論文　複合構造物におけるコンクリートと塗装鋼板の界面部での腐食特性に関する基礎的研究

櫨原　弘貴[*1]・谷口　望[*2]・佐々木　巌[*3]・大西　弘志[*4]

要旨：無機ジンク塗装鋼板を用いて，トリプルコンタクト部における腐食特性の把握を目的として実験を実施した結果，腐食は，大気部よりも埋込内部の鋼板に多くの腐食が確認された。また，埋込部内に損傷や塗斑がある場合には，損傷位置よりも深部でマクロセルが形成されて孔食が大きかった。また，コンクリート内部に塩化物イオンが供給され，また滞水が生じやすい環境では，埋込部において無機ジンクに含まれる Zn からの防食電流が流れやすく，無機ジンク塗装材の消耗が激しいと考えられた。そのため，塗装材のみでは，埋込内部での腐食の抑止は難しいと予想されたことから，別途に対策工を設ける必要があると考えられた。

キーワード：トリプルコンタクト，鋼板腐食，塩化物イオン

1. はじめに

近年，複合構造物のコンクリートと鋼材界面部において経年による腐食損傷が数多く見られている。腐食損傷は，従来から見られる現象であり，様々な予防保全が行われているにもかかわらず問題となる事例が散見されている。その中でも特に，鋼およびコンクリートと大気がそれぞれ接触している鋼材とコンクリートの界面「トリプルコンタクト」において重大な腐食損傷に至った事例が多い。この代表的な事例として挙げられるのが，2007 年国道 23 号木曽大橋でコンクリート床版とトラス斜材との境界部の鋼材に腐食損傷が確認され，腐食が進行したことで部材破断にまで至ったものである。損傷は，いずれも目視検査時に目の届きにくい部位となる場合も多く，腐食損傷が外観に現れ難いものが多い。

トリプルコンタクト部に着目した腐食特性に関する研究としては，貝沼ら[1)]は，鋼板にコンクリートを取り付けた要素供試体の促進劣化試験を実施しており，経時的な腐食挙動を確認している。コンクリート内部に埋込まれた鋼材は，コンクリート境界近傍に腐食が集中するタイプ，局部腐食が全面にほぼ一様に分布するタイプ，局部腐食が境界近傍以外に集中しているタイプに分類されることを示唆している。実構造物に見られるコンクリート境界近傍に腐食が集中するタイプでは，一般的に，酸素濃度差による通気差電池が形成されていると言われている。一方で，中嶋ら[2)]は，鋼とコンクリートの複合構造物においては，コンクリートの収縮や温度差によって界面部に隙間が生じて，この隙間より水や酸素が侵入することで，コンクリート中の鋼材に腐食が生じるという観点のもとに研究が行われている。これらの研究は，トリプルコンタクトの腐食特性の解明に有益な情報を与えている。ただし，実験目的の都合上，裸鋼板が用いられており，鋼板露出部がアノード部として先に腐食が進展する実験ケースとなっている。しかし，実構造物では，大気部での腐食は確認されずに，埋込内部に腐食が進展しているケースが散見されている。通常は，大気部がアノード側になるため，埋込内部が先行して腐食するとは考え難い状況にある。一般的に実構構造物の鋼材には，防錆材が塗装されているため，この塗装材が埋込部での腐食形態に何らかの影響を及ぼしていると考えられた。

そこで本研究は，塗装鋼板におけるトリプルコンタクト部における腐食特性を把握することを目的とした。また，塗装材の塗膜厚の不均一性によって生じる影響についても検討を行うために，予め微小な損傷与えた塗装鋼板を用いたケースでも検討を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

試験体は，**図-1** に示す様に 10cm×10cm×5cm の角柱モルタル内に 10cm×7.5cm×0.9cm の鋼板を高さ 5cm 位置まで埋設したものを作製した。モルタルには，セメントとして普通ポルトランドセメント，細骨材に海砂（密度 2.58kg/m^3）を使用して，**表-1** に示す配合で作製した。なお配合は，通常の上部工の配合とは異なり塩分浸透を促進させる目的で貧配合とした。また，表中の W：単位水量，C：単位セメント量，S：単位細骨材量を示している。鋼板には，一般的に防錆材として実構造物でも使用されている Zn を含む無機ジンクを塗装した。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

*1 福岡大学　工学部社会デザイン工学科　博士(工学)　(正会員)
*2 前橋工科大学　工学部土木工学科　博士(工学)　(正会員)
*3 国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター 博士(工学)　(正会員)
*4 岩手大学　理工学部土木工学科　博士(工学)　(正会員)

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。また，埋込の鋼板に平行して分極抵抗を測定するために，ステンレス板も埋設しているが，無機ジンク塗装の影響により分極抵抗を適切に測定することができなかった。そのため，本論では，その結果について記載はしなかった。

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各種環境下で腐食促進を行った。

腐食促進の方法は，塩水噴霧試験と海洋大気中での曝露試験とした。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サイクルまで実施している。各サイクルで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。残りの1供試体は，現在も促進サイクル中である。一方の，海洋大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

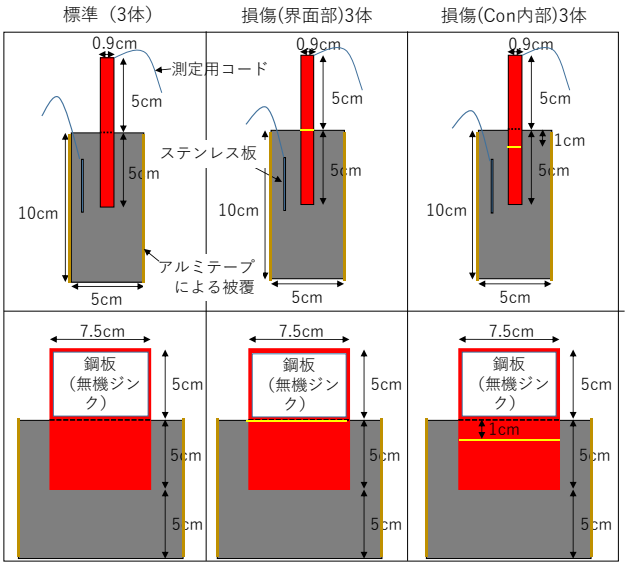
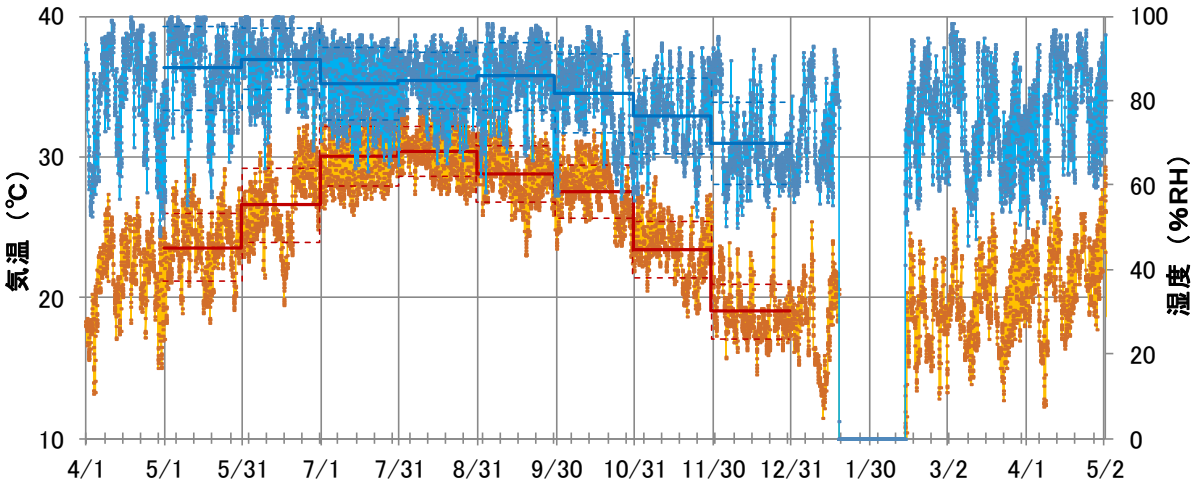


図-1　供試体概要

写真-1　鋼材のみ供試体（損傷）

写真－2　供試体の設置状況



図－2　1年間の湿度・温度変化（海洋大気中）

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曝露を行った。

(2) 測定項目および方法

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。また，鉛照合電極を用いて，予め接続していたリード線を介して，被覆してあるアルミテープを剥がして，埋込部中央位置に電極を当てて，鋼板の自然電位の測定を行った。ただし，無機ジンク塗装の影響により，適切に測定できなかったことから，結果では記載していない。

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。

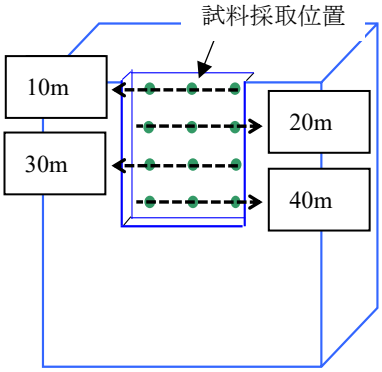
d) 鋼板の腐食重量

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。

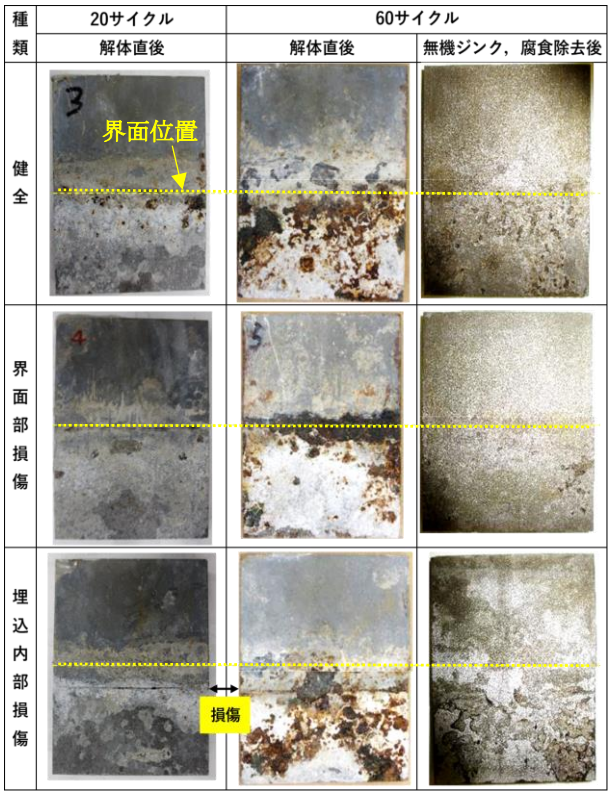
3. 結果および考察

3.1 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，損傷個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個所の塗装材は，目視ではあるが，健全性が保たれているような状況であった。



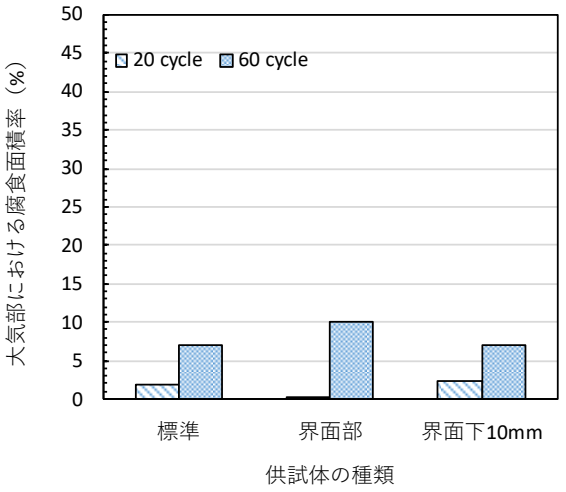
図－3　塩化物イオン量測定のための粉体採取位置



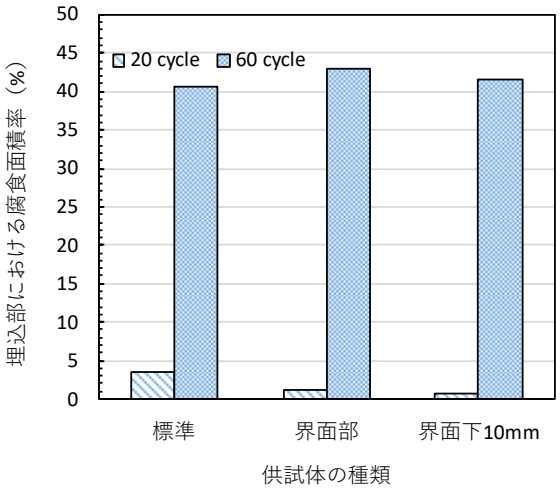
図－4　各サイクルにおける解体後の鋼板の腐食

i）塗装有り　　ii）塗装有＋損傷　　iii）塗装無し

写真－3　鋼材のみの腐食状況



図－5　大気部における鋼板の腐食面積率



図－6　埋込部における鋼板の腐食面積率

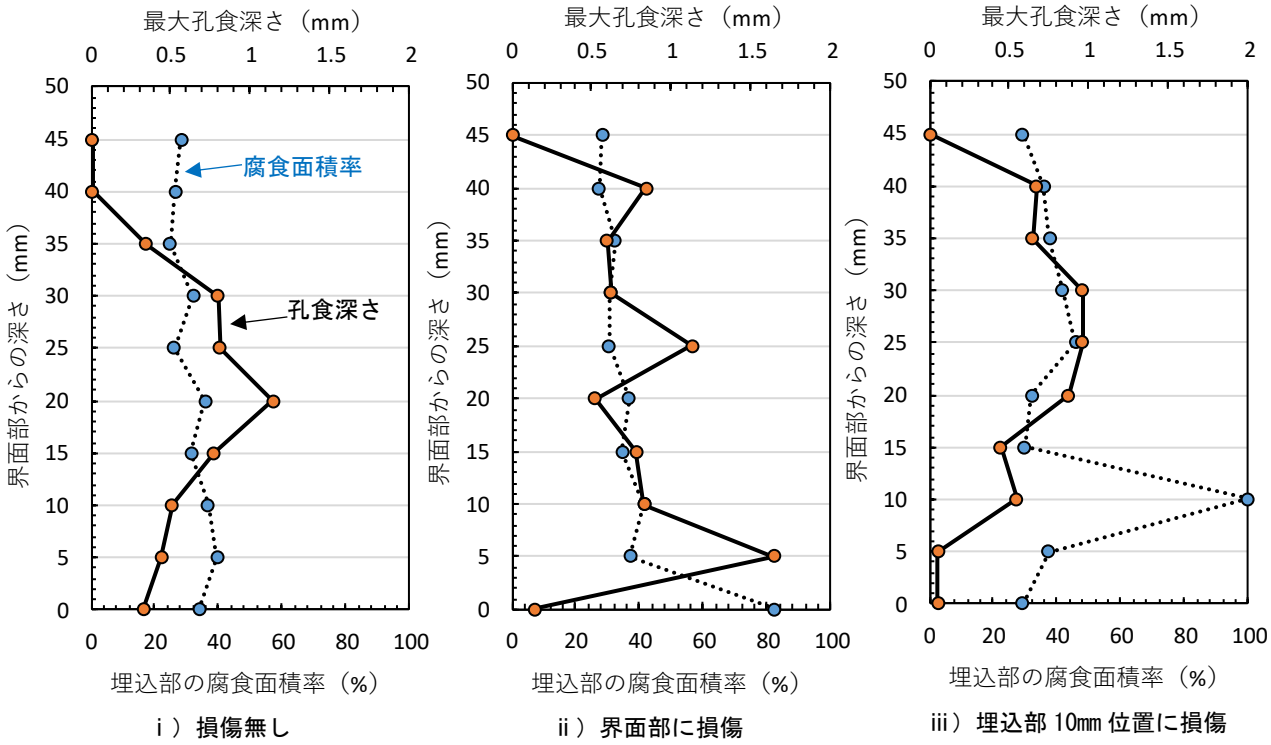


図-7　各種供試体における腐食面積率と最大孔食深さ（60 サイクル）

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状況が確認された。さらに，埋込内部に損傷が位置するものは，損傷個所よりも，さらに深部で腐食が進行する状況であった。以上のことから，埋込部内に軽微な損傷や塗装厚が薄い箇所がある場合には，その位置によって，埋込内部の腐食特性が大きく異なることが分かった。また，埋込内部の塗装材は，60 サイクルになると腐食が確認されていない個所においても白く変色しており，塗装材の劣化も確認された。

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，塗装無しのものは，全面に赤錆が発生しているのに対して，無機ジンクを塗装したものは，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，無機ジンクに含まれる Zn により十分に防錆されることが分かった。さらに，埋設部において腐食が明らかに進展しており，また大気部には見られなかった塗装材の白色化が確認されたことから，水，塩化物イオンが埋込部での滞水することで，伝導性があがり埋込部に

おいて無機ジンクに含まれる Zn から鋼材に対する防食電流が通常よりも多く流れたと推察される。そのため，塗装材が短期間に消耗したと思われる。塩水噴霧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）では，鋼板に塗装材を施しても腐食の抑止は難しく，別の対策工と併用する必要があると思われる。

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で除して算出している。供試体種類による腐食面積率には大差がなく，60 サイクルにかけての腐食の進行は軽微であることが分かる。**図－6** 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。そこで，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り 5mm 範囲ごとに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，5mm～10mm の範囲の測定結果は，測定開始深さにプロットしている。腐食面積率は，鋼板種類および深さごとに違いが見られ，健全鋼板の腐食面積率は，いずれの深さにおいても同程度であった。それに対して，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たと言える。このことから，塗装の塗斑や損傷は，無視できないと考えられ，アノード部として腐食する際に，損傷の位置や程度の影響でアノード部とカソード部の距離や面積比が異なってくる。そのため，マクロセル腐食形成が大きく異なると予想された。

図－8 には，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ものと考える。一方で，埋込内部に損傷が位置する供試体

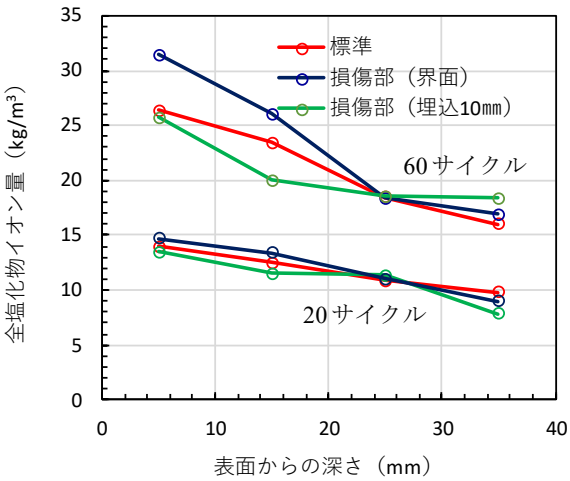
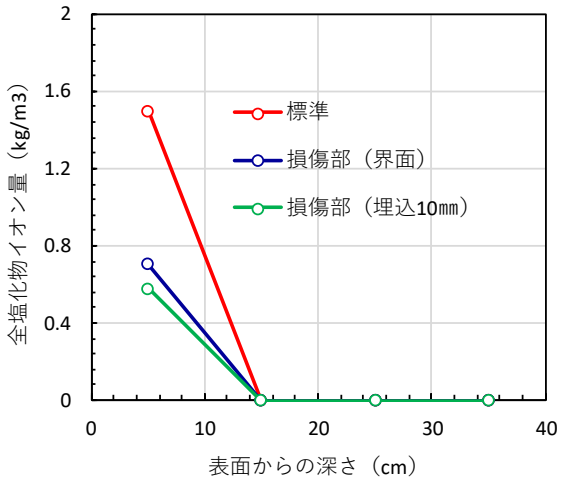
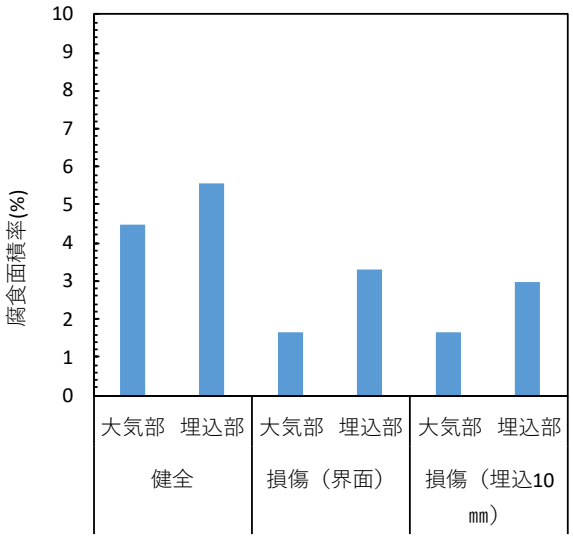


図 - 8　各種供試体における塩化物イオン量分布



図－9　暴露供試体における塩化物イオン量分布



図－10　暴露供試体における腐食面積率

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いた。最も孔食が見られた 20mm～30mm 範囲と一致しており，埋込内部で付着力の低下が生じていると思わる。

3.2　海洋暴露試験

図－9 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，いずれの供試体においても塩化物イオンは，あまり供試体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 [3]，腐食は進行していないと予想できる。**図－10** 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も関らず，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，大気部と埋込部との間に通気差電池によるマクロセルが形成されたと考えられる。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，暴露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。

以上より，本結果においても損傷の有無に関係なく埋込部に腐食が生じており，塗装材のみでは埋込部の腐食は防げないことを示唆していると思われる。

3. まとめ

無機ジンクを塗装した鋼板におけるトリプルコンタクト部の腐食特性を把握することを目的として検討を行った結果，以下の知見を得た。

1) 無機ジンク塗装鋼板の場合には，既往の研究とは異なり，大気部よりもコンクリート埋込部での腐食が卓越する結果を示した。
2) コンクリート内部に滞水が生じる様な環境では，埋込部内の無機ジンク塗装に含まれる Zn からの防食電流が多く流れたことで，塗装材の消耗が激しくなると予想できた。塗装材のみでは，埋込内部の腐食の抑止は難しいと考えられる。
3) 塗装材の塗り斑や軽微な損傷がある場合には，埋込内部の腐食特性は大きく異なり，損傷位置よりも深部でマクロセルが形成されていた。
4) 腐食の進行に伴って，鋼板とコンクリートの付着が低下することで，さらに塩化物イオンが深部に浸入する状況を確認することができた。
5) 塩化物イオンが侵入していない場合でも大気部と埋込部との間に通気差によるマクロセルが形成されることが分かった。

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，土木学会論文集，No.780/I-70，土木学会，pp.97-114, 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［設計偏］