

高炉スラグ微粉末を適用したプレストレストコンクリート橋の塩分浸透抑制効果

(株) 安部日鋼工業 正会員 工修 ○石井 豪
 (株) 安部日鋼工業 正会員 工修 辛 軍青
 (株) 安部日鋼工業 正会員 早川 岳

キーワード：高炉スラグ微粉末，塩化物イオン，暴露試験，浸せき試験，電気泳動試験

1. はじめに

近年、環境負荷低減や耐久性向上を目的として、高炉スラグ微粉末などの混和材を結合材の一部として用いたプレストレストコンクリート構造物の適用事例が増加している¹⁾。

混和材の採用にあたっては、予め目的とした性能を確認することが求められ、塩化物イオンの浸透抑制効果については、既往の暴露試験などのデータや促進試験により推測する方法が用いられているが、これらの試験データが必ずしも十分には揃っていないことが課題として挙げられる。そこで、本稿では、早強ポルトランドセメントまたは普通ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリートを適用したプレストレストコンクリート橋における塩化物イオンの浸透抑制効果の検証とデータの蓄積を目的として実施した、構築から10年経過した複数橋梁の追跡調査結果や、構築時に促進試験として実施した電気泳動試験および浸せき試験の事例について報告する。

2. 暴露試験

2.1 暴露試験の概要

表-1に示した3橋について、主桁製作と同時に作成した角柱供試体(□100×200mmまたは□150×250mm)を構築物付近に暴露し、所定の期間経過後の塩化物イオン量の測定を行った。

供試体の配合は、主桁に使用した高炉スラグ微粉末6000を混和した配合(配合名A-B, B-B, C-B)および強度発現を主桁配合と同等とした高炉スラグ微粉末6000を混和しない配合(配合名A-H, B-H, C-H)とし、橋梁ごとに混和材の有無による比較を行った。なお、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

塩化物イオン量の測定は、測定面以外の表面からの塩分浸透の影響を除くため、角柱供試体の暴露面のうち5面を除去し、残りの1面について深さ方向に適宜分割し分析試料とした。深さ方向の分割幅は、A橋およびC橋は10mm、B橋は7mmとした。塩化物イオン量の測定はJIS A 1154に準拠した。

表-1 暴露試験配合

橋名	竣工年	暴露環境	配合名	水結合材比 W/B %	細骨材率 s/a %	単位量 kg/m ³					単位量 B×% Ad	フレッシュ性状 (目標値)		暴露試験 実施材齢 年
						水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G		スランブ cm	空気量 %	
							セメント C	高炉 スラグ BFS						
A橋	2001年	凍結防止剤散布	A-H	37.0	38.9	146	395	—	694	1101	0.80	10.0±2.5	4.5±1.5	1, 5, 10
			A-B	37.0	41.7	142	192	192	746	1056	0.65			
B橋	2004年	飛沫帯	B-H	43.0	38.7	170	396	—	663	1107	1.10	12.0±2.5	4.5±1.5	1, 10
			B-B	40.0	37.2	170	212	213	621	1107	1.00			
C橋	2004年	飛沫帯	C-H	38.0	42.0	150	395	—	759	1071	0.66	12.0±2.5	4.5±1.5	1, 3, 5, 10
			C-B	35.0	42.0	145	207	207	751	1060	0.51			

2.2 暴露試験の結果

暴露材齢10年時の全塩化物イオン濃度分布を図-1に示す。高炉スラグ微粉末6000を混和した配合の塩化物イオン濃度は、混和しない配合と比較して小さくなる傾向が見られた。また、A橋とC橋は表面付近の塩分量がB橋に比べ少なく配合の違いによる差は小さかった。なお、全ての供試体について、中性化深さは0.5mm以下であった。

暴露材齢5年と10年の測定値から、式(1)を用いて算出した塩化物イオンの見掛けの拡散係数(D_{ap})を図-2に示す。

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

ここに、 x : 供試体表面から全塩化物イオンを測定した箇所までの距離(cm), t : 暴露期間(年), $C(x,t)$: 各距離, 暴露期間において測定されたコンクリート単位質量当りの全塩化物イオン(kg/m³), C_o : 浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン(kg/m³), C_i : コンクリートの初期に含有される全塩化物イオン(kg/m³), D_{ap} : 浸せき試験による見掛けの拡散係数(cm²/年), erf : 誤差関数である。

算出の結果から、高炉スラグ微粉末6000を混和した配合の D_{ap} は未混和の配合よりも大幅に低下し、既報²⁾と同様に、塩分浸透に対し抵抗性が高いと判断できる結果であった。また、同一の配合について、暴露期間の経過とともに見掛けの拡散係数が小さくなる傾向も既報²⁾と同様であった。

また、暴露試験により得られた見掛けの拡散係数と下記予測式(2)³⁾, (3)³⁾および式(4)⁴⁾との比較を行った結果を図-3に示す。なお、式(2)は普通ポルトランドセメント(N), 式(3)は高炉セメントB種(BB), 式(4)は早強ポルトランドセメント(H)を結合材とした場合の予測式である。

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (2)$$

$$\log_{10} D_{ap} = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (3)$$

$$D_{ap} = 15.768 \cdot e^{-1.6(C/W)} \quad (4)$$

ここに、 W/C : 水セメント比(ここでは W/B : 水結合材比)である。

配合A-H, B-H, C-Hの暴露試験結果を式(2)および式(4)と、配合A-B, B-B, C-Bの暴露試験結果を式(3)と比較すると、 D_{ap} は予測式と同等もしくは小さい結果であった。このことから、本試験での配合や暴露条件の範囲では、 W/B と上記予測式により D_{ap} を安全側で予測できると考えられる。

3. 促進試験

3.1 試験概要

表-2に示す2橋について、促進試験として電気泳動試験および浸せき試験を行った。供試体の配合は、主桁に使用した高炉スラ

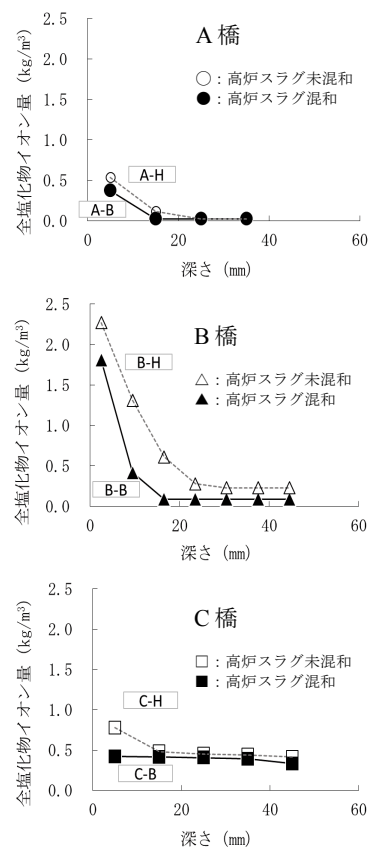


図-1 全塩化物イオン濃度分布 (暴露材齢 10 年)

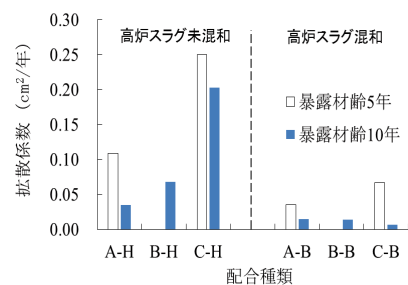


図-2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

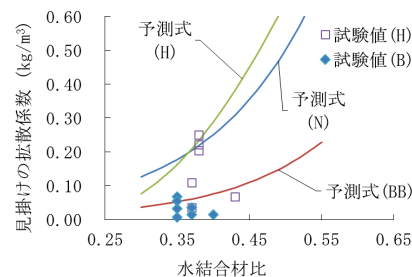


図-3 予測式と試験値の比較

表-2 促進試験配合

橋名	竣工年	配合名	水結合材比 W/B %	細骨材率 s/a %	単体量 kg/m ³						単体量 B×% Ad	フレッシュ性状 (目標値)		
					水 W	結合材 B			細骨材 S	粗骨材 G		混和剤	スランブ cm	空気量 %
						セメント C	高炉スラグ BFS	膨張材 EX						
D橋	2011年	D-H	34.0	44.0	155	456	—	—	734	1101	0.65	10.0±2.5	4.5±1.5	
		D-B	32.0	42.9	153	239	239	—	704	1104	0.60	10.0±2.5		
E橋	2011年	E-N	46.5	37.4	167	360	—	—	640	1114	0.80	8.0±2.5		
		E-B	45.0	39.6	165	173	174	20	673	1067	0.50	12.0±2.5		

グ微粉末 6000 を混和した配合(配合名 D-B, E-B)および強度発現を主桁配合と同等とした高炉スラグ微粉末 6000 を混和しない配合(配合名 D-H, E-N)とした(表-2)。なお、セメントの種類は、D-H, D-B は早強ポルトランドセメント、E-N, E-B は普通ポルトランドセメントを使用した。

電気泳動試験は JSCE-G 571-2010、浸せき試験は JSCE-G 572-2010 に準拠した。供試体は、両試験共に、打込み翌日に脱型し、材齢 28 日まで(運搬時のみ封かん養生)標準養生を行ったφ100×200mm の円柱供試体を用いた。浸せき試験における塩化物イオン量の測定は、開放面から厚さ 5mm ごとに切り出した試料(図-4)を用いて電位差滴定法により行った。浸せき期間は、配合 D-H, D-B が 3 年、配合 E-N, E-B は 5 年である。

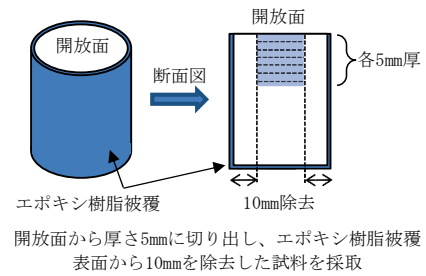


図-4 供試体概要

3.2 試験結果

電気泳動試験結果を図-5 に示す。実効拡散係数(D_e)は、高炉スラグ微粉末 6000 を混和した配合 D-B, E-B の方が、それぞれ配合 D-H, E-N よりも 1/3 程度と小さく、塩分浸透抑制効果が高い結果であった。

また、参考として、実効拡散係数(D_e)から式(5)³を用いて推定した見掛けの拡散係数(D_{ae})を図-5 に併記した。なお、 $k_1 \cdot k_2$ の算出には、配合 D-H および E-N は普通ポルトランドセメントの場合の式(6)³を用い、配合 D-B および E-B は高炉セメント B 種の場合の式(7)³を用いた。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (5)$$

$$k_1 \cdot k_2 = 0.21 \exp\{1.8(W/C)\} \quad (6)$$

$$k_1 \cdot k_2 = 0.14 \exp\{3.1(W/C)\} \quad (7)$$

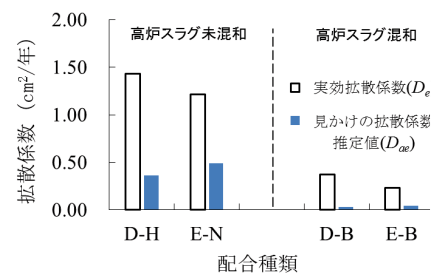


図-5 電気泳動試験結果の拡散係数

浸せき試験から得られた全塩化物イオン濃度分布を図-6 に示す。

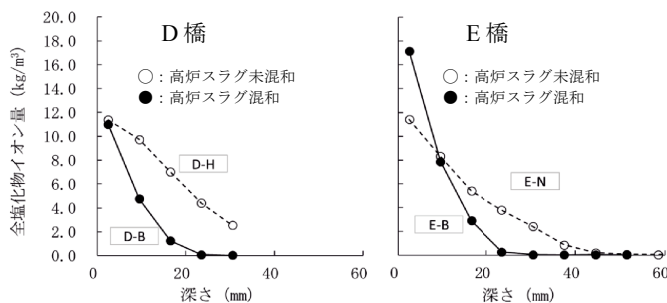


図-6 全塩化物イオン濃度分布 (浸せき試験)

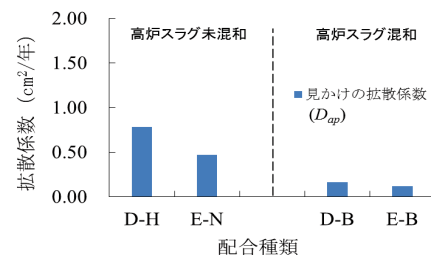


図-7 浸せき試験結果の拡散係数

高炉スラグ微粉末を混和した D-B, E-B の方が, それぞれ D-H, E-N よりも塩分の浸透抑制効果が高い結果であった。図-6 から前述の式(1)を用いて算出した D_{ap} を図-7 に示す。浸せき試験結果についても, 高炉スラグ微粉末を混和した配合の D_{ap} は大幅に低下しており, 塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が高いと判断できる結果であった。これらは暴露試験と同様の傾向を示しており, 高炉スラグ微粉末の混和の有無による塩分浸透抑制効果の大小関係については, 促進試験においても評価ができると思われる。

浸せき試験により得られた見掛けの拡散係数(D_{ap})と電気泳動試験により得られた見掛けの拡散係数の推定値(D_{ae})を比較したところ, 普通ポルトランドセメント単味の配合 E-N についてはよく一致したが, その他の配合については, 既報⁵⁾と同様に D_{ae} は D_{ap} よりも小さな値となった。

このため, 電気泳動試験により評価を行う場合, D_{ae} による塩分浸透予測では危険側の評価となりうるため, 現時点では配合間の比較にとどまるものと考えられる。

4. まとめ

本報告をまとめると下記のとおりである。

- (1) 実構築物付近に設置した供試体の 10 年後の暴露試験結果から, 早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリートは早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも高い塩分浸透抑制効果を示すことを確認した。
- (2) 暴露試験結果から得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数は, 既往の予測式で評価できる結果であった。
- (3) 浸せき試験および電気泳動試験結果から, 早強ポルトランドセメントまたは普通ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリートの塩分浸透抑制効果が確認できた。ただし, 電気泳動試験から求められた見掛けの拡散係数については, 既往の予測式よりも小さくなる傾向が見られるため, 配合間の相対比較にとどまる結果であった。

本報告の範囲においては, 建造物の構築にあたり現行の規基準類に従うことで, 塩化物イオン浸透に対する耐久性は十分確保できると考えられるが, 様々な耐久性の要求スペックに柔軟に対応するためには, 結合材の違いによる耐久性の評価をより正確に行うことが必要となる。このため, 今後も塩化物イオン浸透状況などのデータの蓄積を行い, 長期耐久性が要求されるプレストレストコンクリート橋への高炉スラグ微粉末の適用に寄与したいと考える。

参考文献

- 1) 例えば, 国立研究開発法人土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 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ト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.
- 2) 谷口 秀明, 渡辺 博志, 手塚 正道, 藤田 学, 塩害暴露環境によるコンクリートの塩分浸透性の評価—その 2: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.1, pp.45-51, 2013.
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.154-156, 2013.
- 4) 国土交通省土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 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 橋の塩害に関する検討—, 共同研究報告書第 270 号, pp.9-47, 2001.
- 5) 俵 道和, 呉 承寧: コンクリートの塩化物イオン拡散係数の測定方法, 第 17 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.103-106, 2008.