

コンクリートのひび割れや塗膜割れが 躯体への水分浸透と鉄筋腐食に与える影響

鈴木 浩明* 鶴田 孝司* 上原 元樹*

Effect of Concrete Cracks and Coating Film Cracks on Water Penetration and Rebar Corrosion

Hiroaki SUZUKI Koji TSURUTA Motoki UEHARA

Surface-protection materials have been used for the surface of concrete to recover and improve the durability of structures. On the other hand, due to aging deterioration, repeated load of trains, etc. coating film cracking and the structural concrete cracking can occur. In addition, these structures are exposed to the outdoor environment and are therefore susceptible to rainwater. However, the effect of water penetration into these deteriorated points is not clear. In this paper, for painted and cracked concrete, we report the results of the water penetration test, chloride ion penetration test, and the results of the rebar corrosion test. We also discuss some effective and process-saving repair methods for cracks.

キーワード：コンクリート，ひび割れ，塗膜割れ，水分浸透，鉄筋腐食，塩分浸透

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化と「水」には密接な関係がある。一般的に、コンクリート構造物には「屋外にて長期間供用するため、雨水等の影響を受けやすい」「取替が困難である」といった特徴がある。雨水等の「水」には、塩化物イオンなどのコンクリート構造物にとって有害な物質を運ぶ性質の他、コンクリート中の鉄筋腐食を助長する性質、コンクリートの凍害など、それ自身が劣化因子であるといった性質がある。そのため、コンクリート標準示方書【規準編】に「短期の水掛りを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）（JSCE-G582-2018）」¹⁾が新たに制定されるなど、コンクリートへの水分浸透の重要性に対する関心が高まっている。また、コンクリート構造物は取替が困難であるため、劣化箇所の補修や計画的な予防保全などによる適切な維持管理が求められている。例えば、補修もしくは予防保全の一つにコンクリート構造物に対する表面保護工がある。これは構造物の耐久性回復や向上を目的とし、コンクリート表層へ施工される。表面保護工は、表面処理工法と断面修復工法に分類されるが²⁾、外部からの水分の浸透防止を目的とする場合には、表面処理工法が選定され、特に表面被覆工法が施工されることが多い。

一方、問題なく供用されている実構造物においても、経年劣化や列車の繰返し荷重などによる躯体コンクリートのひび割れ、および被覆材の塗膜割れが生じている事例³⁾が報告されている。表面被覆工を施工したコンク

リート構造物の維持管理を適切に行うためには、これらの変状箇所に対する水分浸透挙動などの物質移動抵抗性を調査し、補修の要否や時期を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では塗膜割れやひび割れなどの変状を模擬して、含水率センサーを埋設した鉄筋コンクリート試験体を作製し、試験体に塩水を噴霧することで、それらの変状が含水率の変化や鉄筋腐食の程度に与える影響について検討した。

2. コンクリート構造物の劣化事例

図1～図3に本報告において検討される実構造物における表面保護工の劣化事例を示す。ここで示された事例は、定期的に点検が実施され、問題なく供用されているものであるが、構造物の一部には、被覆材の塗膜割れ、表層剥離あるいはふくれが認められる場合がある。

3. 劣化を模擬した試験体の各種分析

本報告では、塗膜割れとひび割れの発生箇所に、雨水等の躯体コンクリートへの浸透性状や内部の鋼材腐食へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、上記変状を模擬した試験体を作製した後、塩水噴霧試験を実施し、内部含水率、塩化物イオン量、鉄筋の自然電位を測定した。

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室



図1 塗膜割れの発生状況例



図2 表層剥離の発生状況例

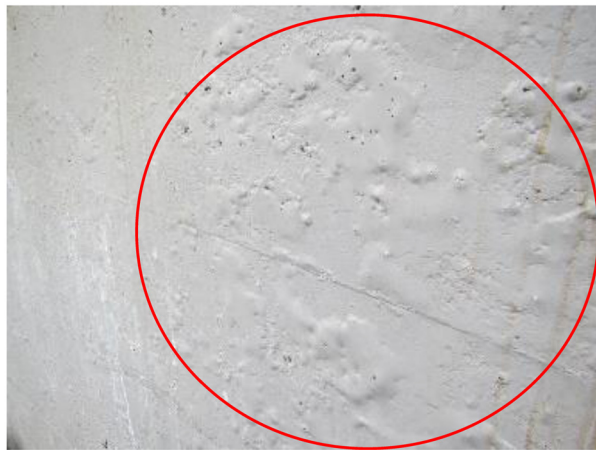


図3 ふくれの発生状況例

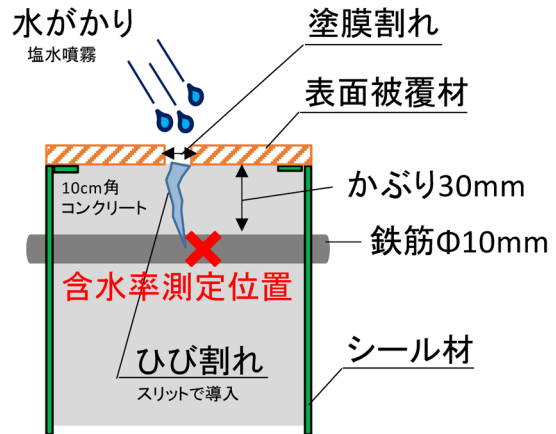


図4 試験体の概念図

3.1 塗膜割れやひび割れを模擬した試験体の作製

塗膜割れやひび割れがコンクリートへの水分浸透と鉄筋腐食に与える影響を調べるため、試験体を作製した。試験体の形状寸法を図4、塗膜割れやひび割れ幅と深さを表1に示す。100mm×100mm×100mmの母材コンクリートには、ひび割れ近傍の内部含水率あるいは鉄筋の自然電位を測定するため、かぶり30mmとなるように内部含水率センサーもしくは鉄筋を埋設した。ここで、コンクリートのひび割れは、コンクリート打ち込み時にスリット（鉄板）を埋設し一定時間後に取り除くことで、鉄筋に直交する方向に導入した。さらに、ひび割れを導入した面には被覆材を施工した。ここで、施工面の対面については自然電位の測定のため被覆を行わず、残りの四面については、シール材（ナプコバリア：透水性の低い材料）を塗布した。また、コンクリートにひび割れを導入した試験体に対して、鉄板引き抜き後に被覆材を塗布するとひび割れを塞いでしまうため、鉄板を挿入した状態で被覆材を塗布した。なお、母材コンクリートの使用材料と配合は表2、表3に示すとおりである。養生環境はいずれも20℃相対湿度60%の恒温恒湿室内であり、

材齢1日で脱型し、材齢2週にシール材を、材齢3週に表4に示す3種類の被覆材を塗布した。

表1 塗膜割れやひび割れの試験水準

想定する状況	(mm)		
	塗膜割れ 幅	ひび割れ 幅 深さ	
塗膜割れやひび割れがある場合 (ひび割れ深さが35mmはひび割れが鉄筋に到達)	1.0	1.0	35
			10
塗膜は割れているがひび割れない場合	1.0	0.2	35
	0.2		10
塗膜割れやひび割れない場合	なし	なし	
塗膜未施工でひび割れない場合	塗膜未施工		

表2 母材コンクリートの使用材料

材料(記号)	種類 (名称, 品質)	生産者または産地
セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³)	太平洋セメント(株)
細骨材(S)	陸砂 (表乾密度:2.58g/cm ³)	静岡県大井川水系
粗骨材(G)	碎石 (表乾密度:2.66g/cm ³ , 最大寸法20mm)	東京都青梅産
混和剤(Ad)	AE減水剤 マスターエア202	BASFジャパン(株)
練混ぜ水(W)	上水道水	—

表3 母材コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				Ad (C×%)
		W	C	S	G	
60	47	180	300	838	945	0.004

空気量4±1.5(%)とした

表4 使用した被覆材

被覆材種類	材料詳細
有機系	プライマー(エポキシ系材)
	下塗り(エポキシ系パテ材)
	中塗り(ポリブタジエン系材)
	上塗り(フッ素樹脂系材)
無機系	プライマー(エポキシ系材)
	主材下塗り(ポリマーセメントモルタル)
	主材上塗り(ポリマーセメントモルタル)
	仕上材下塗り(水系アクリル材)
無機系 (メッシュ入)	仕上材上塗り(水系アクリル材)
	浸透固化材(エポキシ系材)
	表面保護材(ポリマーセメントモルタル)
	メッシュ材(2軸アラミドビニロンメッシュ)
	仕上材(水系アクリル材)

3.2 塩水噴霧試験

試験体作製と外的塩害を模した塩水噴霧試験の概要を図5に示す。材齢28日の試験体に対して表面被覆材を施工した面を鉛直上向きにして塩水噴霧試験装置の中に静置し、1日間の塩水噴霧と6日間の静置を1サイクルとした試験を4サイクル計28日間行った。

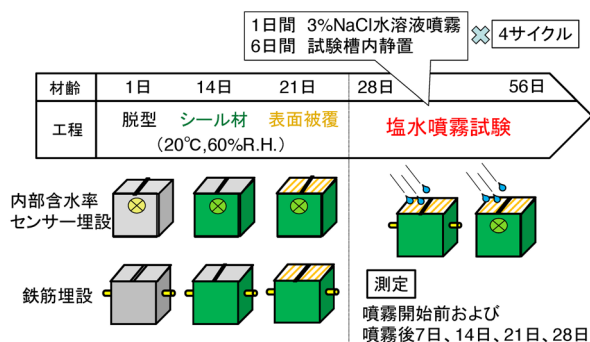


図5 試験体作製と塩水噴霧試験の概要

3.2.1 内部含水率

内部含水率の測定は、株式会社ケツト科学研究所製コンクリート・モルタル水分計 HI-800 を用いて行った。測定時期は、噴霧開始前および噴霧開始から7、14、21、28日後とした。

3.2.2 塩化物イオン量測定

塩化物イオン量の測定は、メトローム社製電位差滴定装置を用いて行った。測定時期は、噴霧開始から28日

後とした。また、塩化物イオン量の測定は、ひび割れ周辺のかぶりコンクリートを対象とし、範囲をかぶり深さ10mmから30mmまでの約20mm、縦横は約40mmとした。

3.2.3 鉄筋の自然電位

鉄筋の腐食程度を示す自然電位の測定は、四国総合研究所製鉄筋腐食診断器 SRI-CM-Ⅲを用いた。測定は、被覆材を施工していない面に対して端子を当てることで実施した。測定時期は、塩水噴霧開始前および塩水噴霧開始から7日、14日、21日、28日(一部42日)後とした。

3.3 試験結果と考察

3.3.1 内部含水率

図6に噴霧開始前から噴霧後28日での内部含水率の変化を示す。塗膜未施工の試験体では内部含水率が2.0%程度上昇したのに対して、塗膜割れとひび割れがない試験体では含水率の上昇は認められず、塗膜による防水効果が確認された。また、塗膜割れが生じていてもひび割れを伴わない場合は、その上昇率は小さかった。しかし、塗膜割れとひび割れが同時に発生している場合は、その幅や深さによらず、塗膜未施工の試験体と同程度まで内部含水率が上昇した。塗膜割れとひび割れ部分以外には被覆されているにも関わらず、内部含水率が上昇していることから、ひび割れから直接水分が浸透し、内部含水率が上昇したものと推察される。ここで、ひび割れ幅(0.2mm, 1.0mm)、ひび割れ深さ(10mm, 35mm)の

異なる各試験体において、内部含水率の上昇に大きな差がみられなかった。このことから本試験の範囲において、水分浸透に対して塗膜の割れ幅やひび割れ幅の影響は小さく、それらの有無が大きく影響することがわかった。なお、塗膜に用いた材料の違いによる内部含水率への影響は明確ではなかった。

以上の結果より、表面被覆施工箇所において、外観上塗膜割れが生じている場合、躯体コンクリートへの水分浸透に影響を与えるか否かは、塗膜割れと躯体コンクリートのひび割れが同時に生じていないことの確認が特に重要であることがわかった。また、ひび割れが鉄筋位置に到達していない場合でも、内部含水率が上昇したことから、コンクリートにひび割れが生じている場合は、ひび割れ先端から一定範囲に水分が浸透することがわかった。ただし、水分の浸透に関しては、水セメント比などの配合や養生方法などのコンクリートの品質、および微細ひび割れの発生程度によって異なることに加え、水分の浸透範囲と浸透量および鉄筋位置との関係によって鉄筋腐食への影響程度が異なると考えられるため、今後詳細な検討が必要である。

3.3.2 塩化物イオン量

図7に塩水噴霧開始から28日後の塩化物イオン量の測定結果を示す。いわゆる塗膜未施工試験体（塗膜なし、ひび割れなし：ここでは種類Aとする）では、鉄筋位置におけるコンクリートの質量に対する塩化物イオン濃度が0.06%程度であった。ここで、コンクリート試験体のみかけの密度が約2,200kg/m³であったことから、塗膜未施工試験体の採取位置における塩化物イオン量は約1.32kg/m³である。ここで、塗膜を施工し、塗膜割れおよびひび割れのない試験体（種類B）では、いず

れの被覆材においても塩化物イオン量は0.01質量%程度となり、被覆材の施工により塩化物イオンの浸透が抑制されたことがわかる。一方、塗膜を施工したが、塗膜割れとコンクリートのひび割れが同時に発生している試験体（種類C, D, E, F）では、いずれも塩化物イオン濃度が塗膜未施工である種類Aあるいは塗膜を施工した種類Bと比較して同等か高くなった。また、ひび割れ深さ10mm（種類C, D）とひび割れ深さ35mm（種類E, F）を比較すると、ひび割れ深さが大きいほど、塩化物イオン濃度が高く、値のばらつきが小さい結果となった。なお、本試験の状況の範囲においてはひび割れ幅が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響は明確でなかった。

以上の結果より、塗膜を施工することで塩化物イオンの浸透が抑制される。しかしながら、塗膜割れとひび割れが同時に生じていた場合には、その箇所を除く同一面が被覆されていても、ひび割れを通じて塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透することや、ひび割れ深さが大きいほど内部に塩化物イオンが浸透することがわかった。

ここで、前述した内部含水率の上昇はひび割れ深さの影響が不明確であったのに対し、塩化物イオンの浸透程度はひび割れ深さの影響が大きいことがわかる。これは、水分がコンクリート中を比較的早く移動するのに対し、塩化物イオンはフリーデル氏塩として固定化されるなど、その浸透速度が遅くなることに起因する。すなわち、ひび割れ深さ35mmの試験体では直接塩水が浸透し、その周囲の塩化物イオン濃度を上昇させるが、ひび割れ深さ10mmの試験体では、鉄筋位置まで20mmに相当するコンクリート躯体を塩化物イオンが浸透する必要があるため、その速度差により水分浸透とは異なる結果となるものと推察される。

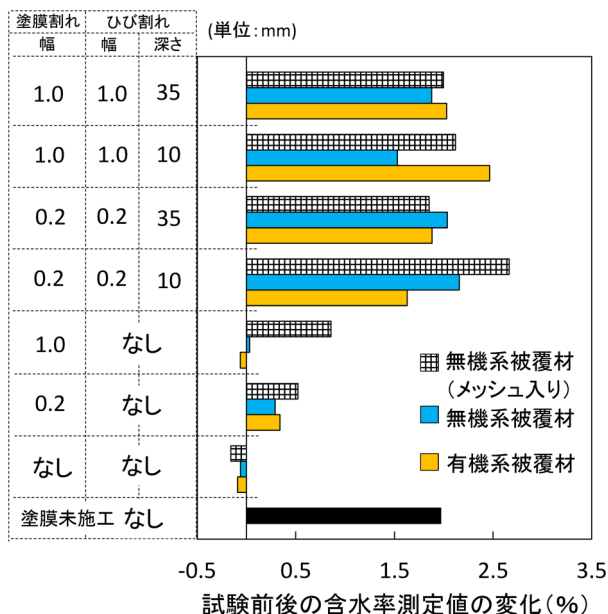


図6 内部含水率の測定結果

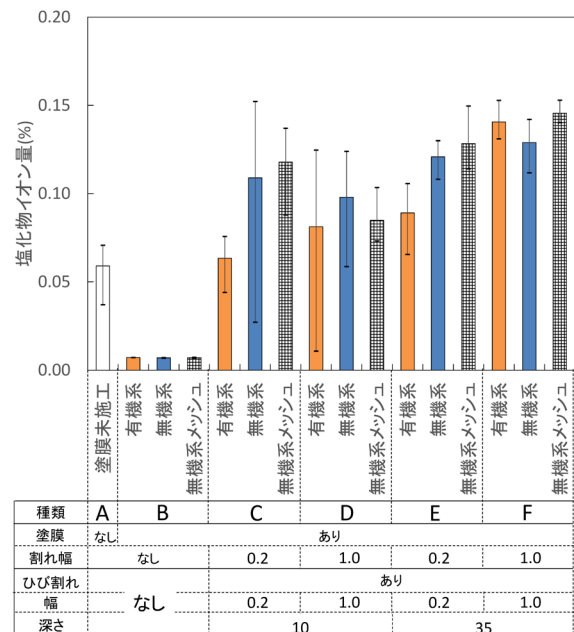


図7 塩化物イオン量の測定結果

以上をまとめると、内部含水率と塩化物イオン量の測定結果より、塗膜を施工した場合は塗膜割れが生じた場合であっても、躯体コンクリートにひび割れが生じていなければ水分の浸透が抑制されることがわかった。一方、塗膜割れとひび割れが同時に生じた場合は、水分はひび割れ幅やひび割れ深さの影響を大きく受けずにコンクリートに浸透するが、塩分はひび割れ深さの影響が大きかった。

3.3.3 鉄筋の自然電位

図8に鉄筋の自然電位の測定結果を示す。ひび割れがないコンクリートに対して被覆材（塗膜の割れなし）を施工した場合と未施工の場合を比較して、鉄筋の自然電位の値に大きな差はみられなかった。これは、3.3.1項で認められたように被覆材の施工によって水分浸透は抑制されるが、本試験の短期間の測定では、中性化していない試験体における水分浸透量の違いによる自然電位の差を確認できなかったものと考えられる。一方、ひび割れ深さが35mmの試験体と10mmの試験体を比較すると、ひび割れ幅によらず、深さ35mmの試験体の自然電位は卑側となり、鉄筋が腐食傾向となった。これは、鉄筋位置における内部含水率は、ひび割れ深さ10mmおよび35mmの試験体で同様に上昇し水分が同程度浸透したが、塩化物イオンの浸透量はひび割れ深さ35mmの試験体で多かったことに起因する。

以上の結果より、ひび割れがない場合、塗膜の有無による短期の水掛り条件下での鉄筋腐食の抑制効果は明確ではなかった。また、ひび割れ幅と比べてひび割れ深さが鉄筋腐食に与える影響が大きく、ひび割れが鉄筋位置近傍に到達していた場合は鉄筋が腐食傾向となることがわかった。

3.3.4 ひび割れ補修と鉄筋の自然電位

3.3.1項～3.3.3項で得られた結果より、塗膜の割れのみが発生している場合は、水分や塩化物イオンが躯体コンクリートへ及ぼす影響や鉄筋腐食に及ぼす影響は小さいことがわかった。一方で、塗膜割れとともに躯体コンクリートにひび割れが発生した場合は、水分及び塩化物イオンがひび割れからコンクリートに浸透し、特にひび

割れが鉄筋に到達していた場合には鉄筋腐食へ及ぼす影響が大きいことがわかった。

一方、実構造物において塗膜割れやひび割れが発生した場合、ひび割れ幅は測定可能だが、ひび割れ深さについては目視で確認することができない。つまり、ひび割れ幅のみでは鉄筋腐食への影響を正確に知ることは難しい。そこで本研究では、安全側の補修となるように、躯体コンクリートに生じたひび割れは鉄筋位置まで到達していることを前提として、ひび割れに対して補修を行った試験体の補修状態を確認し、補修後の鉄筋の自然電位測定により防食効果を検討した。補修水準は表5に示すとおりである。ここで、一般に被覆材は躯体側から表面にかけて複数の層で構成され、躯体との付着性を持つ層、動的に追従性を持つ層、物質移動抵抗性を持つ層、耐候性を持つ層に分かれていることが多い。本試験では、省工程補修として耐候性を持つとされる上塗材のみを施工した場合においても検討した。

図9に補修状態の外観と内部の充填状況を示す。使用した補修材料により、外観上、ひび割れが充填されたものと残存したものがあり、ひび割れが充填された試験体はひび割れの開口部のみの充填となり、鉄筋付近は未充填となった。一方、外観上ひび割れが残存したものは、鉄筋付近が充填されていた。ここで、本研究では補修材を鉛直下向きに施工したことから、補修材のひび割れ

表5 補修水準

補修水準	材料種類	材料詳細	工程数
全工程補修	有機系	プライマー(エポキシ系材)	4
		下塗り(エポキシ系バテ材)	
		中塗り(ポリブタジエン系材)	
		上塗り(フッ素樹脂系材)	
	無機系	プライマー(エポキシ系材)	5
		主材下塗り(ポリマーセメントモルタル)	
主材上塗り(ポリマーセメントモルタル)			
省工程補修	有機系	上塗り(フッ素樹脂系材)	1
		仕上材下塗り(水系アクリル材)	2
	無機系	仕上材上塗り(水系アクリル材)	2
		エポキシ樹脂系材	1
	複合材料	シーラー材	2
		ケイ酸質系およびシロキサン系材料	

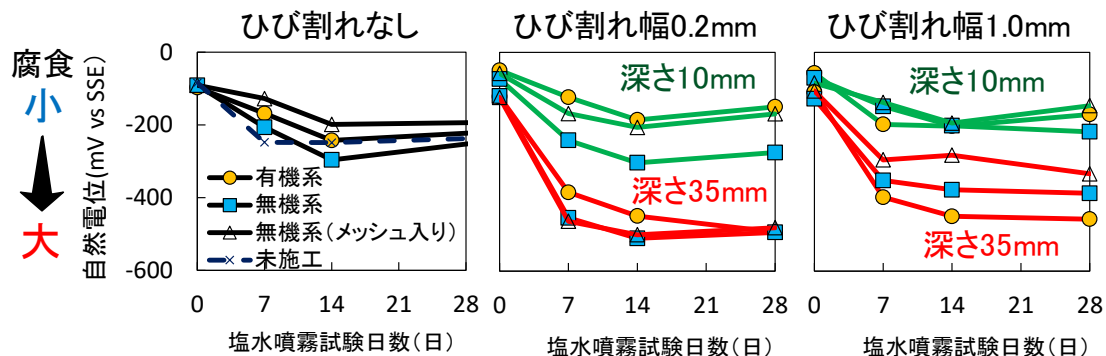


図8 鉄筋の自然電位の測定結果

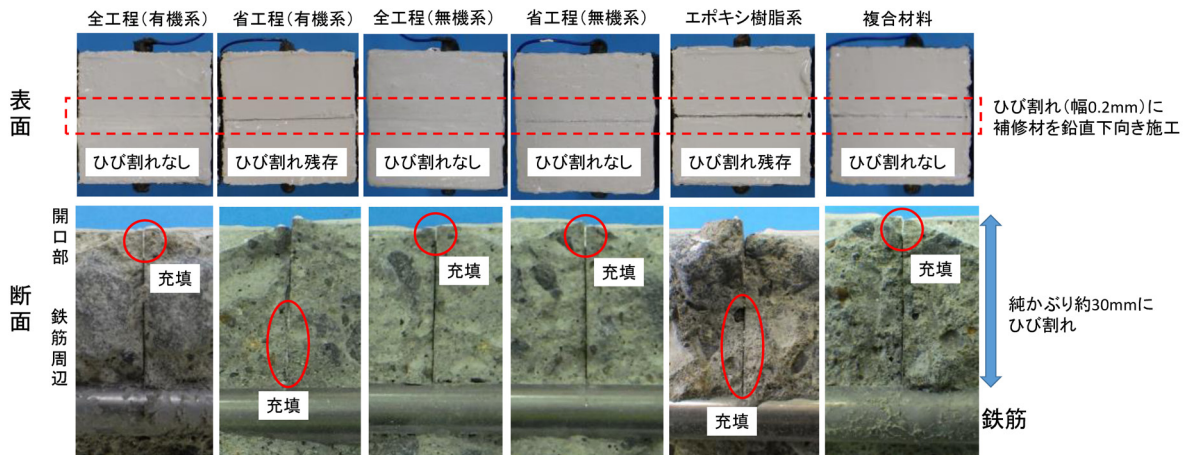


図9 補修状態の外観と内部の充填状況

開口部への充填や鉄筋近傍への浸透に関して、有利な施工条件であったと考えられる。一方、実施工現場における補修対象箇所、つまりひび割れの発生箇所の方向は、部材によってまちまちであり、例えば鉛直上向きへの施工は充填に対して不利に働くと考えられる。また、ひび割れ補修時の充填程度に影響すると考えられるコンクリートの含水状態は環境によって異なる。よって、施工方向の違いや施工対象の環境条件の違いについて、さらなる検討が必要である。

図10に補修後における鉄筋の自然電位の測定結果を示す。補修した試験体の鉄筋における自然電位は、未補修と比較して総じて貴となり、鉄筋腐食が抑制されることがわかった。一方で、ケイ酸質系およびシロキサン系の複合材料は比較的腐食傾向となった。また、全工程補修と省工程補修を比較すると、省工程補修とした場合でも鉄筋腐食が抑制されることがわかった。しかし、本試験は短期の塩水噴霧による試験であったため、耐久性に関してはさらなる検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

被覆材を施工したコンクリート構造物の一部に、塗膜割れやひび割れなどの劣化が生じている場合がある。そのような箇所に対する水掛かりの影響や有効な補修方法を調査するため、劣化や補修を模擬した試験体を作製した後、塩水噴霧試験を行い内部含水率と鉄筋の自然電位を測定した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 塗膜施工面に水掛かりがある場合、塗膜の施工により水分浸透を抑制でき、塗膜割れのみを生じている場合も同等の抑制効果が維持される可能性がある。一方、塗膜割れを伴うひび割れが生じた場合は、ひび割れ幅やひび割れ深さによらず水分がコンクリー

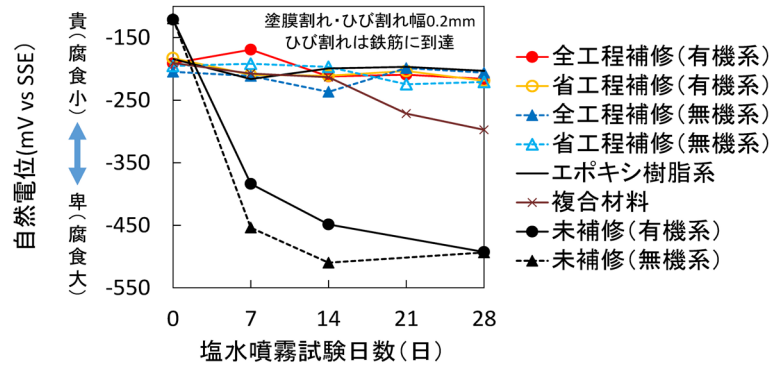


図10 補修後の自然電位の測定結果

- トに浸透する。
- (2) 水掛かり環境における塗膜施工の鉄筋腐食抑制効果は、塩水がかかるような条件下では、塗膜割れを伴うひび割れの深さが影響し、ひび割れが鉄筋位置に到達した場合に鉄筋が腐食傾向となる。
- (3) 補修工事において、使用材料によるひび割れ充填状況の相違により、ひび割れ部の表面上の様子や内部の充填箇所が異なる。また、一部工程を省力化した上塗りのみによる補修においても鉄筋腐食を抑制できる可能性がある。

文献

- 1) 土木学会 コンクリート標準示方書【標準編】 土木学会 規準および関連規準, P.448, 土木学会, 2018
- 2) 土木学会 コンクリートライブラリー 119 表面保護工法 設計施工指針(案) [工種別マニュアル編], P.71, 丸善, 2005
- 3) 宮本祐輔, 吉田幸司ほか: 報告 既設表面保護工の健全性と水の影響に関する実橋調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1321-1326, 2018