論文　外来塩に対する鉄筋コンクリートのひび割れ補修効果の実験的研究

北山　良[*1]・片平　博[*2]・渡辺　博志[*3]

要旨：低圧注入・充填・表面塗布等の各種ひび割れ補修を行った鉄筋コンクリート供試体に対して腐食促進試験（乾湿繰り返し＋塩水浸漬）を行った。試験中の自然電位を測定し，促進試験終了後に供試体を解体し，鉄筋の腐食量について検討した。また，EPMA 分析にて供試体に浸透した塩化物イオンの分布状況を調査した。これらの結果から各種補修工法の特徴を整理した。

キーワード：ひび割れ補修，腐食促進試験，自然電位，腐食減量率

1．はじめに

塩分環境の厳しい場所におけるコンクリート構造物については,的確な維持管理を行う必要がある。とりわけ，ひび割れ補修工法に関しては鉄筋を腐食から守るために，十分に塩分を遮断し得る工法を選定する必要がある。しかしながら，現状では多種多様なひび割れ補修工法が存在し，各手法の特徴や効果について十分な知見が得られているとは言い難い。そこで本研究では，海からの飛来塩や凍結防止剤等の外来塩のある塩害環境下での各種ひび割れ補修工法の特性や効果を明らかにすることを目的とした。

２．実験概要

実験方法は，鉄筋を有する試験体に人工的にひび割れを発生させ，このひび割れに対して各種のひび割れ補修工法を実施し，塩害環境を想

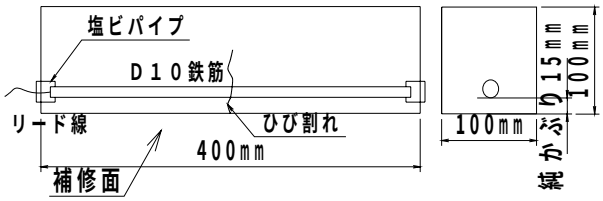
表－1　実験で使用した補修材

補修工法	概　　要		材料の系統
表面塗布	毛管現象により，ひび割れへの含浸作用のあるエポキシ樹脂をコンクリート表面に塗布		２液型エポキシ樹脂系注入材
低圧注入	ひび割れに低粘度エポキシ樹脂を低圧で注入		２液型エポキシ樹脂系注入用接着剤
充填	ひび割れ表面を深さ1㎝程度までUカットし，材料を充填		１成分形ポリウレタンシーリング材
表面被覆	コンクリート表面を塗装により被覆	(手順は，以下のとおりである。)	
	1.プライマー処理	コンクリート表面にエポキシ樹脂プライマーを塗布	２液型エポキシ樹脂系プライマー
	2.不陸調整	コンクリート表面の凹凸をエポキシ樹脂系パテで平滑化	２液型エポキシ樹脂系パテ
	3.中塗り	エポキシ樹脂系塗料を塗布（水密性、気密性の確保）	２液型溶剤エポキシ樹脂系塗料（中塗）
	4.上塗り	ポリウレタン樹脂系塗料を塗布（耐候性の確保）	２液型柔軟ポリウレタン樹脂系上塗塗料
充填＋表面被覆	充填と表面被覆を併用		

*1 独立行政法人土木研究所　技術推進本部構造物マネジメント技術チーム交流研究員　(正会員)
*2 独立行政法人土木研究所　技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主任研究員　(正会員)
*3 独立行政法人土木研究所　技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主席研究員　(正会員)

表－２　コンクリートの配合とフレッシュ性状

配合名	粗骨材最大寸法(mm)	水ｾﾒﾝﾄ比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m³)				混和剤量(g/m³)		測定ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)	測定空気量(%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤		
W/C40	20	40	45	160	400	785	982	1240	8.0	4.5	3.6
W/C55	20	55	45	160	291	826	1032	902	2.9	9.6	4.3
W/C70	20	70	45	160	229	849	1062	710	2.3	6.7	4.1



図－１　供試体形状図

定した促進試験を行い，試験中の供試体の自然電位を測定し，促進試験終了後，供試体から鉄筋を取り出して腐食減量率を測定し，腐食状況を観察した。また，EPMA 分析にて供試体に浸透した塩化物イオンの分布状況を調査した。

2.1 ひび割れ補修工法

本実験は，文献[1)]に示されているような一般的に実施されている方法を検討対象とした。**表－１**に本実験で使用したそれぞれの工法の概要および用いた材料の種類を示す。

2.2 供試体の作製

(1) コンクリートの配合

試験体の作製に使用したコンクリートの配合とフレッシュ性状を**表－２**に示す。

表－３　試験体の内訳

供試体番号	コンクリート配合	補　修　法					ひび割れ幅	
	W／C	表面塗布	低圧注入	充填	表面被覆	充填＋表面被覆	0.2 mm	0.5 mm
1	40 55 70	補修無し					ひび割れ無し	
2		補修無し					ひび割れ無し	
3		補修無し					○	
4		補修無し						○
5		○					○	
6		○						○
7			○				○	
8			○					○
9				○			○	
10				○				○
11					○		○	
12					○			○
13						○	○	
14						○		○

(2) 試験体の製造

練り混ぜたコンクリートを用いて**図－１**に示す試験体（□100×400）を各配合あたり１４本作成した。１４本の内訳は**表－３**に示すとおりである。この試験体には異形鉄筋 D10 を配置し，試験体底面からのかぶり厚さを 15mm とした。コンクリート打設後，翌日に脱枠し，１４日間湿布養生を行い，その後は気乾状態とした。

(3) ひび割れの導入と補修方法

１配合あたり１４本製造した試験体のうち１２本については，試験体製造約１ヶ月後に，中央点載荷法によるコンクリートの曲げ強度試験方法（JIS A 1106 付属書）により，試験体の中央にひび割れを発生させた。ひび割れ幅は 0.2mm と 0.5mm の２ケースとし，補修面で概ね 0.2，0.5mm となるようにした。

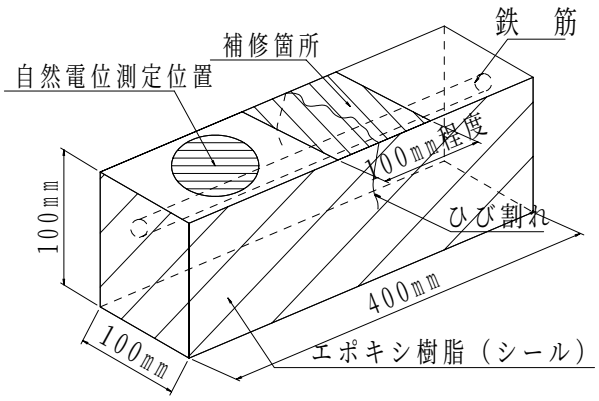
図－１に示す試験体の下面を上向きにして，補修面のひび割れに対して**表－１**に示す各方法により補修を行った。表面塗布と表面被覆は，実際の施工ではコンクリート表面の全面に施工することが可能だが，今回の実験では全面を覆うと自然電位の測定ができないので，**図－２**に示すようにひび割れの周囲の幅 10cm 程度までの施工とした。補修面以外の５面は，エポキシ樹脂でシールし，外部からの塩水や空気の侵入は補修面からのみ行われる条件とした。

2.3 促進試験方法

促進試験は，JCI-SC3 の「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法－乾湿繰返し法－」を参考に，以下の工程を１サイクルとし，２０サイクルまで試験を行った。

- 塩水環境：２０℃の３％の食塩水に浸漬，１日間

・湿潤環境：温度６５℃，相対湿度９５％，
　２日間
・乾燥環境：温度１８℃，相対湿度４０％，
　４日間



図－２　自然電位測定位置

2.4 自然電位の測定

促進試験の１サイクルごと（塩水環境後）に鉄筋の自然電位の測定を行った。自然電位については照合電極が飽和塩化銀電極を用い，電位は飽和硫酸銅電極換算とした。なお，測定位置は，**図－２**に示すように補修箇所の横とした。

2.5 鉄筋腐食度の測定

促進試験終了後，試験体から鉄筋を取り出し，腐食位置と腐食状況を観察した。また，以下の方法で腐食減量率を求めた。

供試体から取り出した鉄筋を15%クエン酸アンモニウム20℃水溶液に２日間浸漬して，腐食生成物を除錆した。なお，黒皮も除去されるので全く腐食が認められない鉄筋の減量を各鉄筋の腐食減量より差し引いて補正した。

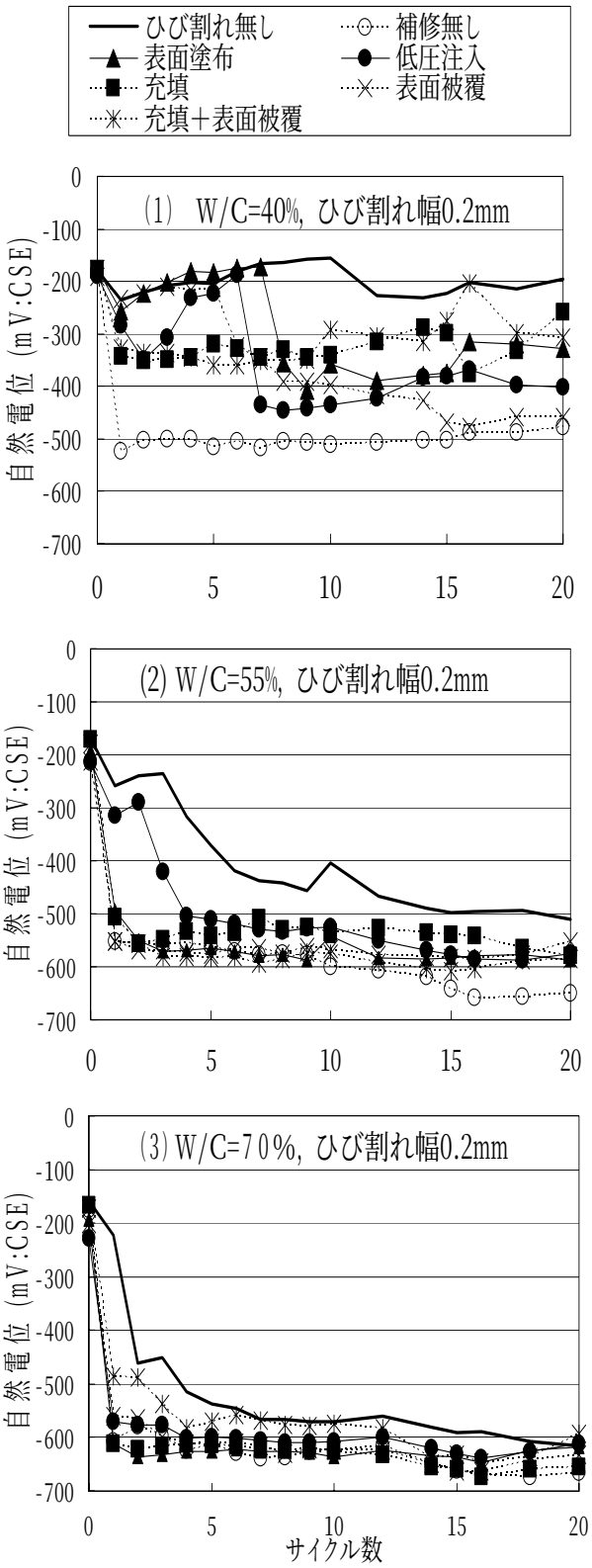
式（１）を用いて腐食減量率を算出した。

$$A=\{(B-C+D)/B\}\times 100 \qquad (1)$$

ここにA：腐食減量率，B：試験前鉄筋質量，C：除錆後鉄筋質量，D：黒皮除去分質量

2.6 ＥＰＭＡによる塩化物イオン分析

供試体の一部（ひび割れ部含む）を切断し，ＥＰＭＡ分析にてコンクリート中の塩化物イオン分布状況の測定を行った。



図－３　サイクル毎の自然電位の変化

3．実験結果及び考察

3.1 自然電位による検討

以下にW/C毎に自然電位測定結果の特徴を述べる。なお，**図－３**にはひび割れ幅0.2mmの場合の

自然電位の結果を示す。

（1）W/C＝４０%のケース

・ひび割れ無しの試験体では-200mV程度の値を保持した。

・ひび割れ補修した試験体のうち，自然電位が-200mV程度の値で比較的良好な結果を示したものは，0.2mmの1～7サイクルの表面塗布，表面被覆と3～6サイクル低圧注入の３種類，ひび割れ0.5mmの1～10サイクルの低圧注入と1～7サイクルの表面被覆であった。

・ひび割れを補修しない試験体は１サイクル目から-400～-500mV程度の値を示した。

・充填＋表面被覆のケースでは１サイクル目で充填箇所の装面の表面にひび割れが確認され，自然電位の値がやや卑となり，-350mV程度の値を示した。ひび割れが発生した原因としては充填材と表面被覆材の熱膨張係数，または乾湿による変形性状が異なり，試験中の急激な環境条件の変化に双方の変形性が追従しきれずに，ひび割れが発生したものと考えられる

（2）W/C＝５５%のケース

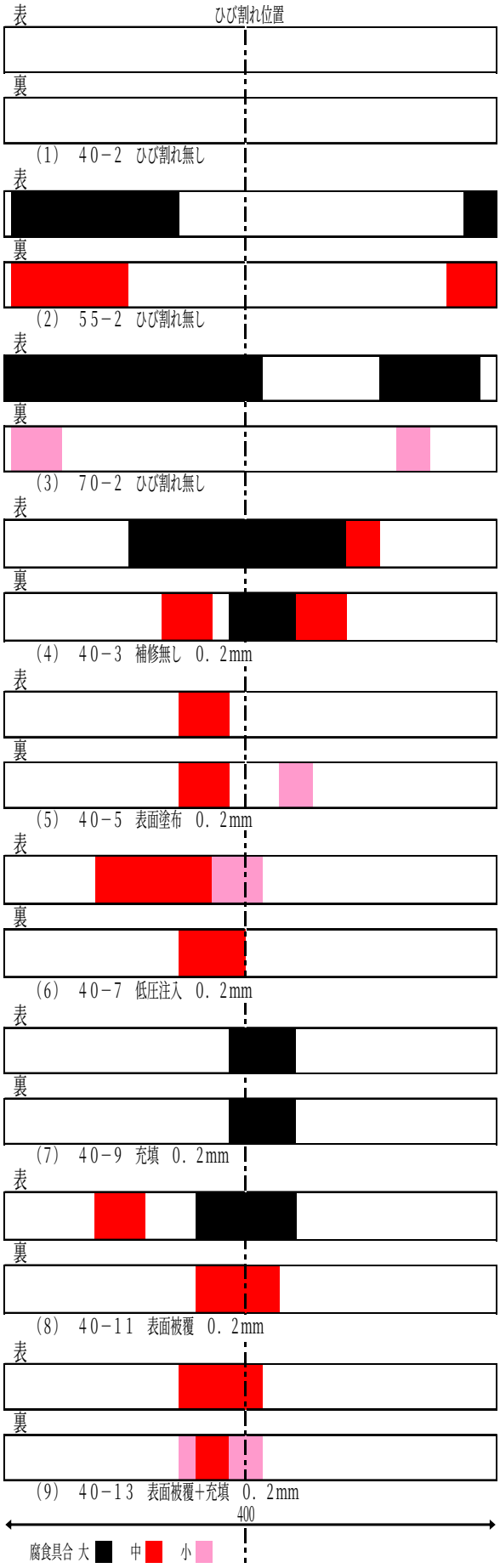
・ひび割れ無しの試験体でも，５サイクル以降では-400mV以下まで値が低下した。この理由としては，本試験ではかぶりが15mmしかないこと，乾燥条件から塩水に浸漬しているために急速に塩水が浸透すること等によると考えられる。

・３サイクルまでの間で，自然電位が-350mV以上だった試験体は，ひび割れ幅0.2mmの低圧注入の試験体のみであった。

・その他の全ての試験体については実験開始直後から-500～-600mVの値を示した。

（3）W/C＝７０%のケース

・全ての試験体で試験開始直後から-500～-600mVの卑の値を示した。これは，文献[2)]のとおりコンクリート自体の透過性が高いためにコンクリート表面全体から塩分が浸透したためと考えられる。表面を被覆する表面塗布や表面被覆でも卑の値となった理由としては，今回の実験では，ひび割れ部分の周囲10cm程度までの範囲しか被覆しておらず，その他の部分から塩化物イオンが浸透



図－４　鉄筋の展開図

したためと考えられる。

3.2 鉄筋腐食状態の検討

3.2.1 展開図による腐食状況の観察

供試体から取り出した鉄筋に対して，目視より腐食状態を観察した展開図を**図－４**に示す。なお展開図は，すべてひび割れ幅0.2㎜のものである。図中の鉄筋の表・裏は，補修面側を表とする。腐食具合の大・中・小は，鉄筋径全面に著しく腐食しているものを大，表面にわずかに点錆が認められるものを小，その中間を中とした。

・ひび割れ無しでは，W/C＝40%では腐食がみられず，W/Cが50，70%と大きくなるごとに腐食面積が広がっているがわかる。

・W/C＝40%の各補修ではひび割れ補修無しより腐食している面積が小さかった。特に表面塗布，低圧注入，表面被覆＋充填の腐食面積が小さかった。

3.2.2 腐食減量率による検討

図－５にW/C毎の各供試体別の腐食減量率を示す。この図よりW/C毎の特徴を以下に述べる。なお，本実験の範囲ではひび割れ幅 0.2㎜ と 0.5㎜ の差はほとんどなかった。

（1）W/C＝４０%のケース

・すべての補修でひび割れ補修無しより腐食減量率が低かった。その中でも表面塗布，充填＋表面被覆は低い値を示し，充填は高い値を示した。

（2）W/C＝５５%のケース

・充填以外は，ひび割れ補修無しより腐食減量率が低かった。

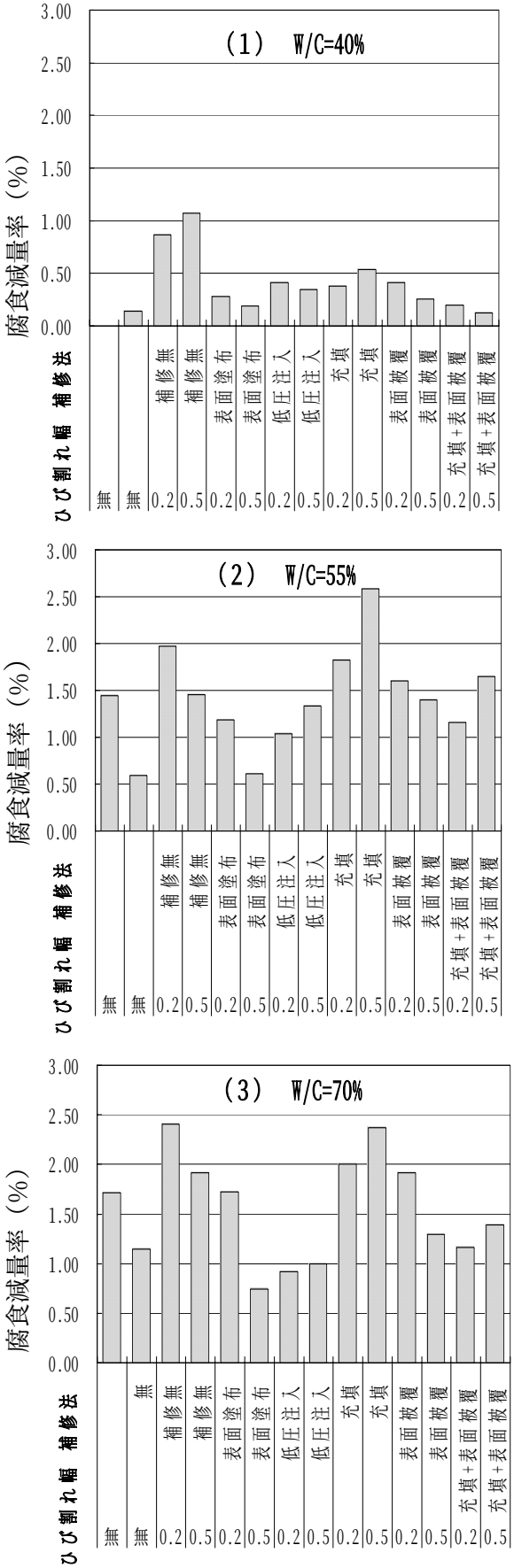
・表面塗布と低圧注入は，ひび割れ無しと同程度の結果であった。

（3）W/C＝７０%のケース

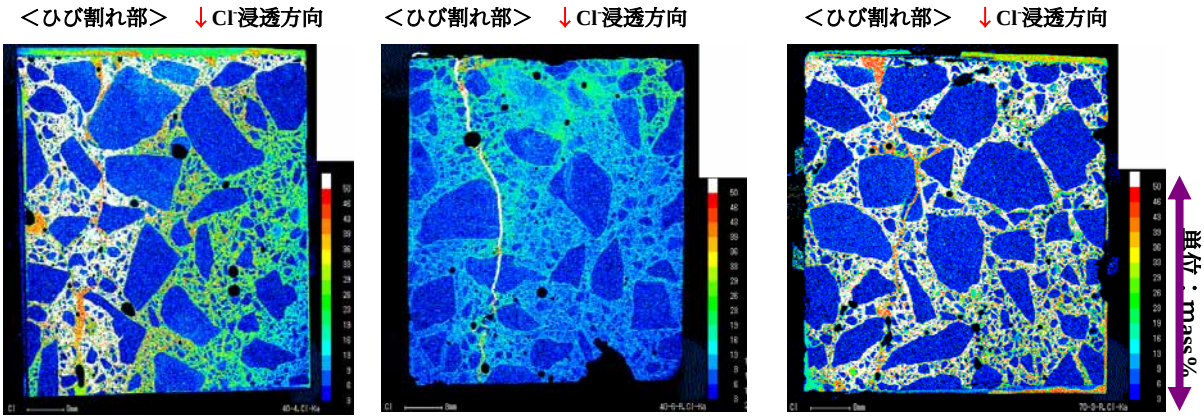
・充填以外は，ひび割れ補修無しより腐食減量率が低かった。

・表面塗布，低圧注入，充填＋表面被覆は，ひび割れ無しと同程度か，やや低い結果となった。

いずれの W/C のケースにおいても，充填工法の腐食減量率は，他の補修工法より大きかった。



図－５　各供試体別の腐食減量率



（1）W／C＝４０％　ひび割れ補修無し　（2）W／C＝４０％　表面塗布　（3）W／C＝７０％　ひび割れ補修無し

図－６　ＥＰＭＡ分析結果

この原因は，塩分浸透深さがコンクリート表面から 1cm 以上となった場合に充填部の界面及びその周辺からひび割れ部に塩分が浸透するためだと思われる。

3.3 ＥＰＭＡによる塩化物イオン分析

W/C＝40，70%の補修無し（40-4），(70-5)と表面塗布(40-6)の Cl^-の EPMA 面分析(512×512 ピクセル)結果を**図－６**に示す。

補修無しでは，ひび割れと表面からCl^-が浸透しているのがわかる。特にW/C＝70%の補修無しは，ひび割れ部がない部分でも広範囲にCl^-が浸透しているのがわかる。これらと比べ，表面塗布では，材料がひび割れ部分に充分に浸透し，Cl^-の侵入が抑えられているのがわかる。

4．まとめ

本実験で自然電位，鉄筋の腐食状況（腐食位置，腐食減量率）等から各種補修工法の効果を検討した。各測定項目の結果に若干の差異はあるが本実験結果から包括的に各種補修工法の効果を整理すると以下のように考えられる。

(1) 鉄筋の腐食状況から判断して最も高い補修効果を示したのは低圧注入と表面塗布で，厳しい塩害環境下ではひび割れを深部にわたるまで塞ぐ工法が優れていると思われる。

(2) 充填工法は，他の補修工法に比べて全般的に腐食度が高くなった。その原因として，ひび割れに対して，コンクリート表面からは約 1cm 程度の深さまでしか充填しないためだと思われる。本実験のように補修効果が得られない可能性もあるので，充填工法を飛来塩分環境下で行うときは，充分な注意が必要と思われる。

(3) コンクリートの水セメント比が高い場合にはコンクリート自体の透過性が大きいのでひび割れ部のみを補修をしても，他の部分から塩分が浸透するのでコンクリート表面全体を覆う必要があると思われる。

(4) 充填工法＋表面被覆工法を組み合わせたケースでは，塩害の促進試験の初期段階で塗装面にひび割れが生じた。原因として充填材と被覆材の変形性能（伸び能力や熱膨張係数）の違いによるものと考えられ，このように異種の材料を組み合わせる場合は事前に確認試験を行うなど，十分考慮する必要がある。

参考文献

1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修･補強指針 2003，pp.85-107，2002

2) 岡田　清，宮川豊章:コンクリートの水セメント比およびひび割れが鉄筋腐食に与える影響について，セメント技術年報 33 巻，pp494-497，1976.12