

(60) 既設鋼橋の複合構造化リニューアルの 耐久性調査

谷口 望¹・石田 学²・赤江 信哉³・久保 武明⁴

¹正会員 日本大学 理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: taniguchi.nozomu@nihon-u.ac.jp

²正会員 太平洋マテリアル株式会社 営業本部 (〒114-0014 東京都北区田端6-1-1)

E-mail: Manabu-Ishida@taiheiyo-m.co.jp

³正会員 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)

E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

⁴正会員 株式会社トーニチコンサルタント 本社事業本部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町1-13-3)

E-mail: T_Kubo@tonichi-c.co.jp

著者らは以前より、既設鋼橋の延命化、維持管理の合理化、騒音振動の低減による環境適合性の向上を同時に達成することを目的として、ポリマーセメントモルタル、速硬軽量コンクリート、FRPを組み合わせた複合構造化工法を提案している。この構造は、2012年夏に相模鉄道川島陸橋で初めて供用中の橋梁において実用化されているが、9年が経過し現在も供用中である。本複合構造化工法の耐久性が懸念される中で、この川島陸橋の現状を調査し、材料耐久性や橋梁全体の健全性について判断するとともに、今後の課題などを整理した。また、併せて2011年、2014年から実施している、高松琴平電鉄原川橋梁における、ポリマーセメントモルタルの海浜曝露試験の分析結果についても報告する。

Key Words : *polymer cement mortar, renewal, durability, life extension, anti-noise measure*

1. はじめに

土木構造物に対して効率的に維持管理を行うことは重要となっている¹⁾。特に、鋼鉄道橋では、供用開始後100年を超える橋梁も多く、設計耐用年数を越えたものが多くなっている。設計耐用年数を越えた鋼鉄道橋は、取り換えによって更新されることもあるが、採算性の低い地方線区では、既設鋼橋を低コストで長寿命化することが必要とされている。一方、鋼鉄道橋の大きな課題として、長寿命化のほかに騒音対策がある。鉄道の場合、老朽化した橋梁の多くは開床式となっており、鋼部材から生じる音に加えて、レールから生じる音(転動音)や車両音が直に外部に伝わるため、道路橋や鉄道コンクリート橋に比べて、車両通過時の騒音が大きくなっている²⁾。

これら構造物の長寿命化や騒音対策として、著者らは既設鋼橋の複合構造化を検討してきた。複合構造化とは、既設の鋼橋に、コンクリート部材を設置しこれを一体化することで鋼部材の腐食を防止し、また、桁剛性を向上

させることにより活荷重応答時の応力振幅を低減させ、疲労に関しても延命化することを目的としている。同時に、鋼部材とコンクリート部材を一体化することにより、鋼部材から発生する騒音を低減させることもできる³⁾。また、本構造の大きな特徴としては、鉄道の維持工事の実施にあたっては、軌道の移設や復旧に多くの時間が割かれることを考慮し、軌道を工事することなくそのままに老朽化鋼橋のリニューアルができることにある。

一方、コンクリートを使用した複合構造化にあたっては、検討課題も多い。鋼桁にずれ止めを溶接することなく複合構造化を実現するために、鋼とコンクリート双方に付着力の高いポリマーセメントモルタル(以下PCM)を用いているが、室内促進試験以外での本構造の耐久性に関しては未知な部分が多い状態にある。

そこで本報告では、2012年夏に相模鉄道川島陸橋で初めて供用中の橋梁において実用化された、PCMを用いた本複合構造化リニューアル⁴⁾について、9年が経過した現在の供用中の状況を調査し、報告を行う。また、2014年から実施している、高松琴平電鉄原川橋梁におけ

る、PCMの海浜曝露試験⁵⁾の分析結果についても報告を行う。

2. 複合構造化リニューアルの概要

複合構造化リニューアルの概要を、図-1に示す。複合構造化に当たっては、様々な手法が考えられるが、ここでは、施工性や防食、また、供用中の既設鋼橋への影響を最小限とする観点から図-1の手法を提案している。本複合構造化の特徴としては、既設鋼橋に対して削孔や溶接などの改造を行っていないことと、既存の軌道構造をそのまま利用することである。本構造では、複合構造化に次の比較的新しい材料を使用している。(1) PCM被覆材^{3)・6)}、(2) FRP型枠(埋設型枠)、(3) 速硬軽量コンクリート(床版)⁷⁾を用いている。それぞれの複合構造化の構成材には次のような目的がある。

(1) PCM(被覆材)^{3)・6)}

- ・コンクリート床版との一体化促進
- ・鋼部材の防食
- ・鋼橋の騒音低減
- ・塗り替えの省略による維持管理コスト低減

(2) FRP型枠(埋設型枠)

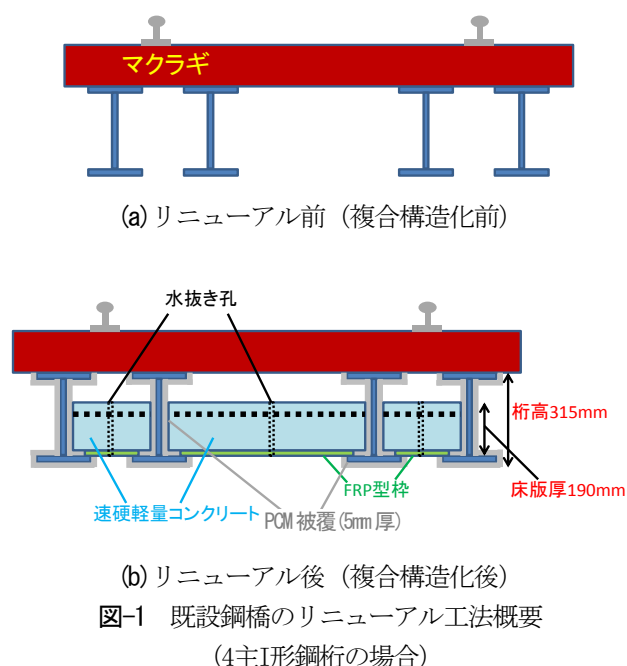
- ・死荷重増分量の低減
- ・施工性の向上

(3) 速硬軽量コンクリート(床版)⁷⁾

- ・鋼橋への剛性の寄与(耐荷力、耐久性の向上)
- ・死荷重増分量の低減(軽量)
- ・鉄道工事の夜間急速施工に対応可能(速硬)
- ・構造物音や車両音、転動音などの騒音の低減

PCMは、モルタルにゴムラテックス混和剤を混入させたものであり、鋼材・コンクリート双方への付着性能が高く(一般に材令7日付着せん断強度で 5.0N/mm^2 程度)、耐水性能、耐衝撃性能にも優れていることが知られている。既存の適用事例としては、道路橋の鋼床版の疲労対策等として、鋼床版の上に設置する構造などが提案されている。本複合構造化においては、この高い付着性能から、鋼部材の防食だけでなく、コンクリート床版との一体化を促進することも可能であると考えた。また、PCM被覆のみを5mm厚で設置した場合でも、鋼材の防食効果があり、鋼橋の騒音を低減することができることが確認されている^{3)・5)}。なお、PCMのヤング係数は、一般に $2.00 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 程度である。

FRPは、近年、土木構造物への適用が多く検討されており、軽量であることと高強度であることが特徴となっている。したがって、本構造では、複合構造化によって、



(b) リニューアル後(複合構造化後)

図-1 既設鋼橋のリニューアル工法概要
(4主I形鋼桁の場合)

死荷重を極力増加させないようにすることが必要であることから、GFRPを埋設型枠として使用することとした。GFRPを使用した理由としては、型枠としての要求性能(弾性係数等)を満足し、経済性にも優位であるためである。また、軽量のGFRPを使用することにより、人力による運搬、設置も容易であることから、施工性の向上も図ることができると考えられる。

速硬軽量コンクリートは、鉄道橋における夜間施工を想定して、比較的早期に強度を発現させることに着目した新しい材料である。また、死荷重を低減させるために、軽量骨材を使用し、単位容積質量を 2.03kg/l 程度、ヤング係数を $2.30 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 程度(通常の軽量コンクリートとほぼ同等)とすることとした。なお、格子状鉄筋は、速硬軽量コンクリートのひび割れ防止のために配置している。

本工法を適用した相模鉄道本線川島陸橋の概要を写真-1に示す。本橋梁は、上下線で別々の2橋となっており、上り線は4主I形鋼溶接桁(図-1と同等断面)、下り線桁はトラフガーダー改造桁(形鋼を組み合わせた4主リベット桁)であり、桁長はいずれも3.85mである。上り線桁には、下フランジに溶接されたプレート(写真-1(b))以外には、横桁方向の部材は取りついていない。なお、上り線桁は1952年(昭和27年)以前に製作、下り線桁は1926年(大正15年)以前に製作されている。

施工の手順は、桁の塗装をバキュームブラスト処理にて撤去した後、PCM被覆を施工し、FRP型枠設置後、速硬軽量コンクリートを打設したものである。今回の施工では桁に対しての削孔や溶接等の改造は一切行っておらず、軌道構造も変更していない。



(a) 川島陸橋全景



(b) 上り線桁下面（複合構造化前）



(c) 下り線桁下面（複合構造化前）



(d) 上り線桁下面（複合構造化後）



(e) 下り線桁下面（複合構造化後）

写真-1 相模鉄道川島陸橋の概要
（複合構造化後は施工直後の状況）

表-1 PCMの配合

種類	水セメント 比(%)	ポリマーセ メント比(%)	砂セメント 比	計量値(kg)	
				パウダー	混和液
PCM	27.0	18.0	1.99	25.0	3.75

表-2 速硬軽量コンクリートの配合

水結合 材比%	細骨材 率%	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	速硬性 混和剤	細骨材	軽量粗 骨材
32.5	60	183	394	168	966	412

表-3 PCM・速硬軽量コンクリートの強度発現状況

	材齢	PCM	速硬軽量コンクリート
圧縮強度 (N/mm ²)	3hr	13.4	27.0
	1d	24.2	40.7
	7d	32.5	50.9
	28d	36.5	54.6

実施工程は、夜間線路閉鎖中（実質作業時間約3時間）による作業を中心として2橋併せて34日間で完了している。実際に使用した各材料の諸元を表-1～表-3に示す。

本リニューアルの効果の概要は、以下のとおりである。

- (1) 実橋における測定で、応力振幅が最大で42%、平均で20%程度低減でき、累積疲労損傷度の理論による鋼部材の長寿命化が可能であると考え、延命化効果は5.1倍と想定できる。
 - (2) 実橋における測定で、騒音振動レベルも低減できることが確認され、ウェブ振動加速度で30dB程度、近傍の騒音レベルで15～18dB程度（構造物音のみ）である。また、その効果は、従来から使用されてきた制振材と比較してもかなり大きな効果となっている。
- 本効果の詳細については文献4) に示されている。

3. 9年が経過したリニューアルの状況

2012年夏に施工後から9年が経過した川島陸橋に対して、2021年5月に目視検査を行った。本橋梁では複合構造化リニューアル後も、リニューアル前と同様に供用され、その後の補修補強工事等も行っていない状態にある。

桁下の状況を写真-2に示す。上り線桁、下り線桁ともにPCM被覆やFRP型枠に割れや剥離の異常は認められなかった。なお、PCMについては一部茶色く変色している部分があるが、これは軌道から回ってきたさび汁によ



(a) 上り線桁下面（複合構造化後9年経過）



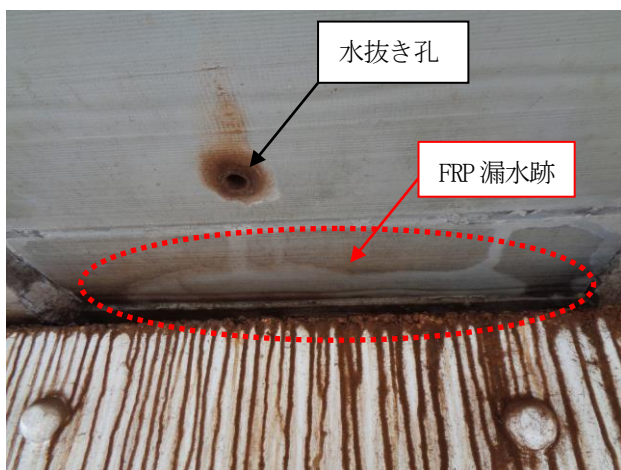
(a) 上り線桁上面（複合構造化後9年経過）



(b) 下り線桁下面（複合構造化後9年経過）



(b) 下り線桁側面（複合構造化後9年経過）



(c) 上り線桁端部の漏水跡



(c) 下り線桁PCM被覆の浮き

写真-2 相模鉄道川島陸橋の調査（下面）
（複合構造化後9年経過の状況）

写真-3 相模鉄道川島陸橋の調査（上面）
（複合構造化後9年経過の状況）

るものであり、材料が変化したものではない。下面からの目視でられた変状としては、上り線桁の終点側端部の

FRP型枠継ぎ目からの漏水があった。この漏水はPCM部には達しておらず、水抜き孔とも無関係な位置であるこ

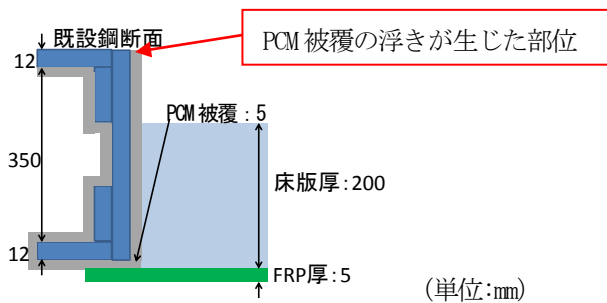


図-2 下り線桁の主桁断面概要と浮きが生じた場所

とから上面コンクリート床版と端部のFRP側面型枠の境界面から水が侵入していることが想定できる。この部分に関しては、FRP型枠上面とコンクリート床版下面の境界に今後も耐水が生じる可能性があり、FRP型枠下面からドリルで水抜き孔を設置するのが望ましいと言える。なお、下り線桁を含めたこの部位以外には漏水は見られなかった。

桁上面の状況を写真-3に示す。桁上面においても目立ったPCMの割れや、コンクリート床版のひび割れは見当たらなかった。しかし、下り線桁のC型断面主桁の上端面に一部PCM被覆の浮きが見られた。この浮きでは、PCM被覆と鋼材に隙間が生じているものの、PCMに割れが生じた形跡はない。また、型枠を含めた桁下に漏水の形跡がないため、上部のみで浮きは止まっており、床版内部や桁下までは進行していない可能性がある。しかし、この浮きに水が侵入し、凍結が生じた場合に浮きが拡大する可能性があるため、早急にこの浮き部分のPCM被覆は撤去し防食対策をすべきであると考えられる。なお、この浮きが生じた原因としては、浮きが生じた部分のPCM被覆がかなり薄いことが原因と考えられる。写真-3からもPCM被覆厚が薄くなっておりリベット部は鋼材が露出していることが分かり、本箇所は桁下からのPCM吹付施工で行っているため、施工しにくい部分であったことが想像できる。よって、本リニューアルにあたってはPCM被覆厚が十分に確保されるよう注意すべきであると考えられる。

4. 海岸線橋梁における曝露試験

外観調査ではPCMを被覆した鋼部材を2011年9月より、一般環境部のビルの屋上および海岸線の腐食環境にある実際の橋梁に置いて、表面の変状を曝露試験によって調査した⁹⁾。更に、2014年10月より、海岸線の腐食環境に各種物性確認のための曝露試験体を追加して物性試験も実施した。以上の曝露試験により、PCMの耐久性、および鋼材保護効果の確認を行った。



図-3 曝露試験実施場所（国土地理院電子地図を加工）



写真-4 高松琴平電鉄原川橋梁（単純Iビーム）



写真-5 外観調査用試験体の設置状況

(1) 曝露試験実施場所

外観調査用の試験体は、2011年9月に一般環境として図-3「一般環境」に示す香川県高松市の海岸から2.6km inlandに位置するビル屋上の軒の無い場所に設置し、腐食環境として図-3「腐食環境」に示す同市海岸線に隣接する高松琴平電鉄原川橋梁（写真-4）のA：桁上面、B：桁側面、C：桁下面の3箇所（写真-5）に設置した。2014年から実施した物性確認試験体は写真-4に示すようにステンレス製かごに入れ、腐食環境の橋台上に2014年10月に設置し、2015年9月、2016年7月、2017年8月および2019年6月に試験体を回収して試験室にて各種物性試験を実施した。

表-4 各種試験方法概要

試験項目		試験方法
外観調査	外観	・上面をサンドブラストによる1種ケレン処理した10cm×10cm×6mmの鋼材を使用し、PCMは塗装用吹付けガンを用いた吹付け工法で、JISモルタルは左官工法で厚さ5mmに塗布
	圧縮強度	・試験体寸法：4×4×16cm ・塩化物イオン浸透深さ試験に用いた試験体を使用
物性確認	塩化物イオン浸透深さ	・試験体寸法：4×4×16cm ・所定材齢で回収し、カッターで中央部を分割し、断面にフルオレセインナトリウム水溶液、および0.1N硝酸銀溶液を噴霧して浸透深さを測定
	中性化深さ	・試験体寸法：4×4×16cm ・試験体端部より、5mm、10mm、15mmの位置で割裂し、フェノールフタレインを噴霧後、各測定面の打設面、右面、底面、左面で中性化を測定
	付着強度	・上面をサンドブラストによる1種ケレン処理した10cm×10cm×6mmの鋼材を使用し、PCMは塗装用吹付けガンを用いた吹付け工法で、JISモルタルは左官工法で厚さ5mmに塗布 ・建研式引張試験機を用いて測定

表-5 材料の配合

種類	水セメント比 (%)	ポリマーセメント比 (%)	砂セメント比	計量値 (kg)				
				パウダー	セメント	ISO基準砂	混和液	水
PCM	27.0	18.0	1.86	25.0	—	—	3.9	—
JISモルタル	50.0	—	3.00	—	0.45	1.35	—	0.225

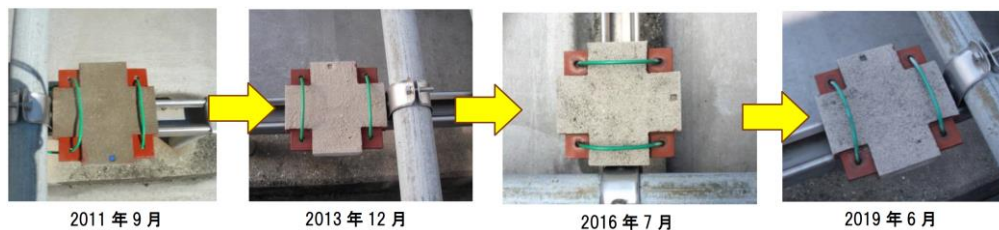


写真-6 外観調査試験体の経過観察（一般環境）

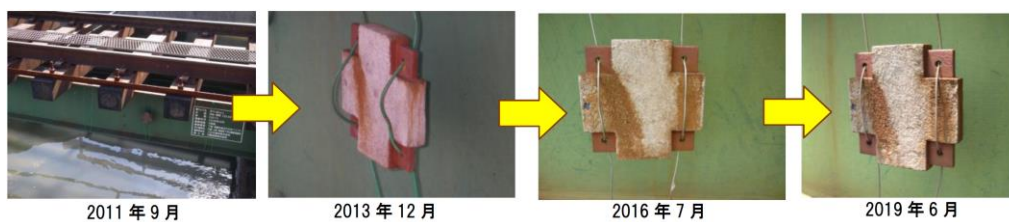


写真-7 外観調査試験体の経過観察（腐食環境，B：桁側面）

(2) 試験方法

試験方法を表-4に示す。PCMは基本的に無機セメントモルタルの特性を示すことから、補修用ポリマーセメントモルタルのJIS試験方法を適用した。また、PCMと物性確認試験の比較用としたJISモルタル（JIS R 5201）の配合を表-5に示す。

(3) 試験結果

市内ビル屋上の一般環境に曝露した外観調査用試験体の状況を写真-6に示す。試験体表面は白色に変色しているが、8年経過してもさびやひび割れの発生は認められなかった。腐食環境下の海岸線に曝露した試験体のうち、桁側面に設置した試験体の状況を写真-7に示す。試験体

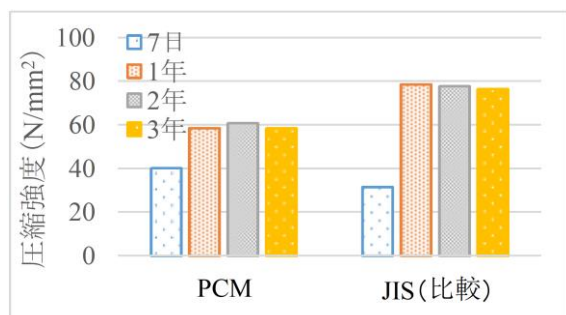


図-4 圧縮強度結果

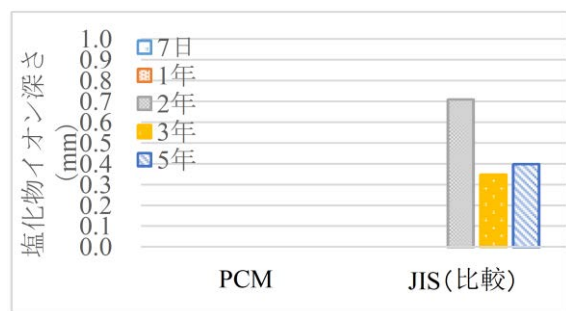


図-5 塩化物イオン浸透深さ結果

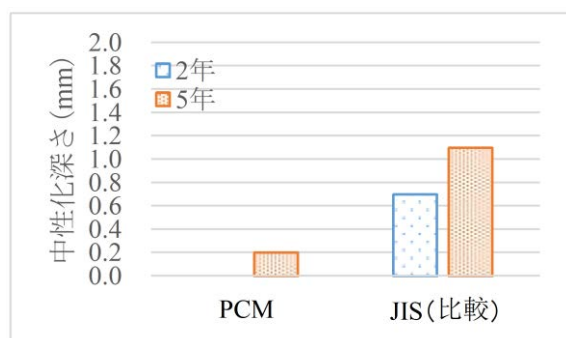


図-6 中性化深さ結果

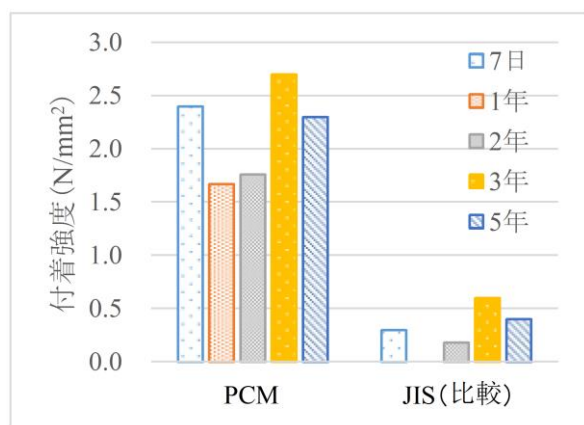


図-7 付着強度結果

表面にはさびが付着して茶色に変色していたが、このさびは桁上面から飛散したものと考えられる。8年経過後も被覆面の鋼材の錆やひび割れ、モルタルの浮きは認め

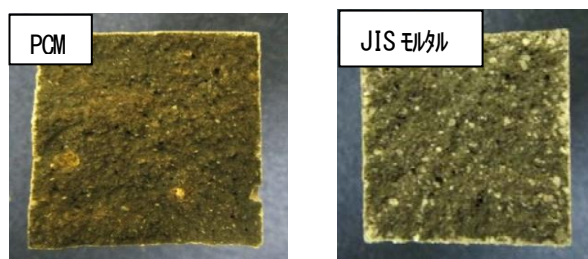


写真-8 破断面（塩化物イオン浸透深さ）

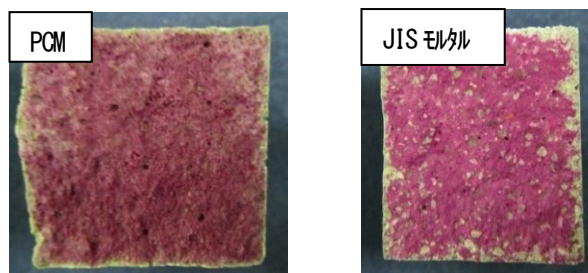


写真-9 破断面（中性化深さ）

られず健全であった。

圧縮強度結果を図-4に示す。圧縮強度はJISモルタル、PCM共に材齢7日以降、強度増進が見られるが、材齢3年の圧縮強度は材齢1年と同程度であり強度低下は認められなかった。また、圧縮強度が 50N/mm^2 を超える強度を発現していることから緻密な硬化体を形成していると考えられる。

塩化物イオン浸透深さ結果を図-5および写真-8に示す。塩化物イオンの浸透深さはPCM、JISモルタル共に材齢1年では 0mm であり、塩化物イオンの浸透は確認できなかった。しかし、材齢5年ではJISモルタルでは 0.4mm 浸透したのに対して、PCMは塩化物イオンの浸透は認められず、両材料に明確な差が確認できるようになった。このことから、PCMはJISモルタルよりも遮塩性に優れていることが分かる。

中性化深さ結果を図-6および写真-9に示す。材齢5年での中性化深さは、JISモルタルでは 1.1mm まで進行したのに対して、PCMは 0.2mm の進行であった。したがって、PCMはJISモルタルよりも中性化抵抗性に優れていることが分かる。

付着強度結果を図-7に示す。PCM、JISモルタル共に表面に変状の発生は認められなかったが、JISモルタルは試験時にカッターを入れた際に剥がれる試験体もあり殆ど付着していない状態であった。これに対してPCMは材齢5年においても 2.3N/mm^2 の付着強度が得られ、良好な付着性を有していた。JISモルタルには一部凝集破断のものもあったが、PCMは何れの材齢であっても鋼材とモルタル界面での破断であった。要因として、スチレンブタジエンゴムラテックス（SBR）がポリマーセメ

ント比で15%以上の高濃度で配合されており、そのポリマーの効果で高い付着性を示したと考えられる。さらに、PCMの水分浸透抑制により、鋼材とモルタルの境界面への水分の侵入を防止して付着耐久性が大きく向上していると考えられる。なお、付着試験用鋼板のPCMやJISモルタルを塗布していない外周部の鋼材は有機系の防錆ペイントを塗布していたが、局所的に腐食の発生が確認された。PCMとJISモルタル塗布部分には鋼材の腐食は確認されなかった。

5. まとめ

本報告では、既設鋼橋に対して施工したPCMを用いた複合構造化リニューアルの9年間供用後の状況を調査した。また、PCM材料の実橋での曝露試験結果についてまとめた。本検討より以下の結論が得られた。

- (1) 実際の橋梁に対して施工した複合構造化リニューアルでは、9年間供用した後もPCMの大きな剥離や割れは見られなかった。ただし、一部、型枠上面への漏水や施工不良から生じたと考えられるPCMの浮きが生じたが、橋梁のリニューアル効果に対して大きな影響を与えるものではなかった。
- (2) 腐食環境上にある橋梁におけるPCM材料の曝露試験では、外観調査では8年、物性確認試験では5年の経過において試験を行ったが、各試験結果ともに異常は見られず、物性としてはJISモルタルよりも高い耐候性、耐久性を確認することができた。

本検討は、長期にわたる調査や耐久性確認が必要であるため、今後も試験・調査を継続し、定期的に報告を行う予定にしている。

謝辞：本検討の実施にあたっては、相模鉄道の各担当者および高松琴平電鉄の各担当者の多大なご協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：事例に基づく複合構造の維持管理技術の現状評価、土木学会、複合構造レポート04、2010.5.
- 2) 半坂征則、杉本一朗、長倉清、間々田祥吾：鋼構造物騒音の部材ごとの寄与度解析および対策材料の検討、鉄道総研報告、Vol.21, No.2, 鉄道総合技術研究所、pp.21-26, 2007.7.
- 3) 谷口望、半坂征則、碓山晴久、上月隆史、棚橋明朗、依田照彦：ゴムラテックスモルタル被覆を用いた低騒音鋼橋の開発に関する研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.55A, pp.1164-1171, 2009.4.
- 4) 谷口望、大久保藤和、佐竹紳也、杉野雄亮、松浦史朗、半坂征則：既設鋼橋の複合構造化によるリニューアル工法の施工と実証試験、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、土木学会、70巻5号、pp.Ⅱ_40-Ⅱ_52, 2014.2.
- 5) 赤江信哉、谷口望、久保武明、石田学：速硬ポリマーセメントモルタルの長期海岸線曝露試験、鋼構造年次論文報告集第28巻、2020.11.
- 6) 上月隆史、棚橋明朗、谷口望、碓山晴久、依田照彦：ゴムラテックスモルタルを被覆した負曲げを受ける合成桁のずれ止めに関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.56A, pp.969-978, 2010.4.
- 7) 浜中昭徳、長塩靖祐、中島裕：速硬性混和材および軽量骨材を用いたコンクリートの基礎性状、土木学会平成22年度全国大会、土木学会、V-710, pp.1419-1420, 2010.9.
- 8) 佐竹紳也、大久保藤和、赤江信哉：速硬ポリマーセメントモルタルの長期海岸線曝露試験、第72回年次学術講演会、土木学会、CS5-026, 2017.9.

(Received September 10, 2021)

DURABILITY STUDY OF RENEWAL OF EXISTING STEEL BRIDGE WITH COMPOSITE STRUCTURE

Nozomu TANIGUCHI, Manabu ISHIDA, Shinya AKAE and Takeaki KUBO

A composite construction method combining polymer cement mortar, fast-hardening lightweight concrete, and FRP is proposed to extend the service life of existing steel bridges, streamline maintenance, and improve environmental compatibility by reducing noise and vibration. This structure was first applied to the Kawashima overpass in the summer of 2012, and is still in service after nine years. The present status of the Kawashima overpass was investigated to determine the durability of the materials and the soundness of the bridge as a whole, as well as to identify future issues. In addition, the results of the exposure tests of polymer cement mortar on the Harakawa River Bridge, which have been carried out since 2011 and 2014, are reported.