

論文 長期暴露環境下における補修工法システムの種類による鉄筋 コンクリートの劣化特性及び鉄筋自然電位の評価

曹 俸碩*3 · 金 武漢*1 · 金 圭庸*2 · 金 映徳*3

要旨：本研究は補修工法システムの補修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ために海岸及び一般大気環境下で長期暴露実験を行って材齢54ヶ月までの外観観察及び鉄筋の自然電位などを測定した後コンクリートの劣化特性及び鉄筋自然電位などを定量的に検討・分析して評価したものである。

キーワード：長期暴露実験, 補修工法システム, 補修性能評価, 外観観察, 鉄筋自然電位

1. はじめに

最近, 数多く補修材料及び工法が開発され, 多様な技術が適用されているが, 環境条件と施工条件などを考慮しないままの補修施工によって再劣化現象が発生する場合も多くあり, 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^{1), 2)}。

本研究では韓国の補修材料・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ために, 韓国で幅広く行われている補修工法システムを適用した暴露試験体を作製し, 54ヶ月間海岸及び一般大気環境下で暴露させた後, 外観等級評価及び鉄筋の自然電位などを定量的に検討・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は表-1に示したようにW/C 0.60の暴露試験体を作製し, 海岸及び一般大気環境で54ヶ月間暴露した後, 外観等級評価, 写真及びSEM撮影, 鉄筋自然電位などを測定した。また, 韓国で幅広く施工されている5社のシステム化された補修工法を選定して暴露実験を行った後外観等級及び鉄筋の自然電

位評価を6, 12, 18, 24, 30, 42及び54ヶ月毎に実施した。

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調合及び使用材料の物理的性質を表-2及び表-3に示す。鉄筋はD13mmの異形鉄筋を使用し, コンクリートの塩化物混入量を調節するため純度99%のNaClを用いた。また, 補修工法システムの主要構成材料を表-4に示した。

2.3 暴露試験体の作製方法

暴露試験体の形状及び寸法は図-1及び写真-1に示したように補修部位は発泡スチロールを埋設し断面欠損部位を設けた。また, コンクリート内の鉄筋は完全に埋め込められた状況を

表-1 実験要因と水準及び測定項目

W/C	要因	水準	測定項目
0.60	暴露環境	海岸及び一般大気環境	- 外観観察 (外観等級評価, 写真)
	補修工法の種類	5種類	- 鉄筋の自然電位
	塩化物混入量	0.0, 2.4kg/m ³	- 微細構造観察 (SEM撮影)
	防せい剤	処理, 無処理	

表-2 基材コンクリートの調合

W/C	スランブ (cm)	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位重量 (kg/m ³)		
				セメント	細骨材	粗骨材
0.60	18±1	48	186	310	830	931

*1 大韓民国 忠南大学校 建築学部 教授・工博 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 建築学部 助教授・工博 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

表-3 使用材料の物理的性質

使用材料	物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm ³)
細骨材	海砂(最大寸法: 5mm, 密度: 2.57g/cm ³ , F.M.: 2.85)
粗骨材	砕石(最大寸法: 20mm, 密度: 2.65g/cm ³ , F.M.: 6.50)
鉄筋	D13 異形鉄筋
NaCl	純度 99%

表-4 補修工法システムの主要構成材料

工法	主要構成材料
A	<ul style="list-style-type: none"> ● ガネト混入水性アクリルポリマーモルタル ● 水性浸透性接着強化材 ● 水性エポキシ表面被覆処理材
B	<ul style="list-style-type: none"> ● 浸透性ポリマーセメントモルタル ● 含浸プライマ ● 無機質コーティング材
C	<ul style="list-style-type: none"> ● 充填用ポリマーモルタル ● 鉄筋防せいコーティング材 ● 中性化及び塩害防止コーティング材
D	<ul style="list-style-type: none"> ● ポリマーセメントモルタル ● 防せいプライマ ● エポキシ系被覆材
E	<ul style="list-style-type: none"> ● ポリマーセメントモルタル ● プライマ

表-5 補修工法システムの補修工程

補修工程	補修工法の種類				
	A	B	C	D	E
1 錆び除去及び下地処理	○	○	○	○	○
2 含浸材の塗布		○	○	○	
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	○	○	○	○	

注) ○ : 適用された補修工程

想定した鉄筋Ⅰ, 鉄筋全体が露出された鉄筋Ⅱ, 鉄筋の一部が露出された鉄筋Ⅲの計3本の鉄筋を埋め込んだ^{3), 4)}。

2.4 補修工法システムの施工方法

補修工法システムの補修工程概要を表-5に示す。本研究の補修工法システムの施工は、各社別の示方書に準じて下地処理, 鉄筋の錆び除去, 含浸材塗布, 防せい処理, 断面修復, 下地

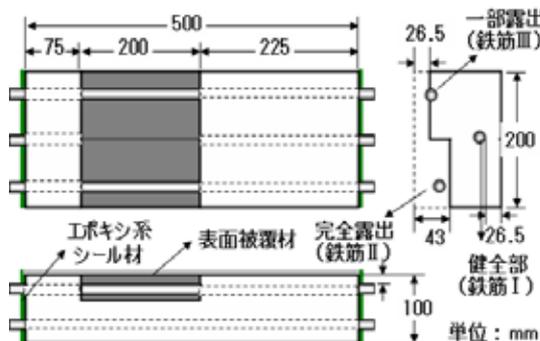


図-1 試験体の概要及び寸法



写真-1 試験体の形状



図-2 暴露実験場位置 写真-2 暴露実験全景

調整及び表面被覆処理工程の順で実施した。

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図-2及び写真-2(a)に示したように海岸から100m程度離れており, 飛来塩分の影響を多く受けるような場所で決めた。また, 一般大気環境暴露実験場は図-2及び写真-2(b)に示すように内陸である忠南大学建物の屋上で設けた。

2.6 暴露試験体の評価時期及び評価項目

海岸及び一般大気環境での長期暴露実験において暴露試験体の評価時期及び項目は表-6に示すように暴露前, 暴露中, 暴露後と区分して暴露材齢54ヶ月まで暴露前と暴露中のすべての評価項目及び暴露後では表面被覆材と断面修復材だけを評価した。暴露中の各性能評価項目に対する評価等級は既往の研究を参考して表-7に示したように表面被覆材, 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^{4), 5)}。

また, 図-3に示した測定方法に準じて材齢6, 12, 18, 24, 30, 42及び54ヶ月毎において鉄筋の自然電位を評価し, 表面被覆材及び断面修復材に対して写真及びSEMを撮影して観察した。

3. 実験結果の検討及び分析

3.1 暴露前の初期評価結果検討及び分析

暴露前, 補修材料の材齢別圧

表-6 暴露試験体の評価時期及び評価項目

評価時期	評価部位	評価項目
暴露前	表面被覆材	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	表面被覆材	写真, 白華, 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, 自然電位
暴露後	表面被覆材	写真, 白華, 剥落, SEM撮影, 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, 腐食面積率, 重量減少率, 自然電位

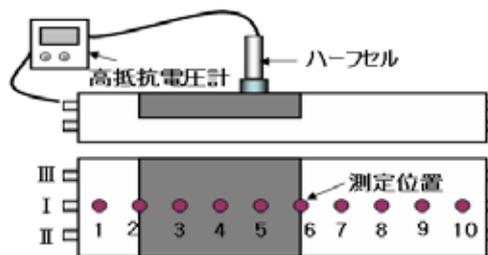


図-3 鉄筋の自然電位測定方法の概要

表-7 測定項目の評価等級

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
	汚染	完全除去可能	少し汚染残留	汚染残留	著しい残留
	膨れ	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	ひび割れ	0.2mm以下	0.2~0.5mm	0.5~1.0mm	1mm以上
断面修復材	剥落	5cm ² 以下	5~25cm ²	25~100cm ²	100cm ² 以上
鉄筋	錆び汁	無し	少し認められる	認められる	著しく認められる

参考：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(Ⅲ), 1996

表-8 圧縮強度, 曲げ強度及び附着強度の測定結果

補修工法システム	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
基準値 ¹⁾	-	-	20.0	-	-	6.0	-	-	1.0
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	1.9	1.7
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

注 1) KS F 4042 「コンクリート補修用ポリマーセメントモルタル」の品質基準

縮強度, 曲げ強度及び付着強度を評価した結果, 表-8のように全ての補修材料においてKS F 4042 「コンクリート補修用ポリマーセメントモルタル」の品質基準値を満足した。

3.2 暴露中の定期評価結果検討及び分析

(1) 外観観察による性能評価結果

海岸及び一般大気環境で暴露中及び暴露後試験体の外観観察結果, 各社別補修工法システムに関係なく, 暴露材齢54ヶ月まで写真-3

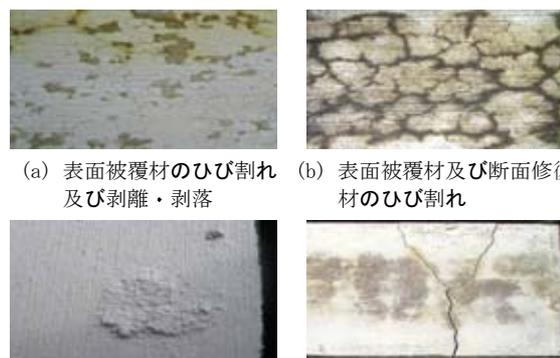


写真-3 暴露試験体の性能低下ケース

に示したように一部補修工法システムにおいて表面被覆材の微細ひび割れ, 膨れ, 剥離及び断面修復材のひび割れが多少発生したが, 鉄筋の錆び汁などの急激な性能低下現象は見られなかった。

暴露中, 材齢による表面被覆材の外観観察の等級評価結果を図-4に示す。補修工法D, Eは暴露材齢54ヶ月までは表面被覆材の微細ひび割れは見られなかったが, 補修工法Aは海岸環境試験体の場合, 6ヶ月から4等級と評価され, 一般大気環境で暴露した試験体は30ヶ月から4等級と評価された。また, 補修工法Bは海岸及び一般大気環境で6ヶ月から3等級と評価され, 補修工法Cは海岸環境で18ヶ月から, 一般大気環境では30ヶ月から2等級と評価された。全般的に一般大気環境より海岸環境で表面被覆材の性能低下現象がかなり現れた。

図-5は暴露材齢54ヶ月での補修工法の種類による表面被覆材の各種劣化等級を示したもので, 補修工法A, Cの場合には白華, 汚染, 剥離などの性能低下現象が著しく現れた。

一方, 図-6は海岸及び一般大気環境で暴露材

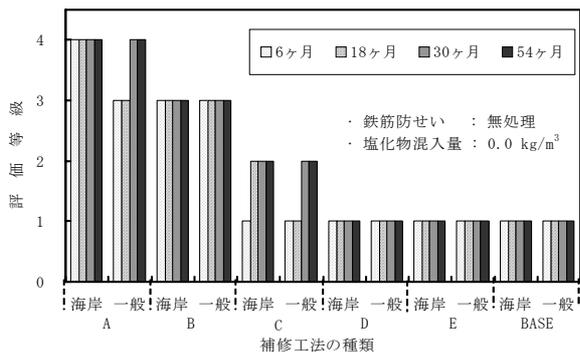


図-4 暴露材齢による表面被覆材のひび割れ等級評価

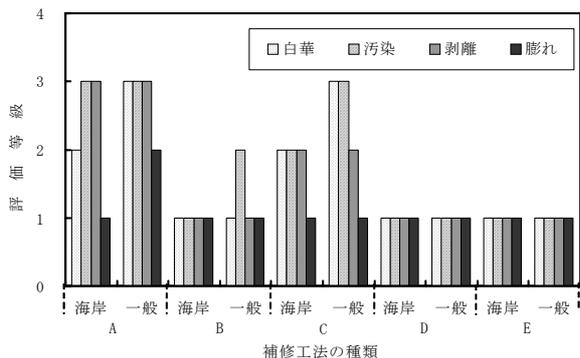


図-5 補修工法の種類による表面被覆材の各種劣化等級 (54ヶ月)

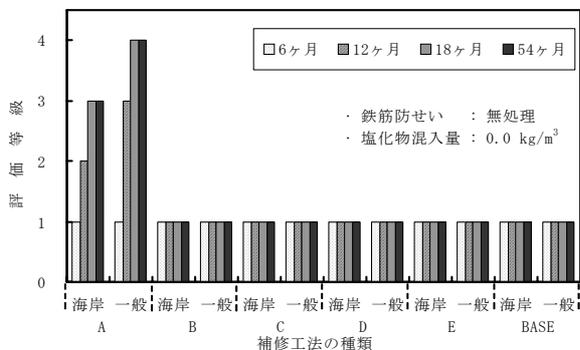


図-6 暴露材齢による断面修復材の剥離等級評価

齢による断面修復材の剥離評価等級を示したもので、補修工法B, C, D及びEの場合、暴露材齢54ヶ月までは断面修復材の剥離現象は見られなかったが、補修工法Aの場合、海岸環境で暴露材齢12ヶ月から剥離現象が観察され、18ヶ月以後では3等級と評価された。特に補修工法Aは海岸より一般大気環境で断面修復材の剥離現象が著しく見られた。なお、表-9は写真撮影によって暴露材齢別に一般大気環境下での試験体の外観変化を観察したもので、補修工法Aは材齢1

2ヶ月から表面被覆材及び断面修復材のひび割れと剥離現象が著しく見られた。

表-10は暴露材齢54ヶ月での補修工法種類による表面被覆材と断面修復材の組織構造をSEM撮影したもので、特に、補修工法Aの断面修復材の場合には大きい空隙が他の材料に比べて多く観察され、外部から水分、CO₂、塩化物イオンの浸透や凍結融解作用などの物理的な影響を受け易い状態であると考えられる。

(2) 自然電位による性能評価結果

図-7は一般大気環境下での補修工法の種類による自然電位測定結果を示したもので、暴露材齢24ヶ月に比べて54ヶ月の場合が自然電位値が全般的に低く評価された。補修工法の種類においては補修工法A, Dの場合が多少低く現れたが、すべての試験体で自然電位値が-350 mV以上と現れ、ASTMの基準によれば鉄筋の腐食発生確率は低く評価されている。

一方、同質なコンクリートで構成されているBaseとD試験体を除けば、ほとんどの試験体でコンクリートの非補修部と各々の断面修復材の補修部との境界で鉄筋自然電位値の差が発生することが見受けられた。

図-8は暴露材齢による補修部の自然電位の平均値を示したもので補修工法の種類による自然電位値は補修工法B及びEの場合が他の補修工法に比べて高く評価された。また、暴露材齢の経過と共に自然電位値は全般的に多少低くなる傾向を見せている。

図-9は暴露環境による鉄筋Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ別に自然電位の平均値を示したもので全般的に海岸環境で暴露された試験体が一般大気環境の試験体より自然電位値は多少低く現れた。

また、塩化物混入量による鉄筋の自然電位は図-10に示したように表面ひび割れと剥離現象が著しく発生したA工法を除けば塩化物が2.4kg/m³混入した試験体が塩化物を入れない試験体より自然電位値が小さく現れた。図-11は防せい処理有無による補修部の自然電位

表-9 補修工法及び暴露材齢による試験体の外観変化 (一般大気環境, 防せい処理有り, 塩化物混入量 0.0kg/m³)

種類 材齢	補修工法の種類				
	A工法	B工法	C工法	D工法	E工法
6ヶ月					
12ヶ月					
18ヶ月					
30ヶ月					
42ヶ月					
54ヶ月					

表-10 補修材料のSEM撮影結果 (×50)

区分	補修工法 A	補修工法 B	補修工法 C	補修工法 D	補修工法 E
表面被覆材					
断面修復材					

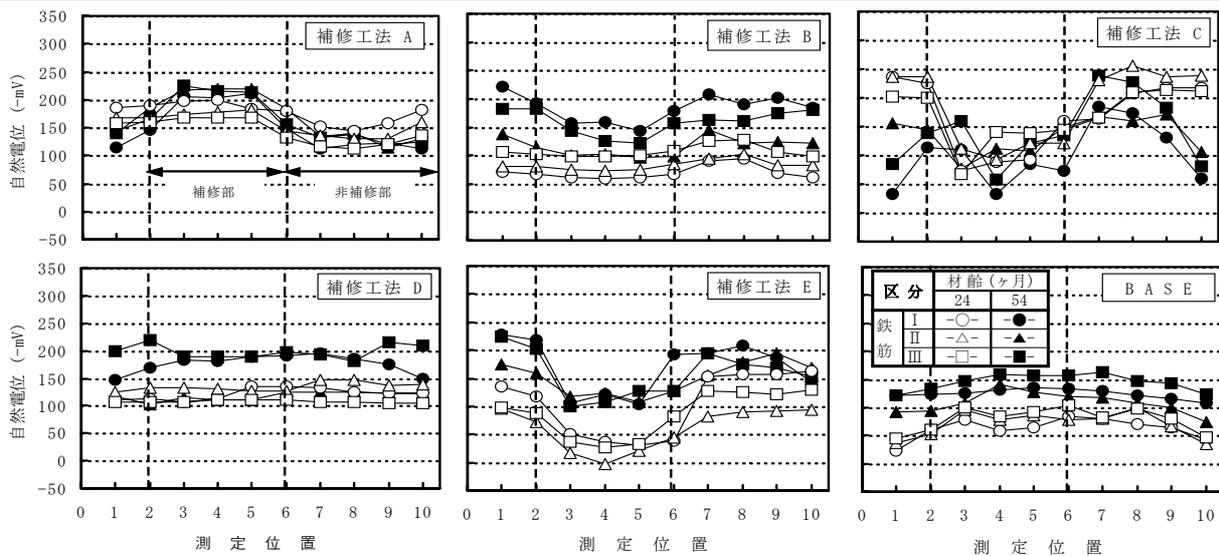


図-7 補修工法の種類による鉄筋の自然電位測定結果 (一般大気環境, 防せい処理無し, 塩化物混入量 0.0kg/m³)

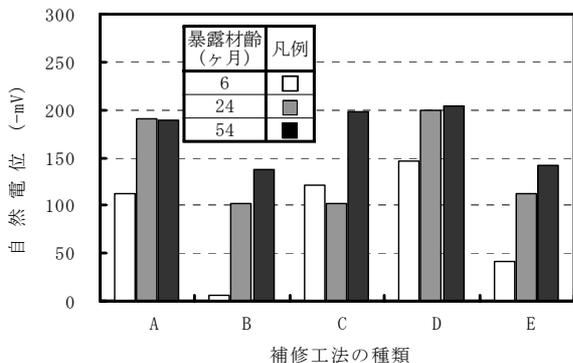


図-8 暴露材齢による補修部の自然電位 (一般大気環境, 防せい処理有り, 塩化物混入量 0.0kg/m³)

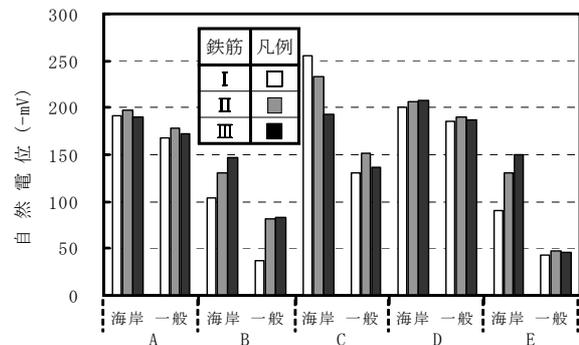


図-9 暴露環境による自然電位 (54ヶ月, 防せい処理無し, 塩化物混入量 2.4kg/m³)

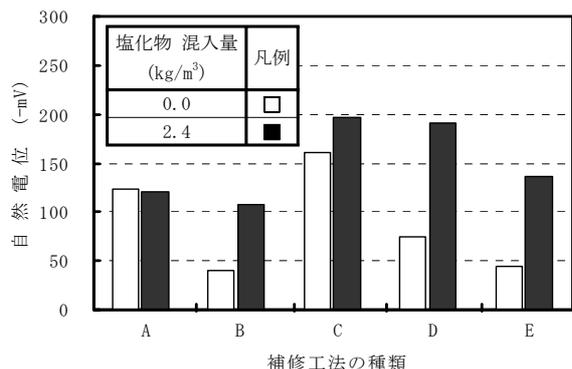


図-10 塩化物の混入量による自然電位(鉄筋Ⅲ, 54ヶ月, 一般大気環境, 防せい処理無し)

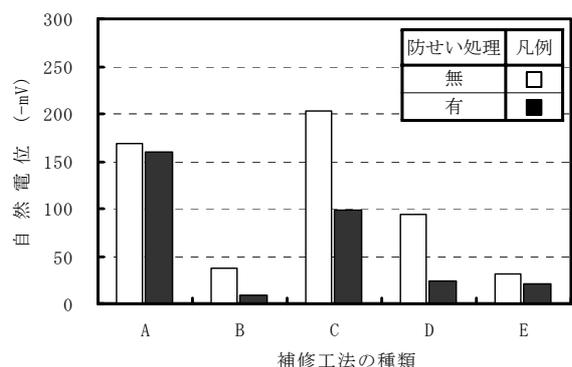


図-11 防せい処理有無による補修部の自然電位(54ヶ月, 一般大気環境, 塩化物混入量0.0kg/m³)

測定結果を示したもので全般的に防せい処理を実施した試験体において相対的に自然電位値が大きく評価され、補修性能の効果を明らかに確認することが出来た。

4. まとめ

以上、本実験の範囲で次のような結果が得られた。

- (1) 海岸及び一般大気環境下で補修工法システムを適用し54ヶ月間暴露実験を行った後、外観等級及び自然電位値の評価によって補修工法システムの種類別に補修性能の差があることを確認した。
- (2) 一般大気環境に比べて海岸環境の場合が補修材料の性能低下に及ぼす影響が相対的に大きく現れ、補修工法システムの適用時、構造物が位置した環境条件を考慮して補修施工をするべきである。
- (3) 暴露した全ての試験体で自然電位値が-350

mV以上で鉄筋の腐食発生確率は低く評価されたが、コンクリートの非補修部と断面修復材の補修部境界で鉄筋自然電位値の差が認められた。

- (4) 補修工法システムを適用した鉄筋コンクリートの試験体を海岸及び一般大気環境下で長期暴露した後、外観等級及び鉄筋の自然電位などを定量的に評価・分析して補修工法システム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出来た。

謝辞

本研究は2001年建交部「目的 E00-01」とBK (Brain Korea) 21 2段階事業の支援を受け取って行った研究成果の一部で有り、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 韓国建設交通部, 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, 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
- 3) 金武漢ほか, 耐久性を考慮した表面被覆材の性能評価に関する研究, 大韓建築学会秋季学術発表大会論文集, pp. 467~470, 2003. 10
- 4) 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(Ⅲ)-補修工法の性能評価のための暴露実験, pp. 1~44, 1996. 10
- 5) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説-付2. 補修工法の補修効果評価試験(案), pp. 203~216, 1997