コンクリートの欠陥部に生じる
中性化による鉄筋腐食の形態と速度†

大 即 信 明* 宮 里 心 一* 木 村 勇 人**

Corrosion Cell Formation Pattern and Rate of Steel Corrosion
Induced by Carbonation in Concrete with Defects

by

Nobuaki OTSUKI*, Shin-ichi MIYAZATO* and Hayato KIMURA**

The objective of this study was to analyze comprehensively the corrosion cell formation pattern (macro-cell and micro-cell) and the corrosion rate induced by carbonation in concrete with joints or cracks. First, mortar tests were performed using specimens with model defects that simulated cold joints or bending cracks. Herein three important factors that caused steel corrosion were investigated in detail. These factors were : 1) carbonized location, 2) supply of water and oxygen, and 3) water-cement ratio of mortar. Next, concrete tests were performed using specimens with cold joints and bending cracks. The results obtained in this study were as follows ; a) 27 cases of which the carbonized location, supply of water and oxygen, and the water-cement ratio of mortar differed were experimented. As results, the corrosion cell formation pattern and the corrosion rate were comprehensively analyzed based on unified conditions. b) In the case of carbonation-induced corrosion with defects, macro-cell corrosion would be formed regardless of the water-cement ratio. Also, the corrosion rate decreased with the decreasing of water-cement ratio. c) The result b) was confirmed not only in mortar tests but also in concrete tests. d) According to above results, it could be said that the low water cement ratio was excellent in the durability for the steel corrosion, when concrete with defects received the influence of carbonation.

Key words : Carbonation-induced corrosion, Defects, Macro-cell, Micro-cell, Corrosion rate

1 序 論

1・1 背景

コンクリート内部の鉄筋は高アルカリ環境下にあるため、鉄筋表面には不動態皮膜が形成され、腐食から保護されている。しかしながら、二酸化炭素の浸透によりコンクリートが中性化した場合、内部鉄筋の腐食は誘発される。特に、コールドジョイントや曲げひび割れなどの欠陥部では、腐食要因物質の二酸化炭素、水分や酸素が局所的に多量に侵入する。これに伴い、早期に腐食が発生し、さらに増進することになる。また、その腐食性状は欠陥部の種類や外部環境、コンクリートの水セメント比によって変化すると考えられる。したがって、欠陥部を有する鉄筋コンクリート部材に生じる中性化による腐食が、どのような腐食形態（マクロセル腐食、ミクロセル腐食）で、かつどれだけの腐食速度かを詳細に検討し整理する必要がある。

これまで、欠陥を考慮しない鉄筋コンクリート部材に対する中性化腐食を検討した研究はある。例えば1), 2), 3) しながら、実構造物で散見される打継目やひび割れ等の欠陥の影響を考慮し、腐食形態および腐食速度に関して統一した基準でかつ網羅的に整理・比較した研究は著者らの知る限りない。

1・2 目的

以上の背景から、本研究では、1) モデル欠陥部に生じる中性化による腐食の形態と速度を、統一した基準で網羅的に整理する、2) 中性化の影響を受ける鉄筋コンクリート部材の代表的な欠陥部であるコールドジョイント部および曲げひび割れ部を対象とし、腐食の形態と速度を評価する、ことを目的とし実験的検討を行った。

Table I . Physical property and chemical analysis of cement.

Physical tests		Chemical analysis(%)	
Density(g/cm ³)	3.16	MnO	1.6
Blaine Fineness(cm ² /g)	3270	SO ₃	1.9
Setting time (min)	initial 155	Ig. Loss	1.4
	final 229	Alkalis as Na ₂ O	0.62
Compressive Strength(MPa)	60.2 (28day)	Cl	0.006

Table II . Physical property of fine aggregate.

Density (g/cm ³)	2.60
Coefficient of water absorption (%)	2.20
Fineness Modulus	2.59
Max grain size (mm)	5

Table III . Chemical analysis of steel.

(%)	
Fe	99.13
C	0.12
Si	0.12
Ma	0.58
P	0.031
S	0.023

† 原稿受理 平成 12 年 11 月 1 日 Received Nov. 1, 2000

* 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 〒152-8552 東京都目黒区大岡山, Dept. of International Development Eng., Tokyo Inst. of Tech., Meguro-ku, Tokyo, 152-8552

** 五洋建設(株) 〒980-8605 仙台市青葉区二日町, Penta-Ocean Construction Co., Aoba-ku, Sendai, 980-8605

2 モルタル試験

2・1 実験概要

2・1・1 使用材料 セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。物理的性質および化学成分を Table I に示す。細骨材は千葉県小櫃産の陸砂を使用した。物理的性質を Table II に示す。鉄筋は丸鋼 (SR235, $\phi 9$ mm) を使用した。化学成分を Table III に示す。混和剤として、ナフタレンスルホン酸系高性能 AE 減水剤、およびメチルセルロース系増粘剤を使用した。

2・1・2 供試体概要 供試体概要を Fig. 1 に示す。鋼材内部を流れる電流を測定するため 9 つの要素に分割した鉄筋を用いた。鋼材を 5mm, 10mm, 20mm, 30mm に切断し、紙やすりで黒皮を剥いだ。このうち 5mm, 10mm, 30mm の鉄筋要素には両端部、20mm の鉄筋要素には一方の端部のみリード線をはんだ付けした。その後、中央に 5mm の鉄筋要素を 3 本配置し、その両

端に 10mm, その両端に 30mm, 最端部に 20mm の鉄筋要素が連結するように、各鉄筋要素間をエポキシ樹脂で絶縁接続した。その後、隣接するリード線を接続して電氣的に一本の鋼材とみなせるようにした。なお、欠陥部に近い位置の腐食速度を詳細に検討するため、9 つの鉄筋要素のうち中央の鉄筋要素を特に細かく分割した。

打設方法を以下に示す。前処理された鋼材を型枠中心に配置した。供試体中心に欠陥部を生じさせるため、モルタルは 2 層に分けて打設した。はじめに、直径 50mm, 高さ 200mm の型枠半分まで打設した。24 時間後表面のレイタンスを十分に除去し、2 層目を打設した。また、打設の際に No.1 ~ No.9 供試体 (Table V 参照) においては、打継面に厚さが 0.5mm のろ紙を挟んだ。No.10 ~ No.18 供試体においては、打継面および打継目を中心に 21mm の範囲の鉄筋周囲にろ紙を巻いた。ここで鉄筋周囲のろ紙は、曲げひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートのはく離⁴⁾を模擬するものである。No.19 ~ No.27 供試体においては、二酸化炭素、酸素および水分を内部鉄筋全体に様に供給させるため、ろ紙を用いていない。

モルタルの配合を Table IV に示す。砂セメント比は 2.5 とした。また、水セメント比が 0.3 のモルタルには、高性能 AE 減水剤をセメントに対して 2.0wt% 添加した。一方、水セメント比が 0.7 のモルタルには増粘剤をセメントに対して 1.2wt% 添加した。

養生方法を以下に示す。脱型後全ての供試体は湿潤環境中にて 4 週間の初期養生を行った。その後、中性化促進環境下 (二酸化炭素濃度 10%, 温度 40℃, 湿度 70%) に暴露した。この暴露期間中において、同様の条件で作製・養生された 9 種類 (ろ紙の配置 3 水準, 水セメント比 3 水準) の予備供試体を割裂し、フェノールフタレイ

Fig. 1. Configuration of specimen (mortar tests).

Table IV. Mixture proportion of mortar.

w/c	s/c	Agent (C×wt%)		Slump flow
		A	B	
0.3	2.5	2.0	—	170
0.5	2.5	—	—	200
0.7	2.5	—	1.2	260

Note) A : superplasticizer, B : high velocity agent

Table V. The experiment cases (mortar test).

No	Carbonized Location	supply of H ₂ O, O ₂	W/C
1	Joint only	wet	0.3
2			0.5
3			0.7
4		dry & wet repetition	0.3
5			0.5
6			0.7
7		dry	0.3
8			0.5
9			0.7
10	Joint and its surroundings	wet	0.3
11			0.5
12			0.7
13		dry & wet repetition	0.3
14			0.5
15			0.7
16		dry	0.3
17			0.5
18			0.7
19	the whole part	wet	0.3
20			0.5
21			0.7
22		dry & wet repetition	0.3
23			0.5
24			0.7
25		dry	0.3
26			0.5
27			0.7

Note) At supply of H₂O and O₂, wet means more H₂O and less O₂. Dry means more O₂ and less H₂O. Dry and wet repetition means both more H₂O and O₂.

ンアルコール溶液を噴霧することにより、内部鉄筋近傍におけるモルタルの中性化進行程度を評価した。これにより、Table Vに示す各位置において鉄筋近傍のモルタルが中性化したことを確認した後、本試験養生を開始した。ここで本試験養生とは、Table Vに示す水分および酸素の供給を行うために実施した湿潤養生（湿度 90% 室温 20℃）、乾燥養生（湿度 50% 室温 20℃）、乾湿繰返し養生（24 時間の湿潤状態と、60 時間の乾燥状態が繰り返される環境）のことである。なお、全ての供試体において本試験期間は 56 日間である。

2・1・3 実験ケース 実験ケースを Table V に示す。水セメント比は 0.3, 0.5, 0.7 の 3 水準とした。水分・酸素の供給条件は、一般の外部環境を考慮し、水分が多く酸素が少ない湿潤環境、水分および酸素がともに多い乾湿繰返し環境、水分が少なく酸素が多い乾燥環境の 3 水準とした。また、中性化位置は欠陥部、欠陥部と近傍、全体の 3 水準とした。それぞれを組み合わせた 27 水準について、各 2 本の供試体を作製した。

2・1・4 腐食電流密度の定義および測定方法 本研究では、鉄筋要素間の腐食電流をマクロセル電流、鉄筋要素内の腐食電流をマイクロセル電流と定義した。

マクロセル電流の測定概要を Fig. 2 に示す。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。次に、対象とする鉄筋要素の両端から出入する電流を合計した。この電流を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。鉄筋要素 i のマクロセル電流密度 I_{macro} は次式で表わせる。

$$I_{macro} = \frac{I_{i-1,i} - I_{i,i+1}}{S_i} \quad (1)$$

ここで、 I_{macro} = 鉄筋要素 i のマクロセル電流密度 (A/cm^2)、 $I_{i,j}$ = 鉄筋要素 i と j 間を流れる電流 (A)、 S_i = 鉄筋要素 i の表面積 (cm^2) を示す。

そして、対象とする鉄筋要素がアノードの場合、電流密度は正として表わした。一方、対象とする鉄筋要素がカソードの場合、電流密度は負として表わした。なお、腐食電流密度が $100\mu A/cm^2$ は、腐食速度が $1.16mm/年$

Fig. 2. Measurement of macro-cell current.

Fig. 3. Measurement of polarization resistance.

に相当する。

次に、マイクロセル電流密度の測定方法を示す。対象とする鉄筋要素のみの分極特性を測定するため、各鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断した。この状態で、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。測定概要を Fig. 3 に示す。測定は、1000Hz から 0.01Hz 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ールコールプロットを用いて算定した。マイクロセル電流密度 I_{micro} は文献 5) を参考にして次式により算定した。

$$I_{micro} = \frac{K}{R_{Pi}} \quad (2)$$

ここで、 I_{micro} = 鉄筋要素 i におけるマイクロセル電流密度 (A/cm^2)、 R_{Pi} = 鉄筋要素 i における分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)、 K = 定数 (文献 5) を参考にし、0.0209(V) を示す。

なお、各鉄筋要素間を接続するリード線を切断した状態で測定した。したがって、対象とする鉄筋要素と他の鉄筋要素は電氣的に接続されておらず、切断前と切断後の腐食回路、腐食反応の釣り合い状態は異なる。ただし、分極抵抗とは電気二重層（不動態）の抵抗である。ここで、電気二重層（不動態）の顕著な破壊は、本実験の範囲では主に二酸化炭素の供給に伴うモルタル中細孔溶液の pH 低下により生じる。また、分極抵抗を測定するためにリード線を切断した時間は 1 時間以内である。したがって、リード線が切断されている時間中に、二酸化炭素の供給に伴う pH 低下により破壊される電気二重層

Total Corrosion Electricity Density (C/cm^2) = $A_1 + A_2$
 $A_1 = \int_0^{201600} \text{Macro-cell anode current density (A/cm}^2\text{)} dt$
 $A_2 = \int_0^{201600} \text{Micro-cell current density (A/cm}^2\text{)} dt$
 Where, A_1 is Macro-cell electricity density, A_2 is Micro-cell electricity density.

Fig. 4. Definition of total corrosion electricity.

(不動態)は僅かであると考えられる。このため、本実験の範囲では、リード線の切断が分極抵抗値に及ぼす影響は小さいと考えられる。

2・2 腐食形態および腐食速度の評価法

2・2・1 総腐食電気量密度の定義 56日間の本試験期間中に流れたマクロセルアノード電流密度とミクロセル電流密度を時間積分し、マクロセル電気量密度とミクロセル電気量密度を求めた。さらに、それぞれを合計し総腐食電気量密度を算定した。すなわち、総腐食電気量密度とは、Fig. 4に示す面積の和である。

2・2・2 腐食形態の評価 腐食形態に関する評価では、①腐食位置の判定、②マクロセル卓越型腐食とミクロセル卓越型腐食の区別を行った。ここで、判定基準を示す。①に関しては内部鉄筋の観察(マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度の測定が終了した供試体を割裂し、内部鉄筋の腐食状態を観察)、および測定された総腐食電気量密度が相対的に高い場所を限定し、アノード部と判定した。②に関しては、マクロセル電気量密度とミクロセル電気量密度の最大値を比較した。ここでは明らかに両者に差がみられる場合を卓越型として基準を設けた。すなわち、「 $2/3(0.67) \geq (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度})$ 」の時をミクロセル卓越型腐食とした。一方、「 $3/2(1.50) \leq (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度})$ 」の時をマクロセル卓越型腐食とした。また、「 $2/3 < (\text{マクロセル電気量密度} / \text{ミクロセル電気量密度}) < 3/2$ 」の時をマクロセル・ミクロセル併存型腐食とした。

2・2・3 腐食速度の評価 腐食速度に関する評価は、最高総腐食電気量密度の値により判定した。本研究では宮川らの研究⁶⁾を参考にし、鉄筋腐食減少量と鉄筋耐力の関係から30年後における鉄筋耐力が、腐食速度の遅い方では健全時の70%以上、一方速い方では健全時の35%以下となる腐食減少率を求め、その総腐食電気量密度を逆算した。そして56日間の総腐食電気量密度の最高値が $20\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.034\text{mm}/\text{年}$ に相当)よりも低い場合を腐食速度が遅い、 $50\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.085\text{mm}/\text{年}$ に相当)よりも高い場合は腐食速度が速いと判定した。なお、部材の寿命を健全時の耐力の70%に低下するまでの期間と定義した時、腐食速度の遅い場合の寿命は30年以上、速

い場合の寿命は15年以内である。

2・2・4 腐食形態と腐食速度の測定例 Fig. 5に測定例を示す。これは、中性化位置が欠陥部と近傍、外部環境が湿潤、水セメント比が0.5の場合における鉄筋の腐食状態と腐食電気量密度分布である。

鉄筋の観察結果によれば、欠陥部およびその近傍において錆びていることが認められる。また、総腐食電気量密度は欠陥部とその近傍で高くなっていることが認められる。(マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度)は3.7である。以上のことから、欠陥部とその近傍がアノードとなるマクロセル卓越型腐食が進行していると判断できる。

また、最高総腐食電気量密度は $11.79\text{C}/\text{cm}^2$ である。したがって、腐食速度は遅いと判断できる。

2・3 腐食形態および腐食速度の整理

2・3・1 腐食形態 Fig. 6に腐食形態をまとめる。上段・中段・下段はそれぞれ水セメント比が0.3・0.5・0.7の結果である。各段の横軸は、外部環境すなわち水分および酸素の供給条件を示す。縦軸は、二酸化炭素の供給条件を示す。また、各楕円内の文字はアノード位置を示す。塗りつぶしはミクロセル卓越型腐食、ドット付きはマクロセル・ミクロセル併存型腐食、白ぬきはマクロセル卓越型腐食を示す。

これによると、中性化位置が欠陥部またはその近傍の場合には、その箇所が腐食することが認められた。ただし、水セメント比が0.3、中性化位置が欠陥部のみの場合には、外部環境が乾燥あるいは湿潤の時に腐食の発生が認められなかった。これは、欠陥部が中性化した場合、その部分においては不動態皮膜の破壊が促進される。しかしながら、水セメント比が低い場合、乾燥状態では水分の供給が、湿潤環境では酸素の供給が不足するため、腐食の進行は困難であったと考えられる。

Fig. 5. Example of corrosion electricity distributions along a reinforcement.

Fig. 6. Corrosion cell formation pattern and the location.

また、中性化位置が全体の場合、水セメント比が0.7の時には、アノード位置に関する定まった傾向は見られないことが認められた。これは、全体が中性化した場合には鉄筋全体の不動態が破壊される可能性はある。ただし、酸素と水分の供給条件によってアノード部の位置は変化するため、アノード部の定まった傾向は認められなかったと考えられる。なお、水セメント比が0.3や0.5の場合には、水分、酸素が十分に供給されないため腐食は進行しなかったと思われる。

さらに、全体的にマクロセル腐食が卓越する傾向が認められる。これは、中性化したモルタルでは、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化しセメントペーストが緻密化され、細孔量が減少する。⁷⁾ このため中性化の進行に伴い、欠陥部以外（欠陥の影響を受けないモルタル内部）では腐食要因である物質の供給が困難になる。その結果、欠陥部とそれ以外のモルタル部分において、内部鉄筋への酸素供給量の差が大きくなる。Table VIに、欠陥部とそれ以外のモルタル内部に位置する内部鉄筋への酸素供給量の比を示す。また、モルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量も示す。ここで、Fig. 7を用いて酸素供給量の測定方法を記す。No.4～No.6供試体において対象とする鉄筋要素とステンレス間にポテンショスタットを接続し、鉄筋を陰極、ステンレスを陽極として、860mVの電位差を設けた。⁸⁾ この電位差は、予め同様の供試体のカソード分極曲線を測定し、限界電流密度となる電位であることを確認した。そして、定常状態における電流を測定し、モルタル内部を通過し鉄筋表面でのカソード反応において消費される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 = 単位時間あたりの任意の鉄筋要素への酸素供給量 (mol/cm²sec), i_{lim} = 限界電流密度 (A/cm²), n = カソード反応において1molの酸素分子と反応する電子数 ($n=4$), F = ファラデー定数 (= 96500c/mol) を示す。

以上の測定により求めた値を用い、欠陥部とそれ以外のモルタル内部に位置する内部鉄筋への酸素供給量の比を算定した。したがって、この値が大きいほど、欠陥部

Fig. 7. Measurement of oxygen permeability.

の鉄筋への酸素供給量が、モルタル内部の鉄筋への酸素供給量と比較して、相対的に多量になることを意味する。Table VIによると、中性化の影響を受けた供試体では、欠陥部とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比が大きくなることが確認できる。すなわち、中性化の影響を受けた供試体では、欠陥部とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への腐食要因物質の供給量の偏りが大きくなる。このため、マクロセルが形成されやすくなると考えられる。

2・3・2 腐食速度 Fig. 8に腐食速度の判定結果をまとめる。各段の横軸、縦軸はFig. 6と同様である。また、楕円内の値は最高総腐食電気量密度を示す。

これによれば、全体的に水セメント比が低いほど腐食速度が遅いことが認められる。これは、水セメント比が低いほど、物質供給量が減少するためと考えられる。

2・4 まとめ

本章では、モルタル試験により腐食形態と腐食速度を統一した条件でかつ網羅的に整理した。得られた結論を以下にまとめる。

(1) 腐食形態を整理した結果、水セメント比に拘わらず、マクロセル卓越型腐食が進行する傾向にあることが明らかとなった。

Fig. 8. Corrosion rate.

Table VI. Ratio between oxygen supply quantity to the steel across the joint and in mortar.

W/C	No- Carbonation	Carbonation		
	0.5	0.3	0.5	0.7
Oxygen supply quantity to the steel through the joint per unit area (mol/cm ² /sec)				
Oxygen supply quantity to the steel in mortar per unit area (mol/cm ² /sec)	4.6	65.6	23.6	6.0
Oxygen supply quantity to the steel in mortar per unit area (10 ⁻¹¹ mol/cm ² /sec)	3.35	0.09	0.30	0.50

(2) 腐食速度を整理した結果、水セメント比が低いほど腐食速度は遅くなることが明らかとなった。

3 コンクリート試験

3・1 実験概要

3・1・1 使用材料 セメント、細骨材および高性能AE減水剤は2・1・1項で示した材料と同じである。粗骨材は東京都奥多摩産の砕石を使用した。粗骨材の主な物理的性質を、Table VIIに示す。また、水セメント比が0.5および0.7のコンクリートに対し、ナフタレン系減水剤およびAE剤を使用した。

3・1・2 実験ケース 実験ケースをTable VIIIに示す。コールドジョイント部に生じる腐食を対象とした検討、および曲げひび割れ部に生じる腐食を対象とした検討を行なった。水セメント比は0.3、0.5、0.7の3通りとした。なお、コンクリートの配合をTable IXに示す。

3・1・3 供試体概要 はじめに、コールドジョイント部を模擬した供試体の概要をFig. 9に示す。埋設した鉄筋は12本に分割した。鉄筋の前処理は、モルタル供試体と同様である。前処理が終了した鉄筋をかぶりが3cmになる位置に設置し、高さ150cmまで打設した。18時間後にワイヤブラシでレイタンスを除去し、打継ぎを行なった。打設後、相対湿度80%室温20℃にて湿空養

生を行った。材齢28日目において、上面および下面をエポキシ樹脂により被覆し、二酸化炭素、水分および酸素が端部から浸透することを防いだ。それから、中性化促進環境下（二酸化炭素濃度10%、温度40℃、湿度70%）に2ヶ月間暴露した。

次に、曲げひび割れ部を模擬した供試体の概要をFig. 10に示す。埋設した鉄筋は7本に分割した。鉄筋の前処理は、モルタル供試体と同様である。前処理が終了した鉄筋は、曲げ载荷時にリード線の付いた面が圧縮側となるよう、リード線の付いた面を上側にして型枠に設置した。なお、全面にエポキシ樹脂を被覆した曲げ補強鉄筋を、分割鉄筋と並列に埋設した。打設後、相対湿度80%室温20℃にて湿空養生を行った。材齢28日目において、供試体下面の中央部に曲げひび割れを設けた。曲げひび割れは、Fig. 11に示すように3点曲げ载荷により生じさせた。マイクロスコープを用いひび割れ開口部を観察し、ひび割れ幅が0.3mmに達した時点で载荷を終了し、厚さが0.1mm、幅が5mmのステンレス板をひび割れ開口端部に挟み、曲げひび割れ幅を0.3mmに制御した(Fig. 10参照)。なお、このように曲げ载荷によりひび割れを導入することにより、曲げひび割れ近傍に生じる鉄筋とコンクリートのはく離⁴⁾を考慮できた。⁹⁾また、ひび割れ開口面を除く5面を、エポキシ樹脂により被覆し、二酸化炭素、水分および酸素の供給が1面のみから生じ

Table VII. Physical property of coarse aggregate.

Density (g/cm ³)	2.64
Coefficient of water absorption (%)	0.68
Fineness Modulus	6.70
Max grain size (mm)	20

Table VIII. The experiment cases (concrete tests).

(a)Cold joint			(b)Bending crack		
W/C			W/C		
0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
●	●	●	●	●	●

Fig. 9. Configuration of specimen with cold joint.

Fig. 10. Configuration of specimen with bending crack.

Fig. 11. Bending method.

Table IX. Mixture proportion of concrete.

W/C	s/a (%)	Unit weight(kg/m ³)				Agent(g/m ³)			Compressive strength*(MPa)
		W	C	S	G	A	B	C	
0.3	39	165	550	600	963	6875	—	—	73
0.5	45	165	330	803	989	—	743	13.2	45
0.7	45	165	236	837	1032	—	637	9.4	28

Note) A : superplasticizer, B : water reducing agent, C : Air entraining agent ※28day

るようにした。その後、中性化促進環境下（二酸化炭素濃度 10%，温度 40℃，湿度 70%）に 3 ヶ月間暴露した。

3・1・4 測定方法 マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度を測定した。測定方法は、モルタル試験と同様である。

3・2 コールドジョイント部に生じる腐食の形態と速度

3・2・1 実験結果 Fig. 12 に、マクロセル電流密

度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度を示す。水セメント比が 0.3 の場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度は、いずれも低い。水セメント比が 0.5 の場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度は、コールドジョイント位置において高くなる。水セメント比が 0.7 の場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度は、コールドジョイント位置において高くなる。

Fig. 12. Distribution of corrosion current density in concrete with cold joint.

Fig. 14. Distribution of corrosion current density in concrete with bending crack.

Fig. 13. Corrosion cell formation pattern and corrosion rate in concrete with cold joint.

3・2・2 腐食形態と腐食速度の整理 Fig. 13 に、マクロセルのアノード部となったコールドジョイント位置における腐食速度を示す。はじめに、腐食形態について整理する。Fig. 13 によれば、水セメント比に拘わらず、マクロセル電流密度はミクロセル電流密度と比較して高いことが認められる。すなわち、何れの水セメント比においてもマクロセル卓越型腐食が進行することが認められる。この傾向は、モルタル試験の結果と同様である。次に、腐食速度について整理する。Fig. 13 によれば、水セメント比が高いほど、腐食速度は速くなることが確認できる。この傾向は、モルタル試験の結果と同様である。

3・3 曲げひび割れ部に生じる腐食の形態と速度

3・3・1 実験結果 Fig. 14 に、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度を示す。水セメント比が 0.3 の場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度は、いずれも低い。水セメント比が 0.5 の場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度は、ひび割れ位置において高くなる。水セメント比が 0.7 の場合、マクロセル電流密度、ミクロセル電流密度および総腐食電流密度は、ひび割れ位置において高くなる。

3・3・2 腐食形態と腐食速度の整理 Fig. 15 に、マクロセルのアノード部となった曲げひび割れ位置における腐食速度を示す。はじめに、腐食形態について整理する。Fig. 15 によれば、水セメント比に拘わらず、マクロセル電流密度はミクロセル電流密度と比較して高いことが認められる。すなわち、何れの水セメント比においてもマクロセル卓越型腐食が進行することが認められる。この傾向は、モルタル試験の結果と同様である。次に、腐食速度について整理する。Fig. 15 によれば、水セメント比が高いほど、腐食速度は速くなることが確認できる。この傾向は、モルタル試験の結果と同様である。

4 結 論

本研究では、欠陥を有する鉄筋コンクリート部材に生じる中性化に伴う腐食の形態と速度に関して、整理ならびに比較を行った。以下に本研究の結論を示す。

(1) 中性化位置、水分および酸素の供給条件、モルタルの水セメント比に相違を設け、全 27 ケースの腐食形態と腐食速度を、統一した条件のもと網羅的に整理・比較できた。

(2) 欠陥がある場合、中性化による腐食は、水セメント比に拘わらずマクロセル卓越型腐食が進行する傾向にある。また、水セメント比が低いほど、腐食速度は遅くなる。

(3) 上記 2 の結果は、モデル欠陥部を対象としたモルタル試験のみならず、コールドジョイント部および曲げひび割れ部を対象としたコンクリート試験でも確認された。

(4) 以上の結果を踏まえると、中性化の影響を受ける環境では、欠陥がある場合においても、水セメント比が低いことが腐食に対する耐久性に優れていると言える。

本研究をまとめるに当たり、東京工業大学大学院材料工学専攻教授水流徹先生のご指導を賜った。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 北後征雄, 宮川豊章, 材料, **49**, 413 (2000).
- 2) 佐伯竜彦, 大即信明, 長滝重義, 土木学会論文集, No.532, 55 (1996).
- 3) J. A. Gonzalez, S. Algaba and C. Andrade, British Corrosion Journal, **15**[3], 134 (1980).
- 4) 神山 一, セメント技術年報, **26**, 491 (1972).
- 5) 水流 徹, 前田 龍, 春山志郎, 防食技術, **28**, 638 (1979).
- 6) 宮川豊章, 武若耕司, 出村克宣, 梶田佳寛, 守分敦郎, コンクリート工学年次論文報告集, **20** [1], 43 (1998).
- 7) 佐伯竜彦, 米山紘一, 長滝重義, 土木学会論文集, No.451, 69 (1992).
- 8) 木内芳夫, 宮川豊章, 岡田 清, 第 38 回土木学会年次学術講演会講演概要集, V, 265 (1983).
- 9) 大即信明, 宮里心一, 柴田常德, 久田 真, Md. Tarek Uddin, 長滝重義, 土木学会論文集, No.606, 63 (1998).

Fig. 15. Corrosion cell formation pattern and corrosion rate in concrete with bending crack.