

## 塩害を受けた橋梁補修における断面修復の対策効果に関する検討

川田建設(株) 工事総括部技術開発部 ○正会員 渡辺耕平  
 川田建設(株) 工事総括部技術開発部 正会員 高橋 功

### 1. はじめに

海岸地域に建設されたプレストレストコンクリート(以下、PC)橋において、塩害による劣化が問題視され補修が行われてきている。塩害を受けたPC橋の補修方法としては、損傷が顕在化した箇所を除去し、断面修復を行い、塩分の浸透を防ぐため表面塗装が主に実施されている<sup>1)</sup>。しかし、補修後に比較的短期間で補修部やそれ以外の箇所が劣化した事例<sup>2)</sup>もある。このうち、未補修部の劣化は、電位差によるマクロセル腐食も1要因として考えられている。

この再劣化を防止するため、鉄筋を腐食させる塩化物イオン濃度量以上のコンクリートを広範囲にはつり取り、断面修復をする方法などが採用されるようになってきた<sup>3)</sup>。また、断面修復材には、防錆効果が期待できる亜硝酸塩などの防錆剤を利用したり、補修部に拡散してくる塩化物イオン(以下、Cl<sup>-</sup>)を吸着するような物質を含む材料が開発<sup>4)</sup>され、適用する事例もでてきている。このように、再劣化に関しては、様々な方法で有効かつ効果的・効率的な対策が試みられているのが現状である。

そこで、本実験は、上記で述べた材料を使用した時の劣化のメカニズムを検証するため、劣化条件や材料条件を変えて長期暴露試験を行った。ここでは、自然電位の経時測定結果をもとに、実験開始5ヶ月後の対策効果を整理して報告するものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験諸元

試験体は、コンクリート内に潜在する残存塩分に着目した残存塩分混入試験体(以下、シリーズ1試験体)と飛来塩分濃度差に着目した塩水供給試験体(以下、シリーズ2試験体)を製作した。表-1に実験諸元一覧を示す。

シリーズ1試験体はCl<sup>-</sup>を含んだコンクリートに断面修復を部分的に行ったものを想定しており、条件としてコンクリートに含有しているCl<sup>-</sup>を1.2kg/cm<sup>3</sup>、4.8kg/cm<sup>3</sup>の2種類とした。また、シリーズ2試験体は断面修復材に部分的に過大な塩分が供給された場合を想定し、塩水(10%のNaCl溶液を27.7g/dm<sup>2</sup>)を試験体半面に刷毛にて2回/月の散布を行った。暴露環境はシリーズ1、シリーズ2試験体ともに室温20℃湿度70%の恒温恒湿室とした。

表-1 実験諸元一覧

	シリーズ1	シリーズ2
	残存塩分混入試験体	塩水供給試験体
塩分供給量	Cl <sup>-</sup> =1.2kg/m <sup>3</sup> , Cl <sup>-</sup> =4.8kg/m <sup>3</sup>	10%NaCl溶液(27.7g/dm <sup>2</sup> ) 2回/月
暴露環境	室温20±2℃ 湿度70±2% 恒温恒湿室	
塩分供給範囲	各種補修材(塩分供給無し) ← → 各種補修材 ← → Cl <sup>-</sup> =1.2, 4.8kg/m <sup>3</sup> 混入コンクリート → → ← → D13鉄筋 → →	各種補修材 ← → 塩分供給無し → → 塩分供給側 → → ← → D13鉄筋 → → ← → 10%塩水散布面

#### 2.2 試験体諸元

図-1にシリーズ1試験体の形状を示す。シリーズ1は、補修材と塩分混入コンクリート(以下、母材コンクリート)に分割したものである。鉄筋は、かぶり20mmの位置にD13を補修材と母材コンクリートを貫通させた鉄筋(以下、貫通鉄筋)と分割した鉄筋(以下、分割鉄筋)の2本を配筋した。分割鉄筋を配置した理

由は、貫通鉄筋による腐食および電位の影響を評価するためである。試験体製作手順は、補修材を先に打設し、7日養生後母材コンクリートの打設を行った。

シリーズ2試験体の形状を図-2に示す。鉄筋はかぶり20mmの位置に腐食のばらつきを考慮して2本を配筋した。塩水散布は、含水率を安定させるため6ヶ月間気中で養生した後実施した。

2.3 試験体条件

断面修復材は、市販のセメント系のものを単独に使用したものと、防錆剤として亜硝酸リチウムおよび塩分吸着材を断面修復材に混入したもので行った。ここで、塩分吸着材は、通常断面修復材に混入せず、直接鉄筋周辺にペーストやモルタルとして塗布するが、今回は練り混ぜ時に混和剤として混入し、試験体全体に供給した。これは、補修材全体で塩分を吸着させることにより、一層の塩分抑制効果を期待したものである。

シリーズ1試験体の12体の種類を表-2(a)に示す。A-O-Oは、防錆材として亜硝酸塩を混入させたものであり、Cl<sup>-</sup>1.2kg/m<sup>3</sup>に対してNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>モル比0.5:1, 1:1, 2.5:1とした。B-O-Oは断面修復材を単独で使用したものである。また、C-O-Oは塩分吸着材を混入させたものであり、ポンプ圧送による断面修復施工が可能なフロー値から、Cl<sup>-</sup>1.2kg/m<sup>3</sup>に対してNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>モル比0.25:1, 0.5:1の2種類とした。

母材コンクリートは、PC桁を想定し、設計基準強度を50N/mm<sup>2</sup>、水セメント比を35%とした。母材コンクリートの配合条件を表-2(b)に示す。

シリーズ2試験体のパラメータを表-2(c)に示す。試験体種類はシリーズ1と同様に3種類の材料で行い、A-O-OはCl<sup>-</sup>1.2kg/m<sup>3</sup>に対してNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>モル比1:1, 2.5:1の2種類、B-O-Oは1種類、C-O-OはCl<sup>-</sup>1.2kg/m<sup>3</sup>に対してNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>モル比0.5:1, 1:1の2種類の計5体とした。

2.4 鉄筋腐食の経時計測

鉄筋の腐食は、自然電位を計測することにより判断した。ここで、自然電位の照合電極は飽和硫酸銅電極を用いた。図-3に示す通り計測位置は、貫通鉄筋においては25mm間隔で19点とし(記号はSa-1, Sa-2...とする)、そして分割鉄筋においては、中心から左右25mmの点を1点目として、25mm間隔で18点の計測を行った。また、自然電位の経時計測は、1ヶ月に1回(記号を1M, 2M...とする)実施した。

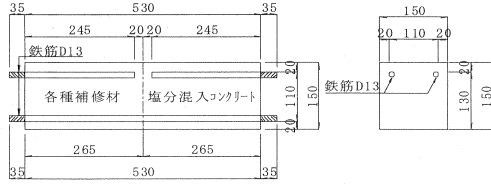


図-1 シリーズ1試験体形状

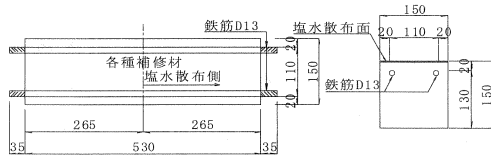


図-2 シリーズ2試験体形状

表-2 材料諸元一覧

(a) シリーズ1補修材

試験体 No	補修材			塩分混入量 (kg/m <sup>3</sup> )
	補修内容	塩分抑制効果	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	
B-0-1.2	断面修復材	-	-	1.2
A-0.6-1.2	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =0.6kg/m <sup>3</sup>	0.5:1	
A-1.2-1.2	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =1.2kg/m <sup>3</sup>	1:1	
A-3.0-1.2	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =3.0kg/m <sup>3</sup>	2.5:1	
C-0.3-1.2	塩分吸着材	Cl <sup>-</sup> =0.3kg/m <sup>3</sup>	0.25:1	
C-0.6-1.2	塩分吸着材	Cl <sup>-</sup> =0.6kg/m <sup>3</sup>	0.5:1	4.8
B-0-4.8	断面修復材	-	-	
A-0.6-4.8	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =0.6kg/m <sup>3</sup>	0.5:1	
A-1.2-4.8	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =1.2kg/m <sup>3</sup>	1:1	
A-3.0-4.8	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =3.0kg/m <sup>3</sup>	2.5:1	
C-0.3-4.8	塩分吸着材	Cl <sup>-</sup> =0.3kg/m <sup>3</sup>	0.25:1	0.25:1
C-0.6-4.8	塩分吸着材	Cl <sup>-</sup> =0.6kg/m <sup>3</sup>	0.5:1	

(b) シリーズ1母材コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Slump (cm)	σ <sub>ck</sub> <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
15	35	43.0	4.5	10.0	50

(c) シリーズ2補修材

試験体 No	補修材			塩水供給量
	補修内容	塩分抑制効果	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	
B-0-10	断面修復材	-	-	NaCl/w10% (27.7g/dm <sup>2</sup> )
A-1.2-10	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =1.2kg/m <sup>3</sup>	1:1	
A-3.0-10	亜硝酸塩	Cl <sup>-</sup> =3.0kg/m <sup>3</sup>	2.5:1	
C-1.2-10	塩分吸着材	Cl <sup>-</sup> =1.2kg/m <sup>3</sup>	1:1	
C-0.6-10	塩分吸着材	Cl <sup>-</sup> =0.6kg/m <sup>3</sup>	0.5:1	

試験体Noの※は、セメント内添型塩分吸着材を示す。



※ シーズ1,2の貫通鉄筋はSa-1~19, シーズ1の分割鉄筋はSb-1~9, Sbr-11~19

図-3 計測位置図

3. 測定結果および考察

3.1 シリーズ1試験体

隣接する測点の電位差が顕著に現れる塩分供給の境界面付近(Sa-7~Sa-13)の自然電位に着目し、5M 測定結果および貫通鉄筋と分割鉄筋の自然電位差から腐食抑制効果について検討を行う。

図-4は母材コンクリートにCl=1.2kg/m<sup>3</sup>を混入した各試験体の自然電位計測結果である。5ヶ月後の暴露状態では、防錆剤を混入した各試験体は、自然電位がほぼ一定の値を示している。しかし、断面修復材のみのB-0-1.2試験体は、母材コンクリートと補修材の境界付近で電位が、若干卑の方向に傾いている。表-3のASTM<sup>5)</sup>の評価によると、全ての試験体で鉄筋腐食がまだ生じていないと判断される。

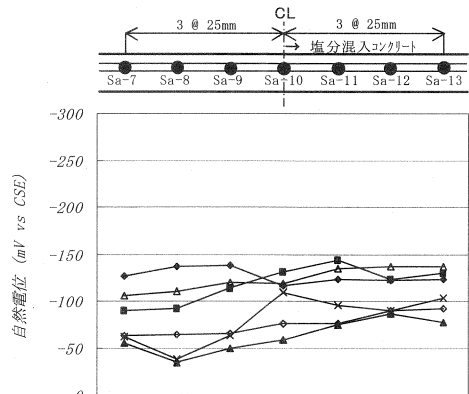
図-5は母材コンクリートにCl=4.8kg/m<sup>3</sup>を混入した各試験体の自然電位計測結果である。母材コンクリート部分の自然電位は、Cl=1.2kg/m<sup>3</sup>と異なり-200mV~-270mVの値を示している。表-3のASTM<sup>5)</sup>の評価によると、母材コンクリート側は腐食の可能性がではじめたと言える。

これに対し、補修材側は-200mVより貴な電位となっており腐食の可能性は小さい。しかし、補修部と未補修部には電位の勾配が生じており、母材コンクリートと補修材の間で電流が流れている。各試験体の違いとしては、自然電位の勾配がC試験体で最も緩やかになり、続いてA試験体、B試験体の順番になった。ここで、貫通鉄筋による腐食および電位の影響が生じているかを分割鉄筋との自然電位の関係から比較してみる。図-6は分割鉄筋と貫通鉄筋の自然電位分布の関係である。分割鉄筋で-100mVより卑な電位を示した場合、貫通鉄筋でもほぼ同等の値となるが、-100mVより貴な電位を示しても、貫通鉄筋では-100mVより卑な値を示している。この領域は、母材コンクリートの自然電位の影響を受けていると考えられる。

そこで各試験体のSa-9における貫通鉄筋と分割鉄筋の電位を比較した結果を図-7に示す。防錆剤を使用したA、C試験体の貫通鉄筋では、母材コンクリート側の電位の影響を受けていることがわかる。防錆剤を使用した場合、鉄筋が腐食していなくても、自然電位の値では腐食の可能性があると思われる。これに対しB試験体は、母材コンクリートの自然電位の影響を受けていないので、補修部が正しい電位

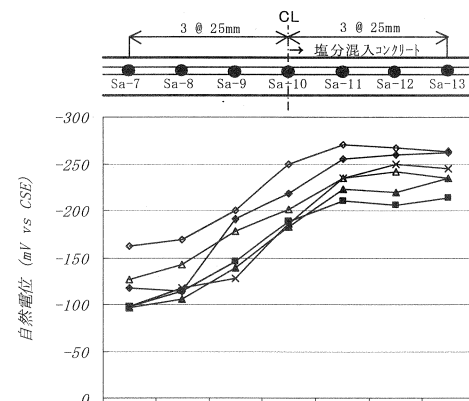
表-3 ASTM C 876<sup>5)</sup>による腐食性評価

自然電位 E (mV vs CSE)	鉄筋腐食の可能性
-200 < E	90%以上の確率で腐食なし
-350 < E ≤ -200	不確定
E ≤ -350	90%以上の確率で腐食あり



	Sa-7	Sa-8	Sa-9	Sa-10	Sa-11	Sa-12	Sa-13
◆ A-0.6-1.2	-126	-137	-138	-116	-123	-122	-123
▲ A-1.2-1.2	-55	-35	-50	-59	-75	-86	-77
■ A-3.0-1.2	-90	-92	-114	-131	-144	-123	-130
× B-0-1.2	-62	-38	-63	-109	-95	-90	-104
◇ C-0.3-1.2	-63	-64	-66	-76	-76	-90	-92
△ C-0.6-1.2	-106	-110	-119	-118	-134	-137	-137

図-4 自然電位結果(Cl=1.2kg/m<sup>3</sup>試験体)



	Sa-7	Sa-8	Sa-9	Sa-10	Sa-11	Sa-12	Sa-13
◆ A-0.6-4.8	-117	-114	-191	-218	-255	-260	-262
▲ A-1.2-4.8	-96	-106	-139	-183	-223	-220	-234
■ A-3.0-4.8	-98	-114	-146	-188	-210	-206	-214
× B-0-4.8	-98	-117	-128	-186	-234	-249	-245
◇ C-0.3-4.8	-162	-169	-200	-250	-270	-267	-263
△ C-0.6-4.8	-126	-143	-178	-201	-235	-241	-235

図-5 自然電位結果(Cl=4.8kg/m<sup>3</sup>試験体)

を示すことになる。

3.2 シリーズ2 試験体

図-8にシリーズ2 試験体の塩水散布5ヶ月後の自然電位結果を示す。シリーズ2 試験体は補修材のみで作成しているため、材料条件の差が顕著に自然電位に現れている。防錆剤を使用していないB-0-10 試験体は、最も卑な電位を示し、塩分を塗布していないSa-8 点から-200mV より卑になっている。これは、図-7の結果から判断してCl<sup>-</sup>の拡散の影響を受けていると考えられる。

防錆剤として亜硝酸塩を供給したA 試験体は、つぎに卑な電位を示しており、防錆剤混入量の多いA-3.0-10 試験体の方が卑となった。自然電位の結果からは、防錆剤の混入量が多くても防錆効果に違いが現れていない。今後さらに経時計測を進め混入量の違いについて確認をする。

塩分吸着材を混入したC-0.6-10 試験体は、塩分供給の有無による自然電位の勾配が発生していない。これは、Cl<sup>-</sup>の拡散により吸着効果を失われてきている可能性もあるが、図-7の結果から判断すると、塩分供給側の電位の影響を受けているとも考えられる。これについても、今後の経時計測から確認をする。

4. まとめ

- ① 補修材は、残存塩分量の影響を受けるが防錆剤を使用した場合、貫通鉄筋では自然電位が正しい値を示さない可能性がある。
- ② 自然電位の計測結果では、亜硝酸塩や塩分吸着材の防錆剤を混入した断面修復材は、未混入の材料より鉄筋腐食に対して効果があった。

材料条件の違いが、まだ明確に現れていないため、今後さらに経時計測を行っていく。

参考文献

- 1) 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説：昭和 59 年 2 月, (社)日本道路協会
- 2) PC 橋の耐久性向上マニュアル：(社)プレストレストコンクリート技術協会, 平成 12 年 11 月
- 3) 岡井賢一・森山守・登坂知平・小澤郁夫：塩害を受けた橋りょう上部工の全面修復―北陸自動車道 手取川橋―コンクリート工学, Vol34, No2 pp33-42, 1996. 2
- 4) 堀孝廣・山崎聡・樹田佳寛：防錆モルタルに関する研究, コンクリート工学論文集第5 巻, pp. 89-97, 1994. 1
- 5) ASTM C876 : Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete

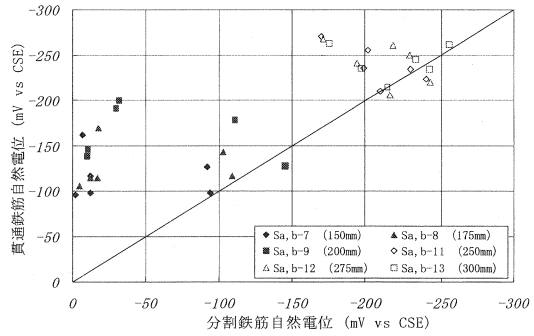


図-6 貫通鉄筋と分割鉄筋の自然電位分布

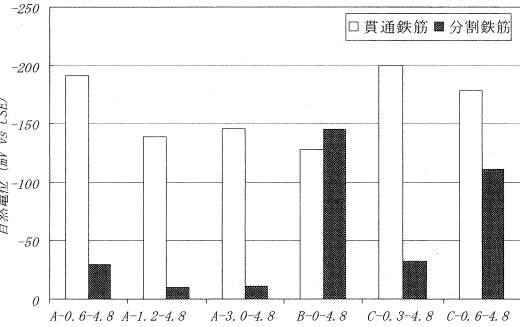


図-7 貫通鉄筋と分割鉄筋の自然電位差 (Sa-9)

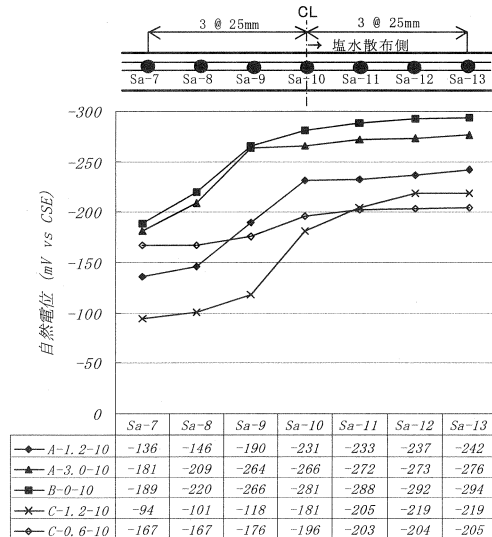


図-8 自然電位結果(シリーズ2 試験体)