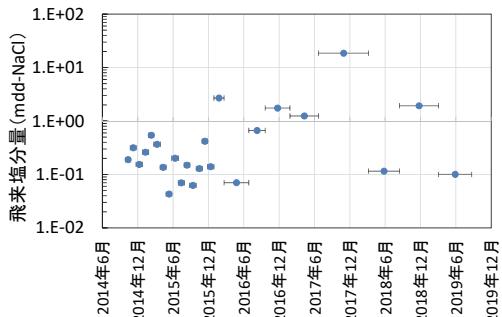


図-3 飛来塩分量の測定結果

に対応する。2014年10月から2019年8月の期間の飛来塩分量の測定結果を図-3に示す。飛来塩分量は、0.043～18.6mdm-NaClの範囲でありばらつきが大きいが、これは過去の沖縄における飛来塩分量の調査結果<sup>1)</sup>も同様である。

暴露90ヶ月後に試験体を回収し、解体調査を行った。調査内容は、中性化深さおよび全塩化物イオン量の測定である。なお、本報告では、暴露20ヶ月と40ヶ月後に同様に調査した結果も併せて示す<sup>6),7)</sup>。

中性化深さの測定では、試験体の端部から40mmの位置を割裂し、JIS A 1152:2018に準拠して割裂面にフェノールフタレン溶液を噴霧して、暴露面から赤紫色を呈

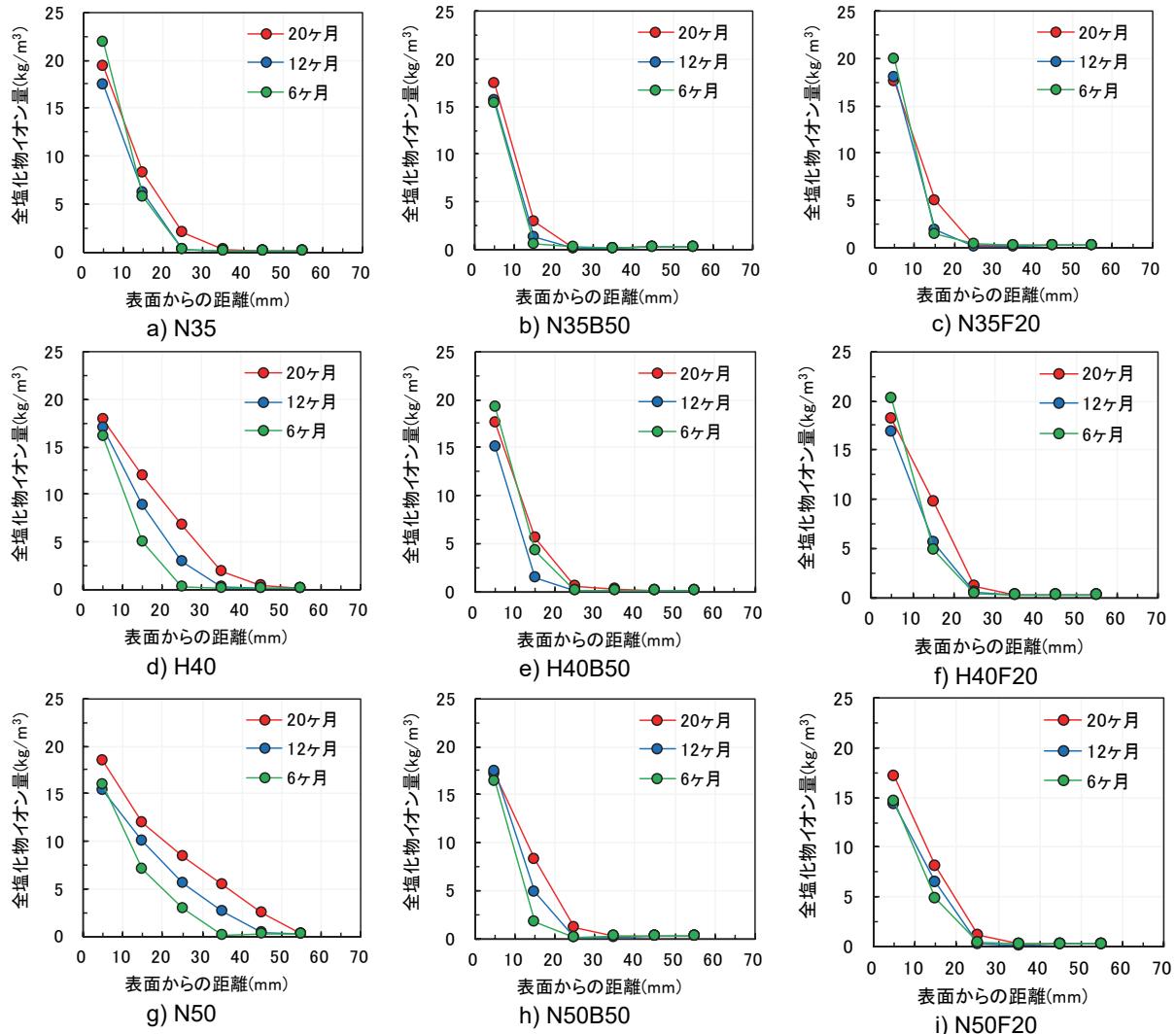


図-4 浸せき試験における全塩化物イオン量の分布

した部分までの距離をノギスで測定した。等間隔に 9 点で測定を行って得られた平均値を中性化深さとした。

全塩化物イオン量は、試験体の中央部から厚さ 5 mm または 10 mm ごとに採取した試料から定量した。

### 3. 浸せき試験および暴露試験の結果と考察

#### 3.1 浸せき試験

浸せき試験による全塩化物イオン量の分布を図-4 に示す。なお、表面からの距離は、採取した試料の中点位置を示す（例えば表面からの距離 10~20mm から採取した試料は 15mm）。

W/B35% の N35 では、浸せき 20 ヶ月時点で「表面からの距離 20~30mm」まで塩分の浸透が認められる。N35B50 と N35F20 では、「表面からの距離 10~20mm」までの塩分の浸透に留まった。既往研究で確認されていたとおり、混和材の使用により、塩分浸透抵抗性が向上したと考えられる<sup>6,7)</sup>。

W/B40% の H40 では、全塩化物イオン量の分布が経時に変化し、浸せき 20 ヶ月では「表面からの距離 30~

40mm」まで塩分の浸透が認められる。H40B50 と H40F20 では、「表面からの距離 20~30mm」までの塩分の浸透に留まった。

W/B50% の N50 では、全塩化物イオン量の分布が経時に変化し、浸せき 20 ヶ月で「表面からの距離 40~50mm」まで塩分の浸透が認められる。N50B50 および N50F20 では、「表面からの距離 20~30mm」までの塩分の浸透に留まった。

これらの結果から、いずれの W/B でも、混和材の使用により、塩分浸透抵抗性が高くなることを確認できた。

#### 3.2 暴露試験

##### (1) 中性化

暴露 20 ヶ月、40 ヶ月および 90 ヶ月時点の中性化深さおよび中性化速度係数を図-5 に示す。暴露 90 ヶ月の中性化深さは、W/B35% と 40% の試験体で 0.07mm~0.8mm 程度、W/B50% の試験体で 0.6mm~2mm 程度であり、暴露 20 ヶ月と 40 ヶ月時点の中性化深さとほとんど同じであった。中性化が進行しなかった要因としては、雨掛かりがある環境のため、水分供給により結合材の反応が継

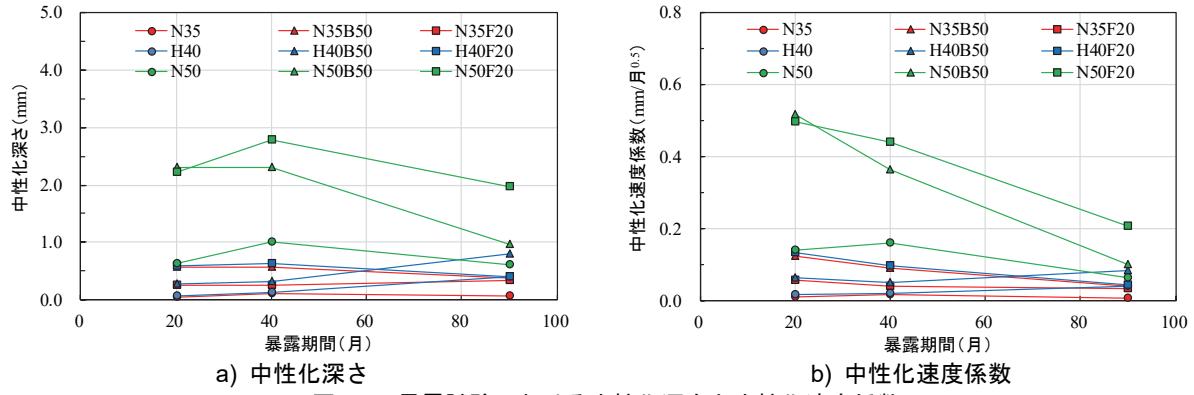


図-5 暴露試験における中性化深さと中性化速度係数

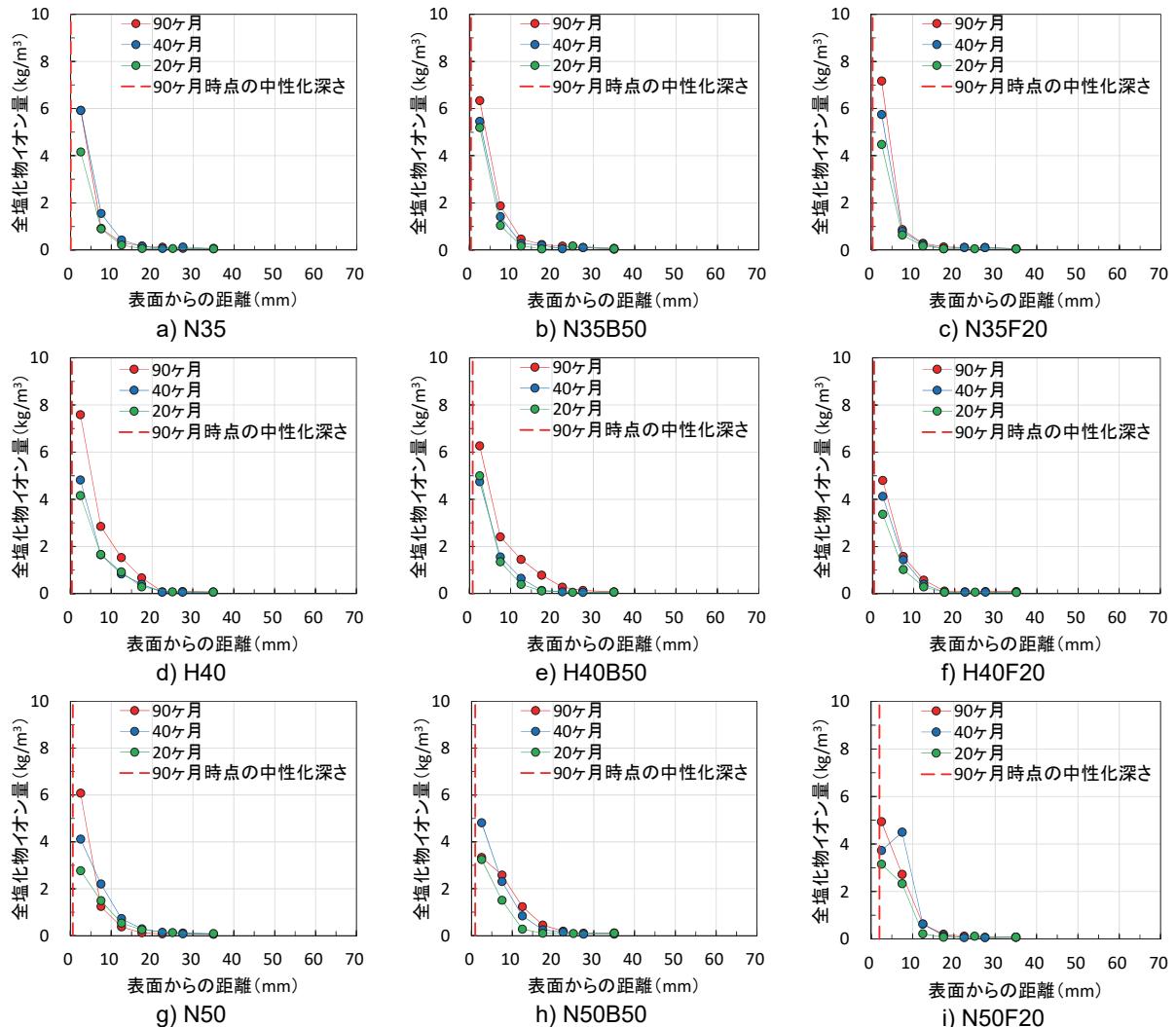


図-6 暴露試験における全塩化物イオン量の分布

続し緻密化したこと、試験体内部は含水率が高く保たれ中性化しにくかったこと<sup>9)</sup>などが考えられる。

中性化の進行が緩慢であることから、暴露時間が長くなるにつれて、中性化速度係数は小さくなつた。暴露 90 ヶ月の中性化速度係数は、N50F20 で最も大きく、 $0.2 \text{ mm}/\sqrt{\text{月}}$  程度であった。暴露 90 ヶ月時点の N50F20 の中性化深さと中性化速度係数を用い、その後の中性化速度係数は変化しないと仮定して 100 年後の中性化深さを算定す

ると 9mm 程度である。このことから、水結合材比 50% 以下であれば、B 種相当まで混和材で置換した場合でも中性化の進行は顕著ではないと考えられる。

## (2) 塩分浸透

暴露試験による全塩化物イオン量の分布を図-6 に示す。図中には、90 ヶ月時点の中性化深さも併せて示す。

W/B35% の N35 シリーズでは、いずれの試験体も、「表面からの距離 10~15mm」までの塩分浸透に留まり、暴

露 20 ヶ月以降の全塩化物イオン量の変化が不明瞭であった。なお、図-4 に示した浸せき試験の結果と比較すると、塩分浸透が浅くなっている。浸せき試験ではコンクリート中の空隙は液状水で飽和しているのに対し、実環境では乾燥により空隙の飽和度が低下し、塩化物イオンの拡散経路となる液状水の連続性が低下する<sup>10)</sup>。このため、暴露試験では見掛けの拡散係数が小さくなり、塩分浸透が浅くなったと考えられる。また、中性化はごく表層に留まっており、中性化に伴う塩化物イオンの濃縮現象は認められない。

W/B40%の H40 と H40B50 では、全塩化物イオン量の分布の経時的な変化が認められるが、H40F20 では N35 シリーズと同様に大きな変化はない。中性化については、N35 シリーズと同様に、いずれの試験体もごく表層に留まっていた。

W/B50%の N50 では、「表面からの距離 5~10mm」よりも深い場合に暴露 20 ヶ月よりも全塩化物イオン量が少なくなり、経時的な変化が確認された浸せき試験の結果と異なる結果となった。N50B50 では、全塩化物イオン量の分布が経時的な変化が認められる。N50F20 では、「表面からの距離 10~15mm」までの塩分浸透に留まり、大きな変化はない。なお、暴露 40 ヶ月で「表面からの距離 0~5mm」の全塩化物イオン量が低下している。これは、表層 3mm 程度の範囲において中性化により解離した塩化物イオンが移動したためと考えられる。

### 3.3 見掛けの拡散係数

図-4 および図-6 の全塩化物イオン量分布の全測定データを最小二乗法で式(1)にフィッティングし、見掛けの拡散係数を算定した。ただし、中性化の影響が確認された暴露 40 ヶ月の N50F20 については、「表面からの距離 0~10mm」の結果を除外した。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - erf \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここに、 $x$ : 表面からの距離(cm),  $t$ : 試験期間(年),  $C(x, t)$ : 距離  $x$  と試験期間  $t$  での全塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_0$ : 表面塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_i$ : 初期含有塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $D_{ap}$ : 見掛けの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ ),  $erf$ : 誤差関数である。

見掛けの拡散係数の経時変化を図-7 に示す。浸せき試験における見掛けの拡散係数は、H40, N50, N50B50 では浸せき期間においてほぼ一定となり、その他の場合も浸せき期間 12 ヶ月以降では必ずしも低下していない。

暴露試験では、暴露時間が長くなるにつれて見掛けの拡散係数は低下する傾向が確認できる。また、浸せき試験の結果と比較すると、低下の度合いが大きい。これは、浸せき試験では試験体が飽和状態にあるのに対し、暴露試験では乾燥状態となることに起因すると推察される。

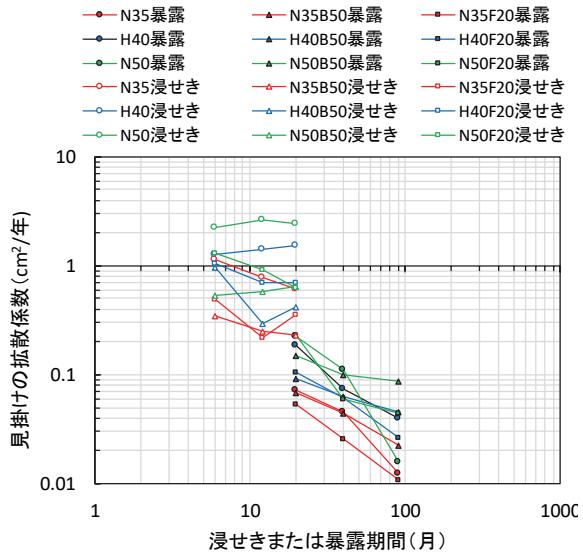


図-7 見掛けの拡散係数の経時変化

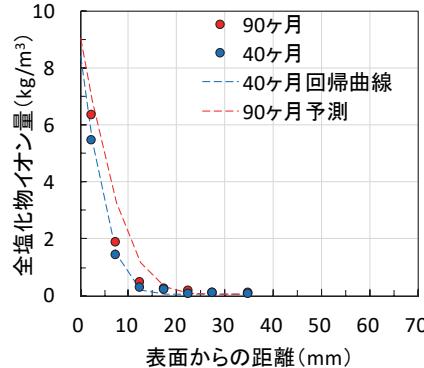


図-8 Fick の拡散則を用いた分析例 (N35B50)

表-2 Fick の拡散則を用いた分析結果

| 暴露試験体  | 分析結果           |
|--------|----------------|
| N35    | 算定値と乖離         |
| N35B50 | 算定値と乖離         |
| N35F20 | 算定値と乖離         |
| H40    | 算定値と概ね一致       |
| H40B50 | 算定値と概ね一致       |
| H40F20 | 算定値と乖離         |
| N50    | データに不明点があり分析困難 |
| N50B50 | データに不明点があり分析困難 |
| N50F20 | 算定値と乖離         |

浸せき試験から得られる見掛けの拡散係数は、暴露試験の場合と比較して大きい値を示している。例えば、浸せき期間および暴露期間を 20 ヶ月として比較すると 3~11 倍になる。このような傾向は、既往研究でも指摘されている<sup>3),10)</sup>。浸せき試験による見掛けの拡散係数を用いて将来予測などを実施する場合には、乾燥を受けることなど実環境との相違を考慮することが重要と考えられる。

### 3.4 Fick の拡散則を用いた分析

暴露試験において、全塩化物イオン量の分布の経時的な変化が不明瞭な場合があったため、Fick の拡散則を用いてさらに分析を行った。

式(1)に示す Fick の拡散則は、見掛けの拡散係数に経時変化がないことを仮定している。よって、ある時点の結果からその後の結果をある程度予測できれば、見掛けの拡散係数の低下が顕著でなく、式(1)が適用できると考えられる。反対に、予測との乖離があれば、見掛けの拡散係数の低下が顕著なことや、塩分の拡散がほとんど生じていない可能性がある。そこで、以下の方法で分析した。

暴露試験 40 ヶ月時点のデータから得られる見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン量  $C_0=9\text{kg}/\text{m}^3$  を式(1)に代入し、暴露 90 ヶ月時点の全塩化物イオン量の分布を算定した。 $C_0$  は、暴露場が汀線付近に位置する環境と想定して設定した<sup>11)</sup>。

この分析を実施した例として N35B50 の結果を図-8 に示す。この配合では、算定値と暴露 90 ヶ月時点のデータに乖離があった。

他の配合についても分析した結果を表-2 に示す。結果として、W/B35%の場合や W/B40%以上でもフライアッシュを用いた場合で、図-8 に示したような傾向が確認された。このような配合では、塩分浸透抵抗性が特に高いと考えられる。一方、H40 と H40B50 では、概ね算定値と一致する結果であった。なお、暴露試験の N50 と N50B50 では、40 ヶ月～90 ヶ月の全塩化物イオン量の分布の変化がほとんどなく、浸せき試験における傾向とも異なるため、本データでは分析は困難と考えた。

#### 4. まとめ

本報告では、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュの置換率を B 種相当として W/B35%, 40%, 50%としたコンクリートを用いて、浸せき試験と暴露試験を行い、塩分浸透抵抗性が特に高くなる配合条件等を検討した。

- (1) 浸せき試験では、いずれの W/B においても、混和材の使用により、塩分浸透抵抗性が高くなることを確認できた。
- (2) 暴露試験では、暴露 20～90 ヶ月での中性化の進行が緩慢であり、W/B40%以下であれば、B 種相当まで混和材で置換した場合でも塩化物イオンの濃縮現象は確認されなかった。
- (3) W/B35%の場合および各 W/B でフライアッシュを用いた場合には、暴露 20 ヶ月以降の塩分浸透の明確な進行が認められず、これらの配合は特に高い塩分浸透抵抗性を有すると考えられた。

今後、他の地点や配合で実施している暴露試験結果等も活用し、混和材を用いた場合のかぶりの在り方について検討していく予定である。なお、本報告は、(国研) 土木研究所と(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究「新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築」における実験結果の

一部を報告したものである。

#### 謝辞

暴露試験では、内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所名護維持出張所の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木研究所：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書（II）－コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討－、共同研究報告書第 258 号、2000
- 2) 土木研究所：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書（III）－PC 橋の塩害対策に関する検討－、共同研究報告書第 270 号、2001
- 3) 田中良樹、藤田学、河野広隆、渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.2, pp.517-522, 2001
- 4) 土木研究所：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（I）－低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）、共同研究報告書第 471 号、2016
- 5) 土木研究所：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（II）－混和材を用いたプレストレスコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）－、共同研究報告書第 472 号、2016
- 6) 栗原勇樹、中村英佑、鈴木雅博、古賀裕久：混和材を用いたコンクリートの実環境下での強度と耐久性に関する検討、第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.405-408, 2016
- 7) 中村英佑、栗原勇樹、古賀裕久：暴露 40 ヶ月後の混和材を多量に用いたコンクリートの塩化物イオン浸透、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.1, pp.187-192, 2017
- 8) 気象庁ホームページ：気象統計情報、<https://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>（閲覧日 2019 年 12 月 27 日）
- 9) 片平博、古賀裕久：コンクリートの中性化に関する全国暴露試験、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、第 19 卷、pp.161-166, 2019
- 10) 皆川浩、中村英佑、藤井隆史、綾野克紀：大気環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.41, No.1, pp.767-772, 2019
- 11) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]、pp.163-164, 2017