

(50)トリプルコンタクトポイントの腐食メカニズムに関する実験的検討

児島 あかり¹・櫛原 弘貴²・西 弘³・谷口 望⁴・佐々木 巖⁵

¹正会員 福岡大学大学院 資源循環・環境工学専攻（〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: td197002@cis.fukuoka-u.ac.jp

²正会員 福岡大学助教授 社会デザイン工学科（〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1）
E-mail: hazehara@cis.fukuoka-u.ac.jp

³正会員 株式会社 CORE 技術研究所（〒530-0047 大阪府大阪市北区西天満 1 丁目 2-5）
E-mail: nishi@coreit.co.jp

⁴正会員 前橋工科大学准教授 工学部土木工学科（〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地 1）
E-mail: n-tani@maebashi-it.ac.jp

⁵正会員 国立研究開発法人 先端材料資源研究センター（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）
E-mail: iwao.sasaki@nifty.com

複合構造物における鋼板埋込部において局部腐食は発生し、鋼板の破断が生じる事例が散見されつつある。この破断メカニズムを解明することを目的として、マクロセル腐食の発生に着目し、判断が見られるコンクリート埋込部の腐食特性を経時的に行った。その結果、無機ジンの塗装をされている場合には、コンクリートに埋め込まれていることによって pH が上昇し、無機ジンの自己腐食が生じることが分かった。また、これまでの大気部と埋込部内部に酸素や水分の分布によるマクロセル腐食ではなく、環境差によるマクロセル腐食が生じて、腐食が進展していくことが明らかとなった。本論は、上記の結果を明らかにし、これまでの複合構造物の腐食に対する考え方を再考させるものである。

Key Words: concrete-steel-water interface, steel plate corrosion, chloride ion, sacrificial anode

1. 塗装が鋼とコンクリート界面部における腐食特性に与える影響

(1) はじめに

複合構造物における腐食特性は、鋼とコンクリートの界面部あるいは、コンクリート内部で腐食が進展するケースが多い。これまでの研究報告等¹⁾では、裸鋼板が用いたの試験が多く、鋼板露出部がアノード側にコンクリート内部がカソード側となるため、露出部が先行して腐食が進展している。実構造物で見られる腐食形態とは、異なっており、その要因として一般的に実構造物では用いられている鋼板塗装がこれらの腐食形態の違いに影響を与えていると予想された。そこで、ここでは、波型鋼板ウェブ橋の下床版埋込部を模擬して、モルタルに塗装鋼板を埋め込んだ試験体を用いた。この試験体により、塩水噴霧試験および海洋環境下での暴露試験を実施して、腐食特性について検討を行った。

(2) 実験概要

a) 試験に用いた基盤モルタルおよび鋼板

基盤モルタルの配合は、塩分浸透を促進させる目的で、一般的なコンクリート橋上部工よりも高い水セメント比 50%で作製した。鋼板は、一般的に実構造物で建設中の鋼材を防食する目的で使用されている Zn を含有する無機ジンで塗装したものをを用いた。

b) 試験体の概要

試験体は、図-1 に示す様に 100mm×100mm×50mm の角柱モルタル内に 100mm×75mm×9mm の鋼板を深さ 50mm 位置まで埋設したものを作製した。鋼板厚さは、実構造物で使用されているものと同様にした。供試体の水準は、鋼板に損傷がないものを標準供試体とし、市販のカッターナイフでコンクリートの界面部に損傷を与えたものを損傷鋼板として（写真-1）、その損傷がモルタルの界面部に位置するものを損傷（界面部）、界面部

から深さ 10mm のモルタル内に損傷が位置するものを損傷 (Con 内部) として、それぞれ 6 体作製した。損傷を予め与えた鋼板は、建設時に何らかの損傷が生じたことやコンクリートと無機ジンクの付着力が乾燥収縮や熱伝導率の相違による膨張・収縮により低下したことを想定したものとなっている。供試体の作製後は、コンクリート部を温度 20℃ の環境下で湿布養生を行った後に、上面と底面を除いて、全てアルミテープで被覆してから塩水噴霧試験および海洋環境下に静置して腐食促進を行った。塩水噴霧試験による腐食促進は、10% の塩化ナトリウム水溶液を 40℃ の環境下で 5 日間噴霧し、その後は、湿度 60% ・温度 20℃ の環境下での 2 日間の乾燥工程とし

て、計 7 日間の促進を 1 サイクルとして、20 サイクル、60 サイクル、100 サイクルで詳細調査を実施している。各サイクルにて 1 水準あたり、3 体のうち 1 体を解体して塩化物イオンの浸透状況および腐食状況について評価を行った。なお、促進サイクルが 25 サイクルに達した際に、塩水噴霧装置に不具合が生じたため、その代わりとして、3% 濃度の塩化ナトリウム水溶液を吸水させたシートで被う工程を 5 日間、温度 20℃ ・湿度 60% 環境下での乾燥工程の 2 日間を 1 サイクルとした促進試験に切り替えている。一方の、海洋気中での暴露試験は、写真-2 に示す沖縄県の沿岸部に供試体を設置して、暴露期間 20 カ月の時点で各水準 1 体を解体して、塩化物イ

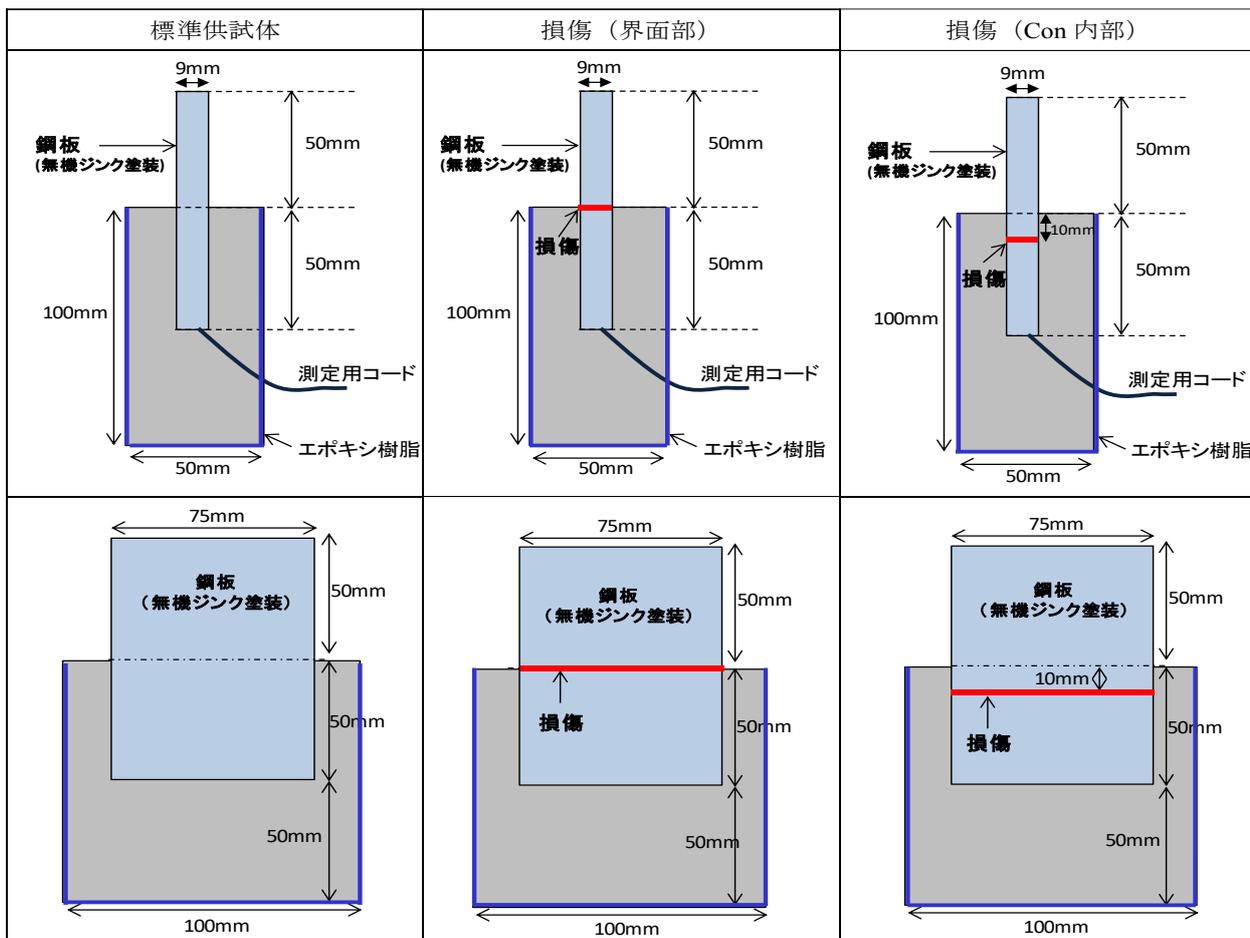


図-1 試験体の概要



写真-1 鋼材のみ供試体(損傷)



写真-2 供試体の設置状況

写真 3. 2. 2 供試体の設置状況

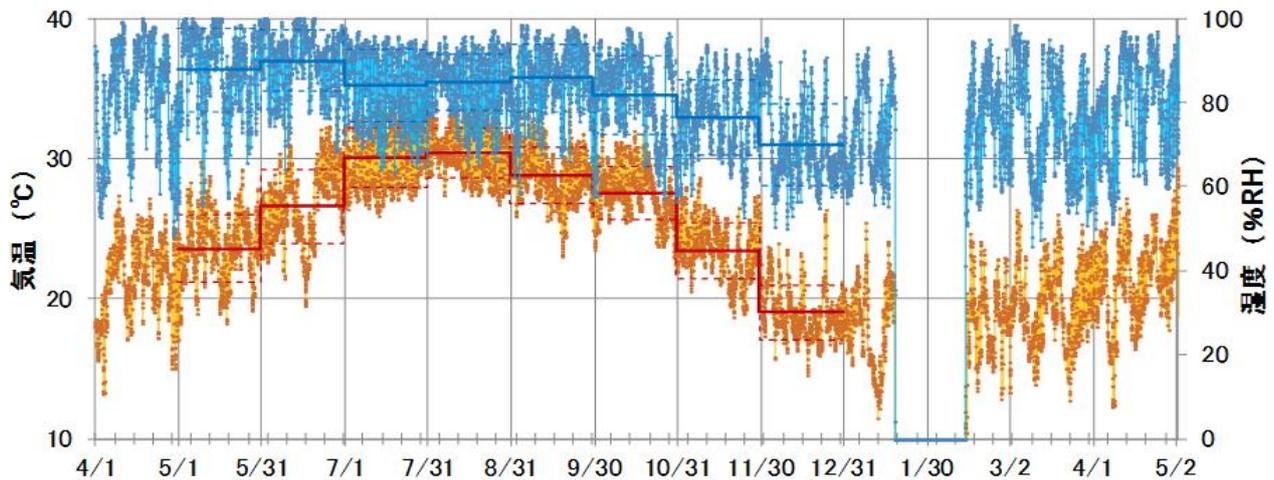


図-2 1年間の湿度・温度変化 (海洋大気中)

オンの浸透状況ならびに鋼板の腐食状況を評価した。

図-2には、暴露環境の情報として2017年4月～2018年5月までの約1年間の温度と湿度の経時変化を示している。また併せて、無機ジンク塗装無し鋼板および無機ジンク塗装有り鋼板、無機ジンク塗装鋼板にカッターナイフで損傷を与えたものも併せて暴露を行った。

(3) 試験方法

a) 外観変化および定期測定

定期的に、デジタルカメラにて外観観察を行った。

b) 全塩化物イオン量

図-3には、全塩化物イオン量を測定するために採取した試料位置を示す。解体した供試体の鋼板との接面において、図-3に示すようにモルタルと鋼板の界面部から深さ方向に10mm, 20mm, 30mm, 40mm位置で等間隔に3箇所ずつφ9mmのコンクリート用ドリルの先端を当てた。ドリルにより深さ5mm位置までの粉体を採取し、3箇所の試料を混合したものを測定試料とした。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の測定を行った。

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付けて腐食部分を描写した後、画像処理にて腐食面積率を算出した。

d) 鋼板の腐食重量

JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して、濃度10%の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。その後は、浸漬前と浸漬後の重量差から鋼板の腐食量を算出した。

(4) 結果および考察

a) 塩水噴霧試験

図-4には、塩水噴霧試験における各サイクルでの鋼

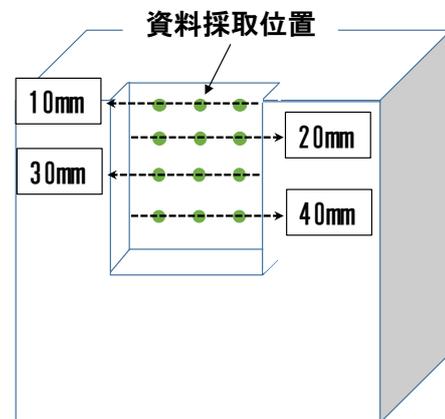


図-3 塩化物イオン量測定のための粉体採取位置

板の腐食状況を示す。20サイクル終了時における健全供試体での腐食状況は、大気部と埋込部の界面付近に腐食が見られ、埋込部側に腐食が分布していた。一方の、界面部に損傷が位置するものは、埋込内部で所々に腐食が見られる程度であった。界面部から10mmに損傷が位置するものは、損傷箇所においても腐食を確認することができなかった。むしろ内部に損傷が存在した方が腐食の進展が低減される状況であった。これは、無機ジンクに含まれるZnが損傷によって溶出しやすくなり、犠牲陽極として機能したものと考えられる。また、いずれも腐食が確認されていない箇所の塗装材は、目視ではあるが、健全性が保たれている様であった。

60サイクルになると、いずれの供試体においても埋込み内部の鋼材で腐食が確認されたが、大気部での腐食は軽微なものであった。健全供試体の腐食状況は、埋込内部の鋼材にて腐食が一様に分布する状況であった。一方で、界面部に損傷が位置するものは、界面部を中心として腐食が進行する様な状況であったのに対し、埋込内部に損傷が位置するものは、損傷箇所よりもさらに深部

		健全	界面部損傷	埋込部損傷
20 サイクル	解体直後			
	60 サイクル			
60 サイクル	無機ジンク・腐食除去後			
	100 サイクル			
100 サイクル	無機ジンク・腐食除去後			

図-4 各サイクルにおける解体直後の鋼板腐食状況



i) 塗装有 ii) 塗装有 + 損傷 iii) 塗装無し

写真-3 各種鋼板の暴露過程での腐食状況

で腐食が進行する状況であった。また、いずれの供試体も埋込部位置において、無機ジंकに含まれる Zn の自己腐食によって生じる白色化が確認された。さらに、100 サイクルになると、いずれの供試体においても埋込部の腐食は、さらに進展している。健全供試体は、全体的に腐食が進行していたのに対し、損傷供試体では、損傷位置を中心に腐食がさらに進行する状況にあった。大気部における鋼板の腐食は、軽微なもので留まっており腐食が抑制されていた。次に、写真-3には、鋼板のみを海洋大気中に20カ月暴露した際の腐食状況を示す。塩水噴霧環境とは、腐食環境が異なるため直接の比較は難しいが、塗装無しのものには全面に赤錆が発生しているのに対し、無機ジंकを塗装したものは、損傷の有無に関わらず、腐食の発生は確認できなかった。カッターナイフ程度の損傷に対しては、大気環境においても無機ジंकに含まれる Zn により十分に防錆が機能している。

以上のことから埋込部内に軽微な損傷や埋込部の薄い箇所がある場合には、その位置の種類で、埋込内部の腐食特性が大きく異なることが分かった。水、塩化物イオンが埋込部での滞水することで、攻撃性がある埋込部において無機ジंकに含まれる Zn から鋼材に対する防食電流が通常よりも多く流れたことや、水が滞水することでモルタル部からアルカリが溶出したことで滞水している水の pH が上昇した結果、Zn の自己腐食により防錆効果が大気部に比べて機能しなかったと推察できる。そのため、無機ジंक塗装材を施しても埋込内部では、Zn が短期間に消耗するため、今回の塩水噴霧試験環境の様に塩化物イオンと水の供給が激しい環境（例えば、凍結融解剤を含む雨水等が直接あたる箇所）での防食は難しく、水や塩化物イオンの侵入を抑制する別の対策と併用することが望ましいと思われる。

図-5には、各サイクルにおける大気部の鋼板腐食面積率を示す。ここでの腐食面積率は、大気部の腐食面積を大気部の鋼板表面積を除いて算出している。供試体種類による腐食面積率には、大差がなく60サイクルを経

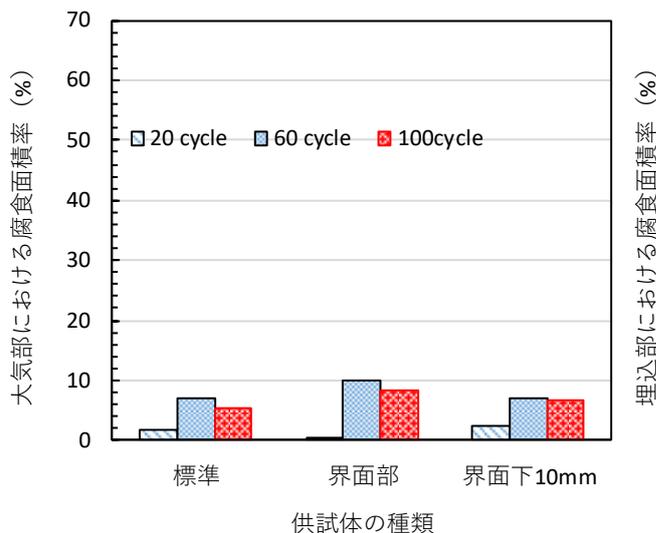


図3.2.6 大気部における鋼板の腐食面積率

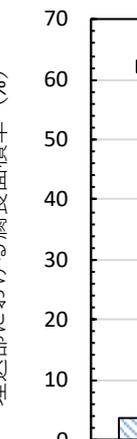


図3.2.7 埋込部における鋼板の腐食面積率

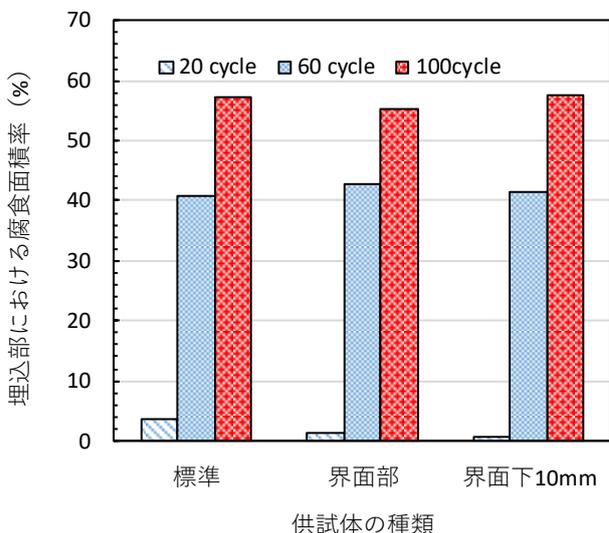


図3.2.7 埋込部における鋼板の腐食面積率

過しても、その後の腐食の進行は軽微であった。一方で、図-6には、各サイクルにおける埋込部の腐食面積を埋込部の鋼板表面積で除して算出した埋込内部の腐食面積率を示している。20 サイクル目から60 サイクル目にかけて、腐食面積率が急激に増加する結果を示した。ただし、供試体の種類による腐食面積率に明確な違いは確認できなかった。

次に埋込部内の鋼板を5mm 範囲ごとに最大孔食深さと腐食を描写したセロハンを画像処理によって5mm 範囲ごとに区切り、腐食面積率を求めて評価を行った結果を図-7に示す。なお、例えば0~5mmの腐食面積率のプロットは、その中間点である2.5mm位置で記している。腐食面積率は、鋼板種類および深さごとに違いが見られ、健全鋼板では、いずれの深さにおいても同程度であった

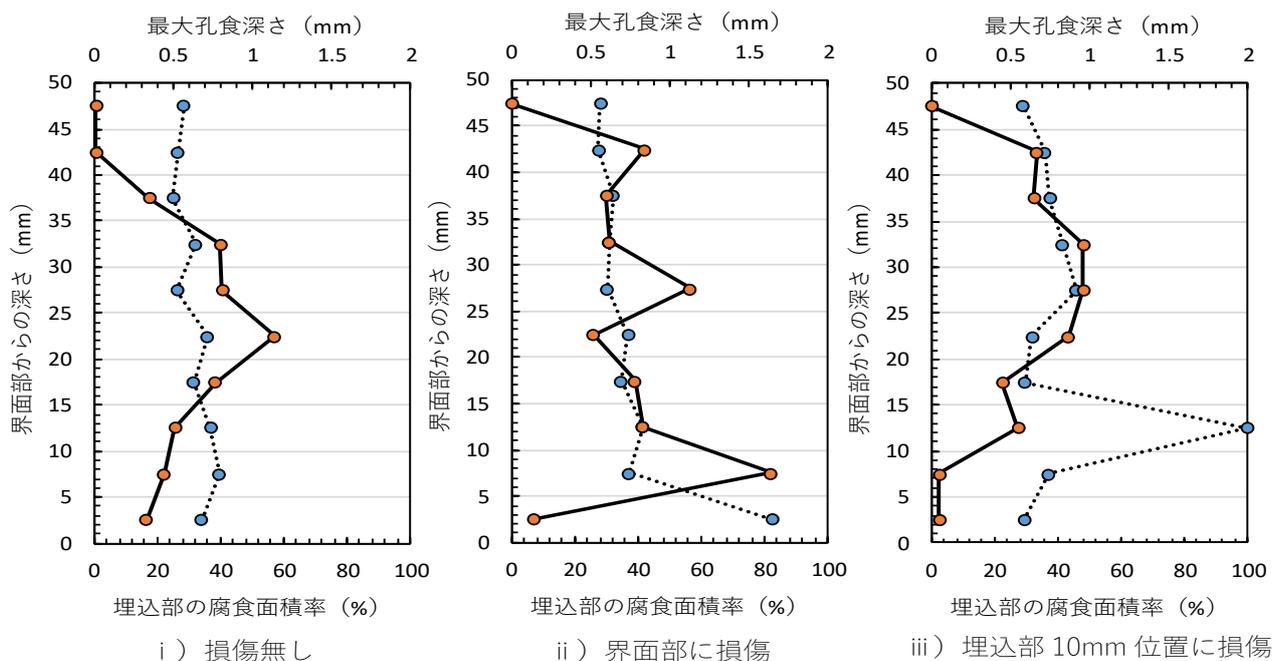


図-7 各種供試体における腐食面積率と最大孔食深さ (60 サイクル)

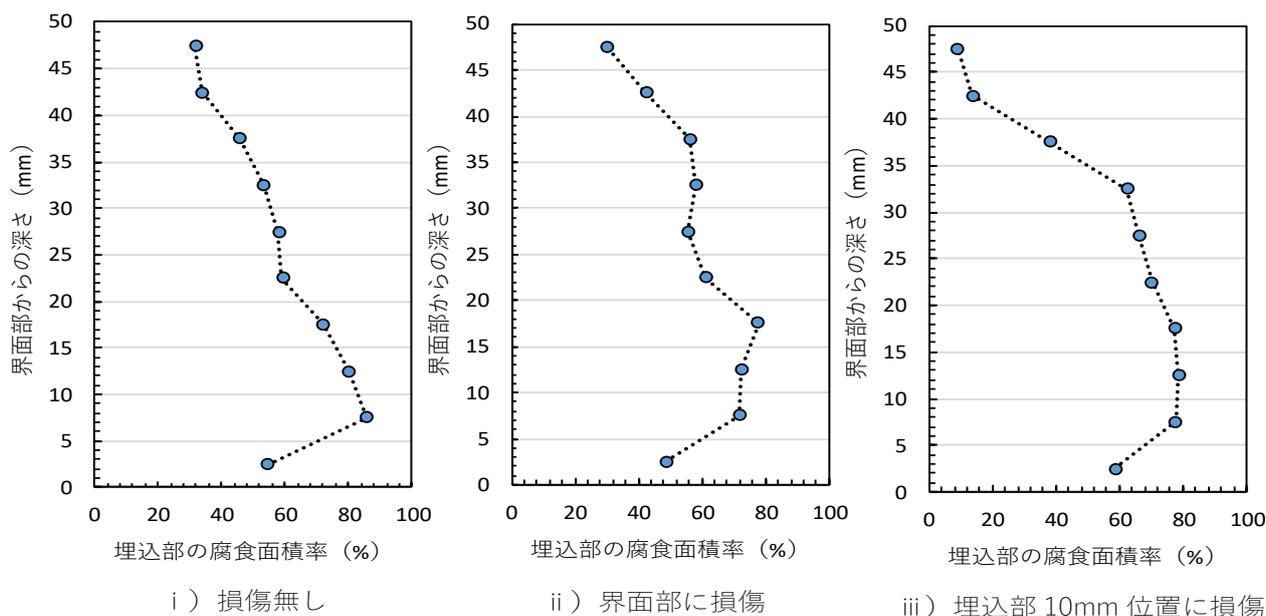


図-8 各種供試体における腐食面積率と最大孔食深さ (100 サイクル)

のに対し、界面部に損傷が位置するものは、界面部で腐食面積率が最も大きくなっている。一方の、埋込部 10mm に損傷が位置するものは、損傷位置で全面腐食が確認された。しかしながら、最大孔食深さを示した位置は、供試体ごとで異なっており、健全供試体で 20mm 位置、界面部損傷で 5mm、埋込部損傷で 25mm 位置となっている。特に、損傷を与えたものは、最大腐食面積を示した位置での孔食は比較的に浅く、それよりも深部で最大孔食が確認されている。最大孔食を示した部分にマク

ロセルによる激しい局部腐食が生じていると言える。図-8 に示すように、100 サイクルになると、いずれの供試体も全体的に腐食が進行しており、損傷位置による腐食発生 of 明確な違いは確認されなくなった。

次に、鋼板埋込部における深さごとの全塩化物イオン量分布を試験サイクルごとに図-9 および図-10 に示す。20 サイクル時点において、全塩化物イオンの浸透状況には、供試体種類で違いは見られなかった。60 サイクルになると、塩化物イオン量は、表層部において界面部、

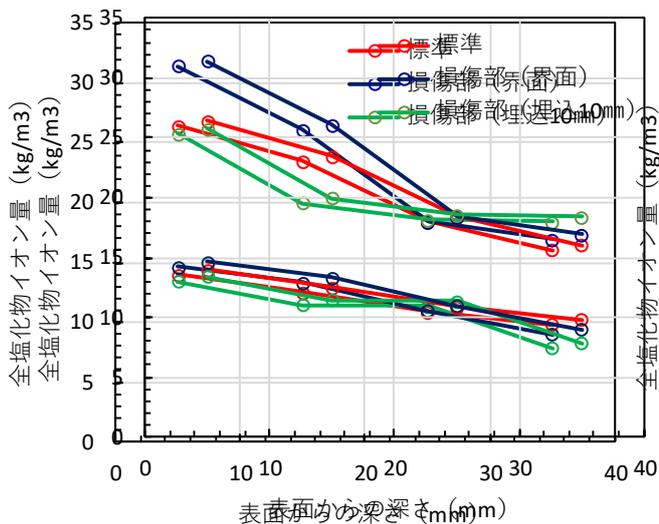


図2-10 各種供試体の塩化物イオン量分布 (20サイクル、60サイクル)

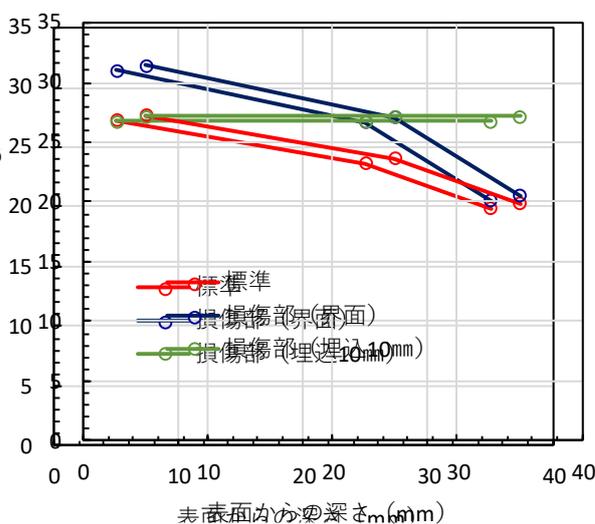


図3-10 各種供試体の塩化物イオン量分布 (100サイクル)

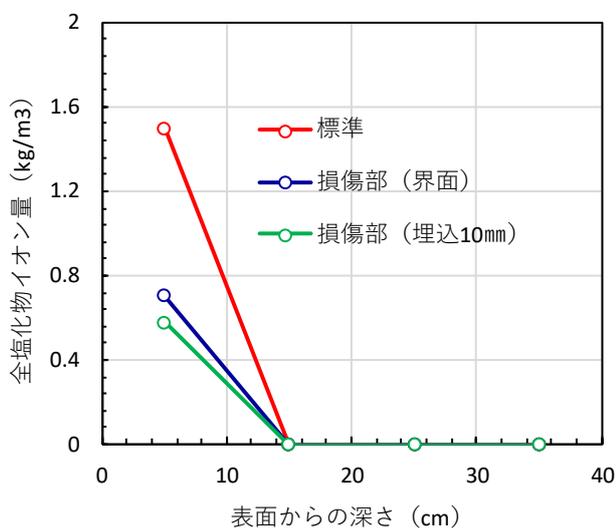


図3.2.11 暴露供試体における塩化物イオン量分布

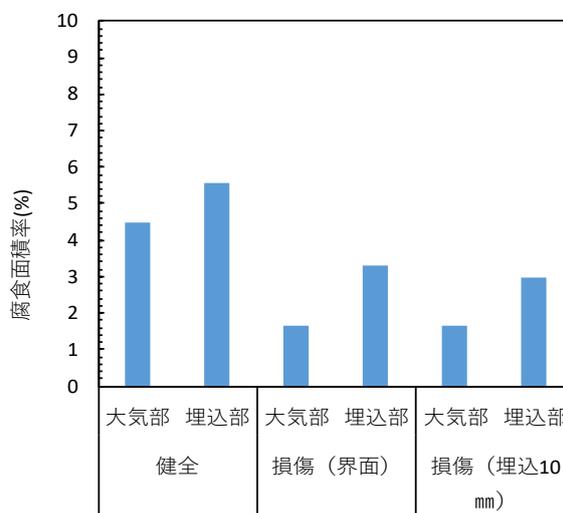


図3.2.12 暴露供試体における腐食面積率

に損傷が位置する供試体が最も多くなっていた。これは界面部に腐食が集中したことで、腐食膨張による鋼材とモルタル部の付着に低下が生じたことで塩化物イオンの浸透が容易になったと考えられる。一方で、埋込内部に損傷が位置する供試体では、25mm 以降の深部で全塩化物イオン量が他よりも多くなっており、最も孔食が見られた 20mm~30mm 範囲と一致していた。これも、孔食位置で付着の低下が生じたと思われる。また、100 サイクルになると、塩化物イオンは、いずれの供試体においても埋込部深部へ浸透しており、表層部において損傷 (界面部) 供試体が最も塩化物イオン濃度が高い結果を示し、深部では損傷部 (界面) の供試体が最もイオン濃度が高くなっていた。

b) 海洋暴露試験

図-11 には、暴露期間 20 カ月目における全塩化物イ

オン量分布を示す。この結果、暴露期間が短いこともあり塩化物イオンは、いずれの供試体も内部に浸透していなかった。一般的な鉄筋コンクリートでは、腐食発生限界塩化物イオン量は、 2.0kg/m^3 程度であるため、腐食は進行していないと予想できる。図-12 には、大気部と埋込部を分けて腐食面積率を示す。この結果をみると、塩化物イオンが浸透していないに関らず、埋込部において腐食の発生が確認された。いずれの供試体も大気部よりも埋込部の方が腐食面積率は大きくなっており、この傾向は、塩水噴霧試験の結果と同様であった。腐食因子の侵入が軽微でも、腐食が発生していることから、埋込内部での無機ジンの自己腐食および水分分布の違いによるマクロセルが形成されていると考えられる。また、損傷無し供試体の腐食面積率は、大気部および埋込部のいずれにおいても損傷供試体よりも大きくなっている。

これは、供試体の設置位置において日射等の気候の違いが影響した可能性があるが、腐食面積も小さいことから、今後も継続して、より長期的に腐食の経時変化を確認していく予定である。

(5) まとめ

以上より、鋼板埋込供試体を用いて行った実験検討を通して得られた結果を以下にまとめる。

1. 無機ジンク塗装鋼板は、大気環境においては防食性能が機能していたが、コンクリートに埋め込まれた部分では、高アルカリ環境であるため自己腐食により防錆性能が低下する状況が確認された。
2. コンクリート埋込部では、損傷や弱点部を中心に腐食の広がりを見せたが、最大孔食深さを示した位置は、それよりも深部であった。コンクリート埋込部内部でマクロセルが形成されていると考えられる。
3. 埋込内部の鋼板に腐食が生じることで、コンクリートと鋼板界面の付着力が生じ劣化因子の侵入が容易になることが分かった。

2. 鋼とコンクリート界面部における水分浸透の評価

(1) はじめに

鋼とコンクリート界面部からの水や塩化物イオンの侵入により埋込部の鋼板が腐食することが1の実験事例により明らかとなったことから、本実験事例においては、鋼とコンクリート界面部からの水の侵入経路とその程度を把握することを目的とする。

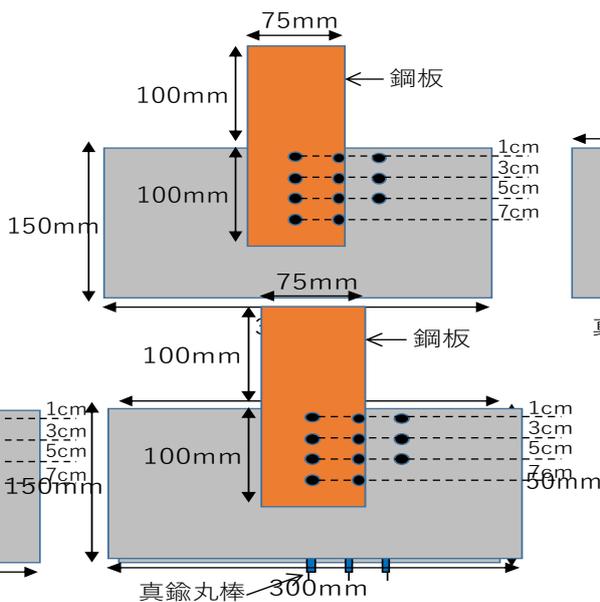


図-13 実験供試体の概要

(2) 実験概要

a) 試験に用いた基盤モルタルおよび鋼板

基盤モルタルの配合は、1の実験事例と同様に、一般的なコンクリート橋上部工よりも高い水セメント比50%で作製した。鋼板は、一般的に実構造物で建設中の鋼材を防食する目的で使用されているZnを含有する無機ジンクで塗装したものをを用いた。

b) 試験体および測定の概要

試験体は、図-13に示す様に150mm×150mm×300mmの角柱モルタル内に200mm×75mm×9mmの鋼板を深さ100mm位置まで埋設したものを作製した。鋼板厚さは、実構造物で使用されているものと同様にした。用いた鋼板は、裸鋼板と全面に無機ジンク塗装を施した2種類を用いた。供試体の作製後は、コンクリート部を温度20℃の環境下で湿布養生を行った後に、上面と底面を除いて、全てアルミテープで被覆してから沖縄県の沿岸部に供試体を3カ月間静置させた。供試体内部には、水分分布を測定することを目的として、両端以外をエポキシ樹脂で被覆した真鍮丸棒を所定の位置に埋め込んでいる。その後は、沖縄県の沿岸部に供試体を2018年12月～2019年4月まで設置した。2019年4月に供試体上部に水を張り、1h、3h後に深さごとにA-B間およびB-C間の抵抗値をLCRメータによって抵抗値の測定を行った。

(3) 結果および考察

図-14には、塗装鋼板における測定箇所A-B間の比抵抗値の変化率を深さごとに示す。この結果、いずれの深さにおいても比抵抗の変化率には、時間が経過しても大きな変化は見られなかった。モルタルと鋼板の付着力が保持されており、水の侵入が抑制されていると思われる。

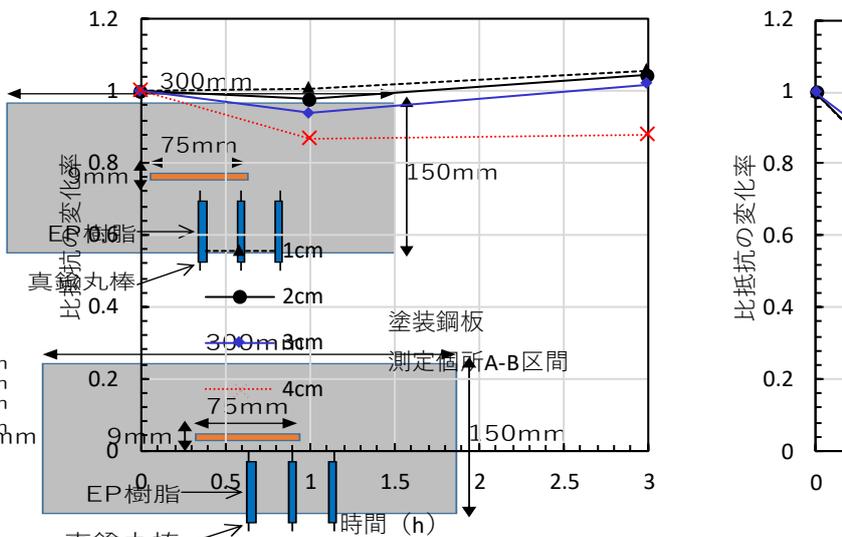


図 3. 3. 2 塗装鋼板における測定箇所 A-B 間の比抵抗の経時変化

図 3. 3.

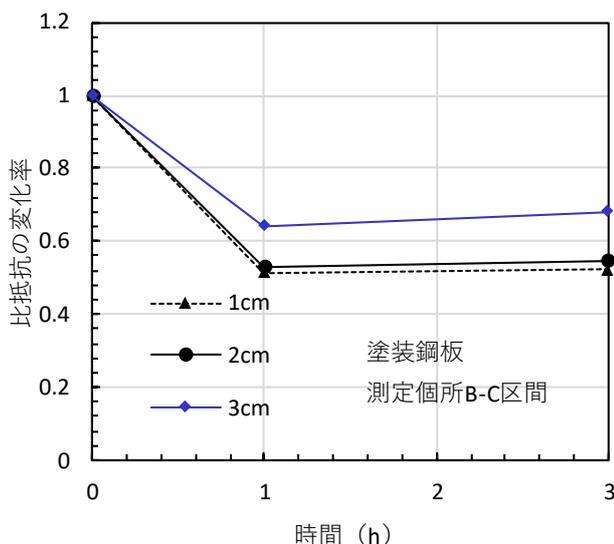


図-15 塗装鋼板における測定箇所B-C間の比抵抗の経時変化
図 3.3.3 塗装鋼板における測定箇所 B-C 間の比抵抗の経時変化

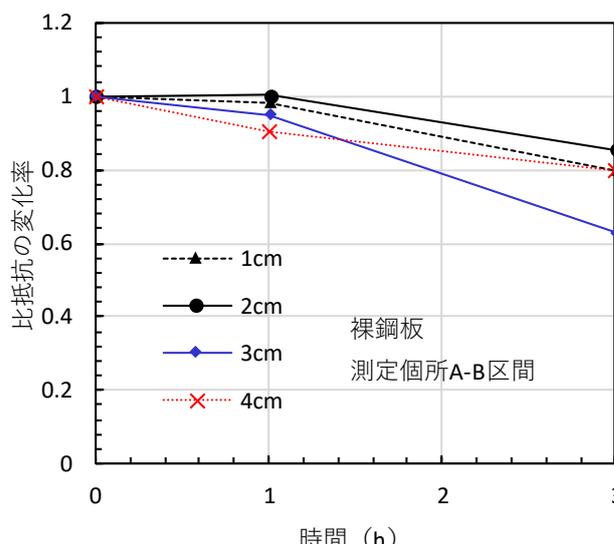


図-16 裸鋼板における測定箇所A-B間の比抵抗の経時変化
図 3.3.4 裸鋼板における測定箇所 A-B 間の比抵抗の経時変化

図-15には、塗装鋼板における測定箇所 B-C 区間の比抵抗の変化率を示しているが、いずれの深さにおいても比抵抗は、1 時間で水が侵入したことと低下する結果を示している。また、3 時間を経過しても抵抗値はさらなる低下を示さなかったことから、1 時間程度の短時間で水が埋込内部に浸入し、飽和状態になっていると推定される。以上の結果より、水は鋼板平面部よりも隅角部の方から水が侵入していると考察された。

図-16には、裸鋼板における測定箇所 A-B 区間の比抵抗値の変化率を示す。この結果、水張りから 1 時間程度では、抵抗値に変化が生じていないが、3 時間を経過するといずれの深さにおいても低下していた。裸鋼板の方が塗装鋼板よりも界面部の腐食が進んでいると推察されることから、腐食の生成によってモルタルと鋼板の付着力が低下したと考えられる。

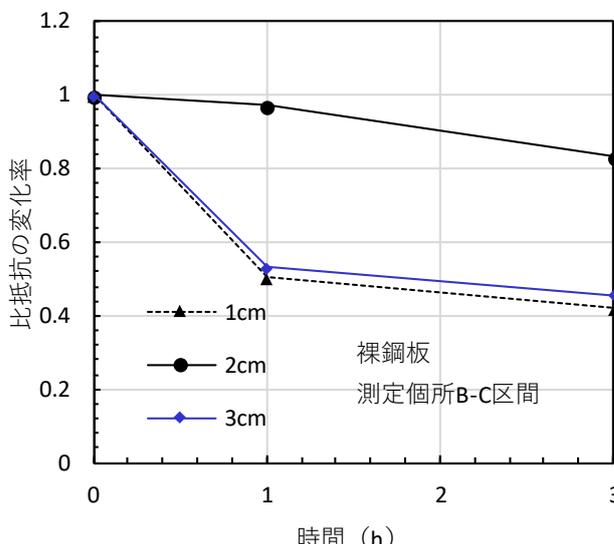


図-17 裸鋼板における測定箇所B-C間の比抵抗の経時変化
図 3.3.5 裸鋼板における測定箇所 B-C 間の比抵抗の経時変化

図-17には、裸鋼板における測定箇所 B-C 区間の比抵抗値の経時変化を示しているが、いずれも 1 時間程度で抵抗値に低下が見られている。腐食がほとんど進行していない状況であっても、鋼板とモルタルとの熱伝導率の違いやモルタルの収縮等によって付着が低下していると思われる、特に隅角部からの水の侵入が容易であると考えられた。

以上のことから、鋼とコンクリートの接着部においては、水分の浸透が容易であり、例え腐食が見られていなくても特に隅角部を有する箇所から容易に劣化因子が侵入することを示唆しており、劣化因子の侵入を防ぐ対策が必要であると言える。

(4) まとめ

ここでは、4 ヶ月程度の暴露した供試体を用いて、水張試験を行い供試体埋込内部の比抵抗値の測定により水

分布を検討した結果、本実験を通して得られた結果を以下にまとめる。

1. 外観では塗装鋼板に腐食が確認されていない場合でも、コンクリートと鋼板の付着力は低下していると考えられ、界面に沿って水は浸透しており、特に隅角部から侵入が顕著であった。
2. コンクリートと鋼板界面において、水の侵入を抑制することは難しく、水が侵入することを前提とした設計が好ましいと言える。

参考文献

1) 貝沼重信, 細見直史ら: 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挙動に関する研究, 土木学会論文誌, No.780/I-70, 土木学会, pp97-114, 2005.

- 2) 中嶋ら：鋼とコンクリート界面の腐食の発生・進展に関する基礎的研究, 第9回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会, pp.417-422, 2011.
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]

(Receded August 30, 2019)

STUDY ON THE CORROSION MECHANISM AT THE CONCRETE-STEEL-WATER INTERFACE

Akari KOJIMA, Hirotaka HAZEHARA, Hiroshi NISHI, Nozomu TANIGUCHI and Iwao SASAKI

In deteriorating reinforced concrete structures, there are some cases in which local corrosion occurs in the steel bars leading to failure of structure. In order to elucidate this deterioration mechanism, the occurrence of macrocell corrosion was analyzed, and the corrosion characteristic was observed over time by water infiltration.

It was found that when inorganic zinc was applied as a sacrificial anode, the pH increased as more water penetrated into the concrete due to electrochemical reaction. It was clarified that the progress of macrocell corrosion was due to the environmental difference inside the concrete with varying distribution of oxygen and moisture and not due to the difference with external environment. In addition, the penetration of water from the outside reduces the adhesion at the interface between the steel plate and the concrete even if no deterioration has occurred.