

論文 補修工法による鉄筋コンクリート構造物の劣化特性及び補修性能評価に関する暴露実験

金武漢*1・金容魯*2・金載桓*3・曹俸碩*3

要旨：本研究では、補修材料・工法の性能評価方法及び品質管理基準の確立に必要な基礎資料を得ることを目的とし、韓国で数多く用られている補修材料・工法を適用した暴露試験体を作製し、海岸及び一般大気環境下で暴露実験を行った。材齢 18 ヶ月まで、暴露試験体に対して外観観察及び自然電位の測定を実施した結果、一部の補修材料・工法の表面被覆材及び断面修復材において、微細ひび割れ、膨れ剥離、補修境界部位のひび割れ及び補修部位と非補修部位の電位差の発生が認められた。今後、持続的な研究を通じて定量的な補修材料・工法の性能評価方法及び品質管理基準の確立に必要な基礎資料を得ることが可能であると考えられる。

キーワード：暴露実験、補修材料・工法、性能評価、外観観察、自然電位、表面被覆材

1. はじめに

近年、韓国では、塩害及び中性化などによる鉄筋コンクリート構造物の劣化に関する報道がさかんになって、社会問題化されている。この問題を解決するため、補修材料及び工法が開発されており、新工法、新技術などが用られつつある^{1), 2), 3)}。

しかしながら、韓国の補修材料及び補修施工業界の現状を調べてみると、補修材料及び工法の選定に必要な規格、規準などが、十分に整備されているとはいえない状況である。また、多種多様な補修材料・工法において、それらの性能評価方法及び品質管理基準などを明確に設定する必要がある。

このような背景から、本研究は、韓国の補修材料・工法の性能評価方法及び品質管理基準の確立に必要な基礎資料を得ることを目的とし、新技術などによってその有効性が確認されつつある補修材料・工法を適用した試験体を海岸及び一般大気環境下で暴露し、外観観察及び自然電位などを検討・分析したものである。

2. 実験計画及び方法

2.1 暴露実験計画

本研究の実験要因及び水準を表-1に、補修工法システムの概要を図-1に示す。本暴露実験に適用した補修工法は、最近、韓国で代表的なものとして用いられている5社のシステム化されたものを選定した。暴露実験における暴露材齢は、60 ヶ月まで設定されており、非破壊調査は暴露してから

表-1 実験要因及び水準

W/C	要 因	水 準
0.60	暴露環境	海岸及び一般大気環境
	補修工法の種類	5 種類
	内在塩化物イオン量	0, 2.4kg/m ³
	防せい剤	処理, 無処理

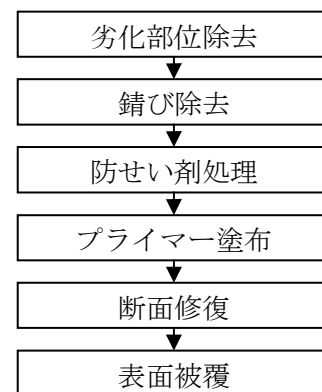


図-1 補修工法システムの概要

6, 12, 18, 24, 36, 48 及び 60 ヶ月に実施することにした。本稿では、暴露材齢 18 ヶ月までの実験結果について報告する。

2.2 コンクリートの調合及び使用材料

基材コンクリートの作製に用いた材料を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。セメントは1種普通ポルトランドセメント、細骨材は最大寸法5mmの海砂、粗骨材は最大寸法20mmの砕石、鉄筋

*1 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 建設材料・施工学研究室 工博・教授

*2 大韓民国 大林産業(株) 技術研究所 建築研究志願チーム 主任研究員

*3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 建設材料・施工学研究室

表-2 使用材料の物理的性質

使用材料	物 理 的 性 質
セメント	普通ポルトランド(密度: 3.15)
細骨材	海砂, (粒径:5mm, 密度:2.57, F.M.:2.85)
粗骨材	砕石, (粒径:20mm, 密度:2.65, F.M.:6.50)
鉄筋	D13 異形鉄筋
NaCl	1級試薬, 純度99%

表-3 コンクリートの調合

W/C	目標 スランプ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位重量(kg/m³)		
				セメント	細骨材	粗骨材
0.60	18±1	48	186	310	830	931

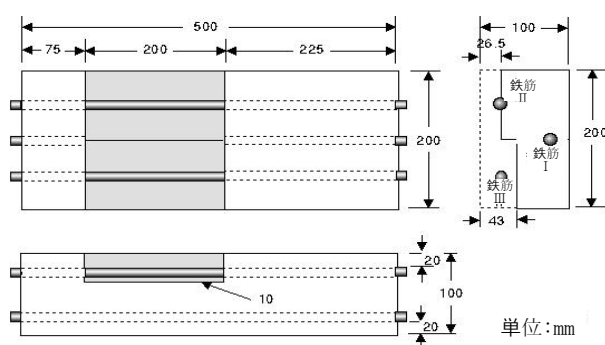


図-2 暴露試験体の形状及び寸法

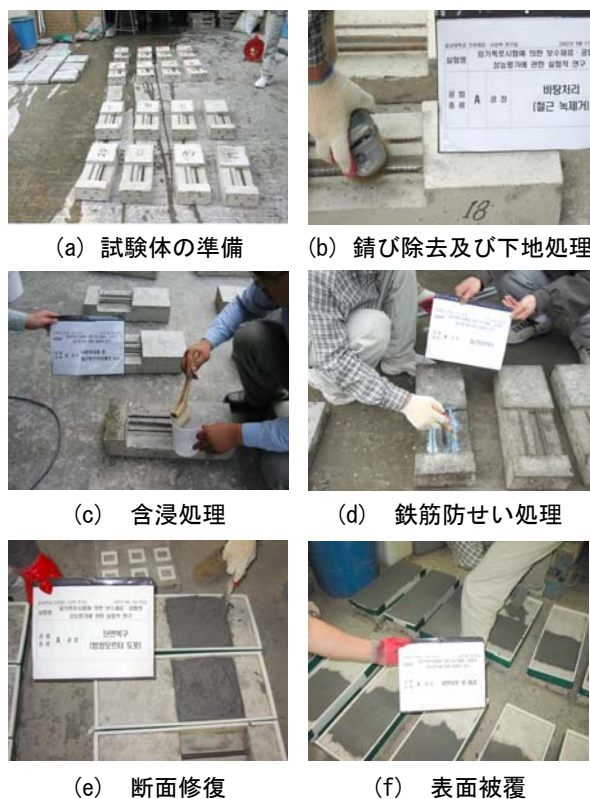


写真-1 補修材料及び工法システムの補修施工

は D13mm の異形鉄筋を使用した。また、コンクリートの内在塩化物量を調節するため、純度 99%の NaCl 1 級試薬を使用した。

表-4 補修材料・工法システムの補修工程

補修工程		補修材料・工法の種類				
		A	B	C	D	E
1	錆び除去及び下地処理	○	○	○	○	○
2	含浸材塗布		○	○	○	
3	鉄筋防せい処理	○	○	○	○	○
4	断面修復	○	○	○	○	○
5	下地調整	○				
6	表面被覆処理	○	○	○	○	○



(a) 海岸環境

(b) 一般大気環境

写真-2 暴露実験場所

2.3 暴露試験体の作製方法

基材コンクリート試験体の形状及び寸法を図-2に示す。発泡スチロールを埋入して、補修部位となる断面欠損部位を設けた。また、コンクリート内の埋入鉄筋の場合、健全部位としてコンクリート内に完全に埋められている状況を想定した鉄筋Ⅰ、鉄筋全体が露出されている状況を想定した鉄筋Ⅱ、鉄筋の一部分が露出されている状況を想定した鉄筋Ⅲの計3本の鉄筋を設けた^{4), 5)}。

2.4 補修材料・工法の概要及び施工方法

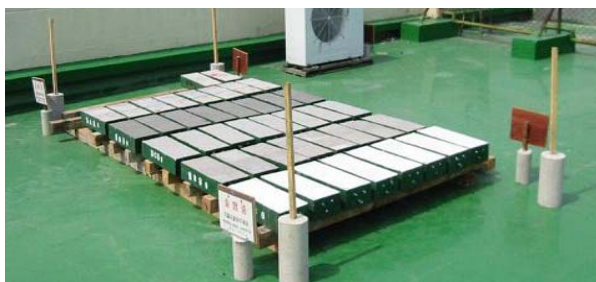
写真-1に補修施工の状況を示す。本暴露実験で用いた補修材料・工法は、表-4のように各製造・生産業体別示方書に準じて実施した。つまり、下地処理及び鉄筋の錆び除去、含浸材塗布、鉄筋防せい処理、断面修復、下地調整及び表面被覆処理工程の順で行った。

2.5 海岸及び一般大気環境暴露状況

海岸環境暴露実験場は写真-2(a)に示すように海岸から 100m 程度離れており、飛来塩分の影響を多く受けると予想される場所として設定した。また、一般大気環境暴露実験場の場合は、写真-2(b)に示すように内陸にある構造物の屋上であり、飛来塩分の影響を受けない場所に設定した。海岸及び一般大気環境での暴露状況を写真-3に示す。



(a) 海岸環境



(b) 一般大気環境

写真-3 暴露状況

表-5 試験体の測定時期及び測定項目

測定時期	測定部位	測定項目
暴露前	表面被覆	写真, 附着強度
	断面修復材	附着強度, 圧縮強度, 曲げ強度
暴露中	表面被覆	写真, 白化, 剥落, 膨れ, ひび割れ
	断面修復材	ひび割れ, 膨れ, 剥離
	コンクリート	ひび割れ, 膨れ, 剥離
	鉄筋	錆び汁流出, 電位差
暴露後	表面被覆	写真, 白化, 剥落, SEM, 膨れ, ひび割れ, 附着強度
	断面修復材	中性化, 写真, 膨れ, 剥離, 塩化物量
	コンクリート	中性化, 写真, 膨れ, 剥離, 塩化物量
	鉄筋	中性化, 腐蝕面積率, 重量減少率, 電位差

暴露試験体は雨水及び日照などの環境的要因による影響を大きく受ける条件である。また、試験体の台として木材を使用し、試験体の下面を暴露試験場の底面から 20cm 離して設置した。

2.6 測定項目及び方法

暴露試験体の測定時期及び測定項目を表-5 に、測定項目と評価等級を表-6 に示す。試験体の評価は暴露前、暴露中、暴露後に行った。また、暴露中の試験体の測定は、表面被覆材、断面修復材、コンクリート及び鉄筋の 4 部分で、暴露開始後 6、12 及び 18 ヶ月に実地し、今後、24、36、48 及び 60 ヶ月に実施の予定である。

暴露中の定期評価において、各性能評価項目に対する評価等級は、従来の研究を参考として表-6

表-6 測定項目と評価等級

測定項目		評価等級			
		1	2	3	4
表面被覆	白華	無し	少し認められる	認められる	著しく認められる
	剥離	直径 3mm 以下	直径 3~10mm	直径 10~50mm	直径 50mm 以上
	ひび割れ	無し	全体面積の 5%	全体面積の 5~20%	全体面積の 20% 以上
	剥落	直径 3mm 以下	直径 3~10mm	直径 10~50mm	直径 50mm 以上
コンクリート 断面修復材	ひび割れ	0.2mm 以下	0.2~0.5mm	0.5~1.0mm	1mm 以上
	剥離	5cm ² 以下	5~25cm ²	25~100cm ²	100cm ² 以上
鉄筋	錆び流出	無し	少し認められる	認められる	著しく認められる

表-7 圧縮強度、曲げ強度及び附着強度の測定結果

補修材料及び工法	圧縮強度 (MPa)			曲げ強度 (MPa)			附着強度 (MPa)		
	材 齢(日)			材 齢(日)			材 齢(日)		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28
A	18.1	39.8	43.2	9.3	9.9	12.0	3.1	2.9	3.5
B	25.6	60.5	58.9	8.2	7.1	9.5	1.0	0.9	0.9
C	41.1	43.8	49.7	6.9	9.0	9.9	2.3	2.4	2.4
D	52.3	56.8	58.3	12.1	13.6	14.1	3.4	3.5	3.7
E	34.7	41.2	43.8	7.3	7.9	9.3	1.6	1.9	2.0

に見られるように表面被覆材、断面修復材、コンクリート及び鉄筋の外観観察などの非破壊調査によって 4 等級に区分した^{6),7)}。

3. 実験結果の検討及び分析

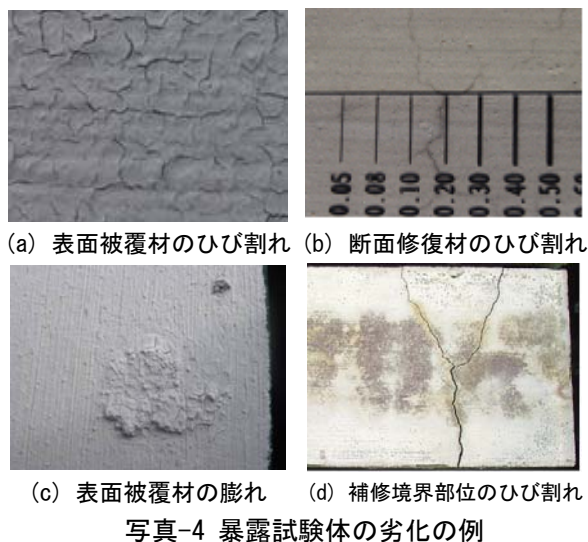
3.1 暴露前の初期評価結果

補修材料における材齢別の圧縮強度、曲げ強度及び付着強度を KS F 4042「コンクリート補修用ポリマーセメントモルタル」の試験方法に準じて測定し、その結果を表-7 に示す。

3.2 暴露試験体の測定結果

(1) 外観観察による性能評価結果

暴露材齢 18 ヶ月までの試験体の外観観察の結果、製造社別の補修材料・工法に関係なく、いずれの試験体においても、鉄筋の錆び汁、補修部の浮き及び剥落などの急激な性能低下現象は見られなかった。しかしながら、一部補修材料・工法の場合



においては、写真-4 に示すように微細ひび割れ、膨れ剥離現象が多少発生した。

暴露材齢別の表面被覆材において微細ひび割れによる評価等級の変化を図-3 に示す。C, D, E 補修工法の場合は、暴露材齢 18 ヶ月まで表面被覆材の微細ひび割れは見られなかったが、A 及び B 工法の場合は、暴露材齢 6 ヶ月から海岸及び一般大気環境で表面被覆材の微細ひび割れが見受けられた。

また、C 工法の場合、暴露材齢 18 ヶ月から海岸環境で表面被覆材の微細ひび割れが発生した。特に、海岸環境で暴露させた A 工法の試験体では、材齢 6 ヶ月から試験体の全面積の 20%以上において表面被覆材の微細ひび割れが観察され、4 等級と評価された。

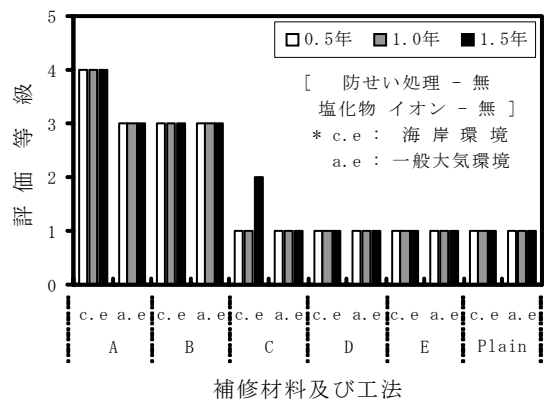


図-3 暴露材齢による表面被覆のひび割れ

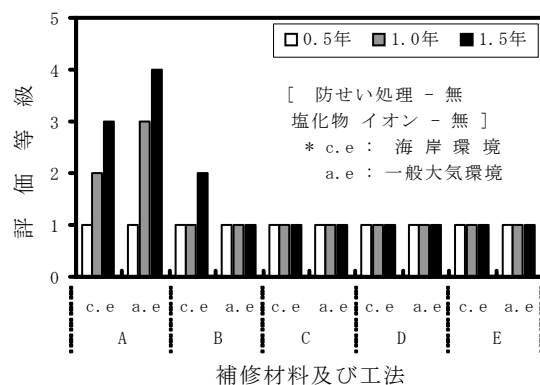


図-4 暴露材齢による断面修復材の剥離

また、暴露材齢による断面修復材の剥離評価等級の変化を図-4 に、一般大気環境下での試験体外観を表-8 に示す。B, C, D 及び E 補修工法の場合、断面修復材の剥離現象は見られなかったが、

表-8 暴露試験体の外観（上面）

暴露環境		一般大気環境（暴露材齢:18 ヶ月）			
防せい剤		無 處 理		處 理	
塩化物物量		0.0kg/m ³	2.4kg/m ³	0.0kg/m ³	2.4kg/m ³
補修工法	A				
	B				
	C				
	D				
	E				
	Plain				

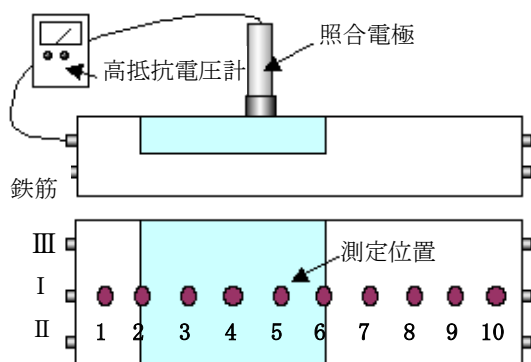


図-5 暴露試験体の自然電位測定方法の概要

A 工法の場合、材齢 12 ヶ月から剥離現象が発生しており、一般大気環境下での断面修復材の剥離が試験体全面積の 100cm² 以上に表れ、4 等級と評価された。

B 工法の場合、暴露材齢 12 ヶ月まで性能低下現象が見られなかったが、18 ヶ月からは海岸環境で断面修復材の剥離現象が発生し、2 等級と評価され、時間の経過による性能低下が確認された。

このような現象は暴露環境の直射日光をうけるきびしい条件であり、一部補修材料・工法では使用材料の調合及び工法などが、不適切であるため、暴露材齢 12 ヶ月から補修材料の性能低下現象が発生したと考えられる。また、性能低下した鉄筋コンクリート構造物に補修材料・工法を適用する時には、基材コンクリートの熱膨脹係数及び弾性係数などを考慮した補修施工が必要であると思われる。

(2) 自然電位による性能評価結果

暴露試験体の自然電位測定方法の概要を図-5 に、海岸環境下での材齢 18 ヶ月における自然電位を図-6 に示す。補修材料・工法の種類に関係なく、ASTM に規定されている鉄筋腐食発生の自然電位値である-350mV を上回っているので、材齢 18 ヶ月までは、鉄筋腐食が生じなかったと推定された。

一方、外観観察結果で性能低下現象が観察された A 及び B 工法の場合は、補修部位の自然電位値が、非補修部位に比べて多少低く現れたが、C、E 工法の場合は、補修部位の自然電位値が相対的に高く現れた。また、D 工法及び Plain 試験体の場合は、補修部位と非補修部位の自然電位において有似な値を示した。

海岸環境暴露試験体における非補修部位の自然電位の平均値の変化を図-7 に、海岸及び一般大気環境下での材齢 18 ヶ月における自然電位平均値の変化を図-8 に、防せい処理有無及び塩化物イオン量による自然電位平均値を図-9 に示す。自然電位の値は、すべての補修材料・工法種類において、暴露材齢 18 ヶ月まで-350mV 以上の値を示しており、時間の経過と共に自然電位値は、小さくなる傾向が見られた。

補修材料・工法の種類による自然電位値の傾向は見られなかったが、外観観察で補修材料の性能低下現象がみられた A 工法の場合は、ほかの工法に比べて相対的に小さい自然電位の値を示した。

また、海岸環境下で暴露させた試験体の自然電位値は、一般大気環境の場合より多少小さい値を

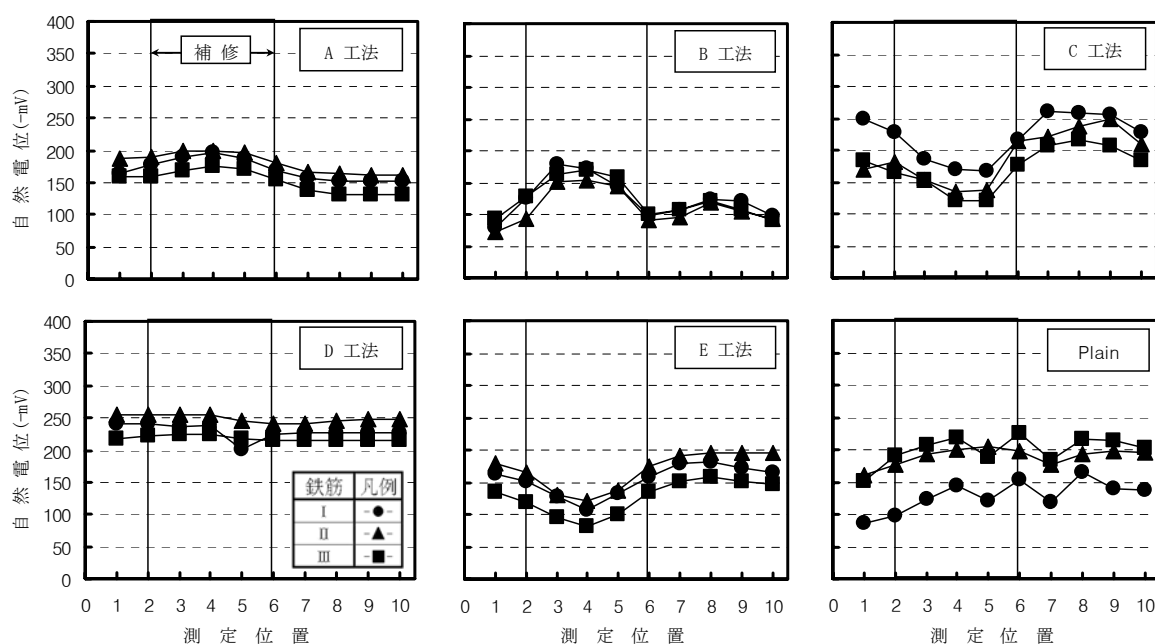


図-6 補修材料及び工法種類による自然電位測定結果

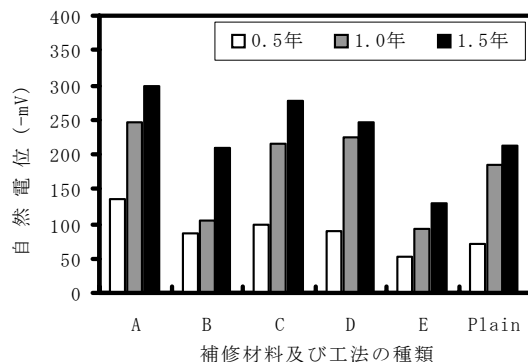


図-7 非補修部位の自然電位の平均値の変化(海岸)

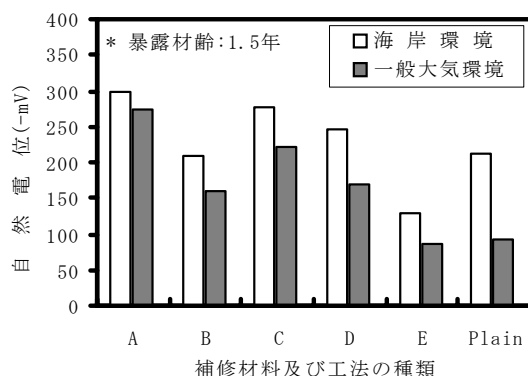


図-8 材齢 18 ヶ月における自然電位平均値の変化

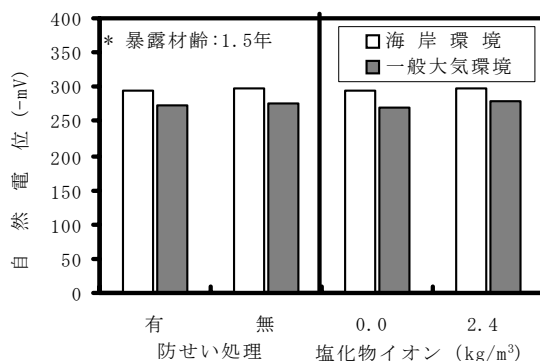


図-9 防せい処理有無及び塩化物イオン量による自然電位

示した。一方、暴露材齢 18 ヶ月までは、防せい処理有無及び塩化物イオン量の変化による自然電位値の差異は見られなかった。

4. まとめ

以上、本研究の範囲で次のような結論が得られた。

- 1) 暴露試験体の外観観察の結果、材齢 18 ヶ月までは深刻な性能低下現象は発生しなかったが、一部補修工法の場合、表面被覆材の微細ひび割れ、膨れ剥離及び補修境界部位のひび割れが多少発生した。

- 2) 暴露試験体の自然電位の測定結果、時間の経過と共に自然電位値が低くなる傾向が現れたが、暴露18ヶ月まで全試験体が-350mV以上の値が現れ、腐食は生じていないと判断された。

- 3) 外観観察結果において性能低下現象が見られた一部補修工法の場合、相対的に自然電位の値が低く現れた。一方、海岸環境暴露試験体の場合、一般大気環境に比べて、低い自然電位の値を示した。

- 4) これまでの暴露実験の結果、一部補修工法の性能低下が見られた。今後、持続的な研究を通じて、定量的な補修材料・工法の性能評価方法及び品質管理基準の確立に必要な基礎資料が得られるものと考えられる。

謝辞

本研究は、2004 年度電力産業研究開発事業の「複合劣化によって性能低下された原電構造物の補修材料・工法システム開発(R-2004-B-118)」に関する一連の研究であり、ここに厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 建設交通部、塩害及び中性化被害を受けたコンクリート構造物の耐久性回復のための補修工法システム開発及び実用化方案、建設技術研究開発事業年次報告書、2003. 4
- 2) 金武漢ほか、表面被覆種類による複合劣環境下の鉄筋コンクリート腐食特性に関する実験的研究、韓国コンクリート学会秋季学術発表大会論文集、pp. 87~90, 2003. 11
- 3) 金武漢ほか、中性化されたコンクリートのアルカリ性回復に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集 Vol. 24, No. 2, pp. 1449~1454, 2002. 6
- 4) Kim Moo-Han et al., Corrosion properties of Reinforced Concrete with Types of Surface Coating Under the Combined Deterioration Environment, Proceedings of JCI, Vol. 26, No.1, pp.1035~1040, 2004. 7
- 5) 日本コンクリート工学協会、コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(Ⅲ)-補修工法の性能評価のための暴露実験、pp. 1~44, 1996. 10
- 6) 日本建築学会、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断及び補修指針(案)・同解説-付 2. 補修工法の補修効果評価試験(案)、pp. 203~216, 1997
- 7) C. Andrade et al, Corrosion rate evolution on concrete structures exposed to the atmosphere, Cement & Concrete Composites pp.635-647, 2002