

寒冷地の海水遡上河川に5年間暴露したコンクリートの耐久性評価

Durability of concrete after 5 years exposure test under the river intruding seawater in cold region

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 〇正 員 吉田 行 (Susumu Yoshida)
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 正 員 島多 昭典 (Akinori Shimata)
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 正 員 嶋田 久俊 (Hisatoshi Shimada)

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、気象・環境条件および使用条件などにより大きく異なる。特に、積雪寒冷地では、凍結融解と塩分の複合作用による性能の低下が著しいことから、長期耐久性向上対策の確立が急務となっている。このため、著者らは、積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の耐久性向上対策の一つとして、混和材の利用によるコンクリート自体の耐久性向上について検討を行い、従来の一般的なコンクリートよりも耐久性の高いコンクリートの製造が可能であることを明らかにするとともに、実環境下における耐久性等を検証するための暴露試験を実施してきた¹⁾。

本研究では、積雪寒冷地の海水遡上河川の護岸堤に5年間暴露した、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート供試体の強度や耐久性について評価したので報告する。

2. 河川護岸堤に暴露した供試体の調査

2.1 暴露試験の概要

河川護岸堤における暴露試験は、北海道オホーツク地方の海水が遡上する河川において実施した。現地コンクリート護岸堤は建設後20~30年程度経過しており、海水による塩害や凍害、冬期に河川が結氷した際に流動する氷によるすり減り等、複合的な劣化が多数みられ、劣化の程度に応じて補修等が順次実施されている。本暴露試験は、コンクリート護岸堤の耐久性向上対策の一つとして、その効果を検証する目的で実施した。

暴露供試体は、ベースセメントに早強ポルトランドセメント（以下、早強セメントと記述）を使用し、JIS規格値を満足する比表面積6000cm²/gクラスの高炉スラグ微粉末（以下、スラグと記述）をセメント内割で60%置換した結合材を使用している。表-1に配合を示す。配合は、既設護岸堤の設計基準強度60N/mm²を考慮して決定した。供試体は、型枠を横置きにしてコンクリートを打込み、パイプブレータで締め固める方法で作製した。目標スランプは、作業性を考慮し、スランプフロー50±5cmに設定した。また、目標空気量は耐凍害性を考慮し、

4.5±1.5%とした。

養生は蒸気養生とし、その方法は比表面積6000クラスのスラグを用いた既往の研究²⁾を参考にした。蒸気養生後は、工場の敷地内にある屋外ヤードに暴露開始まで静置した。

暴露供試体の設置状況を写真-1に示す。海水が遡上する河川の左岸側に、スラグを用いたもの4体（断面0.3×0.3m、長さ3mの角柱）と、比較用の一般品として早強セメントのみのものを1体設置した。供試体は、実際のコンクリート製品と同様に、型枠底面が河川側に向くように既設護岸堤に据え付けた。

2.2 調査・試験概要

これまでに、暴露1、2、3年目でスラグ供試体を1体ずつ回収して経年調査³⁾を行っており、5年目の調査では、現地に残存するスラグ製品1体と一般品1体をそれぞれ回収し、物性や耐久性を調査した。調査にあたっては、写真-2に示すように、回収した暴露供試体の気中部、干満帯、水中部の各部位から4個ずつ供試体内の鉄筋を避けてコアを採取し（φ100×300mm）、各部位の最上部のコアで塩分浸透量の測定を、残り3コア試料で圧縮強度、静弾性係数測定および透過法による超音波伝



写真-1 暴露供試体の設置状況 (当初)

表-1 コンクリートの配合

試験体 種類	セメント 種類	混和材 種類	混和材 置換率 (%)	W/B (%)	空気量 (%)	SP※1 添加量 (セメント×%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (kg/m ³)						AE剤 添加量 (B×%)
								水	結合材 (B)		細骨材	粗骨材 (5-20)	SP※1	
									セメント	スラグ				
スラグ 供試体	早強	S6	60	30.6	4.5	0.60	43	162	529		689	941	3.17	0.0168
									212	317				
一般品		-	-	30.4		0.65	36	150	494	-	607	1111	3.21	0.0200

(※1 SP:高性能減水剤)

播速度計測を実施した。

超音波伝播速度計測は、超音波非破壊測定器を用いて透過法（超音波センサー直径 20mm）で行った。計測は、回収した製品から採取したコア供試体（ $\phi 100 \times 300\text{mm}$ ）を直径方向に超音波伝播時間を測定、伝播距離はノギスで測定し、伝播距離／伝播時間から伝播速度を求めた。なお、超音波伝播速度に及ぼす供試体の水分の影響を排除⁴⁾するため、コア供試体を 1 週間 40℃にて乾燥した後、超音波伝播速度を計測した。

コンクリート内部への塩分浸透量は、電子線マイクロアナライザー（EPMA）による面分析（定量分析）⁵⁾により測定した。面分析は、研磨した試料の分析面に導電性を持たせるために金を蒸着し実施した。面分析条件を以下に示す。

加速電圧：15kV、試料電流： $1 \times 10^{-7}\text{A}$

測定時間：40msec/ピクセル

分光結晶：LDE5H (C)、PET (Ca、Cl)、TAP (Si)

標準試料：Cl (Halite、 $\text{Cl}=60.7\text{mass\%}$)、Ca、
Si (Wollastonite、 $\text{CaO}=48.0\text{mass\%}$ 、
 $\text{SiO}_2=50.9\text{mass\%}$)

プローブ径：25 μm 、ピクセルサイズ：50 $\times$ 50 μm

塩化物イオン(Cl)の濃度分布は、コンクリート内部への塩化物イオンの侵入がセメントペースト部を介して起こるため、面分析結果の画像はセメントペーストに相当する部分のみを表示する条件で作成した。セメントペーストに相当する部分の表示は、反射電子の強度の他に $17.5\text{mass\%} \leq \text{CaO} \leq 52.5\text{mass\%}$ 、および $5.0\text{mass\%} \leq \text{SiO}_2 \leq 30.0\text{mass\%}$ の条件に当てはまるピクセルのみを選択することにより行った。

3. 実験結果および考察

3.1 暴露供試体の外観変状

供試体回収後に目視による外観評価を行った。気中部および水中部は外観上の劣化はほとんど確認できなかったが、干満帯の部位に凍害によると考えられるスケーリング劣化が確認された。写真-3 に干満帯のスケーリング劣化状況を示す。スラグ供試体は表面のモルタルが薄く剥離する程度で極めて軽微だったが、早強セメントのみで製作した一般品は、粗骨材がいくつか露出する程度の劣化が確認された。

3.2 圧縮強度と静弾性係数

図-1 に暴露 5 年経過した供試体の部位別の圧縮強度と静弾性係数を示す。圧縮強度はいずれも設計基準強度の 60N/mm^2 を上回っており、干満帯を除くとスラグ供試体より一般品の方が若干強度は大きかった。しかし、全体としては、静弾性係数を含めて、部位や結合材の違いによる大きな差はなかった。

図-2 にスラグ供試体の圧縮強度の経時変化を、図-3 にスラグ供試体の静弾性係数を示す。なお、凡例の「室内」とは、室内試験用円柱供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）による材齢 7 日と 91 日の値である。

圧縮強度は暴露 3 年までは微増したが、暴露 5 年目ではいずれの部位も低下した。一方、静弾性係数は暴露 5 年まで若干増加の傾向がみられた。なお、圧縮強度および

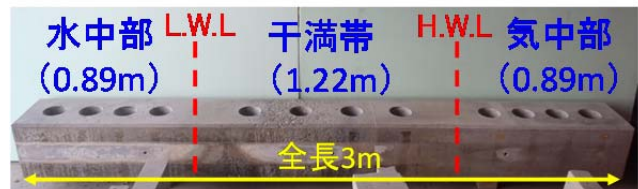


写真-2 回収した暴露供試体の一例（コア採取後）

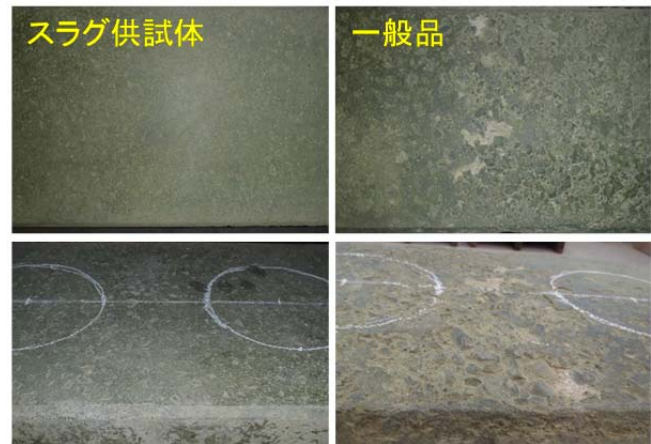


写真-3 干満帯のスケーリング劣化状況

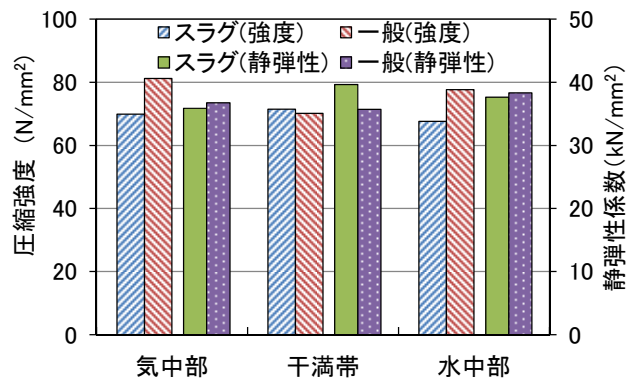


図-1 部位別の圧縮強度と静弾性係数

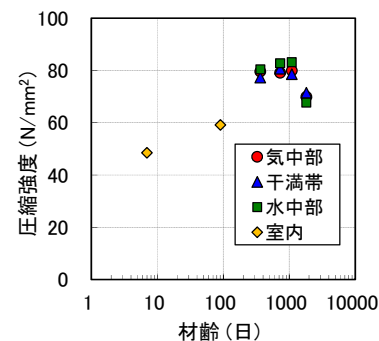


図-2 スラグ製品の圧縮強度の経時変化

静弾性係数は、暴露部位の違いによる差はほとんどなかった。

図-4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。暴露 1 年目で圧縮強度の増加に対する静弾性係数が小さくなったものの、それを除くと土木学会標準示方書[設計編]に示された計算値⁶⁾とほぼ同程度であった。

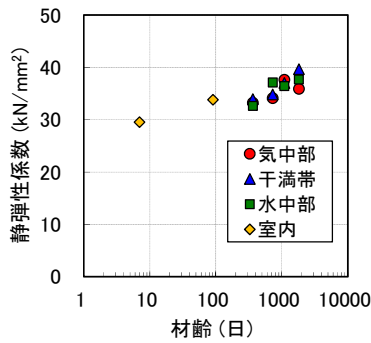


図-3 スラグ製品の静弾性係数の経時変化

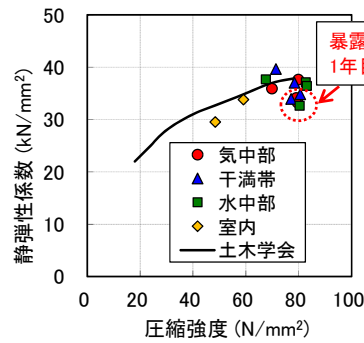


図-4 スラグ製品の圧縮強度と静弾性係数の関係

3.3 超音波伝播速度

図-5 に部位別に採取したコア供試体の直径方向に透過した超音波伝播速度を示す。なお、測定はコアの長手方向に 1cm 刻みで行ったが、全体の傾向把握の観点から、図には両端の値以外の中間点は 4 点毎に平均した値を示した。縦軸の 0cm は河川側の暴露表面であり、30cm は裏面を意味する。

乾燥の影響を受ける気中と干満帯では、表面部の速度が低下する傾向がある。早強セメントのみの使用で水和反応が比較的早い一般品は、表面と内部の速度差は小さい。一方、スラグ供試体は水中部では水と接している表面の方が内部より速度が大きく、干満帯では供試体の型枠面（暴露表面）の方が打設面より速度が大きい傾向があり、これはブリーディングの影響が考えられる。全体としては、スラグ供試体の方が一般品よりも絶対的な速度は小さかった。これは、表-1 の配合のとおり、スラグ供試体の方が一般品よりも単位粗骨材量が少ないため、これが影響していると考えられ、大きな劣化の傾向はいずれも確認できなかった。

3.4 塩化物イオンの浸透状況

図-6 に EPMA 面分析（定量分析）によるコンクリートの塩化物イオンの浸透状況を示す。画像左側が暴露供試体の表面である。なお、塩化物イオン濃度の高い順に白→赤→黄色→緑→青緑→青→黒の色で表示している。また、塩化物イオンの濃度分布は、骨材部分を除いたセメントペースト分に対する塩化物イオン濃度を示している。

気中部は、いずれも極表層部に塩化物イオンの浸透がみられたが、その濃度は極めて低かった。これに対して、干満帯および水中部は気中部よりも内部に塩化物イオンが浸透しており、特に水中部は塩化物イオンの浸透が大きかった。また、一般製品はスラグ製品よりも内部に塩化物イオンが浸透している状況を確認した。

図-7 に EPMA 面分析の結果から算定した塩化物イオンの濃度分布の経年変化を示す。気中部は塩化物イオンの浸透がほとんどなかったため、干満帯と水中部について示している。

スラグ供試体の塩化物イオン浸透量は経年的に増大したが、暴露 3 年から 5 年の差は比較的小さく、暴露 5 年目では深さ 10 から 20mm 位置の水中部における塩化物イオン量が増加する傾向を示した。一方、一般製品はスラグ製品よりも内部方向への塩化物イオン浸透量が多く、

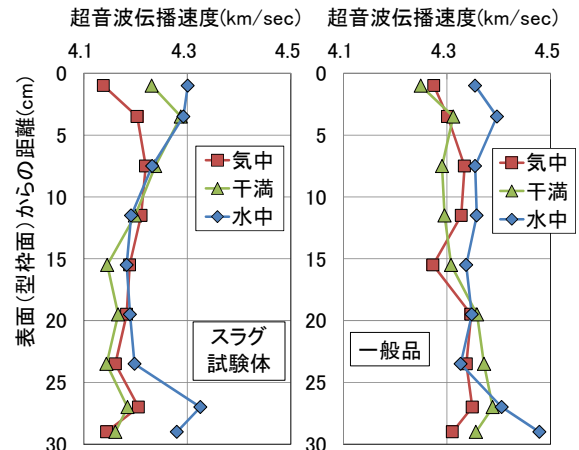


図-5 コア供試体の超音波伝播速度（透過法）

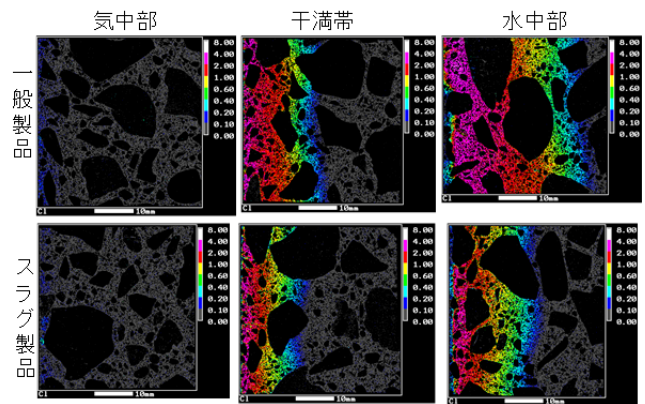


図-6 EPMA面分析による塩化物イオン浸透状況

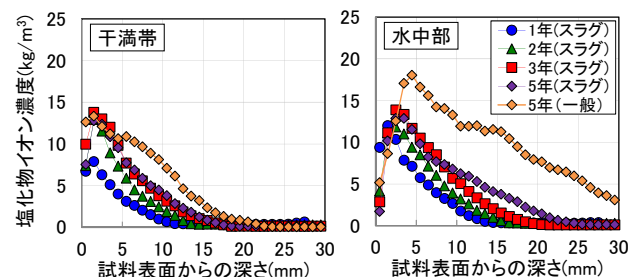


図-7 塩化物イオンの浸透量

特に水中部では深さ 30mm で 3kg/m^3 程度の塩化物イオンの浸透がみられた。これにより、スラグを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性が高いことが確認できた。なお、試料表層部の塩化物イオンの低下は、中性化や水中における溶脱の影響と考えられるが、水中部に着目するとスラグ製品よりも一般品の方が内部まで塩化物イオンが低下しており、スラグ製品の方が表層の品質が高いことに起因していると考えられる。

なお、港湾構造物では、水中部よりも干満帯における飛沫部の塩化物イオンが多くなる傾向があるが、本暴露箇所では水中部の方が塩分の浸透が多かった。これは、河川における干満帯は、雨水や融雪水が増大したときには、干満帯の塩分を洗い流す作用が生じることや、河川では比較的静的な潮の満ち引きで水面が上下するのに対し、港湾では潮の満ち引きに加え、波浪による乾湿作用を受け、塩分の濃縮作用が増大する等が影響したものと推察される。

3.5 塩化物イオンの拡散係数に関する考察

図-7 に示した 5 年目の塩化物イオンの浸透量を用いて、フィックの第 2 法則に基づいた拡散方程式の解により回帰分析して算出した、コンクリートの表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数を図-8 および図-9 にそれぞれ示す。なお、回帰分析にあたっては、表層部の塩分が低下した領域のデータを除外している。

コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、水中部の一般製品で 20kg/m^3 を超える値となったが、これを除くと 15kg/m^3 程度とほぼ一定であった。

塩化物イオンの拡散係数は、いずれの部位においても一般製品よりスラグ製品の方が小さく、干満帯で約 2 倍、水中部で約 3 倍の差があることを確認した。

4. まとめ

寒冷地の海水が遡上する河川に 5 年間暴露したコンクリートの物性および耐久性等を検証した結果、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは暴露 5 年目で強度は低下したものの、設計基準強度を満足しており、静弾性係数は微増していた。また、一般製品に比べて凍害による表面上の劣化が極めて少なく、塩化物イオンの浸透が低いことが確認され、高炉スラグ微粉末の使用が耐久性向上対策として有効であることが示された。

参考文献

- 1) 吉田行、尾形寿、村中智幸、小倉東、佐竹比呂志：室内試験による混和材を用いた高耐久性コンクリー

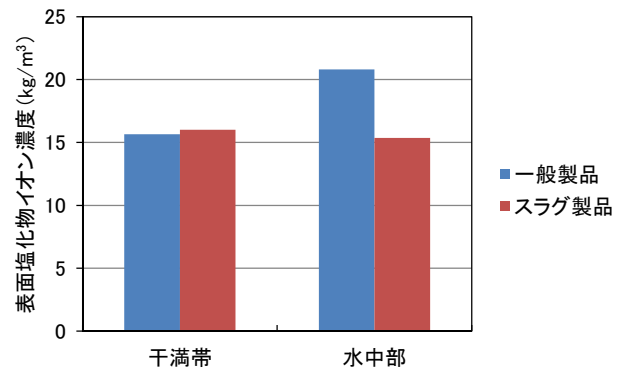


図-8 実測値から求めた表面塩化物イオン濃度

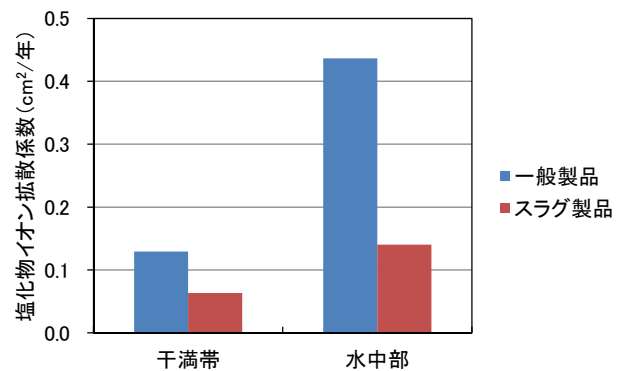


図-9 実測値から求めた見かけの拡散係数

トの工場製品への適用性評価、寒地土木研究所月報、No.680、pp.12-20、2010.1

- 2) 酒井秀昭、横山博司、高野茂晴、前田悦孝：高炉スラグ微粉末 ($6000\text{cm}^2/\text{g}$) を用いた鋼橋の PC プレキャスト床版の検討、プレストレストコンクリート、Vol.43、No.5、pp.50-57、2001.9
- 3) 吉田行、田口史雄、尾形寿、村中智幸、小倉東、佐竹比呂志：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート工場製品の実環境下での性能評価について、寒地土木研究所月報、No.690、pp.2-14、2010.11
- 4) 林田宏、田口史雄、遠藤裕丈、草間祥吾：超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報、No.656、pp.10-15、2008.1
- 5) 小林一輔：図解コンクリート構造物の診断—電子の目で内部を見る—、オーム社、pp.30-33、2006.7
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕、pp.39、2013.