論文 部分断面修復で施工した鉄筋コンクリートの補修評価に関する一考察

渡部　正[*1]・松林　裕二[*2]・元売　正美[*3]・宮下　剛[*4]

要旨：本研究は，塩害で劣化した鉄筋コンクリート構造物を補修した後に生ずる再劣化の原因とその対策を明らかにすることを目的に実施しているものであり，本論文は，部分断面修復した鉄筋コンクリート試験体を 10 年間海洋環境下に暴露し，その時の鉄筋腐食状況を観察・分析した結果について考察した。その結果，母材コンクリートの塩分量の有無に関わらず，断面修復材との境界近傍での鉄筋が局部腐食する現象が認められた。その局部腐食が生ずる範囲は，それら境界から概ね 10mm の範囲であることが分かり，補修を実施する場合には，その部分の再劣化対策が重要であることを示すことができた。

キーワード：塩害，鉄筋腐食，補修，断面修復，暴露試験

1. はじめに

著者らの研究グループは，道路橋の鉄筋コンクリート床版を対象として，コンクリート中の塩化物イオン量，断面修復の範囲・深さおよび補修材の種類などを要因とした鉄筋コンクリート試験体を作製して，海洋環境下と内陸環境下に長期間暴露し，外観変状調査，電気化学的測定，塩化物イオンの拡散性状の測定および鉄筋腐食状況の調査などを実施している[1),2),3),4)]。これは，塩害によって劣化した鉄筋コンクリート構造物を補修した後に生ずる再劣化のメカニズムを明らかにすることを目的にしている。

塩害により劣化した鉄筋コンクリート構造物，すなわち，鉄筋腐食が生じた構造物を補修する場合には，再劣化などの防止の観点から，部材全面に亘って断面修復するのが理想的であるとされている。しかしながら，現実には，施工条件や経済的観点などの理由から，コンクリートの浮きや剥落が生じた部分についてのみ断面修復する場合が多々ある。このような部分断面修復を行った場合には，補修部とコンクリート部の境界部においてマクロセル腐食という局部腐食が生じることが知られているものの，その境界部は明確に定義されておらず，詳細な腐食状態の報告は多くはない。

著者らの既報においても，境界部分の鉄筋腐食がコンクリート部および断面修復部より速く進行することを示した[4)]。今回は，部分断面修復にて補修した海洋暴露 10 年の試験体から取り出した鉄筋の腐食傾向を詳細に調査・分析した。そして，コンクリート部と断面修復部の境界部近傍の腐食範囲に着目し，局部腐食が生じる位置，局部腐食の幅などについて定量的検討を行って考察したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状・寸法

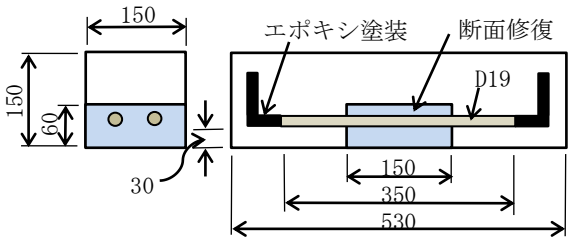
試験体の形状・寸法および補修条件は，**図－1**，**表－1**に示したとおりである。試験体寸法は 15×15×53cm であり，かぶり 3cm として鉄筋を 2 本配置した。

コンクリートの配合およびその使用材料は**表－2**に示すとおりとした。コンクリートには，練混ぜ時に塩化物イオン量が 0，2.4，4.8kg/m^3 となるよう，塩化カルシウム溶液を混和した。鉄筋は，SD345，D19 であり，両端の折り曲げ部分はエポキシ樹脂で塗装を行った。断面修復部は，予め発砲スチロールを配置しておき，その状態でコンクリートを打ち込んで製作した。

2.2 補修方法および補修材料

試験体の補修方法および使用材料は，以下のとおりとした。初めに，鉄筋の錆びをワイヤーブラシで除去し，断面修復部のコンクリート下地をエアージェットタガネやワイヤーブラシを用いて，表面の汚れやレイタンスを取り除いた。その後，断面修復および表面被覆を行った。断面修復は，下地コンクリートにベオバ系のポリマーセメントペーストを刷毛塗りで塗布した後，ベオバ系のポリマーセメントモルタルを吹付けにより行った。表面被覆は，ディスクサンダーを用いてコンクリート表面の汚れや段差を除去した後，エポキシ樹脂系のプライマーを塗布し，エポキシ樹脂パテで素地処理した後、柔軟型エポキシ樹脂系で中塗り 2 層，柔軟型ポリエレタン樹脂系で 1 層上塗り仕上げを行った。表面被覆は，試験体の全面について行ったものと，上面の一面のみを行わないもの(上面以外の面は表面被覆を実施)の 2 種類とした。

*1　日本大学　生産工学部土木工学科　博士(工学)　(正会員)
*2　太平洋マテリアル㈱　開発研究所　博士(工学)　(正会員)
*3　BASF ポゾリス㈱　技術センター
*4　大日本塗料㈱　一般塗料部門構造物塗料事業部



図－１　試験体の形状寸法(単位：mm)

表－１　試験体の種類

No.	記　号	塩化物イオン量 (kg/m^3)	表面被覆
1	1-B-無	0	上面のみ無
2	2-B-無	2.4	上面のみ無
3	2-B-有	2.4	全面被覆
4	3-B-有	4.8	全面被覆

表－２　コンクリートの配合，使用材料

粗骨材最大寸法	20mm
水セメント比	65%
スランプ	12±2.5cm
空気量	4.5±1.5%
圧縮強度	34.3N/mm^2(材齢 28 日)
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	大井川産陸砂　密度 2.58g/cm^3
粗骨材	青梅産硬質砂岩系砕石　密度 2.64g/cm^3
混和剤	AE 減水剤
塩化物イオン量	0,2.4,4.8 kg/m^3

2.3 試験体の暴露条件

コンクリート試験体は，断面修復部が下になるよう桟木で固定し，海洋環境下に暴露した。海洋暴露試験場は，**写真－１**に示す静岡県伊豆半島東海岸の波打ち際であり，常時海水飛沫を受ける厳しい環境下である。2001 年 11 月に海洋暴露を開始し，10 年後の 2011 年まで実施した。

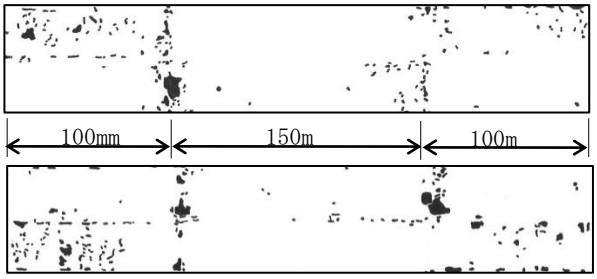
2.4 鉄筋の腐食面積率の測定方法

試験体の外観観察後，試験体を割裂して鉄筋を取り出した。そして，エポキシ樹脂塗装部分を除いた鉄筋 350mm の範囲に透明フィルムを巻きつけて発錆部分をマジックで写し取り 2 値化した。この画像を専用の画像処理ソフトを用いて腐食面積率を測定した。

3. 鉄筋腐食面積率の測定結果と鉄筋腐食の傾向

鉄筋腐食の状況例として，塩化物イオン量 2.4kg/m^3，上面被覆が無い試験体 No.2 の鉄筋 2 本の腐食トレース図を**図－２**に示した。このように，左右 100mm 範囲

写真－１　海洋暴露実験場

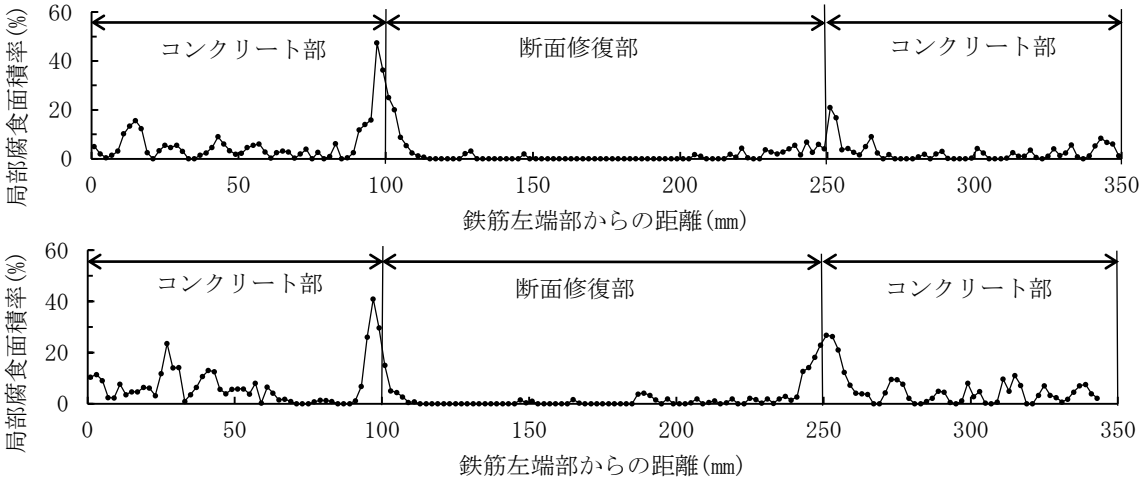


図－２　鉄筋腐食トレース図(試験体 No. 2)

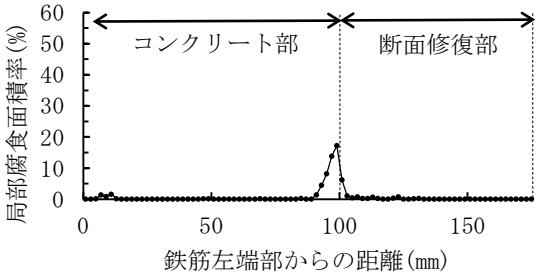
写真－２　鉄筋腐食状況

のコンクリート部分が局所的に腐食している状況が分かる。また，中央 150mm の断面修復部とその左右のコンクリート部との境界でも腐食が発生している状況が分かる。**写真－２**に，断面修復部(左側)とコンクリート部(右側)の境界部分の鉄筋腐食状況の例を示す。なお，試験体の外観は，鉄筋腐食に影響するような有害なひび割れはほぼなく，コンクリート中の塩化物イオンが断面修復材中の鉄筋近傍までにはまだ到達していないことを確認している。

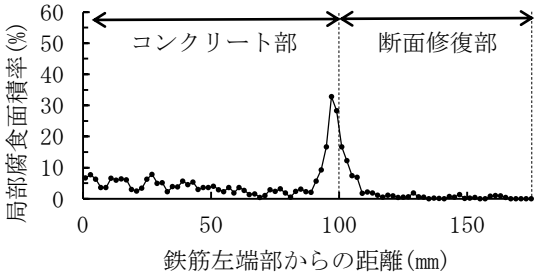
これらの局部的な腐食を考察するため，**図－２**に示した鉄筋 2 本の腐食トレースの画像を用いて，鉄筋の長さ方向 2mm ごとの腐食面積率（局部腐食面積率と称す）を計測し，エポキシ樹脂塗装部分を除いた鉄筋



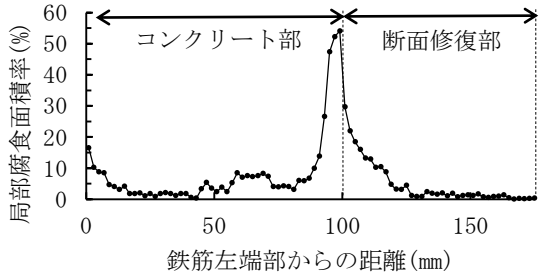
図－３　鉄筋腐食分布の測定結果(試験体 No. 2)



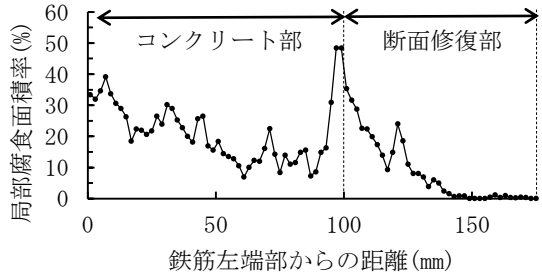
(a)試験体 No. 1



(b)試験体 No. 2



(c)試験体 No. 3



(d)試験体 No. 4

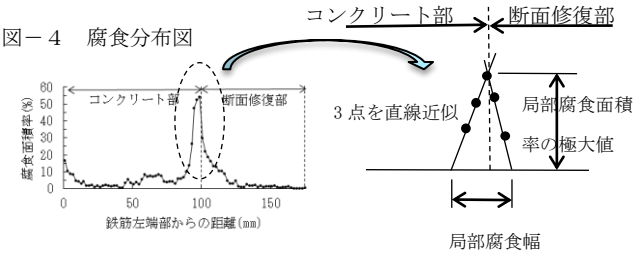
図－４　鉄筋腐食分布図

端部からの距離と局部腐食面積率の関係を**図－３**に示した。この図より，断面修復をした中央部分の 150㎜区間はほとんど腐食しておらず，その両側 100㎜区間のコンクリート部分は僅かながら腐食が認められる。そして，断面修復部とコンクリート部の境界部分である 100㎜の位置と 250㎜の位置が局所的に大きな腐食を示していることが分かる。

また，**図－３**において，鉄筋の左右の位置や鉄筋 2 本間での局部腐食面積率に若干の違いが認められる。これは，鉄筋の腐食分布傾向や測定方法のバラツキの影響であると考えられる。そこで，鉄筋 1 本あたりの左右の測定値および鉄筋 2 本の測定値の合計 4 測定値の平均で局部腐食面積率を評価することとした。全試験体における局部腐食面積率の分布は**図－４**に示すとおりである。これは，鉄筋半分の長さ 175mm として，鉄筋左端部からの距離と局部腐食面積率の関係として示したものである。断面修復部とコンクリートの境界が 100mm の位置に相当し，左側がコンクリート部，右側が断面修復部に相当する。

図－４から，局部腐食面積率の極大値は，いずれの試験体においても，断面修復部とコンクリート部の境界近傍に生じている。この極大値は，境界には一致しておらず，ややコンクリート側に位置しているように見受けられる。この局部腐食面積率の分布は，極大値を頂点として，コンクリート側および断面修復側の内部に向かって減少している傾向が認められる。**図－４(a)**は，母材コンクリートに塩化物イオンが内在していない試験体であるが，この場合においても，内在塩化物イオンが存在する他の試験体と同様，断面修復部とコンクリート部の境界において局部腐食が生じている。このように，塩化物イオンが内在していない場合でも局部腐食が生じていることから，補修材で断面修復することで，コンクリートと同一材料でないことに

図－４　腐食分布図



図－５　局部腐食幅の算定方法

起因するマクロセル腐食が生じることを示している。

なお，コンクリート部における局部腐食面積率は，母材コンクリートに内在する塩化物イオン量が多いほど大きくなる傾向が認められる。また，同時に，断面修復部分の端部の局部腐食面積率がやや大きくなる傾向がある。これは，母材コンクリート側の内在塩化物イオンが断面修復材へ拡散・到達しなくても，鉄筋に沿った塩化物イオンの浸透によって生ずる影響と考えられる。

4. コンクリートと断面修復材の境界部の局部腐食の検討

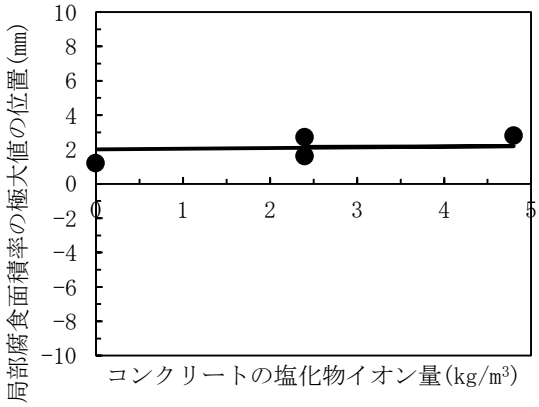
前述した**図－４**を俯瞰すると，断面修復部とコンクリート部の局部腐食面積率は，それら境界近傍で極大値を示し，その部分を頂点とした三角形の形状を呈している。このような性状を利用して，局部腐食面積率が極大を示す位置や局部腐食の幅を次のような方法で算定することとした。

図－５に示したように，**図－４**の鉄筋腐食分布図から，コンクリート部と断面修復部の境界近傍における局部腐食面積率の極大値を含むコンクリート側と断面修復側の三点を一次関数で近似(腐食近似直線と称す)する。そして，この腐食近似直線から局部腐食面積率の極大値、その位置および Y=0 となる範囲（局部腐食幅と称す）を求める。

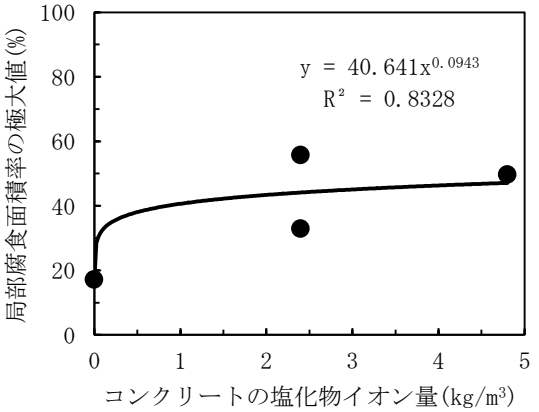
図－６は，コンクリートの塩化物イオン量(コンクリート練混ぜ時に混入した量であり，以下の図も同様)と，補修境界部に対する局部腐食面積率の極大値の位置の関係を示したものである。ここでの局部腐食面積率の極大値の位置とは，コンクリート部と断面修復部の境界よりプラス側がコンクリート部，マイナス側が断面修復部を示している。**図－６**より，局部腐食面積率の極大値の位置は，コンクリート部と断面修復部の境界ではなく，コンクリート側へ約 2mm の位置に生じており，塩化物イオン量に顕著に依存していないことが分かる。このような位置がコンクリート側となることは，電気化学的な腐食実験の既往の知見 [5]とも一致する。

図－７は，コンクリートの塩化物イオン量と，局部腐食面積率の極大値の関係を示したものである。なお，同極大値は，コンクリート側と断面修復側の腐食近似直線に局部腐食面積率の極大値の位置(**図－６**)を代入して求めたものであり，図中の曲線はその散布の大まかな傾向を示してみるためにべき乗関数で近似したものである。同図から，局部腐食面積率の極大値は，塩化物イオンが内在しない場合でも 20%程度生じるが，塩化物イオンが内在しても 30～60%の範囲に止まり，その増加量に顕著には依存していない状況が分かる。

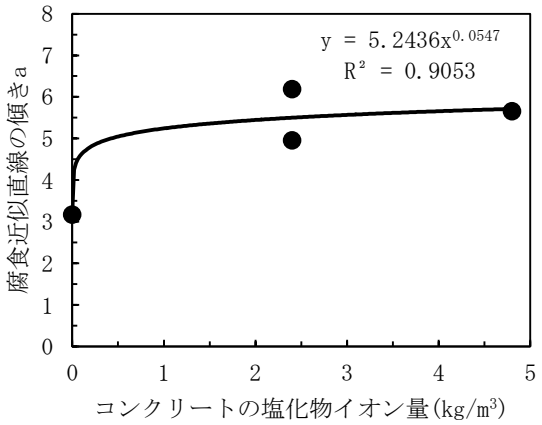
図－８は，コンクリートの塩化物イオン量と，腐食近似直線の傾きとの関係を示したものである。この腐食近似直線の傾きは，**図－４**より，コンクリート側あるいは断面修復側のどちらかで異なるような傾向が認められないため，コンクリート側と断面修復側との絶対値の平均とした。そして，コンクリートの塩化物イオン量とをべき乗関数で近似した。この近似した腐食近似直線の傾きと，**図－６**の局部腐食面積率の極大値の位置(コンクリート側へ 2mm)を用いて，**図－５**に示した局部腐食幅を求めることとする。その結果が**図－**



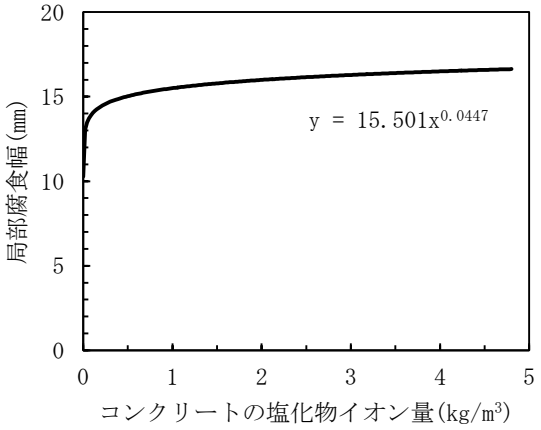
図－6　局部腐食面積率の極大値の位置



図－７　局部腐食面積率の極大値



図－8　腐食近似直線の傾き

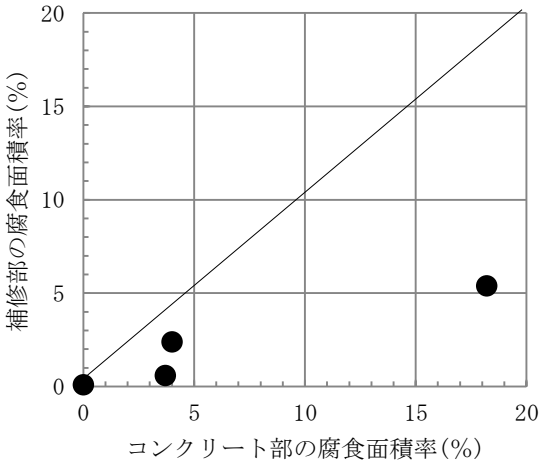


図－９　局部腐食幅の算定

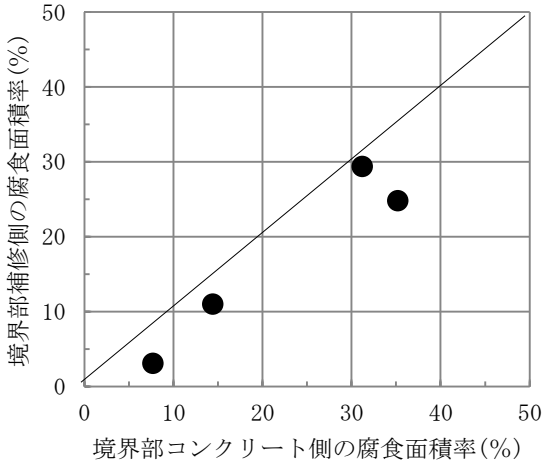
９であり，コンクリート塩化物イオン量と局部腐食幅の関係である。このように，局部腐食幅は，コンクリート中の塩化物イオン量とともに大きくなるが，概ね15mm に収束するような傾向を示している。

以上のことより，コンクリート部と断面修復部の境界近傍における鉄筋の局部腐食について，腐食分布の測定結果より考察した結果，次のようなことが分かった。鉄筋腐食面積率が最大値を示す位置は，コンクリート中の塩化物イオン量が増加してもあまり変化せず，境界からコンクリート側へ約 2mm の位置にある。また，局部腐食の幅は，コンクリート中の塩化物イオン量が多くなると増大するものの概ね 15mm に収束するような傾向を示すことが分かった。このことより，部分断面修復を行う場合には，コンクリート部との境界近傍の鉄筋腐食に関しての適切な評価と対策が重要であることを実験により確認することができた。

5. 断面修復部とコンクリート部の腐食面積率に関する検討



図－１０　コンクリート部と補修部の腐食面積率



図－１１　境界近傍におけるコンクリート部と補修部の腐食面積率

前述したように，部分断面修復によって補修した場合には，内在塩化物イオン量の有無に関わらず，断面修復部とコンクリート部の境界近傍の鉄筋腐食が局部的に進行することを実験的に明らかにし，腐食位置や腐食範囲を定量的に示すことができた。ここでは，もう少し全体的な腐食の傾向について考察するものとする。

図－１０は，各試験体におけるコンクリート部全体の腐食面積率と断面修復部全体の腐食率の関係を示したものである。このように，試験体 No.2～No.4 は，コンクリート部には塩化物イオンが内在するため，鉄筋腐食が進行している。しかしながら，断面修復を行った補修部においても，鉄筋の腐食が認められ，コンクリート部の概ね半分の腐食面積率を示している。これは，前述したように，鉄筋と断面修復材の境界部を塩化物イオンが移動しているためと考えられる。

図－１１は，境界部コンクリート側の腐食面積率と

境界部補修側の腐食面積率の関係を示したものである。なお，境界部コンクリート側は，前述の境界局部の腐食傾向を勘案してコンクリート部と断面修復部の境界より 10mm の範囲を，境界部補修側も同様に 10mm としたものである。このように，境界部コンクリート側の腐食面積率が断面修復側よりも若干大きくなった。このことは，**図－６**で示したように，局部腐食面積率が極大値を示す位置がコンクリート側 2mm であることからも，妥当な結果であるといえる。

6. まとめ

本研究は，塩害によって劣化した鉄筋コンクリート構造物を補修した後に生ずる再劣化のメカニズムを明らかにする一環として，部分断面修復を行った試験体の海洋暴露 10 年の試験結果のうち，鉄筋腐食に着目して考察を行ったものである。その結果，本研究の範囲内において，以下のようなことが明らかになった。

(1) 部分断面修復を行うと，コンクリートに塩化物イオンが内在していない場合でも，コンクリート部との境界近傍の鉄筋が腐食し，マクロセル腐食による局部腐食が確認できた。

(2) 鉄筋腐食の極大値は，内在塩化物イオン量に関わらず，コンクリート側 2mm の位置に生ずることが分かった。そして，この極大値を頂点として，コンクリート側および断面修復側の内部に向かって腐食面積率は，急激に減少していく傾向が認められた。

(3) 局部腐食が発生する範囲は，コンクリートの内在塩化物イオン量が多いと広くなる傾向が認められたが，概ね 15mm に収束するような結果が得られた。

(4) 断面修復部の鉄筋腐食は，マクロセル腐食による局部腐食に加えて，鉄筋と補修材界面の移動によるものと推定される。

(5) 部分断面修復を行う場合には，コンクリート部との境界近傍の鉄筋腐食に関しての適切な評価と対策が重要であることを実験により示すことができた。

以上，今回は，部分断面修復を行った海洋暴露 10 年の試験体についてのみを対象にして，鉄筋の局部腐食に着目した考察を行った。今後は，時系列の測定データによる腐食速度を検討するとともに，塩化物イオンの拡散状態の測定結果や電気化学的測定結果とを総合的に評価して，部分断面修復に関する課題を解決していく予定である。

なお，本研究は，東京大学生産技術研究所と以下に示す産学 19 団体との共同研究として行っているものである。

芝浦工業大学，㈱IHI，BASF ポゾリス㈱，オリエンタル白石㈱，㈱熊谷組，佐藤工業㈱，ショーボンド建設㈱，住友大阪セメント㈱，太平洋マテリアル㈱，大日本塗料㈱，電気化学工業㈱，東急建設㈱，飛島建設㈱，西松建設㈱，日本化成㈱，㈱ブリヂストン，前田建設工業㈱，ニチエー吉田㈱，コニシ㈱

参考文献

1) 星野富夫，松林裕二，戸田勝哉，魚本健人：劣化した鉄筋コンクリート構造物の補修工法に関する研究，コンクリート工学，Vol.47，No.6，2009.6

2) 里隆幸，二井谷教治，星野富夫，魚本健人：補修を施した海洋暴露試験体の塩分拡散に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1113～1118，2007

3) 戸田勝哉，石関嘉一，伊藤学，魚本健人：電気化学的測定による補修を施したコンクリートの研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.757～762，2007

4) 渡部正，松林裕二，槙島修，魚本健人：部分断面修復が補修後の再劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1059～1064，2007

5) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，宮里心一；鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験，土木学会論文集，No.544，V-32，pp.109-119，1996