

# 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研究

長滝重義<sup>1</sup>・大即信明<sup>2</sup>・守分敦郎<sup>3</sup>・宮里心一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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丁目3)

<sup>4</sup>学生員 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課程

本研究では、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後に発生する、内部鉄筋のマクロセル腐食に関して、実験的検討を行った。その結果、①塩化物イオン含有量、水セメント比および材料が、打継目を貫く鉄筋のマクロセル発生機構に及ぼす影響、②外部環境の湿度や温度がマクロセル腐食速度に及ぼす影響について評価することが出来た。

*Key Words: chloride induced corrosion, local repair, macro-cell, corrosion mechanism, corrosion rate*

## 1. まえがき

これまで、コンクリートは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、一部のコンクリート構造物において、塩害による早期劣化が確認され、耐久性を回復させるために種々の補修工法が適用されてきた。しかし、塩分が多量に混入したコンクリートを部分的に取り除き、健全なコンクリートあるいは補修材を打ち継ぐ「断面修復工法」の場合<sup>1)</sup>、新しく打ち継がれた補修材側内部の鉄筋の腐食進行は防止されるが、補修材と既設コンクリートの打継目近傍における、新たな腐食の進行が指摘されている<sup>2), 3), 4)</sup>。この腐食は、補修材と既設コンクリートで塩化物イオンの含有量が異なることによる、マクロセル腐食が主要因となっているものと推定される。

したがって、有効な断面修復を行うためには、既設コンクリートや補修材の材質がマクロセル腐食の発生や進行にどのような影響を与えるか詳細に検討する必要がある。

これまで、断面修復に伴う塩化物イオンの濃度差がマクロセル腐食の発生に大きく関与していることが報告されてきた<sup>5), 6), 7), 8), 9)</sup>。さらに、コンクリート部材の比抵抗あるいは酸素透過性に関する研

究<sup>10), 11), 12)</sup>や、これらと鋼材腐食を関連させた研究<sup>13)</sup>など、マイクロセル腐食に関わる研究は多い。しかし、マクロセル腐食の発生機構やその後の腐食速度に関する詳細な検討例は多くないようである。

本研究では、断面修復工法により生じた打継目を境として、塩化物イオン含有量をはじめとする配合や材質の相違が、内部鉄筋の腐食に及ぼす影響について実験を行い、その発生機構について詳細な検討を行った。さらに、外部環境中の湿度あるいは温度が腐食速度に及ぼす影響についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 本研究の構成

本研究は、Fig. 1 に示すように2つの研究から構成されている。シリーズ1では、塩化物イオンを含有するモルタルあるいはコンクリートに、健全なモルタル、コンクリートあるいは補修材を打ち継いだ場合、打継目を貫く鉄筋のマクロセル腐食がどのように発生し、進行していくかを検討した。

ここでは、「コンクリート中の塩化物イオン量」「モルタルあるいはコンクリートの水セメント比」「補修材の材質」が、マクロセル腐食にどのような影響を与えるか検討を行った。

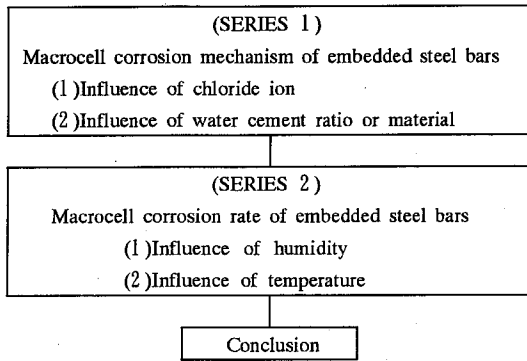


Fig. 1 Flow of this study.

Table 2 Physical properties of aggregates.

	classification	Max. size	F. M.	Spec. Gravity	Absorption
mortar	fine	5 mm	2.20	2.62	1.17%
concrete	fine	5 mm	3.08	2.62	1.73%
concrete	coarse	20 mm	6.70	2.64	0.68%

Table 3 Chemical composition of steel.

Type	Chemical composition(%)				
	C	Si	Mn	P	S
round(φ9)	0.12	0.12	0.58	0.031	0.023
deformed(D10)	0.21	0.18	0.72	0.021	0.032

Table 1 Physical properties and chemical composition of cement.

物理的性質		
比重		3.17
ブレン比表面積	cm <sup>2</sup> /g	3380
88μmふるい残分	%	0.7
凝結:水量	%	28.1
始発	時-分	2-51
終結	時-分	3-52
安定性(煮沸方法)		良
フロー値		238
圧縮強さ:		
3日	kgf/cm <sup>2</sup>	36
7日	kgf/cm <sup>2</sup>	50
28日	kgf/cm <sup>2</sup>	71
曲げ強さ:		
3日	kgf/cm <sup>2</sup>	154
7日	kgf/cm <sup>2</sup>	258
28日	kgf/cm <sup>2</sup>	408
化学成分		
強熱減量	%	0.7
不溶残分	%	0.1
SiO <sub>2</sub>	%	21.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2.9
CaO	%	63.9
MgO	%	1.7
SO <sub>3</sub>	%	2.3

シリーズ2では、外部環境条件(湿度、温度)が腐食の進行速度に与える影響について検討を行った。

## (2) 使用材料

セメントは、Table 1 に示す物理的・化学的性質の研究用普通ポルトランドセメント(セメント協会製)を使用した。

骨材は、Table 2 に示す物理的性質の細骨材および

Table 4 Physical properties of repair materials.

material	Spec. Gravity	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
epoxy	2.04	439(28 day)
polymer cement	2.0	350(7 day)

粗骨材を使用した。なお、モルタル供試体には千葉県小櫃産の川砂を、コンクリート供試体には細骨材として富士川産の川砂、粗骨材として東京都青梅産の砕石を用いた。

鋼材は、Table 3 に示す化学成分の鉄筋を使用した。なお、モルタル供試体には丸鋼を、コンクリート供試体には異形鉄筋を用いた。

補修材は、Table 4 に示す物理的性質のエポキシ樹脂系補修材およびアクリル系ポリマーセメントモルタルを使用した。

## (3) 供試体の作成方法

本研究では、2種類のモルタル供試体(Type A, Type B)と1種類のコンクリート供試体(Type C)を使用した。

シリーズ1の実験では、Type A および Type C 供試体により、塩化物イオン含有量とマクロセル腐食の関係およびモルタル、コンクリートあるいは補修材の材質とマクロセル腐食の関係について検討を行った。さらに、Type B 供試体を用い、電気化学的な手法によって酸素透過量を測定し、酸素透過量が腐食の発生機構に与える影響について検討を行った。

シリーズ2の実験では、Type A 供試体を用いて湿度や温度が腐食速度に与える影響を検討すると共に、Type B 供試体により外部環境ごとに酸素透過量および比抵抗を測定し、外部環境が腐食速度に与える影響について検討を加えた。

Table 5 Experimental cases appreciated macrocell corrosion.

	Type	side-A		side-B		surroundings
		W/C(%)	Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W/C(%)	Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
mortar	1	30	0.5	30	15.0	R. H. 80 %
	2	30	0.5	50	15.0	R. H. 80 %
	3	30	0.5	100	15.0	R. H. 80 %
	4	50	0.5	30	15.0	R. H. 80 %
	5	100	0.5	30	15.0	R. H. 80 %
	6	100	0.5	30	15.0	R. H. 50 %
	7	100	0.5	30	15.0	water
concrete	8	epoxy	0	50	15.0	R. H. 80 %
	9	polymer	0	50	15.0	R. H. 80 %
	10	30	0.5	50	15.0	R. H. 80 %
	11	100	0.5	50	15.0	R. H. 80 %
	12	polymer	0	50	0.5	R. H. 80 %
	13	polymer	0	50	2.0	R. H. 80 %
	14	polymer	0	50	7.0	R. H. 80 %

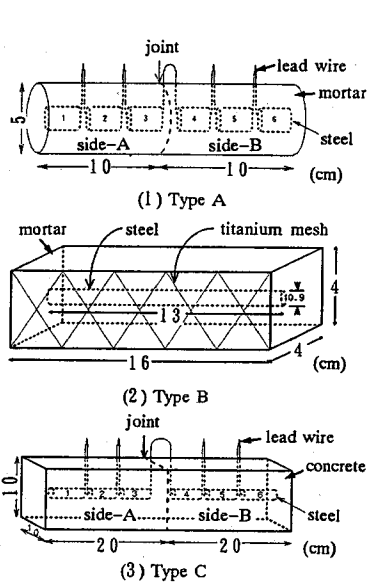


Fig. 2 The configuration of specimen.

a) Type A

Type A のモルタル供試体を Fig. 2 (1) に示す。side-A (以後、文中では「A側」と記す)は、補修部をモデル化して、塩化物イオンを含まない健全なモルタルを用いた。一方、side-B (以後、文中では「B側」と記す)は、母材をモデル化し、塩分を含有するモルタルを使用した。

使用した鋼材は、Fig. 3 (1) に示すように、マクロセル電流分布を測定するために、長さ2.5 cmの鉄筋要素を6本繋いだものを用いた。それぞれの鉄筋は、電動ワイヤブラシにより黒皮を剥ぎ、各鉄筋の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等の影響を防ぐため、端部から0.25cm

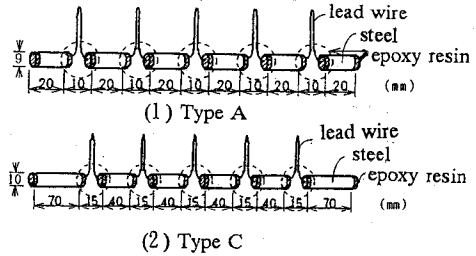


Fig. 3 The configuration of embedded steel bars.

の範囲をエポキシ系樹脂により被覆した。さらに同様のエポキシ系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、まず塩化物イオン含有量の少ないA側のモルタルを打設し、24時間養生後に打継面をワイヤブラシで清掃し、その後塩化物イオン含有量の多いB側のモルタルを打設した。打設後24時間湿空養生した後脱型し、各外部環境中に暴露した。ただし、暴露中に打継目から酸素や水分が浸入することを防ぐため、脱型直後に全ての供試体の打継目を全周に渡ってエポキシ系樹脂により1cm幅でシールした。なお、シリーズ2の実験において、相対湿度50%の空气中に暴露する供試体については、初期ひび割れを防ぐために脱型後1週間湿度80%室温20℃において初期養生を行い、その後暴露を開始した。

b) Type B

Type B の供試体を Fig. 2 (2) に示す。供試体の中心部には鉄筋、供試体の側面および底面にはチタンメッシュが埋め込まれている。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で接続し、Type A 供試体と同じく、端部から0.5cmの範囲をエポキシ系樹脂により被覆した。また、

Table 6 Experimental cases appreciated material character.

W/C(%)	30	50	100
surrounding			
water	-	○	-
R. H. 80 %	○	○	○
R. H. 50 %	-	○	-

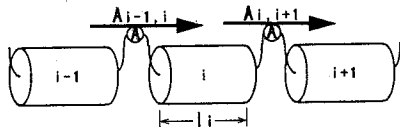


Fig. 4 The measurement of macrocell current density.

チタンメッシュは端部にリード線をはんだで接続し、接続部はエポキシ系樹脂により被覆した。供試体の作成方法は、中央に鉄筋、側面および底面にチタンメッシュが配置された型枠にモルタルを打設し、24時間湿空養生した後脱型し、打型直後に上面を残す5面をシリコンで塗装し、酸素の透過が1面のみから起こるようにして、Type A 供試体と同様な環境に暴露した。

c) Type C

Type C のコンクリート供試体を Fig. 2 (3) に示す。この供試体においても、先のType A 供試体と同様に、A側は補修部をモデル化し、塩化物イオンを含まない補修材あるいはコンクリートを用い、B側は母材をモデル化し、塩分を含有するコンクリートを使用した。鋼材は予め 4.5 cm あるいは 7.5 cm に切断し、Type A と同様な前処理を施し、Fig. 3 (2) で示すように接続した。打設手順は、Type A と同様である。

(4) 配合および外部環境

Type A および Type C 供試体の配合と外部環境を Table 5 に、酸素透過量を測定した Type B 供試体の配合と外部環境を Table 6 に示す。

(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。

シリーズ1では、Type A とType C 供試体のいずれに対しても「各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分極抵抗から、各鉄筋要素表面における腐食電流密度を推定した。また、Type B 供試体によって酸素透過量を測定し、酸素供給量がマクロセル腐食速度に

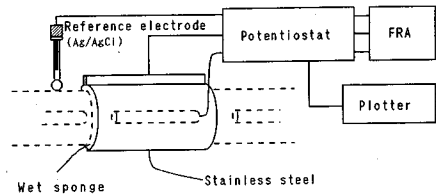


Fig. 5 The measurement of polarization resistance.

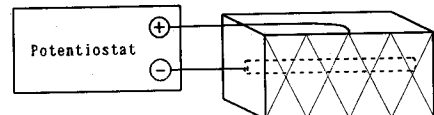


Fig. 6 The measurement of oxygen permeability.

及ぼす影響について検討を加えた。

シリーズ2では、Type A 供試体の電流密度と、Type B 供試体によって得られる酸素透過量および比抵抗との関係より、暴露環境の違いが腐食速度に与える影響について比較検討を行った。

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、マイクロセル電流密度と呼ぶ。

a) 自然電位の測定

Type A およびType C の供試体により、鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、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

Type A およびType C の供試体を用い、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加減し、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、Fig. 4 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。

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} - A_{i,i+1}}{0.9 \times \pi \times l_i} \quad (1)$$

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、流入するカソード電流密度は負として表した。

c) ミクロセル電流密度の測定

Type A およびType C の供試体により、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

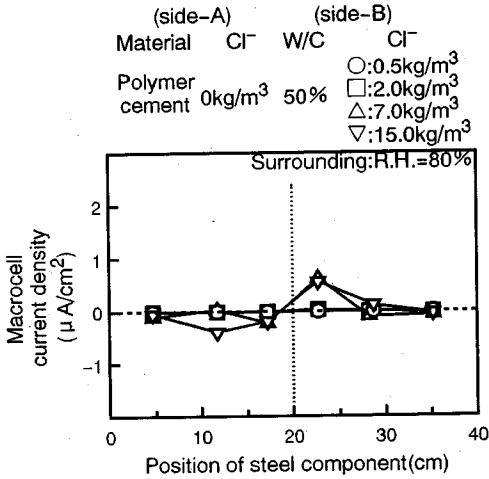


Fig. 7 Comparison of Cl<sup>-</sup> of the anode side for the corrosion mechanism.

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Fig. 5に示す。そして、次式を用いてマイクロセル電流密度を算定した<sup>14)</sup>。

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

ここで、 $b_i$ は要素鉄筋*i*におけるマイクロセル電流密度(A/cm<sup>2</sup>)、 $R_{p_i}$ は要素鉄筋*i*における分極抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )を示し、 $K$ は定数であるが本研究では、文献15)を参考にし、0.0209(V)とした。

#### d) 酸素透過量の測定

Fig. 6に、酸素透過量の測定の概略図を示す。Type Bの供試体の鉄筋とチタンメッシュ間にポテンショスタットを接続し、鉄筋を陰極、チタンメッシュを陽極として、860 mV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<sup>16)</sup>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10)および17)と同様な値である。そして、定常状態における電流を測定し、モルタル内部を透過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。

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

ここで、 $dQ/dt$ は単位時間当たりの酸素透過量(mol/s)、 $i_{lim}$ は限界電流密度(A/cm<sup>2</sup>)、 $n$ は原子価(=4)、 $F$ はファラデー定数(=96500 c/mol)を示す。

#### e) 比抵抗の測定

Type Bのモルタル供試体および $\phi 10 \times 20$  cmの

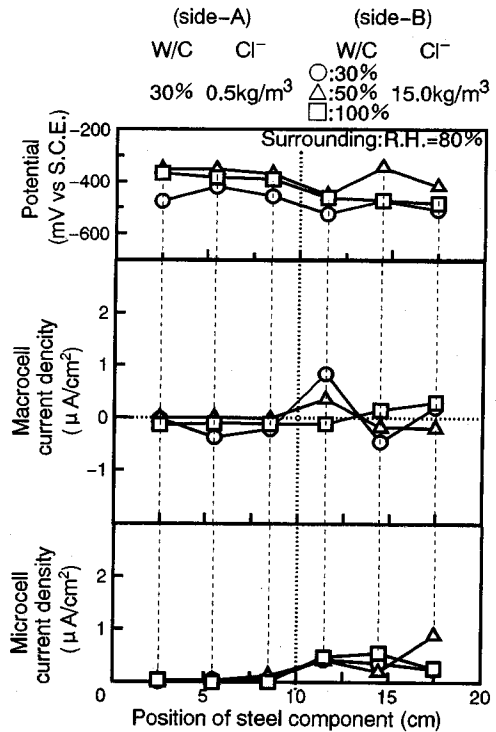


Fig. 8 Comparison of W/C of the anode side for the corrosion mechanism.

コンクリート供試体を用い、各外部環境中において、交流インピーダンス法により測定した。

### 3. 材質の違いが打継目近傍の腐食発生に与える影響 (シリーズ1)

#### (1) 塩化物イオン含有量の相違がマクロセル発生機構に及ぼす影響

塩化物イオン含有量がマクロセル腐食に与える影響をFig. 7に示す。同図は、A側に酸素透過量が少なく比抵抗の大きい補修材を使用し、B側に水セメント比が50%、塩化物イオン量が0.5 kg/m<sup>3</sup>、2.0 kg/m<sup>3</sup>、7.0 kg/m<sup>3</sup>および15.0 kg/m<sup>3</sup>のコンクリートを使用した場合の測定結果である。

測定の結果、B側コンクリートの塩化物イオン含有量が0.5 kg/m<sup>3</sup>および2.0 kg/m<sup>3</sup>の供試体においては、マクロセル電流密度は小さいことが確認された。しかし、塩化物イオンが7.0 kg/m<sup>3</sup>を越える供試体においては、B側コンクリートの打継目近傍に大きなアノード電流が認められ、塩化物イオンが多量に浸透しているコンクリートを断面修復した場合、既設コンクリートの打継目近傍で腐食が進行することが確認された。

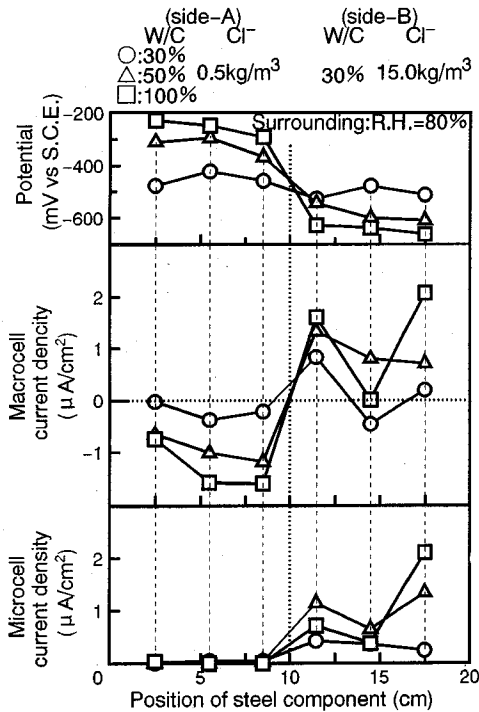


Fig. 9 Comparison of W/C of the cathode side for the corrosion mechanism. (mortar)

(2) モルタル、コンクリートあるいは補修材の材質がマクロセル腐食に及ぼす影響

a) モルタルを用いた実験

塩化物イオンを含むモルタルの水セメント比が、自然電位、マクロセルおよびマイクロセル電流密度に与える影響を Fig. 8 に示す。同図は、A側モルタルの水セメント比が30%、塩化物イオン含有量は0.5 kg/m<sup>3</sup>とし、B側モルタルの水セメント比を30%、50%、100%、塩化物イオン含有量は15.0 kg/m<sup>3</sup>とした場合の測定結果である。

実験の結果、塩化物イオン含有量の多いB側の自然電位がA側と比較して卑な値を示している。また、鉄筋要素間を流れる電流から推定したマクロセル電流密度は、A側がカソード電流（マイナス）、B側がアノード電流（プラス）を示している。そして、鉄筋要素毎の分極抵抗から推定したマイクロセル電流密度については、A側では全く見られず、B側でのみ発生していることがわかる。しかし、これらの計測の範囲では、B側モルタルの水セメント比がマクロセル腐食に及ぼす影響は明確には確認されない。

一方、塩化物イオン含有量の少ないA側モルタルの水セメント比が、自然電位、マクロセルおよびマイクロセル電流密度に与える影響を Fig. 9 に示す。

実験の結果、自然電位はいずれの配合においても、

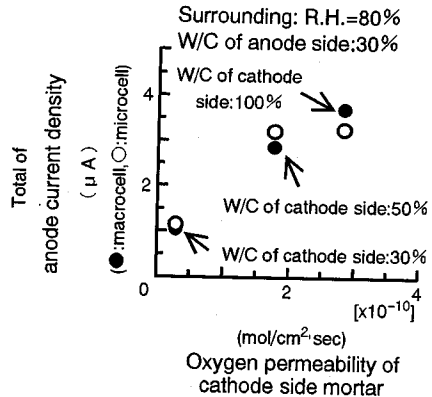


Fig. 10 Comparison between oxygen permeability and corrosion rate.

A側で貴、B側で卑な値を示しており、先の実験結果と同様であった。しかし、A側とB側の自然電位の相違を見ると、カソード側となっているA側モルタルの水セメント比が大きくなるに従って、自然電位の差は大きくなっている。

マクロセル電流密度に関しても、A側は全てカソード電流であるが、B側では打継目近傍を中心に、大きなアノード電流が確認される。また、カソード側の水セメント比が大きい程、B側に見られるマクロセルによるアノード電流の総量は大きくなることも確認された。

マイクロセル電流密度に関しては、全てB側の鉄筋に見られ、その分布形状は、マクロセル電流密度と類似した傾向を示している。

以上の検討の結果、カソード側となっているA側モルタルの水セメント比がマクロセル腐食に影響を与えることがわかった。これを、A側モルタルの酸素透過性の面から検討を加えてみる。すなわち、A側モルタルの酸素透過量をType B供試体により測定し、同様な条件下でType A 供試体において測定されたマクロセルおよびマイクロセル電流密度のアノード側の値(正の値)を各々足し合わせ、両者を比較した。

測定結果を Fig. 10 に示す。同図より、A側モルタルの水セメント比が増加すると酸素透過量は増加し、さらにアノード側の腐食電流密度の和も増加することがわかる。従って、カソード側となっているA側モルタルの酸素供給量がマクロセル腐食の形成とその後の進行に大きな影響を与えていると推測される。

b) コンクリートによる実験

しかし、既設構造物の補修に使用される断面修復材は、モルタルと比較して酸素透過性能は低く、比抵抗が大きいため、断面修復材を使用した場合の

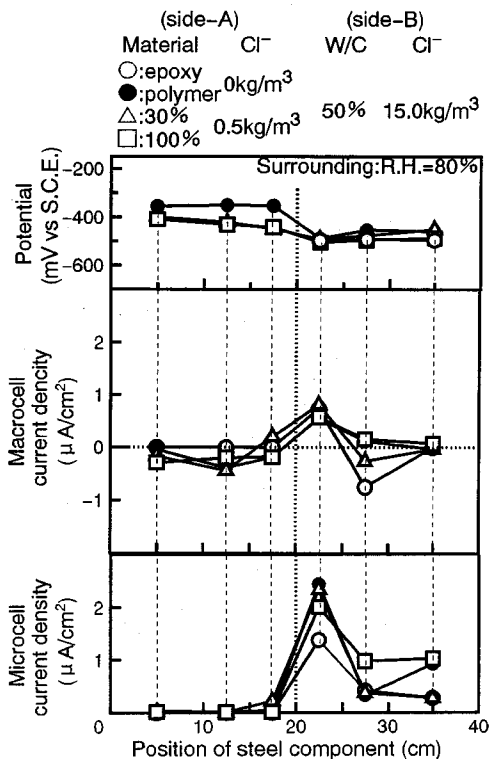


Fig. 11 Comparison of W/C of the cathode side for the corrosion mechanism. (concrete) (Potentials of steels in epoxy can't be measured.)

マクロセル腐食はモルタル供試体の場合と異なることが予想される。

Fig. 11 に、A側に補修材あるいはコンクリート、B側に水セメント比が50%、塩化物イオン含有量が15.0 kg/m<sup>3</sup>のコンクリートを使用した場合の、自然電位、マクロセルおよびマイクロセル電流密度の測定結果を示す。なお、エポキシ樹脂系補修材内部の鉄筋の自然電位は測定不能であったため、同図には記載していない。

自然電位分布は、先のモルタル供試体と同様にA側が貴、B側が卑な電位を示している。

しかし、マクロセル電流密度の分布にはモルタル供試体の場合と若干異なる傾向が見られる。すなわち、マクロセル電流密度はB側コンクリートの中でも、打継目近傍の鉄筋要素に顕著に見られ、他の鉄筋要素の電流密度は大きくない。しかも、一部の供試体においては塩化物イオン含有量の多いB側の中で、アノード部分とカソード部分に分かれていることが確認された。

マイクロセル電流密度に関しては、マクロセルによ

Table 7 Resistance of side-A material.

Material	Resistance (k Ω · cm)
Mortar W/C30%	13.99
Mortar W/C100%	3.77
Polymer cement	31.9
Concrete W/C30%	18.44
Concrete W/C100%	16.03

(Resistance of epoxy can't be measured.)

るアノード電流が卓越した部分 (B側コンクリートの打継目近傍) で大きな値が測定された。

A側の材質が腐食に与える影響としては、水セメント比が100%のコンクリートにおいて、若干電流密度が大きくなっている程度で、モルタル供試体の場合とは異なり、材質の違いによる顕著な傾向は見られなかった。

このような、モルタル供試体とコンクリート供試体の違いは、Table 7に示す、モルタル、コンクリートあるいは補修材の比抵抗の違いが大きな影響を与えているものと推測される。すなわち、コンクリート供試体においては、補修材やコンクリートの比抵抗が大きいため、A側とB側で電位差が発生しても、これらの中でマクロセルを形成することが難しく、電位勾配の影響を受けしかも比抵抗の小さいコンクリート中の鉄筋要素 (B側コンクリート中の打継目に近い鉄筋要素) に、腐食セルが形成されたものと推測される。

#### 4. 外部環境中の湿度および温度がマクロセル腐食速度に及ぼす影響 (シリーズ2)

これまでの検討の結果、マクロセル腐食の進行にはカソード側の材料の酸素透過量と比抵抗が大きく影響しているものと推測された。酸素透過量や比抵抗は、それぞれ外部環境の湿度や温度にも大きく影響される。ここでは、外部環境の相対湿度や温度が腐食速度に与える影響について検討を行った。

##### (1) 外部環境中の湿度がマクロセル腐食に及ぼす影響

外部環境の湿度の相違が、Type A 供試体で測定されたマクロセル電流密度のアノード電流密度 (正の値) の和に及ぼす影響を Fig. 12 に示す。実験の結果、アノード側のマクロセル電流密度の和は相対湿度80%の場合最大となり、水中および乾燥空気中で

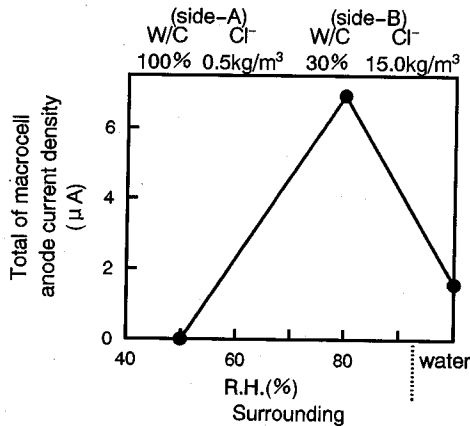


Fig. 12 Influence of relative humidity on the corrosion rate.

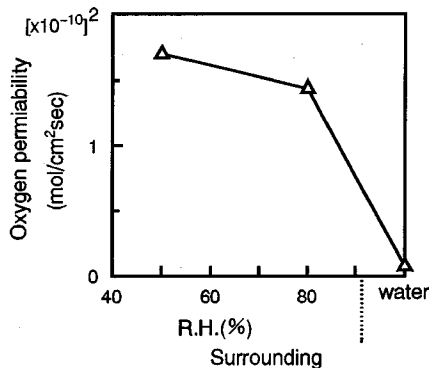


Fig. 13 Comparison between relative humidity and oxygen permeability.

は小さくなることが認められた。これは、相対湿度の影響を受けて、カソード側材料の酸素透過量や比抵抗が変化したことが主要因と考えられる。なお、水中に曝露した供試体については、3ヶ月間の曝露期間中に若干塩分の移動が生じたが、腐食の発生に影響を及ぼさない程度であった。

Fig. 13 に、相対湿度と酸素透過量の関係を、Fig. 14 に、相対湿度と比抵抗の逆数との関係を示す。これによると、酸素透過量は相対湿度が増加すると小さくなる傾向が認められる。一方、比抵抗の逆数は相対湿度が上昇すると大きくなる。

従って、外部環境中の相対湿度が低い場合、酸素透過量は大きくなり、カソード反応を進行させる方向に働くが、比抵抗の逆数が小さくなるために腐食速度は抑えられ、逆に、相対湿度が高い場合や水中に曝露された場合では、酸素透過量が制限されるために腐食速度が遅くなるようである。

ここでの実験の範囲では、相対湿度が80%程度で最も大きな腐食速度を示したが、この値は材質やか

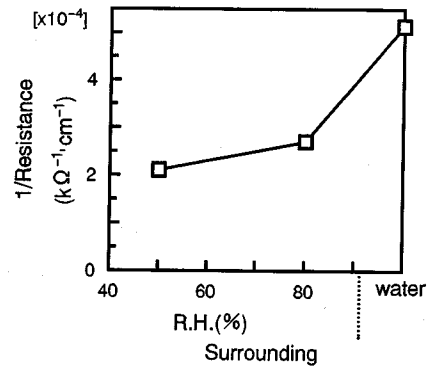


Fig. 14 Comparison between relative humidity and resistance.

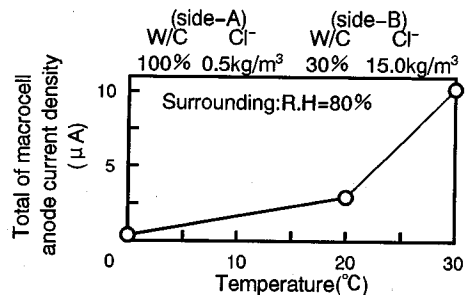


Fig. 15 Influence of temperature on the macrocell corrosion.

ぶり等の影響を受けて変化することも考えられる。

## (2) 外部環境の温度がマクロセル腐食に及ぼす影響

外部環境の温度の相違が、Type A 供試体の鉄筋のマクロセル電流密度のアノード電流密度の和に及ぼす影響を Fig. 15 に示す。同図より、温度が上昇すると電流密度は増加し、温度が低下すると減少することが認められる。一般に温度の上昇は化学反応速度を増加させ、80°C以下の自然環境下での腐食においても、温度の上昇とともに腐食速度は増加すると言われている<sup>19)</sup>。従って、外部環境の温度の変化に伴いマクロセル電流密度が影響を受けたと考えられる。

## 5. 断面修復における補修材の品質と腐食発生機構

### (1) 打継ぎに伴う腐食の発生機構の推定

これまでの実験の範囲から、断面修復を行った場合に発生する腐食の形成過程は以下のように推測することができる。

①塩化物イオンの有無によって、コンクリートある



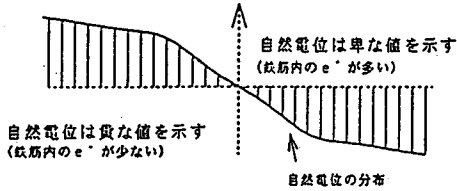
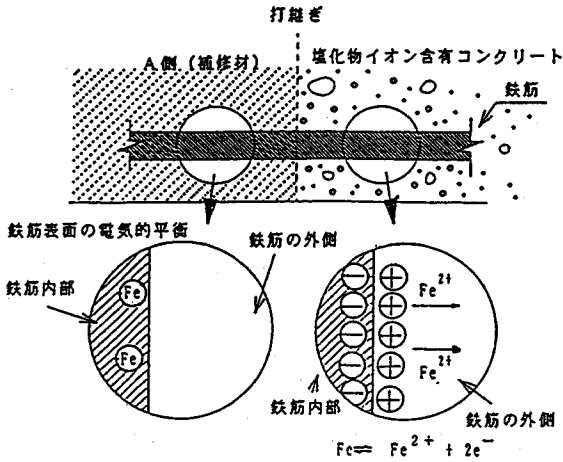


Fig. 16 Influence of Cl<sup>-</sup> content on potential distribution.

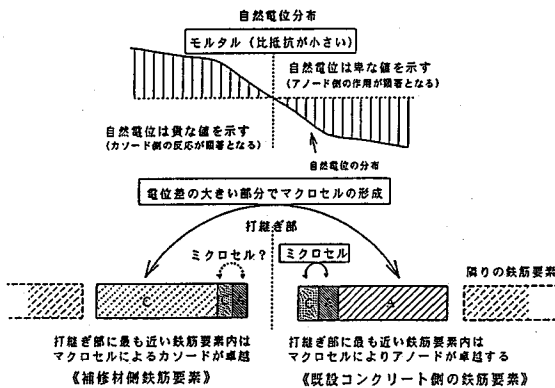


Fig. 17 Propagation process of corrosion on rebars placed in the low resistant material.

いは補修材中の鋼材は、例えば Fig. 16 に示すような平衡状態に移行する。この結果、それぞれの鉄筋位置で自然電位に違いが現れる。

- ②電氣的に一体化した鉄筋において、場所によって自然電位に相違があると、電池作用によりアノードあるいはカソードが形成される。
- ③このとき、モルタルなど比較的比抵抗の小さい材料の場合は、打継目を境としたマクロセルを形成することが可能である。このような場合の鉄筋要素内の腐食セルの面積比を、概念的に Fig. 17 に示す。
- ④一方、比抵抗の大きいコンクリートや補修材の場合、打継目を挟んで鉄筋の自然電位に違いがあつて

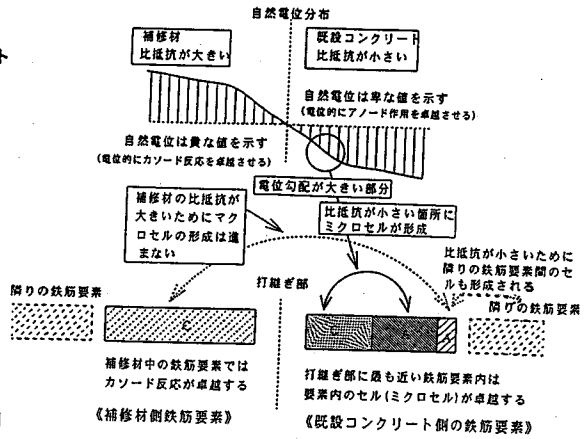


Fig. 18 Propagation process of corrosion on rebars placed in the high resistant material.

も、マクロセルを形成することが難しい。しかし、自然電位の違いによってできた電位勾配は、比抵抗の小さい部分（塩化物イオンを含む側）にも及んでおり、この部分で腐食セルが形成される。このような場合の腐食セルの面積比を概念的に Fig. 18 に示す。

⑤補修材やコンクリートの材質は、外部環境の影響を受けるため、打継部近傍の腐食の進行も、環境条件の影響を受け、複雑に変化するものと考えられる。

## (2) 各材料の分極曲線と打継部近傍の腐食

以上のように考えると、断面修復材と既設コンクリートの材質が、マクロセル腐食の形成に大きく関与しているものと推測される。

ここでは、使用される材料（補修材）や塩化物イオンを含む既設コンクリート中の鉄筋が示す分極曲線の特徴から、打継ぎを行った場合に発生する腐食の進行過程を考察した。

すなわち、Type C 供試体において、リード線を接続した状態で計測される各鉄筋要素の電位とマクロセル電流密度より、鉄筋要素ごとの電位と電流密度の関係は、Fig. 19 のようになる。測定データにはばらつきが大きいですが、図中に示すような分極曲線を想定することも可能である。

これら想定される分極曲線を同一図面上にプロットしたものを Fig. 20 に示す。塩化物イオンを 15.0 kg/m<sup>3</sup> 混入したコンクリート中の鉄筋の電位は単な値を示しており、しかも電位-電流の曲線は平坦であることがわかる。

一方、カソード側となっているポリマーセメントモルタル中の鉄筋の自然電位は、カソード電流密度が小さい範囲では、他の材料に比較して貴な値を示している。したがって、塩化物イオン含有量の多い

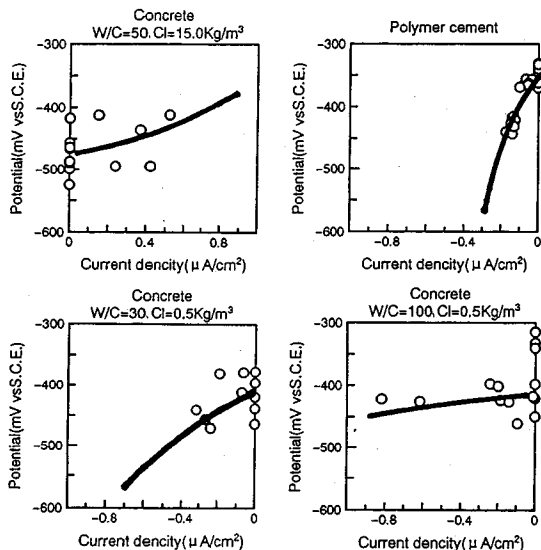


Fig. 19 Relation between potential and current.

コンクリートとの間で、鉄筋の電位の違いが大きく、マクロセル腐食の駆動力が大きいのと推測される。しかし、ポリマーセメントの分極曲線の勾配が急なために、両者の分極曲線の交点で示されるマクロセル腐食の電流密度は小さくなるものと思われる。従って、このような材料を用いて断面修復を行うと、打継目を境として大きな電位差が生じることとなるが、これらの間のマクロセル腐食の進行は大きくないものと考えられる。しかし、電位の勾配が大きいため、比抵抗の小さいコンクリート側の打継目近傍で腐食が激しくなったものと推測される。

一方、比較的健全なコンクリートを断面修復材として用いた場合、内部鉄筋のカソード分極曲線は、全体的に卑な電位を示しており、塩化物イオンを含むコンクリートとの電位の違いは小さいことがわかる。従って、マクロセルの駆動力としては小さくなるものと考えられるが、分極曲線が平坦なために、分極曲線の交点で示されるマクロセル腐食の電流密度は大きくなっている。従って、このような材料を断面修復材として使用すると、打継目を境としたマクロセルの形成が顕著となるものと考えられる。

しかし、補修材として用いたコンクリートの水セメント比を小さくすると、分極曲線の勾配が急になり、マクロセル腐食の電流密度は小さくなる傾向にあることが理解される。

従って、断面修復に用いる材料の評価は、事前にそれぞれの材料の中に鉄筋を埋め込んで、分極曲線を測定することにより可能と考えられる。さらに、分極曲線の形状から、断面修復後の腐食の進行過程

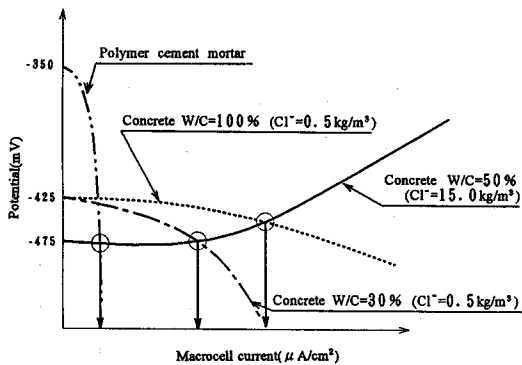


Fig. 20 Relation of each material's polarizations.

を推定することも可能と思われる。

## 6. 結論

本研究では、塩分を多量に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ち継ぐ「断面修復工法」により補修された打継部を対象とし、打継目を境とする母材と補修材間の塩化物イオン含有量の相違により生じるマクロセルの発生機構および腐食速度について、実験的に検討を行った。本研究により得られた結論を以下に記す。

- ①モルタルあるいはコンクリート部材に含まれる塩化物イオン含有量が異なることにより、打継目付近の鉄筋に腐食速度（電流密度）の増加が確認された。この傾向は、補修材に比抵抗の大きいエポキシ樹脂系補修材あるいはポリマーセメントモルタルを用いた場合においても同様であった。
- ②コンクリート中の塩化物イオン含有量が少ない場合、断面修復を行っても顕著なマクロセル腐食の発生は見られなかった。本研究の範囲では、既設コンクリート側の塩化物イオン含有量が  $2.0 \text{ kg/m}^3$  以下であれば、顕著な腐食の進行は確認されなかった。
- ③補修材の比抵抗や酸素透過量が小さくても、打継目を境として自然電位が異なる場合、塩化物イオンを含む既設コンクリート側で腐食が促進されることが確認された。
- ④腐食速度が最大となる相対湿度が存在することが分かった。これは、外部環境中の相対湿度が上昇すると内部鉄筋への酸素透過量が減少し、逆に湿度が低下すると比抵抗が増加して、腐食速度を抑制させることが原因と考えられる。
- ⑤外部環境の温度が上昇すると腐食速度は増加し、温度が低下すると減少することが分かった。

⑥断面修復に伴う腐食の発生とその後の進行は、打継がれる材料の分極曲線より推定可能であることがわかった。

⑦断面修復工法としてこれまでに実績の多い、「ポリマーセメントモルタル」を用いた場合、塩化物イオン含有量の多いアノード側鉄筋の電位とポリマーセメントモルタル中のカソード側鉄筋の電位の差が大きく、マクロセル腐食を起こさせる駆動力が大きいことが推測された。しかし、ポリマーセメントモルタル中の鉄筋のカソード分極曲線の電位-電流勾配が急であるために、マクロセルによる腐食速度は低く抑えられる。

謝辞：本研究において、実験ならびに論文作成に尽力を戴いた東京工業大学大学院柴田常德君に深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 河野広隆, 西崎到: 塩害・中性化と補修・補強方法, コンクリート工学, Vol. 31, No. 7, pp. 65~68, 1993. 7.
- 2) A. W. Beeby: Concrete in the Oceans, Technical Report No. 1 (IRIA/UEG), *Cement and Concrete Association, Slough, England*, pp. 77, 1978.
- 3) 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.
- 4) 出村克直, 大濱嘉彦, 伊部博: 補修後5年を経過した鉄筋コンクリート造建物の鉄筋腐食, 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.
- 5) P. Schiessl and M. Raupach: MACROCELL STEEL CORROSION IN CONCRETE CAUSED BY CHLORIDES, *Second CANM ET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Canada*, pp. 565-583, 1991. 8.
- 6) 大野義照, 鈴木計夫, 田村博: 電気化学的測定による

コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究(塩化物濃度の異なる電池), セメント・コンクリート論文集, No. 44, pp. 388~393, 1990. 12.

- 7) 中村一彦, 佐伯電彦: 補修した構造物の塩害再発メカニズムに関する一実験, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, 第5部, pp. 272~273, 1993. 9.
- 8) 宮里心一, 大即信明, 長滝重義, 守分敦郎: コンクリートの打継ぎが鉄筋の腐食に及ぼす影響, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 第5部, pp. 542~543, 1994. 9.
- 9) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 宮里心一: 断面修復が鉄筋のマクロセル腐食におよぼす影響, 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. 7~14, 1994. 10.
- 10) 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回年次学術講演会概要集, 第5部, pp. 265~266, 1983. 9.
- 11) 氏家勲: コンクリートの透気係数の定量的検討と密実性評価の適用性に関する研究, 東京工業大学学位論文, 1994.
- 12) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性に関する研究, コンクリート工学, Vol. 24, No. 12, pp. 91~106, 1986. 12.
- 13) 宮川豊章, 松村卓郎, 小林和夫, 藤井学: 鋼材腐食から見たコンクリート中での酸素透過性の検討, 土木学会論文集, 第408号/V-11, pp. 111~120, 1989. 8.
- 14) 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について, 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.
- 15) 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.
- 16) 田村英雄, 松田好晴: 現代電気化学, 培風館, 1977. 4.
- 17) O. E. Gjorv, et al: Diffusion of dissolved oxygen through concrete, *Corrosion/76, Paper No. 17*, pp. 17/1~17/13, 1976. 3.
- 18) 伊藤伍郎: 腐食速度と防食技術, コロナ社, 1979.

(1995. 7. 26 受付)

## THE EXPERIMENTAL STUDY ON CORROSION MECHANISM OF REINFORCED CONCRETE AT LOCAL REPAIR PART

Shigeyoshi NAGATAKI, Nobuaki OTSUKI, Atsurou MORIWAKE  
and Shin-ichi MIYAZATO

When reinforced concrete structures have been suffered from chloride induced corrosion, repair works were done. However, there is possibility that the bars around the joint will corrode again with macro-cell corrosion, because the concentrations of contained chloride ions are different between the new materials and old concrete members. Therefore, in this study macrocell mechanism and macrocell corrosion rate of steels in concrete members are experimentally investigated. As a result, it can be confirmed as follows:

- ① Influence of W/C, materials and chloride ion on macro-cell initiation mechanism.
- ② Influence of humidity and temperature of surrounding on macro-cell corrosion rate.