

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

大即信明¹・宮里心一²・柴田常德³・久田真⁴・Tarek Uddin Md.⁵・長瀧重義⁶

¹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(〒152-8552目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工修 東京工業大学助手 工学部開発システム工学科

³正会員 工修 大林組株式会社(〒592-0001大阪府高石市高砂3-1)

⁴正会員 工博 新潟大学助教授 工学部建設学科(〒950-1401新潟市五十嵐二の町8050)

⁵正会員 工博 株式会社ニュージェック(〒542-0082大阪市中央区島之内1-20-19)

⁶正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科

水セメント比の相違が、鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に形成される腐食の形成機構に及ぼす影響を、実験的に検討した。初めに、モルタルを用いた腐食促進試験を行い、塩化物イオン浸透性および酸素透過性と腐食形態の関連を調べた。ここで用いた供試体は、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本に分割した鉄筋をモルタル内部に埋設した。さらに、曲げひび割れ近傍に生じる、鉄筋とモルタルの剥離部を考慮した。最後に、鉄筋コンクリート梁供試体を用いた腐食試験により、モルタル試験を検証した。この結果、鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる、腐食の発生機構とその後の進行形態が明らかとなった。

Key Words: chloride induced corrosion, bending crack, macrocell corrosion, microcell corrosion, W/C

1. はじめに

コンクリートは現代の社会基盤を形成してきた最も重要な材料の一つであり、今後もその利用が期待される。しかしながら、これまでに建設された鉄筋コンクリート構造物の一部に対し、塩害による早期の劣化が指摘され、その耐久性がクローズアップされてきた。

一般に、鉄筋コンクリート構造物は、かぶりにより、腐食要因となる塩化物イオン、酸素および水分の浸透を抑制している。しかしながら、コンクリートにひび割れが存在すると、それらの物質を鉄筋まで容易に浸透させ、比較的早期に腐食が発生する。特に、ひび割れ部においてマクロセル腐食が発生すると、さらに腐食は促進し、早期劣化を引き起こすこととなる。

ひび割れ部に形成するマクロセル腐食に関する研究には、次のものがある。蛭川らの研究¹⁾によれば、腐食形態は全般に局部腐食型であり、ひび

割れ面と交わる付近で、最も著しい腐食が発生するとしている。宮川らの研究^{2), 3)}によれば、マクロセル腐食は、ひび割れ箇所と部材内部の鉄筋の電位差が起電力になり生じる。ひび割れの存在は腐食を局部化するが、腐食領域はひび割れ部のみならず近傍を含んだ領域である。また、大野、鈴木、田村の研究⁴⁾によれば、水セメント比が50%と70%の場合は、ひび割れの有無が腐食に大きく影響を及ぼす。一方、30%では、鉄筋の腐食開始は著しく遅く腐食量も小さいとしている。筆者ら⁵⁾は、ひび割れと交わる部分の鉄筋は、乾湿の条件によってはマクロセルにおけるアノードまたはカソードと変化することを指摘した。しかしながら、いずれの研究においても、マクロセル腐食について、アノードとカソードの位置関係を特定せずに考察しているのが現状である。

以上のことから、本研究では、鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の発生機構およびその後の進行形態の解明を目的として、水セメ

表-1 セメントの物理的性質および化学成分

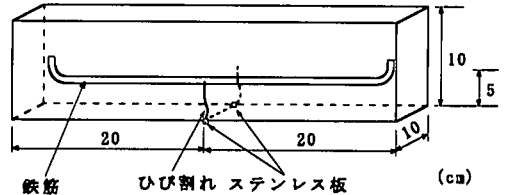
		丸外	コンクリート
物理的性質	密度	g/cm ³	3.15
	ブレン比表面積	cm ² /g	3260
	凝結：水量	%	28.3
	始発	時一分	2-22
	終結	時一分	2-28
	安定性 (煮沸方法)		良
	フロー値		240
	圧縮強さ： 3日	MPa	16.6
	7日	MPa	26.7
	28日	MPa	42.7
化学成分	強熱減量	%	1.4
	不溶残分	%	0.62
	MgO	%	1.5
	SO ₃	%	1.9
	Cl ⁻	%	0.005
			0.01

表-2 骨材の物理的性質

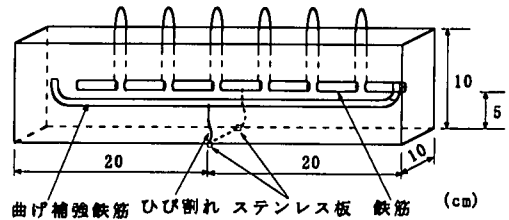
	最大寸法	粗粒率	表乾比重	吸水率
細骨材	5mm	2.20	2.62	1.17%
粗骨材	20mm	6.65	2.64	0.81%

表-3 鋼材の化学成分

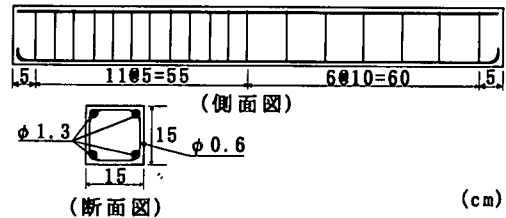
(%)					
Fe	C	Si	Mn	P	S
99.1	0.12	0.12	0.58	0.031	0.023



(a)モルタル①供試体



(b)モルタル②供試体



(c)コンクリート供試体

図-1 供試体概要図

ント比に相違を設け、実験的検討を行った。すなわち、曲げ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)⁶⁾における塩化物イオン浸透性、およびひび割れ箇所と部材中の酸素透過性の比較を詳細に検討し、経時的に変化するマクロセルにおけるアノードとカソードの位置関係およびマイクロセル腐食の発生箇所を特定した。

本論文の構成および使用した供試体の特徴を記す。まず初めに、モルタル供試体を用い、塩化物イオン浸透性および酸素透過性と、腐食形態の関連を暴露期間毎に検討した。ここでは、水セメント比を3通り(30, 50, 70%)設定し比較検討した。使用した供試体は、鋼材内部を流れる電流を測定可能とするため、7本の要素に分割した鉄筋を埋設した。また、3点曲げ载荷によりひび割れを作製することにより、曲げひび割れ近傍に生じる鉄筋とコンクリートの剥離部を考慮することを可能とした。最後に、鉄筋コンクリート梁供試体を用いた試験により、モルタル試験を検証した。

2. 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普通ポルトランド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(砕石)を使用した。

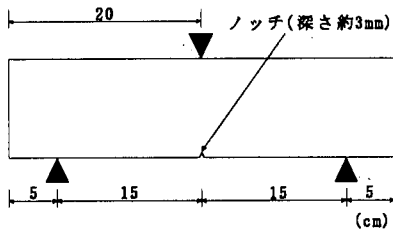
混和剤は、ブリーディングを防止するため、水セメント比が70%のモルタルにおいて、メチルセルロース系水中不離性混和剤を水質量に対して、1.2%添加した。また、水セメント比が30%のモ

ルタルにおいて、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。一方、コンクリートにおいては、スランプおよび空気量在一定となる様に、スルホン酸系A E減水剤およびA E助剤を添加した。なお、これらの混和剤が腐食に及ぼす影響は少ないと思われる。

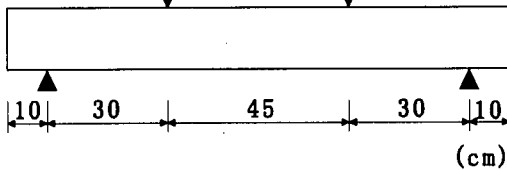
鋼材は、表-3に示す化学成分の丸鋼を使用した。

(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。モルタル①供試体を用いて、塩化物イオン浸透分布およびモルタルと鉄筋の剥離面積を測定した。モル



(a)モルタル①・②供試体



(b)コンクリート供試体

図-2 曲げひび割れ作製方法

タル②供試体を用いて、ひび割れ部における酸素透過量、あるいは鉄筋の腐食程度を評価した。

a) モルタル①供試体

使用した鉄筋は、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。打設後、相対湿度80%室温20度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、図-2に示すように、予め供試体下面に深さが約3mmのノッチを設け、3点曲げ荷重により生じさせた。マイクロスコブを用いひび割れ開口部を観察し、ひび割れ幅が0.3mmに達した時点で荷重を終了し、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(図-1(a)参照)。また、ひび割れ開口面を除く5面を、エポキシ系樹脂により被覆し、塩化物イオンが1面のみから浸透するようにした。その後、塩水噴霧(NaCl13.1wt%)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。

b) モルタル②供試体

供試体内部に埋設した鉄筋を、図-3に示す。使用した鉄筋は、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本に分割した。各鉄筋は、モルタル①供試体と同様に黒皮を剥ぎ、鉄筋側面の両側端部にリード線をはんだ付けした後、接合部をエポキシ系樹脂により被覆した。さらにリード線が付いた面を同一方向に揃え、

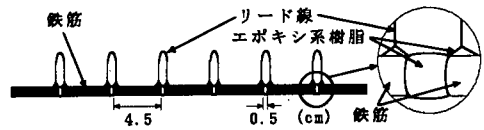


図-3 モルタル②供試体に埋設した内部鉄筋

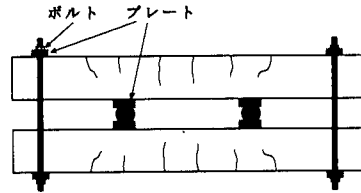


図-4 コンクリート供試体の治具取り付け状況

表-4 コンクリートの配合とフレッシュ性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量						Slump (cm)	Air (%)
		W	C	S	L	G	減水剤/助剤 (ml/m³)		
50	45	165	330	803	989	743	13.2	9.0	4.9
70	45	165	236	837	1032	637	9.4	9.5	5.2

エポキシ系樹脂によって鉄筋要素間を接続し、隣接する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。前処理が終了した鉄筋は、曲げ荷重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。さらに、酸素透過性を測定するため、一部の供試体に対しては、型枠下面にチタンメッシュを配置し、打設した。なお、全面にエポキシ系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。打設後の処理は、モルタル①供試体と同様である。

c) コンクリート供試体

鉄筋はワイヤブラシで黒皮を剥いだ後、引張側主鉄筋となる鋼材端部にリード線をはんだ付けし、接合部をエポキシ系樹脂により被覆した。初期養生方法は、モルタル供試体と同様である。曲げひび割れは、図-2に示す位置を支点および荷重点とする4点曲げ荷重により作製した。ひび割れは、図-4に示す治具により制御し、東京工業大学構内(東京都目黒区)にて1996年8月から屋外暴露を行った。1週間に一度、コンクリート表面に対して2.42kg/m²の塩水(NaCl13.5wt%)を噴霧した。

(3) 実験ケース

モルタルの配合は、水セメント比が30%、50%、70%の3通りとした。いずれの水セメント比においても、S/Cは2.5とした。一方、コンクリートの配合、スランプおよび空気量の測定結果を、表-

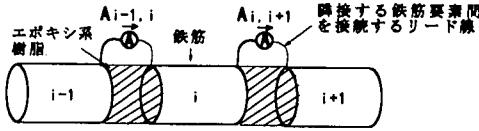


図-5 マクロセル電流密度の測定方法

4に示す。

(4) 測定項目と測定方法

本研究では、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ぶ。すなわち、マクロセルとは、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)と定義する。一方、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。すなわち、マイクロセルとは、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)と定義する。したがって、マクロセル電流とマイクロセル電流を合計することにより、全腐食電流が求まる。

a) 自然電位の測定

照合電極に飽和硫酸銅電極を用い、自然電位を測定した。モルタル試験においては、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、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-5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モルタル中に流出するアノード電流密度は正、モルタル中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⁷⁾。

c) マイ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、

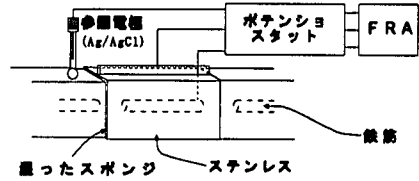


図-6 分極抵抗の測定方法

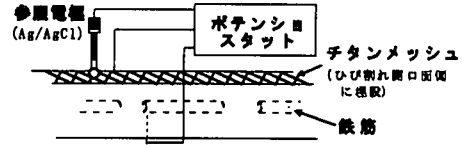


図-7 酸素透過量の測定方法

各鉄筋要素毎の鉄筋表面の分極抵抗を周波数応答解析装置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-6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、分極抵抗は、ボ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⁸⁾。

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

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8)を参考にし、 $0.0209(\text{V})$ とした。

d) 酸素透過量の測定

図-7に、酸素透過量の測定の概略図を示す。測定方法は、鉄筋とチタンメッシュ間にポテンシオスタットを接続し、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、予め同様の供試体において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、しかも水素発生がないことを確認した。この値は、文献9)および10)と同様な値である。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。

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

ここで、

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

i_{lim} = 限界電流密度(A/cm^2)

$n = 4$

F = ファラデー定数($=96500\text{ C/mol}$)

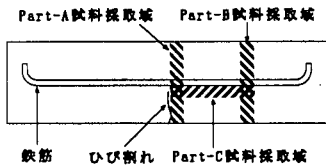


図-8 可溶性塩化物イオン含有量試験の試料採取域

e) 腐食減量の測定

供試体から取り出した鉄筋を、10%クエン酸二水素アンモニウム水溶液に24時間浸漬させて錆を溶解した。その後、サンドペーパーおよびワイヤブラシを用い表面の付着物を完全に除去し、鉄筋の質量を測定し、打設前の鉄筋との質量差から、腐食減量を算定した。さらに、鉄筋要素の長さで除することにより、鉄筋単位長さ当たりの腐食減量を求めた。

f) 可溶性塩化物イオン含有量の測定

ダイヤモンドカッターにより、図-8に示す、対象とする部材を切り取った。Part-Aはひび割れ近傍、Part-Bはひび割れの影響を受けないモルタル内部、Part-Cは鉄筋下面近傍である。採取した試料は質量を測定し、105度の乾燥炉にて24時間乾燥させた。その後、乾燥した試料の質量を測定し、次式より、含水率を算定した。

$$C_w = \frac{W_0 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 C_w : 試料の含水率 (wt%)
 W_0 : 乾燥前の試料質量 (g)
 W_1 : 乾燥後の試料質量 (g)

乾燥させた試料は、105 μ m以下の大きさに粉碎した。この試料10gを100gの蒸留水に浸漬させ、50度の恒温室に24時間保存し、その後室温が20度の環境中にて、水溶液の温度が20度になるまで保存した。この溶液中の塩分量を、塩分濃度計を用いて測定し、次式から、モルタルの単位質量当たりの可溶性塩化物イオン量を算定した。

$$C_{c1} = \frac{C_m}{10} \times \frac{100}{100 + C_w} \quad (5)$$

ここで、
 C_{c1} : モルタルの単位質量当たりの可溶性塩化物イオン量 (wt%)
 C_m : 測定された可溶性塩化物イオン量 (%)

g) モルタルと鉄筋の剥離 (肌離れ) 面積の測定
ひび割れ開口部から、1%フェノールフタレイ

ンアルコール水溶液を注入し、ひび割れ部および曲げひび割れ近傍に生じたモルタルと鉄筋の剥離部へ浸透させた。十分に乾燥させた後、供試体を割裂し、鉄筋とモルタルの付着面における変色面積を測定し、剥離面積とした。

3. モルタル供試体を用いた腐食促進試験

(1) 実験結果-1(水セメント比と腐食の関係)

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-9~12に示す。ひび割れ幅は0.3mm、モルタルの水セメント比は30%、50%、70%である。図-9は暴露期間が1週、図-10は2週、図-11は4週、図-12は13週の測定結果である。

これによると、自然電位に関しては、暴露期間が1週および2週の場合は、いずれの水セメント比においても、ひび割れ箇所のみが卑になることが認められる。一方、暴露期間が13週になると、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍の鉄筋も、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、暴露期間が1週および2週においては、ひび割れ箇所であノード電流が認められる。一方、暴露期間が13週においては、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍であノード電流が認められる。また、ひび割れ箇所のアノード電流は、暴露期間が4週の場合と比較して、減少することが認められる。マイクロセル電流密度に関しては、暴露期間が1週、2週および4週において、ひび割れ箇所で大きくなることが認められる。その値は、水セメント比が大きいほど、増加する。一方、暴露期間が13週においては、水セメント比が50%の場合は、ひび割れ近傍の鉄筋(鉄筋の位置=25cm)でも、大きくなることが認められる。水セメント比が70%の場合は、ひび割れからさらに離れた(鉄筋の位置=30cm)鉄筋要素でも、大きくなることが認められる。また、水セメント比が30%の場合は、ひび割れ箇所でのみ、小さなマイクロセル電流が確認できる。

図-13に、腐食電流の和の継時変化を示す。ここで腐食電流の和とは、測定されたマクロセル電流のアノード側の値およびマイクロセル電流の値(図-9~図-12中の正の電流密度とその鉄筋要素の表面積を掛けた値)を各々足し合わせたものである。これによると、暴露期間に関わらず、水セメント比が大きいほど、マクロセル電流の和およびマイクロセル電流の和は、増加することが認めら

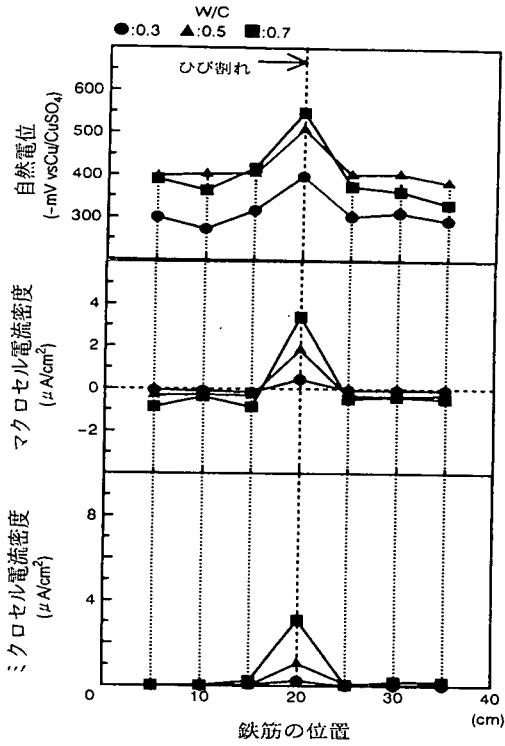


図-9 水セメント比の相違が腐食に及ぼす影響 (暴露期間1週)

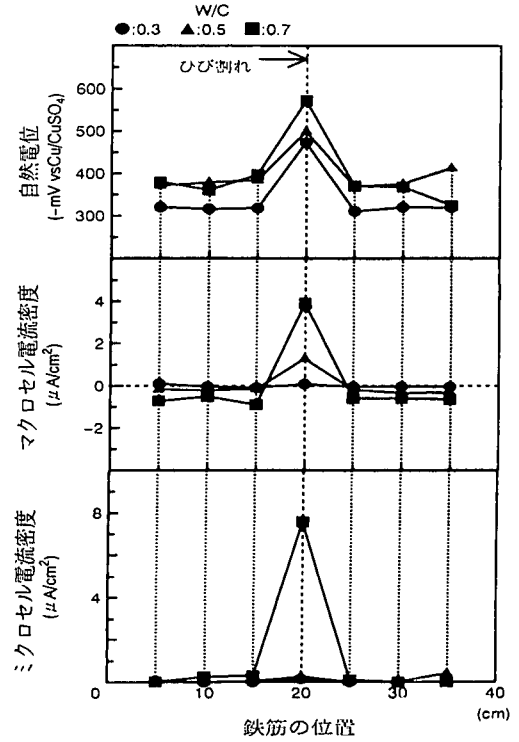


図-10 水セメント比の相違が腐食に及ぼす影響 (暴露期間2週)

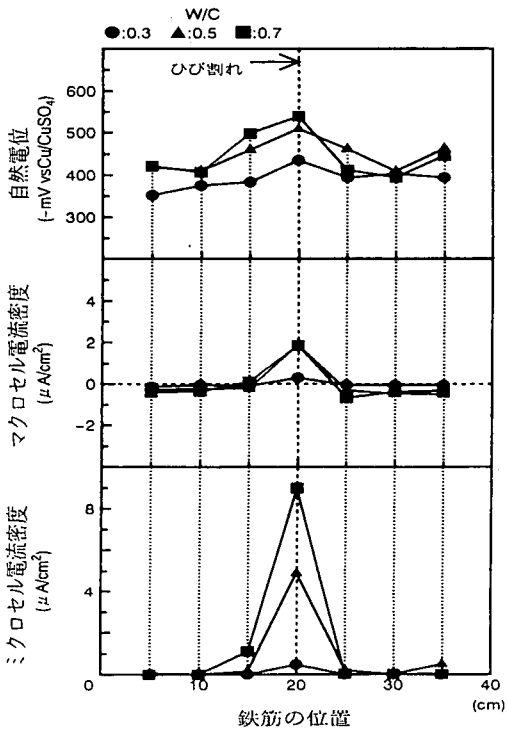


図-11 水セメント比の相違が腐食に及ぼす影響 (暴露期間4週)

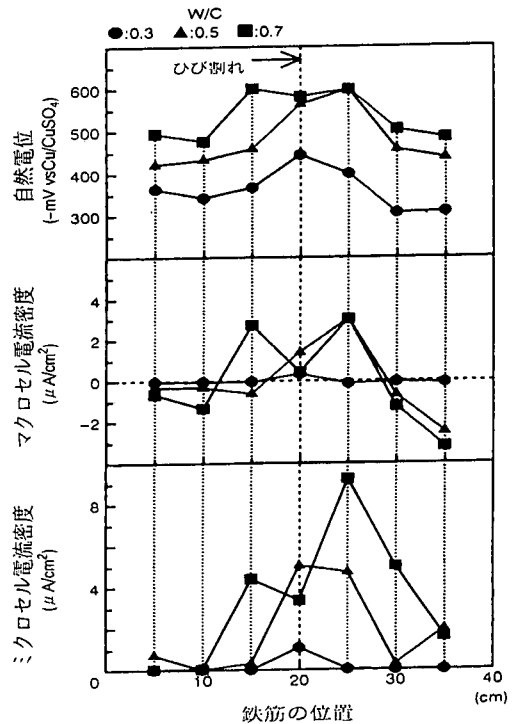


図-12 水セメント比の相違が腐食に及ぼす影響 (暴露期間13週)

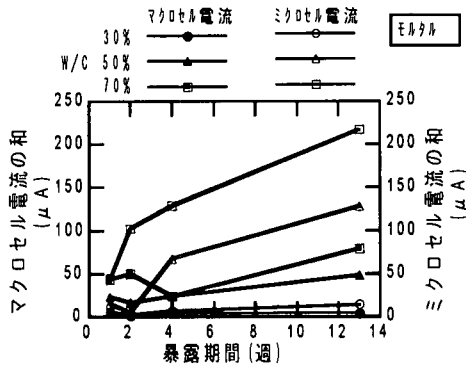


図-13 水セメント比の相違が腐食電流に及ぼす影響

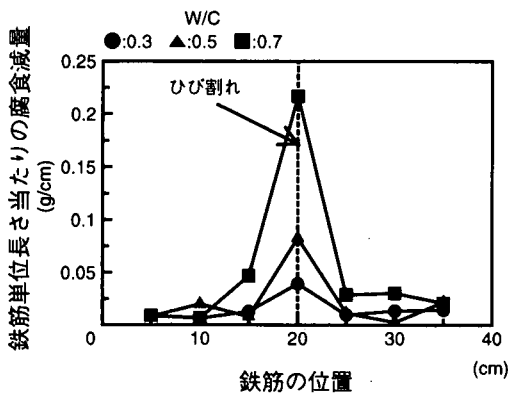


図-14 水セメント比の相違が腐食減量に及ぼす影響

れる。また、マイクロセル電流は、マクロセル電流と比較して、大きいことが分かる。

以上のことから、実験結果をまとめると、次のことが分かる。マクロセルを形成するアノードとカソードの位置関係に関しては、暴露期間が短期の場合は、ひび割れ箇所のみがアノードとなる。一方、暴露期間が長期になると、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍のモルタル内部の鉄筋がアノードとなる。マイクロセル電流の発生箇所に関しても、同様の傾向が見られた。すなわち、暴露期間が短期の場合は、ひび割れ箇所のみで、マイクロセル腐食の発生が見られた。一方、暴露期間が長期になると、水セメント比が50%および70%の場合は、ひび割れ近傍のモルタル内部の鉄筋においても、腐食の進行が確認された。特に、水セメント比が70%では、ひび割れから離れた鉄筋においても、腐食は発生した。また、腐食速度に関しては、マクロセル腐食速度およびマイクロセル腐食速度ともに、水セメント比が大きいほど増大する。さらに、マイクロセル腐食速度は、マクロセル腐食速度と比較して大きい。

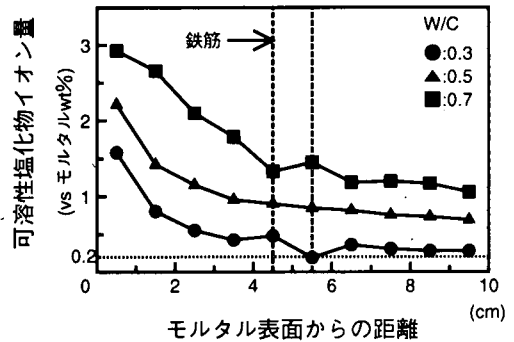


図-15 暴露期間13週におけるPart-AのCl⁻量

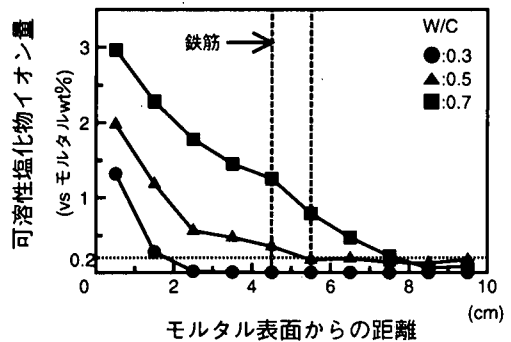


図-16 暴露期間13週におけるPart-BのCl⁻量

図-14に、暴露期間が13週における、水セメント比の相違が腐食減量に及ぼす影響を示す。これによると、ひび割れと交わる部分の鉄筋が最も大きく、その値は水セメント比が大きいほど、増加することが認められる。また、水セメント比が70%の場合は、ひび割れ近傍の部材内部の鉄筋においても、腐食減量が大きくなることが分かる。したがって、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から想定される腐食程度と、内部鉄筋をはつりとり測定した腐食減量は、同様な傾向を示すことが確認できた。

(2) 実験結果-2(水セメント比と物質透過性の関係)

図-15~18に、水セメント比の相違が塩化物イオン浸透量に及ぼす影響を示す。図-15は暴露期間が13週におけるひび割れ近傍のモルタル中に含まれる塩化物イオン量分布、図-16は暴露期間が13週におけるひび割れから離れたモルタル中に含まれる塩化物イオン量分布、図-17は暴露期間が4週におけるひび割れからモルタル内部方向への

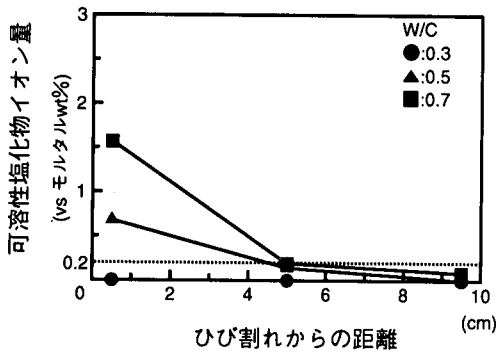


図-17 暴露期間4週におけるPart-CのCl⁻量

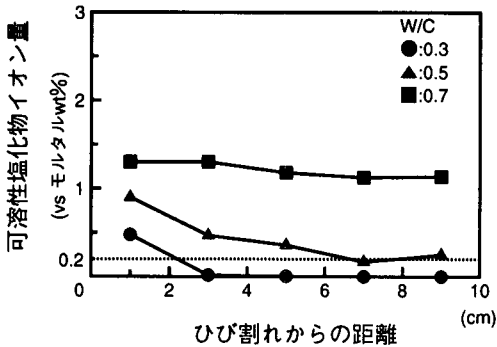


図-18 暴露期間13週におけるPart-CのCl⁻量

鉄筋下面近傍のモルタルに含まれる塩化物イオン量分布、図-18は暴露期間が13週におけるひび割れからモルタル内部方向への鉄筋下面近傍のモルタルに含まれる塩化物イオン量分布を示す。なお、図中の点線（可溶性塩化物イオン量=0.2%）以上であれば、50%以上の確率で健全な不働態は存在しない¹³⁾。

図-15によると、ひび割れを通じて浸透する塩化物イオン量は、水セメント比が大きいほど増加することが認められる。同様に、図-16によると、ひび割れの影響が少ないモルタル中を通じて浸透する塩化物イオン量も、水セメント比が大きいほど増加することが認められる¹⁴⁾。次に、図-17と図-18を比較する。暴露期間が4週においては、ひび割れ箇所のみが多量の塩化物イオンを含有していることが分かる。一方、暴露期間が13週においては、水セメント比が50%および70%の場合、モルタル内部においても、塩化物イオン含有量が多くなることが認められる。特に、水セメント比が70%の場合、50%の場合と比較して、暴露期

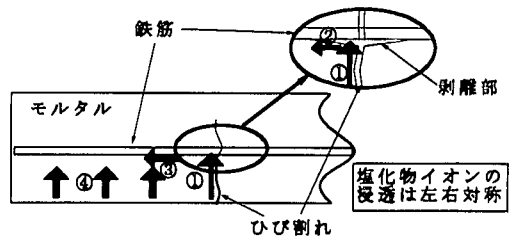


図-19 塩化物イオンの浸透経路

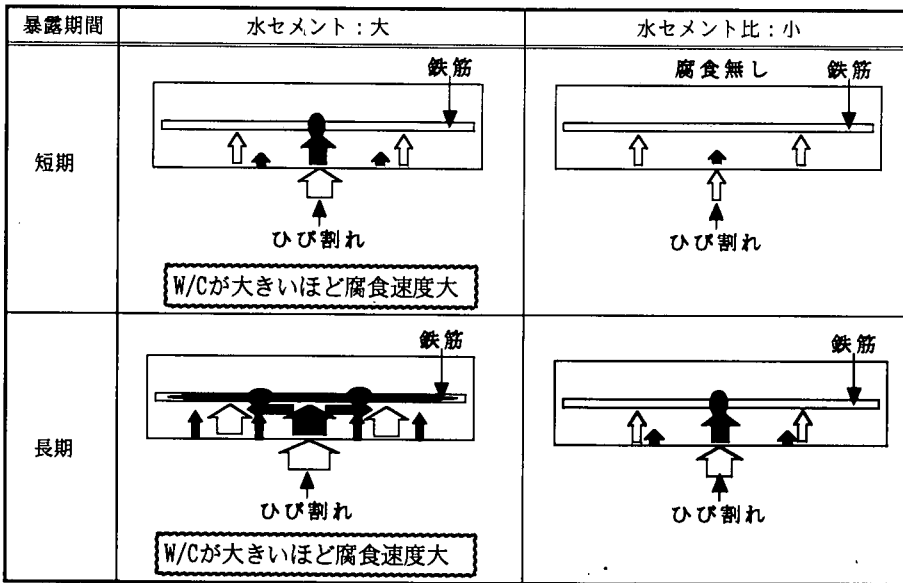
表-5 ひび割れ近傍の鉄筋とモルタルの剥離面積

W/C	剥離面積 (cm ²)
0.3	1.53
0.5	2.11
0.7	2.48

間が4週の時と比較した塩化物イオン含有量の増加が多いことが分かる。このことについて、図-19を用いて考察する。塩化物イオンは、かぶりコンクリート中を浸透することと比較して、ひび割れを通じることにより、内部鉄筋に容易に浸透することが出来る(①)。ひび割れを通じての塩化物イオン浸透量は、図-15に示す通り、水セメント比が大きいほど増加する。ひび割れを通じて、外部環境から内部鉄筋に到達した塩化物イオンの一部は、表面からさらに遠いひび割れ内部に浸透する。他方は、ひび割れ近傍の鉄筋とモルタルの剥離部に浸透する(②)。表-5に示す通り、水セメント比が大きいほど、ひび割れ近傍の鉄筋とモルタルの剥離面積が増加する。したがって、水セメント比が大きいほど、剥離部を浸透する塩化物イオン量は増加すると考えられる。さらに、剥離部先端に到達した塩化物イオンは、締固め時に浮上した空気泡等が貯まり多孔質となった、鉄筋下面近傍のモルタルを伝わり、健全なモルタル中に浸透する(③)。以上のことより、外部環境からひび割れを通じて鉄筋表面に到達し、さらに鉄筋に沿ってモルタル内部に浸透する塩化物イオンは、水セメント比が大きいほど、増加すると考えられる。さらに、図-16に示す通り、水セメント比が70%では、外部環境からモルタル中を通じて鉄筋表面に浸透する塩化物イオンも、多量に存在することが確認できる(④)。なお、図-18によれば、水セメント比が30%の場合、13週間暴露した後においても、モルタル内部へは塩化物イオンが浸透していないことが認められる。

表-6に、水セメント比と酸素透過量の関係を示す。(a)は暴露期間が4週、(b)は13週の測定結果である。また、各々ひび割れと交わる部分の鉄筋への酸素透過量、およびモルタル内部の鉄筋へ

表-7 水セメント比が腐食形成機構に及ぼす影響



- ↑ 塩化物イオン浸透量(太いほど多い)
- ⌞ 酸素透過量(太いほど多い)
- マクロセルのアノード部
- ミクロセルの腐食箇所

の酸素透過量を測定した。(a)によると、暴露期間が4週では、ひび割れと交わる部分の鉄筋において、水セメント比が大きいほど、酸素透過量が增大することが確認できる。一方、(b)によると、暴露期間が13週では、水セメント比が50%および70%の場合、ひび割れを通じての酸素透過量は、同様に多いことが認められる。また、モルタルを通じての酸素透過量は、水セメント比が大きいほど、増大する。この時、ひび割れを通じての酸素透過量は、モルタル中の酸素透過量と比較して、多いことが認められる。

(3) 考察

表-7に、物質透過性と腐食の関連性を整理する。暴露期間が短期では、水セメント比が大きい場合、ひび割れ箇所において腐食が発生する。これは、ひび割れと交わる部分の鉄筋のみに塩化物イオンが浸透するためと考えられる。この時、水セメント比が大きいほど、ひび割れ箇所における、酸素透過量が增大するため、腐食反応を促進させる。

一方、暴露期間が長期では、水セメント比が70%あるいは50%の場合は、マクロセルのアノード部と、ミクロセル腐食の発生箇所に相違が見ら

表-6 水セメント比が酸素透過量に及ぼす影響

(a) 暴露期間4週		
W/C	酸素透過量(10 ⁻¹⁰ mol/cm ² sec)	
	ひび割れ箇所	乱列内部
0.3	0.3	0.1
0.5	1.0	0.2
0.7	2.4	0.4

(b) 暴露期間13週		
W/C	酸素透過量(10 ⁻¹⁰ mol/cm ² sec)	
	ひび割れ箇所	乱列内部
0.3	0.3	0.1
0.5	3.5	1.3
0.7	3.0	1.7

れた。塩化物イオンはひび割れから鉄筋に沿って部材内部に浸透する。したがって、ひび割れ近傍にも、不動態皮膜の破壊を生じさせるに十分な量の塩化物イオンが浸透し、鉄筋はアノードと成りえる。この時、酸素透過量は健全なモルタル内部の鉄筋と比較して、ひび割れと交わる部分の鉄筋で多い。すなわち、多量の酸素が到達するひび割れと交わる部分の鉄筋がマクロセルのカソードに成りやすい。マクロセルは、アノードとカソード間のモルタルによる電気抵抗が小さいほど、形成が容易である。したがって、ひび割れ近傍のモルタル内部の鉄筋がアノードとなるマクロセルが形成したと考えられる。また、ミクロセルに関しては、次の通りである。塩化物イオンは、短期にお

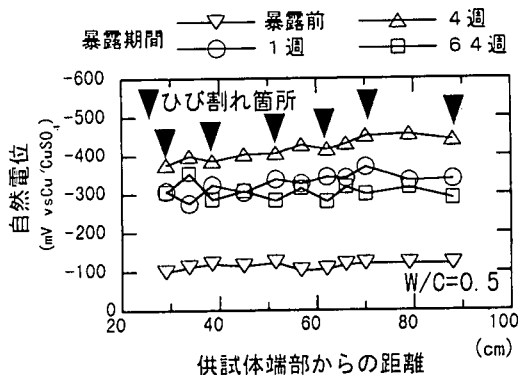


図-20 コンクリート供試体の自然電位の経時変化

いてすでに浸透したひび割れ箇所から、長期になると鉄筋内部に浸透する。また、水セメント比が70%の場合は、モルタル中を通じて、鉄筋表面に浸透する塩化物イオン量も多い。その結果、不動態皮膜を破壊するに十分な量の塩化物イオンが到達した鉄筋においては、ひび割れからの位置と関係なく、腐食の発生が確認された。この時、水セメント比が大きいほど、モルタル内部を透過する酸素量が増加するため、腐食速度も速い。水セメント比が30%の場合は、ひび割れと交わる部分の鉄筋のみに塩化物イオンが浸透した。したがって、ひび割れ箇所でも腐食が発生した。ただし、酸素透過量はひび割れ箇所およびモルタル内部の鉄筋いずれにおいても少ないため、腐食速度は遅いと考えられる。

4. コンクリート供試体を用いた試験

モルタル供試体を用いた腐食促進試験により、ひび割れ部の物質透過性と腐食の関連性が、明らかとなった。ここでは、鉄筋コンクリート梁供試体を用いた試験を行い、モルタル試験の結果を検証する。

引張側主鉄筋の自然電位の経時変化を、図-20に示す。これによると、暴露期間が1週では、ひび割れと交わる鉄筋が、ひび割れ中間部のかぶりコンクリート中の鉄筋と比較して、卑になることが認められる。一方、暴露期間が64週では、ひび割れ中間部のかぶりコンクリート中の鉄筋が、ひび割れ箇所と比較して、卑になることが認められる。したがって、暴露期間が比較的短い場合は、

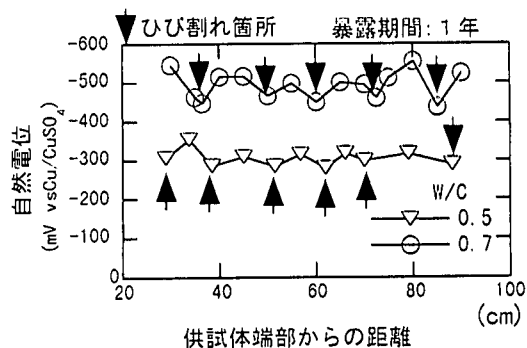


図-21 コンクリートの水セメント比がマクロセル腐食に及ぼす影響

ひび割れ箇所がアノードとなるマクロセルが形成し、またマイクロセル腐食もひび割れ箇所において発生していたと考えられる。また、暴露期間が長期になると、ひび割れ箇所がカソード、ひび割れ中間部のかぶりコンクリート内部の鉄筋がアノードとなると考えられる。

水セメント比が50%および70%における、自然電位の測定結果を図-21に示す。これによると、自然電位に関しては、水セメント比が70%の場合は、50%の場合と比較して、卑になることが認められる。したがって、水セメント比が70%の時は、50%と比較して、腐食は促進していると考えられる。

以上のことから、コンクリート供試体を用いた試験においても、モルタル試験と同様の傾向であることが示された。すなわち、腐食形成については、暴露期間が長くなると、ひび割れと交差する鉄筋のみならず、かぶりコンクリート内部の鉄筋も腐食することが明らかとなった。このことから、曲げひび割れ部にマクロセルが形成し、腐食が進行すると、鉄筋の断面減少が曲げひび割れの近傍を含む部分（本研究の実験ではひび割れから約5cmの範囲）で生じる可能性が懸念される。

5. 結論

本研究では、曲げひび割れを有する鉄筋コンクリート部材の腐食形成機構に関して、水セメント比に相違を設け、実験的に検討を行った。実験の範囲内で、次のことが分かった。

- ① 曲げひび割れ部に形成する腐食形態は、経時的に変化する。暴露期間が短期では、ひび割れと交差する部分の鉄筋においてのみ、腐食が発生する。一方、暴露期間が長期になると、水セメント比が50%あるいは70%の場合、ひび割れ近傍の鉄筋がアノードとなるマクロセルが形成し、腐食が進行する。また、水セメント比が70%の場合は、健全なかぶりコンクリート内部の鉄筋においても、ミクロセル腐食は発生する。
- ② 暴露期間によらず、水セメント比が大きいほど、腐食速度は速い。
- ③ 外部環境中の塩化物イオンは、初め、ひび割れを通じて、内部鉄筋に浸透する。内部鉄筋表面に浸透した塩化物イオンは、その後、鉄筋下面に沿って、健全なかぶりコンクリート内部へも浸透する。その浸透量は、水セメント比が大きいほど、増加する。
- ④ ひび割れと交差する部分の鉄筋への酸素透過量は、健全なかぶりコンクリート中の鉄筋への酸素透過量と比較して、多い。

以上の研究により、曲げひび割れ近傍に生じる鉄筋とコンクリートの剥離部を考慮した、物質透過性と腐食の関連性が明らかとなった。すなわち、塩化物イオンは曲げひび割れを通じて、コンクリート内部の鋼材に容易に浸透する。したがって、初めにひび割れと交差する部分の鉄筋において腐食が発生する。その後、暴露期間が経過すると、塩化物イオンは鉄筋に沿って、ひび割れからかぶりコンクリート内部へ浸透する。したがって、ひび割れ近傍の鉄筋においても腐食が進行する。さらに、水セメント比が大きい場合は、かぶりコンクリート中を通じても、塩化物イオンは鉄筋表面に浸透する。この場合、ひび割れから離れた、健

全なかぶりコンクリート内部の鉄筋においても、腐食が発生する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 岡田清, 宮川豊章: コンクリートの水セメント比およびひびわれが鉄筋腐食に与える影響について, セメント技術年報, No.33, pp.494~497, 1979.
- 4) 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.
- 5) 大即信明: ひび割れがコンクリート中の鉄筋の腐食傾向に及ぼす影響の電気化学的検討, セメント技術年報, No.39, pp.288~291, 1985.
- 6) 神山一: 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 大即信明, 横井聡之, 下沢浩: モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響, 土木学会論文集, 第360号/V-5, pp.111~118, 1985.
- 12) 枘田佳寛, 友沢史紀, 安田正雪, 原謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集 10-2, pp.493~498, 1988.

(1997.11.27受付)

THE INFLUENCE OF W/C ON CORROSION MECHANISM NEAR BENDING CRACK

Nobuaki OTSUKI, Shinichi MIYAZATO, Tsunenori SHIBATA, Makoto HISADA, Tarek Uddin Md. and Shigeyoshi NAGATAKI

The influence of water to cement ratio on the corrosion mechanism of steel bars embedded near a bending crack was experimentally investigated. First, early corrosion tests were studied using mortar. Chloride ion and oxygen permeations were investigated, considering the gap between steel and concrete. The influences of those permeations on macrocell corrosion were studied. Lastly, tests on concrete specimens were conducted to confirm the results obtained from the mortar case. Results show that the permeation near the bending crack plays an important role in corrosion behavior.