論文　ポリマーセメントモルタル吹付塗装鉄筋の耐食性およびコンクリートとの付着性状

山口　信[*1]・村上　聖[*2]・武田　浩二[*3]

要旨：加工・組立て後に簡便に施工可能な鉄筋防食方法の開発に資するため，ポリマーセメントモルタル（PCM）吹付塗装を施した鉄筋の塩水噴霧に対する耐食性について実験的検討を行った。その結果として，PCM の塗膜欠陥部やひび割れ部においても顕著な腐食は認められず，良好な耐食性が確認された。また，鉄筋－PCM 界面に無視できない量のクロムを含む層状物質が形成されていることが判明し，これが PCM の良好な防食効果に寄与しているものと考えられた。更に，PCM 吹付塗装鉄筋のコンクリートに対する付着性状についても併せて検討を行い，PCM 吹付塗装が鉄筋の付着性状に殆ど影響しないことを確認した。

キーワード：ポリマーセメントモルタル，吹付塗装，鉄筋，防食，蛍光 X 線分析，付着

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において，塩害による鉄筋腐食は深刻な劣化現象のひとつであり，その対策として，かぶり厚さを増す方法や，水セメント比を小さくして塩化物イオンの拡散係数を小さくする方法等が適用されるのが通常である。しかし，飛沫帯などの海洋環境或いは寒冷地における凍結防止剤散布環境等の極めて過酷な塩害環境下に鉄筋コンクリート構造物を建設する場合においては，上述の対応のみでは不十分であり，より積極的な鉄筋防食方法を適用する必要がある。その代表的なものとして，エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する研究が古くから実施されており，同材料を用いた鉄筋コンクリート構造物の設計施工指針〔改訂版〕[1)]も刊行され，その需要が増加している。また，その長期耐久性についても星野らの一連の研究[2),3),4)]により明らかにされつつある。

ところで，エポキシ樹脂塗装鉄筋では，鉄筋とコンクリートとの間に介在する防食層の影響により，普通鉄筋を用いた場合と比較して付着強度が小さくなることが知られており，その改善を目的とした研究も実施されている[5),6)]。また，製品製造の段階で塗装が施されるエポキシ樹脂塗装鉄筋においては，鉄筋の曲げ加工時における防食層の損傷に多大な注意が払われており，この面で，曲げ加工後に現場にて簡便に施工可能な防食方法を新たに検討することは有意義であると考えられる。

著者らは既に，ポリマーセメントモルタル（以下，PCM と略記）を表面に吹付けた鉄板を対象に塩水噴霧試験を実施し，PCM 吹付け面だけでなく，カッターナイフによる傷口部分においても腐食が抑制されることを明らかにしている[7)]。引き続き本研究では，鉄筋加工・組立て後に現場にて簡便に施工可能な鉄筋防食方法の開発に資するため，PCM 吹付塗装を施した鉄筋を対象に塩水噴霧試験を実施し，無塗装の普通鉄筋との比較からその耐食性について考察した。また，マイクロスコープによる観察結果および蛍光 X 線による成分分析結果に基づき，PCM 吹付塗装による耐食性向上機構について若干の考察を加えた。更に，中央部をコンクリート角柱に埋設した PCM 吹付塗装鉄筋を対象に両引き付着試験を実施し，塗膜の有無が付着性状に及ぼす影響についても併せて実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

表－1 に使用材料を示す。吹付塗装用の PCM としては，ポリアクリル酸エステルを主成分とする複合高分子エマルション（*Em*）と無機系コンパウンド（*Co*）から成る市販の 2 材系 PCM を用いた。PCM の調合比率は，同製品が吹付け材として用いられる際の仕様に従い，*Em*：*Co* = 1.0：3.5（質量比）とした。なお，本調合による PCM のコンクリートに対する付着強度は 1.5N/mm^2 以上（母材破壊，建研式接着力試験機による）であることが確認されている。鉄筋には異形鉄筋 SD345, D13 を黒皮付きのまま無処理で用い，付着試験用のコンクリートには呼び強度 27，指定スランプ 18cm のレディーミクストコンクリートを用いた。

2.2 試験方法

(1) 耐食性試験方法

耐食性試験は，PCM 吹付塗装を施した長さ 500mm の異形鉄筋について引張試験を実施し，PCM 塗膜に**表－2** に示す 4 水準の損傷を生じさせたものを対象に実施した。なお，試験片 No.1～4 における PCM 塗膜の厚さは，い

*1 熊本大学　大学院自然科学研究科環境共生工学専攻　助教　工博　(正会員)
*2 熊本大学　大学院自然科学研究科環境共生工学専攻　教授　工博　(正会員)
*3 熊本大学　大学院自然科学研究科環境共生工学専攻　准教授　工博　(正会員)

表－1　使用材料

コンクリート	レディーミクストコンクリート（普通-27-18-20-N） 実測スランプ：20.0cm （標準養生材齢 28 日）σ_B=29.1N/mm^2，σ_t=1.81N/mm^2 （現場湿布養生材齢 28 日）σ_B=32.8N/mm^2，E=26.8kN/mm^2，σ_t=2.07N/mm^2	
鉄筋	SD345, D13 降伏強度：366N/mm^2，引張強度：573N/mm^2，破断伸び：2.07%	
吹付け材	2 材系ポリマーセメントモルタル	
	エマルション（*Em*）	ポリアクリル酸エステル：ポリスチレン：水 ＝19：13：68（質量%）
	コンパウンド（*Co*）	白色セメント：硅砂 6 号 ＝40：60（質量%）
	調合	*Em*：*Co* = 1.0：3.5（質量比）

注 1）σ_B：圧縮強度，E：ヤング係数，σ_t：割裂引張強度
注 2）コンクリートの圧縮および割裂引張試験には，φ100×200mm 円柱供試体を各 3 体使用

表－2　耐食性試験用試験片一覧

No.	PCM 塗膜の有無	引張載荷レベル	引張載荷後の PCM 塗膜の外観
0	無	無載荷	―
1	有	無載荷	―
2	有	降伏域（46.9kN）	変状無し
3	有	ひずみ硬化域（48.6kN）	ごく僅かにひび割れが発生
4	有	最大荷重（64.7kN）	数本のひび割れが発生

ずれも 1mm 程度である。また，比較のため，PCM 塗膜なし，引張載荷なしの試験片（**表－2** 中の試験片 No.0）についても同様の検討を行った。

塩水噴霧試験は, JIS Z 2371（塩水噴霧試験）に準拠し，温度 35±2℃の試験槽内にそれぞれ平行となるように並べた試験片に 48 時間継続して塩水を噴霧した後, 鉄筋の腐食状況を調べた。なお，塩水には，温度 35℃で濃度 5±0.5%，pH6.5～7.2 となるように調整された塩化ナトリウム水溶液を用いた。

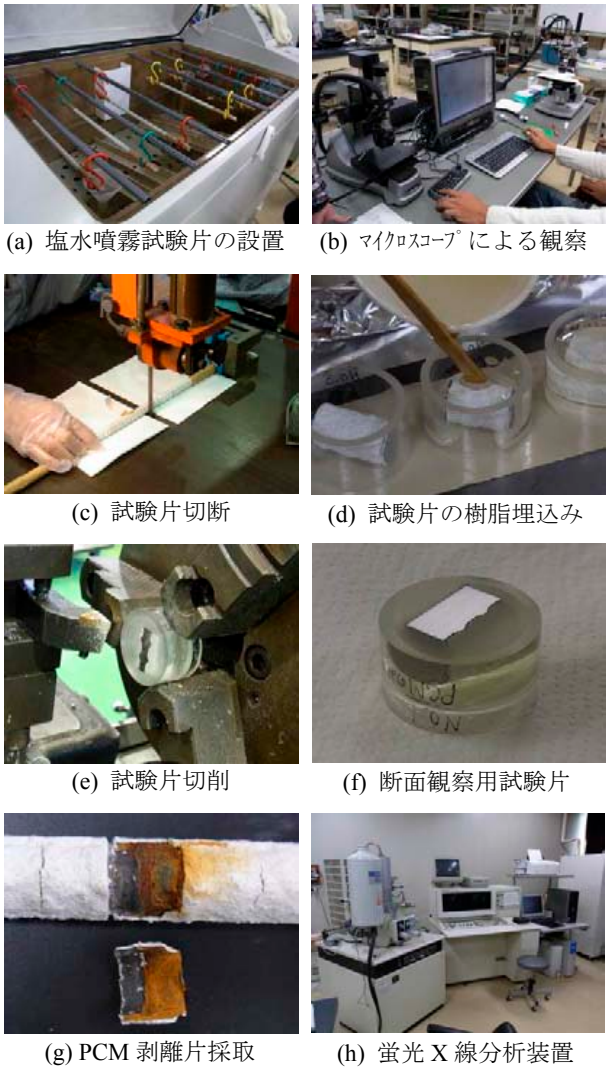
鉄筋腐食状況の調査は，以下に示す手順で行った。

1）塩水噴霧後の試験片の外観を，マイクロスコープを用いて倍率 100～200 倍に拡大して観察し，その腐食状況を基に断面観察位置を決定した。
2）1）で決定した観察位置を中心として長さ 2cm となるように試験片を切出し，これをアクリル製円筒容器に入れてエポキシ樹脂により埋め固めた上で，旋盤で切削・研磨した。
3）2）で作製した試験片の切断面を，マイクロスコープを用いて観察した。また，必要に応じて PCM 塗膜を剥ぎ取り，それを対象に蛍光 X 線による成分分析を行った。

以上の塩水噴霧試験および鉄筋腐食状況調査の状況を，**写真－1** に一括して示している。

(2) 付着試験方法

PCM 吹付塗装鉄筋の付着試験には，長さ 700mm の鉄筋の中央部分を 100×100×400mm のコンクリート角柱の断面中央に埋設した両引き付着試験体を作製した（**図－1 参照**）。試験体は，PCM 塗膜ありおよび PCM 塗膜な



(a) 塩水噴霧試験片の設置　(b) ﾏｲｸﾛｽｺｰﾌﾟによる観察
(c) 試験片切断　(d) 試験片の樹脂埋込み
(e) 試験片切削　(f) 断面観察用試験片
(g) PCM 剥離片採取　(h) 蛍光 X 線分析装置

写真－1　耐食性試験の実施状況

しの鉄筋各 3～4 本を対象に作製し，コンクリート打設後 28 日間現場湿布養生した上で，試験時まで気中養生とした。試験にあたり，コンクリート角柱部分の側面に標点距離 300mm のパイ型変位計を装着し，引張載荷に伴う軸方向変位を計測した。

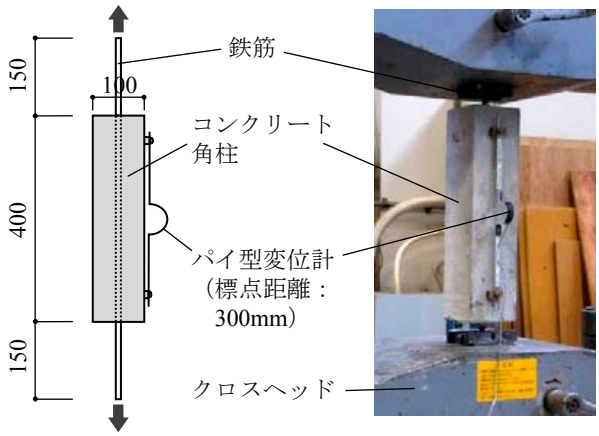
3. 実験結果および考察

3.1 耐食性試験結果

(1) 表層部の腐食状況

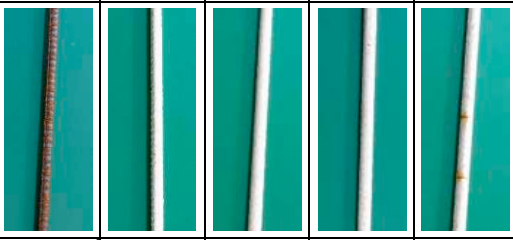
表－3 に塩水噴霧後の各試験片の腐食状況，**表－4** にマイクロスコープを用いて撮影した各試験片表層部の拡大画像をそれぞれ示す。

塗膜なしの試験片 No.0 には全面的に赤錆の発生が見られたのに対して，試験片 No.1～4 の PCM 塗膜が健全な部分には赤錆の発生は認められなかった。試験片 No.3 の PCM が剥離した箇所では，露出した鉄筋表面に点錆が認められるものの，剥離箇所内部の PCM が薄く残存した部分において発錆が抑制されている様相が観察される。また，試験片 No.4 では，PCM 塗膜に発生したひび割れのうち，開口幅が約 0.7mm 以上と比較的大きい箇所（**表－4** 中の(b)）では赤錆の発生が見られたものの，開口幅が約 0.5mm 以下の箇所（**表－4** 中の(a)）では腐食は観察されなかった。

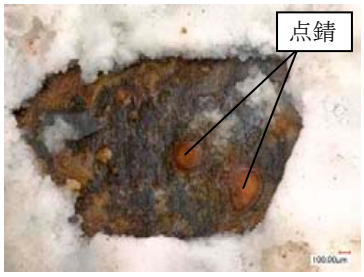
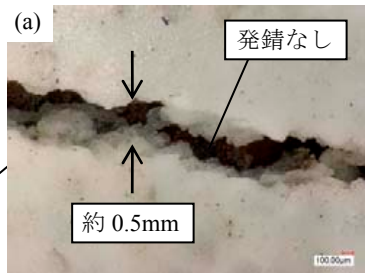
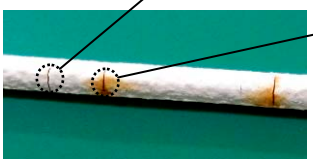
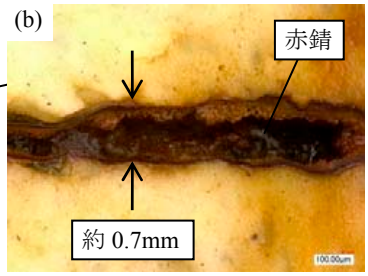


図－1　両引き付着試験方法

表－3　塩水噴霧後の各試験片の腐食状況

	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4
外観					
塗膜健全部		錆無	錆無	錆無	錆無
塗膜欠陥部	全面的に発錆			点錆	大：発錆 小：錆無

表－4　各試験片表層部の腐食状況の拡大画像

	全般		塗膜健全部	塗膜欠陥部
No.0		No.3		
No.1		No.4		
No.2				

以上の結果より，PCM 吹付塗装鉄筋の使用にあたり，これを用いた部材の応力が弾性限以下（鉄筋が未降伏）の許容応力度設計の範囲内であれば，PCM 塗膜に損傷を生じることなく，十分な耐食性を期待できるものと考えられる。また，引張鉄筋応力が降伏強度を超え，PCM 塗膜に損傷が生じた場合に，そのひび割れ幅が，耐久性上問題となるひび割れ幅とされている 0.2～0.3mm を超えたとしても，0.5mm 程度以下であれば，良好な耐食性を維持できることが推察される。

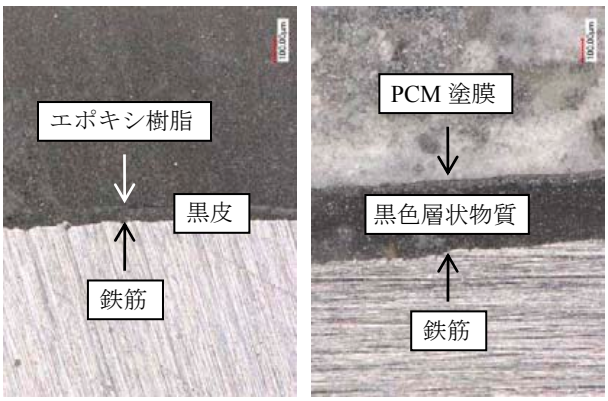
(2) 鉄筋－PCM 界面の状況

以上の表層部の観察結果に基づき，断面観察用の試験片（長さ 2cm）をバンドソーにより切出してマイクロスコープを用いた観察を行った。その際の代表的な撮影画像を**写真－2** に示す。

塗膜なしの試験片 No.0 では鉄筋表面に黒皮（酸化皮膜）の存在が確認されるが，鉄筋－PCM 界面の様相はそれとは異なり，黒皮よりも厚い黒色の層状物質が形成されている様相が観察される。なお，ここでは掲載していないが，試験片 No.1～4 のいずれにおいても，鉄筋－PCM 界面に同様の黒色層状物質の形成が認められた。また，これら 4 試験片すべてにおいて，健全な PCM 塗膜下の鉄筋－PCM 界面に赤錆は観察されなかった。

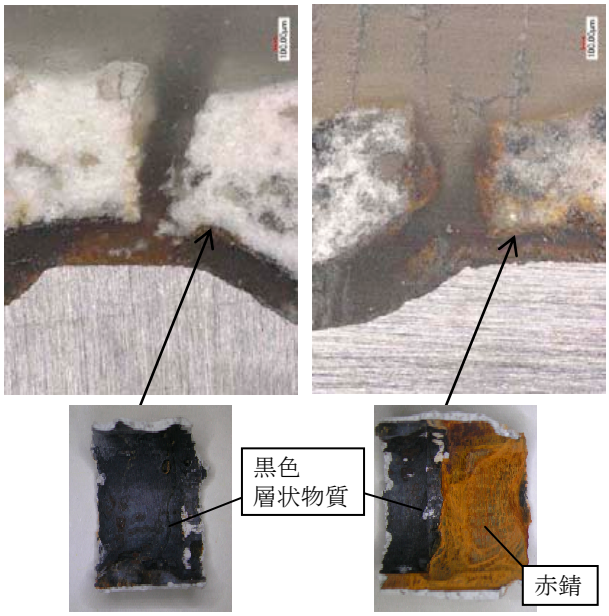
(3) 蛍光 X 線による成分分析結果

以上のように，PCM 吹付塗装による鉄筋の耐食性向上には，鉄筋－PCM 界面に形成された黒色の層状物質が寄



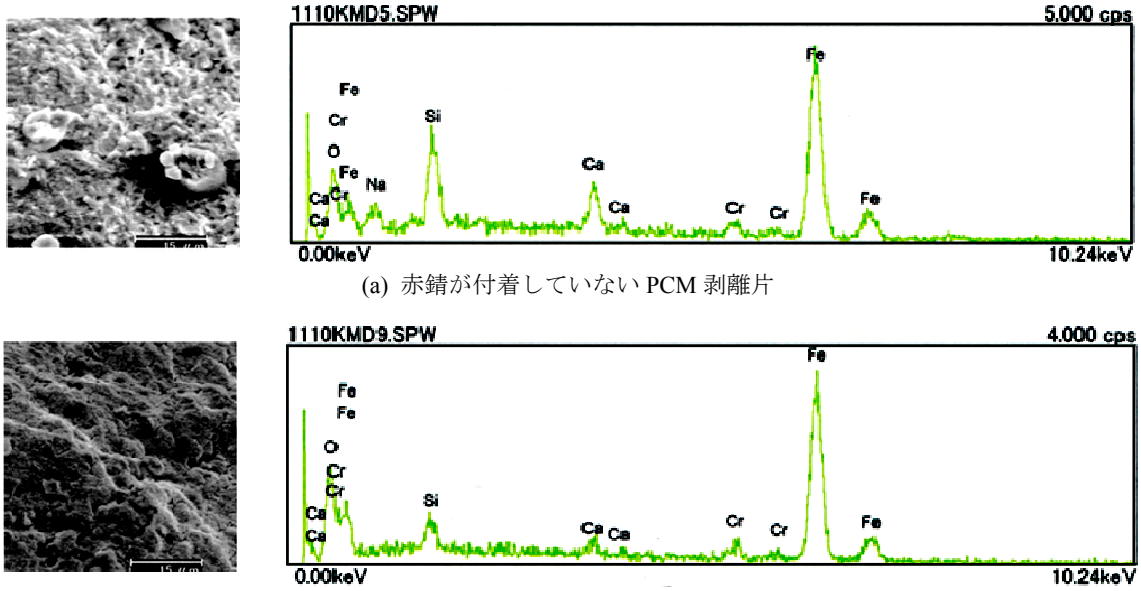
(a) 鉄筋表面（試験片 No.0）　(b) 鉄筋－PCM 界面（試験片 No.4 の例）

写真－2　代表的な試験片断面の拡大画像



(a) 発錆なし　(b) 発錆あり

写真－3　試験片 No.4 におけるひび割れ部断面の拡大画像および PCM 剥離片の剥離面外観



(a) 赤錆が付着していない PCM 剥離片

(b) 赤錆が付着した PCM 剥離片

図－2　PCM 剥離片（試験片 No.4）における黒色層状物質を対象とした蛍光 X 線分析結果

与している可能性が考えられる。そこで，ここでは上述の試験片 No.4 における 2 箇所のひび割れ近傍から PCM 塗膜を剥ぎ取り，その剥離片に付着した黒色層状物質を対象に蛍光 X 線分析を行った。**写真－3** に同 2 箇所の断面の状況および PCM 剥離片の外観を示す。**写真－3 (a)** は，赤錆の発生が見られなかった，開口幅が約 0.5mm のひび割れ近傍の剥離片であるが，その剥離面に黒色層状物質が付着している様相が確認される。一方，**写真－3 (b)** は，ひび割れ幅が約 0.7mm の，赤錆の発生が認められた箇所の剥離片であるが，この場合も剥離面に黒色層状物質が形成され，その上に赤錆が付着している様相が観察された（鉄筋に近い方から，赤錆，黒色層状物質，PCM の順である）。

図－2 に，黒色層状物質を対象とした蛍光 X 線分析結果を示す。分析の結果，黒色層状物質の成分中に無視できない量のクロム（Cr）が検出され，これが塗膜欠陥部における PCM の防食効果に大きく関係している可能性が考えられる。なお，このクロムは，PCM に使用したセメント（市販品）に由来するものであることが予想されるが，これが黒色層状物質中に選択的に析出した理由は現時点で不明である。また，黒色層状物質中におけるクロムの存在形態についても本実験の範囲内では明らかでなく，今後更に実験的検討を行う予定である。

3.2 付着試験結果

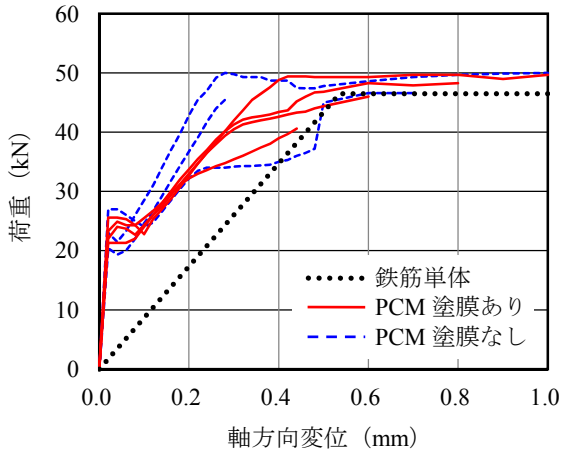
写真－4 に，代表的な両引き付着試験体におけるコンクリートのひび割れ発生状況を示す。すべての試験体において，コンクリート角柱の中央付近に載荷軸に対して直交方向のひび割れが発生し，進展・拡大する性状を示した。

図－3 に荷重－軸方向変位関係を示す。図より，PCM 塗膜の有無による荷重－変位関係の差異は小さいことから，PCM 吹付塗装鉄筋はコンクリートに対して十分な付着性状を有しているものと考えられる。なお，図中には，鉄筋のヤング係数を 2.05×10^5N/mm^2 と仮定し[8]，パイ型変位計の標点距離（300mm）によりひずみを軸方向変位に換算した，鉄筋単体の荷重－変位関係の推定値も併記している。いずれの試験体においても，テンションスティフニング効果により鉄筋単体の場合に比して剛性が顕著に増大していることが確認される。

4. まとめ

本研究では，鉄筋加工・組立て後に現場にて簡便に施工可能な鉄筋防食方法の開発に資するため，PCM 吹付塗装を施した鉄筋を対象に塩水噴霧試験を実施し，その耐食性について検討した。また，中央部をコンクリート角柱に埋設した PCM 吹付塗装鉄筋の両引き付着試験を実施し，塗膜の有無が付着性状に及ぼす影響についても併せて実験的検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると，以下のようになる。

写真－4　代表的な両引き付着試験体におけるコンクリートのひび割れ発生状況



注）鉄筋降伏以前に曲線が途切れているものは，コンクリートのひび割れ幅をパラメータとする塩水浸漬試験に供することを想定して，意図的に除荷したものである。

図－3　両引き付着試験における荷重－軸方向変位関係の測定値

1) PCM 吹付塗装鉄筋においては，PCM 塗膜に軽微な欠陥や幅 0.5mm 程度以下のひび割れが存在する場合においても，良好な耐食性を期待することができることを確認した。
2) 蛍光 X 線分析の結果，鉄筋－PCM 界面に無視できない量のクロムを含む層状物質が形成されていることが明らかとなり，これが塗膜欠陥部における PCM の防食効果に寄与している可能性が考えられた。
3) PCM 吹付塗装がコンクリートに対する付着性状に及ぼす影響は小さく，塗膜なしの鉄筋と同等の付着性状を有していることが実験的に確認された。

なお，PCM 吹付塗装による鉄筋の耐食性向上機構について今後引き続き検証していくとともに，実際の腐食環境下において長期的に耐食性を調査する必要があると考え

ている。

謝辞

実験にあたり，熊本大学技術専門職員の甲斐定夫氏，戸田善統氏ならびに建築材料・施工研究室の大学院生・卒研生の皆様に多大なご協力をいただきました。また，（株）フジコンケミカルからはポリマーセメントモルタルの提供，熊本県産業技術センターからは塩水噴霧および成分分析試験における技術支援をそれぞれ賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針〔改訂版〕，コンクリートライブラリー112，丸善，2003
2) 星野富夫，魚本健人，小林一輔：海洋環境下に 15 年間暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋ならびに亜鉛メッキ鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.883-888，1997
3) 星野富夫，魚本健人：エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリートの防食効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.891-896，2004
4) 星野富夫，上久保通夫，岸利治：沖縄の海洋飛沫帯に長期間暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いたコンクリートの防食効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1151-1156，2012
5) 津村壽樹，上田隆雄，新井康裕，宮川豊章：エポキシ樹脂塗装鉄筋の付着改善に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1357-1362，2009
6) 吉田誠，武若耕司：新たな方法で樹脂被覆した防食鉄筋の諸性能に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1375-1380，2009
7) 太田智之，村上聖，武田浩二，中村哲男，長谷川麻子，オジユン：各種多機能材料の建築分野への応用開発研究，日本建築学会 2010 年度大会学術講演梗概集，A-1 分冊，pp.417-418，2010
8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，丸善，2010