

論文 塩分吸着剤を添加した補修材を用いて断面修復した RC 部材の補修部の自然電位に及ぼす残留塩化物イオンの影響

風間 裕也^{*1}・金安 賢人^{*2}・西 信衛^{*3}・村上 祐貴^{*4}

要旨: 本研究では、「塩分吸着剤」を添加した補修材を用いて断面修復を施した際の補修部の自然電位に及ぼす既設コンクリートの残留塩化物イオンの影響について検討した。残留塩化物イオン濃度の異なる既設コンクリートに、「塩分吸着剤」を添加した補修材を主として、5種類の補修を施した試験体を作成し、乾湿繰返し試験を実施した。その結果、補修部の自然電位は、既設部の残留塩化物イオン量の影響を受け、自然電位が卑側の値を示す傾向にあった。また補修部境界近傍の腐食量は自然電位との相関が認められた。

キーワード: 自然電位, 塩分吸着剤, 残留塩化物イオン, マクロセル腐食

1. はじめに

日本海海岸部に建造された鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化は深刻であり、補修・補強を必要とする構造物が増加している。塩害劣化の生じた RC 部材の代表的な補修工法として、断面修復工法が挙げられる。従来の断面修復工法では、鉄筋表面、コンクリートはつり面に浸透拡散型亜硝酸リチウムおよび亜硝酸リチウム含有ペーストを塗布することで、鉄筋近傍の防錆環境を構築することを基本戦略としたものが多い。亜硝酸リチウムに塩化物イオンを無害化する効果は無いことから、既設コンクリートに残留塩分が存在している場合等は、補修部内に塩分が再拡散し、再劣化を生じる場合がある¹⁾。

この再劣化への対策の一つとして、「塩分吸着剤」を添加した補修材を用いた断面修復工法がある^{2), 3)}。例えば、立松らが開発した「塩分吸着剤」は、塩化物イオン (Cl⁻) を吸着し、予め保持させた亜硝酸イオン (NO₂⁻) を放出するイオン交換機能がある⁴⁾。この機能により、鉄筋表面の残存する塩分を吸着し、腐食の進行を抑止する。

一方で、RC 部材の鉄筋腐食の兆候を判別する最も一般的な方法として、自然電位法がある。自然電位は、比較的簡便に測定できることから補修範囲を決定する上での判断指標の一つとして利用される。しかしながら、自然電位の計測値に対して、既設部の残留塩化物イオン量が補修部の自然電位に及ぼす影響については未解明の部分が多い。

そこで、本研究では、内在する塩化物イオン量の異なるコンクリートについて、「塩分吸着剤」を添加した補修材を主として、5種類の補修方法を模擬した試験体を作成し、乾湿繰返し試験サイクル中の既設部と補修部の自然電位を計測した。乾湿繰返し試験中の自然電位の

推移から補修部の自然電位に及ぼす既設部の塩化物イオン量の影響について検討するとともに、既設部と補修部の境界付近の自然電位とマクロセル腐食の関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験パラメータ

乾湿繰返し試験に用いる試験体の概要を図-1, 図-2 に示す。試験体は既設コンクリート部と補修部で構成されており、断面 100mm×100mm、長さ 400mm の角柱試験体である。コンクリートの配合を表-1 に示す。練り混ぜ水には、所定量の塩化ナトリウムを溶解した塩水を用いた。既設部の養生方法は封かん養生であり、既設部の材齢 33 日以上で補修材を打設した。

実験パラメータを表-2 に示す。検討項目は、既設コンクリート部 (以下、既設部) の塩化物イオン量および補修方法である。既設部に含まれる塩化物イオン量は、0.0kg/m³, 1.2kg/m³, 2.5kg/m³, 5.0kg/m³, 10.0kg/m³ の 5 水準とした。補修方法は、「塩分吸着剤」を添加した補修材を用いて補修する方法を 3 種類 (R1, R2, R3 シリーズ)、亜硝酸リチウムを含有したポリマーセメントモルタルで補修する方法を 1 種類 (RL シリーズ)、モルタルを使用した場合の 1 種類 (RM シリーズ) とした。各補修材の配合は表-2 に示す通りである。なお防錆ペーストは、鉄筋の防錆処理と保護を目的とし、露出鉄筋に塗布するものである。防錆モルタル A, B は、防錆ペーストと組み合わせて用いることで厳しい塩害環境下に対応する。遮塩モルタルは、修復断面への塩化物イオンの侵入抑制および断面修復材として用いられる。防錆ペースト、防錆モルタルおよび遮塩モルタルには亜硝酸ハイドロカルバイトを主成分とした「塩分吸着剤」が添加されてお

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 (学生会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟 (正会員)

*4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 博 (工) (正会員)

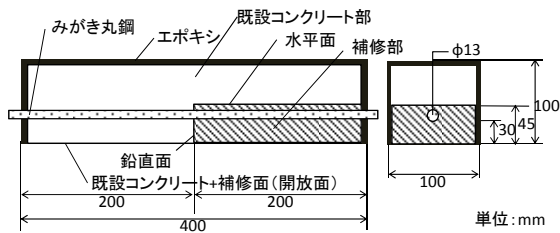


図-1 試験体の形状および寸法

表-1 試験体の既設コンクリート部の配合

W/C	単位量(kg/m ³)				AE減水剤(kg)	AE剤(kg)
	水	セメント	細骨材	粗骨材		
55	155	282	795	1074	2.818	0.00845

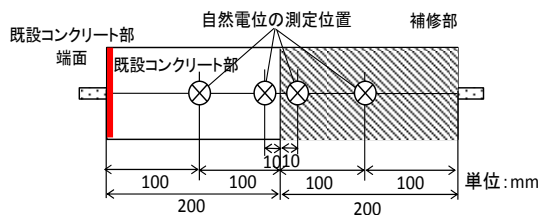
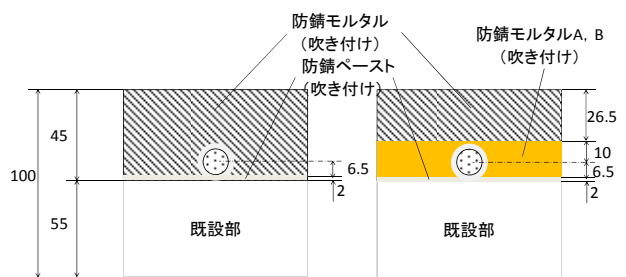
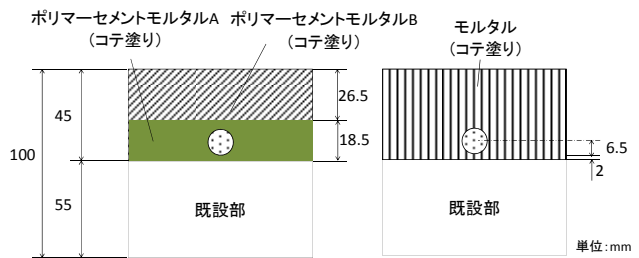


図-3 自然電位測定位置



(a) R1 シリーズ (b) R2, R3 シリーズ



(c) RL シリーズ (d) RM シリーズ

図-2 補修モデル

表-2 実験パラメータ

補修モデル	塩分吸着効果	補修材	[配合]1m ³ あたりの使用量(kg)	[配合]140%亜硝酸リチウム(kg)	[配合]1m ³ あたりの使用水量(kg)	Cl ⁻ 吸着量(kg/m ²)	NO ₂ 放出量(kg/m ²)	既設コンクリートの塩化物イオン量(kg/m ²)	補修材打設から試験開始までの材齢(日)
R1	○	防錆ペースト	1400	-	378	5.46	21.25	0, 1.2, 2.5, 5.0, 10.0	37-45
		遮塩モルタル	1750	-	271	0.82	17.20		
R2	○	防錆ペースト	1400	-	378	5.46	21.25	10.0	45
		防錆モルタルA	1700	-	216	4.82	17.20		
R3	○	防錆ペースト	1400	-	378	5.46	21.25	10.0	45
		防錆モルタルB	1700	-	224	3.82	11.70		
RL	×	遮塩モルタル	1750	-	271	0.82	-	0, 1.2, 2.5, 5.0, 10.0	45-47
		ポリマーセメントモルタルA	1750	138	217	-	-		
RM	×	ポリマーセメントモルタルB	1750	-	280	-	-	10.0	35
		モルタル	-	-	-	-	-		

り、補修材に添加する「塩分吸着剤」の添加率を変化させることで、塩化物イオン吸着量および亜硝酸イオン放出量を用途に合わせて変化させている。

図-2 に各試験体シリーズの補修モデルを示しているが、R1~R3 シリーズ試験体は、防錆ペースト、防錆モルタル A 或いは、防錆モルタル B、遮塩モルタルを使用する。なお、各補修材 1m³あたりの塩化物イオン吸着量と亜硝酸イオンの放出量の公表値は表-2 に示す通りである。

R1 シリーズについては、鉄筋近傍および既設部水平面(図-1 参照)に防錆ペースト(層厚:2mm)を吹き付けた後、2時間経過後に遮塩モルタル(層厚:43mm)を吹き付けた。R2, R3 シリーズ試験体は、鉄筋近傍および既設部水平面に防錆ペースト(層厚:2mm)を吹き付け、2時間経過後、防錆モルタル A (R2 シリーズ、層厚:16.5mm)もしくは防錆モルタル B (R3 シリーズ、層厚:16.5mm)を吹き付けた。さらに2時間経過後、遮塩モルタル(層厚:26.5mm)を吹付け施工した。なお、防錆ペーストの吹付け量は質量で管理し、層厚が2mmになる質量分の防錆ペーストを試験体に吹き付けた後、層厚が一様になる様、刷毛でならした。なお、塩化物イオン吸

表-3 自然電位 (mV) と腐食確率 (ASTM C876)

自然電位 (mV:CSE)	腐食確率
$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	腐食不確定
$-350 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

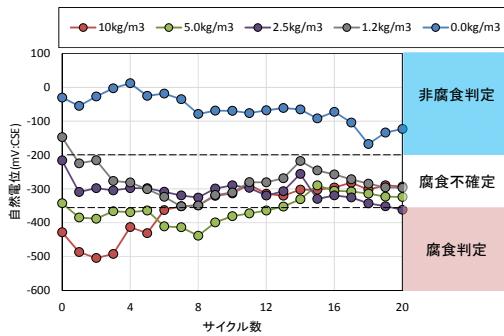
着剤を添加した補修材で補修する試験体は、既設部と補修部の境界の鉛直面には、防錆ペーストを吹き付けていない。

RL シリーズは、鉄筋近傍にポリマーセメントモルタル A (層厚:18.5mm)を吹き付け、その後、ポリマーセメントモルタル B (層厚:26.5mm)を吹き付けた。

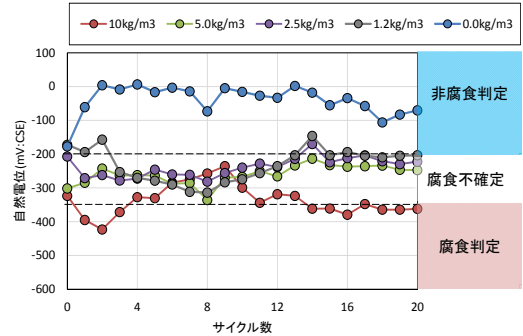
モルタルを補修材として使用した RM シリーズ試験体は、普通セメント、砂、水を質量比 1:3:0.5 で練り混ぜたモルタル(層厚:45mm)を、型枠に打ち込み、コテで仕上げた。

2.2 乾湿繰り返し試験

乾湿繰り返し試験は、補修材の打設から 35 日以上経過した後、JCI-SC3「塩分を含んだコンクリート中における補強筋用棒鋼の促進腐食試験方法-乾湿繰り返し法」に準拠して実施し、湿潤状態(70℃, 90%)を3日間、4日間の乾燥状態(10℃, 55%)を1サイクルとした試験を、20サイクル実施した。なお、最小かぶり面以外の面

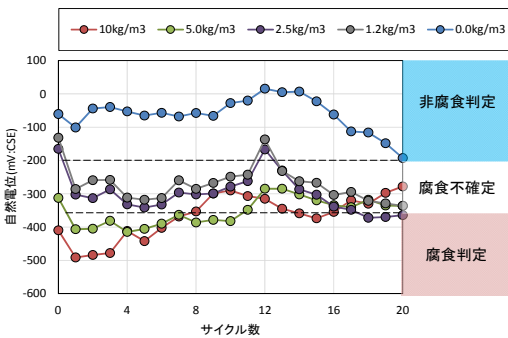


(a) 既設部中心 (既設部端面から 100mm)

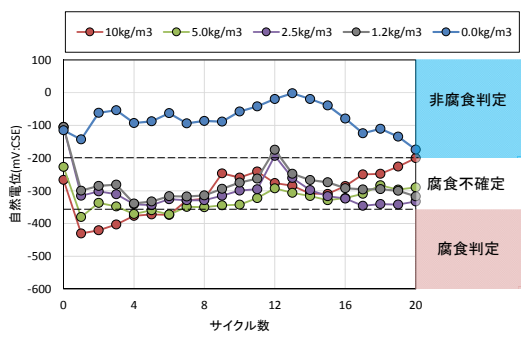


(b) 補修部中心 (既設部端面から 300mm)

図-4 R1 シリーズ試験体



(a) 既設部中心 (既設部端面から 100mm)



(b) 補修部中心 (既設部端面から 300mm)

図-5 RL シリーズ試験体

はエポキシ樹脂およびアルミ箔テープでシールした。

2.3 自然電位の測定方法

自然電位は、乾湿繰り返し試験開始前および、乾湿繰り返し試験 1 サイクル試験終了毎に測定を行った。電極には飽和硫酸銅電極を用い、図-3 に示す試験体底面(最小かぶり面)の既設部側端面から 100mm, 190mm, 210mm, 300mm の 4 箇所自然電位を計測した。測定した自然電位は、表-3 に示す ASTM C 876 の鉄筋腐食判定基準に基づき、評価を行った。

2.4 Cl⁻および NO₂⁻の分析

乾湿繰り返し試験 20 サイクル終了後、試験体の既設部中心近傍、既設部側境界近傍 (境界から 15mm 既設部側)、補修部側境界近傍 (境界から 15mm 補修部側) および補修部中心近傍の 4 箇所をハンマードリルで削孔し、イオン分析用の試料を採取した。開放面から深さ方向に 0~1.5cm, 8.5~10cm は 1.5cm の区間、1.5~8.5cm の区間は 1.0cm 毎に試料を採取した。採取した試料の塩化物イオン濃度は電量滴定法により計測し、亜硝酸イオン濃度の計測は比色法で行った。測定方法の詳細は既往の文献を参照されたい⁵⁾。

2.5 鉄筋腐食の測定

試験体からイオン分析用の試料を採取後、はつり出した鉄筋に、透明テープを巻きつけ、発錆部分を記録した。はつり出した鉄筋を 10%クエン酸二アンモニウム水溶液に 24 時間浸した。その後、既設部と補修部の境界で

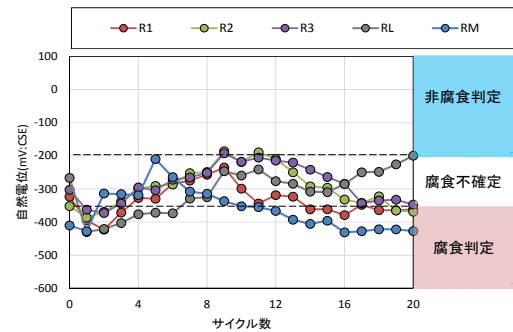


図-6 塩化物イオン量 10.0kg/m³(補修部中心)

鉄筋を切断し、既設部分と補修部分の鉄筋をそれぞれ 20mm 間隔毎に切断し、腐食前後の鉄筋の質量減少率(以降腐食量)を算出した。

3. 自然電位に及ぼす各種影響

3.1 既設コンクリートの残留塩化物イオン

既設部および補修部中心における R1 シリーズおよび RL シリーズ試験体の自然電位の推移を図-4, 図-5 に示す。自然電位の測定値は試験体 3 体あるいは 4 体の平均値であり、明らかに他の試験体と自然電位が異なるデータは除外して平均とした。

0 サイクル時における既設部中心の自然電位は、両シリーズともに、既設部の塩化物イオン量が多い程、卑の値を示した。表-3 に示した ASTM 基準によれば、両シリーズともに塩化物イオン量が 10.0kg/m³ の場合、90%以

上の確率で腐食ありの判定となった。補修部中心の0サイクル時における自然電位は、既設部中心の自然電位と同じ傾向であり、既設部の塩化物イオン量の増加に応じて、卑の値を示した。

次に、乾湿繰り返し試験中の自然電位の推移であるが、既設部に内在塩分を有する試験体の既設部中心では、1～4サイクルの間に自然電位が低下する傾向にあった。4サイクル以降は、 $1.2\sim 2.5\text{ kg/m}^3$ の塩化物イオン量を有する試験体の自然電位は、ほぼ一定の値で推移した。一方、 5.0 kg/m^3 以上の塩化物イオン量を有する試験体は、試験サイクル数の増加とともに自然電位が大きく貴側に推移し、最終的に、 $1.2\sim 2.5\text{ kg/m}^3$ の塩化物イオン量を有する試験体の自然電位との差異は小さくなった。塩化物イオン量が 5.0 kg/m^3 、 10 kg/m^3 の場合における自然電位の貴側への推移は、かぶりコンクリートに発生した腐食ひび割れによる電気抵抗の増加が要因であると考えられ、塩化物イオン量が $1.2\sim 2.5\text{ kg/m}^3$ の試験体では、RLシリーズを除き試験終了までかぶりコンクリートに腐食ひび割れは発生していなかった（RLシリーズのひび割れ発生は20サイクル試験終了時）。

既設部に残留塩分を有する試験体における補修部中心の自然電位の推移も、既設部中心と同様の傾向であり、初期サイクル時に自然電位は最も卑の値を示す傾向にあった。サイクル数の増加とともに、 5.0 kg/m^3 以上の塩化物イオン量を有する試験体の自然電位は、R1シリーズ、 10 kg/m^3 試験体を除き、貴側に推移し、サイクル試験終了時の自然電位は塩化物イオン量によらずほぼ同様の値を示した。

3.2 補修材の種別

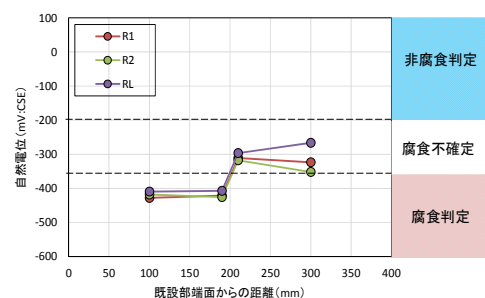
図-6に一例として、既設部の塩化物イオン量が 10.0 kg/m^3 の補修モデルが異なる試験体における補修部中心の自然電位の推移を示す。サイクル試験終了時の自然電位は、RLシリーズ試験体を除き、ASTM基準では腐食判定もしくは腐食不確定となった。R1シリーズ試験体およびR2シリーズ試験体から鉄筋をはつり出し、腐食状況を確認したが、R1シリーズ試験体では補修部中心に腐食の発生が認められる一方で、R2シリーズ試験体では補修部中心に腐食の発生は認められなかった。このように、補修部においては、明らかに防錆環境が構築されている場合においても既設部の内在塩分の影響によって自然電位が卑側の値になる傾向にあり、補修部の再劣化による鉄筋腐食を自然電位で確認する場合には既設部の内在塩分量に留意する必要があると思われる。また、「塩分吸着剤」を添加した試験体シリーズに着目すると、「塩分吸着剤」の添加率による自然電位の明確な差異は認められず、「塩分吸着剤」の添加率が自然電位に及ぼす影響は少ないものと考えられる。

3.3 測定位置

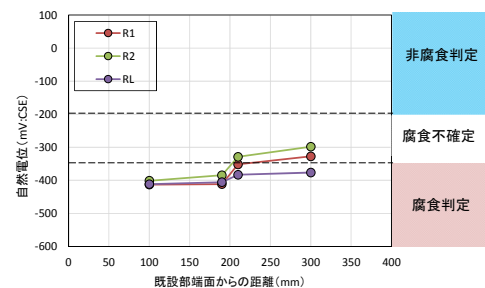
図-7は、既設部の塩化物イオン量が 10.0 kg/m^3 の場合のR1、R2、RLシリーズ試験体を対象として、0サイクル、4サイクルおよび20サイクル終了時の自然電位分布を示したものである。

0サイクル時では、いずれの試験体も既設部と補修部境界の電位差が大きい。試験サイクル数の増加に伴い、境界部の電位差は減少する傾向にあった。また、補修部境界と補修部中心に自然電位の明確な差異は認められなかった。後述するようにR1、R2試験体では補修部境界付近にマクロセル腐食が発生したが、自然電位の大きさからこのことを判断することは困難であった。

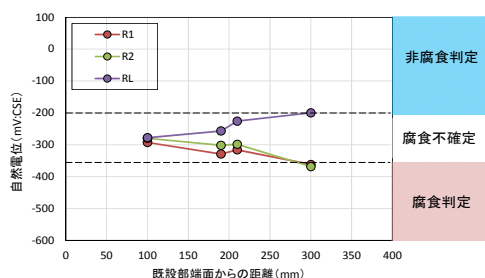
図-8は図-7に示した試験体における鉄筋近傍（開放面からの深さが $35\sim 45\text{ mm}$ ）の20サイクル終了時点の可溶性塩化物イオン量の分布を示したものである。なお、可溶性塩化物イオン量の測定値は補修部中心の試験体3体の平均値であるが、補修部境界、既設部境界、既設部中心は所定のサンプル量（ 10 g ）の試料を採取できないため、3体の試験体から採取した試料を同質量で混合し1



(a) 0サイクル終了時



(b) 4サイクル終了時



(c) 20サイクル終了時

図-7 自然電位分布

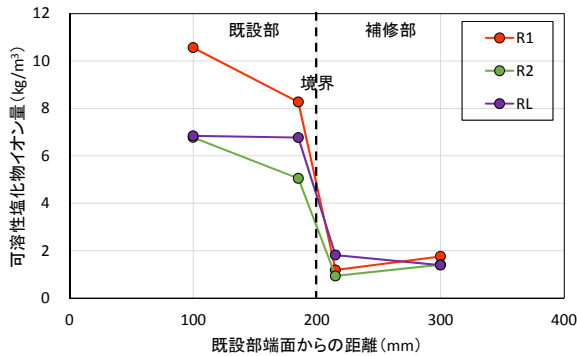


図-8 可溶性塩化物イオン分布
(20 サイクル終了時)

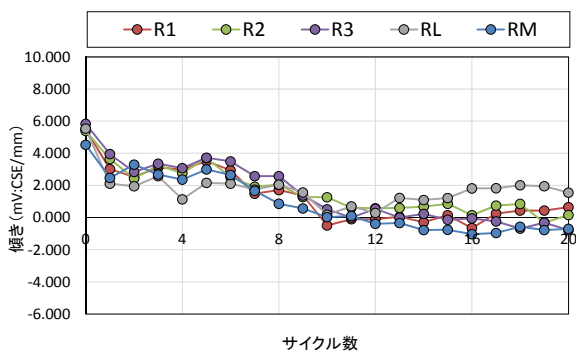


図-9 自然電位の傾き (塩化物イオン量 10.0kg/m³)

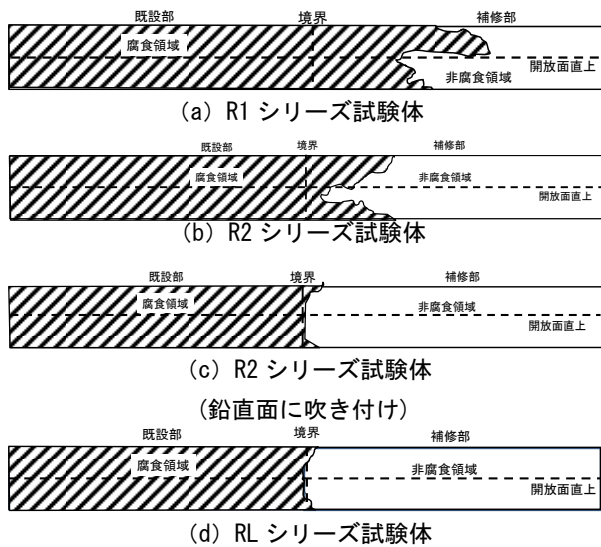


図-10 鉄筋の腐食性状 (10.0 kg/m³)

回の計測を行った。

図-8 よりいずれの試験体も補修部の塩化物イオン量は 2kg/m^3 程度であり、既設部の塩化物イオン量とは大きな差異がある。図-8 から 0 サイクル時の塩化物イオン分布を推察すると、補修部に塩分は拡散していないと思われ、図-7(a)に示したように、0 サイクル時での補修部の自然電位は既設部に比べて全体的に貴側にはあるが腐食不確定の範囲の自然電位であり、補修を施した初期

の自然電位は既設部の塩化物イオン濃度の影響受けるものと考えられる。

一方、図-7 (b) (c) に示すように、サイクル試験が進むにつれ既設部と補修部の自然電位の差異は減少傾向にあった。そこで補修部境界 (既設部端面から 210mm) と既設部境界 (既設部端面から 190mm) の電位差に着目し、式(1)から自然電位の傾きを算出した⁶⁾。

$$A = \frac{E_2 - E_1}{x} \quad (1)$$

A : 自然電位の傾き (mV:CSE/mm)

E_1 : 既設部境界の自然電位 (mV:CSE)

E_2 : 補修部境界の自然電位 (mV:CSE)

x : 既設部境界から補修部境界までの距離 (mm)

図-9は塩化物イオン量が 10.0kg/m^3 の試験体の境界付近の自然電位の傾きの経時変化を示したものである。

図-9 よりいずれの試験体も自然電位の傾きは、0~12 サイクルで徐々に小さくなり、ほぼ傾きの差異が無くなった。これは、既設部のかぶりコンクリートに発生した腐食ひび割れによる既設部コンクリートの電気抵抗の増加に加えて、既設部から補修部に向かい塩化物イオンが拡散することで、電位差が小さくなったためであると考えられる。したがって補修部の自然電位は既設部からの塩化物イオンの拡散現象を考慮する必要があると考えられる。

4 鉄筋腐食性状

4.1 腐食発生領域

既設部の内在塩化物イオン量が 10.0kg/m^3 の R1, R2, RL シリーズ試験体を対象として、乾湿繰り返し試験 20 サイクル終了後の鉄筋の腐食発生状況を図-10 に示す。

図-10 より補修部では R1 シリーズ試験体が最も腐食発生面積が大きかった。これは、R1 シリーズが比較的軽微な塩害環境 (塩化物イオン量 2.0kg/m^3 以下) を想定した補修モデルであることによる。R2 シリーズの補修モデルは比較的厳しい塩害環境 (10.0kg/m^3) を想定した補修モデルであるが、図-10 (b) に示すように境界付近に腐食が発生した。本実験では、補修部中心と補修部境界の吹き付け (防錆ペーストの条件) を統一するため、既設部と補修部の鉛直面に防錆ペーストを吹き付けていない。そのため鉛直打継面から補修部内部に向かい、塩化物イオンが拡散し補修部境界付近にマクロセル腐食が形成されたと考えられる。図-10 (c) には鉛直打継面に防錆ペーストを吹き付けた R2 試験体の腐食状況を示すように、鉛直面に防錆ペーストを吹き付けた場合は境界付近でもほとんど腐食が発生していないことがわかる。

R1 シリーズおよび R2 シリーズにおいて補修部に発生した腐食は、既設コンクリート側の鉄筋表面に集中した。

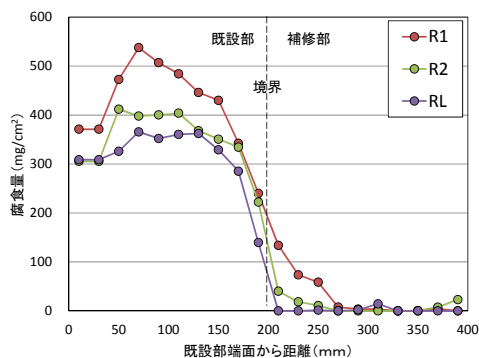


図-11 腐食量 (mg/cm²) 分布

本実験では、既設コンクリートと鉄筋の離隔を 2mm しか確保していないことが要因であると考えられ、既設部の塩化物イオン量が 10.0 kg/m³ 程度の塩害環境下では、既設部と鉄筋の離隔をある程度確保する必要があると思われる。なお、亜硝酸リチウムを添加した補修モデルでは、補修部全域にわたり腐食は発生しなかった。

4.2 腐食量と自然電位

既設部の内在塩化物イオン量が 10.0kg/m³ の R1, R2, RL シリーズ試験体を対象として、腐食量 (mg/cm²) の分布を図-11 に示す。

いずれの試験体でも既設部の鉄筋腐食量は既設部端面側から 40-80mm の位置で腐食量が最大となり、補修部に向かうに従い、小さくなった。これは、既設部境界付近の塩化物イオンが補修部に拡散するとともに補修部から既設部に向かい亜硝酸イオンが拡散することで、既設部境界付近の防錆環境が改善されたためであると考えられる。一方、補修部では R1, R2 シリーズ試験体の補修部境界から約 60mm の区間の腐食量が大きくなっており、マクロセル腐食が形成されたものと考えられる。RL 試験体では補修部境界近傍の腐食量は 0.0mg/cm² であった。

前述したように R1, R2 シリーズにおいて、マクロセル腐食が発生した主たる要因は鉛直打継面に防錆ペーストを吹き付けなかったことで高濃度の塩化物イオンが吸着されることなく、補修部に拡散したためであると考えられる。

図-12 は図-11 に示した試験体の補修部側境界の腐食量 (mg/cm²) と自然電位の関係を示したものである。

図-12 より、自然電位が卑になる程、腐食量が大きくなる傾向が認められ、本論文の範囲内では、-300mV より卑になると腐食が発生する傾向にあった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 補修部の自然電位は、サイクル試験初期では既設部の塩化物イオンの影響を受けて塩化物イオン量の大きい程、卑側の値を示す。また、サイクル試験終

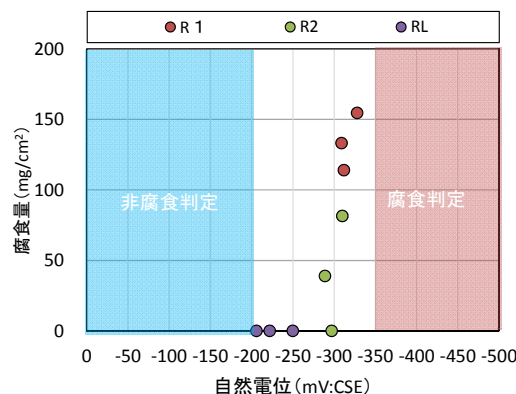


図-12 自然電位 (mV : CSE) と腐食量 (mg/cm²) の分布 (補修部側境界)

了時には塩分濃度の違いが自然電位に与える影響は小さくなった。

- (2) 補修部の自然電位は既設部の塩化物イオン濃度の影響を受け、卑側の値を示す場合がある。
- (3) 本実験の範囲では、既設部の塩化物イオン量が 10.0 kg/m³ の厳しい環境下において、水平打継面と鉄筋との離隔を 2mm 確保した場合、既設部側の鉄筋表面の腐食の進行が大きくなり、防錆環境を構築するためにはある程度の離隔が必要であると考えられる。
- (4) 内在塩分が 10.0 kg/m³ 程度の厳しい環境下において、鉛直打継面の防錆ペーストの吹き付けは境界付近のマクロセル腐食の抑制に効果がある。

参考文献

- 1) 松田芳範・石橋忠良・豊岡昭博・天木儀一：塩害により損傷を受けた PC 橋の補修効果に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, 1999
- 2) 上田洋・水野清・上原元樹・飯島亨・玉井譲：塩化物イオン吸着材を用いた鉄筋コンクリート構造物塩害抑制工法の耐久性評価，鉄道総研報告，Vol.26, 2012.12
- 3) 岩井雅紀・宮里心一・宮口克一・上村豊：塩分吸着断面修復材と亜硝酸リチウムを併用した補修材料の強度と耐久性：土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，V-236, 2014
- 4) 飯島亨・高田潤・立松英信：塩化物イオン吸着剤を活用した塩害抑制工法 - 融雪剤による劣化構造物への適用，日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集，Vol.43, 1999.9
- 5) 山田あずさ・西信衛・桑原俊彦・村上祐貴：断面修復後の RC 部材の補修部への塩化物イオンの再拡散，土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，Vol.33, pp.338-341, V-2, 2015.11
- 6) 古賀裕久・渡辺博志・中村英佑：マクロセル環境が自然電位測定結果に与える影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.33, No.1, 2011