

論文 塩害劣化した鉄筋コンクリート梁の補修後の曲げ耐力

花岡 大伸^{*1}・宮里 心一^{*2}・羽瀨 貴士^{*3}・網野 貴彦^{*4}

要旨: 塩害劣化した鉄筋コンクリート梁に対して補修（工法の種類と補修時期がパラメータ）を施し、補修後における鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力を評価した。その結果、予防保全的な表面被覆は、厳しい塩害環境下においても補修後の鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力が低下しないことが確認された。一方、補修時期が遅くなるのに伴い、補修後の曲げ耐力が低下し部材耐力の観点からも補修効果の低下が懸念された。したがって、本研究の成果に基づけば、鉄筋コンクリート構造物の合理的な維持管理を行うためには、予防保全的な補修が有効である。

キーワード: 鉄筋コンクリート梁、塩害、曲げ耐力、補修、補修時期

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物をより長くかつ安全に供用するためには、適切な維持管理が重要である。例えば港湾施設の実態調査では、15～20年間に亘り、供用された構造物において、内部鉄筋の腐食が報告されている¹⁾。ここで、鉄筋コンクリート部材は、鉄筋とコンクリートが一体となって外力に抵抗する構造体である。そのため、鉄筋腐食に伴う部材の力学性能に関する研究^{例えば 2)}が数多く行われている。また、対策を施すため、補修方法に関する研究^{例えば 3)}も数多く行われている。ただし、これらの研究では、塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材に対する補修効果を、塩化物イオンの浸透抑制効果、内部鉄筋の電気化学的特性、あるいは再劣化のメカニズムなどについて検討したにすぎない。一方、補修効果を構造部材の力学性能と関連付けた研究事例^{4),5)}は少ない。したがって、補修後における部材の力学性能を定量的に評価することが必要である。

以上の背景から本研究では、塩害劣化した鉄筋コンクリート梁に対して補修（工法の種類と補修時期がパラメータ）を施し、さらに塩化物環境下に暴露された後における鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力を評価する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

粗骨材の影響を無視した基礎的研究と位置付け、本研究では試験の容易なモルタル供試体を用いた。モルタルの使用材料を表-1に示す。また、モルタルの配合および諸性質を表-2に示す。

2.2 供試体概要

既往の研究⁶⁾によれば、鉄筋が腐食したコンクリート

表-1 使用材料

	種類	主な性質
セメント	OPC	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3270cm ² /g
水	水道水	—
細骨材	陸砂	密度: 2.59g/cm ³ F.M.: 2.58 吸水率: 2.83%
鉄筋	SD295A D6	降伏点: 331N/mm ² 引張強さ: 550N/mm ²

表-2 モルタルの配合および諸性質

W/C	S/C	フロー値	Air	圧縮強度
0.6	2.5	170	2.5%	42.2N/mm ²

梁の曲げ耐力の低下には、フックによる定着の影響が大きいことが明らかとなっている。したがって、腐食に伴う鉄筋とモルタルの定着の影響を無視できるように、全ての供試体の内部鉄筋には、両端部で90°フックを設け、定着部はゴムテープにて被覆した。また、鉄筋の断面減少と部材耐力の低下傾向を顕著にみるため、釣合鉄筋比5.8%に対して鉄筋比を0.36%とした。さらに供試体は、局部腐食が生じるような「ひび割れ供試体」、および全面腐食が生じるような「かぶり不足供試体」の2種類を用いた。供試体の概要を図-1に示す。

ここで、ひび割れ供試体では、中央部に厚さ0.1mmのステンレス板を鉄筋に接するように配置し、打設した。ただし、初期養生後に、3点曲げ載荷を行いながら、ステンレス板を引き抜くことにより、開口幅0.1mmの人工ひび割れとした。一方、かぶり不足供試体では、鉄筋のかぶりを5mmとし、ひび割れの導入は行わないものとした。なお、両供試体には2・3(1)にて後述する促進暴露

*1 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻 博士後期課程 修(工) (正会員)

*2 金沢工業大学 環境・建築学部 博(工) (正会員)

*3 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 博(工) (正会員)

*4 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 修(工) (正会員)

に用いるチタンメッシュを、上面から 10mm 位置に埋設した。

2.3 暴露方法

(1) 補修前の暴露方法

脱型後すべての供試体は、水中環境下 (20℃) において初期養生を 28 日間行った。その後、補修前の塩害劣化を促進させるため、通电により塩化物イオンの浸透を促進した。すなわち、図-2 に示すとおり、NaCl 水溶液中の塩化物イオン (Cl⁻) は、陰イオンであるため、陽極側に強制的に引き寄せられる。また、この方法では鉄筋外部に電極を設けて直流電流を流すため、鉄筋自身の分極程度は少ないと考えられ、電食とは異なり実構造物における塩害と同様な腐食が生じていると思われる。

また、通电期間を変化させることにより、補修前の劣化程度に相違を設けた。すなわち、ひび割れ供試体では、劣化グレード (小) の場合「通电時間 0.5 日間」、また劣化グレード (中) の場合「通电時間 7 日間」、さらに劣化グレード (大) の場合「通电時間 14 日間」とし、補修前の劣化促進暴露を行った。一方、かぶり不足供試体では、劣化グレード (小) の場合「通电時間 1 日間」、また劣化グレード (大) の場合「通电時間 14 日間」とし、補修前の劣化促進暴露を行った。

(2) 補修後の暴露方法

各種補修を施した供試体に対して、補修後の劣化を促進させるため、50℃の環境下において塩害促進暴露を 120 日間、180 日間および 545 日間行った。ここでの塩害促進暴露とは、3%の塩水浸漬 (50℃) 1 日 + 乾燥 (50℃) 2.5 日を 1 サイクルとした乾湿繰り返しを行うことである。また、比較用として補修を施さない供試体も同様に暴露した。

2.4 補修方法

代表的な補修方法として、ひび割れ注入、表面被覆、および断面修復を選定した。

(1) ひび割れ注入

注入材にはひび割れ追従性に優れたビスフェノールを主成分とする柔軟型エポキシ樹脂を用い、図-3 に示す手順に従い補修した。すなわち、まず供試体底面の人工ひび割れの位置に 2 つの座金を設置し、側面の人工ひび割れ表面は注入材が漏れないよう被覆した。その後、注入材を注射器でゴム袋に挿入した。最後に、ゴム袋を座金に取り付け、ゴムの復元力によりひび割れ深部にまで樹脂を注入した。

(2) 表面被覆

打設面以外の 5 面について表面を紙ヤスリで磨いた後、プライマー塗布 (エポキシ樹脂)、パテを用いた下地調整 (エポキシ樹脂)、およびポリブタジエンゴム系の樹脂による中塗りを行った。なお、ひび割れ注入と表面被

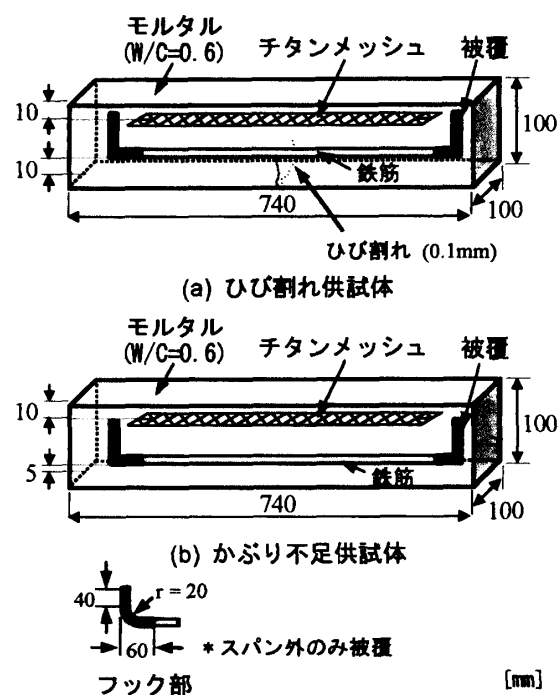


図-1 供試体概要

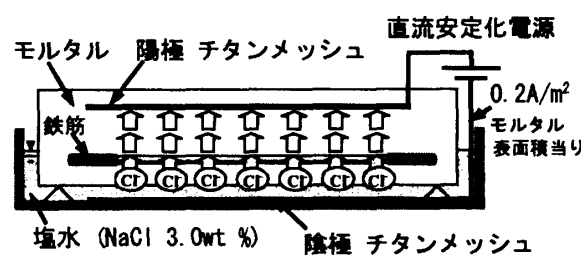


図-2 補修前の塩害促進暴露

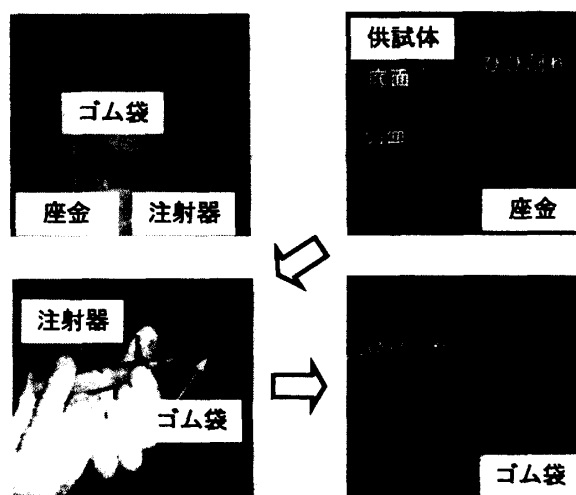


図-3 ひび割れ注入の補修手順

覆で用いたエポキシ樹脂は異なる。中塗りは、1 層の膜厚が 160 μm の被覆を 3 層実施した。また、本研究では屋内暴露としたため、表面被覆材を紫外線から守るための上塗りは行わなかった。

(3) 断面修復

モルタルをコンクリートドリルによりはつた。対象

範囲は、供試体の中央部の幅が 250mm、深さが鉄筋の裏側 10mm までとした。その後、防錆剤を使用せずに、ワイヤブラシおよび紙ヤスリのみを用いて鉄筋の錆を落とした。また、補修材の打継ぎは、はつり面にプライマーを塗布した後、ポリマーセメントモルタルを用いて行った。

2.5 実験ケース

実験ケースを表-3 に示す。現場における補修実績を踏まえ、劣化程度と補修方法を組み合わせた。すなわち、ひび割れ注入は、ひび割れ供試体の劣化グレード（小）および劣化グレード（中）の供試体に対して行った。また表面被覆は、ひび割れ供試体の劣化グレード（小）および劣化グレード（中）、さらにかぶり不足供試体の劣化グレード（小）および劣化グレード（大）の供試体に対して行った。さらに断面修復は、ひび割れ供試体の劣化グレード（中）および劣化グレード（大）、さらにかぶり不足供試体の劣化グレード（大）の供試体に対して行った。

表-3 実験ケース

劣化グレード	補修工法	ひび割れ注入	表面被覆	断面修復
劣化グレード 小		●	●○	—
劣化グレード 中		●	●	●
劣化グレード 大		—	○	●○

●：ひび割れ供試体、○：かぶり不足供試体

2.6 測定項目

(1) 塩化物イオン含有量

暴露後の供試体から試料を採取し、十分に乾燥させた後、粉砕機にて細かく粉砕した。ここで試料の採取箇所は、図-4 に示すようにひび割れ供試体ではひび割れ部における鉄筋位置（ひび割れ部から左右 5mm の範囲）、およびひび割れの影響を受けない健全部（モルタル表面から深さ 30mm の範囲を 5mm ピッチで採取）とした。なお、補修後の供試体においては、ひび割れ部近傍部の試料を採取した。一方、かぶり不足供試体では任意の箇所（モルタル表面から深さ 15mm の範囲を 5mm ピッチで採取）とした。この試料を蒸留水に浸漬させ、50℃の恒温槽にて 24 時間保存し、その後室温が 20℃の環境下にて、水溶液の温度が 20℃になるまで保存した。この溶液中の塩化物イオン量を、イオン選択性電極を用いて測定した。

(2) 腐食減量率

暴露が終了した供試体から内部鉄筋を取り出した後、鉄筋表面の腐食生成物を除去し、腐食対象領域における腐食減量率を測定した。ここで鉄筋の除錆処理は、腐食後の凹凸面に対しても十分除錆が可能なワイヤブラシ

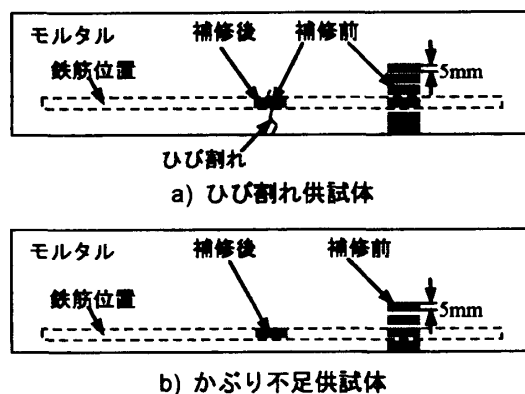


図-4 試料の採取位置

および紙ヤスリを用いて行った。またワイヤブラシは、目の細かなものを用いたため、健全な鉄筋部分が削れる影響は少ないものと考えられる。腐食減量率の算出方法を式(1)に示す。

$$W_{loss} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 W_{loss} : 腐食減量率 (%), M_1 : 腐食対象領域における暴露前（健全）の鉄筋の質量 (g) (健全時のノギス測定による直径 (mm) と鉄の密度 (7.86g/cm³) から質量(g)を算出した。), M_2 : 腐食生成物除去後の腐食対象領域における鉄筋の質量 (g)。

(3) 曲げ耐力

曲げ試験は、図-5 に示すとおり、支点間隔 600mm の 2 点単純支持の条件下で、載荷点間隔 150mm の対称 2 点載荷を行った。また、ロードセルおよび変位計を用いて載荷に伴う変形性状と破壊状況を確認した。さらに、各荷重段階におけるひび割れ発生状況も観察した。ただし、表面被覆を行ったものについては梁部材自身の力学的性能を評価するため、被覆材をはがした後に曲げ試験を実施した。

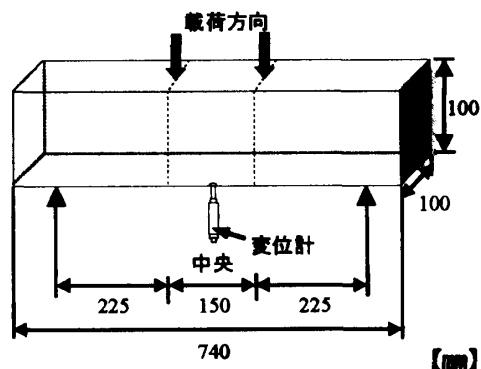
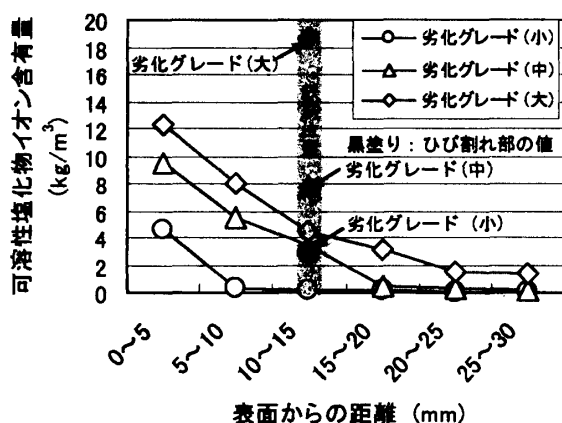


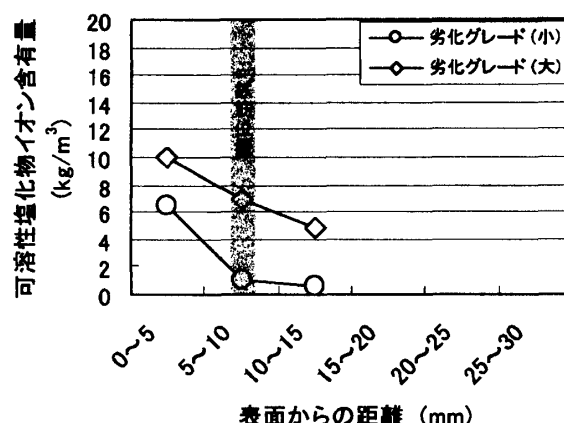
図-5 載荷方法

2.7 補修前の塩化物イオン含有量

補修前の塩化物イオン量の分布を図-6 に示す。ひび



a) ひび割れ供試体



b) かぶり不足供試体

図-6 補修前の塩化物イオン量の分布

割れ供試体をみると、劣化グレード(中)の場合、健全部における鉄筋位置の塩化物イオン量は、腐食発錆限界塩化物イオン量⁷⁾(1.2kg/m^3)以上である。また、いずれの劣化グレードにおいてもひび割れ部における鉄筋位置の塩化物イオン量は、この値を超えていることが認められる。同様にかぶり不足供試体では、劣化グレード(大)の場合に、鉄筋位置における塩化物イオン量は、この値以上であることが認められる。

3. 実験結果

3.1 補修後の劣化状況

(1) 供試体の外観調査

図-7 に暴露終了後における供試体の劣化状況の例を示す。これによると、供試体の種類に拘らず、無補修の場合は鉄筋軸方向に腐食ひび割れが発生している。ここで、ひび割れ供試体では供試体の中央部で錆汁の滲出が多くみられ、最大腐食ひび割れ幅が 1.2mm であった。ま

た、かぶり不足供試体では供試体全体に渡り平均 1.1mm 程度のひび割れが発生している。

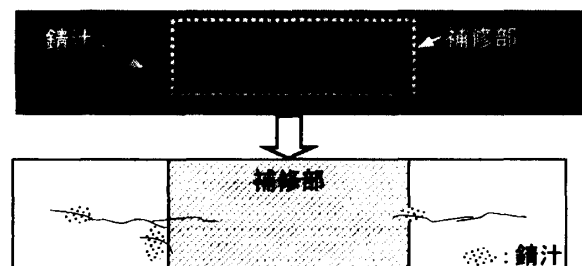
また、劣化グレード(大)のひび割れ供試体に対して断面修復により補修した場合は、打継目近傍において錆汁が滲出しており、特に母材側において 0.3mm 程度の腐食ひび割れが確認された。さらに錆汁の滲出がみられた箇所で、載荷に伴い鉄筋が破断した。これは母材側に多量の塩化物イオンが含まれていたため、打継目近傍でマクロセル腐食(局部腐食)が生じたためと考えられる⁹⁾。さらに、劣化グレード(大)のかぶり不足供試体に対して表面被覆により補修した場合、被覆材が変状し錆汁の滲出がみられ、平均 0.1mm 程度の腐食ひび割れも確認された。これは、コンクリート内部に既に塩化物イオンが存在していたため、表面被覆による補修後に再腐食を引き起こさせたものと考えられる⁹⁾。

(2) 補修後の塩化物イオン含有量

図-8 に暴露期間 120 日後における塩化物イオン量を



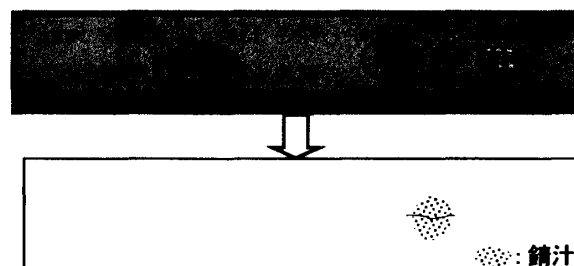
a) 無補修 (ひび割れ供試体)
(劣化グレード(大), 暴露期間 545 日)



d) 断面修復 (ひび割れ供試体)
(劣化グレード(大), 暴露期間 180 日)



b) 無補修 (かぶり不足供試体)
(劣化グレード(大), 暴露期間 545 日)



c) 表面被覆 (かぶり不足供試体)
(劣化グレード(大), 暴露期間 545 日)

* 載荷に伴い打継目近傍で鉄筋が破断

図-7 補修後の劣化状況の例

示す。これによると、補修後の塩化物イオン含有量は、補修工法の違いによって大きく異なることが認められる。本研究では、高水セメント比の供試体であったため、モルタル自体の物質透過性が高い。したがって、ひび割れ注入による補修では、健全部においても腐食要因物質が供給された。そのため、補修を施しても、ひび割れ部のみならず健全部において、塩化物イオンが浸入したと考えられる。また、表面被覆による補修では、供試体内部への腐食要因物質の供給が大幅に抑制された。しかしながら、図-6に示したとおり劣化グレード(中)(大)の場合では、補修前において既に多量の塩化物イオンが供試体内部にあったため、補修後においても高い値となっている。また、塩化物イオン量が補修前よりも増加しているのは、表面被覆による補修後に、かぶり表層部から再拡散したため¹²⁾と考えられる。さらに、断面修復による補修では、塩化物イオンを含むモルタルが除去されたため、補修部についての塩化物イオン含有量は著しく減少している。

3.2 梁の曲げ耐力

(1) 梁の力学特性

図-9に補修後の荷重-変位曲線の例を示す。a)によれば、劣化グレード(中)のひび割れ供試体に対して表面被覆により補修した場合、鉄筋の腐食減量率が補修前とほぼ同等であり、曲げ耐力も低下していないことが認められる。一方ひび割れ注入により補修した場合では健全時の約50%に、また断面修復により補修した場合では健全時の約75%に最大荷重が低下している。特にひび割れ注入の場合、鉄筋の腐食減量率が25.5%と著しく高く、曲げ耐力の低下も大きい。これは、3.1(2)に示したとおり、補修後においても腐食要因物質の供給が多量であったため、補修を行わなかった場合と同様に鉄筋の腐食が進行したためと考えられる。またb)によれば、劣化グレード(大)のかぶり不足供試体に対して表面被覆によ

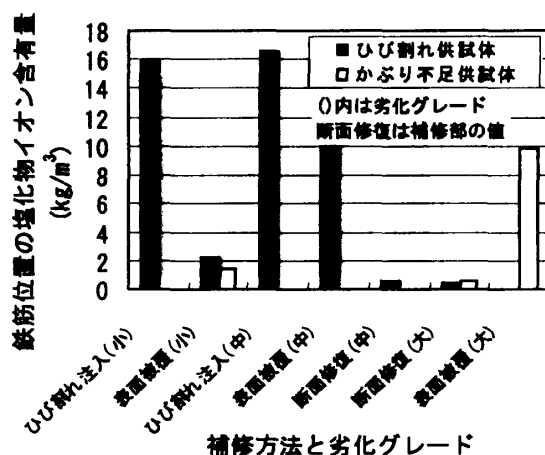
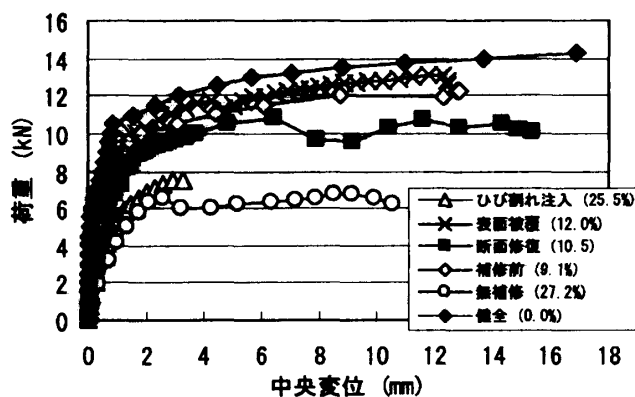


図-8 補修後における塩化物イオン含有量
(暴露期間 120 日)

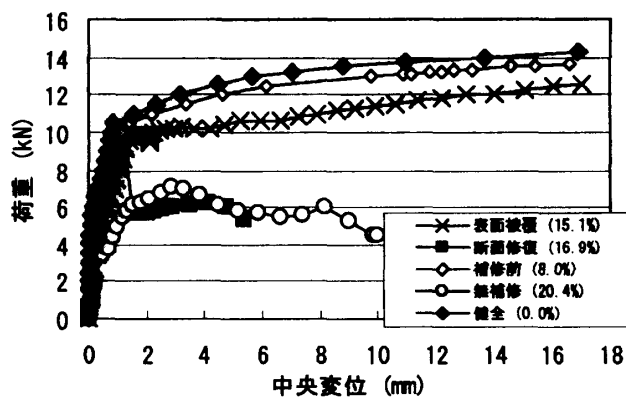
り補修した場合では健全時の約90%に、さらに断面修復により補修した場合では、健全時の約70%に曲げ耐力が低下していることが認められる。これらも、上記と同様に補修後に腐食が進行したためと考えられる。また、断面修復後に再劣化を引き起こしたものは、再劣化が生じた打継目からの破壊が認められた。

(2) 曲げ耐力の経時変化

図-10に補修後における最大荷重比(健全時に対する最大荷重の割合)の経時変化を示す。これによると、供試体種類に拘らず、劣化グレード(小)に対して表面被覆により補修した場合、暴露期間545日目においても健全時とほぼ同等な耐力を有している。一方、劣化グレード(小)に対してひび割れ注入により補修した場合、また劣化グレード(中)(大)に対して各方法で補修した場合、暴露期間の経過とともに耐力は低下することが認められる。また、補修前の劣化グレードが大きいほど、最大荷重の低下率は大きいことが認められる。すなわち、同じ補修方法を行う場合でも、補修時期が遅いほど補修効果は低下すると考えられる。



a) ひび割れ供試体 (劣化グレード: 中)



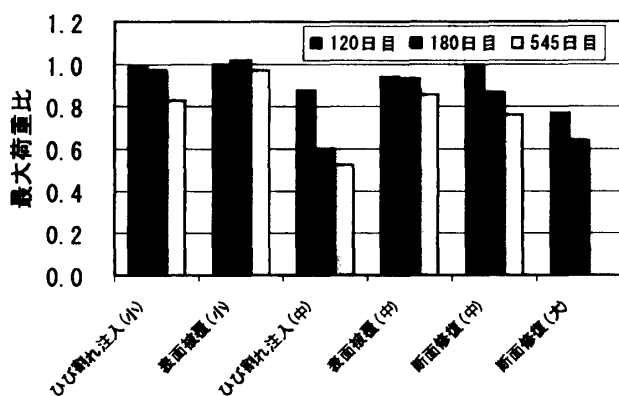
b) かぶり不足供試体 (劣化グレード: 大)

図-9 荷重-変位曲線の例

(暴露期間 545 日)

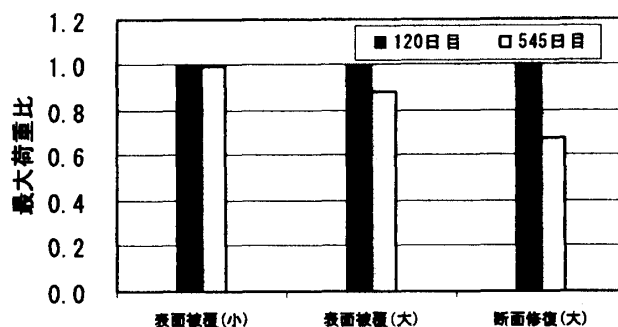
○内の数値は腐食減量率

断面修復を行ったものは打継目における腐食減量とした。



補修工法と劣化グレード

a) ひび割れ供試体



補修工法と劣化グレード

b) かぶり不足供試体

○内は劣化グレード

図-10 最大荷重比の経時変化

(3) 腐食減量率と曲げ耐力の関係

図-11 に全ての実験データにおける鉄筋の腐食減量率と最大荷重比の関係を示す。これによると、供試体種類および補修の有無に拘らず、腐食減量率の増加に伴い最大荷重は低下することが認められる。したがって、補修を考慮していない場合と同様¹⁰⁾に、補修後の梁の曲げ耐力も鉄筋の腐食量を考慮することで評価できると考えられる。

4. まとめ

塩害により劣化した鉄筋コンクリート梁の補修後の曲げ耐力に関する基礎的所見を得るため、補修工法および補修時期を変化させたモルタル梁供試体を用いて、補修後に塩化物環境下に暴露した後の曲げ耐力を評価した。主な知見を下記に示す。

- (1) 鉄筋位置の塩化物イオン量が少ない場合、表面被覆による補修は、厳しい塩害環境下においても補修後に鉄筋が腐食することなく、梁の曲げ耐力も低下しない。
- (2) 補修工法に拘らず補修前に多量の塩化物イオン量がコンクリート中に存在する場合、補修後に再劣化が生じ、補修効果は期待できない場合もある。
- (3) 上記(1), (2)を踏まえ、鉄筋位置の塩化物イオン量が多くなる以前に対策を講じる予防保全的な補修が、梁の曲げ耐力を考慮した場合にも有効である。

参考文献

- 1) 大即信明, 鈴木慎也: 耐久性に優れたコンクリート構造物-港湾構造物-, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.29-39, 1986.8
- 2) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造的な性能, コンクリート技術シリーズ71, 2006.8
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告, 1996.10

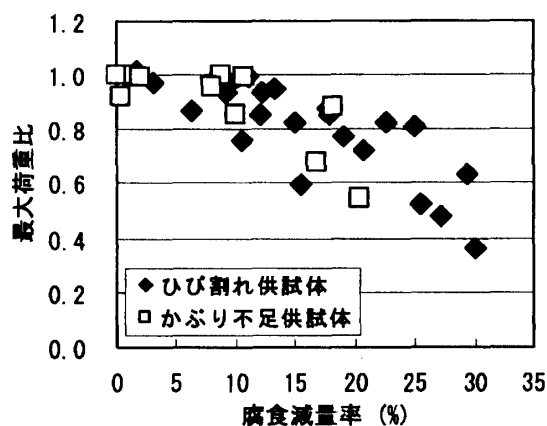


図-11 腐食減量率と最大荷重比の関係

- 4) 加藤絵万ほか: 表面被覆を施した RC 部材の長期耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1759-1764, 2004
- 5) 花岡大伸ほか: 塩害により劣化した鉄筋コンクリート梁に対する補修後の力学性能評価, 第6回コンクリート構造物の補修・補強アップグレードシンポジウム論文報告集, pp.243-250, 2006.10
- 6) 李翰承ほか: 鉄筋腐食が RC 単鉄筋梁の耐力性能低下に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.732-737, 1995
- 7) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書施工編, p.24, 2002.3
- 8) 長瀧重義ほか: 断面修復部における打継目の物質透過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.31-42, 1997.11
- 9) 守分敦郎ほか: 塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討, 土木学会論文集, No.534/VI-30, pp.109-123, 1996.8
- 10) 花岡大伸ほか: 鉄筋コンクリート梁の腐食形態と腐食量が曲げ性状に及ぼす影響, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp.300-312, 2007.6