

鋼コンクリートの境界部の腐食に関する調査

田中良樹* 村越 潤**

1. はじめに

防護柵支柱や照明柱のようにコンクリートに埋め込まれた鋼材の埋込み境界部において、鋼材の著しい腐食が見られることがある。鋼とコンクリートの境界部(以下、鋼コンクリート境界部)における腐食の要因は、防食に関わるものを含め、材料、施工、環境それぞれの面から多岐にわたっている。

道路橋の事例としては、鋼トラス橋において斜材がコンクリート床版に埋め込まれた部分が、著しい腐食による断面欠損によって、破断に至った事例がある¹⁾。橋梁用防護柵、鋼製橋脚基部、パイルベントなども類似の腐食が懸念される。一方、波型鋼板ウェブPC橋をはじめとする複合PC橋、鋼げたとコンクリート製下部構造の剛結部など、近年採用されているさまざまな新形式橋梁においても、同境界部の防食が課題の一つである。中には本体構造の保持に重要な箇所に、鋼コンクリート境界部があるものも含まれる。

これらと関連して、鋼コンクリート境界部における腐食について、腐食促進試験による検討が行われ、その場合の腐食パターンの評価方法や境界部をシリコンによりシールすることによって防食効果が改善されることなどが報告されている^{2), 3)}。照明柱に関しては、実態調査を踏まえて点検方法が検討されている⁴⁾。しかし、道路橋における鋼コンクリート境界部について、実構造物を用いた調査は重大損傷の事例に限られ、実態の詳細な把握が十分に行われていないのが現状である。

本文では、撤去された道路橋部材の腐食調査事例を紹介するとともに、鋼コンクリート境界部の腐食について、現時点で考えられる要因と留意点、及び今後の課題を示す。

2. 沿岸部における橋梁用防護柵支柱の腐食

撤去された道路橋に設置されていた防護柵支柱

の中から、写真-1に示す1本に着目して、支柱周囲のコンクリート中の塩化物イオン分布及び支柱の鋼材の腐食状況について、調査を行った。本橋は日本海沿岸部で供用され、2005年に、上部構



写真-1 調査対象の防護柵支柱(撤去直前)

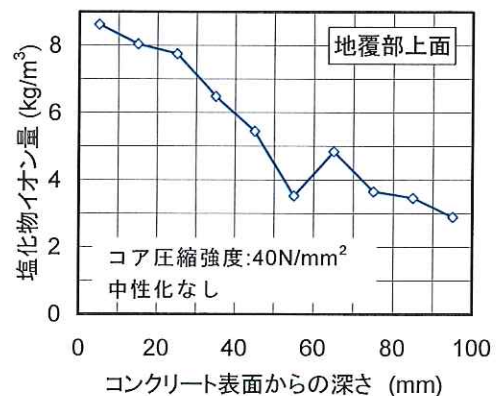


図-1 地覆コンクリートの塩化物イオン分布

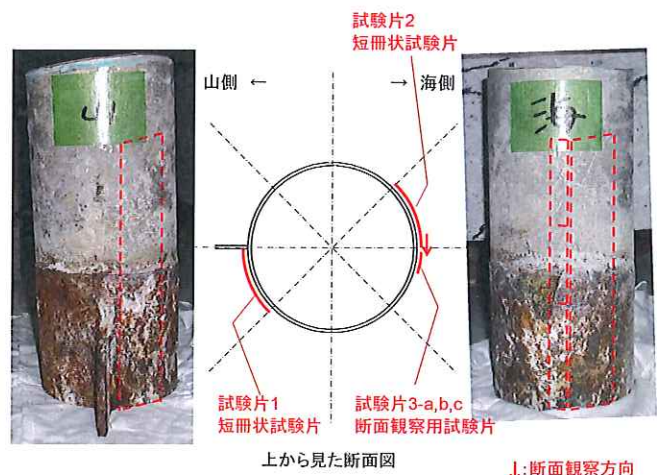


写真-2 防護柵支柱基部の腐食

造の塩害により撤去された。この防護柵と地覆は、1985年前後に取り換えられたもので、約20年間、厳しい塩分環境に置かれていた。基部コンクリートには、支柱の鋼材腐食によると思われるひび割れ、錆汁が見られた。図-1に、支柱近傍の地覆に含まれていた塩化物イオン量の分布を示す。コンクリート中には、コンクリート中の鋼材の腐食限界値($1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ 以上)を超える多量の塩化物イオン量が浸透しており、厳しい塩分環境であったことがわかる。

写真-2に、取り出した支柱基部の腐食状況を示す。支柱の基部のうちコンクリートに埋め込まれていた範囲全体にわたって、層状のさびが発生していた。写真中、破線で示す位置から試料を切り出し、めっき除去、さび除去を行った。写真-3に、めっき除去後(さびは除去途中)の状況を示す。切り出した鋼材における境界位置は、板の下端からの距離によって確認した。腐食による断面欠損は、コンクリート埋設部で顕著であり、露出していた範囲では、コンクリートから高さ5~7mmの範囲で軽微な断面欠損が見られた。図-2に、さび除去後の境界部付近とコンクリート中に埋め込まれていた範囲における断面欠損深さ測定結果を示す。この測定結果の範囲では、断面欠損深さは、地覆表面から深さ15mmより深い部分で、深さに関係なく概ね同程度の腐食が見られ、最大深さは約1.0mmであった。

別途切り出した鋼材のめっき層及びさび層を観察するため、元素分析装置を有する走査型電子顕微鏡(SEM/EDS)により高さ方向断面の成分分析を行った(この防護柵支柱はアルミめっきされていた)。図-3に、気中、コンクリート中及び境界部付近(境界部の約5mm下)における成分分析結果のうち、アルミニウムイオンの結果を示す。図中、分析結果に基づき、鉄イオンの範囲も参考として示す。気中では、アルミめっき層が明確に認められる。地鉄部分との間に混在部が見られ、熔融アルミめっきの合金層と思われる。一方、コンクリート中では、表層に若干のアルミニウムイオンが見られるが、アルミめっき層はほとんど消失していた。境界部でも、コンクリート中ほどではないが、アルミめっきの大部分が消失していた。なお、腐食が見られなかった気中部のめっき厚は、めっきの除去前に電磁式膜厚計(K社製LE900j)を

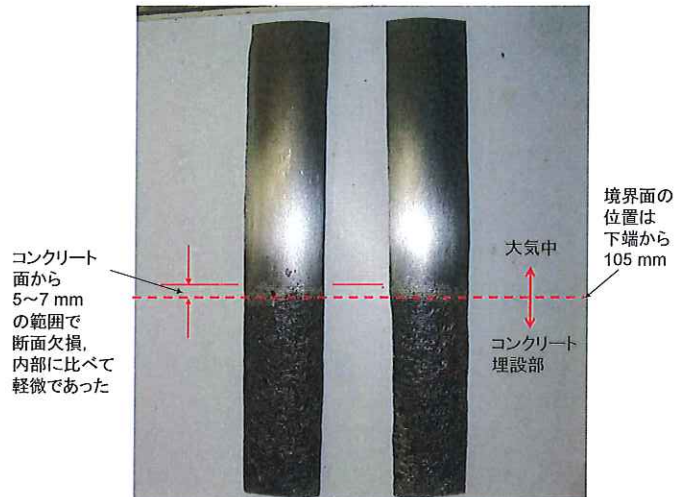


写真-3 支柱試料のめっき除去後の状況

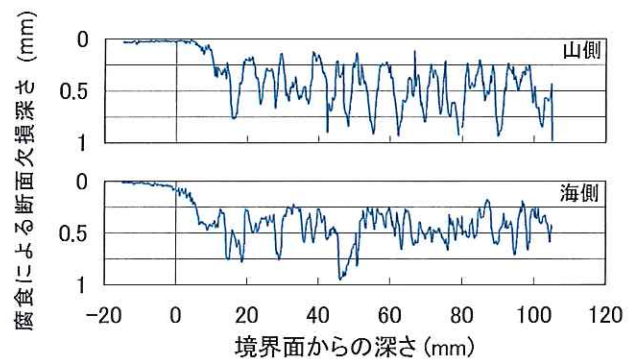


図-2 腐食断面形状の測定結果

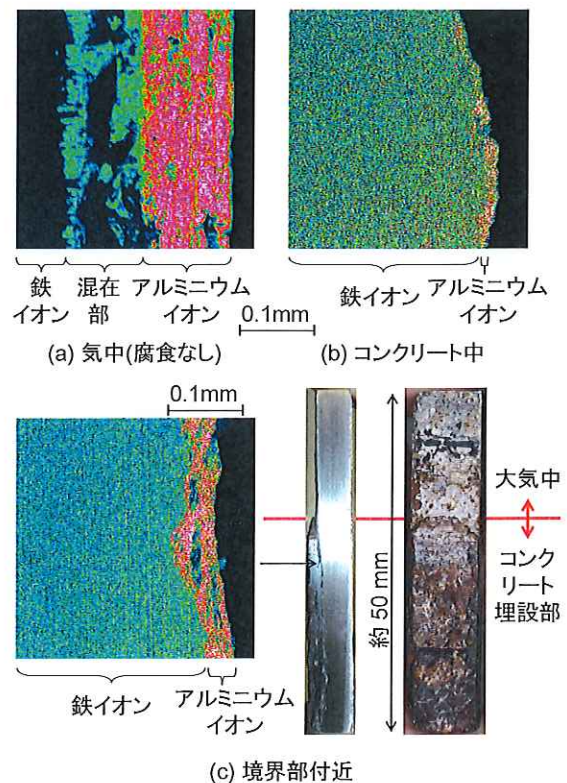


図-3 めっき層の断面観察

注) (a)~(c)それぞれのカラースケールは異なる。

用いて測定したところ、 $0.18\sim0.29\text{mm}$ であった。図-3の気中の結果と比較すると、膜厚計で測定しためっき厚は、混在部も含むものと考えられる。

支柱周囲のコンクリート中の塩化物イオン分布と、消失したアルミニウムイオンの行方を把握するため、図-4に示すとおり支柱に接していたコンクリートの試料を切り出して、EPMA分析(元素分析の一手法⁶⁾)を行った。図-5に、それらの結果の一例として、試料No.1の結果を示す。骨材中には多量のアルミニウムイオンが含まれ、外部からの浸入状況を判別し難いので、図-5(b)では骨材部分を黒く表示している。図中のスケールは値が大きいほど、濃度が高いことを表す。図-5における水平方向のひび割れは鋼管を取り出す際に生じたものと考えられる。塩化物イオンは、図-1の結果と同様に、地覆上面からコンクリート中に多量に浸透していた。また、支柱と接していた箇所には塩化物イオンの高い濃縮が見られる。塩化物イオンは、何らかの要因により発生した支柱とコンクリートの隙間から浸入した可能性がある。アルミニウムイオンの濃縮は、支柱に接した箇所での塩化物イオンの濃縮箇所と概ね同じ位置に見られる。この位置の塩化物イオンの拡散が顕著でないことから、これらの多くは塩化アルミニウムとして存在していたと考えられる。

写真-2の腐食部分に薄層の白色物質が見られたので、X線回折により成分分析を行った。その結果、白色物質は水酸化アルミニウムであることがわかった。

以上の結果より、支柱のめっき層から消失したアルミニウムイオンは、一部は塩化アルミニウムとしてコンクリートとの境界部に存在し、その他は水酸化アルミニウムとしてさびに固着していた。コンクリート中の水酸化物がアルミめっきを劣化させるとともに、コンクリート中に浸透した塩化物イオンが鋼材の腐食を促進したと考えられる。また、孔食の深さがコンクリート中の埋め込み深さによって大きく変化していなかったのは、鋼とコンクリートの隙間に浸入した塩水の影響が、図-2に示したコンクリート表面からの塩化物イオン浸透の影響よりも大きかったことによると考えられる。

なお、塩化物イオンを多量に含んだコンクリート中に埋め込まれたアルミ材は、著しい腐食が生

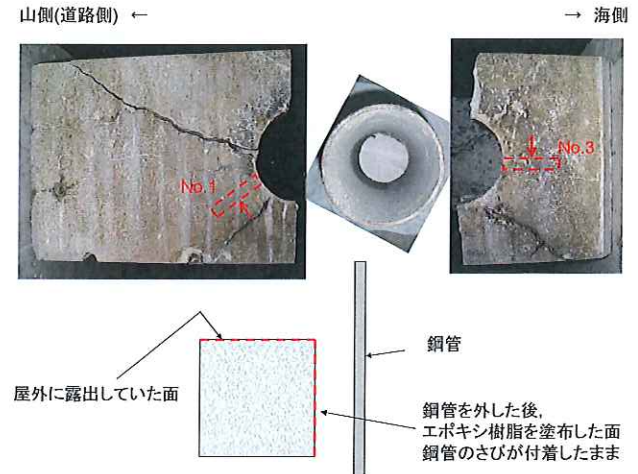
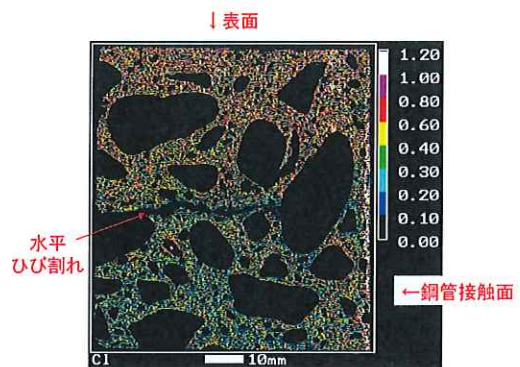
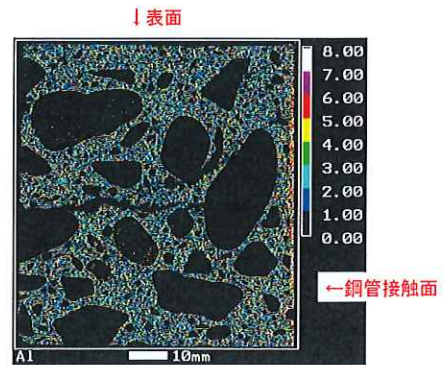


図-4 コンクリートのEPMA試料採取箇所



(a) 塩化物イオン分布



(b) アルミニウムイオン分布

図-5 支柱近傍のコンクリートのEPMA分析結果

注) 測定面積: いずれも $80\text{mm}\times80\text{mm}$



写真-4 撤去前のパイルベントの状況

じることが知られている⁶⁾。アルミ材、アルミめっき材ともに、沿岸部などの厳しい塩分環境での使用はコンクリートとの界面の処理に注意する必要がある。

3. パイルベントの境界部における腐食

日本海沿岸部から約2kmの位置で供用され、撤去された道路橋のパイルベントの鋼コンクリート境界部について、腐食状況の調査を行った。対象橋梁の供用中の状況を写真-4に示す。1963年に竣工し、2006年に撤去された。冬季に凍結防止剤が散布される橋であった。同写真に点線で示した箇所について、解体ヤードにて鋼コンクリート境界部の腐食状況調査を行った。写真-5に、調査対象箇所の腐食状況を示す。

コンクリートブロック下面の塩化物イオン分布を図-6に示す。塩化物イオンが外部から深さ60mm程度のところまで浸透していた。写真-6に、コアNo.4(写真-5右下や図-6中の図に示すとおり鋼管の側方から採取した)の採取箇所における鋼管の腐食状況を示す。鋼管の塗装(A-1塗装系)はコンクリートの表面までであった。コア採取時に、コンクリートとの境界に形成されていた層状さびが、コア側に付着して剥離した。この写真は、コア採取直後に撮影したもので、さび剥離箇所は酸欠のためやや青く見え、一見塗装のようにも見えるが、深さ概ね50mmの範囲に層状剥離さびが発生していた部分である。図-7に、コアNo.4における鋼管と接していたコンクリート中の塩化物イオン分布について、EPMAにより測定した結果を示す。図-6と同様にコンクリートの下面から塩化物イオンが浸透しているだけでなく、鋼管に近いところでより多くの塩化物イオンが浸透していた。

写真-6に示した箇所では、鋼板の断面欠損深さが最大で約1mmであった。調査対象とした箇所以外の解体された鋼管のうち、確認できたもので断面欠損深さは最大3mm(気中部)、コンクリート表面からの腐食範囲の深さは160mmに至る腐食が見られた。

4. 境界部の腐食試験中間結果

鋼コンクリート境界部の腐食に関する検討として、亜鉛めっきされた照明柱から50mm×300mm(厚さ4.5mm)の大きさに切り出した鋼板



写真-5 パイルベントの腐食状況(解体ヤードで撮影)
注) 鋼管径711mm、板厚15mm、右下はコア採取状況

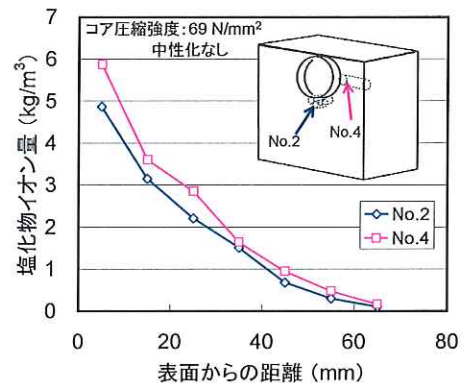


図-6 コンクリート下面の塩化物イオン分布

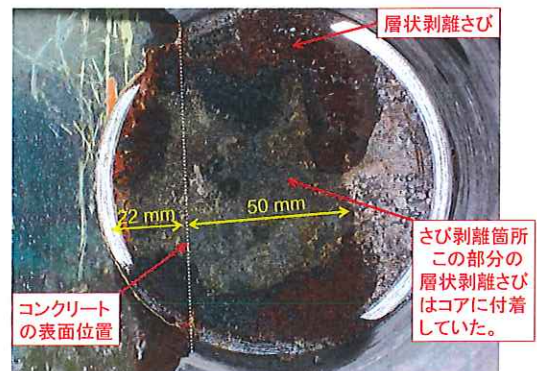


写真-6 鋼管の境界部の腐食状況

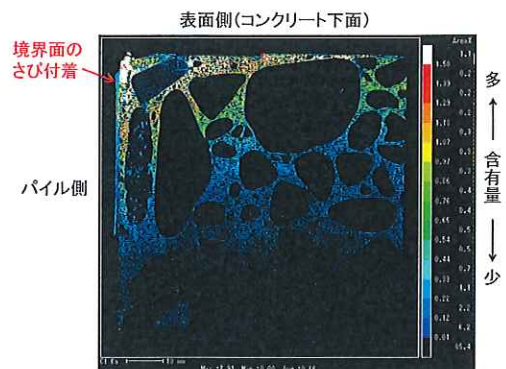


図-7 鋼管付近コンクリートの塩化物イオン分布
注) EPMA測定面積: 80mm×80mm

を、写真-7のように水セメント比55%のコンクリートに埋め込んで、水中養生1ヶ月の後、3%NaCl水溶液への浸漬を行った。写真-7は1ヶ月塩水浸漬を行った後、気中に1年放置した状態である。気中部の亜鉛めっきの劣化は水中養生(めっき部も水中に置いた)の間に生じたものであり、気中に放置している間の変化はほとんどなかった。写真-8は、塩水浸漬1週間後の状況を示す。めっき表面から白色の物質が発生しているとともに、水素ガスが発生していた。白色物質は、塩素を含む水酸化亜鉛化合物であり(X線回折による)、局部的かつ急激に亜鉛めっきの劣化が進行した。写真-9に、塩水浸漬約1年後の状況を示す。塩水に浸漬されていた範囲でめっきの劣化が見られるとともに、局部的にめっきが消失し、鋼材の腐食が生じている箇所が見られた。

参考までに、写真-10に、塩水浸漬1ヶ月の後、塩水を含む土(土の乾燥質量に対する塩化物イオン量6.8mg/g)で覆って、土が乾燥しないようにして約1年暴露した後の状況を示す。土層と気中の境界部付近に著しい腐食が見られた。

5. 境界部の腐食形態

以上の結果を踏まえ、図-8(a)～(c)に鋼コンクリート境界部の腐食パターンの例を概念図で示す。

鋼コンクリートの境界部は、養生水により塗膜、めっきが損なわれる場合がある。供用後は、降雨があまりない部位であっても、結露などによって境界部付近が湿気を保ちやすく、この点からも境界部の腐食環境は厳しい。飛来塩分量が多い地域や塩水が流れてくるような場合には、一層厳しい状況となる。なお、塗装やめっきがコンクリート中まで連続して施される場合でも、コンクリート打設時の金ごて仕上げや型枠の組立て時に、塗膜が傷付けられやすいので、施工に注意する必要がある。

鋼コンクリート境界部に近いコンクリート中は、コンクリートの中性化によってコンクリートが持つ防食性能が低下する場合がある。特に、沿岸部のようにコンクリート中に塩化物イオンが浸透する環境では、塩化物イオンの浸透範囲に腐食が生じやすい(図-8(b))。また、コンクリートの施工時の収縮や外力によって、境界部に隙間ができると、一層深く塩化物が浸透することも考えられる(図-

8(c))。

鋼コンクリート境界部の腐食因子は多岐にわたり、腐食パターンも一様でない。いずれにしても、この部位の腐食環境は厳しい場合が多いと考えられ、鋼材のコンクリートに埋め込まれる部分にも、上記の点に配慮した上で、塗装などの防食が必要である(無機ジンクリッチプライマーが用いられ



写真-7 境界部の試験(塩水浸漬1ヶ月、気中1年放置)



写真-8 境界部の試験(塩水浸漬1週間後)



写真-9 境界部の試験(塩水浸漬約1年後)



写真-10 境界部の試験(塩分を含む土中1年後)

る場合がある)。また、環境条件に応じて、中性化や塩化物イオンの浸透を抑制するため、鋼材周囲のコンクリート表面への塗装や、目地部のシーリングなどの適用について検討を行う必要がある。

道路橋の桁端部では、塩化物イオンを含む土砂が堆積している場合が少なくない。塩化物を含む土中におけるコンクリート中への塩分浸透は、塩水中に比べて速い傾向があるとともに⁷⁾、土層と気中の境界部において、写真-10のように腐食が促進される。この観点から、桁端部の土砂等の除去、清掃は、その周囲の鋼材腐食を抑制する効果が期待できる。

6. おわりに

鋼コンクリートの境界部の腐食の傾向についてはある程度把握されてきているが、耐久性の高い最適な防食方法を得るには至っていない。この点について解決するため、上記のような既設構造物の調査や室内試験を、さらに系統立てて実施する必要がある。

謝 辞

本調査にご協力いただいた国土交通省の関係事務所、出張所の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田健太郎：木曾川大橋の斜材の破断から見えるもの、土木学会誌、Vol.93、pp.29～30、2008.1.
- 2) 貝沼重信ほか：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、pp.97～114、2005.1.
- 3) 小野聖久ほか：波型鋼板ウェブ橋における埋込み接合部の腐食特性、第6回複合構造の活用に関するシンポジウム、土木学会、pp.29-1～6、2005.11.
- 4) 高木千太郎、本山明：街路灯・道路標識鋼管柱の腐食実態と健全度評価、橋梁と基礎、pp.23～27、2005.9.
- 5) 硬化コンクリートのミクロの世界を拓く新しい土木学会規準の制定－EPMA法による面分析方法と微量成分溶出試験方法について－、コンクリート技術シリーズ59、土木学会、2006.4.
- 6) McGeary, F.L., Performance of aluminum in concrete containing chlorides, ACI Journal, pp.247-265, Feb.1966.
- 7) 田中良樹、村越潤：道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討、土木技術資料、第50巻、第11号、pp.16～19、2008

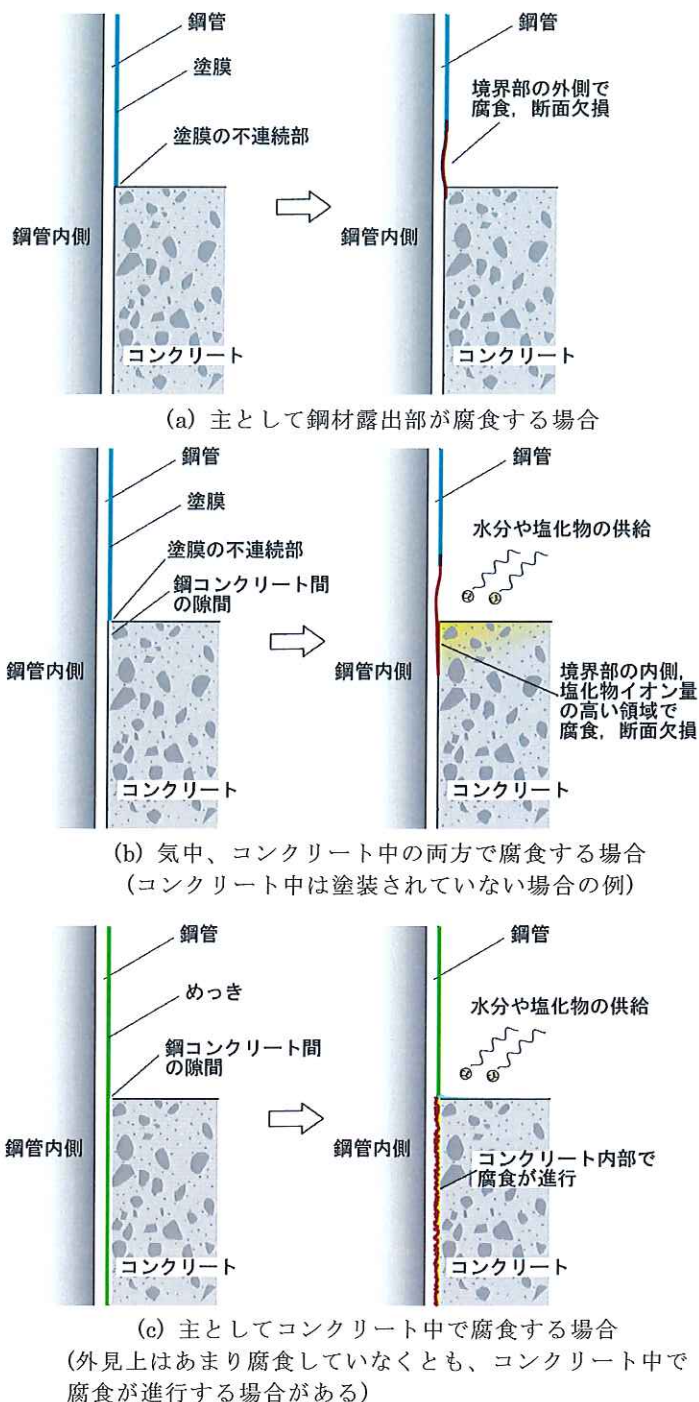


図-8 鋼コンクリート境界部の腐食パターンの例
(本文の調査事例を参考に例示)

田中良樹*



独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究
センター橋梁構造研究グ
ループ 主任研究員
Yoshiki TANAKA

村越 潤**



独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究
センター橋梁構造研究グ
ループ 上席研究員
Jun MURAKOSHI