

コンクリートの部分断面補修箇所周辺の鉄筋腐食機構

飯島 亨* 工藤 輝大* 玉井 譲*

Mechanism of Corrosion of Reinforcement in the Vicinity of the Patch Repair Area of Concrete

Toru IIJIMA Teruhiro KUDO Yuzuru TAMAI

There is a patch repair method as one countermeasure for deterioration of concrete structure. Recently, reinforcement has corroded early around this patch repair area. So investigation about the situations of concrete structure was executed in order to establish a countermeasure for this deterioration. Further, we prepared a test piece to imitate concrete structure having separate reinforcement and based on measurement of electric current between separate reinforcement, mechanism of corrosion of reinforcement in the vicinity of patch repairs was grasped by electro-chemical method. We have also proposed a guide for efficient execution of patch repairs.

キーワード：鉄筋，コンクリート，腐食，腐食速度，補修，マクロセル，劣化予測

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化対策の一つとして、はく離・はく落した箇所を部分的に補修する断面補修が多く用いられている。近年、この補修箇所の周辺で鉄筋腐食による劣化が認められる事例があり、その劣化対策が求められている。そこで、部分断面補修後に、補修箇所周辺で発生する鉄筋腐食による劣化（以下、再劣化と呼ぶ）のメカニズムを明らかにするため、現地構造物の調査および供試体試験を実施した。さらに、効率的な施工方法も提案した。

2. コンクリート構造物の現地調査

コンクリート構造物の現地調査は、鉄筋腐食によるはく離・はく落に起因した第三者被害が懸念される箇所のひとつである床版下面について、部分断面補修箇所周辺におけるコンクリートの性状と鉄筋腐食状況について実施した。

2.1 調査項目

調査項目は、現地調査および採取コアの調査からなる。現地調査では外観・打音調査、鉄筋のかぶり調査を、採取コアの調査では中性化深さ、塩化物イオン量の測定を実施した。また、コンクリート構造物の補修時にコンクリートからはつり出した鉄筋の腐食調査を実施した。

2.2 調査結果

(1) 現地調査

コンクリート高架橋（床版下面）の外観写真および外観・打音調査結果から、補修後の劣化は主に部分断面補修箇所の周辺で認められた。コンクリート高架橋（床版下面）の配筋およびかぶり調査は、レーダ法および電磁誘電法により実施した。その結果、本調査では、補修部の鉄筋かぶりが極端に小さくなっており、補修箇所周辺の鉄筋かぶりも小さくなる傾向にあった（図1）。

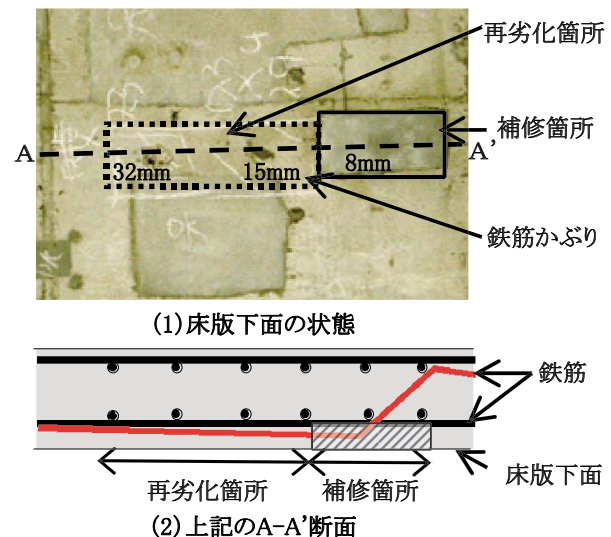


図1 部分断面補修箇所周辺の鉄筋位置と劣化状態

(2) 採取コアの調査

コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす中性化と塩害の影響を調べるため、採取コアを用いて中性化深さ測定と塩化物イオン量の測定を実施した。中性化深さは、コアの

* 材料技術研究部（コンクリート材料）

特集：材料技術

割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して表面から呈色部までの距離を測定して求めた。調査時の中性化深さの平均値は23.7mmで、中性化速度係数は $4.08\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ であった。中性化速度の予測式としてしばしば用いられる岸谷式¹⁾で普通ポルトランドセメントを使用、水セメント比を55%として中性化係数を求めると、 $2.9\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ であり、この値と比較して中性化の進行は速いことがわかる。

採取コアの塩化物イオン量は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して、全塩化物イオン量を定量した。また、可溶性塩化物イオン量も測定した。全塩化物イオン量は深部で $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であった。また、コンクリート表面から40mm程度（鉄筋近傍）の位置に中性化による塩化物イオンの濃縮箇所が認められ、濃縮箇所の全塩化物イオン量は $2.3\text{kg}/\text{m}^3$ であった。また、全塩化物イオン量に対する可溶性塩化物イオン量は、30%程度であった。

(3) はつりによる鉄筋腐食調査

はつりによる鉄筋腐食調査は、部分断面補修箇所と未補修箇所との境界付近を対象とし、床版下面にて実施した。調査箇所は、断面補修箇所周辺に劣化が認められる箇所とした。図2に調査結果の例を示す。鉄筋の腐食は、断面補修箇所および施工界面周辺において鉄筋腐食度IV（断面欠損状態）まで進行していた。施工界面から約160mm程度離れた箇所では鉄筋腐食度III（面錆状態）であり、施工界面周辺の中性化残り（＝鉄筋かぶり－中性化深さ）は0mmであった。また、今回の調査で、補修箇所の近傍で劣化が認められた箇所の多くは、補修後10年程度を経過した箇所であった。

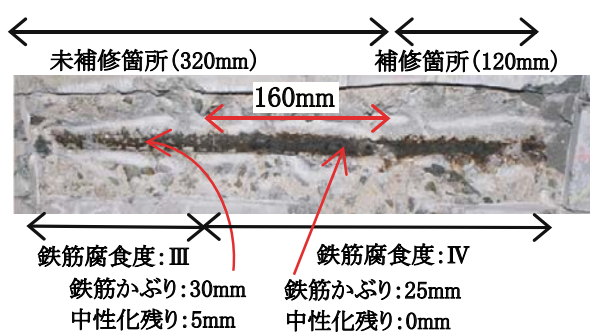


図2 鉄筋腐食調査結果

2.3 現地調査のまとめ

コンクリート構造物において、部分断面補修箇所周辺におけるコンクリートの性状と鉄筋腐食状況を調査した結果、以下のことがわかった。

- (1) コンクリート表面に対して鉄筋が大きく傾斜している箇所（傾斜角度約 6° ）では、鉄筋かぶりが小さい側の補修箇所近傍で腐食の進行している箇所が認められた。

- (2) 調査時の中性化深さの平均値は25～30mm程度（経過年数34年）で、中性化の進行は速く、塩化物イオン量は深部で $1\sim 2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度で、中性化による塩化物イオンの濃縮箇所で $2\sim 4\text{kg}/\text{m}^3$ であった。
- (3) 鉄筋の腐食は、断面補修箇所および施工界面周辺において鉄筋腐食度IV（断面欠損状態）まで進行し、施工界面から約160mm程度離れた箇所では鉄筋腐食度III（面錆状態）であった。また、今回の調査で、補修箇所の近傍で劣化が認められた箇所の多くは、補修後10年程度を経過した箇所であった。

3. 再劣化のメカニズムの検討

実構造物を数多く調査する中で、部分断面補修箇所周辺の未補修箇所では鉄筋腐食による再劣化が生じている。部分断面補修箇所周辺では、中性化の進行によるpHの差および塩化物イオン量の差などで鉄筋周囲の環境が異なっている場合、その影響により部分断面補修箇所と未補修箇所の界面付近では、腐食箇所（アノード部）とカソード部が互いに離れた位置にあるマクロセル腐食が生じている可能性がある。マクロセル腐食が生じると通常の全面腐食（ミクロセル腐食）との総和が腐食速度となるため、腐食の進行が速くなる。そこで、マクロセル腐食の有無およびそのマクロセル電流量の大きさを調べ、コンクリート構造物の調査結果を踏まえた供試体試験を行い、再劣化のメカニズムを検討した。

3.1 供試体

作製したコンクリート供試体は、 $100\text{mm} \times 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ の大きさで、マクロセル腐食電流を測定するため、12個の分割鉄筋²⁾（ $\phi 13\text{mm} \times 15\text{mm}$ ）をリード線で接続した鉄筋（全長300mm：図3参照）を用いた。コンクリートの配合は表1に示すとおりで、これに塩化物イオンを1, 2, 3もしくは $5\text{kg}/\text{m}^3$ 添加した。供試体中の鉄筋配置は図3に示すとおりで、平均かぶりが20mmとなるようにし、実構造物のかぶりのばらつきを考慮して、[水平：傾斜角度 0°]、[少し傾斜：傾斜角度 3°]、[大きく傾斜：傾斜角度 6°]の3種類を設定した。供試体の養生を打設後28日間 20°C 、相対湿度60%の気中で行った後、中性化させる1面を除きエポキシ樹脂で被覆した。その後、促進中性化試験を実施して、かぶり20mmの箇所では鉄筋の半分（約27mm）が中性化域になるようにした。その後、部分断面補修箇所周辺の補修後の再劣化に対するマクロセル腐食の影響の大きさを調べるため

表1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m^3)			
	セメント	水	細骨材	粗骨材
65	268	174	836	1058

に、図4に示す3種類の範囲（補修幅：150mm, 200mm, 250mm）において部分断面補修をそれぞれ実施した。部分断面補修には実際に使用されている市販のポリマーセメントモルタルを使用した。

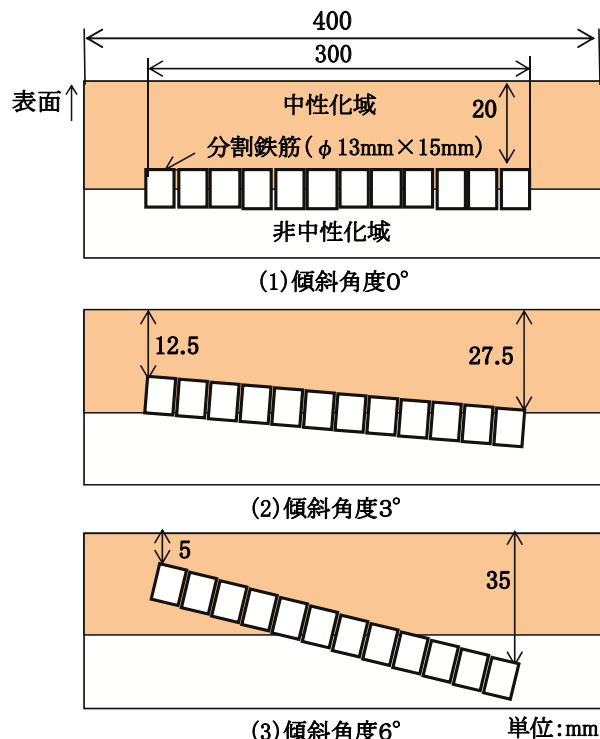


図3 供試体の模式図

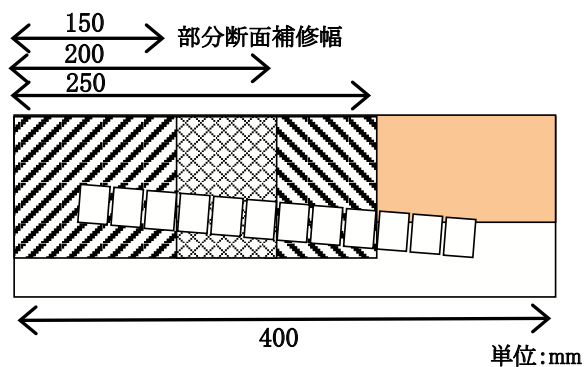


図4 供試体補修の模式図

3.2 試験方法

部分断面補修前に、鉄筋が大きく傾斜している箇所にかぶりが小さい箇所の部分的な劣化現象に対するマクロセル腐食の影響を調べるために、分割鉄筋の自然電位測定と分割鉄筋間の電流測定を行った。自然電位の測定は、分割鉄筋2個毎に、JSCE E 601「コンクリート構造物における自然電位測定方法」に準じて実施した。また、マクロセル腐食は各分割鉄筋間の電流量を無抵抗電流計により測定し、分割鉄筋の両端で測定された電流量の差から、各分割鉄筋間のマクロセル腐食電流量を求めた。

部分断面補修後に、上記と同様に各分割鉄筋間の電流量を測定し、分割鉄筋間のマクロセル電流量を求めた。

3.3 試験結果

(1) 補修前の部分的な劣化

試験を実施した供試体の塩化物イオン量 (Cl) は 1, 2, 3, 5kg/m³ で、鉄筋の傾斜角度は 0, 3, 6° である。各供試体の自然電位の測定結果は、塩化物イオン量 (Cl) が 1kg/m³ では -200~-350mV (vs CSE (銅/硫酸銅電極)), 2kg/m³ では -300~-350mV, 3kg/m³ では -300~-450mV, 5kg/m³ では -350~-450mV 程度であり、通常言われているように、塩化物イオン量が多いほど自然電位は卑側（一側）になり、腐食が進行する傾向にある。鉄筋配置別の自然電位は、その一例 (Cl : 2kg/m³) を図5に示すとおりで、[傾斜角度0°] ではいずれの場所でもほとんど同一の値であるが、[傾斜角度3°], [傾斜角度6°] では鉄筋かぶりが小さい側で卑側になる。実際のコンクリート構造物での測定結果も同様の傾向であり、現地調査でみられた鉄筋の腐食状態を再現できたものと考えられる。そこで、この供試体を用いてマクロセル腐食電流を測定した。

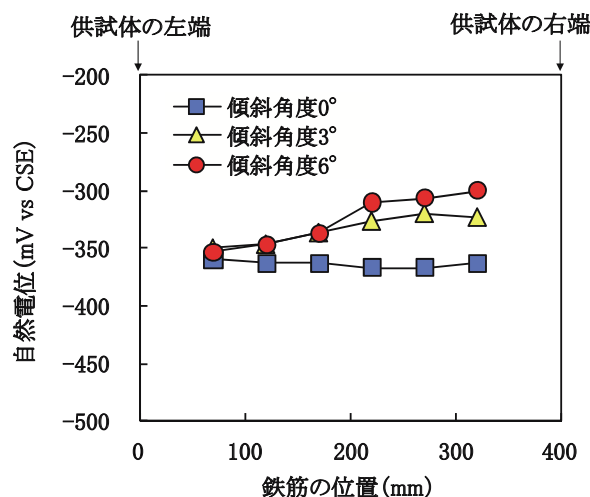


図5 自然電位の測定結果 (Cl : 2kg/m³)

各分割鉄筋のマクロセル腐食電流量は、その一例 (Cl : 2kg/m³) を図6に示すように、[傾斜角度0°] では 0μA/cm² 近傍でばらついている。しかし、[傾斜角度3°], [傾斜角度6°] では、鉄筋かぶりの小さい中性化域側でアノード部 (+側)、かぶりの大きい非中性化域側でカソード部 (-側) になり、マクロセル腐食電流が生じていた。この腐食電流量は、鉄筋の傾斜が大きいくほど大きく、塩化物イオン量が多いほど大きくなる傾向にあった。[傾斜角度6°] の鉄筋で、このマクロセル腐食量と各箇所の中性化残り、塩化物イオン量、含水率から算出³⁾した鉄筋の全面腐食 (マイクロセル腐食) の電流量を比較すると、いずれの箇所でも腐食電流量の加算分は最大で 1/2 程度であった (図7)。鉄筋の腐食速度は、マイクロセル腐食とマクロセル腐食の総和となることから、この箇所の腐食速度は最大で 1.5 倍程度になることがわかった。

特集：材料技術

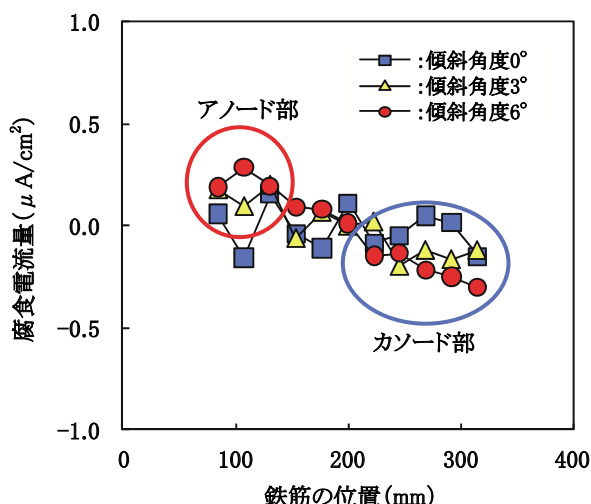


図6 部分断面補修前の腐食電流量 (Cl : 2kg/m³)

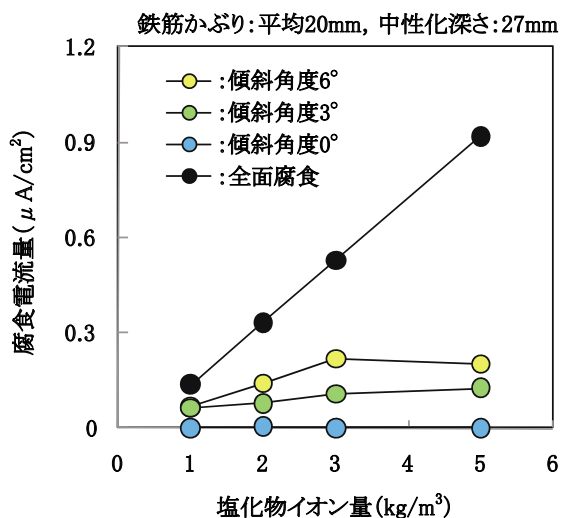


図7 部分断面補修前の腐食電流

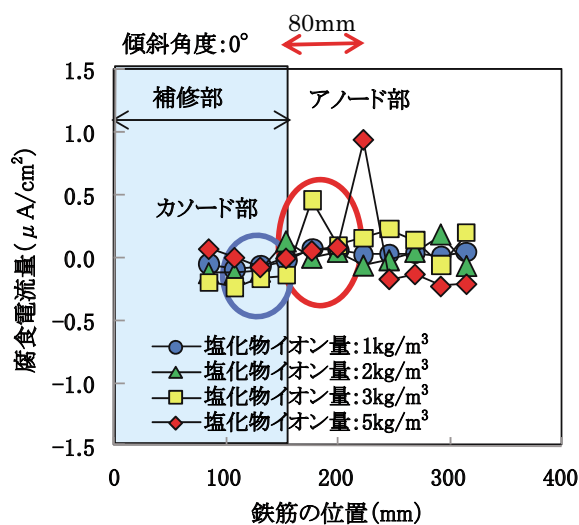


図8 各鉄筋間の腐食電流量 (補修幅 150mm)

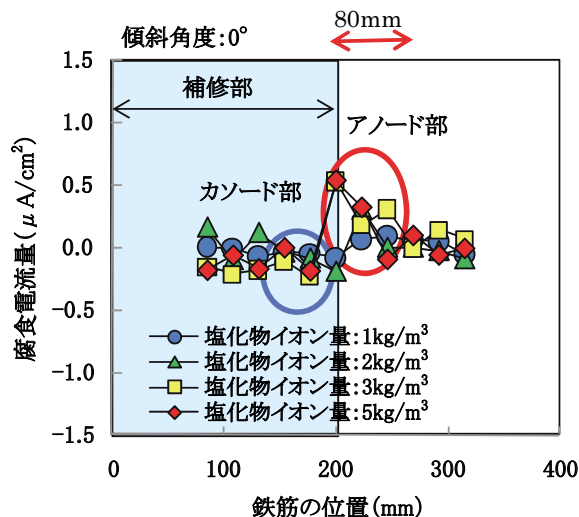


図9 各鉄筋間の腐食電流量 (補修幅 200mm)

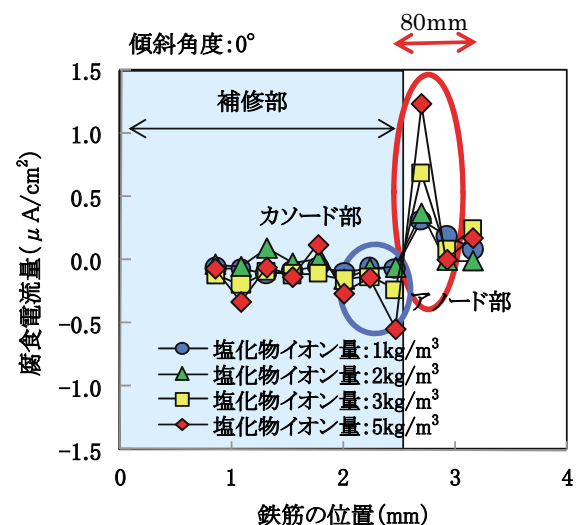


図10 各鉄筋間の腐食電流量 (補修幅 250mm)

(2) 部分断面補修後の再劣化

部分断面補修箇所周辺の補修後の再劣化に対するマクロセル腐食の影響を調べるために、塩化物イオン量が1, 2, 3, 5 kg/m³、鉄筋の傾斜角度が0, 3, 6°の供試体をそれぞれ用いて、補修幅を150mm, 200mm, 250mmの3種類として部分断面補修した後の各分割鉄筋間のマクロセル腐食電流量を測定した。

傾斜角度を0°とした供試体の各分割鉄筋間のマクロセル腐食電流は、いずれも補修界面から未補修側に80mm程度の範囲でアノード部(+)側になり、この箇所でマクロセル腐食が生じていることがわかる。このマクロセル腐食電流量は、塩化物イオン量が多いほど大きくなる傾向であった(図8~10)。傾斜角度を3, 6°と変えて実施した各分割鉄筋間のマクロセル腐食電流量の測定結果も、傾斜角度を0°とした時と同様に、補修界面から未補修側に80mm程度の範囲で、マクロセル腐食が生じており、鉄筋の傾斜との相関は認められなかった(図11-13)。

このマクロセル腐食電流量を補修前の鉄筋のマイクロセル腐食（全面腐食）電流量と比較すると、図11～13に示すように、いずれの箇所でも最大で同程度となり、この箇所の鉄筋の腐食速度はマクロセル腐食とマイクロセル腐食（全面腐食）の総和になることから、最大でマイクロセル腐食の2倍程度になることがわかった。

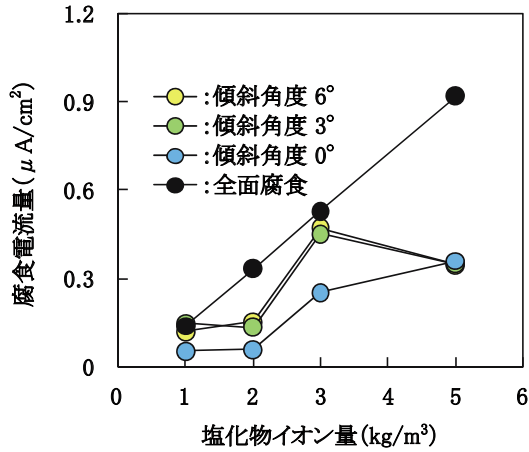


図11 部分断面補修後の腐食電流量（補修幅 150mm）

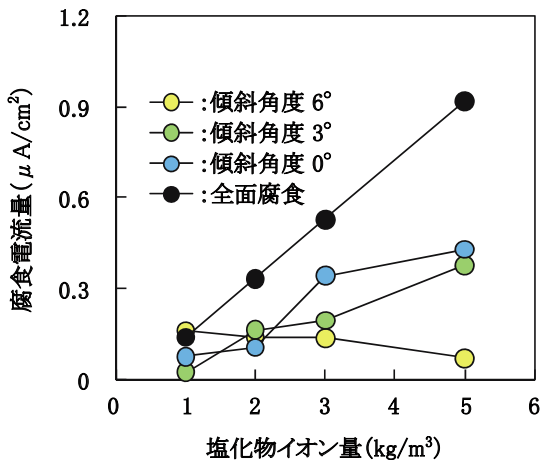


図12 部分断面補修後の腐食電流（補修幅 200mm）

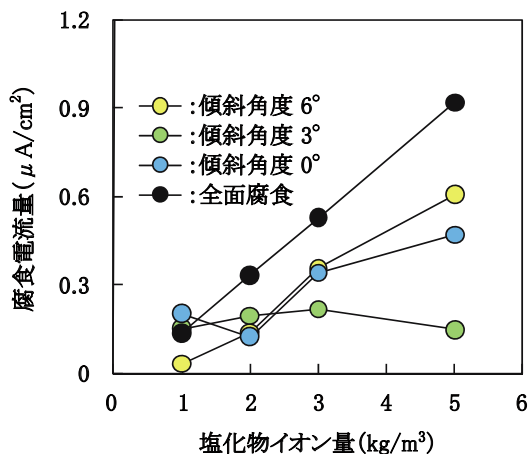


図13 部分断面補修後の腐食電流（補修幅 250mm）

3.4 試験結果と再劣化のメカニズム

塩化物イオン量を1, 2, 3もしくは5kg/m³添加した各コンクリートに、大きく傾斜（傾斜角度6°）、少し傾斜（傾斜角度3°）、水平（傾斜角度0°）に設置した分割鉄筋を入れた供試体を用いて、部分断面補修前後の鉄筋間を流れる腐食電流を測定して、補修前の部分的な劣化と補修後に生じる再劣化に及ぼすマクロセル腐食の影響を調査した。試験結果とこれから考察される再劣化のメカニズムは、以下のとおりである。

- (1) 部分断面補修前、鉄筋が大きく傾斜し、かぶり小さくなって中性化域となる箇所では、非中性化域との間でマクロセル腐食が生じ、腐食速度は通常の全面腐食（マイクロセル腐食）の最大で1.5倍になることがわかった。このマクロセル腐食電流量は、塩化物イオン量が多いほど大きくなる傾向にあった。
- (2) 部分断面補修後、補修境界から非補修部側に80mm程度の範囲でマクロセル腐食による再劣化が生じ、腐食速度は通常の全面腐食（マイクロセル腐食）の最大で2倍程度になることがわかった。この腐食電流量は、塩化物イオン量が多いほど大きくなる傾向であった。
- (3) 再劣化は、①腐食が生じてコンクリートがはく離・はく落を生じた箇所の鉄筋を部分断面補修すると、この箇所がカソード部となり、補修界面近傍の未補修箇所がアノード部（腐食部）になって、マクロセル腐食が生じる、②補修界面近傍で、マイクロセル腐食の影響で鉄筋の腐食速度が全面腐食（マイクロセル腐食）の最大2倍程度になり、腐食が促進する、③鉄筋が腐食により生成した錆は、体積膨張となるため、経年により錆が累積すると補修界面から未補修側に80mm程度の箇所ではく離・はく落（再劣化）を生じるというメカニズムにより進行すると考えられる。

4. 効率的な部分断面補修の施工

4.1 補修範囲

部分断面補修を実施すると、その周囲の未補修箇所側にマクロセル腐食が生じる。マクロセル腐食が生じると、腐食速度が最大で全面腐食の2倍程度になり、経年により錆が累積し、はく離・はく落（再劣化）を生じることがわかった。

そこで、部分断面補修後に再劣化を生じるまでの期間を算定するため、部分断面補修後の周辺の腐食速度が補修前の2倍になると仮定して、図14に示す3ケースについて、部分断面補修後の補修箇所周辺の供用年数と鉄筋の平均腐食減量率の関係を求めた。

コンクリートがはく離している箇所の鉄筋の腐食状態は通常、面錆ないし一部断面欠損状態となっている。図

特集：材料技術

14の左側でコンクリートのはく離が生じていると想定して、部分断面補修前の鉄筋の腐食状態を左側から面錆状態、点錆状態、腐食なし状態と想定した。劣化予測の算出条件は表2を用いた。算出した部分断面補修後の補修箇所周辺の供用年数と鉄筋の平均腐食減量率の関係は図15に示すとおりで、部分断面補修箇所近傍がケース1(面錆状態)では、補修後に鉄筋腐食が進行して、短い時間でコンクリートのはく離が生じると推定されるが、ケース2(点錆状態)、ケース3(腐食なし)になるにつれてはく離に達する時期が長くなることが推測される。

したがって、部分断面補修後に、補修部周辺の再劣化を抑制するためには、補修箇所と未補修箇所の境界部を腐食度Ⅱ(点錆)以下にする必要があると考える。

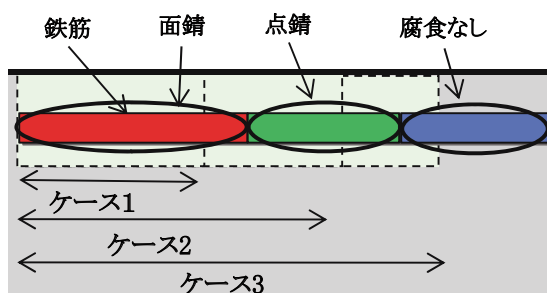


図14 鉄筋の腐食状態と部分断面補修範囲

表2 劣化予測の算出条件

補修時の腐食量 ⁴⁾ : 腐食なし0%, 点錆0.4%, 面錆1.5%
コンクリートのはく離する質量減少率 ⁵⁾ : 2% (鉄筋径D16, かぶり20mm)
補修箇所周辺の鉄筋腐食速度(補修後): 2倍

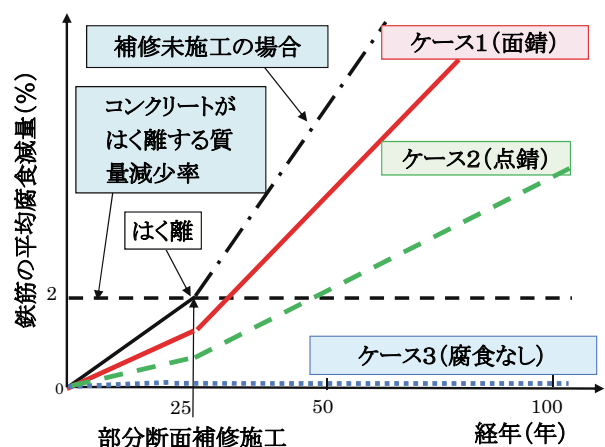


図15 経年と鉄筋の平均腐食減量の関係

4.2 施工にあたっての留意点

部分断面補修後、補修境界部の未補修側の再劣化は、マクロセル腐食によるもので、腐食速度は通常の腐食と比較して最大で2倍になるが、補修時に補修境界部の腐食状態を点錆以下に抑えることで、はく離、はく落までの時期を長くすることが可能である。したがって、施工にあたっての留意点は、補修境界部および未補修側の腐食速度を抑えることである。なお、部分断面補修後の補

修部周辺に生じるマクロセル腐食以外でも、補修界面に欠陥部があると、水、酸素が供給され、鉄筋の腐食が著しく速くなることが考えられる。特に、コンクリート中の塩化物イオン量が高い箇所については留意する必要がある。

5. 結論

コンクリート構造物の劣化対策の一つとして、部分断面補修が用いられている。近年、この箇所の周辺で鉄筋腐食による早期劣化が認められ、その劣化対策が求められている。そこで、コンクリート構造物の現地調査および供試体試験から、部分断面補修箇所周辺の鉄筋腐食による再劣化のメカニズムを明らかにした。

その結果、部分断面補修の施工前の部分的な劣化は、鉄筋が大きく傾斜し、かぶりが小さくなって中性化域となる箇所で生じており、その要因として非中性化域との間で生じるマクロセル腐食があり、その腐食速度は通常の全面腐食(マイクロセル腐食)の最大で1.5倍程度になることがわかった。また、部分断面補修後の再劣化は、補修境界から非補修部側に80mm程度の範囲で生じるマクロセル腐食によるもので、腐食速度は通常の全面腐食の最大で2倍程度になることがわかった。この腐食電流量は、塩化物イオン量が多いほど大きくなる傾向であった。

部分断面補修の効率的な施工として、補修部周辺の再劣化を抑制するためには、補修箇所と未補修箇所の境界部の鉄筋を点錆状態以下にする必要があり、境界部の鉄筋が面錆状態で部分断面補修を実施すると、マクロセル腐食により腐食が進行して、コンクリートのはく離、はく落を生じる可能性があると考ええる。また、補修界面に欠陥部があると、水、酸素が供給され、鉄筋の腐食が著しく速くなる。特に、コンクリート中の塩化物イオン量が高い箇所については留意する必要がある。

文献

- 1) 岸谷他：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「中性化」、技報堂出版、1986
- 2) 長滝重義, 大槻信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリートの断面補修部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544, V -35号, pp.109-119, 1996
- 3) 飯島亨, 工藤輝大, 玉井謙: コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす気温の影響, 鉄道総研報告, 第23巻6号, pp.11-16, 2009
- 4) 升田他: 鉄筋腐食度評価式の検討, 日本建築学会大会学術講演集A, pp.1051-1052, 1992
- 5) 鉄道構造物維持管理標準・同解説(構造物編), コンクリート構造物, 2007