

論文 コンクリートへのシーリング目地の付着力と界面からの物質移動

富永 雄悟*1・塚越 雅幸*2・中山 一秀*3・上田 隆雄*4

要旨：コンクリート目地用シーリング材の界面からの漏水が内部の鉄筋腐食に及ぼす影響について実験的に検討を行なった。試験体は、シーリング材の種類と界面処理状況、コンクリートひび割れをパラメーターに作製した。これらを 5%NaCl 溶液への浸漬と気中乾燥を繰り返し、コンクリートかぶり 43.5 mm 位置の D13 鉄筋の自然電位等を測定することで、シーリング界面からの水分や酸素の物質移動の推定を試み、あわせて鉄筋の腐食状況を観察した。コンクリートとシーリング材界面部への異物の付着や充填不足などの不具合があった場合、界面からの漏水による鉄筋腐食が認められた。

キーワード：シーリング, 目地, 付着力, 界面, 物質移動, 鉄筋腐食

1. はじめに

コンクリート構造物は、温冷ムーブメントや地震動の影響など一定の変形が生じる。このような変形が発生した際に、コンクリート部材に予期せぬひび割れを発生させないよう、計画した場所にひび割れを誘発させるための誘発目地が一定の間隔で設けられる。コンクリートに生じたひび割れは漏水や劣化因子の浸入経路となり、雨漏り等の漏水の原因だけでなく、構造物の耐久性を著しく低下させる。そのため、目地部にはシーリング材が充填される。同様に、コンクリート 2 次製品同士の目地部分にもシーリング材が充填される(写真-1)。

一般的にシーリング材は、ウレタンやアクリル、シリコーン等を主原料とする高分子材であり、高い水密・気密性を持ち、かつ被着体のムーブメントに追従できる柔軟な変形性能を有する^{2,3)}。またシーリング材はその他、劣化等で生じたひび割れの充填や、打ち継ぎ目地の止水充填材としても用いられる場合がある。シーリング材は基本的には接着剤の一種であり、被着体となるコンクリートに適切に接着し充填されることで水密・気密性が確保される。ここで注意が必要な点として、高い接着力を有する材料であっても接着面に不具合箇所があった場合、その部分を選択的に水分や劣化因子が浸入してしまう危険性がある事である。これまで、目地部の止水性についてムーブメントに対する検討はされているものの^{4,5,6)}、接着面の状態について検討された事例は少ない。

本研究では、シーリング材の施工時の不具合として生じる可能性のある、被着体コンクリート表面への不純物質の付着とシーリング材の充填不足を想定した試験体を用いて、界面からの物質の浸透が内在する鉄筋の腐食に及ぼす影響について、実験的に検討を行なった。



写真-1 シール目地部の例

2. 試験体の作製と試験方法

2.1 シーリングの付着力測定用試験体と引張試験

(1) 引張試験用試験体の作製

被着体として用いたモルタルは、W/C=55%, S/C=240%とし、図-1に示すように、30×70×10 厚さ mm の板状の形状とした。このモルタル板 2 枚の間に、長さ 50 mm で厚さ 10 mm、目地幅 10 mm となるようにシーリング材を施工したものを試験体とした。モルタルは型枠に打設後、翌日に脱型し 28 日間 20℃の水槽内で養生し、その後 2 週間、20±5℃、60±10%R.H.の実験室内で乾燥させた。その後、シーリング材を同実験室内で施工し 28 日間そのまま養生した。

シーリング材はウレタン系のものを 2 種類、シリコーン系の物を 1 種類用いた。さらに、ウレタン系シーリング材のうち、低モジュラスの物については、模擬的に初期不具合⁷⁾として、プライマーを施工したものとしていないものに対して、被着体の片面 50%に刷毛でグリースを塗布したもの、シーリング材の充填量を重量換算で 30%減少させた物を準備した。準備した試験体の種類についてまとめて表-1に示す。

*1 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 理工学部研究部理工学部門社会基盤デザイン系助教 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース博士後期課程修士(工学) (学生会員)

*4 徳島大学大学院 理工学部研究部 理工学部門社会基盤デザイン系教授 博士(工学) (正会員)

(2) 引張試験

試験は、JIS A 1439:2010 建築用シーリング材の試験方法を参考に、引張速度 5.5 mm/min で、20±2℃の実験室内にて行った。試験の状況を写真-2 に示す。なお、引張装置の治具に固定する際に被着体のモルタルが破壊するのを防止するために、治具とモルタル間に厚さ 2.0 mm 程度のウレタンゴム系の緩衝材を挿入してあるが、試験時に滑り等は生じていない。

2.2 シーリングとコンクリート界面からの水分浸透試験

(1) 塩水浸漬試験用試験体の作製

被着体となるコンクリートの調合を表-2 に示す。コンクリート試験体は、100×300×厚さ 100 mm の角柱と

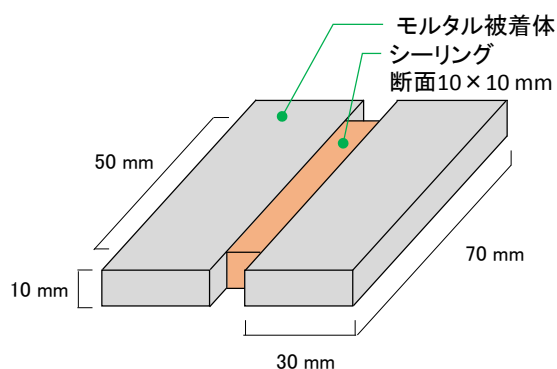


図-1 引張試験用試験体形状と寸法

表-1 試験体の種類

試験体名	シーリング材	プライマー	不具合
PU-①	低モジュラスウレタン	あり	-
		なし	-
			汚れ 充填不足
PU-②	高モジュラスウレタン	なし	-
SR	シリコーン		-

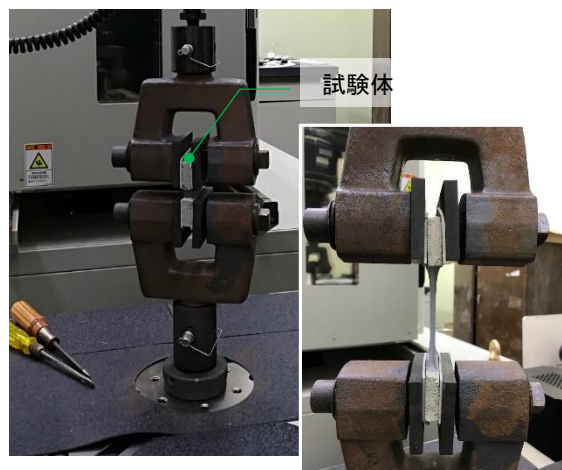


写真-2 シーリングの引張試験状況

し、断面中央部分に両端部 40 mm をエポキシ樹脂にてコーティングした D13 鉄筋を埋設した。また、シーリング材を充填するために、試験体長手方向中央位置に直行するように断面が 20×20 mm の切り欠きを設けた。なお、比較のためにシーリング材を施工しないコンクリート試験体には切り欠きは設けていない。コンクリートを型枠に打設後、先の引張試験用試験体と同様に養生、シーリング材の施工を行った。用意した試験体の種類も同様である。

シーリング材の養生後、シーリング直下のコンクリート部分にひび割れを生じさせたものも用意した。ひび割れは油圧式圧縮試験機を用いて 3 点曲げにより与え、こ

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				空気量 (%)
		W	C	S	G	
0.55	0.45	179	325	773	945	5.0

W : 水道水, C : 普通ポルトランドセメント (密度 : 3.16 g/cm³, 比表面積 : 3280 cm²/g), S : 徳島県鳴門市撫養町産砕砂 (表乾密度 : 2.56 g/cm³, 吸水率 : 1.77%, F.M. : 2.79) G : 鳴門市撫養町産砕石 (表乾密度 : 2.55 g/cm³, 吸水率 : 1.61%, G_{max} : 15mm) 28日圧縮強度 : 46.8 N/mm²

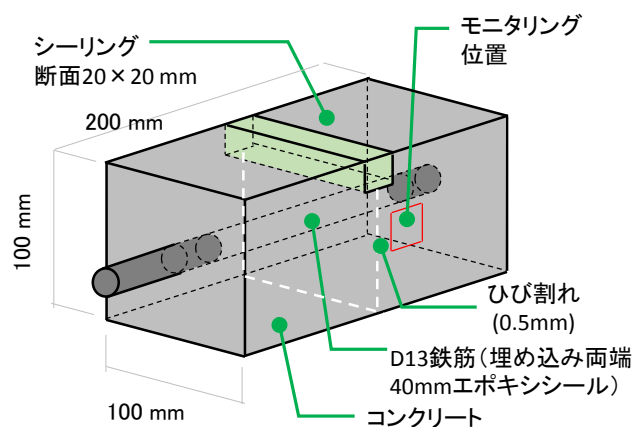


図-2 塩水浸漬用コンクリート試験体の概要

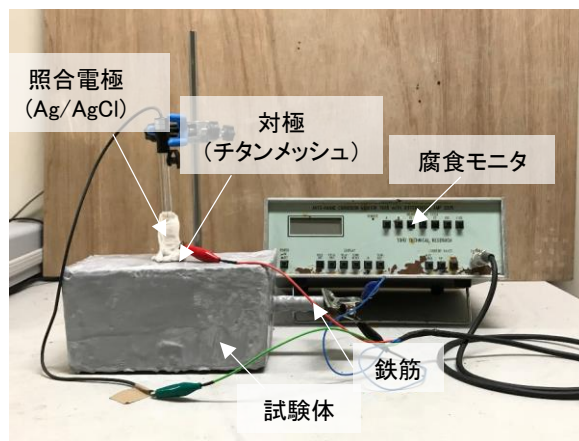


写真-3 電気化学的モニタリング状況

の時、載荷時に引張側となるシーリング材に接する面のひび割れ幅が 0.5 mm となるようにクラックスケールを用いて制御し、除荷前にステンレス製スペーサーをひび割れ端部に挿入し固定した。その後、暴露面となるシーリング材が施工された面の端部 2 cm と、暴露面以外はすべてエポキシ樹脂にて完全にシールした。

(2) 塩水浸漬・乾燥試験

シーリング材とコンクリートの界面からの水分や塩化物イオン、酸素の浸透による鉄筋の腐食状況を電気化学的モニタリング手法を用いて検討した。実験は浸透試験体を 5% NaCl 溶液への浸漬と 20±5℃、60±10%R.H.の実験室内での乾燥の繰り返し環境で保管した。浸漬は、試験体全体が塩水中に浸漬されるように配置した。試験開始直後は十分水分が浸透するよう 2 週間塩水浸漬し、その後は一定期間の気中乾燥と、塩水浸漬を繰り返した。塩水浸漬と気中乾燥を変更するタイミングで、電気化学的鉄筋腐食指標（自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗）を定期的に測定した。また、電気化学的測定を行うため、エポキシ樹脂を塗布した側面に対して、ひび割れの横、約 10mm の位置に縦横 20mm の測定窓を開け（図-2）、ここに露出したコンクリート表面部分に照合電極と対極を含水状態の脱脂綿を介して密着させて測定を実施した（写真-3）。測定終了後は、劣化因子の侵入を防ぐため、アルミテープで測定窓を閉塞した。

電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行う際の照合電極は、飽和銀塩化銀電極（Ag/AgCl）、対極にはチタンメッシュを用いて、試験体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流 10 μA、周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値の差から求め、コンクリート抵抗は高周波数側（800 Hz）のインピーダンス値として求めた。

3. 試験結果

3.1 シーリングの引張試験結果

伸び率と引張強度の関係について、図-3 に代表データをそれぞれ 1 つずつ示す。また、試験後の破壊の状況を表-3 に示す。なお試験は各パラメーター 3 体ずつ行っており、伸び率と引張強度はその平均の値を示している。使用した材料間の違いについては、同様のウレタン系の 2 種でも、PU-①は低モジュラスな物であり、比較的引張強度が低く伸び率が大きく、PU-②はその逆となる特性を持つ材料である。SR はその両者の中間的な機械的性質を持っている。

界面処理の影響については、プライマーを使用しない場合、伸び率が 5% ほど低下した。また界面にグリースを塗布したのも若干の強度低下と 5% ほどの伸び率の低下が見られた。最も強度と伸び率が低下したものが充填

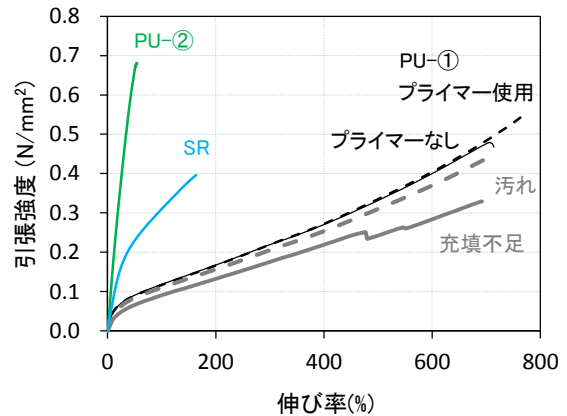


図-3 シーリング材の引張強度と伸び率の関係

不足の試験体であり、伸び率 500%の手前でシーリング材中央部あたりで破断が生じており、引張強度は 33%、伸び率は 10%ほど低下した。なお、全ての試験体で最終的には若干の被着体のモルタルの剥離があったが、被着体とシーリング材界面の界面剥離で破壊した。

3.2 塩水浸漬・乾燥試験結果

78 日間促進環境で保管した試験体の電気化学的鉄筋腐食指標については、全て 2 体ずつの試験体で測定を行っており、試験結果はその平均値である。

(1) シーリング材の有無・プライマー処理の影響

シーリング材・プライマーの有無が自然電位に与える影響について図-4 に示す。なお、自然電位については、ASTM C 876-91 の腐食判定基準を参考にすると、照合電極が飽和銀塩化銀（Ag/AgCl）の場合、-0.09 V より貴な電位で 90%以上の確率で腐食なし、-0.24 V より卑な電位で、90%以上の確率で腐食あり、その間の電位で不確定と評価される。

初期の 2 週間の塩水浸漬により全ての試験体で自然電位が急激に卑化している。これは、2 週間の塩水浸漬により鉄筋近傍へ酸素が供給されず貧酸素状態になったことで鉄筋の不動態皮膜の形成が阻害されたことが原因と考えられ、その後の気中乾燥で酸素が供給され電位が貴化していることが確認できる。

その後の塩水浸漬と気中乾燥の繰り返し期間では、験体間の差はほとんどなく浸透量の差異までの判定は難しかった。しかし、シーリングが施工された試験体は、コンクリート単体試験体に比べて塩水浸漬と気中乾燥の繰り返しによる値の変動が小さいことが分かる。これはシーリング材により外部環境の変化の影響が抑制されたためではないかと思われる。

(2) シーリング材の種類の影響

同図-4 より、今回用いたシーリング材の種類の違いについては、若干 PU-①の試験体が全体的に貴な値をとっているが、シーリング材を施工した全ての試験体で-0.09V 程度の非腐食域にあった。一方で、シーリング材

表-3 シーリング材の引張試験結果

試験体名	プライマー	不具合	破壊モードと破壊面	破断時 伸び率 (%)	引張強度 (N/mm ²)
PU-①	あり	-	 剥離した シーリング側面 界面剥離	765	0.53
	なし	-		733	0.48
		汚れ		707	0.46
		充填不足	 シーリング破壊 界面剥離	688	0.35
PU-②	なし	-		53	0.62
SR	なし	-		150	0.37

の付着強度は PU-①で 0.48 N/mm² , PU-②で 0.62 N/mm² , SR で 0.37 N/mm²であったが、自然電位との相関性は見られない。このことより、シーリング材とコンクリート界面からの透水抑制効果を付着強度から推定することは困難であると考えられ、接着性能と界面からの物質移動性能については個々に検討する必要があると思われる。またプライマーの有無の影響についてはあまり差が見られなかったが、今後、躯体のムーブメントや耐候劣化等による物理・化学的劣化の影響などについて検討が必要であると思われる。

(3) シーリング材の界面処理の影響

シーリング材の界面処理が電気化学的鉄筋腐食指標に与える影響についてまとめて図-5 に示す。図-5(a) に示す自然電位の測定結果を見ると、界面部の汚れ処理を施した試験体と、シーリング材の充填不足の試験体では、乾湿どちらの条件下にあっても常に-0.09V より卑な値となっていることから腐食の可能性がうかがえ、また乾湿繰り返し時の電位の変化が大きいことから、より外部環境の変化の影響を受けていることが分かる。これは

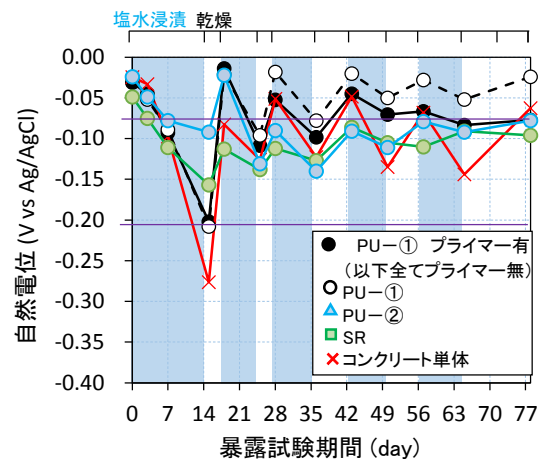
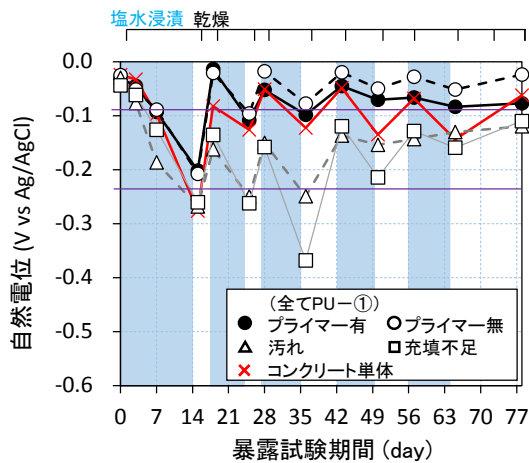


図-4 ひび割れなし試験体の自然電位の経時変化

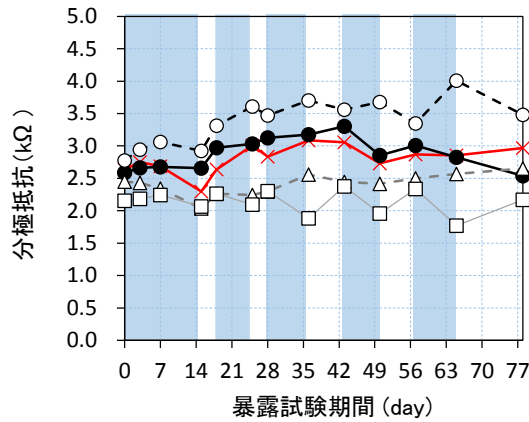
汚れ処理試験体については、物理的な被着体との接着力低下、充填不足試験体については被着体との接着面積の低下により、界面からの塩水や酸素の移動量が大きくなったためだと推測される。

図-5(b) の鉄筋腐食速度の逆数に比例する分極抵抗の値を見ると、汚れ処理試験体および充填不足試験体は

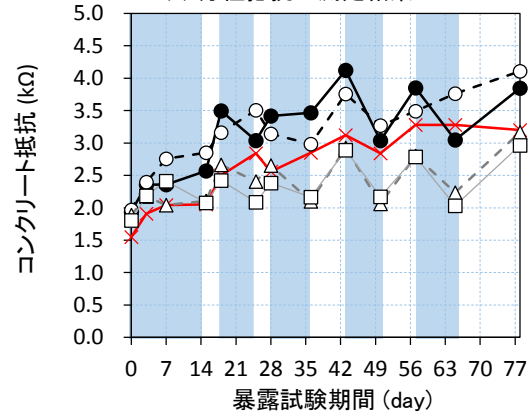
2.0k Ω 程度の値をほぼ横這いで推移しているが、その他の試験体では途中から変化が緩慢になっているが全体的に徐々に大きな値へとシフトしている。これは、図-5(c)のかぶり部分のコンクリートの電気抵抗であるコンクリート抵抗の値をみると、全ての試験体で全体的に大きな値へとシフトしており、セメントの水和の進行による組織の緻密化が影響しているものと思われる。また塩水への浸漬期間は全試験体で抵抗値が低下する傾向にあり、水分の浸透によりコンクリートの電気抵抗値が低下したものである。



(a) 自然電位の測定結果



(b) 分極抵抗の測定結果

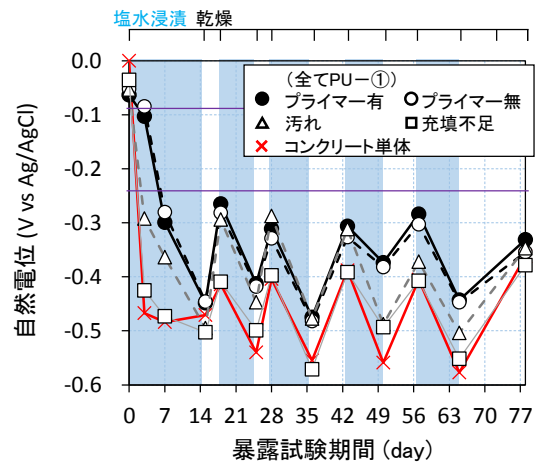


(c) コンクリート抵抗の測定結果

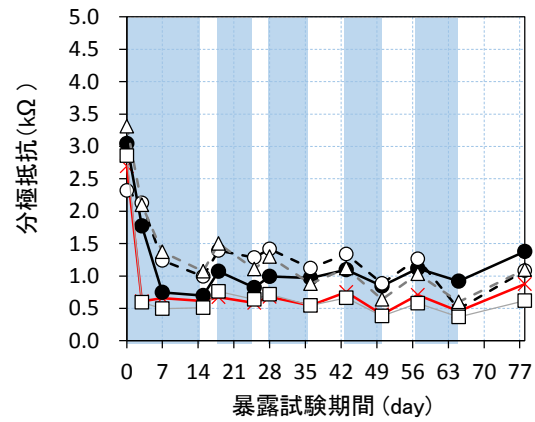
図-5 ひび割れなし試験体の電気化学的鉄筋腐食指標の経時変化(界面処理の影響)

(4) シーリング下のコンクリートひび割れの影響

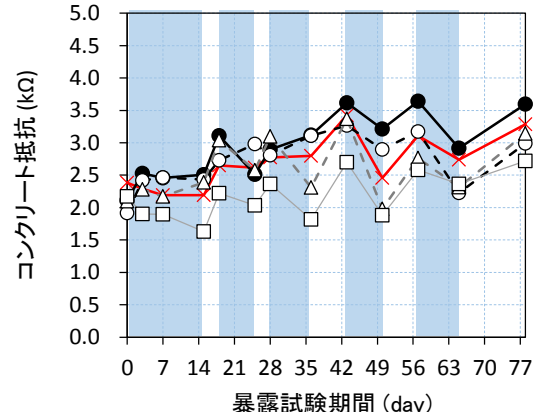
シーリング材直下のコンクリートひび割れが電気化学的鉄筋腐食指標に与える影響についてまとめて図-6に示す。図-6(a)の自然電位に関しては、すべての試験体で-0.3 から-0.5 V 程度と腐食領域にあることを示す卑な値となっている。同様に図-6(b)の分極抵抗を見ても試験開始前は 3.0k Ω 程度であった抵抗値が、0.5 から 1.5 k Ω 程度まで低下している。これらの値より、ひび割れなしの試験体に比べて厳しい腐食環境にあることが分かる。本研究で用いた試験体は暴露面の幅(鉄筋の暴露長さ)



(a) 自然電位の測定結果



(b) 分極抵抗の測定結果



(c) コンクリート抵抗の測定結果

図-6 ひび割れあり試験体の電気化学的鉄筋腐食指標の経時変化

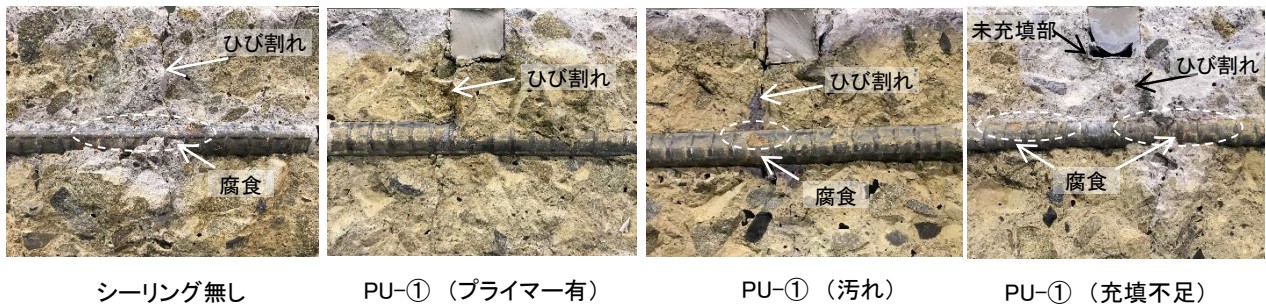


写真-4 硝酸銀噴霧による塩化物イオン浸透状況の確認結果例

同じ)12 cm に対して、シーリング材の幅は 2 cm であり、暴露面の面積割合に換算すると 12.5%の影響幅しかないが、シーリング直下のコンクリートにひび割れを生じさせたことにより、シーリング材とコンクリートとの界面から浸入した水分が、このひび割れに沿ってより早期に鉄筋まで伝わり、腐食指標の変化として捉えられたものと思われる。また、図-6(c)のコンクリート抵抗は、ひび割れ無しの試験体と比べて全体的に小さい値となっていることから、ひび割れを介して水分が浸透し、かぶりコンクリート部分が高含水状態になっていることがうかがえる。

今回行った電気化学的モニタリング結果は、測定中でのコンクリートの水和の影響とひび割れの影響の方が、シーリング材の種類や不具合の影響よりも強く表れており、また水分、塩化物イオン、酸素の影響が複合的に作用しているため、外部からの物質それぞれの移動量について定量的に議論することは難しい。今後センサー等を用いるなど測定方法について検討したい。

(5) 塩分の浸透と鉄筋腐食状況の確認

試験終了後、試験体をシーリング材と直行方向に割裂し、0.1N 硝酸銀溶液を噴霧した結果を写真-4 に示す。硝酸銀噴霧後白色化している部分は塩化物イオンが浸透している部分である。シーリング材が健全に施工された場合、塩化物イオンの浸透は確認されておらず、鉄筋は健全な環境にあった。しかし、不具合があった試験体では、界面部とひび割れ近傍部に塩化物イオンの浸透と鉄筋の腐食が確認された。

4. 結論

シーリング材とコンクリートの界面部の物質移動が内在する鉄筋腐食に及ぼす影響について、塩水浸漬試験を行いコンクリート中に埋設した鉄筋腐食状況の電気化学的モニタリングと、目視による鉄筋の腐食状況の観察した結果を以下にまとめる。

1. 本研究で用いたシーリング材を健全に施工することで、その高い止水性によりコンクリートへの水分の浸透量が抑制された。

2. ただし、シーリング材と被着体であるコンクリートとの界面の汚れや、シーリング材の充填不足が生じ、かつシーリング材直下のコンクリートにひび割れが生じた場合では、界面から浸入した水分がより早期に鉄筋まで伝わり、鉄筋がより厳しい腐食環境に曝されていた事が、暴露試験後の鉄筋腐食状態の観察結果から明らかとなった。以上の結果は、使用環境によっては、界面から劣化因子が浸入してしまう危険性がある事が示唆され、シーリング材を健全に施工することは、シーリング材のみならず、RC 部材の耐久性にも強い影響があると言える。

参考文献

- 1) 片岡弘安， 淵田安浩， 人見尚：吸水ポリマーを利用した誘発目地ひび割れ部の漏水防止に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66， No.1， pp.592-599， 2012
- 2) 榎本教良:建築用シーリング材の防水機能に対する耐久性，接着の技術， Vol.31， No.4， pp.14-20， 2012
- 3) 榎本教良， 田中享二：建築用シーリング材の耐候性に対する動的変形の影響の定量化に関する研究，日本建築学会構造系論文集， Vol.72， No.619， pp.27-32， 2007
- 4) 山科祐太， 鈴木好幸， 濱幸雄， 谷口円：止水型コンクリートひび割れ誘発目地材の付着性および止水性の評価， 日本建築学会北海道支部研究報告集， Vol.83， pp.1-4， 2010
- 5) 藤山宗， 渡部直人， 長野浩一， 伊藤夕樹， 樽屋啓之， 中田達：コンクリート開水路を対象とした水膨張性ゴムによる目地補修工法の止水性と耐久性，農業農村工学会論文集， Vol.81， No.3， pp.279-280， 2013
- 6) 森丈久， 中矢哲郎， 石神暁郎， 加藤智丈：接着型テープによる小規模コンクリート水路の簡易漏水補修工法の開発， 農業農村工学会論文集， Vol.78， No.6， pp.523-530， 2010
- 7) 田中享二， 榎本教良：シーリング材防水における不具合責任に関する事例研究，日本建築学会学術講演梗概集 2013(材料施工)， pp.917-918， 2013