

論文 塩害損傷を受けたコンクリート構造物の効率的補修法の考案

青山 實伸^{*1}・平野 誠志^{*2}・宮里 心一^{*3}

要旨：道路橋では、伸縮装置周辺部等からの凍結防止剤を含む路面水の漏水が要因となり、塩化物イオンが浸透して鉄筋腐食を生じ、浮き・剥離の塩害損傷を発生した RC 部材が多く存在する。この補修には、従来、断面修復工法や電気化学的防食工法を適用しているが、小規模であるための補修コスト高や再劣化による更新コストなど、多くの補修費と維持管理費が必要になる。この課題に対応するために、塩害を受ける部材の鉄筋腐食進行メカニズムを解明し、鉄筋防食機能を短期的に犠牲陽極材（亜鉛）、長期的に防錆剤により発現させる補修工法を考案した。この結果、小規模損傷に対して、効率的な補修を実現できることとなる。

キーワード：塩害、鉄筋防食、補修工法、犠牲陽極材、防錆剤、複合防食工法

1. はじめに

道路橋では、伸縮装置周辺部等からの凍結防止剤を含む路面水の漏水が要因となり、塩化物イオン(以下「塩分」)が浸透して鉄筋腐食を生じ、浮き・剥離の塩害損傷の発生しているコンクリート部材が多く存在する。凍結防止剤による塩害を発生するコンクリート部材は、伸縮装置部の漏水に伴う橋梁桁端部や橋脚・橋台、橋脚配水管の破損箇所などである。これらの塩害損傷は、損傷面積が小規模である一方、損傷発生橋梁数は多いことが特徴である。またそれらの補修は、従来、断面修復工法や電気化学的防食工法が適用されているが、小規模であるために補修コストは高く、再劣化による更新コストなど、全ての損傷部を補修するには多額の補修費と維持管理費が必要になる。この課題に対応するために、塩害を受ける部材の鉄筋腐食進行メカニズムを解明し、犠牲陽極材（亜鉛）と高濃度の防錆剤（亜硝酸リチウム）混入モルタルによる断面修復を組み合わせた効率的な補修工法（以下「複合防食工法」）を考案した。本文では、損傷発生の最も多い RC 橋の桁端部に着目して、塩害損傷状況を示すと共に、これまでに実施した塩害による鉄筋腐食進行メカニズムや鉄筋防食に関する研究を基に、考案した複合防食工法の概要と特徴について述べる。

2. 凍結防止剤による桁端部の塩害損傷状況と補修工法

2.1 桁端部の塩害損傷状況¹⁾

北陸地方の高速道路の橋梁では、図 - 1 に示すように桁端部 2m の範囲の部位に、鉄筋腐食が先行して生じる浮き・剥離・鉄筋露出の損傷が集中して発生している。

RC 中空床版桁端部の比較的大きい損傷面積 8m² の損傷状況事例を図 - 2 の展開図に示す。桁端部の損傷は、大きさの異なる損傷が点在している。桁端部から 2m までの損傷（浮き・剥離・鉄筋露出）の全面積を算定し、

損傷面積の大きさごとの桁端部数と累加比率を図 - 3 に示す。算定面積 10m² 以下の桁端部が 98% を占め、損傷面積は小規模である特徴を示している。

RC 中空床版の桁端部の損傷 1 個の大きさが 0.5m² 以上である損傷部の塩分の浸透状況の調査結果を図 - 4 に示す。損傷部には多くの塩分が深部まで浸透しており、

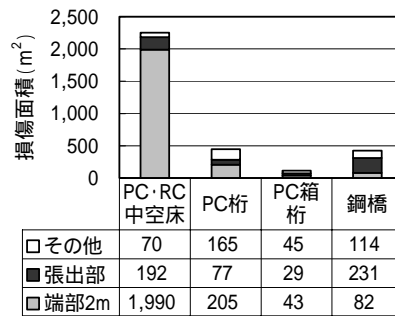


図 - 1 橋梁型式ごとの損傷位置と損傷面積の関係

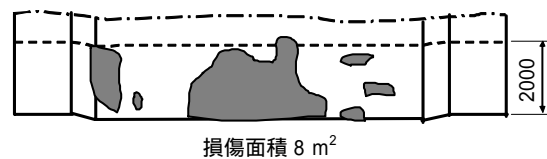


図 - 2 RC 中空床版桁端部の損傷状況事例の展開図

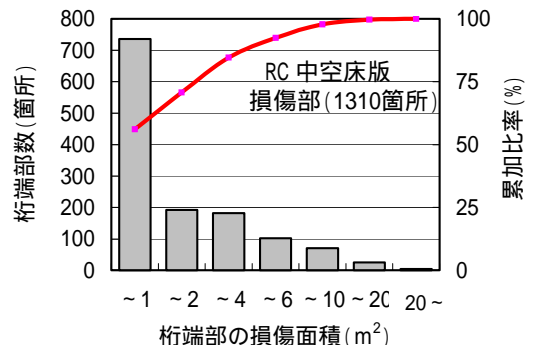


図 - 3 桁端部の損傷面積と桁端部数と累加比率

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 土木部 部長 博士(工学) (正会員)

*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 土木部 課長代理 (正会員)

*3 金沢工業大学 環境土木工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

鋼材腐食発生限界塩分濃度(以下「発錆塩分濃度」)1.2 kg/m³ を大きく越えて浸透しており、深部でも塩分腐食環境下にあることが推察される。

2.2 桁端部に適用する補修工法の課題

RC 中空床版桁端部の鉄筋配置は、図 - 5 に示すように、桁端部横桁の補強鉄筋である橋軸直角方向筋 (D22 ~ D25mm)、橋桁の補強鉄筋である橋軸方向筋 (D32mm) 1~2 段、せん断補強鉄筋 (D16mm) と、輻輳した鉄筋配置となっている。

従来、RC 中空床版の桁端部の損傷部に適用された補修工法としては、断面修復工法、電気防食工法並びに脱塩工法の事例がある。断面修復工法は多く適用されているが再損傷発生事例が多く、現在は、発錆塩分濃度を越える部分を除去することを基本としている。この場合、はつり深さが大きくなるとコストが増大し、分割施工を必要とする場合や、桁の仮受けを必要とする事も生じる。また、既設コンクリートと断面修復部の境界でのせん断補強筋のマクロセル腐食発生のリスクは避けられない。電気防食工法の適用では、補修面積が小規模の場合、一定の受電設備等が必要になるため補修コスト高となり、更新コストも高くなる。脱塩工法では、一定の仮設受電設備や管理が必要になるため、補修面積が小規模の場合にコスト高となる。また、鉄筋に深く浸透した塩分の脱塩効果等に課題がある。

3. 鉄筋防食に関する実験等

3.1 鉄筋腐食進行メカニズム

塩害損傷の進んだ RC 橋桁端部の床版下面の塩分浸透は、内部側の鉄筋の背面にまで発錆塩分濃度を超える高濃度の塩分が浸透している場合が多い。塩分浸透状況を考えると、内部側の鉄筋は腐食する塩分環境下にある。しかし、実際の床版下面の鉄筋腐食は、写真 - 1 に示すようにコンクリート表面側下面に集中している事象が数多く見られる。

この事象の要因を解明するため、平野らは、実橋における塩害の劣化過程を模擬した二軸方向分割鉄筋を配置した試験体による促進試験を実施し、鉄筋上下面位置での時間経過に伴う鉄筋の腐食進行過程を図 - 6 のように推定している。²⁾ これによれば、鉄筋上下面で腐食の進行速度が異なり、鉄筋下面の腐食進行が大きく、特にひび割れ・浮き・剥離の発生以降は、表面側に配置された鉄筋下面で集中的に腐食が進行する。他方、内部側に配置された鉄筋

や鉄筋上面側の腐食進行は、高濃度の塩分環境下にあるにも係わらず、下面側より遅くなっている。

この結果、特に浮き・剥離の損傷が発生した劣化期では、表面側に配置された鉄筋下側がアノードになり、残りの鉄筋がカソードとなる一種の犠牲陽極的な挙動を呈して腐食が進行すると推定され、この傾向は現地の腐食状況と合致している。従って、深部に塩分が多く浸透している場合でも内部側の鉄筋周辺には、ひび割れ発生を伴う損傷が生じるリスクは小さいといえる。このことから、補修後に鉄筋腐食進行を抑制できれば、断面修復深

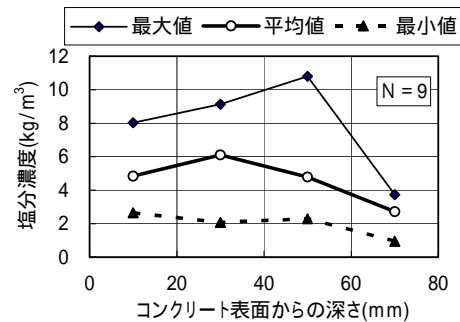


図 - 4 桁端部の損傷部(0.5m²以上)の塩分浸透状況

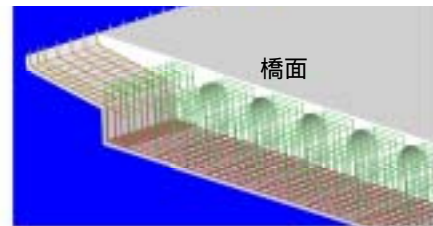


図 - 5 RC 中空床版桁端部の配筋状況



写真 - 1 実際の床版下面の鉄筋腐食状況

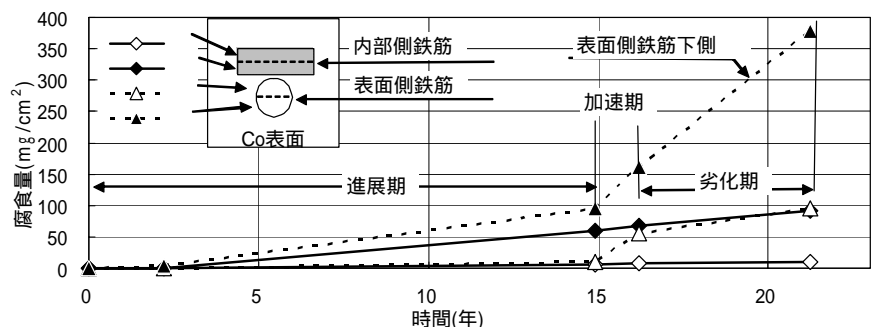


図 - 6 時間経過に伴う鉄筋腐食量の進行過程

表 - 1 試験体の条件

種類	Cl ⁻ 量 (kg/m ³)		LiNO ₂ 混入量
	低	高	
No.1	2.5	7.0	なし
No.2	2.5	7.0	8.5 kg/m ³
No.3	2.5	7.0	57.5 kg/m ³

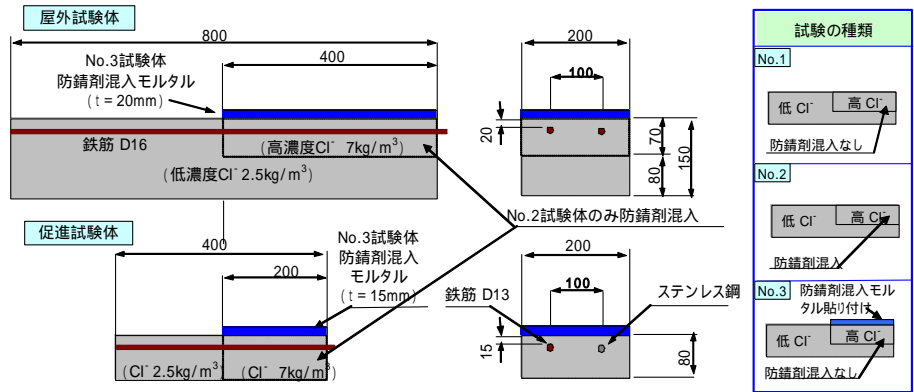


図 - 7 防錆剤混入モルタルの防錆効果確認の試験体

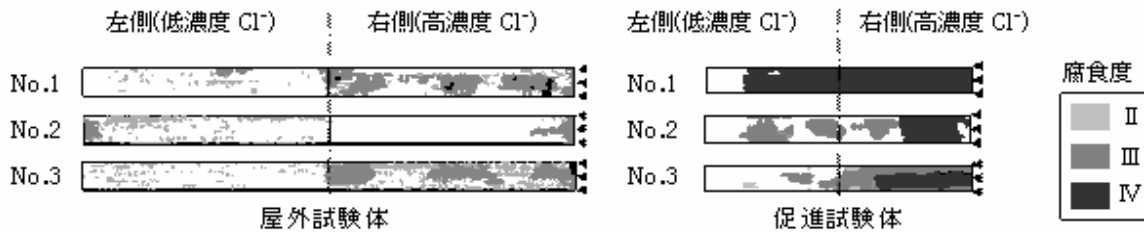


図 - 8 曝露後の鉄筋の腐食状況

さを表面側鉄筋背面位置に設定しても鉄筋コンクリートとしての性能を十分確保できると推察する。

3.2 防錆剤混入モルタルの防錆効果

(1) 曝露試験による防錆効果の確認³⁾

鉄筋コンクリート用の防錆剤は、JIS 規格でも規定されており、亜硝酸系を使用することが多い。亜硝酸イオン(以下「防錆成分」)は、塩害コンクリート中の鉄筋の不動態皮膜を再生させ、防錆効果が発現される。防錆効果はコンクリートに含有される防錆成分と塩分とのモル比 ($\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$) により決まり、防錆効果が発現するモル比は 0.6 ~ 1.0 程度であるとされている。ここでは、特に浮き・剥離の損傷が発生した劣化期で塩分を含むコンクリート中の防錆剤の有効性と、高濃度の防錆剤混入モルタルを断面修復材に使用した場合の防錆成分の浸透による防錆効果を屋外・促進の曝露試験により確認した。

試験は、塩分を混入した W/C=63%のコンクリート ($C=210\text{kg/m}^3$) に、表 - 1 に示す条件で防錆剤 (亜硝酸リチウム) を混入させた場合と、高濃度の防錆剤混入モルタルをコンクリート表面に貼付けた図 - 7 に示す試験体で、屋外曝露を 37 ヶ月、乾燥・湿潤繰り返し (40 : 4 日間乾燥 (50% RH) ・ 3 日間湿潤 (95% RH)) の促進試験を 10 ヶ月間実施した。試験終了解体後の鉄筋腐食状況を図 - 8 に示す。これによれば、高濃度部の塩分混入コンクリートにモル比 0.8 相当の防錆剤を混入した No.2 試験体では、防錆剤無混入の No.1 試験体と比較し、鉄筋腐食を抑制している。また、高濃度の防錆剤混入モルタルをコンクリート表面に貼付けた No.3 促進試験体は、

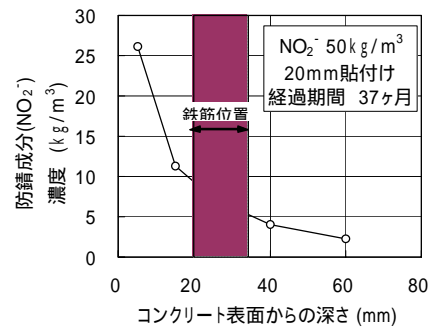


図 - 9 防錆成分濃度の分布

No.1 試験体より腐食が抑制されており、防錆剤の浸透による防錆効果が発現されている。図 - 9 は、No.3 と同じ屋外試験体で、防錆成分濃度の深さ方向の分布の測定結果を示す。時間経過に伴い、防錆成分が濃度差により拡散して浸透することを確認できる。

この結果、高濃度の防錆剤混入モルタルを用いて断面修復を実施すれば、断面修復材中の防錆成分がコンクリート中に浸透し、塩分腐食環境下であっても長期的にわたり鉄筋の防錆雰囲気を持続できることが推察される。

(2) 防錆成分の浸透性

防錆剤混入モルタルからコンクリート中に浸透する防錆成分の浸透性を確認した。

防錆成分の浸透性の確認は、図 - 10 に示す試験体で屋外曝露により実施した。使用したコンクリートは W/C 50 % ($C=342\text{kg/m}^3$) で、モルタルは W/C 45% ($S/C=2.5$) である。モルタルには、塩分 (Cl^-) 濃度 50kg/m^3 および防錆成分 (NO_2^-) 濃度 50kg/m^3 を混入している。コンクリート

表面の 1/2 には塩分混入モルタル，残り 1/2 には防錆剤混入モルタルを 20 mm 厚で被覆し，モルタル被覆後に試験体底面を除く 5 面を塗装で被覆した。曝露はモルタル被覆面を下側と横側の 2 方向に配置し，37 ヶ月曝露後に直径 55 mm のコアを採取し，コンクリート中に浸透した深さごとの全塩分濃度および水溶性防錆成分濃度を測定した。

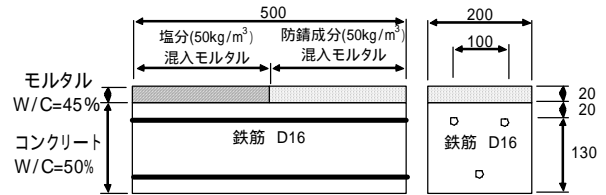


図 - 10 防錆成分浸透性確認の試験体

コンクリート中に浸透した塩分および防錆成分の分布状況を図 - 11 に示す。防錆成分の浸透量は，塩分の浸透量より多くなっている。これは，塩分がフリーデル氏塩に固定化⁴⁾されることなどによるものと考えられる。曝露面の方向の違いによる浸透量は，塩分は下面が横面より少し多いが，防錆成分は下面と横面がほぼ同じであり，方向に関係なく概ね同程度の浸透性を示すものと推察される。

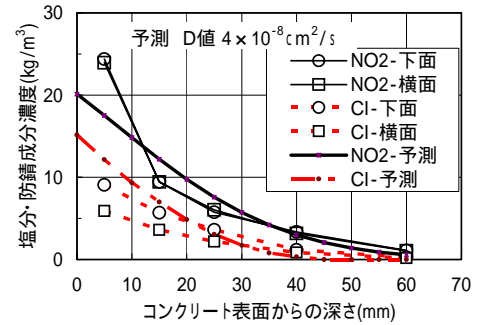


図 - 11 塩分・防錆成分の分布状況と予測の関係

塩分と防錆成分の浸透性を，拡散係数により評価を加える。拡散係数は，モルタルとコンクリートは同じで，塩分および防錆成分の総量は変化しないと仮定して，1次元差分法を用いてシミュレーションを行い，浸透量の分布形状と測定値が近似する値を探した。塩分浸透のシミュレーションでは，丸屋ら⁴⁾の固定化係数と全塩化物量との関係式を用い，固定化を勘案した。シミュレーションの結果，測定値と予測値の分布は合致できなかったが，拡散係数 D を $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ とすると図 - 11 に示す予測結果となり，防錆成分の拡散係数が塩分の拡散係数より大きいと想定される。また，塩分分布から塩分の見かけの拡散係数を算定すると， $3.4 \sim 3.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。

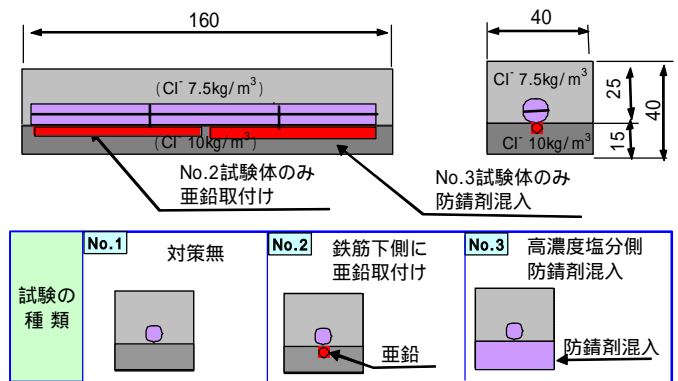


図 - 12 犠牲陽極材の防食効果の確認試験

この結果，防錆成分の浸透性は塩分の浸透性より大きく，防錆成分の浸透予測では，防錆成分の拡散係数を塩分の見かけの拡散係数と同じとすれば，浸透量は小さく予測され，対策検討では安全側に評価されることになる。

3.3 犠牲防食材の防食効果

損傷を受けたRC中空床版の補修では，鉄筋以深の塩分腐食環境下での鉄筋腐食を抑制するために，犠牲陽極材を設置する電気的防食の適用が有効であると考えられる。この場合，鉄筋進行メカニズムを勘案すると，断面修復の深さは表面側鉄筋背面まででき，はつり量を減じることが可能になる。ここでは，損傷発生部の塩分腐食環境下を想定して，鉄筋に沿って亜鉛を犠牲陽極材として配置した場合の鉄筋腐食の抑制効果を促進試験により確認した。

促進試験は，図 - 12 に示す試験体により実施した。試験体は，モルタル(W/C 50%，S/C=2.5)を用い，図 - 13 (上段) に示す二軸方向分割鉄筋を1本埋設した。塩分は，鉄筋下面までを 10 kg/m^3 ，鉄筋埋設部から深部に 7 kg/m^3 を混入した。No.1 試験体は無対策で，No.2 試験体は犠牲陽極材(亜鉛)を鉄筋に沿って配置し，No.3 試験体は

かぶり部に0.8 モル相当の防錆成分 10 kg/m^3 を混入した。初期養生は，水中 (20 ± 2)において28 日間行い，その後，下面以外の5面を塗装により被覆した。促進試験は浸漬 (20 ，3% NaCl溶液) 3日間と乾燥 (20 50%RH) 4日間の繰り返しを2ヶ月実施後，2 週間乾燥させた時点で鉄筋腐食速度を測定した。各試験体 2 本の鉄筋要素の総腐食電流密度の測定結果を図 - 13 (下段) に示す。無対策のNo.1 試験体では，鉄筋下側部の総腐食電流密度が大きく，高程度～激しい腐食速度を示している。他方，亜鉛を配置したNo.2 試験体の総腐食電流密度は小さく，ほぼ不動態状態が維持され，犠牲陽極材として防食効果の機能を発揮している。防錆剤を混入したNo.3 試験体においても，No.2 試験体と同様な結果を示している。これは，試験体作製時に防錆剤混入部と未混入部を同時に打設したことから，防錆成分の鉄筋周辺への浸透が早かったことによるものと推察する。

この結果，損傷発生部の塩分腐食環境下において鉄筋に沿って配置した亜鉛は，犠牲陽極材として鉄筋の防食効果の機能を発現することを確認できた。

4. 複合防食工法の考案

4.1 複合防食工法の概要

犠牲陽極材を用いれば、補修直後から塩分腐食環境下で鉄筋防食効果を発現でき、はつり深さをひび割れ発生範囲に限定することができる。しかし、犠牲陽極材である亜鉛は、防食電流による腐食減量が生じ、有効に機能する期間に限られる。他方、防錆剤混入モルタルによる鉄筋防食は、断面修復中の防錆成分が浸透し塩分とのモル比 ($\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$) が所定の値になって初めて効果を発現する。防錆効果の発現までには時間を要するが、防錆効果発現後は長期にわたり鉄筋の防食機能を維持できる。

考案した複合防食工法は、損傷部の補修において犠牲陽極材と高濃度の防錆剤混入モルタルによる断面修復とを組み合わせることにより、2つの防食機能の特性を活用して、図-14に示すように、補修直後から長期にわたり鉄筋防食を持続させて、補修コストと更新コストの最小化を計ることを意図して考案した工法である。本工法は、鉄筋に断面減少が生じ、浮き・剥離の損傷が進行した加速期後期から劣化期にある部材に適用できる。

4.2 複合防食工法の特徴

(1) 亜鉛による犠牲陽極機能

亜鉛がコンクリート中で犠牲陽極材として機能するためには、不動態を生じさせないよう電解質溶液を PH 13.3 以上にする必要があり⁵⁾。亜硝酸リチウムを防錆剤に使用する場合、混入量を増すほど PH 値を大きくすることができる。プレミックスタイプの SBR 系ポリマーセメントモルタルへ防錆成分 (NO_2^-) 混入量を 48 kg/m^3 と 0 kg/m^3 の2種類で作製した試験体(径 $50 \times 100 \text{ mm}$)より、硬化 24 時間後に細孔溶液を抽出し、PH メータとイオンクロマト法により PH 値と防錆成分濃度を測定し、その関係を図-15に示す。防錆剤無混入の試験体で防錆成分が検出されているのは、先行して実施した防錆剤混入試験体の抽出時に残存した防錆成分の影響を受けたことによると推察する。図-15より、細孔溶液中の防錆成分は、モルタルに混入した防錆分量の約 3.5 倍になっている。PH 値と細孔溶液中の防錆成分濃度の関係式より比例計算すると、細孔溶液中の PH 13.3 以上にするのに必要な防錆成分混入量は、約 40 kg/m^3 以上と算定される。なお、亜鉛の腐食生成物は、膨張性がなくコンクリートに悪影響を与えないことが知られている。

(2) 複合防食工法の適用性の検討

適用性の検討では、はつり深さ・防錆剤混入量・厚さ等の断面修復構造の条件を設定する。コンクリート中の浸透塩分分布より表面塩分濃度 C_0 と拡散係数 D を、式(1)の解により推定する。 C_0 値と D 値を用いて、断面修復後に残存したコンクリート中の塩分の移動、断面修復材に混入した防錆成分(拡散係数は塩分と同じとする)の変

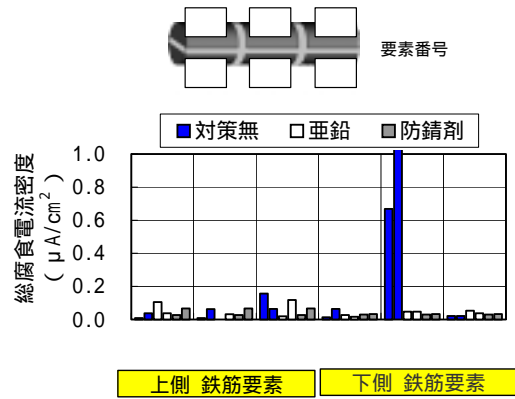


図-13 各試験体の鉄筋要素の総腐食電流密度

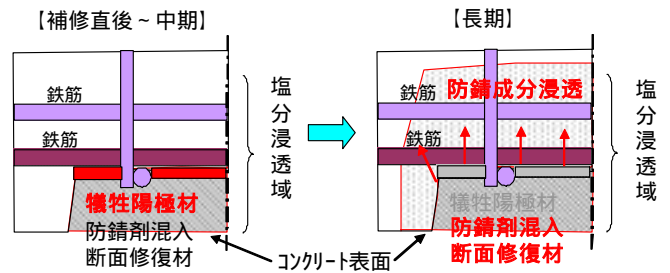


図-14 複合防食工法の防食機構

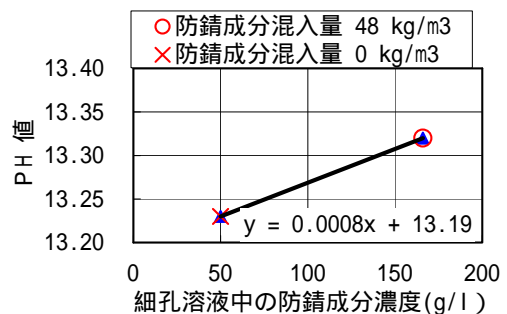


図-15 細孔溶液中の PH 値と防錆成分濃度の関係

化を式(1)により差分法によるシミュレーションを行い予測する。その結果を基に、鉄筋位置での防錆効果の発現時期を、防錆成分と塩分とのモル比により判定する。犠牲陽極材の有効期間は、補修後の鉄筋腐食速度より犠牲陽極材である亜鉛の腐食減少量を推定し、安全率を勘案して決定する。これらの検討結果より、犠牲陽極材の有効期間内に各鉄筋位置で防錆成分による防錆雰囲気を形成できれば複合防食工法は適用可能と判断する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \times (\partial^2 C) / \partial x^2 \quad (1)$$

ここに、 C ：塩分濃度、 D ：拡散係数、 t ：時間、 x ：コンクリート表面からの距離

25年経過した RC 中空床版の桁端部損傷部での複合防食工法の検討事例を以下に示す。図-16(上段)に、検討部材の鉄筋の配置構造、残存塩分量や補修条件を示す。はつり深さは、表面側鉄筋背面 55 mm とし、断面修復厚 55 mm の内、鉄筋側に 20 mm 厚の防錆剤 55 kg/m^3 を混入する。図-16(下段)は、深部鉄筋背面(深さ 85 mm)

位置での塩分・防錆成分濃度およびモル比の変化のシミュレーション結果を示す。防錆剤の浸透により防錆成分濃度が増加し、補修後、約7年目に塩分濃度 3.2kg/m^3 の腐食環境下で防錆効果（モル比 0.8）が発現すると予測される。よって、7年の有効期間を有する犠牲陽極材を配置すれば、複合防食工法は適用可能と判断される。

この結果、複合防食工法は、損傷部の厳しい塩分腐食環境下においても適用可能なことを示している。

(3) 複合防食工法の補修コスト評価

図 - 16 と同一構造の損傷発生部を補修する場合、複合防食工法の補修コストを、従来の断面修復および電気防食工法のコストと比較する。

断面修復のはつり工法は、かぶり部を人力、鉄筋を深部をウオータジェットによる。はつり深さは、従来の断面修復は深部鉄筋背面の露出に必要な 90mm 、複合防食は表面部鉄筋背面の 55mm 、電気防食は損傷部の除去に必要な 45mm とする。断面修復材料はポリマーセメントモルタルを用いた吹付け工法とし、複合防食工法では防錆剤混入部を 20mm 厚とする。複合防食工法の犠牲陽極材のコストは、既製品を用いて検討する。電気防食工法のコストは、電気防食工法に関する技術資料⁶⁾による。

補修コストの算定結果を図 - 17 に示す。コストは、複合防食工法を 100 とし指数化している。なお、脱塩工法の補修コストも電気防食工法と概ね同程度である。

この結果、複合防食工法は、 50m^2 未満の小規模損傷の補修であればコストが小さくなる。また、更新コストも削減できることから LCC も小さくなると推察する。

5. 結論

本研究で得られた結果をまとめると、次のようである。

- 1) 凍結防止剤による塩害損傷は、RC 中空床版の桁端部などに小規模な損傷として多く発生している。なお、損傷部には多くの塩分が浸透している。
- 2) 促進試験で鉄筋腐食進行メカニズムを解明した結果、浮き損傷が生じた劣化期では、表面側鉄筋の下側の腐食進行が著しく、内部の鉄筋の腐食進行は小さいことを確認した。これは、実橋の劣化実態と合致している。
- 3) 断面修復材の防錆剤混入モルタル中の防錆成分は、コンクリート中に浸透し、長期的に鉄筋の防錆雰囲気を形成する。なお、防錆剤の浸透性は塩分に比べて大きい。
- 4) 塩分腐食環境下の鉄筋に沿って配置した亜鉛は、犠牲陽極材として補修後、鉄筋の防食効果を発現する。
- 5) 犠牲陽極材と高濃度の防錆剤混入モルタルによる断面修復を組み合わせた複合防食工法は、補修直後から長期にわたり鉄筋防食を持続させて、補修コストや更新コストを削減でき、小規模損傷の補修に適する。

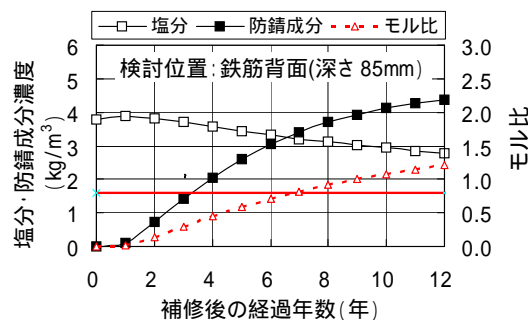
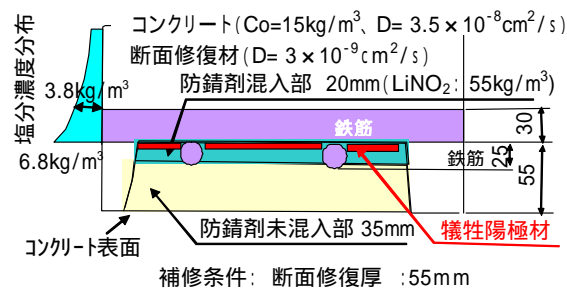


図 - 16 複合防食の検討事例

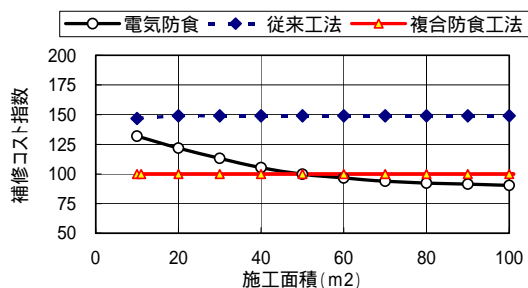


図 - 17 複合防食工法と従来工法の補修コスト

参考文献

- 1) 熊谷和夫ほか: 北陸地方の橋梁けた端部のコンクリート部材の損傷特性と劣化推移, 土木学会論文集, Vol.798/ -68, pp.31-39, 2005.
- 2) 平野誠志ほか: 凍結防止剤が散布される RC 道路橋の塩害進展メカニズムの解明, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.1005-1010, 2007.7
- 3) 青山實伸ほか: 防錆剤混入モルタルによる塩害コンクリート中の鉄筋の防食効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1075-1081.2003.9
- 4) 丸屋剛ほか: コンクリート表層部における浸透予測モデルの構築, 土木学会論文集, No.585 / V-38, pp.79-95, 1998.2
- 5) Andrade, M.C. & Macias, A., Galvanized Reinforcement in Concrete, In Surface Coating-2, eds A.D. Elsevier Applied Science, pp. 137 - 182.
- 6) 技術講習会 2007 金沢, コンクリート構造物の塩害対策と電気防食技術の動向 - 電気力で塩害を防ぐ - 【応用編】, 日本エルガード協会, 2007.11