

# 混和材を多量に用いたコンクリートの 塩化物イオン浸透に関する暴露試験

中村英佑・古賀裕久

## 1. はじめに

コンクリート構造物の構築に伴って発生する二酸化炭素排出量を削減できる技術として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物を混和材として多量に用いた低炭素型のコンクリートが注目されている。混和材を多量に用いたコンクリートは、材料製造時に発生する二酸化炭素排出量の削減や副産物の有効利用に貢献することに加えて、塩化物イオン浸透やアルカリシリカ反応の抑制などコンクリート構造物の高耐久化や長寿命化にも寄与することが期待されている。しかし、混和材を多量に用いたコンクリートの設計施工方法は十分には確立されておらず、実用化を進める際の課題となっていた。

土木研究所先端材料資源研究センター(iMaRRC)では、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、株式会社大林組、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社、戸田建設株式会社、西松建設株式会社、鉄鋼スラグ協会、電源開発株式会社との共同研究を行い、強度特性、塩害や中性化、凍結融解に対する抵抗性、クリープ・収縮特性、温度ひび割れに対する抵抗性、二酸化炭素排出削減効果などを検討し、この結果をとりまとめた「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)<sup>1)</sup>」を発刊した<sup>2),3)</sup>。

本稿では、この検討のうち、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状況を明らかにするために行った暴露試験の結果を報告する。

## 2. 暴露試験の目的

海岸付近など塩分の供給がある環境で供用されるコンクリート構造物では、塩化物イオンがコンクリート内部に浸透して鋼材を腐食させ、コンクリートのひび割れや剥離、鋼材の断面減少、構造物の耐荷性能の低下などを生じさせる塩害に対する抵抗性の確保が重要である。このため、コンクリートは、

外部からの塩化物イオンの浸透に対して十分な抵抗性を有するものとする必要がある。

一般に、混和材の使用は、コンクリートの空隙構造を緻密にし、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を高める効果を有するとされる。しかし、混和材を多量に用いた場合の研究事例は少なく、実環境での抵抗性は明確にされていない。そこで、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用量の異なるコンクリートの試験体を製作して暴露試験を行った<sup>4),5)</sup>。

## 3. 暴露試験の方法

### 3.1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表-1 に示す。コンクリートの配合は 12 種類である。内訳は、(1) 普通ポルトランドセメントのみを用いた配合(N50、N35)、(2)高炉スラグ微粉末を用いた配合(配合名称に B50、B70、B85 を含む)、(3)フライアッシュを用いた配合(配合名称に F20、F30、F40 を含む)である。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた配合では、混和材の置換率を 3 水準とした。すなわち、高炉スラグ微粉末の置換率を 50%、70%、85%、フライアッシュの置換率を 20%、30%、40%とした。これらは、高炉セメント(JIS R 5211)とフライアッシュセメント(JIS R 5213)が混和材の分量で 3 種類(A 種、B 種、C 種)に分類されていることを参考に、混和材の置換率が「B 種相当」、「C 種相当」、「C 種を超えるもの」となるように設定したものである。国内では「B 種相当」の置換率で混和材が用いられることが多く(高炉スラグ微粉末は 40~45%程度、フライアッシュは 15~20%程度)、本稿では「C 種相当」と「C 種を超えるもの」を混和材を多量に用いたコンクリートとみなした。

水結合材比(単位水量をセメントと混和材の質量で除して百分率で表した値、以下「W/B」という。)は、50%を基本とした。W/B の違いによる影響を検討するために、35%に低減した配合も含めた。

### 3.2 暴露環境

暴露試験の実施状況を図-1 に示す。暴露試験の

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合名称	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					スランブ (cm)	空気量 (%)	材齢28日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		W	B			S				G
			OPC	GGBFS	FA					
N50	50	165	330 (100%)	—	—	827	968	14.0	5.2	44.9
N50B50			165 (50%)	165 (50%)	—	815		13.5	4.3	36.3
N50B70			99 (30%)	231 (70%)	—	810		12.5	4.5	30.5
N50B85			50 (15%)	281 (85%)	—	806		11.5	4.0	21.2
N50F20			264 (80%)	—	66 (20%)	807		11.5	4.4	37.4
N50F30			231 (70%)	—	99 (30%)	797		11.0	4.6	30.0
N50F40			198 (60%)	—	132 (40%)	787		14.5	4.0	22.9
N35	35	165	471 (100%)	—	—	713	968	14.5	4.7	67.7
N35B50			236 (50%)	236 (50%)	—	695		14.5	4.3	55.8
N35B85			71 (15%)	401 (85%)	—	682		12.5	5.1	34.3
N35F20			377 (80%)	—	94 (20%)	684		12.0	3.5	59.3
N35F40			283 (60%)	—	189 (40%)	655		14.5	4.5	41.6

※W: 上水道水、B: 結合材、OPC: 普通ポルトランドセメント、GGBFS: 高炉スラグ微粉末4000、FA: フライアッシュII種、S: 細骨材、G: 粗骨材

※単位量の百分率は結合材に占めるセメントと混和材の質量%を表示



図-1 暴露試験の実施状況

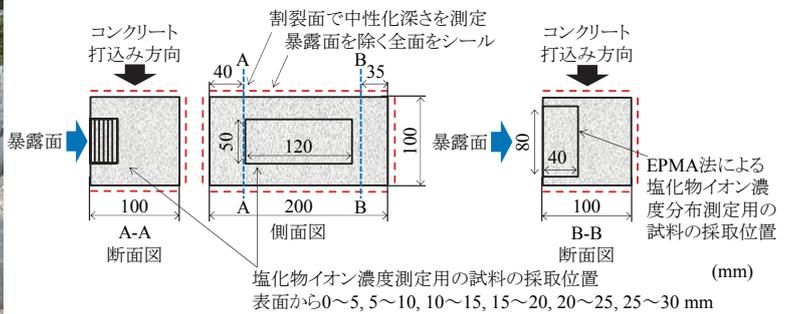


図-2 試験体の概略

実施場所は、沖縄県の沿岸部(沖縄県国頭郡大宜味村)であり、台風時など天候によっては海水が試験体に直接降りかかることもある環境であった。

### 3.3 試験体の形状と解体調査の方法

試験体の概略を図-2 に示す。試験体は 100×100×200mm の角柱である。材齢 28 日まで 20℃で水中養生を行い、片側の側面(100×200mm)を暴露面とし、他の面を塗装材料でシールした。その後、暴露面を海側に向けて設置し、暴露を開始した。

暴露 40 ヶ月後に試験体を回収し、塩化物イオン濃度と中性化深さの測定を行った。塩化物イオン濃度の測定では、試験体の側面の中央部を対象として表面から厚さ 5mm ごとに試料を切断し、JIS A 1154 に準拠した電位差滴定法によって、深さ方向の塩化物イオン濃度分布を求めた。また、W/B を 50%とした試験体では、塩化物イオン浸透状況を精緻に把握するために、土木学会規準 JSCE-G 574 に準拠した EPMA(波長分散型電子プローブマイクロアナライザ)法によって、深さ方向に 0.1mm ごとの塩化物イオン濃度分布を求めた。一方、中性化深さの測定では、試験体の端部を割裂し、JIS A 1152 に準拠して割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、暴露面から赤紫色を呈した位置までの距離を

測定して中性化深さを求めた。

## 4. 暴露試験の結果

### 4.1 塩化物イオン濃度と中性化深さ (W/B=50%)

W/B を 50%とした試験体の塩化物イオン濃度と中性化深さの測定結果を図-3 に示す。

塩化物イオン濃度の測定結果では、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 と高炉スラグ微粉末の置換率を 50%とした N50B50 を除いて、試験体表面に最も近い「表面からの距離 0～5mm」よりも内部の「表面からの距離 5～10 mm」で塩化物イオン濃度が大きくなった。高炉スラグ微粉末の置換率を 85%と大きくした N50B85 では、この傾向が特に顕著に現れており、「表面からの距離 10～15mm」で塩化物イオン濃度が最大となった。

中性化深さの測定結果では、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 の中性化深さが最も小さく、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率の高い試験体ほど中性化深さが大きくなった。

これらの結果を踏まえて、塩化物イオン濃度と中性化深さの関係を比較すると、N50 と N50B50 を除いた試験体では、塩化物イオン濃度が最大になった位置が中性化深さよりも試験体の内部で生じてい

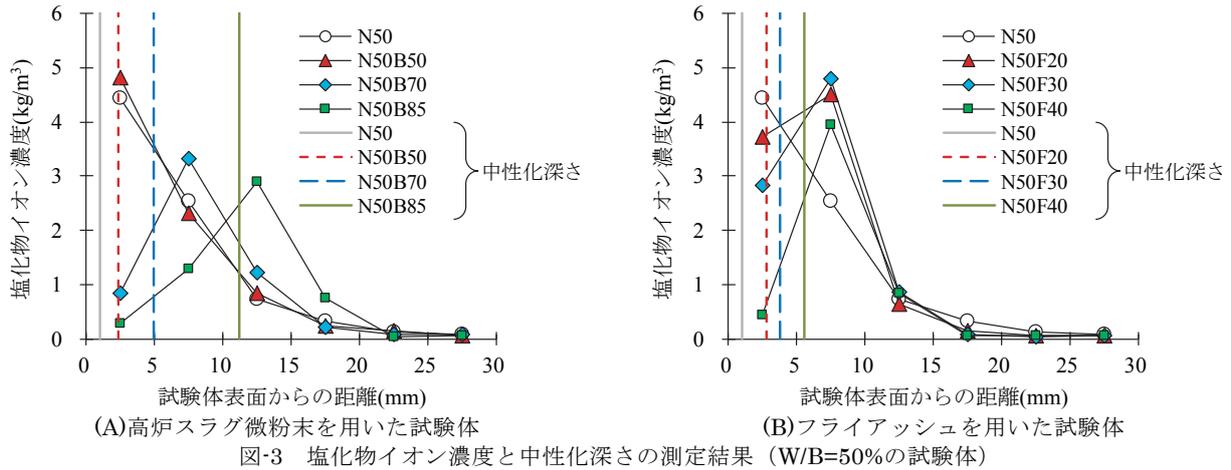


図-3 塩化物イオン濃度と中性化深さの測定結果 (W/B=50%の試験体)

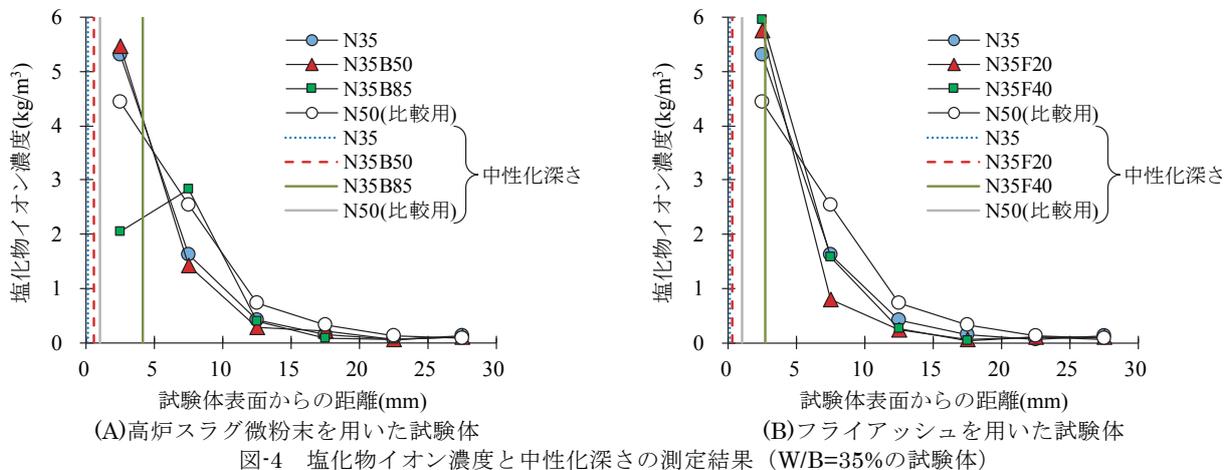


図-4 塩化物イオン濃度と中性化深さの測定結果 (W/B=35%の試験体)

たことがわかる。一般に、コンクリート内部に浸透して水和生成物に固定化されていた塩化物イオンは、中性化が進行すると、中性化深さよりも深い位置の未中性化領域に移動して濃縮すること<sup>9)</sup>が知られている。図-3によると、この塩化物イオンの濃縮現象は混和材を多量に用いたコンクリートでも生じており、特に混和材の置換率の高いN50B85などで影響が顕著に現れたと考えられる。

4.2 塩化物イオン濃度と中性化深さ (W/B=35%)

W/Bを35%に低減した試験体の塩化物イオン濃度と中性化深さの測定結果を図-4に示す。同図には、比較のためにW/Bを50%として普通ポルトランドセメントのみを用いたN50の結果も併記した。

塩化物イオン濃度の測定結果では、高炉スラグ微粉末の置換率を85%としたN35B85を除いて、塩化物イオン濃度は、試験体表面に最も近い「表面からの距離0~5mm」で最大となり、試験体内部ほど小さくなった。N35B85以外の塩化物イオン濃度を厳密に比較すると、混和材を用いた試験体では「表面からの距離5~20mm」の範囲の塩化物イオン濃度が普通ポルトランドセメントのみを用いた

N35よりも小さくなった。また、N50との比較では、N35B85以外の試験体では「表面からの距離5~25mm」の範囲で、N35B85を含めた全ての試験体では「表面からの距離10~25mm」の範囲で塩化物イオン濃度が小さくなり、W/Bを低減することによってコンクリート内部への塩化物イオンの浸透が抑制されたと考えられる。

中性化深さの測定結果では、混和材の置換率が高い試験体ほど中性化深さが大きくなったが、W/Bを35%とした試験体ではW/Bを50%とした試験体と比較すると中性化深さが小さくなった。

これらの結果を踏まえると、混和材を多量に用いたコンクリートにおいても、W/Bを低減することによって中性化の進行と塩化物イオンの未中性化領域への浸透を抑制できると考えられる。

4.3 EPMA法から得られた塩化物イオン濃度分布

EPMA法から得られた塩化物イオン濃度分布の画像の例を図-5に、深さ方向の塩化物イオン濃度分布を図-6に示す。図-5では、図-3と同様に、混和材を用いた試験体において、試験体内部で塩化物イオン濃度の大きい領域が生じていたことを視覚的

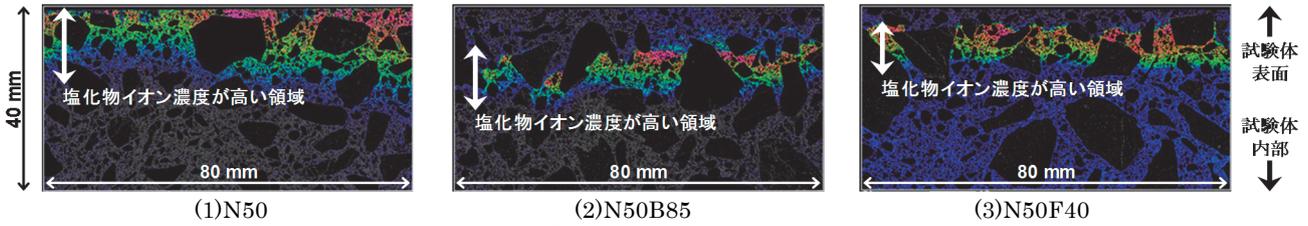


図-5 EPMA法から得られた塩化物イオン濃度分布の画像の例

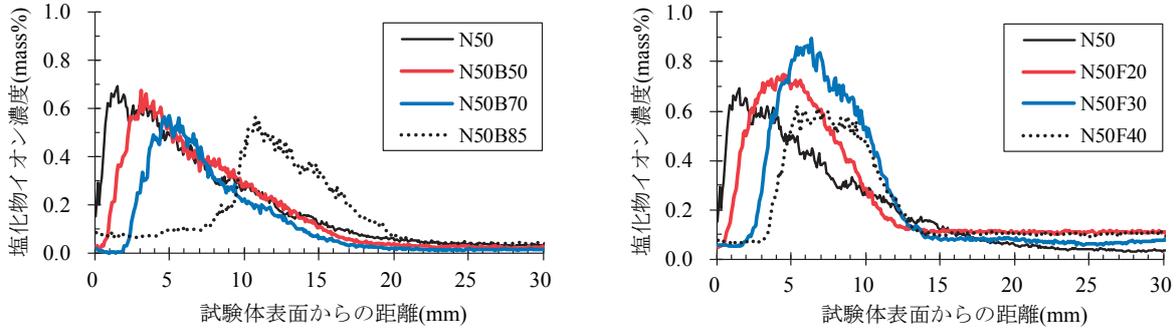


図-6 EPMA法から得られた塩化物イオン濃度分布 (W/B=50%の試験体)

に確認できる。図-6 では、塩化物イオンの濃度分布を図-3 よりも精緻に把握でき、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率が高いほど試験体の深い位置で塩化物イオン濃度が最大となったことを確認できる。また、図-3 に示した厚さ 5mm の試料を用いた測定結果において塩化物イオンの濃縮現象の発生が認められなかった N50 と N50B50 でも、試験体の深い位置で塩化物イオン濃度が大きくなったことを確認できる。

## 5. おわりに

本稿では、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に着目して、沖縄県の沿岸部で行った40ヶ月間の暴露試験の結果を報告した。混和材を多量に用いたコンクリートでは、混和材を用いていないコンクリートと比較して、中性化深さが大きくなり塩化物イオンが内部の未中性化領域に浸透する傾向にあったが、W/Bを適切に選定することによって中性化の進行と塩化物イオンの未中性化領域への浸透を抑制できることなどを確認した。

なお、本稿では暴露40ヶ月後の調査結果を報告したが、混和材を多量に用いたコンクリートの適用方法の信頼性を更に高めることができるように、その後も暴露試験を継続して行っている。

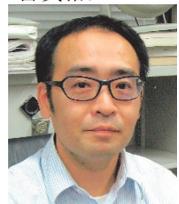
- 田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鉄鋼スラグ協会、電源開発(株)：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅰ)—低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン(案)—、共同研究報告書第471号、2016
- 2) 渡辺博志、古賀裕久、中村英佑：低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン(案)、土木技術資料、第58巻、第5号、pp.46、2016
  - 3) (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター：<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/activity/tech-info.html>
  - 4) 渡辺博志、森濱和正、中村英佑、鈴木聡：低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート供試体の暴露試験、土木技術資料、第54巻、第8号、pp.48～49、2012
  - 5) 中村英佑、鈴木聡、森濱和正、渡辺博志：低炭素社会の実現に寄与するコンクリート技術—低炭素型セメント結合材の利用—、土木技術資料、第55巻、第1号、pp.20～23、2013
  - 6) 小林一輔、白木亮、河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集、Vol.1、No.2、pp.69～82、1990

中村英佑



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 主任研究員、博士(工学)  
Dr. Eisuke NAKAMURA

古賀裕久



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、博士(工学)  
Dr. Hirohisa KOGA

## 参考文献

- 1) (国研)土木研究所、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設(株)、前