

論文 補修 RC 梁中の残留塩分と鋼材腐食に関する検討

北野 勇一^{*1}・渡辺 博志^{*2}・久田 真^{*3}・北山 良^{*4}

要旨：これまでにモルタル系補修材を打ち継いだ RC 梁供試体を作製して実験的な検討を行い、種々の断面修復方法の補修効果について明らかにしてきた。一方、コンクリート系補修材を適用するケースや施工要因の影響および実構造物での検証がなされてなかった。そこで、本研究では、新たに実験的な検討を行うとともに、これまでの試験結果や実橋調査データとを比較検討した。その結果、補修 RC 梁中の残留塩分と鋼材腐食の間には、環境条件により腐食の進行度が異なるものの、ある一定の関係があること、補修材の種類やかぶり厚さおよび防錆剤の使用の組み合わせにより補修効果が異なることなどを示した。

キーワード：補修 RC 梁, 残留塩分, 鋼材腐食, マクロセル腐食

1. はじめに

筆者らは、種々の断面修復方法の補修効果について実験的な検討を進めてきた^{1),2)}。これまでの検討により、PC橋で使用される強度のコンクリートに施工欠陥が生じないようにモルタル系補修材を打ち継いだ供試体に関し、1) マクロセル形成に起因する鋼材腐食の占める割合は母材部の残留塩分が少ないと相対的に大きく、残留塩分が多くなるとその割合が相対的に小さくなる、2)補修材の中には補修部に配置されている鋼材の腐食を助長させる材料がある、3)暴露試験は促進試験と比べマクロセル電流の強さは最大 1/4 であることなどを明らかにしてきた。

一方、これらの結論は、コンクリート系補修材で検討されていないこと、かぶりの大小や防錆剤の塗布などの施工要因に言及していないこと、および補修工事へのフィードバック手法が不明確であることが研究課題として残された。

したがって、本研究では、上記の課題を解明するため、新たに実験的な検討を行うとともに、これまでの試験結果や実橋調査データとを比較検討した。

2. 検討方法

2.1 検討概要

これまでの実験では、黒皮付きの異形鉄筋 D13 を用いて供試体を作製し、促進試験（シリーズ I）と暴露試験（シリーズ II）を実施している。この内、シリーズ II は 2 年弱(710 日)で試験を終了し、供試体を解体して腐食状況を確認した。

新たな実験（シリーズ III）では、質量減少率が少ない範囲の測定精度を向上させるため、みがき棒鋼 $\phi 13\text{mm}$ に変更し、2.2 節に示す要領に従い、シリーズ I と同様の促進試験を行った。

実橋調査データは、既往文献^{3),4)}を引用した。調査対象は撤去された PC 橋であり、A 橋は橋長 144m の 5 径間ポストテンション方式 PC 単純桁橋で、撤去時の供用年数は 34 年、初回補修が供用 16 年目に実施されていた。B 橋は支間長 8.75m のプレテンション方式 PC 単純桁橋であり、初回補修は供用 13 年、撤去が 26 年目であった。両橋とも、日本海沿いの海岸に近接して架設され、A 橋は 100mdd を超す飛来塩分が観測され、B 橋は冬季の悪天候時には海からの波が直接桁下面にかかる状況にあったと報告されている。

*1 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム交流研究員 (正会員)

*2 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主席研究員 工修 (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教授 工博 (正会員)

*4 (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 (正会員)

2.2 シリーズⅢの試験方法

(1) 使用材料

母材部には設計基準強度 40N/mm²相当のコンクリートとして、W/C=40%(C=408kg/m³)の配合とした。補修部には、モルタル系補修材として、ポリマーセメントモルタル(PCM)、セメントモルタル(CM)、軽量ポリマーセメントモルタル(LPCM)を市販品より選定した。また、コンクリート系補修材として、文献5)を参考にW/C=40%(C=438kg/m³)かつW/P=30.3%の高流動コンクリート(高流動)を使用した。物性値を表-1に示す。なお、これらの材料に導入する塩分(内在Cl⁻)は、所定の塩化物イオン量になるよう原子量に依じて58.5/35.5倍のNaClを練混ぜ時に添加した。

(2) 供試体

供試体は、図-1に示すように母材部の長手方向に補修部を打ち継いだ100×100×400mmの形状を基本とし、長さ170mmの鉄筋を所定のかぶりとなるよう母材と補修部に分割して配置した。この分割鉄筋は、供試体の外部でリード線を接続して1本の鉄筋となるようにした。

表-2に示す実験パラメータのうち、内在Cl⁻量は1.8kg/m³を基準に0.5～5倍の範囲で設定した。また、かぶり厚さはPC橋の最小かぶり25mmに加え、モルタル系補修材は10mmの場合も作製した。なお、防錆剤は内在Cl⁻に応じた使用量をメーカー指定の方法にて塗布した。

(3) 促進条件及び測定要領

作製した供試体は、約1.5ヶ月の湿空養生後、JCI-SC3の乾湿繰返し法(3日間の湿潤期間(温度65℃±3℃、湿度90～95%)と4日間の乾燥期間(温度13℃±2℃、湿度60%以下)を組み合わせて1サイクルとして計20サイクル)を実施した。

試験中は、文献1)に従い、ひび割れ観察、自然電位、分極抵抗およびマクロセル電流を測定した。また、試験後に鉄筋を取り出し、JCI-SC1を参考に、腐食面積率と質量減少率を確認した。

表-1 使用材料の物性値

部 位	材料名	圧縮強度* (N/mm ²)	比抵抗** (Ωm)	備 考
母 材	コンクリート	62.1	113	配合 40-8-20H
補 修	PCM	40.0	161	粉体ポリマー使用
	CM	59.1	332	ポリマー無し
	LPCM	26.4	671	液体ポリマー使用
	高流動	65.8	178	配合 40-600-13H

*湿空養生28日 **湿空養生91日(JIS A 1132の圧縮強度用供試体より、φ100×50mmを3個切り出し、LCRメータで測定した。比抵抗は測定周波数1kHzの結果とした。)

表-2 実験パラメータ

項 目	パラメータ
内在Cl ⁻ 量	母材部: 0.0, 0.9, 1.8, 3.0, 4.5, 9.0 補修部: 1.8, 0.0 (単位: kg/m ³)
補修材の種類	PCM, CM, LPCM, 高流動, なし
かぶり厚さ	10mm, 25mm
防錆剤の塗布	未塗布, 補修鉄筋, 母材表面

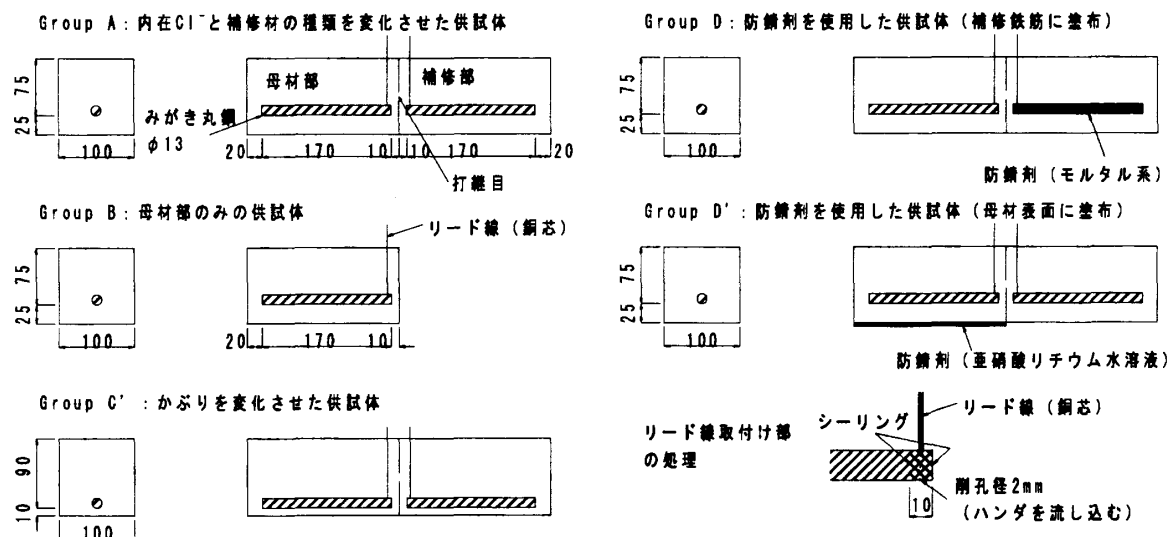


図-1 供試体の形状寸法

3. 残留塩分と鋼材腐食に関する実験検討

3.1 シリーズⅢの試験結果

腐食状況の結果を表-3に示す。

母材部に内在 Cl^- を導入した供試体に着目すると、質量減少率が最大で0.24%であり、腐食が確認されたいずれの供試体も軽微な表面錆が打継目から50mmの範囲に集中して生じていた。また、腐食に伴うひび割れは、No.21 供試体を除き、生じることがなかった。このNo.21 供試体の質量減少率は0.16%とシリーズⅠで確認されたひび割れ発生の下限值0.3%を下回っているが、腐食が狭い範囲に集中して生じていたなどの要因により偶発的に生じたものと考えられる。

一方、補修部に内在 Cl^- を導入した供試体では、補修材LPCMを用いた全ての供試体において、補修部中の鋼材腐食が確認された。

3.2 シリーズⅠ・Ⅲの促進試験結果の整理

シリーズⅠの結果より、母材部に1.8~13.5kg/ m^3 の内在 Cl^- 量(CL)を含む場合、母材部鉄筋の質量減少率(WL)との間に式(1)の関係がある¹⁾。

$$WL(\%) = 0.03 \cdot CL^{1.72} \quad (1)$$

一方、内在 Cl^- 量を1.8kg/ m^3 以下としても、質量減少率がかえって大きくなるケースがあった。この原因はマクロセル形成の影響であり、残留塩分を完全に除去しても、腐食反応を完全には停止できない場合があることを示している。したがって、表-3中の質量減少率が1.8kg/ m^3 以下で最大となる値を用い、式(2)~(3)のように質量減少率の下限値を設定した。

モルタル系補修材を使用する場合：

$$WL = 0.10\%(CL \leq 2.0\text{kg}/\text{m}^3) \quad (2)$$

コンクリート系補修材を使用する場合：

$$WL = 0.04\%(CL \leq 1.2\text{kg}/\text{m}^3) \quad (3)$$

上記(1)~(3)の提案式とこれまでの試験結果を対比すると、シリーズⅢの内在 Cl^- 量1.8kg/ m^3 を超える範囲については提案式により与えられる値より小さくなった(図-2)。その理由として、

鋼材の前処理が影響している可能性もあるが、腐食ひび割れが生じない供試体では腐食速度が抑制されていたものとする。

表-3 腐食状況の結果

No.	グループ	内在 Cl^- 量 (kg/ m^3)	補修材 の種類	腐食面積率(%)		質量減少率(%)	
				母材	補修	母材	補修
1	Group A	母1.8補1.8	PCM			0.06	0.03
2			CM	1.54		0.06	0.01
3			LPCM		4.26	0.04	0.03
4		母0.0補1.8	PCM			0.04	0.05
5			CM			0.03	0.01
6			LPCM		3.90	0.05	0.10
7		母0.9補0.0	PCM			0.04	0.03
8			CM			0.03	0.00
9			LPCM		0.04	0.01	0.00
10		母1.8補0.0	PCM			0.03	0.01
11			CM			0.04	0.02
12			LPCM			0.03	0.02
13		母3.0補0.0	PCM			0.06	0.04
14			CM	0.04		0.05	0.02
15			LPCM		0.22	0.07	0.06
16		母4.5補0.0	PCM	6.18		0.16	0.03
17			CM			0.10	0.02
18			LPCM	1.69		0.04	-
19		母9.0補0.0	PCM	6.62		0.24	0.04
20			CM	2.21		0.17	0.03
21			LPCM	11.76		0.16	0.04
22		母1.8補1.8	高流動			0.04	-
23		母0.0補1.8				0.02	0.02
24		母0.9補0.0			0.04	0.01	0.04
25		母1.8補0.0				0.02	0.03
26		母3.0補0.0				0.04	0.01
27		母4.5補0.0		1.32		0.07	0.02
28		母9.0補0.0		2.21		0.19	0.03
29	Group C	母1.8補1.8	PCM			0.06	0.02
30			CM	0.92	0.66	0.03	-0.02
31		母0.0補1.8	PCM		2.21	0.01	0.05
32			CM			0.01	-
33		母1.8補0.0	PCM			0.03	-
34			CM			0.03	0.04
35	Group D	母4.5補0.0	PCM	19.85		0.15	0.02
36			CM	2.54		0.10	0.01
37		母1.8補1.8	PCM			0.06	0.02
38			CM			0.04	-
39		母0.0補1.8	PCM			0.05	0.01
40			CM			0.04	0.01
41	Group D'	母1.8補0.0	PCM			0.03	0.02
42			CM			0.15	-
43		母4.5補0.0	PCM	2.87		0.12	-
44			CM	0.44		0.10	-
45	Group D'	母1.8補0.0	PCM			0.04	0.03
47		母4.5補0.0		1.84		0.16	0.02
49		母9.0補0.0		3.86		0.24	0.02
46	Group B	母1.8	無	0.55	無	0.07	無
48		母4.5	無	無	無	0.15	無
50		母9.0	無	2.94	無	0.23	無

注釈) - : 試験体採取時にキズがつき測定を行わなかった。

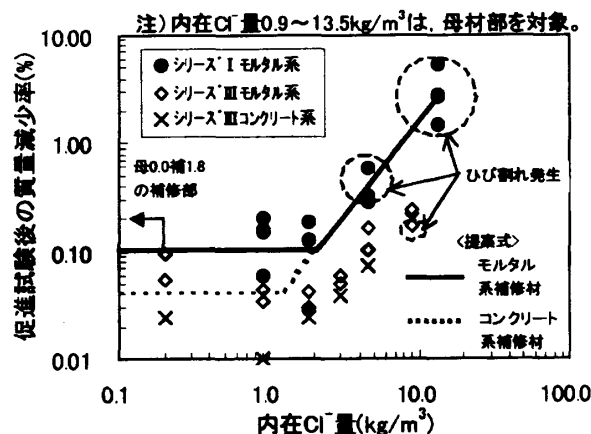


図-2 内在 Cl^- 量と質量減少率の関係

4. 施工要因と補修効果に関する実験検討

4.1 補修材種類の影響（シリーズⅢ）

内在 Cl^- 量と自然電位の関係を図-3に示す。ここで、自然電位の測定は湿潤期間中にリード線の接続を切り離した状態で行った。また、測定電位の温度補正は行っていない。

図-3より、内在 Cl^- 量が 3.0kg/m^3 を超えると、次第に母材部と補修部の間に電位差が生じ、母材部がアノードとなる傾向であった。

一方、それ以下の内在 Cl^- 量になる供試体では、補修材高流動の自然電位が母材・補修部とも貴な電位になるのに対し、モルタル系補修材では同程度あるいは卑な電位に移行した。特に、補修材LPCMでは、補修部に 1.8kg/m^3 の内在 Cl^- が存在する場合、母材・補修部間の電位差が生じ、補修部が -350mV より卑な電位となり、アノード化した。

4.2 かぶり厚さの影響（シリーズⅢ）

母材に近い比抵抗を有する補修材を用いた供試体ではマクロセル電流が高抵抗材料を用いた場合より大きい¹⁾。この際、かぶり厚さが異なると液抵抗(R_s)が変化するなどマクロセル形成が懸念される。そこで、マクロセル腐食反応を模擬した等価電気回路モデル⁶⁾を用いてマクロセル電流量を試算し、これと実験値を比較した。

試算は、打継目近傍の 150mm を対象とした解析モデルにおいて $R_p=20, 100, 500\text{k}\Omega\text{cm}^2$ とした3ケースの電流 I を算出し（図-4）、これより促進試験20サイクル中（湿潤期間60日分）の積算電荷量として求めた。ここで、 R_p は表-2中の

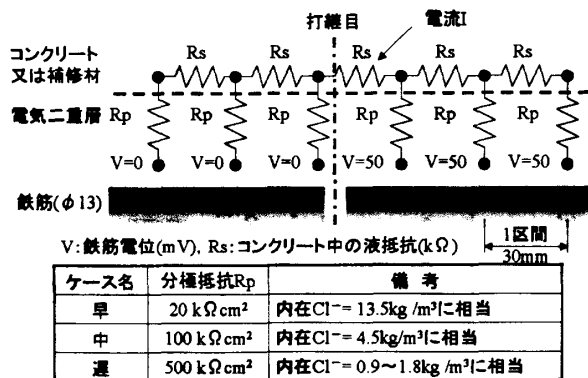


図-4 マクロセル電流の試算条件

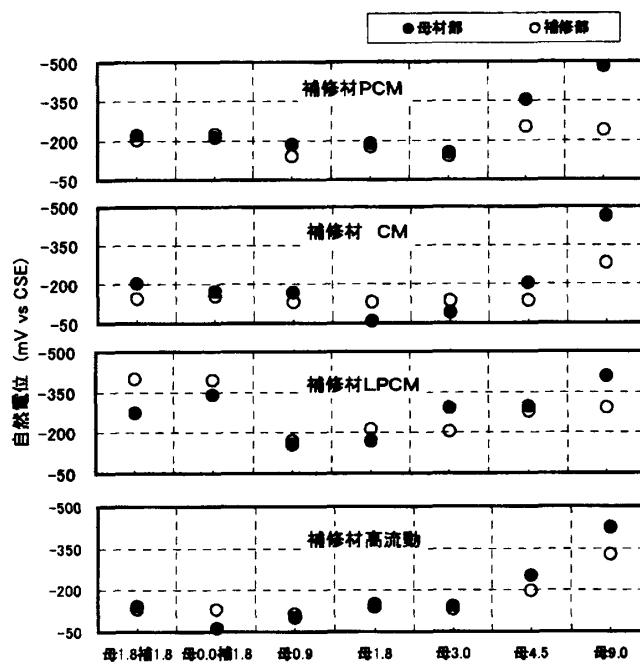


図-3 内在 Cl^- 量と自然電位の関係

内在 Cl^- 量を導入した各供試体で測定された値を目安に設定し、母材・補修部間の電位差を 50mV 、 R_s と R_p を便宜上どの位置も同値とした。

積算電荷量の試算結果と実測値の関係を図-5に示す。ここで、液抵抗 R_s は、母材部の比抵抗に区間長 30mm を乗じ、供試体全幅とかぶり厚さの2倍の面積で除した値とした。これより、試算値と実測値は、完全には一致しないものの、分極抵抗 $100\text{k}\Omega\text{cm}^2$ 程度以下の範囲に限れば、液抵抗 R_s の変化に伴う積算電荷量の変動が小さい試算結果の傾向と概ね一致した。

以上より、かぶり厚さが腐食反応に及ぼす影響は本検討の範囲では小さいものと判断される。

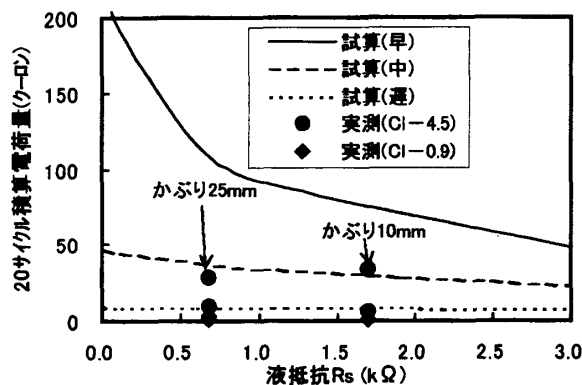


図-5 積算電荷量の試算結果と実測値の関係

4.3 防錆剤使用の影響（シリーズⅢ）

防錆剤の使用は鋼材の不働態の形成を促すなどの効果があることから、その影響の有無について分極抵抗値より検討した（図-6）。防錆剤を未使用とした場合に比べて補修鉄筋に塗布した場合（図-6 上）、内在 Cl^- 量 $1.8 \sim 3.0 \text{ kg/m}^3$ の範囲で分極抵抗が明らかに高い値を示した。また、母材表面に塗布した場合は未使用の場合の分極抵抗に近い値を示した（図-6 下）。

以上より、補修部に配置されている鉄筋への防錆剤の使用は、多量の塩分を残留させない範囲において、分極抵抗を高めることで腐食を抑制していると推察される。また、母材部の表面に塗布して短期間で腐食を抑制させるケースでは期待する防錆効果が得られない可能性がある。

5. 供試体試験と実橋調査との比較検討

5.1 環境条件が腐食の進行度に及ぼす影響

140日間の促進試験と710日間の暴露試験より得られた質量減少率の関係を図-7に示す。これより、両者はよい相関性を示しており、その比率は概ね1:1であった。したがって、今回の暴露試験に対する促進試験の促進倍率は5倍程度であると算定される。また、今回の暴露環境における腐食の進行度(WLy)は、促進試験の結果より得られた式(1)~(3)が暴露2年分に相当するものとする、式(4)として示すことができる。

$$WLy(\%/year) = 0.015 \cdot CL^{1.72} \quad (4)$$

ただし、モルタル系補修材で $WLy \geq 0.05\%/年$ 、コンクリート系補修材で $WLy \geq 0.02\%/年$ とする。

5.2 提案式の適用性に関する検討

実橋調査データと提案式の比較を図-8に示す。ここで、実橋調査データは、PC桁の下フランジ部より採取した鋼材1束の平均質量減少量とその周辺部（A橋のPC鋼材に対してはグラウト）の塩化物イオン量の調査結果である。一方、試算値は、解体調査による鋼材周辺の Cl^- 量をもとにして、式(4)（モルタル系補修材）により求めた。この際、鋼材周辺の Cl^- 量は、建設時は少

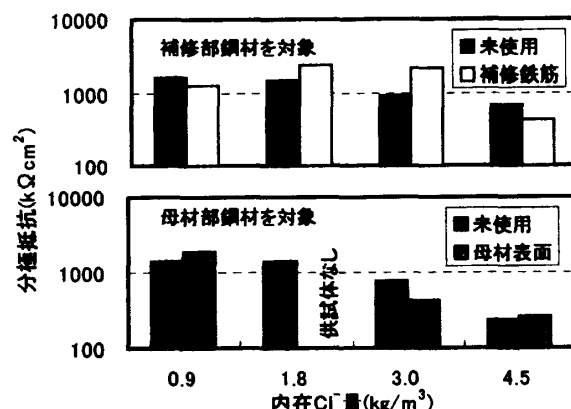


図-6 防錆剤使用と分極抵抗の関係

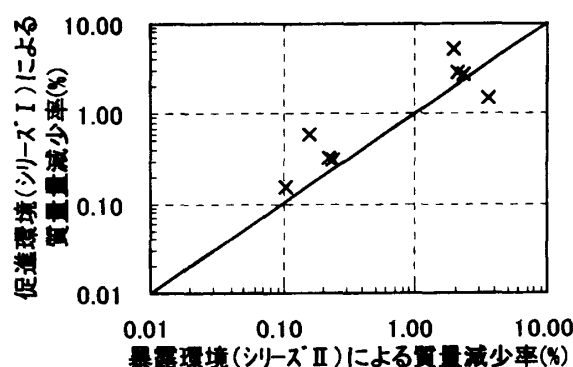


図-7 促進・暴露環境による質量減少率の関係

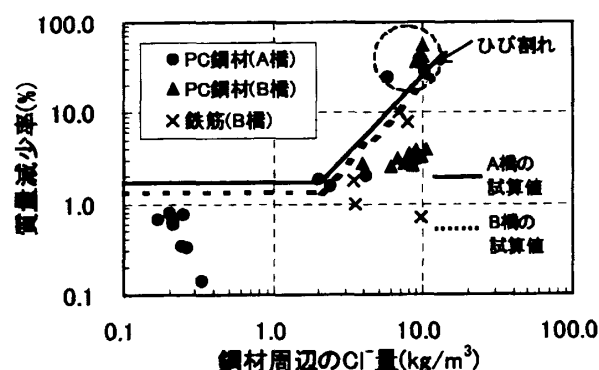


図-8 実橋調査データと提案式の比較

なく、初回補修時まで増加し、その後は定常状態に移行したものと考えられる。したがって、 Cl^- 量は供用期間を通じて危険側の算定となる定常状態の値を用いることにした。

図-8より、実橋における質量減少率は、ひび割れが生じた部位を除き、調査データの最大値が提案式による試算値に概ね一致した。また、それ以外の大半の調査データに対しては、質量減少量を安全側に見積もる結果となった。

5.3 質量減少率と引張強さの関係

鋼材腐食が構造物の耐荷力に及ぼす影響は、鋼材の機械的性質を指標として評価する必要がある。そこで、シリーズⅠ～Ⅲのうち腐食した鉄筋の引張試験を実施し、これと実橋調査データとを比較した（図-9）。その結果、引張強さの減少率は質量減少率の1～4倍程度の範囲に広く分布していた。このように両者の関係が1：1とならないのは、質量減少率が平均的な断面減少率であるのに対し、引張強さの減少率は最大断面減少率を反映するためと考えられる。また、データ分布の中心は、鋼材の種類、試験環境あるいは供試体試験と実構造物との違いにかかわらず、概ね2倍程度となった。

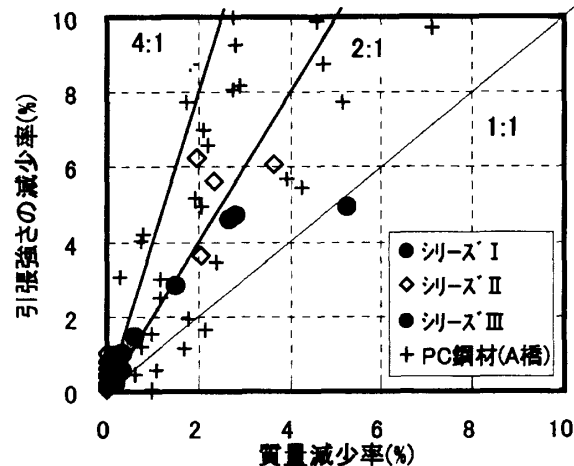


図-9 質量減少率と引張強さの関係

6. まとめ

- (1) 補修RC梁中の残留塩分と鋼材腐食には一定の関係があり、モルタル系補修材はコンクリート系補修材よりもマクロセルを形成し易いことを考慮し、式(1)～(3)を提案した。
- (2) 補修材の種類によっては、補修部鉄筋が母材部鉄筋との電気的な接続によりアノードとなる以外に、塩分の多少の侵入によりアノード化する材料があった。したがって、補修材の選定にあたり、このようなことが生じない実績のある材料や既設コンクリートと同質な材料であることを検討する必要がある。
- (3) かぶり厚さを薄くして補修する場合、母材部の腐食の進行が抑制されている状態であれば、腐食が助長されることはなかった。
- (4) 今回使用した防錆剤は、多量の塩分を残留させない範囲において、補修鉄筋に塗布すること自体は有効であった。
- (5) 環境条件により腐食の進行度は異なるものの促進試験と暴露試験には良い相関性があり、供試体試験と実構造物との間にも一定の関係が見られた。また、提案式(4)は、ひび割れが明らかに生じるケースを除き、塩分を残した補修コンクリート構造物の鋼材腐食を安全側の評価として与えることができた。

参考文献

- 1) Kitano, Y., Watanabe, H., Hisada, M., Tezuka, M. and Tokumitsu, S.: A Study on the Macro-cell Corrosion Due to the Remaining Chloride in Repaired RC Beam, Proceedings of the Second fib Congress, Condensed Papers (2), pp.620-621, June 2006
- 2) 北野勇一, 渡辺博志, 久田 真, 北山 良: 補修RC梁中の残留塩分に起因するマクロセル腐食に関する暴露試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.1787-1792, 2006.7
- 3) 土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅲ)ー塩害により損傷を受けたPC鋼材の機械的性質ー, 土木研究所資料第3810号, 2001.3
- 4) 土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅰ)ープレテンションPC桁の載荷試験ー, 土木研究所資料第3808号, 2001.3
- 5) 谷口秀明, 藤田 学, 久田 真, 渡辺博志: PC部材の大断面修復を対象とした高流動コンクリートに関する検討, 第60回土木学会年次講演会概要集V, pp.133-134, 2005.9
- 6) 宮里心一, 大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学論文集, 第12巻第2号, pp.93-102, 2001.5