

(19) 鋼とコンクリート接合部の腐食特性 と対策工の性能評価に関する研究

樫原 弘貴¹・大西 弘志²・真鍋 英規³・谷口 望⁴・溝江 慶久⁵・松本 涼⁶

¹正会員 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:hazehara@fukuoka-u.ac.jp

²正会員 岩手大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)

E-mail:onishi@iwate-u.ac.jp

鋼とコンクリートの接合部に着目し、鋼とコンクリートの付着性の違いが鋼板腐食に及ぼす影響、ならびに対策工の性能について検討を行った。その結果、付着性に違いによって腐食の発生および進行が大きく異なること、また、熱伝導率の違いやコンクリートの乾燥収縮の影響によって、実構造物においても付着力が低下している恐れがあることが示唆された。また、何らかの対策工を施すことによって、鋼とコンクリート界面部からの塩化物イオンの浸入を抑制できることが分かった。ただし、対策工の種類によっては、対策無よりも孔食になる可能性が高いものも確認された。

Key Words : concrete, steel corrosion, chloride ion, seal material; urethane resin paint,

1. はじめに

近年、愛岐大橋や木曽川橋などでは、局所的な鋼材の腐食によって、実際にコンクリートに埋め込まれた鋼材部が破断に至った事例も報告されている^{1) 2)}。局部腐食の要因には、鋼材とコンクリートの付着界面から腐食因子である水や塩化物イオン、酸素等の浸入によるもの以外にも、酸素濃度の違いによる通気差電池によっても腐食が進行すると考えられている³⁾。さらに、実構造物では、鋼とコンクリートの熱伝導率の違いやコンクリートの乾燥収縮によって、必ずしも鋼材とコンクリートの付着力が十分に確保されているとは言えず、当然、鋼材とコンクリートの付着性の違いによって、腐食特性が大きく異なることが予想される、ただし、これらが鋼材腐食に与える影響については十分に明らかにされていない。

一方、鋼材とコンクリートの界面部における腐食が懸念される箇所においては、予めシール材やウレタン塗装、水切り版等を設置して、水や塩化物イオンの浸入を抑制する等の対策工が実際に施されているが、これらの対策工の有効性については、既往の研究で一部報告されているものの^{4) 5)}、未だ十分な知見が得られていないのが現状である。さらに、近年では、対策工の経年劣化もしくは、対策工を施したのにも関わらず、その内部で鋼材が腐

食している事例が確認されている³⁾。

そこで本研究は、波型ウェブ橋の下床版部を模擬した試験体を作成し、鋼とコンクリート界面の付着性の違いが腐食に及ぼす影響ならびに各種対策工の塩化物イオン浸入および腐食抑制効果について検討を行った。

なお、本研究の成果は、「複合構造を対象とした防水・排水技術研究小委員会」で実施したものであり、既に一部は、「複合構造レポート7 複合構造物を対象とした防水・排水技術の現状」にて報告しているが³⁾、これに新たな知見等を加えて取り纏めたものである。

2. 実験概要

(1) 試験体の作製および概要

a) 試験に用いた基板コンクリート

基盤コンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートの配合は、コンクリート橋上部工を想定して、早強セメントを使用した設計基準強度40N/mm²の配合とし、細骨材に海砂、粗骨材に碎石を使用した水セメント比48%、スランプ8.0±2.0cm、空気量4.0±1.0%のものである。

b) 試験体の概要

実験に用いた試験体は、図-1に示す波型鋼板ウェブ橋の下床版埋め込み部を模擬した1/2相当のモデルである。

表-1 試験に用いたコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	AE減水剤	AE剤
48	44	167	350	774	1019	5	1.5

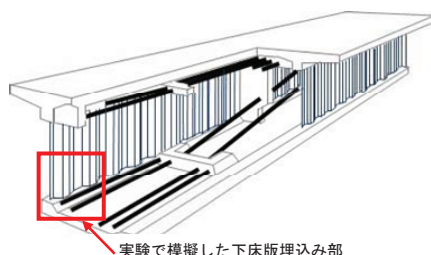


図-1 実験で模擬した波型ウェブ橋の下床版

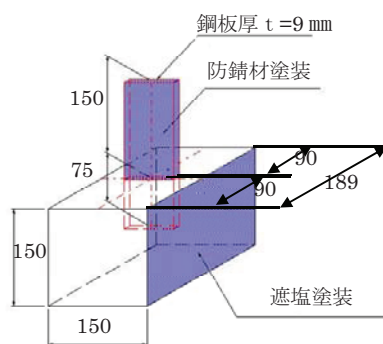


図-2 試験体の形状

図-2には、実験で用いた鋼板が埋め込まれた150×150×189mmの角柱コンクリートを示している。鋼板の形状は、225×75×9mmのものであり、埋め込み深さは75mm、コンクリート端から鋼板までの距離90mm、鋼板厚さ9mmは、いずれも実橋相当としている。また、コンクリートと鋼板の付着力を確保するために、予め鋼板にブラスト処理を施しており、これは一般的に実施されている無機ジंक塗装に相当するものである。コンクリートからの露出部の鋼板部には、事前の検討にてCASS試験により防錆性能が高いものを選定して、全面塗装を行った。なお、試験体作成後は、7日間の湿布養生を行っている。

(2) 試験体の種類

a) 鋼とコンクリートの付着性が異なる試験体

鋼とコンクリート界面の付着性がコンクリート埋め込み部の鋼材腐食に与える影響を検討するため、付着力が異なる3種類の試験体を作製した。写真-1には、鋼とコンクリートの付着力が異なる各種試験体の調整方法を示す。1つめは、外力や温度履歴を与えず、コンクリートと鋼板の付着力が十分に確保されていることを想定し、



試験体 A

試験 B

試験 C

(1 か月間の暴露)

写真-1 付着力が異なる各種試験体の調整方法



シール材+
ウレタン塗装

シール材

水切り板



ポリマーセメントモルタル (PCM)

写真-2 検討対象とした対策工の種類

養生終了後の状態で試験を行った試験体A。2つめは、鋼材とコンクリートの熱伝導率の違いやコンクリートの収縮等が付着力に及ぼすことを想定した試験体B。3つめは、力学的な影響を受けて鋼材とコンクリートの付着力が低下したことを想定した試験体Cである。それぞれの試験体の調整方法として、試験体Bは、2012年8月の1ヶ月間に日光や雨水が直撃する屋外環境に静置されており、一方の、試験体Cは、万能試験機により鋼板の上面から垂直に荷重をかけていき、一時的に除荷するまで圧縮力を加えている。

b) 各種対策工の性能評価に用いた試験体種類

各種対策工を施は、写真-2に示す変性シリコーン系のシール材とウレタン塗装を併用したもの、シール材のみ、水切り板の設置、ポリマーセメントモルタル (PCM) を用いて埋め込み部の鋼材を保護した計4種類である。なお、シール材とウレタン塗装の併用、シール材、水切り板の対策工については、力学的に鋼板とコンクリートの付着性を低下させた試験体Cに施している。一方の、PCMについては、コンクリートと鋼材の付着力を高める目的で実構造物では使用されているため、試験体作製

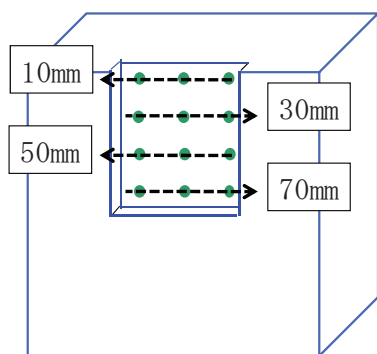


図-3 コンクリート粉末の採取位置



写真-3 コンクリート粉末の採取後

後は、試験体Aと同様に養生終了後の状態を保持させて試験を行っている。

(3) 測定項目および方法

a) 塩化物イオンの浸透範囲

試験体を割裂し、コンクリートと鋼材の接触面に0.1mol/Lの硝酸銀水溶液を噴霧し、塩化物イオンの浸透範囲を呈色状況により確認した。また、鋼材とコンクリートの接触面において、呈色した範囲を界面からノギスによって測定した。

b) 全塩化物イオン量

解体したコンクリート試験体の鋼板との接触面において、図-3および写真-3に示すコンクリートと鋼板の界面から10mm、30mm、50mm、70mm位置の箇所を3点ずつ、コンクリート用ドリルを用いて、深さ5mm位置までのコンクリート粉末を採取した。その後、JIS A 1154に準じて、電位差滴定装置により全塩化物イオン量を測定した。

c) 鋼板の外観観察および腐食面積率

鋼板の腐食状況は、デジタルカメラによる外観観察および、取り出した鋼板にセロハンを巻きつけ腐食部分をマジックで描写した後、フリーソフトを用いて画像処理を行うことで、鋼板腐食面積率を算出した。

d) 鋼板の腐食重量

JSI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に

	試験体A	試験体B	試験体C
5 サイクル	 13.7mm	 15.3mm	 75.0mm
10 サイクル	 14.5mm	 18.0mm	 15.0mm
25 サイクル	 16.8mm	 23.1mm	 21.0mm
35 サイクル	 29.6mm	 41.1mm	 38.2mm

図-4 各種試験体におけるサイクルごとの塩化物イオンの浸透状況

準拠して、濃度10%クエン酸二アンモニウム水溶液に2日間浸漬して腐食生成物を除去した後、浸漬前と後の重量差から鋼板腐食重量を算出した。

3. 結果および考察

(1) 付着性の違いが腐食に及ぼす影響

図-4は、硝酸銀水溶液を鋼板とコンクリートの接触面に噴霧して、呈色によって塩化物イオンの浸透状況を確認したものである。なお、試験体の写真の下に記されている数値は、コンクリート界面から浸透した塩化物イオンの浸透深さを表している。この結果、5サイクル時の試験体Cは、塩化物イオンが付着面の全ての範囲に浸透してしまっているが、これについては、鋼板とコンクリート界面の付着が完全に切れてしまった可能性が高いことを確認している。その他の試験体においては、試験サイクルが進むに従って、いずれも塩化物イオンが浸透し、25サイクル以上になると、腐食生成物がコンクリートにも付着しており、同時に腐食も進行していることが分かる。ただし、腐食の範囲は、塩化物イオンが浸透している範囲よりも小さく、界面から25mmまでの範囲であることが分かる。また、試験体の種類による違いについてみると、付着が十分に確保されている試験体Aは、他のものと比較して、塩化物イオンの浸透が最も

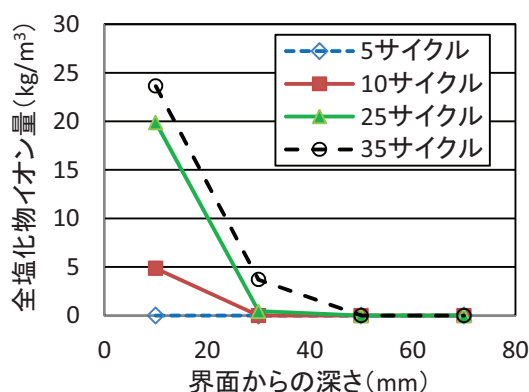


図-5 試験体Aにおける塩化物イオン分布

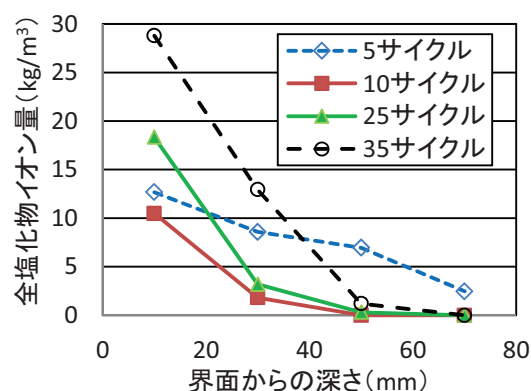


図-7 試験体Cにおける塩化物イオン分布

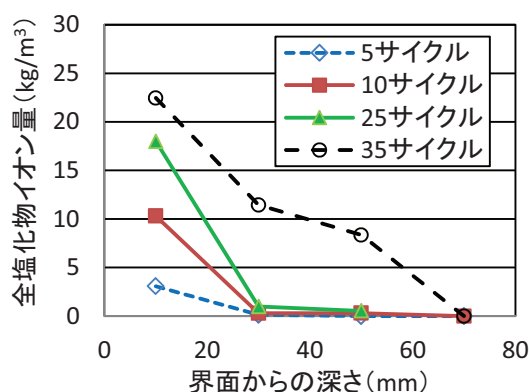


図-6 試験体Bにおける塩化物イオン分布

抑制されている。一方の、1ヶ月間の暴露を行うことで、実構造物における鋼板とコンクリートの付着性に近づけた試験体Bは、力学的に付着性を低下させた試験体Cと大差なく、実構造物においても、熱伝導率の違いやコンクリートの乾燥収縮等の影響により、鋼板とコンクリートの付着性は低下していることが、この結果から予想される。

図-5～図-7には、鋼板とコンクリート界面から浸透した全塩化物イオン量の経時変化を試験体種類ごとにそれぞれ示す。全塩化物イオン量は、いずれも試験サイクルが進むに従って増加しており、25サイクルから35サイクルに進む過程で、急激に増加する結果を示した。特に、試験体B、Cにおいては、この傾向が顕著である。これは、鋼板に腐食が生成され、その膨張圧によって、鋼材とコンクリートの付着性が低下したため、結果として塩化物イオンがさらに浸透し易くなったものと考えられる。

図-8は、各サイクルにおける鋼材の腐食状況を試験体種類ごとに示す。腐食の範囲は、試験サイクルが進むに従って、いずれの試験体においても増加する傾向を示している。腐食の進展は、付着性の違いに関らず、鋼とコンクリートの界面付近の一部に腐食が発生し、そこを中

	試験体A	試験体B	試験体C
5 サイクル			
10 サイクル			
25 サイクル			
35 サイクル			

図-8 各サイクルにおける鋼板の腐食状況

心として周囲に広がっていくことが分かった。また、全塩化物イオン量分布の結果と同様に、いずれの試験体においても25サイクルから35サイクルにかけて、腐食が急激に進展している。35サイクルになると、付着性による腐食の進展に明確な差が表れており、試験体Cにおいては、試験体Aよりも明らかに腐食が進行していることが分かる。ただし、全塩化物イオン量の測定結果では、少なくとも埋設部からの深さ40mmまでの範囲において、 3.0kg/m^3 以上の塩化物イオンが浸透しているにも関わらず、実際の腐食範囲は、埋込み部から25mm程度までの範囲であった。この傾向は、試験体A、Bにおいても一致しており、実際の橋梁で埋込み部の鋼材に腐

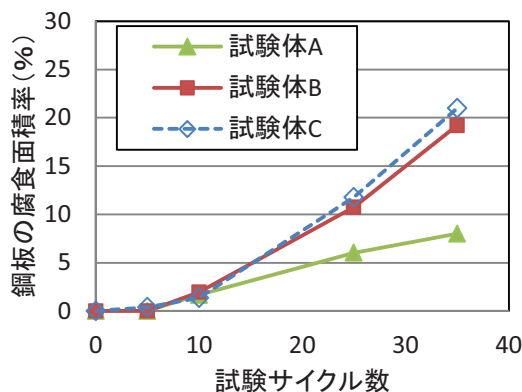


図-9 各種試験体における鋼板の腐食面積率

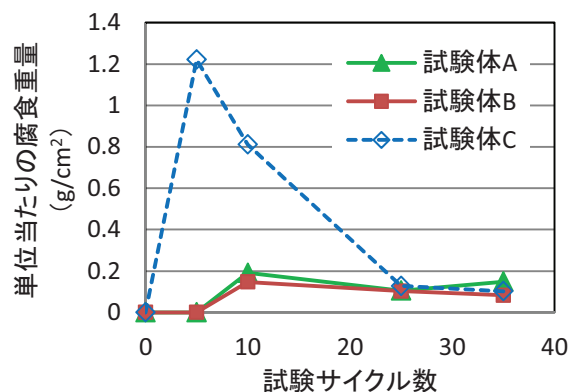


図-11 単位面積あたりの腐食重量

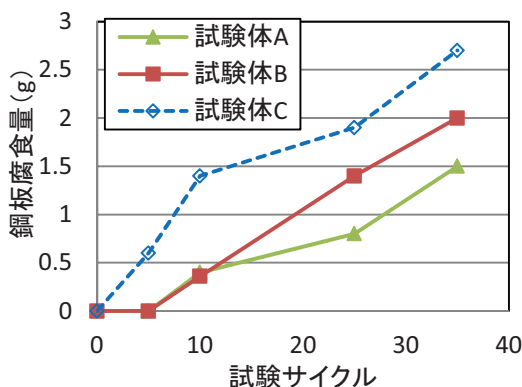


図-10 鋼板の腐食重量



写真-3 腐食除去後の鋼板の外観

食が確認された事例と類似している^{1) 2) 3)}。

図-9は、各種試験体における鋼板腐食面積率の経時変化を示す。試験体BとCの腐食面積率は、いずれのサイクルにおいても大差がなく、試験体Aに比べて、腐食の進行が速い結果を示した。試験体Bは、実構造物を想定したものであり、この結果から鋼とコンクリート界面に何らかの対策が必要であるものと考えられる。

図-10には、各種試験体における鋼板の腐食重量を示す。腐食重量は、いずれの試験体においてもサイクルが進むに従って、多くなる傾向を示している。試験体Cにおいては、試験サイクル初期から他の試験体に比べて大きくなる結果を示している。

図-11は、単位面積あたりの腐食量の経時変化を示している。これは、腐食量を腐食面積で除したものであり、この結果により、腐食した範囲の孔食による平均的な鋼板の断面欠損を間接的に把握できる。この結果、試験体Cの単位あたりの腐食重量は、他のものよりも大きく、孔食が激しいと考えられるが、25サイクル以降になると、いずれの試験体も大差はなかった。

写真-3には、一例として、試験体Cの腐食生成物を除去した後の鋼板の断面欠損の状況を示している。いずれの試験体においても腐食が確認された箇所は、これと類

	シール+ウレタン	シール	水切り版	PCM
浸透範囲				
腐食状況				

図-12 25サイクルにおける各種対策工の塩化物イオンの浸透および腐食状況

似した断面欠損であった。

以上のことから、鋼板とコンクリート界面の付着力の違いによって、鋼板の腐食の進行速度が異なることが分かった。また、塩化物イオン等の劣化因子が界面から浸入した場合には、浸入した範囲が必ずしも腐食が発生するとは限らず、界面付近で局所的に発生した腐食は、孔食に成りやすく、徐々に周囲に進行していくこと様子が確認できた。さらに、腐食がある程度進行した場合には、

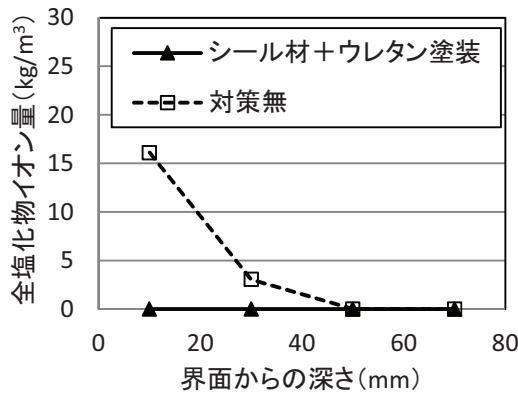


図-13 シール材とウレタン塗装を施した

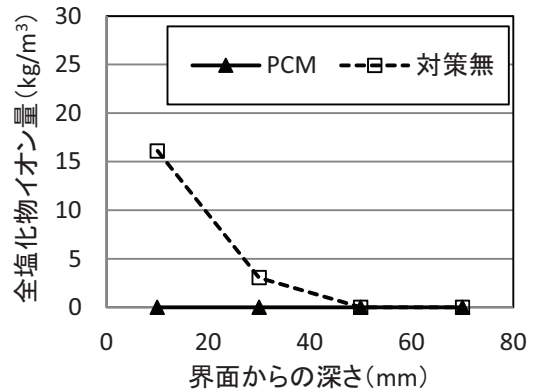


図-16 PCMを施した全塩化物イオン量分布

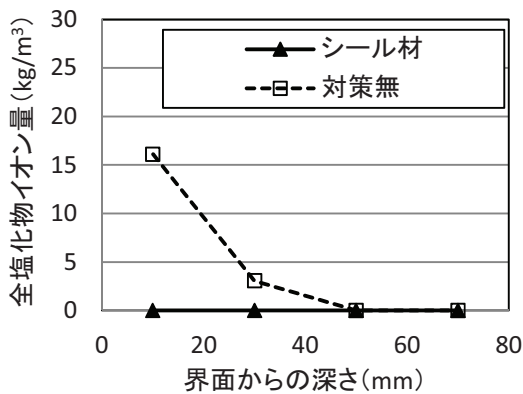


図-14 シール材を施した全塩化物イオン量分布

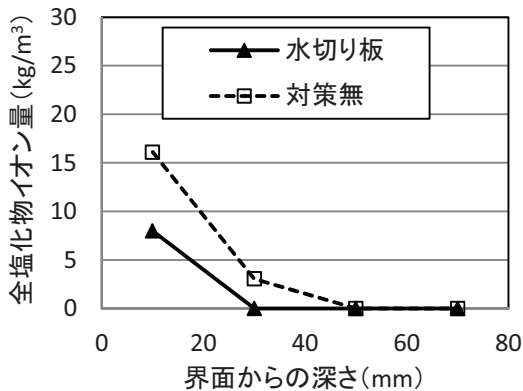


図-15 水切り板を施した全塩化物イオン量分布

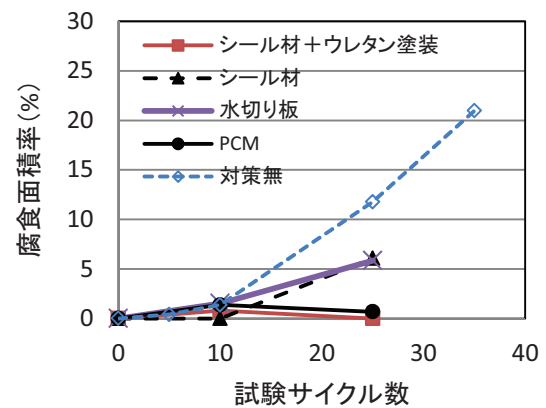


図-17 各種対策工の鋼板腐食面積率

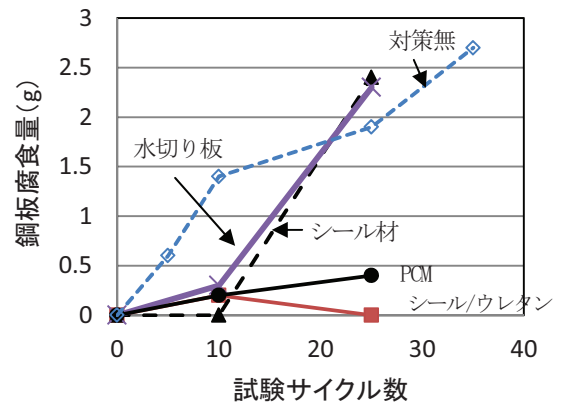


図-18 各種対策工の腐食重量

腐食生成物によって鋼板とコンクリートの付着力が低下することが考えられ、劣化因子の浸入が容易になることや、腐食の進行が加速することが分かった。さらに、実構造物においても、熱伝導率やコンクリートの乾燥収縮等の影響によって、付着力が低下している可能性が示唆された。

(2) 各種対策工の性能評価

図-12は、一例として、25サイクルにおける各種対策工を施した試験体の塩化物イオンの浸透状況および鋼材

の腐食状況を併せて示している。なお、対策工PCMの塩化物イオン浸透状況については、鋼板を覆ったPCMと基板コンクリートとの接触面の結果である。この結果、鋼板の腐食状況は、対策工を施したものでも鋼板の一部に腐食が確認されているが、図-8に示した対策を施していない試験体Cよりも抑制されており、特に、シール材とウレタン塗装を併用したものは、顕著な抑制効果が得られている。

図-13～図-16には、25サイクルにおけるコンクリートと鋼材の界面部から浸透した塩化物イオン量分布を示し

ている。いずれかの対策工を施すことで、塩化物イオンの浸入を抑制できていることが分かる。ただし、水切り板を施したものは、界面部に塩化物イオンの浸入が確認されており、今回の試験の範囲においては、塩化物イオンの浸透を完全に抑制できていなかった。

図-17は、各種対策工を施した試験体の鋼板腐食面積率の経時変化を示す。シーラ材と水切り版を施したものは、対策無と同様に試験サイクルが進むに従って、腐食が進展しているのに対し、コンクリート表面を完全に被覆したシーラ材+ウレタン塗装、鋼材部を遮塩性の高いPCMで覆ったものには、腐食の進展が確認されなかった。

図-18は、各種対策工を施した鋼板の腐食重量を示しているが、25サイクルになると、シーラ材+ウレタン塗装を施したものの以外は、腐食が確認されており、中には、孔食によって、むしろ対策無よりも腐食重量が多くなっているものも確認された。この結果は、対策工の種類によっては、塩化物イオンの浸入を抑制したとしても、その他の要因で腐食が進展していくことを示唆しているものと思われ、さらに、水分等が鋼とコンクリート界面に浸入した場合には、対策工によって逸散を阻害するため、腐食因子が鋼材部に滞在する可能性が高い。

4. まとめ

- (1) 付着性の違いにより、塩化物イオンや腐食の発生が異なることが分かった。また、実構造物においても鋼とコンクリートの付着は、低下している可能性が示唆された。
- (2) 塩化物イオン等の劣化因子が界面から浸入した場合

には、浸入した範囲が必ずしも腐食が発生するとは限らず、界面付近で局所的に発生した腐食は、孔食に成りやすく、徐々に周囲に進んでいくことが分かった。

- (3) コンクリート埋め込み部の鋼板が腐食した場合には、腐食の膨張圧により付着力が低下し、塩化物イオンおよび腐食が急激に進行することが分かった。
- (4) 何れかの対策工を施すことによって、塩化物イオンの浸透および腐食を抑制できることが分かった。
- (5) 対策工の種類においては、むしろ対策無よりも孔食が進む恐れがあり、また、接触面に浸入した水分等は、対策工に阻害され逸散できなくなる恐れが示唆された。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション：他人事ではない木曽川大橋の斜材破断，2007.7
- 2) 山田健太郎：鋼橋の長寿命化における塗替え塗装の重要性-木曽川大橋の斜材の破断事故の教訓，橋梁・鋼構造物塗装，Vol.36，No.1，pp.2-9,1998.
- 3) 土木学会：複合構造レポート7 複合構造物を対象とした防水・排水技術の現状，2013.7
- 4) 小野聖久,長田光司,桜田道博,大浦隆：波形鋼板ウェブ橋における埋込み接合部の腐食特性,第6回複合構造物の活用に関するシンポジウム,pp.29-1～29-6, 2005.11
- 5) 貝沼重信, 細見直史：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食特性に関する研究，土木学会論文集，Vol.780/I-70，pp.97-114, 2005

FUNDAMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTIC OF STEEL CORROSION AND MEASURE TO PREVENT CORROSION AT THE CONNECTION OF CONCRETE WITH STEEL

Hiroataka HAZEHARA, Hiroshi Onishi, Hideki MANABE, Nozomu TANIGUCHI, Yoshihisa MIZOE, Ryo MATSUMOTO

Focused attention on at the connection of concrete with steel, this study were carried out the influence of adhesive property on steel corrosion. Form experimental results, it is found that adhesion of concrete and steel have decreased due to the coefficient of thermal conductivity and the drying shrinkage of concrete. In addition, it is found that the penetration of chloride ion from connection of concrete with steel were prevented by take some measures. However, in some measures, pitting corrosion was bigger than without it.