

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

宮本 祐輔*1・吉田 幸司*2・仲佐 俊之*3・小池 豊久*4

要旨: 東海道新幹線のコンクリート高架橋 200 セットを対象に、1999 年より施工している既設表面保護工（塗装系）の健全性と効果について実橋調査を行った。その結果、既設表面保護工は概ね健全な状態であり、中性化防止効果が発揮されていることを確認した。また、水による鉄筋腐食への影響程度を調査した結果、水によってコンクリートの含水率は高くなるもの、著しい劣化は生じていないことを確認した。

キーワード: 表面保護工, 表面被覆工, 塗膜, 中性化, 水

1. はじめに

開業後 50 年以上が経過する東海道新幹線のコンクリート構造物は、現在も適切な維持管理により健全性を維持している。一方で、鉄筋コンクリート構造物の経年劣化の 1 つにコンクリートの中性化に伴う鉄筋腐食が懸念され、維持管理上の課題の 1 つとなっている。これに対し、1999 年 7 月に「東海道新幹線コンクリート構造物維持管理標準」¹⁾（以下、維持管理標準と略す）を制定し、コンクリートの中性化対策として図-1 のように表面保護工（塗装系）を施工してきた。また、予防保全として平成 25 年度より大規模改修工事に着手し、変状発生抑止対策として高架橋の梁や中央スラブについては表面保護工、はね出しスラブについては恒久対策として鋼板接着を施工している²⁾。

一方で、高架橋における既設表面保護工は、維持管理標準に則って施工後、最大 18 年が経過しており、既設表面保護工の健全性や耐久性が明らかになっていない。また、鉄筋コンクリート構造物では中性化と比べて水掛かりの方が鉄筋腐食に伴う剥落に及ぼす影響が大きい可能性があることが報告されている³⁾。

そこで、東海道新幹線の高架橋を対象に、既設表面保



図-1 新幹線高架橋における既設表面保護工¹⁾

護工の健全性と水の影響を確認することを目的として実橋調査を行ったので、その結果について報告する。

2. 既設表面保護工の健全性に関する調査概要

2.1 調査対象

調査対象の既設表面保護工は、表-1 に示すように維持管理標準にて定める 4 種類の塗装種別とした。それぞれの主な特徴は次のとおりである。

表-1 維持管理標準における塗装種別と施工部位¹⁾

種別	Ae種	A種	B種	C種
対象部位 (高架橋)	縦梁中央部 (下面・側面)	縦梁ハンチ部 (下面・側面) 横梁部 (下面・側面)	中央スラブ部	はねだしスラブ部
1. 外観	塗膜は均一で、ながれ・むら・ふくれ・はがれのないこと。			
2. 耐アルカリ性	水酸化カルシウムの飽和水溶液に30日間浸漬しても塗膜にふくれ・われ・はがれ・軟化・溶出のないこと。			
3. 耐候性	3000時間の促進耐候性試験を行った後、白亜化が極めてわずかであり、塗膜にわれ・はがれがなく、色の変化の程度が原状試験片と比べて大きくないこと。			
4. 接着性	標準状態	1.0N/mm ² 以上		
	耐アルカリ性試験後	0.7N/mm ² 以上		
5. 中性化抑止性	中性化深さ3mm以下 (二酸化炭素濃度5%の促進状態で10週間静置後)			
6. 水蒸気透過性 促進耐候性試験後 (3000時間)	1mg/cm ² ・日以下	5~10	10mg/cm ² ・日以下	
		mg/cm ² ・日		
7. 酸素透過性 促進耐候性試験後 (3000時間)	0.05mg/cm ² ・日以下			—
8. 耐疲労性	標準養生後 促進耐候性試験後 (3000時間)	塗膜のひび割れ・破断がないこと。		
		—	—	—
9. ひび割れ 追従性	標準状態	0.6mm以上	0.4mm以上	—
	低温時 (0℃) 促進耐候性試験後 (3000時間)	—	0.3mm以上	0.2mm以上
10. 押し抜き荷重試験	—	—	—	1.5kN以上

*1 東海旅客鉄道 (株) 総合技術本部 技術開発部 研究員 工修(正会員)

*2 東海旅客鉄道 (株) 総合技術本部 技術開発部 チームマネージャー 工博(正会員)

*3 ジェイアール東海コンサルタンツ (株) 調査事業部 開発技術部

*4 ジェイアール東海コンサルタンツ (株) 調査事業部 開発技術部

A種・Ae種は列車荷重を直接支える梁部材に施工するため、ひび割れ追従性に優れた材料であり、Ae種は耐疲労性を要求している。B種は内部からの水分を外へ逃がすため水蒸気透過性に優れた材料であり、水蒸気透過性に下限値を設けている。C種は剥落等による公衆災害防止のため繊維シートを用いた材料であり、押し抜き荷重に対する抵抗性を要求している。なお、維持管理標準は（一社）日本鉄道施設協会にて発行されており、品質規格を満たす材料であれば、どの塗料メーカーの製品でも採用可能である。施工実績として、維持管理標準制定直後は複数メーカーの塗料を使用していたが、2003年以降は概ね同一製品（表-2）を施工している傾向にある。

調査対象の構造物は新幹線高架橋200セットとし、図-2のように既設表面保護工の施工年度や地区（東京、静岡、名古屋、大阪）を分散させて選定した。

表-2 各塗装種別の主な使用材料

塗装種別	上塗材	中塗材
A種	フッ素樹脂塗料	エポキシ樹脂塗料
Ae種	フッ素樹脂塗料	ポリブタジエン樹脂塗料
B種	アクリル系塗料	ポリマーセメント系無機質材
C種	シリカ系塗料	アクリル系ポリマーセメントモルタル

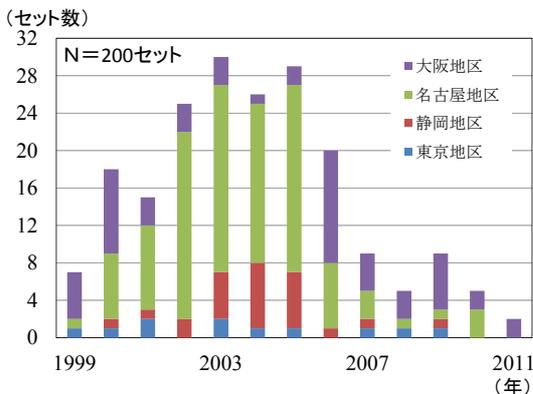


図-2 調査対象構造物の内訳

2.2 調査項目および位置

各高架橋における調査項目は、接着性試験・膜厚測定・ひび割れ調査・紫外線測定・中性化深さの5項目とした。各調査項目の具体的な内容を以下に示す。また、各高架橋における調査位置は図-3による。

(1) 接着性試験

JSCE K531-1999「表面保護材の付着強さ試験方法」に準拠し、既設塗膜に接着性試験用治具（40mm×40mm）を接着し、治具周辺に切り込みを入れてから建研式接着力試験器（LPT-400型）を用いて引張力を加え、破断時の最大引張荷重から付着力を算出した。

(2) 膜厚測定

接着性試験により採取した試料を用いて、塗膜断面を

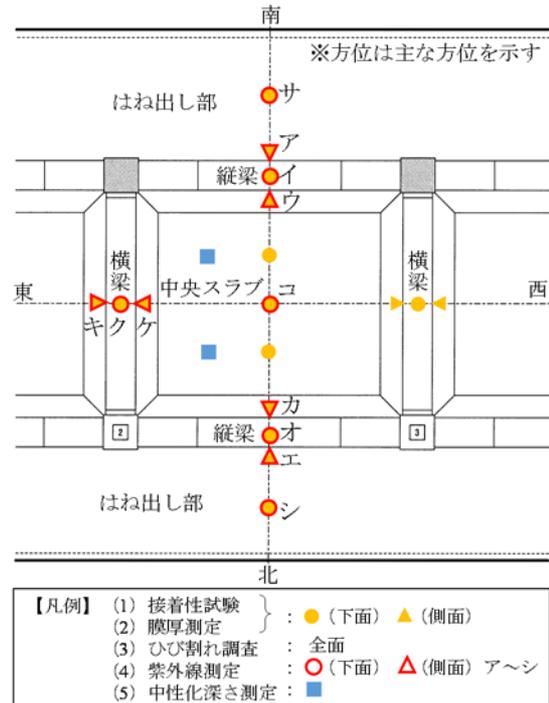


図-3 調査位置（高架橋平面図）

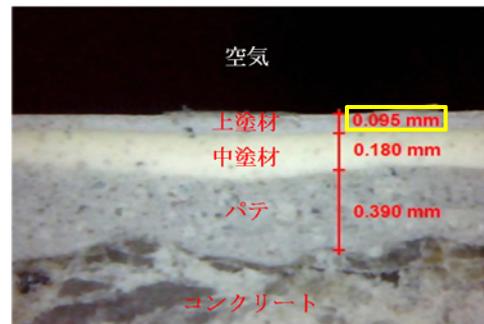


図-4 膜厚測定状況

デジタルファインスコープ（OMRON VC3500）にて観察し、上塗材の残存膜厚の測定を行った。測定イメージを図-4に示す。

(3) ひび割れ調査

既設塗膜のひび割れの有無を、塗装全面に亘って近接目視にて確認した。

(4) 紫外線測定

高架橋の梁、中央スラブ、はね出しスラブにおける紫外線強度（UV-A）を測定した。測定方法は、紫外線強度計（UV-37SD）を使用して、概ね9時・12時・15時の計3回測定し、その時の直射日光も併せて記録した。

(5) 中性化深さ測定

表面保護工施工済みの高架橋の中央スラブにおいてコア削孔によりコアを採取し、JIS A1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し、コア側面にフェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧することにより中性化深さを測定した。

3. 調査結果

3.1 結果および考察

(1) 接着性試験

接着性試験結果を、図-5 に示す。試験結果のばらつきが大きいものの、殆どの既設塗膜（全体の約98%）で標準状態の基準値である $1\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の付着力を有することを確認した。また、付着強さのばらつきの範囲は、施工年度毎で有意な差は確認されなかった。

なお、付着力が基準値を下回る箇所については、施工不良箇所や漏水箇所を除き、塗膜の膨れや剥がれは生じていなく、中性化抑止効果に問題は生じていない。しかし、付着力の確保は塗膜の耐久性において重要な品質管理項目であることから、付着力が基準値を下回った原因について検討するため、C種を対象に次のとおり現地調査を実施した。

まず、塗膜背面のコンクリートに含まれる水の影響について確認するために含水率を測定した。測定方法は、ブラシ式のコンクリート・モルタル水分計を用いて、表面から深さ100mmまで10mm間隔で含水率を測定し、3測点の平均値を測定値とした。その結果、図-6 に示すように、付着力の大小によって含水率の分布に殆ど差が無く、コンクリート表面付近での含水率は3%前後であった。これは維持管理標準にて定める施工時の品質管理

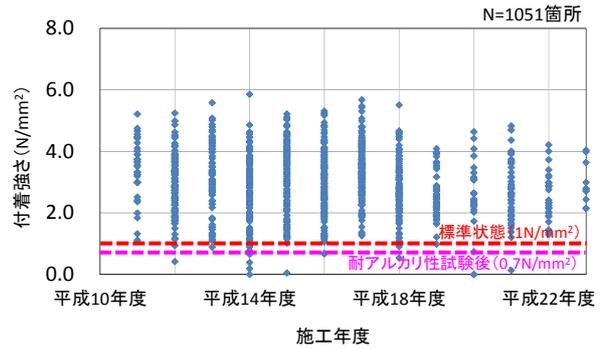


図-5 施工年度別接着強さ（全塗装種別）

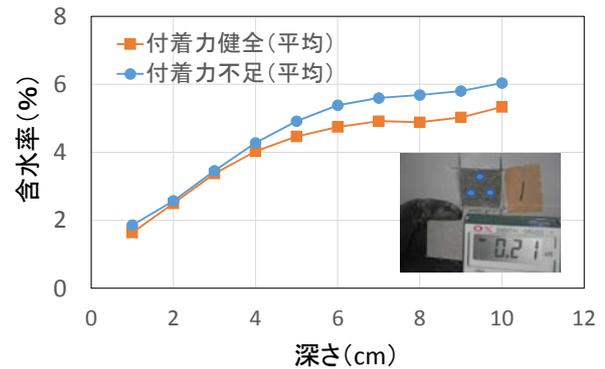


図-6 含水率の分布（C種）

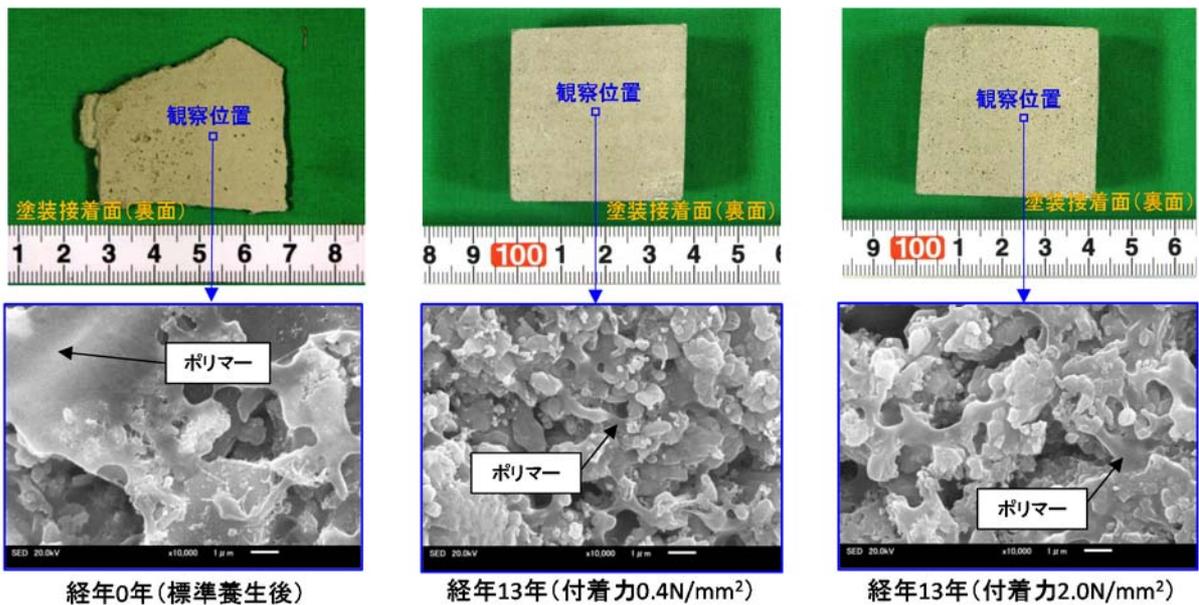


図-7 SEMによる塗膜接着面の観察結果（1万倍）

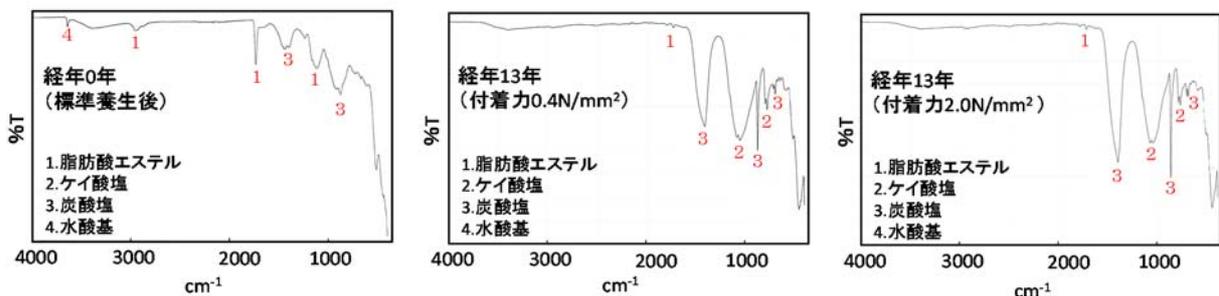


図-8 FT-IRによる分子構造の分析結果

基準 6%を十分に下回る値であり、乾燥した状態といえる。したがって、施工当時の含水率や供用期間中の履歴は不明であるが、調査時点の含水率から推測すれば水による影響の可能性は低いと考えられる。

続いて、塗膜の化学的な構造変化の有無について確認するため、走査型電子顕微鏡 (SEM) にて既設塗膜の接着面を観察した。その結果、図-7 に示すように、新たに製作した試料 (標準用養生後) と比較すると、若干ではあるが、ポーラスな構造となっていることを確認した。また、赤外分光光度計 (FT-IR) にて分子構造を分析すると、図-8 のように経年 13 年後の既設塗膜では、C=O 由来の吸収スペクトル (図中 1) の減少など、化学的变化が確認された。これは、水によってエステル結合の一部が分解したためと推測される。ただし、付着力が基準値を上回る塗膜 (図-8 右図) と下回る塗膜 (図-8 中図) を比較しても、分子構造に明確な差は確認されなかったことから、経年により化学的变化は生じるものの、付着力不足の原因である可能性は低い。

(2) 膜厚測定

A 種および Ae 種の上塗材の膜厚測定結果を、図-9、図-10 に示す。なお、結果は表-2 に示す製品について示しており、グラフ上にある目標膜厚とは、施工時に所定の膜厚が確保されていることを確認するために、高架橋 1 セット毎に 5 ヲ所、各層毎にウェットゲージを用いて測定をしている施工管理基準値である。測定結果より、全ての測定箇所の上塗材が残存していることを確認した。また、経年による劣化傾向は見られず、目視でも白亜化は殆ど確認されなかった。一般にフッ素の減耗速度は遅い (年間で 0.数 μm オーダー) ことを考慮すれば、上塗材が消耗するまで期間には十分に余裕があると考えられる。

続いて、B 種および C 種の上塗材の膜厚測定結果を図-11、図-12 に示す。これらについても表-2 に示す製品について結果を示している。なお、B 種および C 種は無機材料を含む塗料であるため、塗装内に骨材が介在しウェットゲージによる膜厚管理が困難であることから、目標膜厚による施工管理はしていない。そのため、塗料メーカーが塗装仕様書で指定する標準塗布量から膜厚を換算し、標準膜厚としてグラフ上に示した。結果より、経年による劣化傾向は見られなく、B 種および C 種についても塗膜の十分な残存量が確認できた。

(3) ひび割れ調査

既設塗膜のひび割れ状況について確認した結果、図-13 左のように縦梁の A 種、Ae 種にてひび割れが確認された。これらのひび割れは下地コンクリートの曲げひび割れの動的挙動によって生じた塗膜ひび割れであり (鋼

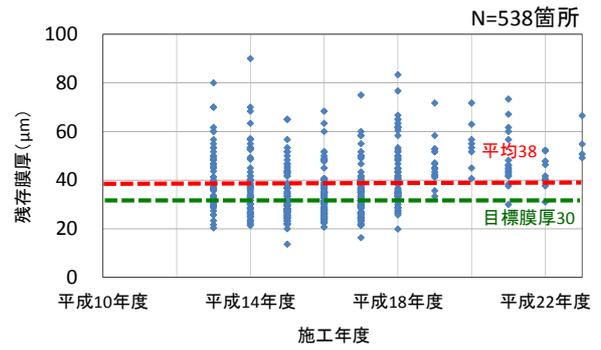


図-9 上塗材の膜厚 (A 種)

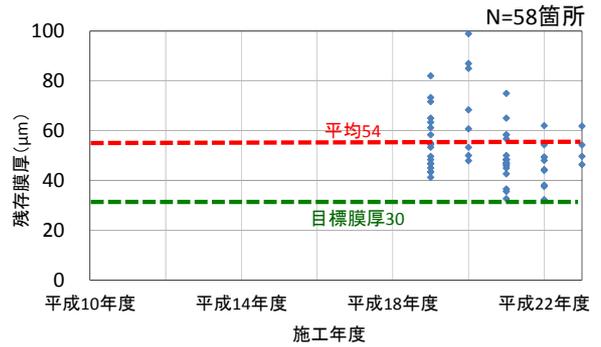


図-10 上塗材の膜厚 (Ae 種)

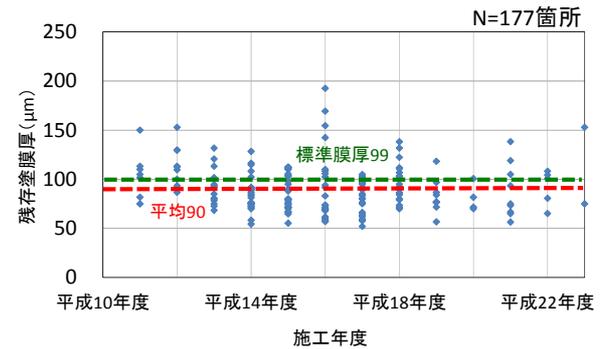


図-11 上塗材の膜厚 (B 種)

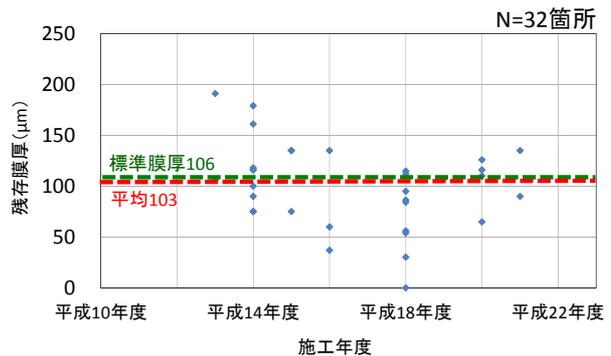


図-12 上塗材の膜厚 (C 種)

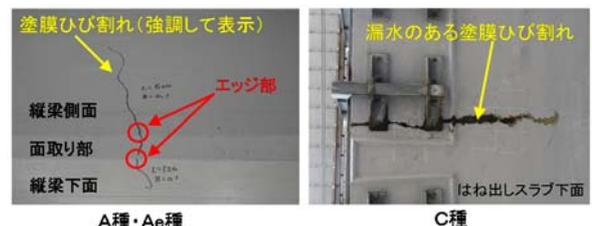


図-13 塗膜ひび割れの調査結果

材腐食によるものではない), 縦梁下側と側面の境界付近(エッジ部)に生じる膜厚不足が主たる原因であることを確認済みである⁴⁾。また, Ae種は耐疲労性能に優れるため, A種に比べてひび割れの発生を抑制できている。一方で, B種およびC種のひび割れ発生は比較的少なかった。なお, C種では, はね出しスラブ部の目地部から進展したひび割れにおいて漏水やエフロレッセンスが確認されたことから, 水の影響による劣化状況について現地調査を行った。その詳細について3節にて述べる。

(4) 紫外線測定

紫外線強度の測定結果(平均値)を, 図-14に示す。結果より, 現地の塗膜が受ける紫外線強度は直射日光に比べて非常に小さく, 直射日光に対して概ね数%程度であった。これは, 一般に高架橋に施工している表面保護工はスラブ下面であるため, 直射日光は当たらず, 照り返しによる影響は少ないためと考えられる。このように紫外線の影響が少ないことが一因で, 現地塗膜は十分に上塗材が残存していたと推測される。

(5) 中性化深さ測定

表面保護工施工前後における同一高架橋のコンクリートの中性化深さを, 図-15に示す。中性化深さは測定場所によって大きく異なり比較が困難なため, 平均値にて表示している。今回の測定結果より, 表面保護工施工前は12.7mmであるのに対し, 施工後は12.9mmであることから, 中性化深さは殆ど進行していなかった。なお, 表面保護工を仮に施工しなかった場合の \sqrt{t} 則による同

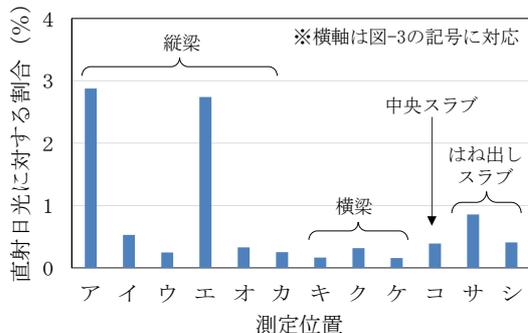


図-14 紫外線強度測定結果

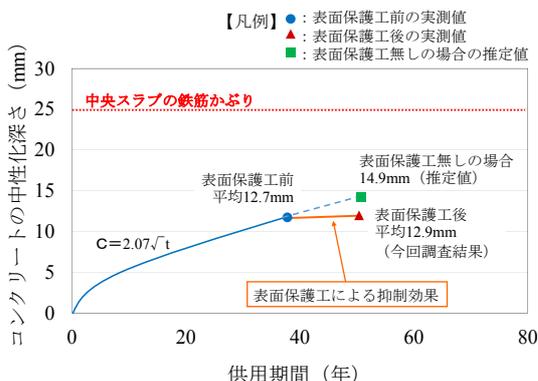


図-15 中性化深さ測定結果

年の推定値(14.9mm)と比べて中性化の進行が鈍化していることから, 中性化抑制効果が確認できた。なお, 中央スラブの鉄筋かぶりに対して, 一般に中性化残りの限界値とされる10mm⁵⁾以上の中性化残りを有していた。

3. 既設表面保護工箇所の水の影響に関する調査概要

3.1 調査対象

前節の既設表面保護工のひび割れ調査において, はね出しスラブのC種では, 目地部から進展したひび割れにおいて漏水やエフロレッセンスが確認されたことから, 水の影響について現地調査を実施した。調査対象は高架橋7セットとし, 全てひび割れがある箇所を選定した。水掛かりパターンは3種類(漏水, エフロ付着, 水掛かり無し)とし, 「漏水」とは晴天時においてもスラブ上面の目地部から供給される水が, 目地部から進展したひび割れを通じて下面から滴る箇所を示す(図-16左図)。また, 「エフロ付着」とは, 漏水はないがエフロレッセンスによって塗装表面が白く変色している箇所を示す(図-16右図)。



図-16 調査箇所(水掛かり箇所)

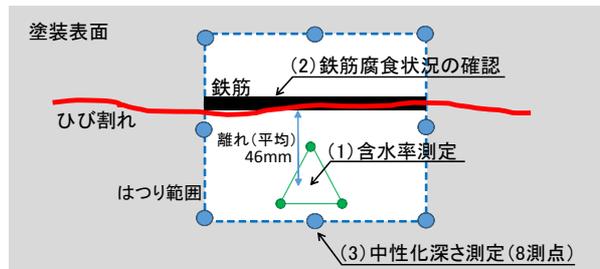


図-17 調査項目と位置

3.2 調査項目および位置

調査項目および方法を, 図-17に示す。

(1) 含水率測定

ブラシ式のコンクリート・モルタル水分計を用いて, 表面から深さ100mmまで10mm間隔で含水率を測定し, 3測点の平均値を測定値とした。

(2) 鉄筋腐食状況の確認

コンクリートを鉄筋裏まではつり出し, 鉄筋の腐食区分を「コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針」⁶⁾を参考に判定した。

(3) 中性化深さ測定

上記(2)のはつり断面において, フェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧し, 中性化深さを測定し

た。測定値は、8 点の平均値とした。

3.3 結果および考察

(1) 含水率測定

含水率の測定結果を図-18 に示す。結果より、測定位置がコンクリート表面から深くなるにつれて、含水率が徐々に大きくなる傾向が確認された。また、水掛かりのある箇所は、水掛かりのない箇所に比べて全体的に含水率が高くなった。これは、スラブ上面から供給される水の影響を受けやすいためと考えられる。

(2) 鉄筋腐食状況の確認

鉄筋腐食状況を図-19 に示す。結果より、水掛かりのある箇所は、水掛かりがない箇所に比べて鉄筋腐食が進行している。漏水箇所の腐食区分⁶⁾に大きなばらつきが生じているのはひび割れと鉄筋の位置関係が影響しており、直行する鉄筋では、交差部のみに孔食(腐食区分IV)が生じている。ただし、この鉄筋は配力鉄筋であり耐力上問題となるものではない。一方で、目地部のひび割れと平行な鉄筋は鉄筋周りが湿潤な状態にあるが、殆ど腐

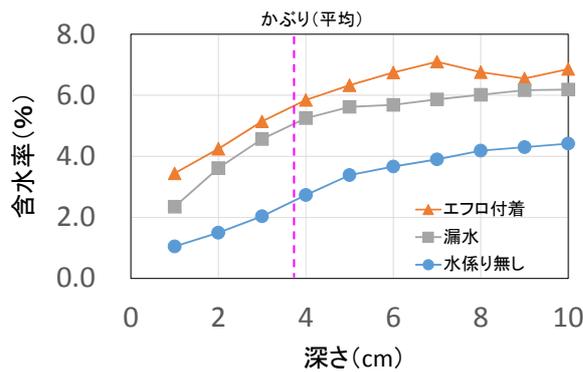


図-18 含水率の測定結果

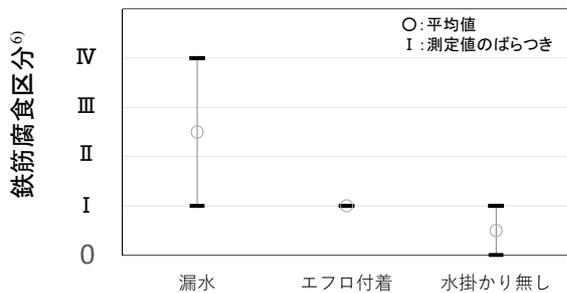


図-19 鉄筋腐食状況の調査結果

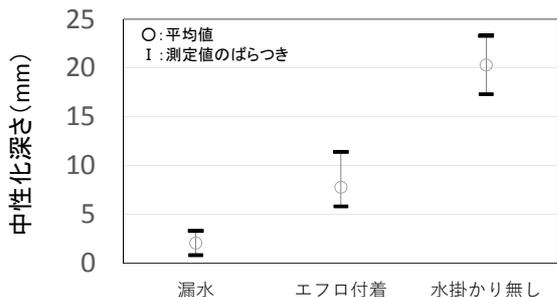


図-20 中性化深さ測定結果

食していない(腐食区分I)。

(3) 中性化深さ測定

中性化深さ測定結果を図-20 に示す。水掛かりが無い箇所でも中性化が最も進行しており、鉄筋腐食区分(図-19)と反対の傾向を示した。したがって今回の調査(フェノールフタレイン法)では、水掛かりが無い方が中性化は進むが鉄筋は腐食せず、水掛かりがある方が中性化は進んでいなくても鉄筋が腐食していた。これは、水掛かりがある場合、コンクリート自体の中性化は進まないものの、ひび割れ部に限定すれば、ひび割れに沿って鉄筋に水が直接供給されるためと推測される。

4. 結論

東海道新幹線の高架橋 200 セットにおいて、既設表面保護工の健全性と水の影響を確認することを目的として実橋調査を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 全塗膜種別において、基準値以上の付着力を概ね有していることを確認した。また、経年により既設塗膜(C種)の化学的な変化が生じているものの、付着力には影響を及ぼしていないことを確認した。
- (2) 全ての測定箇所でも上塗り材が十分に残存していた。これは紫外線の影響が非常に小さいためと推測された。
- (3) 表面保護工の施工前後で中性化は殆ど進行しておらず、表面保護工による中性化の進行抑止効果が確認できた。
- (4) 塗膜のひび割れが発生している箇所は、中性化が進行しやすい状態といえるが、水掛かりが無ければ鉄筋は殆ど腐食していなかった。

参考文献

- 1) (一社)日本鉄道施設協会：東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準，1999.7
- 2) 関雅樹，森川昌司，吉田幸司：東海道新幹線土木構造物の大規模改修工事，JREA，vol.56，No.10，2013
- 3) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集 No.711/V-56，p125-134，2002.8
- 4) 宮本祐輔，伊藤裕一，吉田幸司，伊藤雄郷：既設表面保護工の健全性に関する実橋調査，コンクリート工学会年次大会 2017，2017.7
- 5) 国土交通章鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物，丸善(株)，2007.1
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2013-，2013