

高炉スラグ微粉末を用いた PC 構造物の塩害劣化抵抗性に関する考察

(株)安部日鋼工業	正会員	○石井 豪
九州産業大学	正会員	豊福 俊泰
新日鐵高炉セメント(株)		前田 悦孝
(株)安部日鋼工業	正会員	松山 高広

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下 PC) は、一般的に高強度・高耐久性のある構造物であるが、周辺の環境条件によっては、早期の劣化が発生することが確認されている。その原因として、海岸付近における飛来塩分や寒冷地においては凍結防止剤による塩害が挙げられる。この塩害への対策として、高炉スラグ微粉末 6000cm²/g を早強セメントの 50%置換したコンクリート (以下 BFS) を用いた PC 構造物の実績が増加している。現状の道路橋示方書において、飛沫帯における塩害対策は、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用し且つかぶり厚さを 70mm とすることとされている。飛沫帯に設置された BFS を用いた橋梁の暴露試験調査結果についての既報¹⁾ から、BFS を用いることにより、示方書に示されているかぶりを低減できることが予想される。本報告では、この低減されるかぶりを推定することを目的とする。

2. 試験概要

(1) 試験状況

塩害対策 S 区分の飛沫帯に位置する橋梁である屋嘉比橋は、塩害対策の一つとして BFS を使用している。1998 年の竣工以来継続的に BFS の効果確認を実施しており、現在までに竣工直後、1 年後、3 年後および 5 年後の状況確認が実施された。効果確認にあたっては、本橋の調査に加え、試験体を用いた暴露試験を実施している。本報告における試験データは、試験体を用いた暴露試験により得られたものである。

(2) 試験体配合

試験体のコンクリートの配合を表-1 に示す。配合 No. 1 と No. 2 は、主桁に使用された配合と同一である。目標強度を満足する水結合材比が高炉スラグ微粉末の使用の有無により異なるため、比較用として早強単味配合の No. 1 と水結合材比を同一とした高炉スラグ微粉末使用コンクリート No. 3 についても試験を行った。BFS の目標スランプは、施工性等を考慮して、10cm (早強単味の場合: 8cm) とした。

(3) コンクリートの養生

試験供試体の養生は蒸気養生で行った。最高温度 60℃を 6 時間保持し、温度降下後の打設後 19 時間で脱型し、材齢 49 日まで製品ヤードに保管した。その後、沖縄県大宜味村の暴露試験場に移設し、材齢 51 日より海洋環境への暴露を開始した。

(4) 試験方法

試験体は、かぶり 30mm の位置にエポキシ樹脂鉄筋が埋設された、100×100×400mm の角柱供試体であり、塩化物イオン浸透深さ方向の濃度分布を JIS A 1154 (2003.5 制定) および日本コンクリート工学協会の試験

表-1 試験体配合一覧

配合 No.	スラグ置換率 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単用量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	高炉スラグ微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 S P
1	0	40	43.5	8±2.5	2±1	160	400	---	768	1173	3.20
2	50	35	43.0	10±2.5	2±1	160	229	229	732	1143	2.29
3	50	40	43.5	10±2.5	2±1	160	200	200	762	1164	1.80

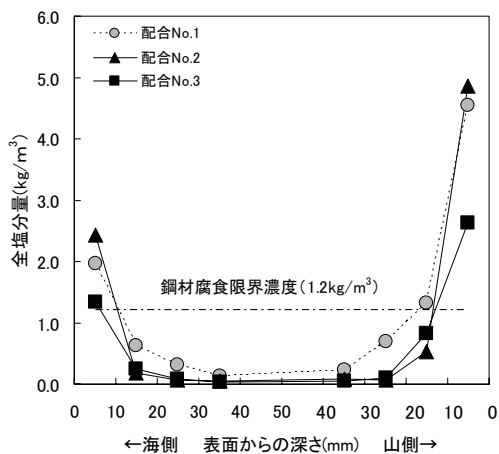


図-3 塩化物イオン濃度 (暴露5年)

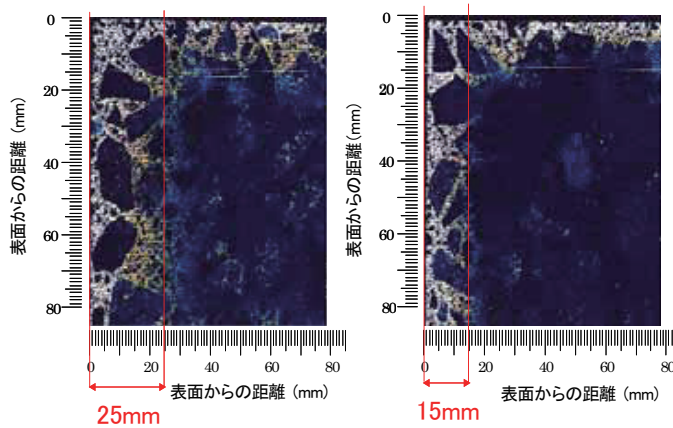


写真-1 塩化物イオン分布 (暴露5年)

方法 JCI-SC4 の塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法に準じた化学分析により測定した。また、EPMA (走査型電子顕微鏡) 分析を合わせて行った。

3. 試験結果

(1) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の化学分析結果を図-3 に示す。この結果より、3 ケースのコンクリート配合において、埋設鋼材の最小かぶり 30mm 位置の塩化物イオン量は、鉄筋腐食の限界塩化物イオン濃度 1.2kg には達していなかった。配合による塩化物イオンの浸透の違いを比較すると、表層 0-10mm の塩化物イオン濃度は、配合 No. 3 が最も高くなった。また、10mm より深い領域では、高炉スラグ微粉末を混和した配合 No. 2, 3 の塩化物イオン濃度は、概ね配合 No. 1 の半分以下となっており、高炉スラグ微粉末の混和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る結果となった。高炉スラグ微粉末の混和により表層部の表面塩化物イオン濃度が高くなる傾向や、硬化体の塩化物イオンの固定化率が高まることは、既報^{1), 2)}の通りである。BFS では、表面から浸透した塩化物イオンが表層部に留められる割合が多くなるために表面近くの塩化物イオン濃度が高くなるものと考えられる。また、配合 No. 3 より配合 No. 2 の方が表層部の塩化物イオン濃度が高くなっているのは、水結合材比が小さいほど結合材材量が多く、表層部での固定化率も高いためと推察される。また、写真-1 に示した EPMA 写真からも、BFS は早強単味配合よりも塩分浸透抑制効果が現れていることが確認できる。ここで、本試験において、海側よりも山側の方が塩分量が多いが、これは、海側からの風が山側にて吹き返される暴露環境であることが影響しているものである。

(2) 塩化物イオンの拡散係数

早強単味および BFS については、図-3 に示した全塩分濃度分布から式 (1)³⁾ を用い、最小二乗法によって見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度の値を算定した。また、比較として、普通コンクリートおよび高炉セメント B 種を用いた場合の拡散係数を、式 (2) および式 (3)⁴⁾ より算出した。

$$\text{塩化物イオン濃度} = C_0 \{ 1 - \text{erf}(X / 2\sqrt{D_d \cdot t}) \} \quad (1)$$

$$\log D_d = -3.9 (W/B)^2 + 7.2 (W/B) - 2.5 \quad (\text{普通ポルトランドセメントを使用する場合}) \quad (2)$$

$$\log D_d = -3.0 (W/B)^2 + 5.4 (W/B) - 2.2 \quad (\text{高炉セメントやシリカヒュームを使用する場合}) \quad (3)$$

ここに、 C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 X : 表面からの深さ (mm)、 t : 材齢 (年)、 D_d : 見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 W/B : 水結合材比 (%)

この結果、表-2 より、BFS の塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果を拡散係数で評価すると、同一水結合材比の配合 No.3 は、早強単味 No.1 より 2~5 割減少し、屋嘉比橋の主桁に使用された配合 No.2 では、6~7

表-2 塩化物イオン拡散係数算定結果

No.	配合条件		拡散係数Dp (cm ² /年)		備考
	結合材	水結合材比 (%)	海側	山側	
1	H	40	0.185	0.164	暴露データ
2	H+BFS (50%)	35	0.054	0.071	暴露データ
3	H+BFS (50%)	40	0.093	0.125	暴露データ
4	N	40	0.570		コンクリート標準示方書
5	高炉セメント	35	0.210		コンクリート標準示方書

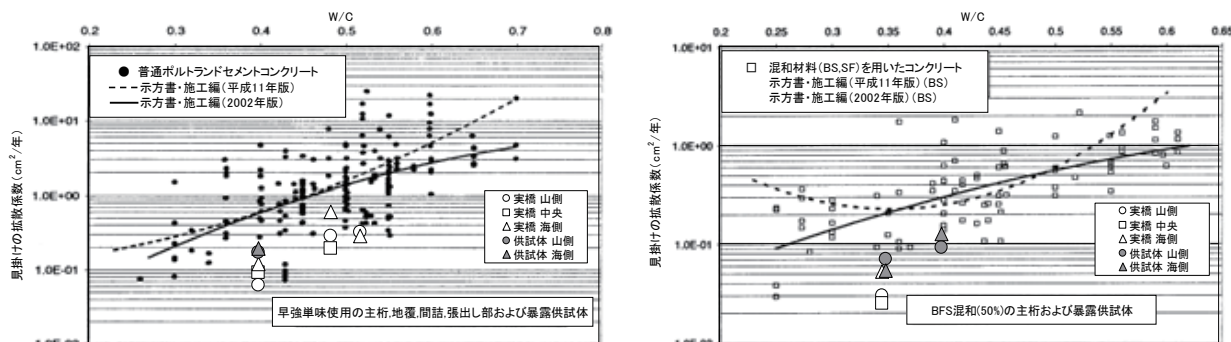


図-4 コンクリートの拡散係数 (暴露5年)

割減少した。また、図-4は、2002年版コンクリート標準示方書改訂資料⁵⁾に示されている拡散係数と本暴露試験から求めた拡散係数を比較したものであるが、今回得られた早強単味とBFSの拡散係数は、いずれも示方書に示されたものよりも低い値となっている。

4. 考察

BFSは、通常のコンクリートの約2倍のAl₂O₃を含有しており、塩分がコンクリート内部へ拡散することを抑制するフリーデル氏塩の生成量が多いことや、コンクリートの透水係数が通常のコンクリートよりも約1桁小さく、物理的な塩分浸透抑制効果があること、および高炉スラグを使用したコンクリートの酸素の拡散係数が通常のコンクリートよりも小さく、鉄筋の錆の発生抑制に寄与するといった、化学的・物理的特性を有する塩害抑制効果の高い材料である。ここで、道路橋示方書⁶⁾における塩害区分と海岸線からの距離およびかぶりの関係とコンクリート標準示方書³⁾による海岸からの距離と表面塩化物イオン量の関係を組み合わせた表-3より、表面塩化物イオン量をS区分の飛沫帯である13.0kg/m³とし、表-2に示された各配合における塩化物イオンの見かけの拡散係数および式(4)⁴⁾により、供用期間100年時点での各配合におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋素地表面の塩化物イオンの濃度とかぶりの関係を予測した。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{end}}} \right) \right) \right) \quad (4)$$

ここに、C₀: 表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)、γ_{cl}: 安全係数、t: 材齢 (年)、c: 設計かぶり (mm)、c_{ep}: エポキシ樹脂塗膜厚 (mm)、D_d: コンクリートの見掛けの拡散係数 (cm²/年)、D_{end}: エポキシ樹脂の見掛けの拡散係数 (cm²/年)

この結果、鋼材腐食限界の塩化物イオン量1.2kg/m³に達する鋼材のかぶりは、配合No.1の場合には42mmであるのに対し配合No.2は25mm、配合No.3は33mmであり、早強単味(水結合材比40%)と比較して、BFS(水結合材比35%)の場合には約0.6倍の値となり、BFS(水結合材比40%)の場合には0.8倍の値となる。道路橋示方書の塩害対策では、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する場合には早強単味において70mmのかぶりが必要であるが、上記の鋼材腐食限界に達するかぶり厚さの比から、BFSにおいては、水結合材比が35%の場合は、70mm×0.6=42mmとなり、水結合材比が40%の場合は、70mm×0.8=56mmとなる。本予測に用いた拡散係数等は、本現場での限られたデータから求めたものであり、一般的な数値として扱うことは現時点では困難であるが、傾向としては妥当なものと考えられる。このことから、早強単味配合と比

表-3 表面塩化物イオン量

道路橋示方書			コンクリート標準示方書	
かぶり	対策区分	海岸線からの距離	海岸からの距離	表面塩化物イオン量
70mm	S、I	海上部および海岸線から100mまで	飛沫帯	13.0kg/m ³
			汀線付近	9.0kg/m ³
		100mをこえて300mまで	0.1km	4.5kg/m ³
50mm	I、II	海上部および海岸線から100mまで	0.25km	3.0kg/m ³
			0.1km	4.5kg/m ³
		100mをこえて300mまで	0.25km	3.0kg/m ³
35mm	II	300mをこえて500mまで	0.5km	2.0kg/m ³
		100mをこえて300mまで	0.25km	3.0kg/m ³

較した場合、BFSを用いることにより、同レベルの塩害抑制効果を現行の基準以下のかぶりで実現できると考えられる。特に、早強単味配合の場合にエポキシ樹脂塗装鉄筋と70mmのかぶりが必要とされる条件において、早強単味配合の代わりにBFSの配合No.2(水結合材比35%)を使用した場合には、エポキシ樹脂塗装鉄筋と50mm以下のかぶりで対応できると考えられる。

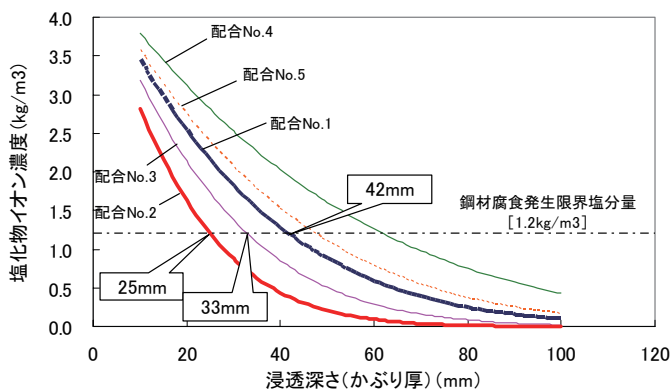


図-5 100年後の塩化物イオン濃度とかぶり位置

5. まとめ

本報告について以下にまとめる。

- ①飛沫帯における100年供用後の鋼材腐食発生限界塩分量(1.2kg/m³)到達浸透深さを、本暴露試験から予測したところ、BFSは早強単味の約0.6から0.8倍のかぶり厚さであることが確認された。
- ②飛沫帯における現行の塩害対策のかぶりである70mmを、BFSを用いることにより低減できる傾向が確認され、特に水結合材比35%の場合には、50mm以下として設計できる可能性が示された。

ただし、サンプルデータが少ない現状であるため、今後、拡散係数の精度の向上を目的として、本試験におけるデータの収集を継続する。また、水結合材比の影響等を含め、本報告物件以外の環境条件・配合によるデータについても蓄積を行いたいと考えている。

〔謝辞〕本報告を行うにあたり、「塩害に対応した高耐久性PC橋の建設に関する研究委員会」の方々に多大なるご協力を戴きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 小島孝昭, 豊福俊泰, 小林一輔: 塩害に対応した高耐久性PC構造物の建設と性能評価に関する研究, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp235-253, 2005.
- 2) 日本材料学会: 高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発, 1998.3.
- 3) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2008.3.
- 4) 土木学会: エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(改訂版), コンクリートライブラリー112, 2003.11.
- 5) 土木学会: 2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー108, 2002.3.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲ, 2002.3.