

曲げひび割れ近傍に生じる 主鉄筋とスターラップの塩化物腐食形成機構

大即信明¹・宮里心一²・鈴木裕隆³・木村勇人⁴

¹正会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科国際開発工学専攻(〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工修 東京工業大学大学院助手 理工学研究科国際開発工学専攻

³正会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社(〒370-8543 高崎市栄町6-26)

⁴学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻

曲げひび割れの発生した鉄筋コンクリート梁を対象とし、塩化物腐食形成機構と腐食速度に関する実験的検討を行った。特長として、1. 曲げ載荷によるひび割れの導入、2. 主鉄筋は基よりスターラップも考慮したこと、3. マクロセル腐食電流とマイクロセル腐食電流を区別した測定、が挙げられる。屋内実験と屋外実験を行った。屋内実験では、1. 単一の主鉄筋に着目した既往の研究の整理、2. 単一のスターラップに着目した実験的検討、3. 主鉄筋とスターラップを共に考慮した実験的検討を行った。さらに、4. 鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外実験を行い、屋内実験の結果を検証した。その結果、ひび割れ近傍の腐食におけるスターラップの重要性、ひび割れが腐食形成機構と腐食速度に及ぼす影響が明らかになった。

Key Words : chloride induced corrosion, bending crack, stirrup, main rebar, macro-cell, micro-cell, W/C

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長所の1つに、高耐久性が挙げられる。しかしながら、一部の鉄筋コンクリートでは、ひび割れに起因する早期の鉄筋腐食が問題となっている¹⁾。すなわち、コンクリートにひび割れが発生すると、ひび割れ箇所において、塩化物イオンは容易に鉄筋に到達する²⁾。その結果、鉄筋の不働態は破壊され、極めて早期に腐食が発生する場合がある。

塩分環境下に存在する実構造物において、ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁に対する著者らの観察によると、腐食の発生は、スターラップと主鉄筋の接続部にて認められた。したがって、スターラップと主鉄筋は、腐食の発生において、相互に影響を及ぼしていると考えた。

しかしながら、従来、塩害に対する耐久性を考慮した研究・設計を行うとき、主鉄筋にのみ着目されてきた。筆者らの研究³⁾も含め、単一の主鉄筋を対象とした、ひび割れを有する鉄筋コンクリート内部の塩化物腐食に関しては、複数の報告^{4), 5), 6), 7)}があ

る。しかしながら、スターラップに関する腐食形成機構に関する研究は、未だなされていない。また、主鉄筋およびスターラップを共に考慮した、鉄筋コンクリート梁内部の腐食形成機構ならびに腐食速度に関する研究は、皆無である。したがって、曲げひび割れ部の腐食において、スターラップの影響を早急に解明する必要がある。

以上のことから、本論文では、塩分環境下において、曲げひび割れの発生したコンクリート梁内部における、鉄筋の腐食形成機構および腐食速度の解明を目的として実験的検討を行った。すなわち、主鉄筋は基よりスターラップを考慮したモデル供試体を用い、ひび割れの有無、水セメント比の相違が、腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

本論文で使用した供試体を、図-1に示す。Type-A 供試体を用いて、単一のスターラップに着目した

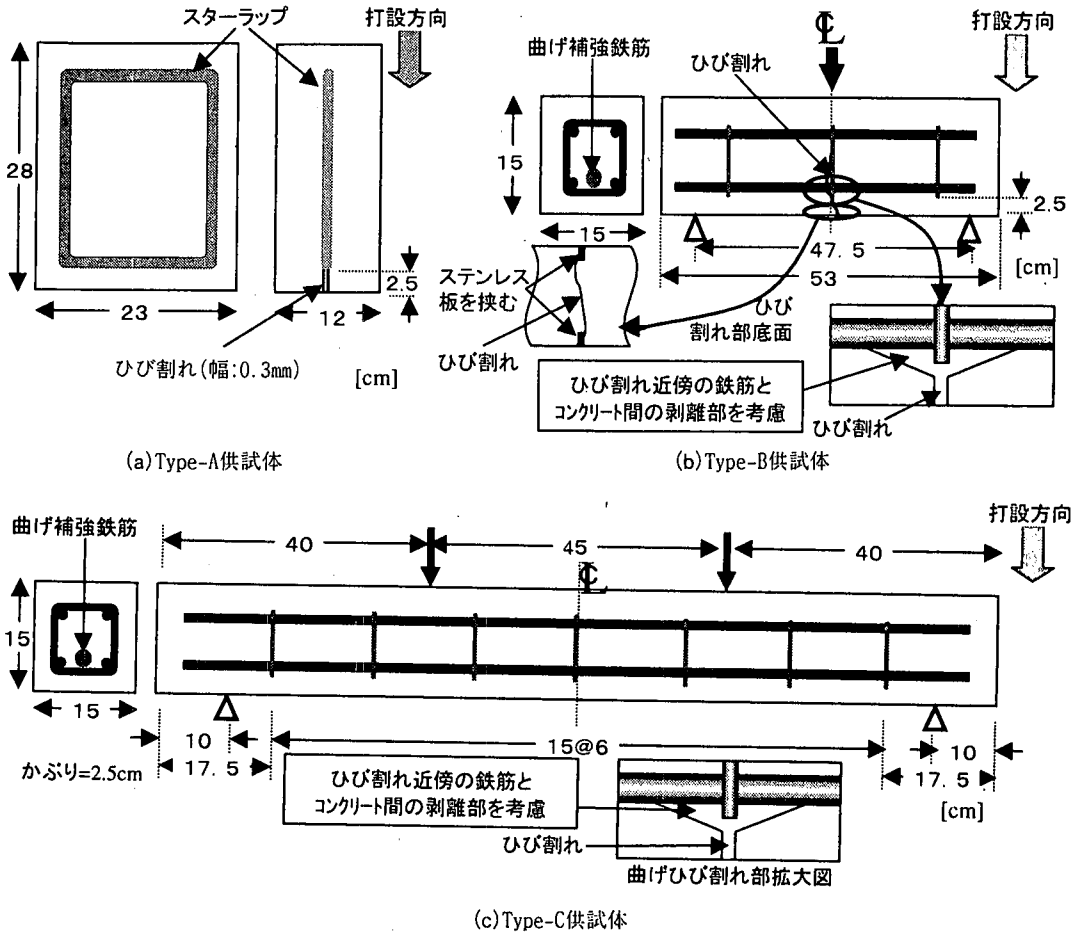


図-1 供試体概要図

表-1 実験ケース

W/C(%)	30	50	70
ひび割れなし		●	
ひび割れあり	●	●	●

注：●印は実施したことを示す。

腐食形成機構および腐食速度を、屋内実験により評価した。Type-B供試体を用いて、スターラップと主鉄筋を考慮した小型鉄筋コンクリート梁中の腐食形成機構と腐食速度を、屋内実験により評価した。Type-C供試体を用いて、スターラップと主鉄筋を考慮した鉄筋コンクリート梁中の腐食形成機構と腐食速度を、屋外実験により検証した。なお、何れの供試体を用いた場合も、実験ケースは表-1に示す通りである。

(2) 使用材料

セメントは、表-2に示す物理的性質および化学成分の普通ポルトランドセメントを使用した。

表-2 セメントの物理的性質および化学成分

物理的性質	密度	g/cm ³	3.16	
	ブレン比表面積	cm ² /g	3250	
	凝結：水量	始発	時-分	2-35
		終結	時-分	3-46
	安定性(煮沸方法)			良
	圧縮強さ	3日	MPa	28.4
7日		MPa	43.0	
28日		MPa	60.0	
化学成分	強熱減量	%	1.4	
	全アルカリ	%	0.61	
	MgO	%	1.5	
	SO ₃	%	1.9	
	Cl	%	0.006	

表-3 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%

骨材は、表-3に示す物理的性質の千葉県小櫃産の

表-4 鋼材の化学成分

φ (mm)	化学成分 (%)					
	Fe	C	Si	Mn	P	S
9	98.9	0.17	0.21	0.69	0.025	0.020
13	99.2	0.15	0.21	0.36	0.012	0.015

表-5 コンクリートの配合および強度

W/C (%)	s/a (%)	単位量						圧縮強度* (MPa)
		W	C	S	G	A剤	B剤	
		(kg/m ³)						(m ³ /m ³)
30	39	165	550	600	963	6875	-	73
50	45	165	330	803	989	-	743	13.2
70	45	165	236	837	1032	-	637	9.4

注：A剤=高性能A E減水剤 B剤=A E減水剤 C剤=A E助剤
*材齢28日、屋外暴露

細骨材(陸砂)および東京都青梅産の粗骨材(碎石)を使用した。

混和剤として、ナフタリンスルホン酸系高性能A E減水剤と、スルホン酸系A E減水剤およびA E助剤を用いた。

鋼材は、表-4に示す化学成分の鉄筋(SR295)を使用した。本論文では、鉄筋表面形状(凹凸等)の影響を除外するため、丸鋼のみを用いた。曲げひび割れを有するコンクリート梁を用いた著者らの研究⁹⁾では、異形鉄筋の腐食速度が、丸鋼を用いた場合と比較して、増加した。また、神山の報告⁴⁾では、ひび割れ幅が等しいとき、丸鋼と異形鉄筋の肌離れ(ひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートの剥離)およびそれに伴う腐食位置に関して、差異は認められない。したがって、異形鉄筋を用いた場合には、丸鋼のみを使用した本論文の結果と比較して、腐食形成機構は概ね同様の傾向が示されると期待される。一方、腐食速度は促進される可能性がある。

(3) コンクリートの配合および基本性状

コンクリートの配合および圧縮強度を表-5に示す。水セメント比は、30%、50%および70%とした。フレッシュコンクリートのスランプは、8±2cm、空気量は5±1%とした。圧縮強度は、φ10×20cmの円柱供試体を用い、28日間の屋外暴露後、測定を行った。

(4) 供試体の作製方法および暴露条件

a) Type-A供試体(屋内実験・単一のスターラップに着目した供試体)

図-2(a)に示す様に、スターラップは10本の分割要素鉄筋により形成される。これによって、実構造物では測定不可能な、スターラップ内のマクロセル腐食電流を測定することを可能とした。なお、本論文で使用した供試体(Type-B, C供試体も含み)に用いた分割要素鉄筋の最小長さは3cmとした。これは、分割要素鉄筋を接続し形成されたスターラップおよび主

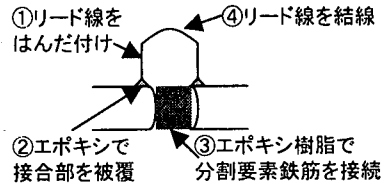


図-3 鉄筋の接続概要

筋が、打設時に自重およびコンクリートの移動に伴う力に耐えることを考慮したためである。鋼材の前処理方法を説明する。各鉄筋は、表面の初期条件を統一するため、クエン酸二水素アンモニウムに24時間浸漬させた後、ワイヤブラシにより黒皮を剥いだ。なお、黒皮の有無は、鉄筋腐食に大きな影響を及ぼさない⁹⁾。その後、①鉄筋側面の両側端部にリード線をはんだ付けした。ただし、②接合部はエポキシ系樹脂により被覆した。さらに、③隣接する鉄筋要素をエポキシ系樹脂により絶縁接続した。最後に、④リード線を結線することにより、電気化学的には一体と見なせる鋼材とした(図-3参照)。前処理が終了した鋼材を型枠中央に配置した。また、一部の型枠には、底面に厚さ0.3mm高さ2.5cmのステンレス板を設置した。24時間の初期養生後脱型した。同時にステンレス板も除去し、ステンレス板の除去により生じた隙間をひび割れに相当する欠陥とした。材齢28日まで、相対湿度80%室温20度にて湿空養生を行った。その後、塩水噴霧(NaCl3.1wt%)を伴う24時間の湿潤(相対湿度90%)と60時間の乾燥(相対湿度50%)が繰り返される、腐食促進環境下に4週間暴露した。なお、腐食反応を促進させるため、室温は60度とした。ただし、予備試験の結果、前述の湿度と温度の組み合わせでは、マイクロクラックの発生は観察されなかった。また、腐食促進暴露中に、外部環境からの塩化物イオンが、供試体の上面と下面(12×23cm)および2側面(12×28cm)からのみ浸透するよう、前面と後面(23×28cm)をシリコン材で塗膜した。

b) Type-B供試体(屋内実験・主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体)

図-2(b)に示す様に、主鉄筋は9本、スターラップは8本の分割要素鉄筋により形成される。鉄筋の前処理は、Type-A供試体と同様である。主鉄筋とスターラップの接続部においては、両鉄筋間を直接電流が流れることを防止した。これによって、リード線を介し、鉄筋間を流れる電流を測定できるようにした。このため、主鉄筋とスターラップ間にビニルテープを挟み、さらに導電性の低い釣り糸を用い結合した。鉄筋は、曲げ載荷時にリード線の付いた面が

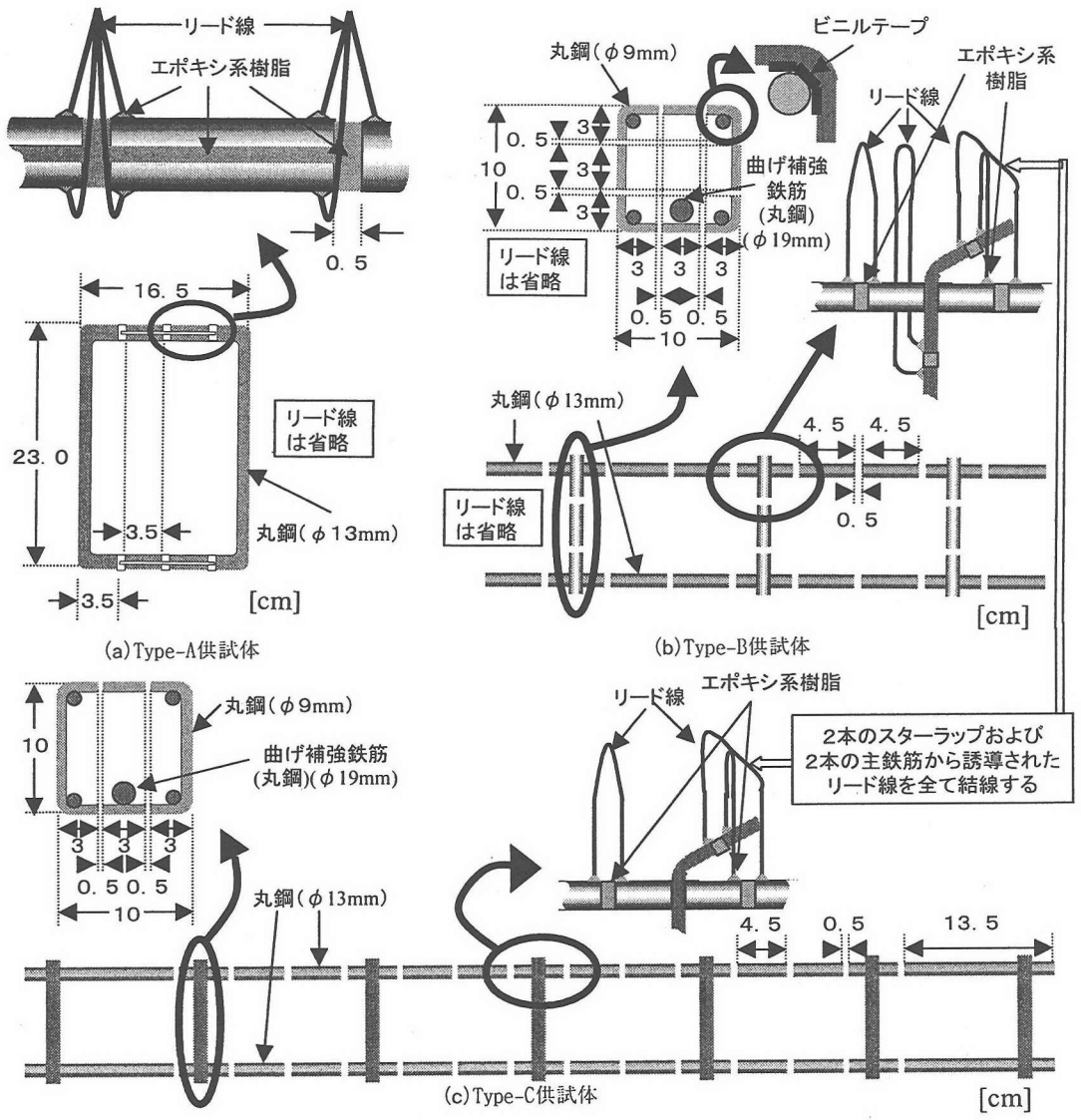


図-2 分割鉄筋概要図

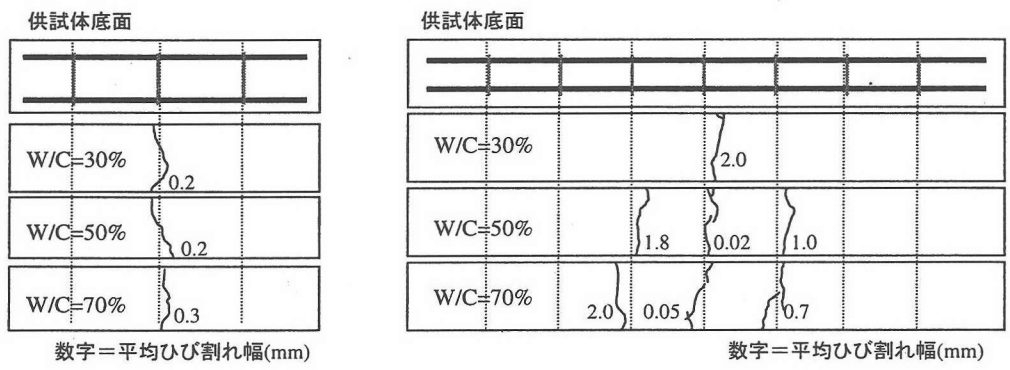


図-4 底面のひび割れ状況

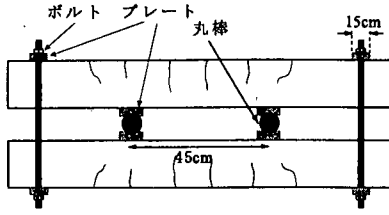


図-5 Type-C供試体の治具取り付け状況

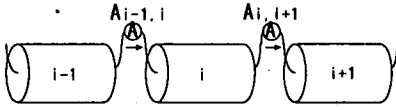


図-6 マクロセル電流密度の測定方法

圧縮側となる様にした。このため、リード線の付いた面を上側に揃え、型枠に設置した。なお、2本の引張側主鉄筋中央に、全面をエポキシ系樹脂で被覆した曲げ補強鉄筋を設置した。Type-A供試体と同様に、打設後28日間は湿空養生を行った。その後、一部の供試体に対して、6tfの荷重にて、3点曲げ載荷を行い、曲げひび割れを導入した。すなわち、Type-A供試体の場合と、ひび割れ導入方法は異なる。その結果、Type-B供試体のひび割れ近傍では、鉄筋とコンクリート間の剥離(肌離れ)⁴⁾が生じる。図-4(a)に、各供試体底面のひび割れ状況および暴露期間中の平均ひび割れ幅を示す。一般にひび割れを無外力の下で放置した場合、残留ひび割れ幅は、ひび割れ導入時と比較して減少する⁴⁾。本論文では、ひび割れ開口端部に、厚さが0.1mm、幅が5mmのステンレス板を挟み、曲げひび割れ幅を制御した。なお、ステンレス板のひび割れ内部への挿入深さは、約2mmとした。したがって、コンクリートおよび鉄筋の特性に大きな影響を及ぼさない。その後、Type-A供試体と同様の腐食促進環境下に4週間暴露した。

c) Type-C供試体(屋外実験・主鉄筋とスターラップをともに考慮した供試体)

図-2(c)に示す様に、主鉄筋は15本、スターラップは4本の分割要素鉄筋により形成される。鉄筋の前処理、打設方法、実験ケースおよび初期養生は、Type-B供試体と同様である。曲げひび割れは、3tfの荷重にて4点曲げ載荷を行い導入した。図-4(b)に、各供試体底面のひび割れ状況および暴露期間中の平均ひび割れ幅を示す。ひび割れは、図-5に示す治具により制御し、東京工業大学構内にて1997年9月から13週間屋外暴露を行った。その間、塩水(NaCl3.5wt%)を、コンクリート底面に対して、2.42kg/m²/day噴霧した。

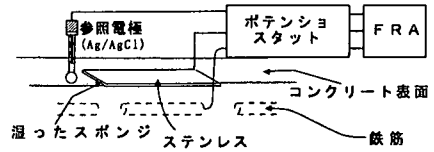


図-7 ミクロセル電流密度の測定方法

(5) 測定項目と測定方法

アノードとカソードが異なる鉄筋要素に跨り形成する腐食セル(回路)を、マクロセルとした。したがって、マクロセル電流は、異なる鉄筋要素間を流れる電流から推定した。一方、アノードとカソードが単一の鉄筋要素内に存在する腐食セル(回路)を、ミクロセルとした。したがって、ミクロセル電流は、対象とする鉄筋要素以外への電流の出入が一時的でない状態を設定し、この時測定した分極抵抗を用い推定した。さらに、全腐食電流は、マクロセル電流とミクロセル電流を合計することにより求める。なお、分割鉄筋要素長さは、全腐食電流に対するマクロセル電流およびミクロセル電流の割合に影響を及ぼすことを注記する。

a) 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。例えば、図-6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、 a_i が正、すなわち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した。一方、 a_i が負、すなわち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した。なお、腐食電流密度が100 μ A/cm²は、腐食速度が1.16mm/yearに相当する⁴⁾。

b) 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た。この時、異なる鉄筋要素間では電流の出入が無い。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。概略図を図-7に示す。測定は、5000Hz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

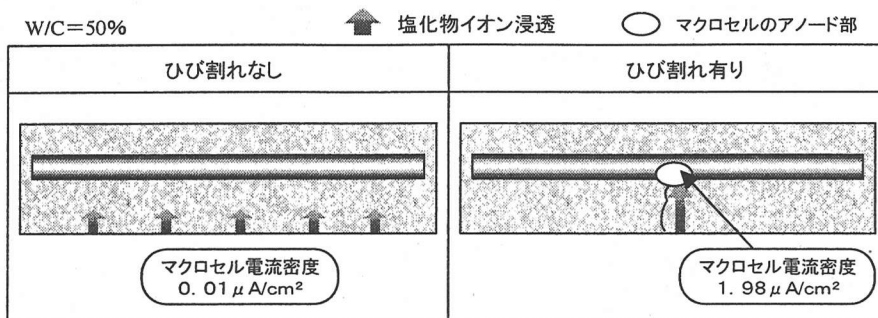


図-9 ひび割れが主鉄筋における腐食形成に及ぼす影響

抵抗は、ポード線図およびコールコー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 のマイクロセル電流密度 (b_i) を算定した¹⁰⁾。

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

ここで、 R_{p_i} = 鉄筋要素 i における分極抵抗、また K は定数であるが、文献¹⁰⁾を参考にし、 0.0209 (V) とした。

なお、マクロセル電流密度の測定は、暴露直後に行った。その後、マイクロセル電流密度を測定した。また、本論文に示すデータは、一回の測定結果である。

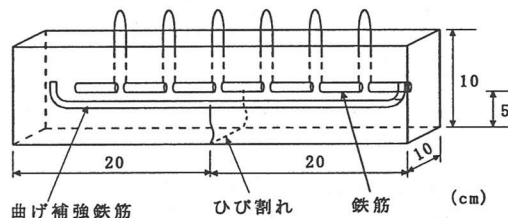


図-8 単一の主鉄筋に着目したモデル供試体

をまとめる。ひび割れがない場合は、腐食の進行は認められなかった。一方、ひび割れが存在すると、マクロセルが形成され、腐食は進行することが認められた。

3. 単一の主鉄筋に着目したモデル供試体による検討

(1) 概説

ひび割れ部に形成する腐食に関する既往の研究は、数例ある。ただしその多くは、主鉄筋にのみ着目した検討である。しかしながら、曲げひび割れ近傍の剥離部(肌離れ)を考慮し、またマクロセルにおけるアノードとカソードの位置関係を正しく評価した研究は少ない。ここでは主に、著者らの研究^{9), 11), 12)}を基に、単一の主鉄筋に着目したモデル供試体中での、腐食形成機構と腐食速度について整理する。なお、本章に示す結果は、図-8に示す供試体を用い、暴露条件はType-AおよびType-B供試体と同様の腐食促進環境の場合である。

(2) ひび割れの影響

図-9に、ひび割れの有無が腐食形成に及ぼす影響

(3) 水セメント比の影響

図-10に、水セメント比の相違が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響をまとめる。

これによると、ひび割れが存在する場合、水セメント比の相違は腐食形成機構に影響を及ぼすことがわかる。すなわち、水セメント比が30%および50%では、ひび割れと交差する鉄筋だけがマクロセルのアノード部およびマイクロセル腐食発生箇所となる。一方、水セメント比が70%では、ひび割れ近傍において、マクロセル腐食のアノード部が形成される。これについて、以下の理由が考えられた。ひび割れ近傍に生じる、鉄筋とコンクリートの剥離部(肌離れ)は、水セメント比が30%および50%の場合と比較して、70%の方が大きい。したがって、塩化物イオンは、ひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートの剥離部を容易に伝わり、健全なかぶりコンクリート内部に浸透する。その結果、ひび割れ近傍において、マクロセル腐食のアノード部が形成したと考えられた。

また、水セメント比が小さいほど、腐食速度は遅

↑塩化物イオン浸透 ● マクロセルのアノード部かつマイクロセル腐食発生箇所 ○ マイクロセル腐食発生箇所

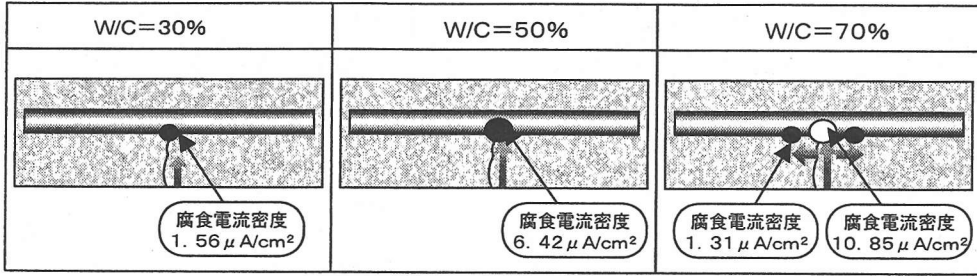
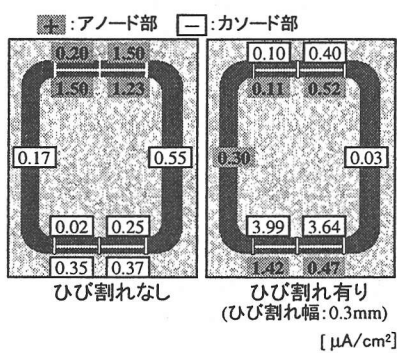
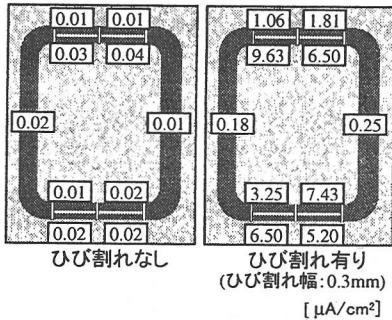


図-10 水セメント比が主鉄筋における腐食形成と腐食速度に及ぼす影響



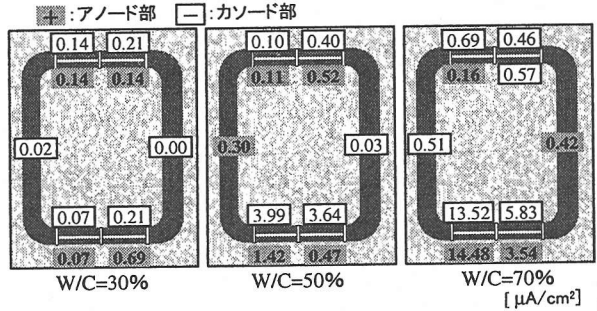
(a) マクロセル電流密度分布



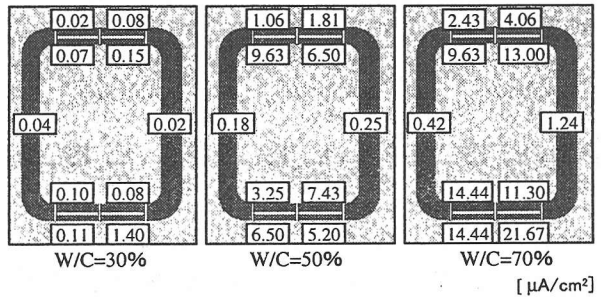
(b) ミクロセル電流密度分布
(Type-A供試体・W/C=50%)

図-11 ひび割れの有無がスターラップの
マクロセル・ミクロセル電流に及ぼす影響

い。これは、水セメント比が小さいほど、健全なコンクリート中の鉄筋およびひび割れと交差する鉄筋への酸素透過量が減少する。このため、カソード反応が律速され、腐食速度は遅くなったと考えられる。また、コンクリート抵抗が増加するため、電気的に腐食セルの形成が困難になることも考えられる。



(a) マクロセル電流密度分布



(b) ミクロセル電流密度分布

(Type-A供試体・ひび割れ幅0.3mm)

図-12 水セメント比の相違がスターラップの
マクロセル・ミクロセル電流に及ぼす影響

4. スターラップに着目したモデル供試体による検討

(1) ひび割れの影響

図-11に、ひび割れの有無が、スターラップの腐食に及ぼす影響に関する実験結果を示す。(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はミクロセル電流密度分布を表す。Type-A供試体を用い、水セメント比は50%とした。

始めに、マクロセル電流密度に関して、実験結果

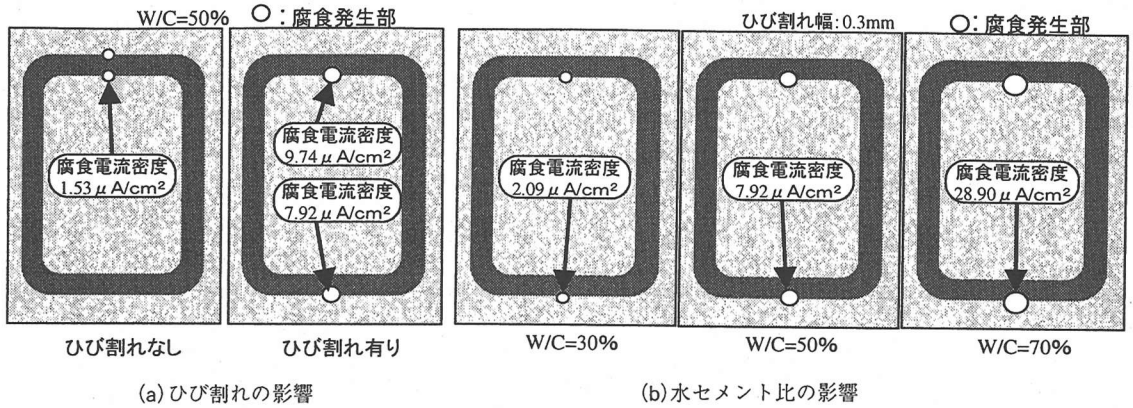


図-13 スターラップの腐食形成と腐食速度

を整理する。ひび割れがない場合は、上部水平鉄筋においてアノード電流が大きくなる。一方、ひび割れが存在する場合は、上部水平鉄筋下面および下部水平鉄筋下面において、アノード電流が大きくなる。次に、マイクロセル電流密度に関して、実験結果を整理する。ひび割れがない場合、何れの鉄筋要素においても、腐食電流は小さい。一方、ひび割れが存在する場合、上部水平鉄筋下面および下部水平鉄筋において大きくなる。

ここで、ひび割れの有無に関わらず、上部水平鉄筋において、腐食が発生する理由を考察する。Type-A供試体の打設方向は、図-1に示す通りである。硬化コンクリートは、打設方向に沿って、上部は下部と比較して、貧配合になる¹³⁾。したがって、上部水平鉄筋は、下部水平鉄筋あるいは鉛直鉄筋と比較して、貧配合のコンクリートと接することとなる。貧配合となったコンクリートと接する鉄筋では、一般に腐食が進行する。したがって、上部水平鉄筋において、マクロセルのアノードあるいはマイクロセル腐食発生箇所となったと考えられる。

次に、ひび割れが存在する時、下部水平鉄筋において、腐食が発生する理由を考察する。Type-A供試体において、下部水平鉄筋は、ひび割れと接する。したがって、下部水平鉄筋には、腐食要因となる、酸素、水分、塩化物イオンが、容易に浸透する。その結果、下部水平鉄筋において、マクロセルのアノードおよびマイクロセル腐食発生箇所となったと考えられる。

(2) 水セメント比の影響

図-12に、水セメント比の相違が、スターラップの腐食に及ぼす影響に関する実験結果を示す。(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はマイクロセル電流密度分布を表す。Type-A供試体を用いた。なお、ひび割

れ幅は0.3mmとし、水セメント比は、30%、50%、70%の3水準とした。

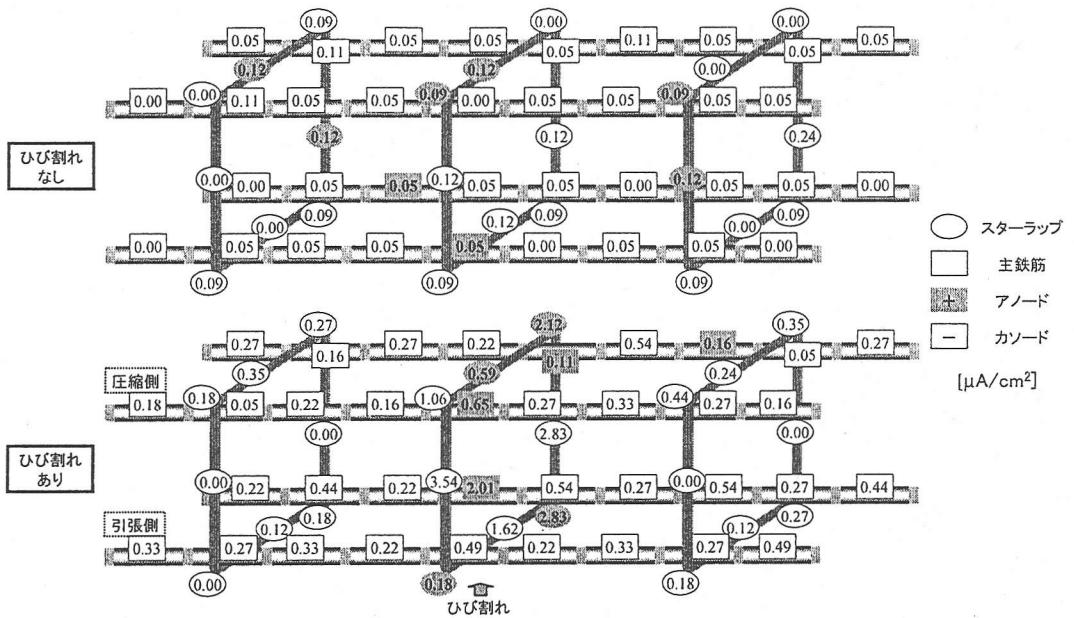
始めに、腐食形成機構について、実験結果を整理する。何れの実験ケースにおいても、下部水平鉄筋において、マクロセルのアノード電流が確認された。また、マイクロセル電流が大きくなった。これは、(1)節にて検討した、ひび割れが存在する場合と同様である。次に、腐食速度について、実験結果を整理する。マクロセルのアノード電流およびマイクロセル電流ともに、水セメント比が小さいほど減少することが認められる。

ここで、腐食電流が最大となる下部水平鉄筋の腐食速度と、コンクリートの水セメント比の関係について考察する。(1)節に記したとおり、下部水平鉄筋には、塩化物イオンが、容易に到達する。その結果、下部水平鉄筋の不働態被膜は破壊される可能性が高い。すなわち、アノード反応が進行する。このような場合、腐食速度はカソード反応に律速される。すなわち、酸素透過量に依存する。ここで、既往の研究⁹⁾によれば、健全なコンクリート中およびひび割れ部ともに、水セメント比が小さいほど、酸素透過量は減少する。したがって、水セメント比が小さいほど、ひび割れと交差するスターラップの下部水平鉄筋、またその他の鉄筋要素への酸素透過量が減少する。その結果、カソード反応が律速条件となり、腐食速度は抑制されたと考えられる。

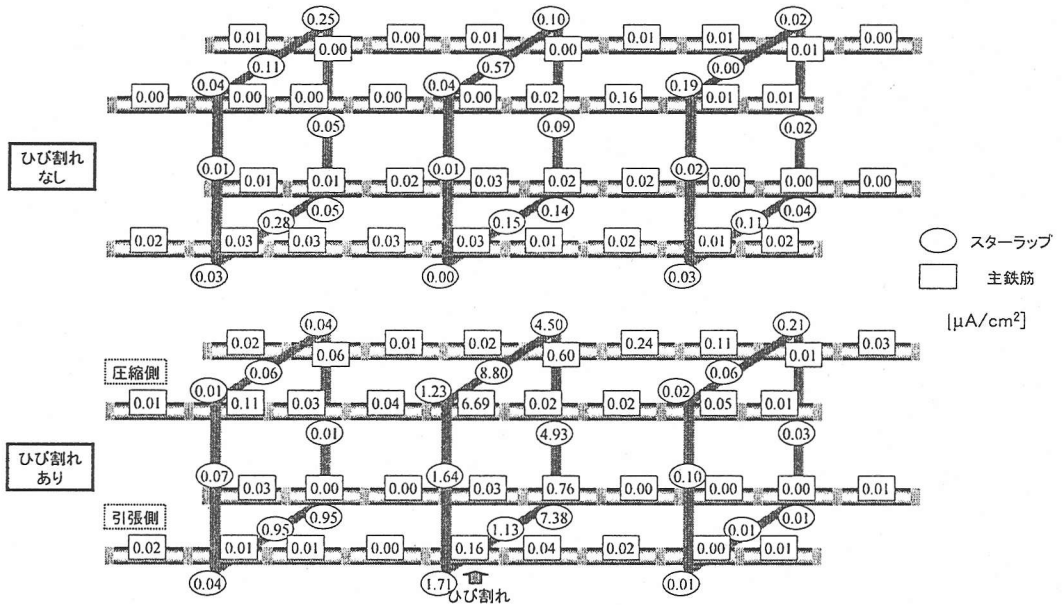
5. 主鉄筋とスターラップをともに考慮したモデル供試体による検討

(1) ひび割れの影響

図-14に、ひび割れの有無が、主鉄筋とスターラップの腐食に及ぼす影響に関する実験結果を示す。



(a) マクロセル電流密度分布



(b) ミクロセル電流密度分布

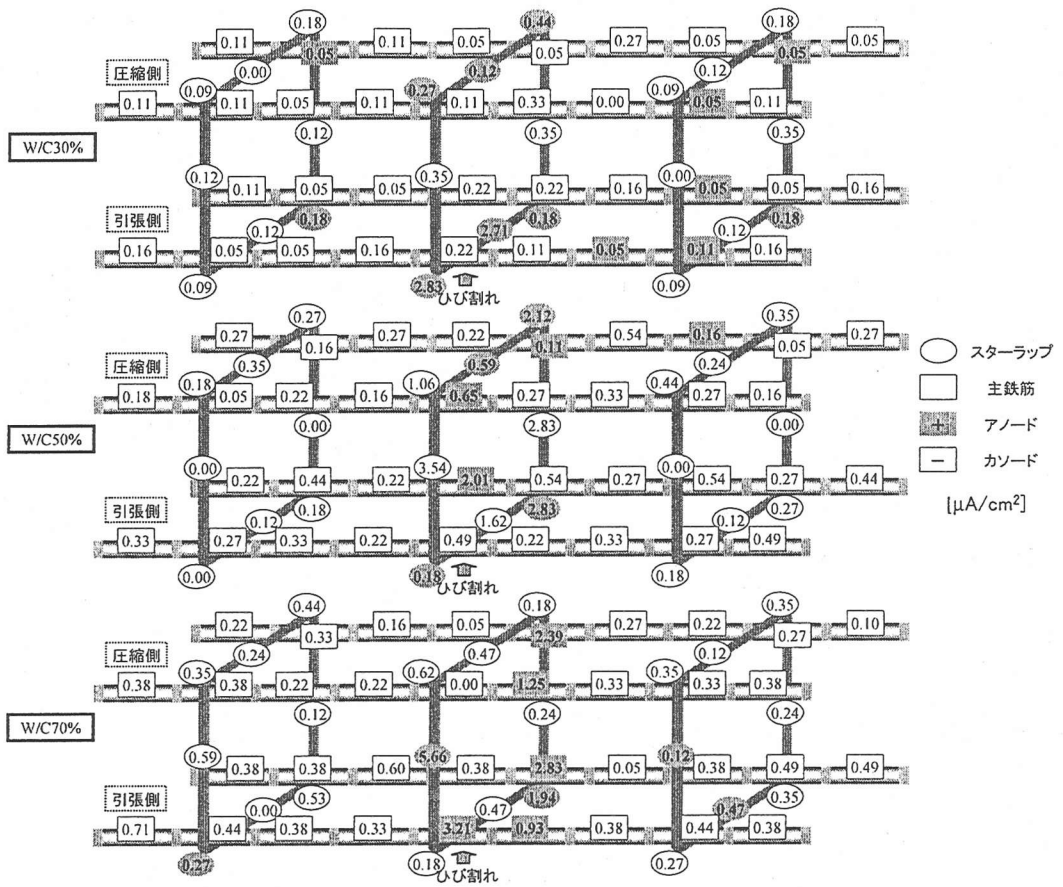
(Type-B供試体・W/C=50%)

図-14 ひび割れが主鉄筋とスターラップのマクロセル・ミクロセル電流に及ぼす影響

(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はミクロセル電流密度分布を表す。Type-B供試体を用い、水セメント比は50%とした。

始めに、ひび割れがない場合について、実験結果を整理する。マクロセルのアノード電流は、スター

ラップの上部水平鉄筋において、大きくなる。また、ミクロセル電流も、スターラップの上部水平鉄筋において、大きくなる。次に、ひび割れが存在する場合について、実験結果を整理する。マクロセルのアノード電流は、スターラップの上部鉄筋のみならず、



(a) マクロセル電流密度分布
(Type-B供試体)

図-15 水セメント比が主鉄筋およびスターラップのマクロセル・マイクロセル電流に及ぼす影響

ひび割れと交差するスターラップの下部鉄筋およびひび割れと交差する引張側主鉄筋においても、大きくなる。また、マイクロセル電流は、スターラップの上部鉄筋およびひび割れと交差するスターラップの下部鉄筋において、大きくなる。

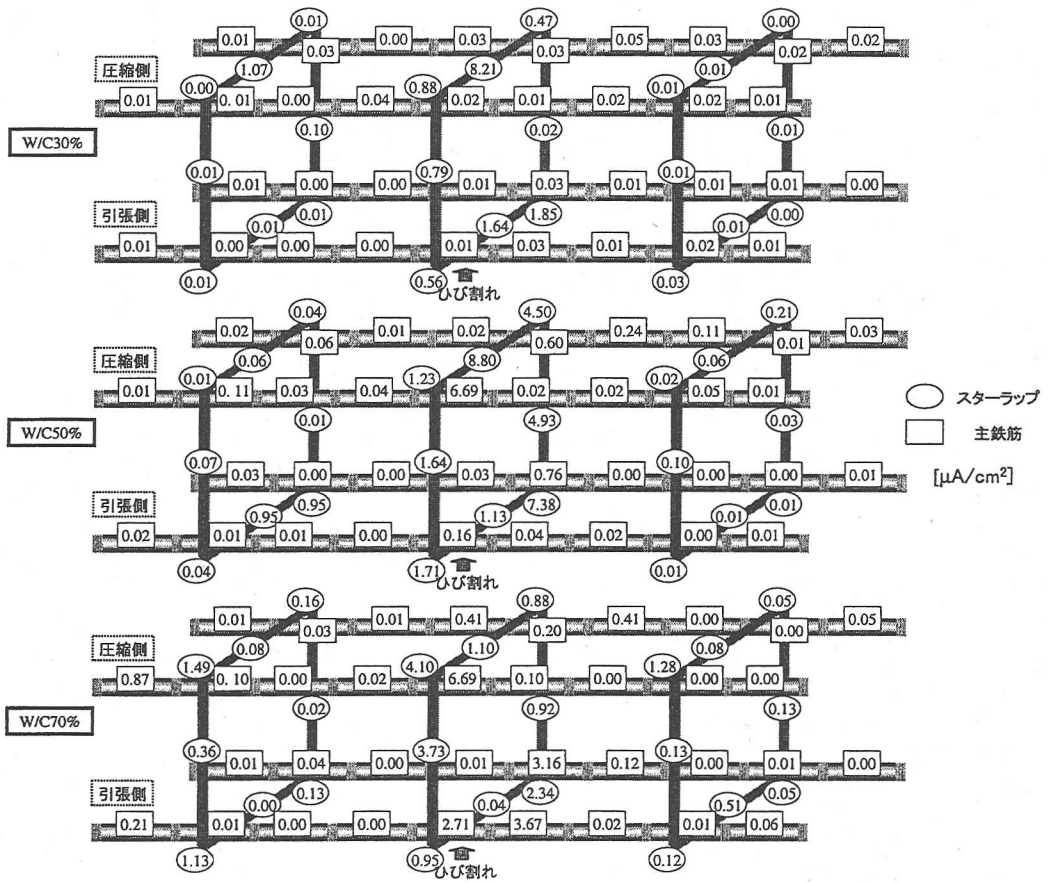
(2) 水セメント比の影響

図-15に、水セメント比の相違が、主鉄筋とスターラップの腐食に及ぼす影響に関する実験結果を示す。(a)はマクロセル電流密度分布を、(b)はマイクロセル電流密度分布を表す。Type-B供試体を用いた。水セメント比は、30%、50%および70%の3水準とした。図-4(a)に示す通り、ひび割れは中央のスターラップ近傍に存在する。

腐食形成機構について、結果を整理する。水セメント比が30%の場合、マクロセルのアノード電流は、中央のスターラップの下部鉄筋において大きくなる。

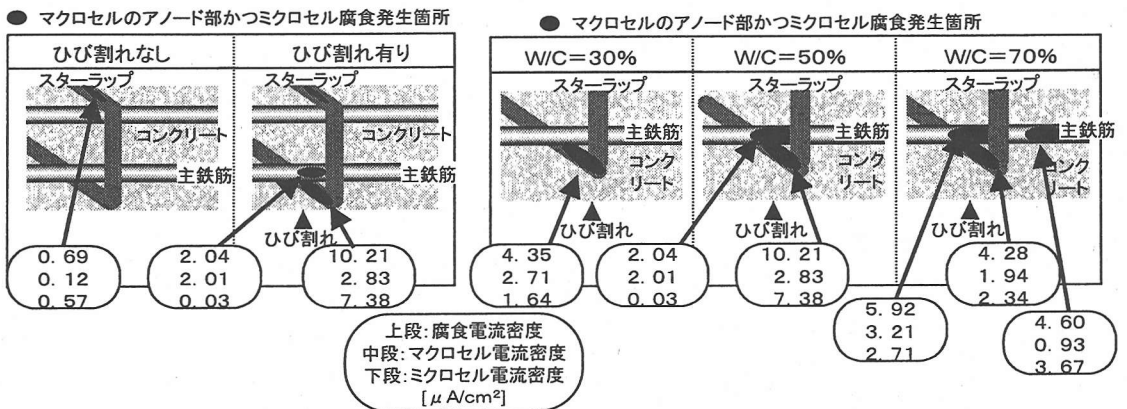
一方、マイクロセル電流密度は、中央のスターラップの上部水平鉄筋および下部鉄筋において大きくなる。水セメント比が50%の場合、マクロセルのアノード電流は、中央のスターラップ下部鉄筋およびひび割れと交差する主鉄筋において大きくなる。一方、マイクロセル電流密度は、中央のスターラップの上部水平鉄筋および下部鉄筋において大きくなる。さらに、水セメント比が70%の場合、マクロセルのアノード電流は、中央のスターラップ下部鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍において大きくなる。一方、マイクロセル電流は、中央のスターラップ下部鉄筋、ひび割れと交差する引張側主鉄筋およびその近傍においても大きくなる。

次に、腐食速度について、結果を整理する。表-6に、水セメント比とマクロセル電流、マイクロセル電流の総和の関係を示す。ただし、マクロセル電流の総和とは、アノード電流が確認された要素毎のマク



(b) ミクロセル電流密度分布
(Type-B供試体)

図-15 水セメント比が主鉄筋およびスターラップのマクロセル・ミクロセル電流に及ぼす影響



(a) ひび割れの影響

(b) 水セメント比の影響

図-16 主鉄筋とスターラップの腐食形成と腐食速度

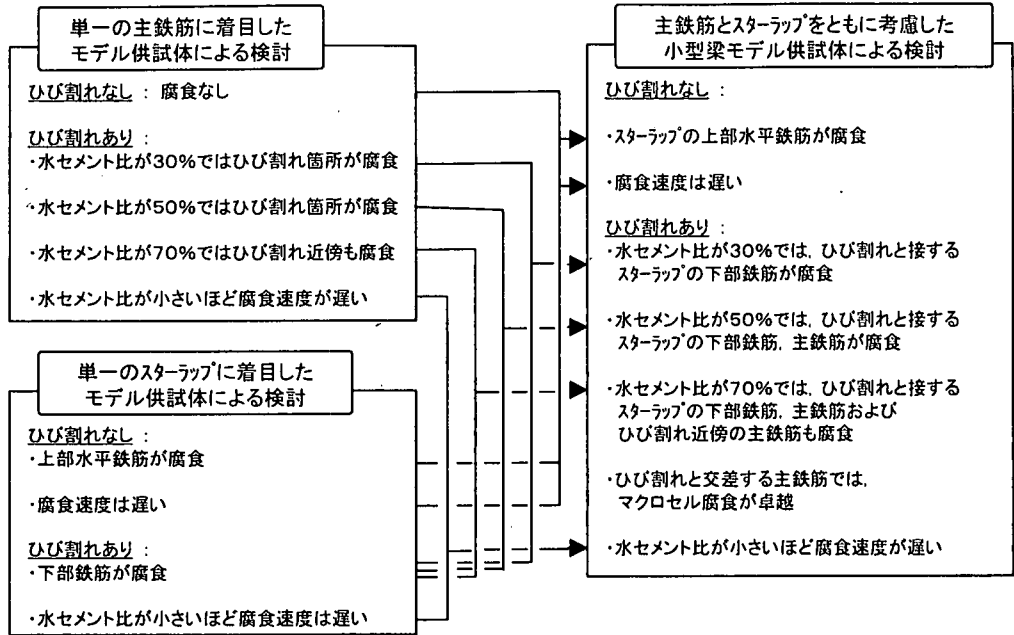


図-17 屋内腐食促進実験の整理

ロセル電流密度に表面積をかけ、それを合計したものである。また、マイクロセル電流の総和とは、各鉄筋要素毎にマイクロセル電流密度と表面積をかけ、それを合計したものである。これによると、マクロセル電流、マイクロセル電流、腐食電流ともに、水セメント比が小さいほど、減少することが認められる。

(3) まとめ

主鉄筋は基よりスターラップも考慮した場合、腐食形成および腐食速度について、得られた結果を図-16にまとめる。

ひび割れの有無が、腐食形成機構に及ぼす影響について、次のことがわかった。ひび割れがない場合は、スターラップの上部水平鉄筋において腐食が進行する。この時、マイクロセル電流が、マクロセル電流と比較して大きい。一方、ひび割れが存在する場合は、ひび割れと接するスターラップの下部水平鉄筋および引張側主鉄筋においても、腐食が進行する。特に、主鉄筋では、マクロセル電流が、マイクロセル電流と比較して大きい。また、ひび割れが存在する場合は、ひび割れがない場合と比較して、腐食速度は増加する。

ひび割れが存在する場合、水セメント比の相違が腐食形成機構に及ぼす影響に関して、以下のことがわかった。水セメント比が30%では、ひび割れと接するスターラップ下部鉄筋において、マクロセルの

表-6 水セメント比の相違が腐食電流の総和に及ぼす影響

	(μA)		
W/C(%)	30	50	70
マクロセル電流(A)	76.8	116.7	273.0
マイクロセル電流(B)	279.0	491.9	552.4
腐食電流 (A+B)	355.8	608.6	825.4

水セメント比が70%では、ひび割れと接するスターラップ下部鉄筋、主鉄筋およびひび割れ近傍の主鉄筋において、マクロセルのアノードとなり、またマイクロセル腐食も進行する。以上のことから、水セメント比に関わらず、スターラップの下部鉄筋において、腐食は進行した。例えば、水セメント比が50%の時、スターラップの腐食速度は、主鉄筋の約5倍となる。すなわち、スターラップの腐食は、著しく速い。スターラップは、主鉄筋と比較して、外部環境に近い位置に存在する。したがって、酸素や塩化物イオンは容易に鉄筋に浸透する。このため、スターラップの腐食速度が主鉄筋より大きいと考えられる。なお、水セメント比と腐食速度の関係については、水セメント比が小さいほど、腐食速度は減少することが確認された。

6. 屋内腐食促進実験の整理

(1) 概要

第3章においては、単一の主鉄筋に着目したモデ

ル供試体による既往の研究を整理した。第4章においては、単一のスターラップに着目したモデル供試体による実験的検討を行った。第5章においては、主鉄筋とスターラップを共に考慮した小型梁モデル供試体による実験的検討を行った。図-17に、各検討結果の関連を整理する。

(2) ひび割れがない場合の腐食形成機構と腐食速度

単一の主鉄筋に着目したモデル供試体では、腐食は発生しなかった。また、単一のスターラップに着目した供試体では、上部水平鉄筋において、腐食が発生した。ただし、腐食速度は遅かった。さらに、主鉄筋とスターラップを共に考慮したモデル供試体では、スターラップの上部水平鉄筋において、腐食が発生した。ただし、その腐食速度は、 $0.69\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($8.0 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$)と遅かった。

(3) ひび割れが存在する場合の腐食形成機構

単一の主鉄筋に着目した供試体では、水セメント比が30%および50%の時はひび割れ箇所が腐食した。一方、水セメント比が70%では、ひび割れ箇所およびその近傍も、腐食した。単一のスターラップに着目した供試体では、ひび割れと接する下部水平鉄筋が腐食した。また、主鉄筋とスターラップを共に考慮した供試体では、水セメント比が30%の時、ひび割れと接するスターラップの下部鉄筋が腐食した。水セメント比が50%では、ひび割れと接するスターラップの下部鉄筋、および引張側主鉄筋が腐食した。水セメント比が70%では、ひび割れと接するスターラップの下部鉄筋、引張側主鉄筋およびひび割れ近傍の主鉄筋も、腐食した。すなわち、何れの水セメント比においても、ひび割れと接するスターラップの引張側鉄筋は腐食した。例えば、水セメント比が50%の場合、スターラップの下部鉄筋における腐食速度は、 $10.21\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($0.12\text{mm}/\text{年}$)であった。また、ひび割れと交差する主鉄筋においては、マクロセル電流は、マイクロセル電流と比較して大きい。例えば、水セメント比が50%の場合、マクロセル電流は、マイクロセル電流の約70倍となった。

(4) ひび割れが存在する場合の腐食速度

単一の主鉄筋およびスターラップに着目した供試体では、水セメント比が小さいほど、腐食速度は減少した。また、主鉄筋とスターラップを共に考慮した供試体においても、水セメント比が小さいほど、腐食速度は減少した。

(5) まとめ

主鉄筋とスターラップを共に考慮した供試体における腐食形成機構は、主鉄筋およびスターラップをそれぞれ単一に有する供試体の実験結果より、説明することができた。また、腐食速度に関する定性的な説明もできた。

7. 鉄筋コンクリート梁供試体を用いた屋外実験による検証

(1) ひび割れの影響

図-18に、全鉄筋要素のマクロセル電流密度分布およびマイクロセル電流密度分布を示す。Type-C供試体を用い、水セメント比は50%である。

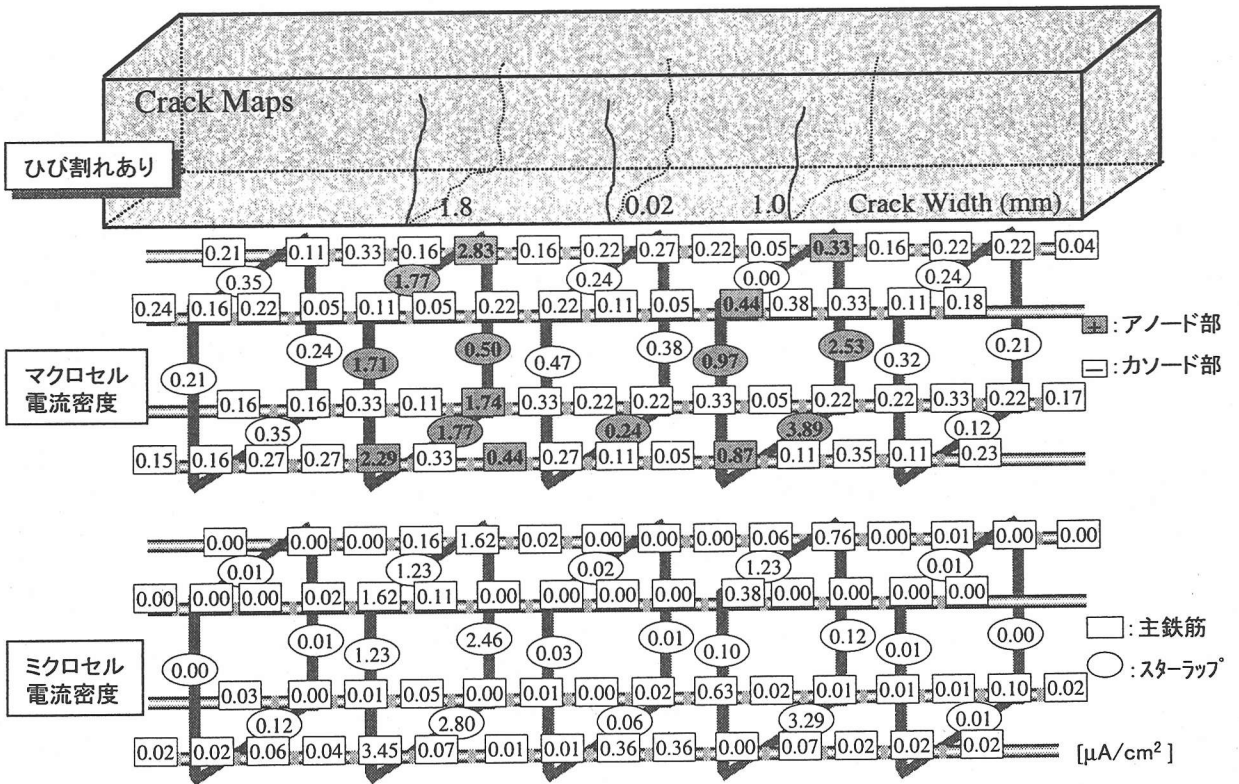
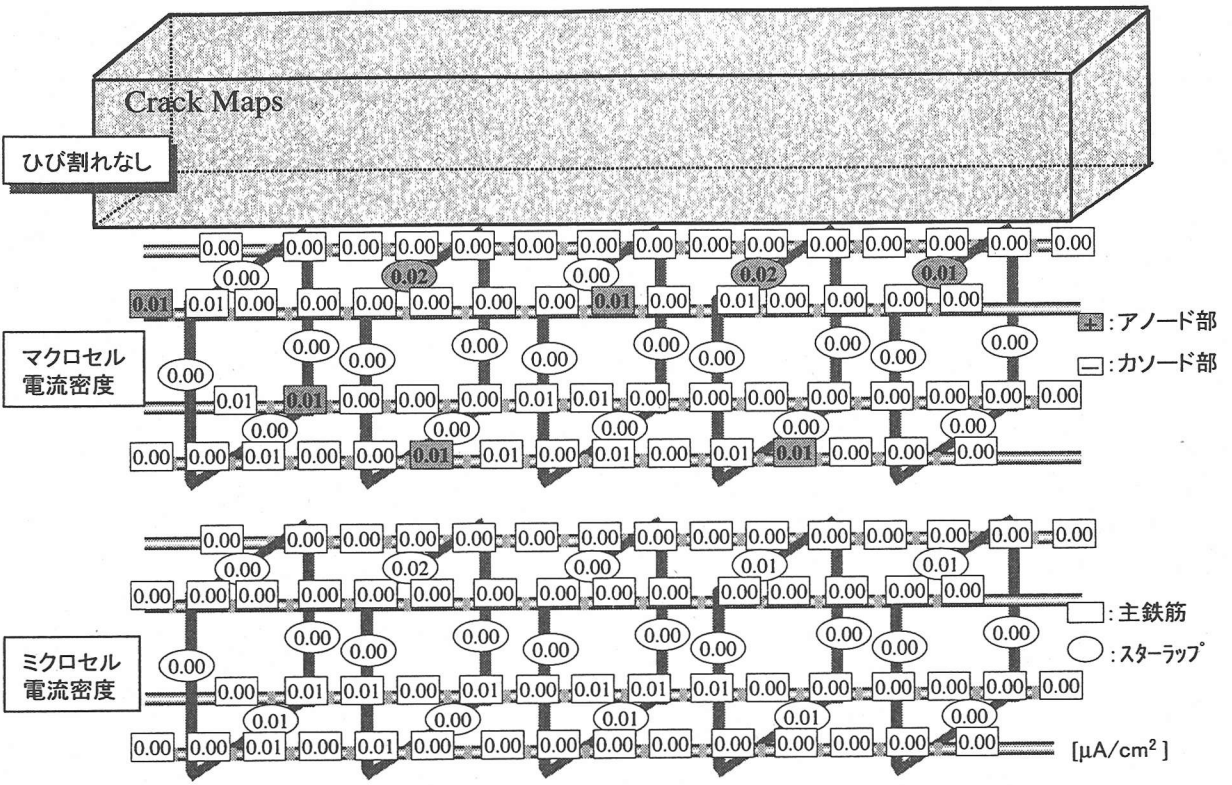
腐食形成機構について、実験結果を整理する。ひび割れがない場合、マクロセルのアノード電流は、上部スターラップにおいて、大きくなる。一方、マイクロセル電流密度も、上部スターラップにおいて、最大となる。ひび割れがある場合、マクロセルのアノード電流は、ひび割れ近傍のスターラップの下部鉄筋および引張側主鉄筋において、大きくなる。一方、マイクロセル電流密度も同様に、ひび割れ近傍のスターラップの下部鉄筋および引張側主鉄筋において、大きくなる。さらに、腐食速度について、ひび割れがある場合は、ひび割れがない場合と比較して速い。

以上のことから、ひび割れの有無が腐食形成機構および腐食速度に及ぼす影響は、屋外実験と屋内実験で、同様な傾向を示すことが確認できた。

(2) 水セメント比の影響

図-19に、引張側鉄筋のマクロセル電流密度分布およびマイクロセル電流密度分布を示す。Type-C供試体を用いた。水セメント比は、屋内実験と同様に、30%、50%および70%の3水準とした。

水セメント比が30%の場合、マクロセルのアノード電流は、ひび割れ近傍のスターラップ下部において、大きくなる。一方、マイクロセル電流密度も、ひび割れ近傍のスターラップ下部において、最大となる。水セメント比が50%の場合、マクロセルのアノード電流は、ひび割れと交差するスターラップおよび主鉄筋において、大きくなる。一方、マイクロセル電流密度も、ひび割れと交差するスターラップおよび主鉄筋において、大きくなる。水セメント比が70%の場合、マクロセルのアノード電流は、ひび割れと交差する主鉄筋および一部ではその近傍においても、大きくなる。一方、マイクロセル電流密度は、ひ



(Type-C 供試体・W/C=50%)

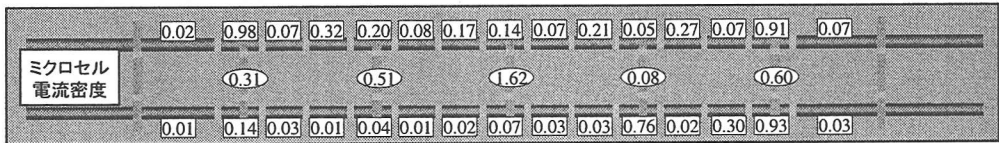
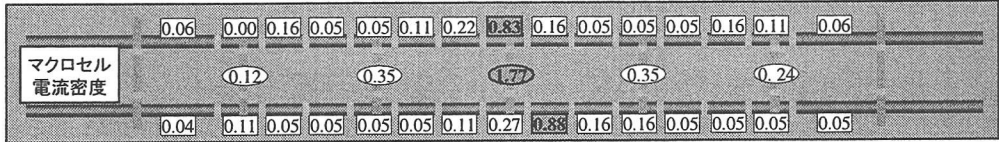
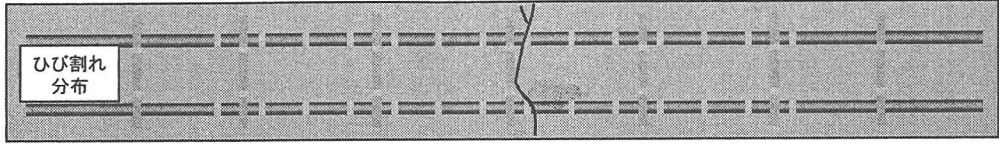
図-18 鉄筋コンクリート梁内部のマクロセル・ミクロセル電流分布

□ : 主鉄筋
○ : スターラップ

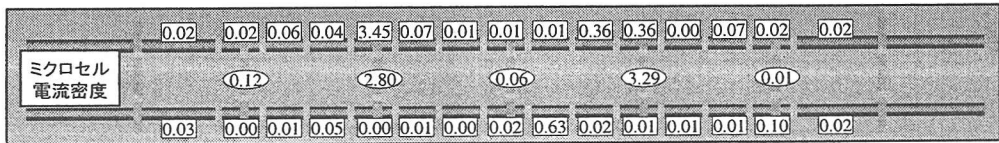
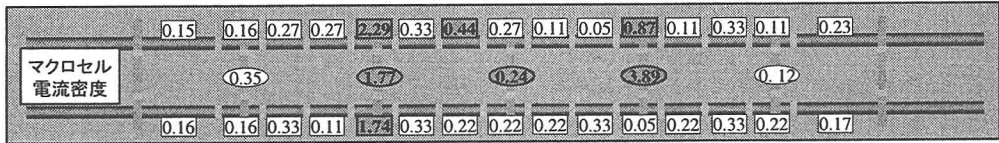
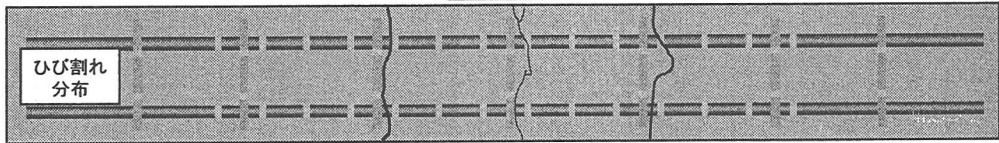
引張側

マクロセル電流密度 : アノード部
 : カソード部

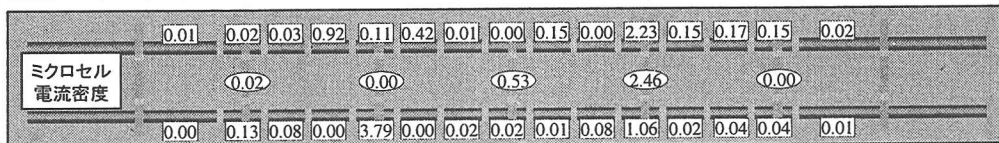
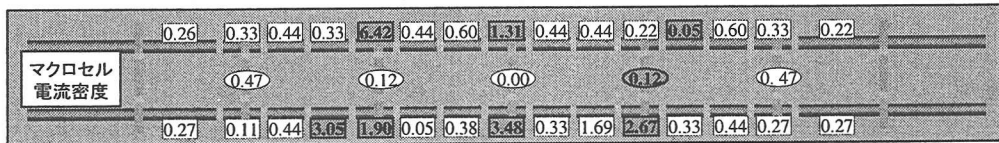
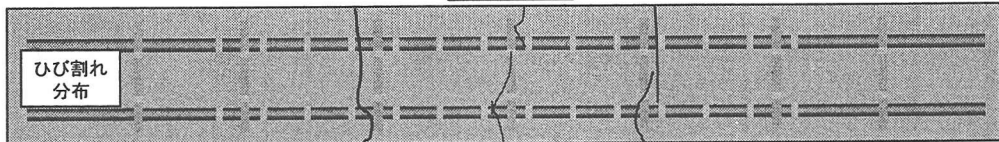
暴露期間13週



(a) W/C30%



(b) W/C50%



(c) W/C70%

[$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

(Type-C供試体)

図-19 鉄筋コンクリート梁内部のマクロセル・マイクロセル電流分布

び割れと交差する主鉄筋およびスターラップで、大きくなる。すなわち、何れの水セメント比においても、ひび割れと交差するスターラップにおいて、腐食が進行した。例えば、水セメント比が50%の場合、スターラップの腐食速度は、最大で $7.18\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($0.08\text{mm}/\text{year}$)であった。また、ひび割れと交差する主鉄筋の腐食は、多くの場合、マクロセルが卓越した。例えば、水セメント比が70%の場合、腐食速度が最大となる主鉄筋において、マクロセル電流 ($6.42\mu\text{A}/\text{cm}^2$)は、マイクロセル電流 ($0.11\mu\text{A}/\text{cm}^2$)の約60倍となった。

以上のことから、水セメント比の相違が腐食形成機構に及ぼす影響は、屋外実験と屋内実験で、同様の傾向を示すことが確認できた。

8. 結論

曲げひび割れ部に生じる塩化物腐食の形成機構と腐食速度に関して、実験的検討を行った。本論文では、主鉄筋は基より、スターラップを考慮した鉄筋コンクリート梁供試体を用いた。実験は、屋内実験と屋外実験を行った。得られた結論を以下に示す。

1. 曲げひび割れ近傍では、主鉄筋と比較して、スターラップの腐食速度は著しく速い。例えば、水セメント比が50%の場合、引張側スターラップの腐食速度は $0.12\text{mm}/\text{年}$ となり、主鉄筋の腐食速度と比較して、5倍も速い。
2. 曲げひび割れ近傍では、マクロセルが形成し、腐食速度は著しく増加する。すなわち、ひび割れがない場合は、上部スターラップにおいて、マクロセル電流密度:マイクロセル電流密度が1:5であったのが、ひび割れが存在する場合は、ひび割れと接する引張側主鉄筋において、70:1となった。さらに、ひび割れと交差する主鉄筋の腐食速度は $0.02\text{mm}/\text{年}$ であり、ひび割れがない場合の3倍も速い。
3. 内部鉄筋を分割した供試体を用いた結果、実構造物では測定不可能な鉄筋内部を流れるマクロセル腐食電流、およびマイクロセル腐食電流を、定量的に測定できた。その結果、腐食形態の評価に有効であった。
4. 屋内実験による1, 2, 3の結果は、屋外実験においても検証された。

一般に、異形鉄筋を用いた場合、丸鋼を用いた場合と比較して、部材条件および外力等が等しければ、曲げひび割れの本数は増加し、各ひび割れの幅は減

少する¹⁰⁾。すなわち、丸鋼と異形鉄筋を用いて作製されたコンクリート梁では、ひび割れの発生状況が異なる。また、ひび割れ部に存在する鉄筋の腐食速度は、丸鋼と比較して、異形鉄筋では速い⁹⁾。これらのことより、曲げひび割れ部に生じる塩化物腐食の形成機構と腐食速度は、丸鋼と異形鉄筋を用いた場合で異なると考えられる。本論文の供試体は、全て丸鋼を用いて作製されたことに留意されたい。

謝辞: 実験において、新潟大学助教授の久田真先生、大成建設株式会社(当時:東京工業大学)の坂巻直紀君に尽力を頂いた。ここに、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 山口一生: 海洋環境下に10年間暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食状態, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, V, pp. 304~305, 1995.
- 2) 大即信明, 櫻野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I), 技報堂出版, pp. 20~21, 1986.
- 3) 大即信明, 宮里心一, 柴田常德, 久田真, Tarek Uddin Md., 長瀧重義: 鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の形成機構に及ぼす水セメント比の影響, 土木学会論文報告集, 第606号, 1998.
- 4) 神田一: コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食, セメント技術年報, pp. 491~493, 1972.
- 5) 岡田清, 小柳治, 宮川豊章: コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究, 土木学会論文報告集, 第281号, pp. 75~87, 1979.
- 6) 蛭川友司, 見坊東光, 森芳徳, 伊藤洋: 海水が浸透するひび割れ中の鉄筋腐食に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 466/V-19, pp. 31~39, 1993.
- 7) 大野義照, 鈴木計夫, 田村博: コンクリート中のマクロセル腐食に及ぼす各種要因の影響, セメント・コンクリート, No. 601, pp. 41~48, 1997.
- 8) N. Otsuki, Tarek Uddin Md., M. Hisada and S. Nagataki: Corrosion of Plain and Deformed Steel Bars in Cracked Concrete, Supplementary papers of 4th CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, pp. 249~268, 1998.
- 9) 腐食防食協会: 金属の腐食・防食Q & A, 丸善株式会社, pp. 140~141, 1988.
- 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) 宮里心一, 大即信明, 柴田常德, 長瀧重義: 曲げひび割れ部のマクロセル腐食に及ぼすひび割れ幅の影響, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, V, pp. 766-767, 1997.
- 12) 宮里心一, 大即信明, 長瀧重義, 柴田常德: 曲げひび割れ部のマクロセル腐食に及ぼす水セメント比の影響, 第15回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, pp. 215-218, 1997.
- 13) 神田衛, 吉田八郎: コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状, セメント・コンクリート, No. 357, pp. 38-43, 1976.

- 14) 宮里心一, 大即信明, 佐伯竜彦: 分極曲線を用いた断面修復部のマクロセル腐食速度予測, コンクリート工学年次論文報告集 第20巻第2号, pp. 865-870, 1998.
- 15) 岡田清, 伊藤和幸, 不破昭, 平澤征夫: 鉄筋コンクリ

ート工学, 鹿島出版会, p. 126, 1992.

(1998. 9. 24受付)

MECHANISM OF CHLORIDE-INDUCED CORROSION ON MAIN REBARS AND STIRRUPS NEAR BENDING CRACKS

Nobuaki OTSUKI, Shinichi MIYAZATO, Hirotaka SUZUKI and Hayato KIMURA

In this study, the chloride induced corrosion mechanism and the rate were experimentally investigated on reinforced concrete beams with bending cracks. Special features of this study include: crack formation through application of bending load, consideration of main rebars and stirrups separately and as a whole, and measurements of both macro-cell and micro-cell currents. Indoor experiments were conducted to investigate local corrosion of main rebars and stirrups. Then, the corrosion of main rebars and stirrups was studied on model beams. To clarify the indoor test results, larger scale beams exposed to outdoor environment were investigated. Results of the importance of stirrups near cracks on corrosion and the influence of existence of cracks on the corrosion mechanism and rate are reported.