

## 高炉スラグ微粉末を適用した橋梁における長期耐久性について

(株) 安部日鋼工業 正会員 ○後藤 剣也  
 (株) 安部日鋼工業 正会員 石井 豪  
 (株) 安部日鋼工業 正会員 辛 軍青  
 (株) 安部日鋼工業 大村 一馬

### 1. はじめに

環境配慮型・低炭素材料である高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートが、塩化物イオンの浸透やASRの抑制効果に優れていることは既に報告されている<sup>1)</sup>が、それらは試験室内における非常に厳しい環境を想定した条件での暴露試験や促進試験<sup>2)</sup>によるものが多く、実際の使用環境下での長期暴露試験に関する報告は少ない。そこで、早強ポルトランドセメントのみを結合材として使用した配合(以下「早強単味」と記述する。)と、その50%を高炉スラグ微粉末6000に置換した配合(以下「スラグ置換」と記述する。)の供試体を実際のPC橋梁構造物と近い環境下に長期間暴露し、継続的に調査した。その結果、建設後数年では顕著な差は認められないが、5~10年後にかけては、早強単味供試体よりもスラグ置換供試体の方が外部からの塩分浸透に対する抑制効果が顕著である結果を得た。

本報告は塩分浸透の抑制効果を中心に報告する。

### 2. 暴露試験の現地概要

スラグ置換したコンクリートの耐久性を実証することを目的として、圧縮強度、塩分測定、中性化に関する試験を実施するために供試体を現地暴露した。

#### 2.1 橋梁位置および配合

スラグ置換したPC主桁コンクリートの耐久性を確認するために橋梁位置近辺において暴露試験用供試体を設置した。橋梁名、所在地および想定される劣化項目を表-1に、橋梁と同じ配合で製作した供試体(スラグ置換(下段))と比較用に作成した供試体の早強単味(上段)の示方配合表を表-2に示す。

表-1 想定される劣化項目

橋梁名	所在地	想定される劣化項目
1 屋嘉比橋	沖縄県	海水による塩害
2 俵山4号橋	熊本県	凍結防止剤による塩害
3 青柳橋	青森県	凍結防止剤による塩害
4 観音橋	青森県	海水による塩害

表-2 示方配合表

橋梁名	粗骨材最大寸法 Gmax (mm)	スラブ <sup>o</sup> sl. (cm)	空気量 air (%)	スラグ <sup>o</sup> 置換率 F/(C+F) (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]					
							水	セメント	高炉スラグ <sup>o</sup> 微粉末	砂	砂利	混和剤
							W	C	F	S	G	AD
屋嘉比橋	20	8±2.5	2.0±1.0	0	40	43.5	160	400	-	768	1173	3.20
	20	10±2.5	2.0±1.0	50	35	43.0	160	229	229	732	1143	2.29
俵山4号橋	20	10±2.5	2.0±1.0	0	40	43.0	160	400	-	768	1173	3.20
	20	10±2.5	2.0±1.0	50	35	43.0	160	229	229	732	1143	2.29
青柳橋	20	10±2.5	4.5±2.5	0	37	38.9	146	395	-	694	1101	3.16
	20	10±2.5	4.5±2.5	50	37	41.7	142	192	192	746	1056	2.50
観音橋	20	8±2.5	4.5±2.5	0	37	39.0	146	395	-	694	1101	2.17
	20	10±2.5	4.5±2.5	50	34	41.1	142	209	209	723	1048	2.51

## 2.2 現地の状況

### (1) 屋嘉比橋 (沖縄県) <sup>3)</sup>

橋梁位置は沖縄県国頭村田嘉里川河口の東シナ海に面した場所で平成10年に竣工した。橋長59.826mのポストテンション方式2径間単純中空床版橋である。暴露試験用供試体の設置位置は、橋梁位置の南西約10kmにある北部国道事務所の海沿いの暴露試験場とした。橋梁位置および供試体設置場所は、道路橋示方書「塩害に対する検討」の対策区分Sである。(写真-1)

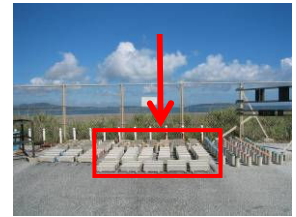


写真-1 暴露試験場

### (2) 俵山4号橋 (熊本県) <sup>4)</sup>

熊本県熊本市と高森町を結ぶ主要地方道熊本高森線に架かる橋長15.0mのプレテンション方式単純中空床版橋で平成11年に竣工した。阿蘇郡九木野村の俵山北川標高480mの高所に位置しているために冬季は凍結防止剤が散布される。暴露試験用供試体は橋面排水が流れ込む集水枳の中へ設置した。(写真-2)



写真-2 俵山4号橋

### (3) 青柳橋 (青森県)

青森県弘前市の主要道である県道28号線に架かる橋長37.8mのポストテンション方式単純合成桁橋(PCコンボ橋)で、海拔45mに位置し平成13年に竣工した。暴露試験用供試体の設置場所は橋台付近の道路面より数m下にあり、道路面に散布される凍結防止剤を含んだ融雪水が通行車両によって供試体に降りかかる状況である。(写真-3)



写真-3 青柳橋

### (4) 観音橋 (青森県)

国道101号線に架かる橋長21.13mのプレテンション方式単純中空床版橋で、海拔2mに位置し平成16年に竣工している。供試体は橋梁下側に設けた鋼製のガゴに入れて設置している。青森県の日本海側に位置し対策区分はSである。

(写真-4)



写真-4 観音橋

## 3. 耐久性確認試験結果

### 3.1 圧縮強度 (円柱供試体: φ100×200)

圧縮強度試験結果を表-3および図-1に示す。材齢に伴い圧縮強度も増加していることが分かる。スラグ置換(H+BFS)と早強単味(H)を比較すると、スラグ置換の方が圧縮強度が高い結果を得た。「青柳橋:暴露後10年」において、スラグ置換と早強単味との比は1.2程度である。従来から高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは長期強度の増加が大きいという特性は知られており、今回の試験結果からも同様の特性を確認できた。

表-3 圧縮強度表

	配合	スラグ置換率 (%)	水結合材比 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
				製品桁と同一養生		暴露後			
				脱枠時	28日	1年	3年	5年	10年 <sup>*)</sup>
1 屋嘉比橋	H 40%	0	40	41.0	55.4	54.6	58.0	63.4	60.7
	H+BFS 35%	50	35	42.7	57.3	74.9	72.7	77.8	76.8
2 俵山4号橋	H 40%	0	40	35.7	55.6	65.2	-	-	78.4
	H+BFS 35%	50	35	41.5	64.1	74.8	-	-	84.4
3 青柳橋	H 37%	0	37	39.2	60.0	65.3	-	67.9	69.6
	H+BFS 37%	50	37	31.0	60.0	74.7	-	82.3	85.0
4 観音橋	H 37%	0	37	37.3	63.0	70.7	74.1	78.2	-
	H+BFS 34%	50	34	47.7	64.9	75.1	75.7	79.1	-

\*注1 屋嘉比橋は暴露後11年のデータを使用した。

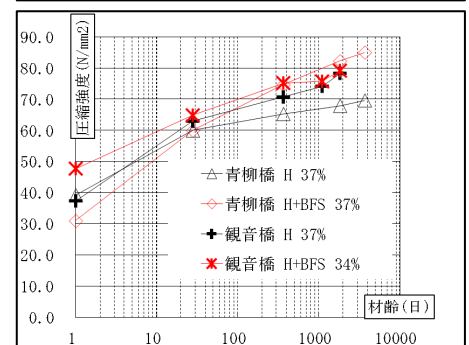
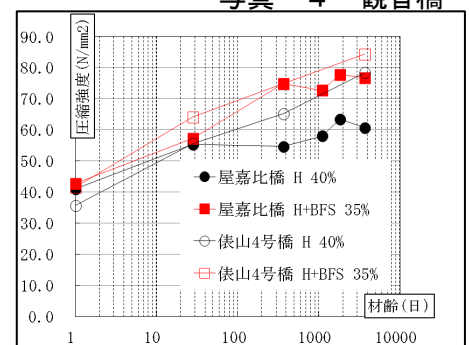


図-1 圧縮強度グラフ

### 3.2 塩分浸透試験 (角柱供試体：□100×100×400)

#### (1) 屋嘉比橋 (沖縄県)

暴露試験5, 11年後における塩分浸透状況を調査するためにEPMA (電子線マイクロアナライザー) によって測定した塩分濃度分布結果を写真-5~8に示す。写真中の白色部分は塩分濃度が高いことを表す。

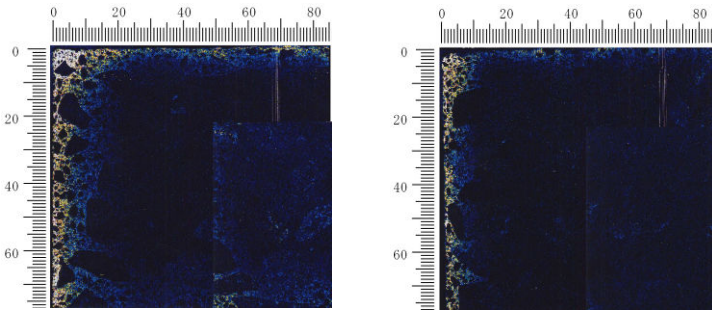


写真-5 早強単味 5年後      写真-6 スラグ置換 5年後

暴露試験11年後の早強単味における浸透深さは下面40mm, 側面30mm, スラグ置換の浸透深さは下面20mm, 側面20mm程度である。

写真-7と写真-8をそれぞれ比較する。写真-7においては、塩分濃度が高いことを示す白色部分はコンクリート表面からの距離は短いものの、色が薄い範囲は中央部付近まで及んでおり塩分浸透が中央部付近まで達していることが分かる。写真-8においては白色部分のコンクリート表面からの距離は写真-7よりも長い、隣接する色が薄い範囲はコンクリート表面付近で止まっている。これはスラグ置換は表面付近で塩分浸透を抑制している結果で、表面付近の塩分濃度は高いが中央部は塩分浸透がないことを表している。

次に表層0~10mm, 10~20mm, 20~30mm, 30~40mmに区分し、化学分析により塩分量を測定した結果を図-2に示す。(グラフ中の<海側><山側>は、角柱供試体□100×100×400における、100×400の長方形面の方向である。)

表層0~10mmの位置はスラグ置換による若干の差異がある。これはスラグ置換は早強単味と比較して細孔が小さいために塩分浸透が抑制され、表面付近に塩分が滞留する結果、塩分量が大きくなるためである。表層20~30mmの位置における施工5年後の全塩分量は早強単味, スラグ置換共に20mmを超えた位置では非常に少ないものの、施工11年後における早強単味の全塩分量は非常に多く、早強単味とスラグ置換との差異が顕著に表れていることが分かる。早強単味の表層20mm位置では、全塩分量の鋼材腐食限界値である1.2kg/m<sup>3</sup>を超過する結果を得た。しかし、同位置におけるスラグ置換では鋼材腐食限界値は超過しなかった。

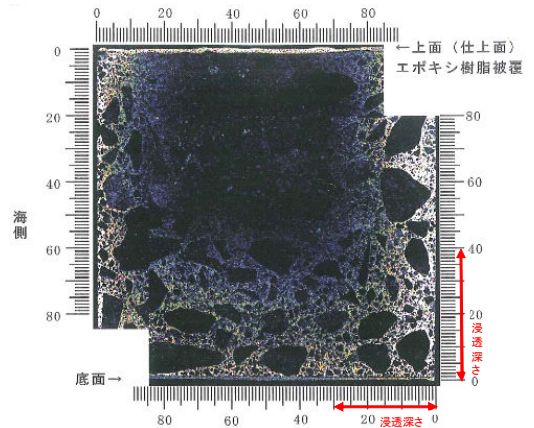


写真-7 早強単味 11年後

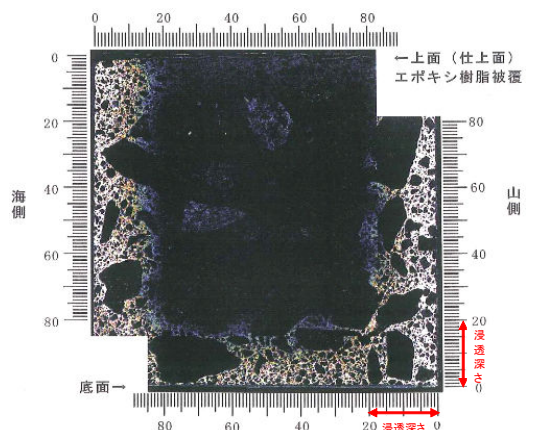


写真-8 スラグ置換 11年後

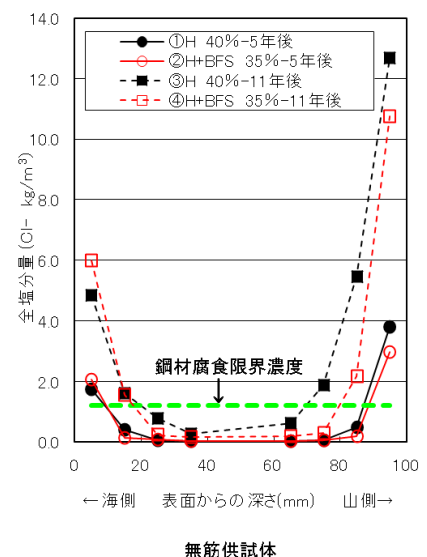


図-2 全塩分量(屋嘉比橋)

(2) 俵山4号橋 (熊本県)

暴露試験10年後の塩化物イオン量におけるグラフを図-3に示す。上述と同様に、スラグ置換の方が早強単味よりも塩化物イオン濃度は低い。表面から20mmの位置ではスラグ置換は0.001%，早強単味は0.007%という結果から、塩分浸透に対する抑制効果が確認できる。

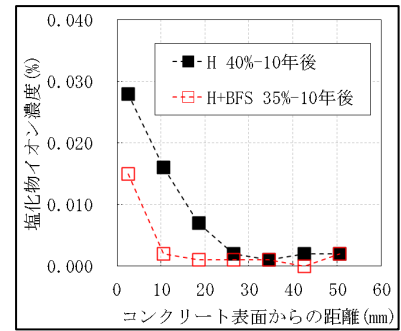


図-3 塩化物イオン量(俵山4号橋)

(3) 青柳橋-観音橋 (青森県)

図-4に青柳橋，図-5に観音橋の結果を示す。図-4からコンクリート表面からの距離が15mm以上は早強単味よりもスラグ置換の方が小さな値を示し高い遮蔽性能を有する結果を得た。

図-5から中央付近においてはスラグ置換の方が塩分浸透が少ない結果を得た。

3.3 中性化試験 (角柱供試体：□100×100×400)

高炉スラグ微粉末6000を使用することにより高炉セメントと同様な中性化の影響が懸念されたので、「JIS A 1152コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じた試験も実施した。屋嘉比橋に関する暴露試験用供試体による試験結果のみ表面部分の1mm程度の部分だけが中性化された結果を得たが、他の橋梁における早強単味とスラグ置換ともに、供試体からは中性化の進展がない結果を得た。

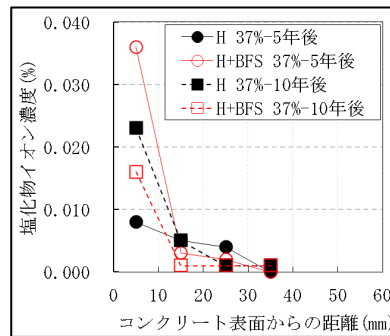


図-4 塩化物イオン量(青柳橋)

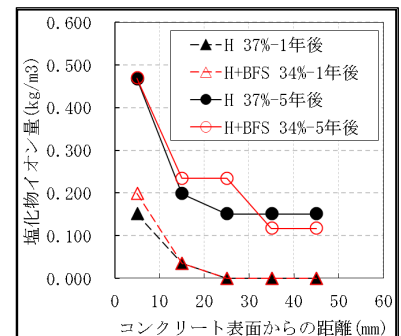


図-5 塩化物イオン量(観音橋)

4. まとめ

本稿における耐久性試験結果についてまとめると、

- (1) 現地暴露後10年経過した供試体は、環境の影響を受けることなくスラグ置換は早強単味よりも圧縮強度が高い結果を得た。
- (2) コンクリート表面から内部への塩分浸透に関しては、早強単味配合よりもスラグ置換配合の方が高い遮蔽性能が得られ、現地暴露後5~10年にかけて顕著になった。また、高い遮蔽性能はコンクリート表面より10~20mmの位置で確認できた。
- (3) 高炉スラグ微粉末6000を使用することにより高炉セメントと同様な中性化の影響が懸念されたが、現地暴露後10年経過した供試体による中性化試験結果の中で、屋嘉比橋に関しては表面から1mm程度の部分が中性化された結果を得た。他の橋梁においては中性化の進展がない結果を得た。

[謝辞]本試験を行うにあたり、多大なご指導、ご協力をいただきました、「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、九州大学ならびに金沢大学の関係者各位に、紙面をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1)石井豪, 松山高広, 大村一馬, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を混合したPC梁部材のASR抑制効果と劣化挙動について, プレストレストコンクリート技術協会 第20回シンポジウム論文集, pp.1-4, 2011.10
- 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) 石井豪, 豊福俊泰, 前田悦孝, 松山高広: 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, プレストレストコンクリート技術協会 第17回シンポジウム論文集, pp.111-114, 2008.11
- 4)佐川康貴, 高鳴笛, 中原晋, 江崎守: 材齢10年を経過した高炉スラグ微粉末6000置換コンクリートの強度および塩分浸透抵抗性, プレストレストコンクリート技術協会 第19回シンポジウム論文集, pp.197-200, 2010.10