

断面修復部における打継目の物質通過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響

長滝重義¹・大即信明²・守分敦郎³・鎌田敏郎⁴・宮里心一⁵

¹正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科(〒950-21新潟市五十嵐2-8050)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科(〒152目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 工博 東亜建設工業(株)技術研究所(〒230横浜市鶴見区安善町1-3)

⁴正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科(〒501-11岐阜市柳戸1-1)

⁵学生会員 工修 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士後期課程

塩害により劣化した鉄筋コンクリート構造物を断面修復工法により補修した時、母材と補修材間に打継目が発生する。この場合、打継目近傍のマクロセル腐食に関して、未だ不明確な点が多いのが現状である。従って、本研究では、打継目の種類(特に物質通過性)の相違が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、実験および解析的な検討を行った。ここで、打継目の物質通過性とは、①打継目を通じての外部からの酸素の浸透性、②打継目を通じての新旧部材間のイオン、電子の通過性(電気抵抗)を意味する。検討方法としては、先ずモルタルあるいはコンクリート供試体を用い、打継目の種類がマクロセル腐食速度に及ぼす影響について評価した。さらに、打継目の種類を考慮に入れたマクロセル腐食モデルを構築し、解析的な検討を加えた。

Key Words: chloride induced corrosion, local repair, permeability through joint, macrocell corrosion

1. はじめに

コンクリートは数多くの土木構造物に使用され、重要な社会資本を形成してきた。しかしながら、一部の鉄筋コンクリート構造物において、塩害による早期劣化が指摘され、耐久性を回復するために種々の補修工法の適用が検討されている。このうち、最も一般的に施工されている断面修復工法の場合、補修材内部の鉄筋の腐食進行は防止されるが、補修材と母材の打継目近傍において、新たな鉄筋の腐食が進行する場合がある^{1)・2)・3)}。この腐食は、マクロセル腐食に起因し、①補修材と母材で塩化物イオン含有量が異なること、②打継目を通じて外部から腐食要因となる物質が浸透すること等によるものと推定される。従って、塩化物イオンの影響を受ける鉄筋コンクリート構造物に対して有効な補修を行うには、断面修復後に発生する打継目近傍におけるマクロセル腐食のメカニズムを解明する必要がある。

既に、母材や補修材の材質の相違が、断面修復部の腐食形成に及ぼす影響は検討されている⁴⁾。また、打継目が欠陥部分となり、外部環境からの物質の浸透を助長し⁵⁾、鉄筋のマクロセル腐食を生じさせることは報告されている^{6)・7)・8)}。しかしながら、打継目の種類が、マクロセル腐食の発生機構や進行にどのような影響を与えるかについて、未だ不明確な点が多いのが現状である。

従って、本研究では、打継目の種類(特に物質通過性)の相違が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響を、実験および解析的に検討した。なお、本研究で打継目の物質通過性とは、①打継目を通じての外部からの酸素の浸透性、②打継目を通じての新旧部材間のイオン、電子の通過性(電気抵抗)を意味する。

2. 本研究の構成

初めに、モルタル供試体を用いた実験的検討を

表-1 セメントの物理的性質および化学成分

物理的性質		
比重		3.13
ブリー比表面積	cm ² /g	4630
凝結：水量	%	30
始発	時一分	2-03
終結	時一分	3-10
安定性（煮沸方法）		良
フロー値		261.0
圧縮強さ： 3日	MPa	31.1
7日	MPa	39.2
28日	MPa	48.4
曲げ強さ： 3日	MPa	5.5
7日	MPa	6.7
28日	MPa	7.6
化学成分		
強熱減量	%	1.1
不溶残分	%	0.1
SiO ₂	%	20.4
Al ₂ O ₃	%	4.6
Fe ₂ O ₃	%	2.7
CaO	%	65.0
MgO	%	1.3
SO ₃	%	3.0

表-2 骨材の物理的性質

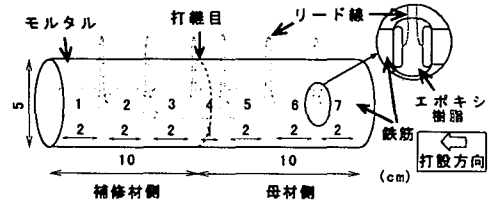
	最大寸法	粗粒率	表乾比重	吸水率
細骨材	5mm	2.20	2.62	1.17%
粗骨材	20mm	6.65	2.64	0.81%

表-3 鋼材の化学成分

(%)					
Fe	C	Si	Mn	P	S
99.1	0.12	0.12	0.58	0.031	0.023

表-4 補修材の物理的性質

比重	圧縮強度(28日)	引張強度(28日)
2.05	35.0MPa	8.5MPa



(a) モルタル供試体

行った。ここでは、①打継目の種類の相違が鉄筋のマクロセル腐食速度に及ぼす影響、②モルタルの水セメント比の相違が鉄筋のマクロセル腐食速度に及ぼす影響について検討した。

次に、コンクリート供試体を用いた実験的検討を行った。ここでは、実構造物において高い補修効果を要求される場合を考慮し、モルタルによる試験結果をもとに、補修材として水セメント比が30%のコンクリートおよびポリマーセメントモルタルを使用した。

最後に、以上の実験的検討をもとに、断面修復部における鉄筋のマクロセル腐食速度の分布形状をシミュレートするモデルを構築した。

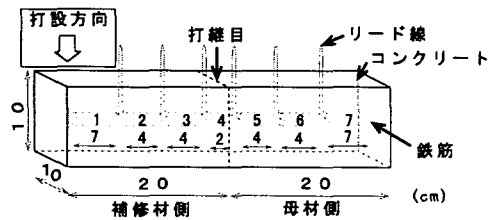
3. 実験概要

(1) 使用材料

セメントは、表-1に示す物理的性質および化学成分の早強セメントを使用した。

骨材は、表-2に示す物理的性質の千葉県小櫃産の細骨材（山砂）および東京都青梅産の粗骨材（碎石）を使用した。

混和剤は、水セメント比が100%のモルタルにおいて、ブリーディングを防止するため、メチルセルローズ系水中不分離性混和剤を水質量に対して、1.2%添加した。なお、本混和材が鉄筋腐食に及ぼす影響は、小さいと考えられる。また、水



(b) コンクリート供試体

図-1 供試体概要図

セメント比が30%のモルタルあるいはコンクリートにおいて、ナフタレン系高性能A/E減水剤をセメント質量に対して、2%添加した。

鋼材は、表-3に示す化学成分の丸鋼（Φ9mm）を使用した。

補修材は、表-4に示す物理的性質のアクリル系ポリマーセメントモルタルを使用した。なお、セメント、エマルジョン（強化材）および水の質量比は、169:17:19である。

(2) 供試体の作製方法

本研究で使用した供試体を、図-1に示す。

a) モルタル供試体

使用した鋼材は、実構造物では測定不可能な、鉄筋内部を流れる電流を測定するため、7本に分

表-5 打継目の種類と打継面の処理方法

	タイプ	打継面の処理方法
モルタル	A	ワイヤブラシによりレイタンスを除去
	B	無処理（レイタンスを除去せず）
	C	レイタンスを除去せず、 厚さ0.5mmの濾紙を挟む
コンクリート	D	無処理
	E	厚さ0.5mmの濾紙を挟む

注) モルタルは鉛直方向に打継ぎを行ったため、レイタンス有り。
コンクリートは水平方向に打継ぎを行ったため、レイタンス無し。

表-6 打継目の付着強度

打継目の種類	A	B	C
A側モルタルのW/C	30		
B側モルタルのW/C	100		
付着強度比	1.00	0.76	0

付着強度比：打継目の種類がAの曲げ強度を1としたときの曲げ強度比

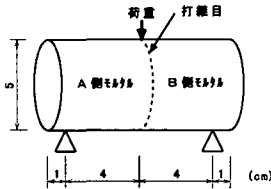


図-2 打継目の付着強度測定概要図

割した。各鉄筋は、電動ワイヤブラシにより黒皮を剥ぎ、両側端部にリード線をはんだ付けした後、切断およびはんだ付けの影響を防ぐため、端部から0.25cmの範囲をエポキシ樹脂により被覆した。さらに同様のエポキシ樹脂によって要素間の絶縁と接続を行い、リード線を繋いで電気的には1体とみなせる鉄筋とした。

打設方法は、要素番号4の鉄筋中央部で打継目が生じるように鋼材を鉛直方向に配置した型枠に、先ず補修材を対象とした塩化物イオン含有量の少ない側のモルタルを打設した。24時間湿空養生を行った後、打継目の種類に相違を設けるため、表-5に示す処理を打継面に施した。その後母材を対象とした塩化物イオン含有量の多い側のモルタルを打設した。なお、母材あるいは補修材内部で、鉄筋周囲のモルタルの品質が一定となるよう、モルタルの打設方向は、図-1に示す通り、鋼材に平行とする。打設後24時間湿空養生した後脱型し、相対湿度80%室温20℃の環境中に暴露した。

b) コンクリート供試体

コンクリート供試体においても、打設手順は、

表-7 実験ケース

	補修材側			母材側	
	W/C %	C1 kg/m ³	打継目の種類	W/C %	C1 kg/m ³
モルタル	100	0.5	A	30	15.0
	100	0.5	B	30	15.0
	100	0.5	C	30	15.0
	30	0.5	B	30	15.0
コンクリート	30	0.5	D	50	15.0
	30	0.5	E	50	15.0
	ポリマー	0.0	D	50	15.0
	ポリマー	0.0	E	50	15.0

モルタル供試体と同様である。ただし、梁および床板の主筋を模擬し、鋼材は水平方向に配置し、コンクリートの打設方向は鋼材と垂直とする。従って、鋼材の下面は、ブリーディングの影響を受けた貧配合のコンクリートと接する。

(3) 打継目の種類と付着強度

打継目の種類と付着強度の関係を表-6に示す。付着強度は、無筋のモルタル供試体を用い、材齢3カ月において、図-2に示す曲げ試験により評価した。

(4) 配合

使用した供試体の配合を表-7に示す。モルタル供試体においては、マクロセルの形成を容易にするため、基本的に、マクロセルにおけるカソード部となる補修材側に、酸素透過性の高い水セメント比が100%のモルタルを使用した。ただし、比較のため、水セメント比が30%の場合についても検討を加えた。コンクリート供試体においては、実造物において高い補修効果を要求される場合を考慮し、配合を設定した。従って補修材には、モルタルによる実験で高い補修効果が得られた、水セメント比が30%のコンクリート、あるいは断面修復工法として今までに実績の多いポリマーセメントモルタルを使用した。また、補修材側には、補修後若干の塩分が浸透した場合を模擬し、ポリマーセメントモルタルを用いた場合を除き、0.5 kg/m³の塩化物イオンを含有した。

(5) 試験項目と試験方法

各測定は、モルタルあるいはコンクリートの物性が比較的安定すると思われる、材齢3カ月において行った。

モルタルおよびコンクリート供試体に対し、

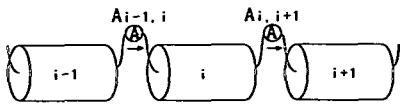


図-3 マクロセル電流密度の測定方法

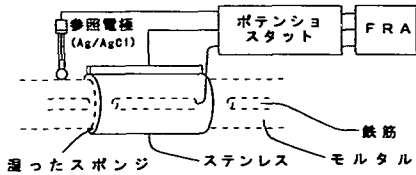


図-4 ミクロセル電流密度の測定方法

「鉄筋要素の自然電位」「鉄筋要素間の電流」「交流インピーダンス法による鉄筋表面の分極抵抗」の測定を行った。さらに、鉄筋要素間の電流および鉄筋表面の分極抵抗から、鉄筋要素表面における腐食電流密度を推定した。なお、本研究の中では、異なる鉄筋要素間を流れる電流から推定した腐食電流密度を、マクロセル電流密度と呼び、一時的にリード線を切断し、異なる鉄筋間では電流が流れない状態で測定した分極抵抗を用い推定した腐食電流密度を、ミクロセル電流密度と呼ぶ。

a) 自然電位の測定

鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、切断による電位の変化が収束した後、照合電極に飽和硫酸銅電極を用い、自然電位を測定した。

b) マクロセル電流密度の測定

隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続し電流(マクロセル電流)を求めた。そして、対象とする鉄筋要素の両端から出入する電流を合計し、鉄筋要素の表面積で除することにより、鉄筋要素表面でのマクロセル電流密度を算定した。例えば、図-3に示す鉄筋要素*i*のマクロセル電流密度(a_i)は、次式で表せる。

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} - A_{i,i+1}}{S_i} \quad (1)$$

ここで、 S_i = 鉄筋要素*i*の表面積

そして、対象とする鉄筋要素表面にて外部に流出するアノード電流密度は正、外部から流入するカソード電流密度は負として表した。なお、腐食電流密度が $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ は、腐食速度が $1.16\text{mm}/\text{年}$ に相当する。

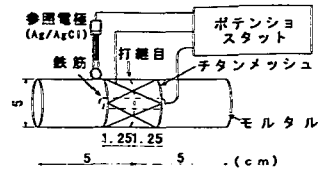


図-5 打継目における酸素透過量の測定方法

c) ミクロセル電流密度の測定

鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、異なる鉄筋要素間では電流の出入が無い状態にし、各鉄筋要素毎の鉄筋表面の分極抵抗をFRA (Frequency Response Analyzer)を用いた交流インピーダンス法により求めた。概略図を図-4に示す。測定は、 1000Hz から 0.0005Hz の範囲において、振幅 50mV の電圧を与えることにより行った。また、分極抵抗は、ボード線図およびコイルコイルプロットを用い算定した。そして、次式を用いて鉄筋要素*i*のミクロセル電流密度(b_i)を算定した⁹⁾。

$$b_i = \frac{K}{R_{p_i} \times S_i} \quad (2)$$

ここで、 R_{p_i} = 鉄筋要素*i*における分極抵抗

なお、 K は定数であるが本研究では、文献10)を参考にし、 $0.0209(\text{V})$ とした。

d) 打継目における酸素透過量の測定

図-5に、打継目における酸素透過量の測定の概略図を示す。測定には、表-5に記す各種打継ぎ処理が施された、 $\Phi 5 \times 10\text{cm}$ のモルタル供試体を使用した。打継目両側のモルタルの水セメント比は30%を基本とし、比較のため打継目の種類がタイプBに関しては、100%の場合についても行った。鉄筋は、3.(2)と同様の処理を施し、打継目中央に埋設した。また、打継目周囲にはチタンメッシュを埋設した。測定方法は、鉄筋とチタンメッシュ間にポテンシヨスタットを接続し、鉄筋を陰極、チタンメッシュを陽極として、 860mV の電位差を設けた。この電位差は、予め同様の供試体のカソード分極曲線を求め、限界電流密度となる電位であり、しかも水素発生の可能性がないことを確認した。なお、この値は文献11)および12)と同様な値である。この方法で、定常状態における電流を測定し、鉄筋表面でのカソード反応において消費された酸素量を次式から算定した。

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{i_{lim}}{nF} \quad (3)$$

3と5の鉄筋間の抵抗を、交流インピーダンス法により測定し、母材と補修材間を電気が流れる時の打継目の電気抵抗として相対的に評価した。

4. モルタル供試体を用いた実験的検討

(1) 打継目の種類が腐食速度に及ぼす影響

打継目の種類が、自然電位、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図-6に示す。同図は、補修材側モルタルの水セメント比が100%、塩化物イオン含有量は0.5 kg/m³とし、母材側モルタルの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は15.0kg/m³とした場合の測定結果である。

これによると、打継目の種類によらず、自然電位に関しては、塩化物イオン含有量が多い母材側において、塩化物イオン含有量の少ない補修材側より卑になることが認められる。マクロセル電流密度に関しては、補修材側の全ての鉄筋で負、母材側の一部の鉄筋で正の値が認められる。従って、補修材側がカソード、母材側がアノードであるマクロセルが形成していると考えられる。

また、打継目の種類に関して比較すると、自然電位に関しては、塩化物イオン含有量の多い母材内部の打継目近傍の鉄筋において、タイプBがタイプAあるいはタイプCと比較し、卑になることが分かる。マクロセル電流密度に関しては、母材内部の打継目近傍の鉄筋において、タイプBがタイプAあるいはタイプCと比較し、アノード電流が多くなることが認められる。ミクロセル電流密度に関しては、打継目あるいは母材側打継目近傍で、最も多いことが認められる。そして、その値は、タイプAおよびタイプBでは、タイプCと比較し、多くなることが確認できる。従って、打継目がタイプBの場合、タイプAあるいはタイプCと比較し、腐食が促進することが分かった。

このことに対し、打継目における酸素透過量および母材と補修材間を電気が流れるときの打継目における電気抵抗の面から検討を加えてみる。すなわち、測定されたマクロセル電流およびミクロセル電流のアノード側の値(図-6中の正の電流密度とその鉄筋要素の表面積を掛けた値)を各々足し合わせ、打継目における酸素透過量および電気抵抗と比較した。

打継目における酸素透過量とマクロセル電流およびミクロセル電流の関係を、図-7に示す。これによると、タイプAはタイプBと比較し、酸素透

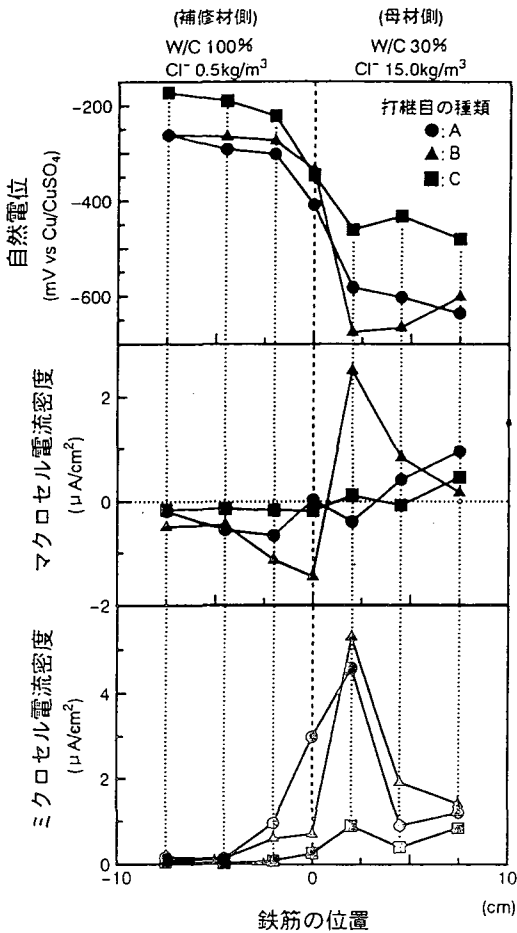


図-6 打継目の種類が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響 (モルタル)

ここで、

$$\frac{dQ}{dt} = \text{単位時間当たりの酸素透過量 (mol/s)}$$

$$i_{lim} = \text{限界電流密度 (A/cm}^2\text{)}$$

$$n = \text{原子価 (= 4)}$$

$$F = \text{ファラデー定数 (=96500 c/mol)}$$

さらに、打継目を有しない同様の供試体により、モルタル部材中における酸素透過量を測定した。そして、打継目における酸素透過量は、式(3)において算定した酸素透過量の内、モルタル部材中を透過した酸素透過量を減じて求めた⁹⁾

e) 打継目の電気抵抗の測定

モルタル供試体を用い、鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、図-1a)に示す要素番号

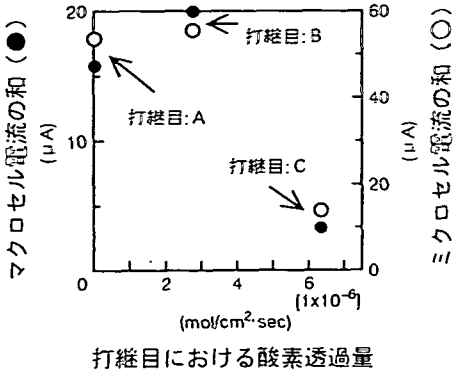


図-7 打継目における酸素透過量と腐食電流の関係 (モルタル)

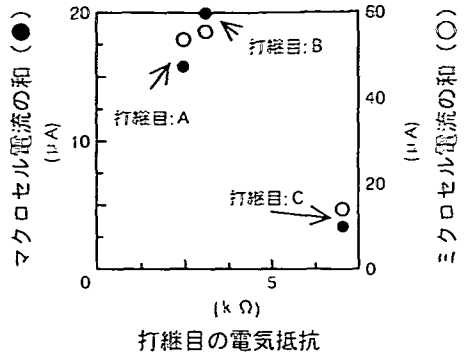


図-8 打継目の電気抵抗と腐食電流の関係 (モルタル)

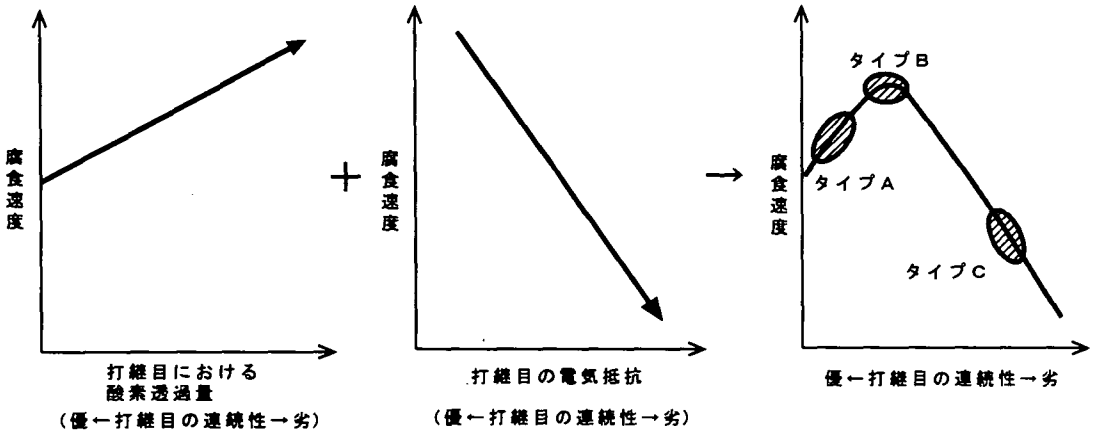


図-9 打継目の連続性と腐食速度の関係

過量が減少し、腐食電流も減少することが認められる。また、打継目の電気抵抗とマクロセル電流の関係を、図-8に示す。これによると、タイプCはタイプBと比較し、電気抵抗は増加し、腐食電流は減少することが認められる。

図-9に、打継目の連続性と鉄筋の腐食速度の関係をまとめる。打継目の連続性が優れると、打継目における酸素透過量が減少し律速条件となり、腐食は抑制されると考えられる(図-9左)。また、打継目の連続性が劣ると、塩化物イオンの浸透が無く、かつ中性化の影響が小さいときは、打継目の電気抵抗が増加し、母材と補修材間に跨るマクロセルの形成が電的に困難となり、腐食は抑制されると考えられる(図-9中央)。従って、断面修復部に形成するマクロセルの腐食速度は、両者の影響を相互に受け、律速されると思われる(図-9右)。なお、ここでの実験では、タイプBで最も

大きな腐食速度を示したが、この値は打継目が電解質(海水等)で満たされる等の条件により変化することも考えられる。

(2) 水セメント比の相違が腐食速度に及ぼす影響

補修材側モルタルの水セメント比の相違が、自然電位、マクロセル電流密度およびマイクロセル電流密度に及ぼす影響を図-10に示す。同図は、補修材側モルタルの水セメント比が30%および100%、塩化物イオン含有量は0.5kg/m³とし、母材側モルタルの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は15.0kg/m³である。また、打継目の種類は、4(1)において腐食速度が最大であった、タイプBである。

これによると、自然電位に関しては、補修材側

表-8 モルタルの配合が打継目における酸素透過量に及ぼす影響

水セメント比 %	酸素透過量 mol/cm ² ·s
30	2.769 × 10 ⁻⁶
100	27.08 × 10 ⁻⁶

(打継目: タイプB)

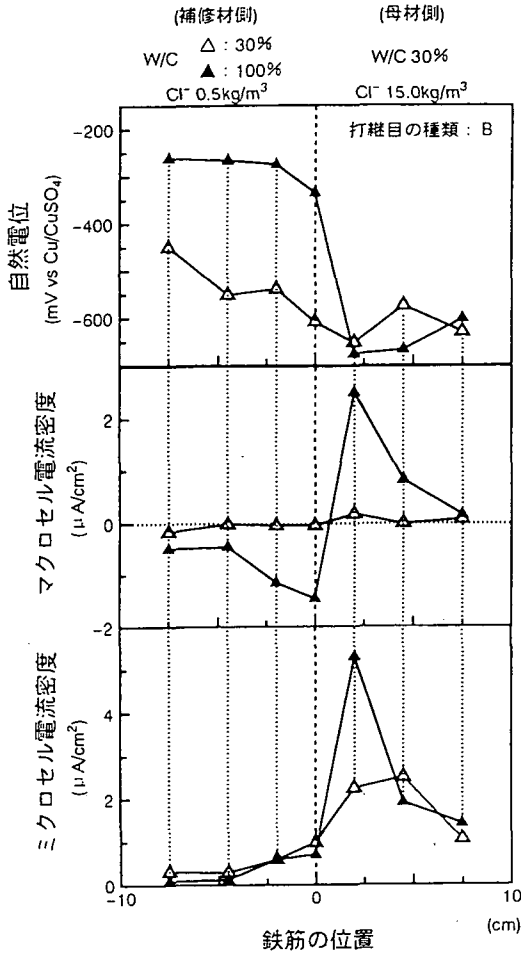


図-10 補修材の配合の相違が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響 (モルタル)

モルタルの水セメント比が30%の場合は、100%の場合と比較し、補修材と母材間での電位差が減少することが認められる。マクロセル電流密度に関しては、補修材側モルタルの水セメント比が30%の場合は、100%の場合と比較し、減少することが認められる。また、マイクロセル電流密度に関しても、補修材側モルタルの水セメント比が30%の場合は、100%の場合と比較し、母材側打継目近傍での値が、減少することが認められる。

以上の検討の結果、打継目が同種の場合、マクロセルにおいてカソード部となる補修材側モルタルの水セメント比が小さい時に、腐食速度は減少することが分かった。これは、補修材側モルタルの水セメント比が小さい時は、モルタル中の酸素

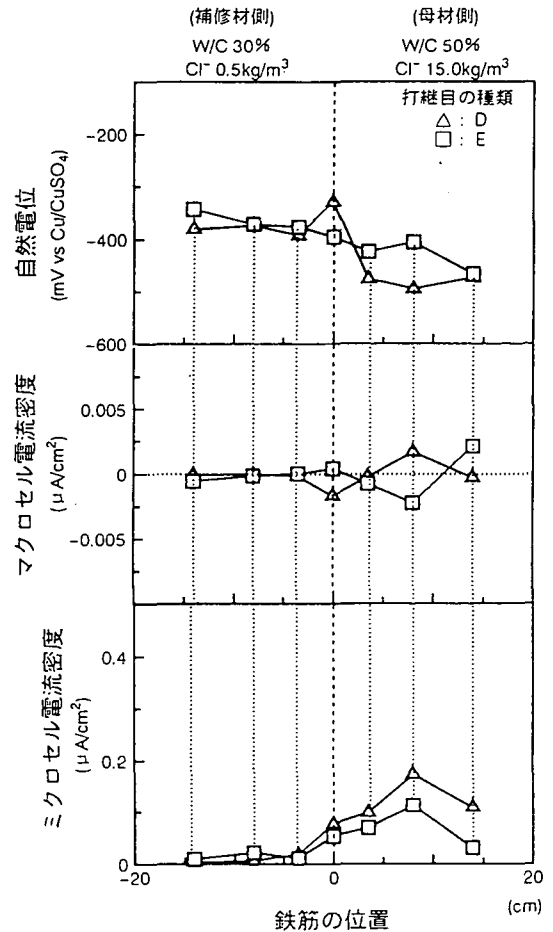


図-11 打継目の種類が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響 (コンクリート)

透過量が減少し⁴⁾、かつ比抵抗が増大し⁴⁾、さらに表-8に示すように、打継目における酸素透過量も減少する¹³⁾ため、腐食が抑制されると考えられる。

5. コンクリート供試体を用いた実験的検討

モルタル供試体を用いた実験的検討により、補修材の水セメント比が小さい場合、酸素透過量が減少し、かつ比抵抗が増大するため、腐食は抑制されることが明かとなった。従って、コンクリート部材を用いた検討では、実構造物において高い補修効果を要求される場合を考慮し、補修材が酸素透過性の低く¹⁴⁾かつ比抵抗が大きい水セメント比30%のコンクリートおよびポリマーセメントの場合に関して、検討を行った。

(1) 補修材に水セメント比が30%のコンクリートを用いた場合

打継目の種類が、自然電位、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度に及ぼす影響を図-11に示す。同図は、補修材側コンクリートの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は 0.5kg/m^3 とし、母材側コンクリートの水セメント比が50%、塩化物イオン含有量は 15.0kg/m^3 とした場合の測定結果である。

これによると、自然電位に関しては、タイプDでは、塩化物イオン含有量が多い母材側で卑に、塩化物イオン含有量が少ない補修材側および打継目で貴になることが認められる。一方、タイプEでは、母材側が補修材側と比較し卑を示すが、顕著な相違は見られない。マクロセル電流密度に関しては、タイプDでは、母材側でアノード電流が、打継目でカソード電流が認められる。一方、タイプEでは、母材側内部だけでアノード電流およびカソード電流が確認される。また、ミクロセル電流密度に関しては、打継目の種類に関わらず、母材内部および打継目に多い。そして、その値は、タイプDがタイプEと比較し、大きくなることが認められる。

以上の検討の結果、タイプDでは母材側がアノード、補修材側および打継目がカソードとなるマクロセルの形成が認められるが、タイプEでは明確なマクロセルの形成は認められなかった。そして、モルタル供試体による実験的検討と同様、無処理にて打継ぎを行ったタイプDでは、打継面に濾紙を挟んだタイプEと比較し、腐食速度は増加することが明らかとなった。これは、モルタルと同様、塩化物イオンの浸透が無く、かつ中性化の影響が小さいときは、打継目の連続性が劣ると、打継目における電気抵抗が増加し、母材と補修材内部の鉄筋間でのマクロセルの形成が困難になる

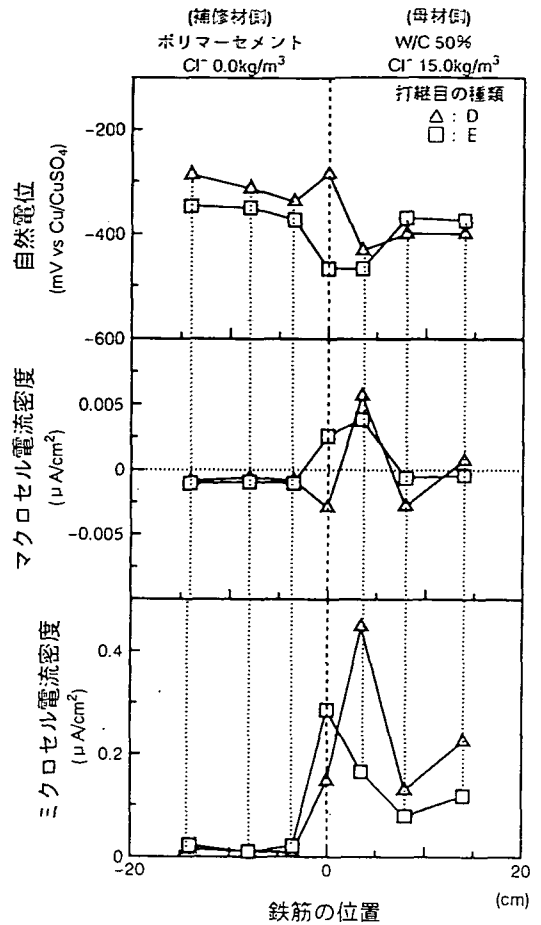


図-12 打継目の種類が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響 (ポリマーセメント)

ためと考えられる。

(2) 補修材にポリマーセメントモルタルを使用した場合

図-12は、補修材が塩化物イオンを含有しないポリマーセメントモルタルとし、母材側コンクリートの水セメント比が50%、塩化物イオン含有量は 15.0kg/m^3 とした場合の測定結果である。

これによると、自然電位に関しては、タイプDでは、塩化物イオン含有量が多い母材側で卑を、打継目および塩化物イオンを含有しない補修材側で貴になることが認められる。一方、タイプEでは、母材側打継目近傍および打継目で卑になることが認められる。マクロセル電流密度に関しては、

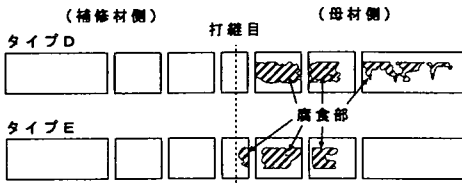


図-13 鉄筋の腐食状況

タイプDでは、母材側打継目近傍でアノード電流が、打継目あるいは一部の母材内部の鉄筋でカソード電流が認められる。一方、タイプEは、打継目および母材側打継目近傍でアノード電流が確認されるが、顕著なカソード電流は確認されない。また、マイクロセル電流密度に関しては、タイプDでは、母材側打継目近傍にて、一方、タイプEでは、打継目にて多くなることが認められる。そして、その値は、打継目を除いて、タイプDがタイプEと比較し、大きいことが確認される。

さらに、供試体を割裂し、内部の鉄筋を取り出し、腐食状況を観察した。図-13は、鉄筋の腐食状況の観察結果である。また、図-14は腐食部面積を鉄筋表面積で除することにより算定した、腐食面積率である。これらによると、打継目の種類に関わらず、母材側打継目近傍で腐食が最も進行していることが確認できる。そして、その腐食程度は、タイプDがタイプEと比較し、進行していると考えられる。

以上の検討の結果、補修材にポリマーセメントモルタルを用いた場合にも、水セメント比30%のコンクリートの場合と同様に、タイプDはタイプEと比較し、腐食速度が増加することが明らかとなった。

6. 解析的検討

以上の実験的検討に対し、理論的な解析を加えてみる。ここでは、補修工法の効果を把握することを目的とした、打継目近傍のマクロセル電流密度の分布形状をシミュレートするモデルの作成を試みた。

(1) モデルの構築

本研究では、実験的検討に用いた供試体を考慮し、図-15に示す形状を対象とした。また、コンクリート中を流れる電流は、コンクリート内部の電位変化に比例し、抵抗に反比例するとして、式

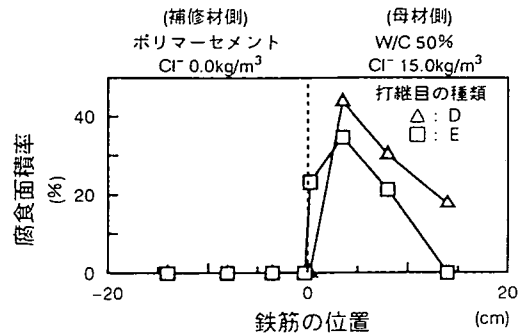


図-14 打継目の種類と腐食面積率の関係

を展開した。ただし、①コンクリート中を流れる電流は鉄筋に対して平行でかぶり方向で変化しない、②電位は鉄筋の長手方向のみで変化し、かぶり方向では変化しない、③部材内部の物性は、打継目からの距離によらず一定、と仮定する。

文献15)を参考によると、打継目から距離 x 離れた任意の点での鉄筋のカソード・アノード電流密度、および補修材・母材中の鉄筋の電位は、以下ようになる。

$$i_{c,x} = \frac{\alpha_c I_{c0} \cosh \alpha_c (L_c - x)}{2 \pi r \sinh \alpha_c L_c} \quad (4)$$

$$i_{a,x} = \frac{\alpha_a I_{a0} \cosh \alpha_a (L_a - x)}{2 \pi r \sinh \alpha_a L_a} \quad (5)$$

$$V_{c0} - V_{c,x} = w_c \frac{\alpha_c I_{c0} \cosh \alpha_c L_c}{\sinh \alpha_c L_c} \quad (6)$$

$$V_{a0} - V_{a,x} = w_a \frac{\alpha_a I_{a0} \cosh \alpha_a L_a}{\sinh \alpha_a L_a} \quad (7)$$

$$(\alpha = \sqrt{W/w})$$

ここで、

L = 鉄筋の長さ(補修材側で L_c 、母材側で L_a [cm])

x = 打継目から任意の点までの距離(補修材方向を正[cm])

w = 鉄筋の単位長さ当りの分極抵抗
(補修材側で w_c 、母材側で w_a [Ω/cm])

r = 鉄筋の半径[cm]

W = 長手方向のコンクリートの単位長さ当りの抵抗(補修材側で W_c 、母材側で W_a [Ω/cm])

$$W = \frac{\rho}{S}$$

ただし、 ρ = コンクリートの比抵抗 [Ω/cm]

S = コンクリートの断面積 [cm²]

I_{c0} = 打継目から補修材へ流れる電流 [A]

I_{a0} = 母材から打継目に流れる電流 [A]

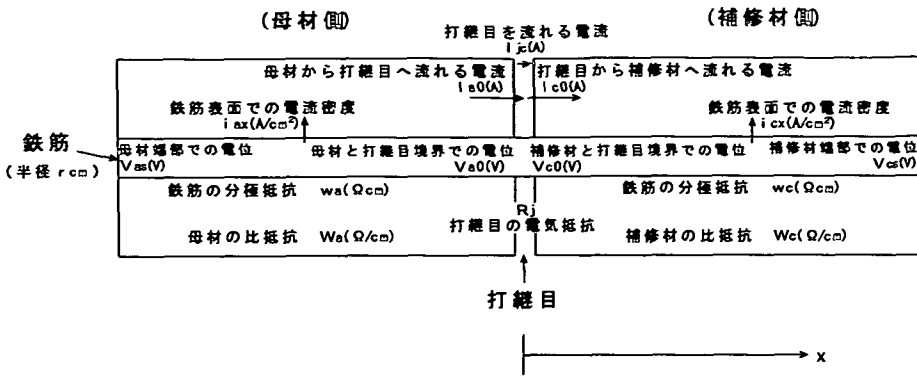


図-15 モデルで対象とする供試体

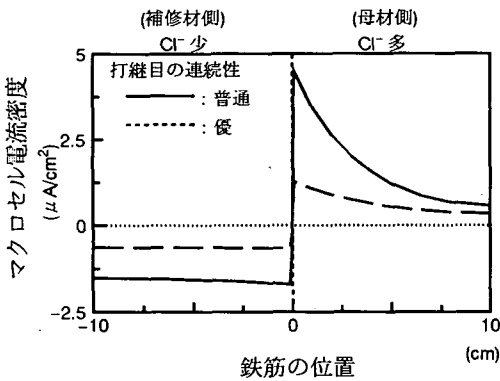


図-16 打継目の種類がマクロセル電流密度に及ぼす影響 (解析結果-1)

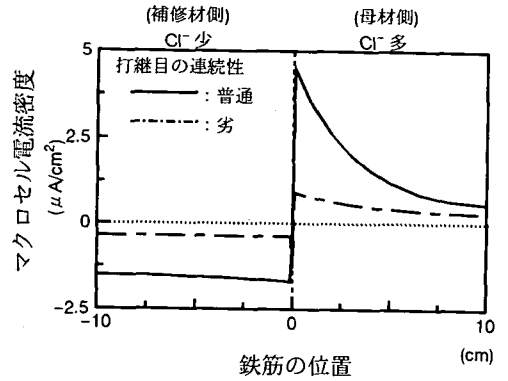


図-17 打継目の種類がマクロセル電流密度に及ぼす影響 (解析結果-2)

$i_{..}$ = 任意の点で鉄筋から流出する電流密度
 (補修材側で $i_{c..}$, 母材側で $i_{a..}$ [A/cm²])
 V_{c0} = 補修材と打継目境界での鉄筋の電位 [V]
 V_{a0} = 母材と打継目境界での鉄筋の電位 [V]
 $V_{..}$ = 鉄筋端部における自然電位
 (補修材側で $V_{c..}$, 母材側で $V_{a..}$ [V])

また、打継目近傍の母材側、補修材側および打継目における電流および電圧変化の関係を表すと、次の様になる。

$$I_{..0} = I_{j..} + I_{c0} \quad (9)$$

$$V_{c0} - V_{a0} = V_{j1} \quad (10)$$

ここで、

$I_{j..}$ = 打継目で発生するカソード電流 (打継目における酸素透過量に関連)

さらに、打継目の種類について考慮する。4 (1) における実験的検討より、母材と補修材間を電気が流れるとき、打継目が電気的な抵抗となることが明かとなった。従って、打継目を貫く電流と打継目における電圧変化には、次式の関係が成り立つ。

$$V_{j1} = R_j I_{c0} \quad (8)$$

ここで、

V_{j1} = 打継目を通過するために必要な電圧ロス

R_j = 打継目の電気抵抗

従って、式(6)(7)(8)(9)(10)より、

$$I_{c0} = \frac{-(V_{c..} - V_{a..}) - w_c \frac{\alpha_c \cdot i_{c..} \cdot \cosh \alpha_c \cdot L_c}{\sinh \alpha_c \cdot L_c}}{w_c \frac{\alpha_c \cdot \cosh \alpha_c \cdot L_c}{\sinh \alpha_c \cdot L_c} + w_a \frac{\alpha_a \cdot \cosh \alpha_a \cdot L_a}{\sinh \alpha_a \cdot L_a} + R_j} \quad (11)$$

従って、式(11)を式(9)に代入し、 $I_{..0}$ が求まる。さらに、式(4)(5)より、任意の点における

表-9 パラメータ

連続性	$V_{c.}$ mV	$V_{a.}$ mV	w_c $\times 10^{-2}$	w_a $\times 10^{-2}$	ρ_c $\times 10^{-2}$	ρ_a $\times 10^{-2}$	R_i k Ω	$I_{i.c.}$ μA
優	-250	-600	500	20	3	5	3.0	0.5
普通	-250	-700	200	10	3	5	3.5	2.0
劣	-200	-450	500	25	3	5	7.5	4.0

カソードおよびアノード電流密度が算定される。

(2) モデルを用いた解析

打継目の種類がマクロセル電流密度に及ぼす影響を、図-16・17に示す。代入したパラメータは、材齢3カ月における実験値を参考にし、表-9に示す値を用いた。打継目の種類の相違により、打継目における酸素透過量の影響を受ける $I_{i.c.}$ 、および打継目の電気抵抗(R_i)が異なる。

これによると、打継目の連続性が優れるあるいは劣る場合は、普通の場合と比較し、マクロセル電流密度が減少することが確認できる。従って、4(1)における実験結果を裏付ける結果が得られた。

7. 結論

本研究では、塩分を含有したコンクリートを部分的には取り取り、塩分を含まない健全なコンクリートあるいは補修材を打継ぐ「断面修復工法」により補修された打継部を対象とし、打継目近傍の鉄筋のマクロセル腐食に関し、特に打継目の種類が腐食速度に及ぼす影響を、実験的・解析的に検討した。本研究により得られた結論を以下に記す。

- ① レイタンスを取り除いた打継目では、打継目における酸素透過量が減少するため、腐食速度が律速される。
- ② 母材と補修材の間隔が広がると、母材と補修材間の電気抵抗が増加する。その結果、母材と補修材間に跨るマクロセルの形成が電氣的に困難となり、塩化物イオンの浸透が無くかつ中性化の影響が小さい時は、腐食は抑制される。ただし、この場合力学的な欠点となる可能性はある。
- ③ 打継目が同種の場合、補修材側モルタルの水セメント比が小さいほど、鉄筋の腐食速度は減少する。これは、モルタル部材中および打継目における酸素透過量が減少し、また比抵抗が増大し、腐食速度が律速されるためと思われる。
- ④ 打継目の種類を考慮に入れた、打継目近傍の鉄

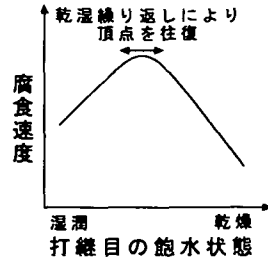


図-18 打継目の飽水状況と腐食速度の関係

筋のマクロセル腐食モデルを構築した。このモデルを用い、打継目の種類がマクロセル腐食速度に及ぼす影響を確認出来た。

以上の研究の結果、打継目における酸素透過量および母材と補修材間の電気抵抗は、マクロセル腐食速度に影響を及ぼすことが明らかとなった。本研究の実験では、打継目の種類に相違を設け、打継目の物質通過性を変化させた。しかしながら、実構造物における打継目の物質通過性は、打継目の飽水状況によっても変化すると思われる。すなわち、同一打継目において、湿潤状態の時は、打継目における酸素透過量が減少する。一方、乾燥状態では、母材と補修材間の電気抵抗が増加する。本研究の検討を踏まえると、打継目の飽水状況とマクロセル腐食速度の関係は図-18に示す通りと考えられる。したがって、乾燥から湿潤に変化する時、および湿潤から乾燥に変化する際に、腐食速度が最大となる可能性がある。このため、乾湿が繰り返されることにより、腐食速度は最大となる点を往復することになる。以上のことから、実構造物において、乾湿繰り返し環境は、断面修復部における打継目近傍の鉄筋腐食を促進させることが示唆される。

謝辞: 本研究において、当時東京工業大学大学院に在学中であった柴田常德氏(現:株式会社大林組)には、実験および論文作成に尽力を頂いた。ここに、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) A. W. Beeby: Concrete in the Oceans, Technical Report No. 1(CIRIA/UEG), Cement and Concrete Association, Slough, England, pp. 77, 1978.
- 2) 浜田秀則, 福手勤, 阿部正美: 塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, 第3巻第2号, pp. 85~95, 1992. 7.
- 3) 出村克宣, 大濱嘉彦, 伊部博: 補修後5年経過

- した鉄筋コンクリート建造物の鉄筋腐食，コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集，pp. 29～32，1994. 10.
- 4) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，宮里心一：鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的検討，土木学会論文集，第544号/V-32，pp. 109～119，1996. 8.
 - 5) 氏家勲，佐藤富一，佐藤良一，長滝重義：新旧コンクリートの打継面の透気性状に関する検討，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集 第5部，pp. 1060～1061，1994. 9.
 - 6) 浜田秀則，原茂雅光，大即信明：コンクリートの各種打継目の耐海水性に関する材令10年試験，コンクリート工学年次論文報告集，第9巻第1号，pp. 339～344，1987. 6.
 - 7) 迫田恵三，竹田宣典，十河茂幸：海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食の進行状況，コンクリート工学年次論文報告集，第10巻第2号，pp. 487～492，1988. 6.
 - 8) Nobuaki OTSUKI, Shigeyoshi NAGATAKI, Makoto HISADA: Influence of Joints and Cracks on Macro-cell Corrosion in Reinforced Concrete, Proc. of Fourth International Conference on Structural Failure, Durability and Retrofitting, pp. 327～334, 1993. 7.
 - 9) 岡田清，小林和夫，宮川豊章，本田哲：分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp. 249～252，1983. 4.
 - 10) 水流徹，前田龍，春山志郎：交流法腐食モニターの局部腐食への適用，防食技術 28，pp. 638～644，1979.
 - 11) Gjørsv O. E., et al: Corrosion 76 Paper No. 17, pp. 17/1～17/13, 1976. 3.
 - 12) 木内芳夫，宮川豊章，岡田清：コンクリートの電気抵抗および酸素浸透について，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集 第5部，pp. 265～266，1983. 9.
 - 13) 氏家勲，菊池一義，佐藤良一，長滝重義：新旧コンクリートの打継目の透気性状に影響を及ぼす要因に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No. 1, pp. 747～752, 1995. 6.
 - 14) 小林一輔，出頭圭三：各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集 No. 86, 12-1, pp. 91～106, 1986. 12.
 - 15) コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(Ⅱ)：コンクリート工学協会，pp. 118～235，1994. 10.

(1996. 10. 23受付)

INFLUENCE OF PERMEABILITY THROUGH JOINT ON MACROCELL CORROSION

Shigeyoshi NAGATAKI, Nobuaki OTSUKI, Atsurou MORIWAKE, Toshiro KAMADA
and Shinichi MIYAZATO

In this study, the macrocell induced corrosion behavior of steel bars embedded in concrete members was experimentally and analytically investigated. The macrocell and microcell current densities and potentials were then evaluated. The comparisons between the type of joint and the permeations of oxygen through the joint were investigated. And, the comparisons between the proportions of concrete and the permeations of oxygen through the joint were investigated. Their influences on corrosion were studied. Lastly, the macrocell corrosion rate near the joint was simulated. Results showed that the permeation through the joint and resistance between new and old members played important roles in macrocell corrosion behavior.