

RC 部材のひび割れによるマクロセル腐食の電気化学特性を用いた解析的検討

小林孝一¹・平澤征夫²・宮川豊章³

¹正会員 博(工) 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 春日井市松本町 1200)

E-mail: koba@isc.chubu.ac.jp

²フェロー会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (同上)

³フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

塩害はRC構造物の劣化要因のうち代表的なものであるが、マクロセル腐食が生じた場合には、劣化速度はさらに大きくなる。しかし、そのような場合に対して一般的な非破壊検査手法をそのまま適用し劣化の程度を推定するのは、問題が多いと考えられる。そこで本研究では、ひび割れによりマクロセル腐食が生じたRC部材の腐食分布、速度を正確に把握することを目的とし、自然電位と分極抵抗の測定値を用い、さらにマクロセル腐食回路の形成による分極の影響を考慮することにより、マイクロセル腐食、マクロセル腐食のそれぞれを検討した。その結果、マクロセル腐食とマイクロセル腐食の両者を数値解析にて正しく把握することが可能となり、またひび割れが腐食に与える影響を明らかにすることができた。

Key Words : chloride induced corrosion, macrocell corrosion, halfcell potential, polarization resistance, finite differences method

1. はじめに

(1) 研究の背景

メンテナンスフリーであると考えられていた鉄筋コンクリート (以下, RC) 構造の耐久性問題が論じられるようになって久しい。

RC構造の劣化メカニズムには様々なものが挙げられる。なかでも塩化物イオンの作用によって鋼材腐食が生じる塩害は、劣化速度が大きいことで知られているが、マクロセル腐食が生じる場合には劣化はさらに激しくなる¹⁾。しかし従来まで行われてきた塩害に関する研究は小型供試体を対象としたものが多く、必然的にマイクロセル腐食のみを対象としたものが中心となっているのが現状である。

一方、コンクリート中の鉄筋の腐食の進行状況は、かぶりコンクリートに阻まれて直接観察することが困難なため、各種非破壊検査手法が開発、検討されてきている²⁾。なかでも、鉄筋の腐食反応は電気化学反応であるため、その特性を利用した自然電位法、分極抵抗法などの電気化学的手法が有効であると考えら

れているものの、正確な劣化状況の把握、あるいは寿命の予測などに向けては、今後解決すべき課題も多い。

(2) マクロセル腐食について

現実のRC構造においては、かぶりコンクリートの品質が均一でないため、あるいは曲げひび割れの発生が許容されているために、内部での鋼材腐食の発生、進行に必要な各種劣化因子の供給量は同一部材内であっても場所によって異なる。したがって鋼材に腐食が生じるような状況のもとでは、ほとんどの場合にマクロセル腐食回路が形成されていると考えられる。この場合には、金属の腐食反応速度はカソード反応で消費される酸素の供給量に依存するため、腐食部以外に大きな面積のカソード部分が併存することにより、腐食速度は大きなものとなる。

図-1にコンクリート中の塩化物イオン濃度差によりマクロセル腐食が生じる場合の分極曲線の概念図を示す³⁾。塩化物イオン量が多いかぶりコンクリート中の鋼材、および塩化物イオン量が少ない部分の鋼

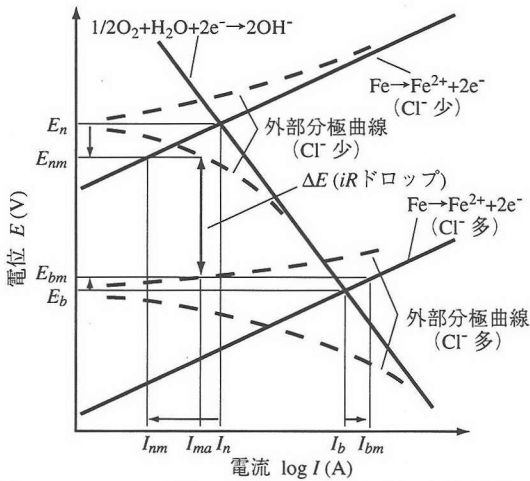


図-1 マクロセル腐食回路が形成された場合の分極曲線³⁾

材のアノード分極曲線、カソード分極曲線を実線で、それぞれの部分において実験的に得られる外部分極曲線を破線で表す。ここでアノード分極曲線は塩化物イオン濃度によって異なるものの、溶存酸素の還元反応を示すカソード分極曲線は、部材内での酸素濃度が一定であるとして、同一の実線で表した。

塩化物イオンが多い部分と少ない部分の鋼材が電気的に絶縁されており、それぞれが独立して存在する場合には、自然電位と腐食電流量は E_b と I_b 、および E_n と I_n となる。

また外部分極曲線は、一般に次式によって表される⁴⁾。

$$I_{ex} = I_0 \left[\exp \frac{(1-\beta)\eta F}{RT} - \exp \frac{-\beta\eta F}{RT} \right] \quad (1)$$

- I_{ex} : 分極による外部電流量
- I_0 : ミクロセル腐食電流量 ($=I_b$ あるいは I_n)
- η : 過電圧 ($=E-E_n$ あるいは $E-E_b$)
- F : ファラデー数
- R : 気体定数
- β : symmetry factor
- T : 絶対温度

ところが実際には塩化物イオンの多い部分、少ない部分は同一部材内に併存し、電気的に接続されているため、塩化物イオンの多い部分の鋼材をアノード、少ない部分の鋼材をカソードとするマクロセル腐食回路が形成されている。この場合にはアノード部、カソード部の電位、腐食電流量はもはや上記の E_b と I_b 、および E_n と I_n とは一致せず、それらは两部分の外部分極曲線を用いて求める必要がある。

アノード部とカソード部の間の溶液抵抗が無視で

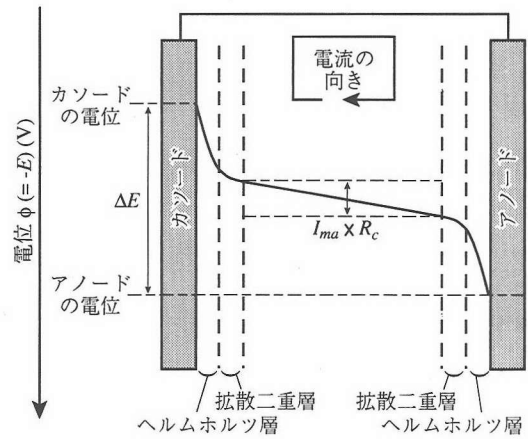


図-2 電解溶液中での電極間での電位分布⁵⁾

きる場合には、両者の電位、およびマクロセル電流量は、アノード部の外部アノード分極曲線とカソード部の外部カソード分極曲線の交点として求めることができる。しかし、RC部材中でアノード部とカソード部を電気的に接続する回路の一部を形成しているのは抵抗の大きなコンクリートであり、これを無視することはできない。この場合には、アノード部とカソード部でのマクロセル腐食反応速度が等しいことから、両電極から外部へ流入するマクロセル電流量は I_{ma} となり、その時の電位はアノード部で E_{bm} 、カソード部で E_{nm} となる。このとき、 $\Delta E = E_{nm} - E_{bm}$ がコンクリート抵抗等によって生じるアノード部-カソード部間の電位差であり、 iR ドロップと呼ばれる。

またアノード部におけるアノード分極曲線上で電位 E_{bm} に対応する電流量 I_{bm} 、カソード部におけるアノード分極曲線上で電位 E_{nm} に対応する電流量 I_{nm} はそれぞれアノード部、カソード部での全反応速度に対応する。すなわち、マクロセル腐食回路の形成により腐食電流量は、アノード部においては I_b から I_{bm} に増加し、一方カソード部においては I_n から I_{nm} に減少し、両者の増減分はそれぞれマクロセル腐食電流量 I_{ma} に一致する。さらに言い換えれば、マクロセル腐食回路中のアノード部分においては、 I_{bm} (全腐食速度) $= I_b$ (いわゆるミクロセル腐食速度) $+ I_{ma}$ (マクロセル腐食速度) なる関係が成り立つ。

またこのとき、アノード部、カソード部は自然電位 E_b 、 E_n からそれぞれ電位 E_{mb} 、 E_{mn} に分極されていると見なすこともできる。

(3) 分極抵抗と腐食速度の算出

a) 分極抵抗について

アノード部とカソード部を電気的に接続しているコンクリートの細孔溶液など、電解溶液中での電位

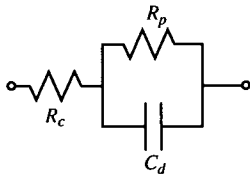


図-3 等価電気回路モデル

分布は図-2のようにモデル化できる⁵⁾。上述の iR ドロップは、コンクリート比抵抗と電極間距離の積で表されることが多いが、実際にはコンクリート中においても電極の表面にはヘルムホルツ層、拡散二重層からなる電気二重層が存在し、電圧降下の大部分は特にヘルムホルツ層において生じている。この部分における電荷移動抵抗が反応抵抗、すなわち分極抵抗であり、この部分に対して様々な等価電気回路モデルが提案されている⁶⁾。そのうちもっとも簡単なものは図-3に示すもので、コンクリート抵抗 R_c が、ヘルムホルツ層を表現する分極抵抗 R_p とコンデンサー C_d とで構成する並列回路に接続された形となっている。

図-4に示すように、この分極抵抗 R_p は試料となる金属に微小な電位変化を与え、その印可電圧とそれによって発生した外部電流(図-1の破線)との比率から求められる。しかし前述のように、マクロセル腐食回路内では、アノード部、カソード部は既に自然電位 E_a, E_c からそれぞれ電位 E_{mb}, E_{mn} に分極されており、この状態からさらに微小電圧を印可することによって得られる応答から求めた「見掛けの」分極抵抗 R_p' の値が元の R_p と異なるのは、式(1)あるいは図-4からも明らかである。

b) 分極抵抗と電位分布、マクロセル腐食速度

図-2から明らかなように、RC部材内の電位分布やマクロセル腐食電流分布を求める際には、この分極抵抗の寄与は無視できないため、これを考慮して解析を行う必要がある。

マクロセル腐食回路が形成された状態で測定された「見掛けの」分極抵抗 R_p' は、その状態における反応抵抗に他ならない。電位に関しても同様で、図-2中のアノード、カソードの電位はそれぞれ「見掛けの」自然電位 E_{mb}, E_{mn} に一致する。したがってマクロセル腐食回路内におけるマクロセル腐食電流量 I_{bm} を求めるためには、この R_p' および E_{mb}, E_{mn} とコンクリート抵抗 R_c を等価電気回路モデルに代入して、図-2に模式的に示したRC部材内の電位分布を解析的に求めればよい。

c) 分極抵抗と Stern-Geary の式

一般に、鉄が腐食によって二価のイオンになると

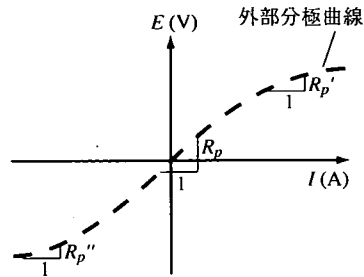


図-4 外部分極曲線と分極抵抗

仮定すると、コンクリート中の鋼材に均一腐食が生ずる場合の腐食量あるいは腐食速度と前述の分極抵抗 R_p との間には、以下の Stern-Geary の式で表される関係が成り立つ。

$$G = \frac{M}{2F} \int I_0 dt = K \times \frac{M}{2F} \times \int \frac{1}{R_p} dt \quad (2)$$

- G: 腐食減量 (g/cm²)
- M: 鉄の原子量 (=55.8)
- F: ファラデー数 (=96500C)
- I₀: 腐食電流量 (A/cm²)
- R_p: 分極抵抗 (Ω・cm²)
- K: 比例定数 (=RT/F) (V)

図-1に示した腐食反応を例にとると、鋼材の電位が自然電位 E_a, E_c に一致するときに、分極抵抗 R_p を求め(図-4参照)、その値を用いて式(2)からマクロセル腐食速度 I_b, I_n (式(2)中では I_0) を求めるのが分極抵抗法の基本原理である。

しかし、式(2)は実験室で注意深く作製された小型供試体において成り立つもので、マクロセル腐食が生じている場合にはこの式は成り立たない。言い換えれば、「見掛けの」分極抵抗 R_p' をそのまま式(2)に代入しても、得られる結果はマクロセル腐食電流量 I_b や I_n ではなく、むしろマクロセル腐食とマイクロセル腐食の合計あるいは差である全腐食電流量 I_{bm} や I_{nn} にも一致しない。

したがって、マクロセル腐食回路が形成されている場合に分極抵抗と Stern-Geary の式を用いてマイクロセル腐食量を求めるためには、第4.(5)節にて後述するような理論的展開が必要となる。

(4) 本研究の目的

以上の考察に基づき、本研究はRC部材において塩害劣化が生じ、マクロセル腐食が発生した場合の腐食性状を明らかにしたうえで、非破壊的に測定した電気化学的特性を用いた数値解析により、鉄筋の腐食量を正確に把握することを目的とすることとした。

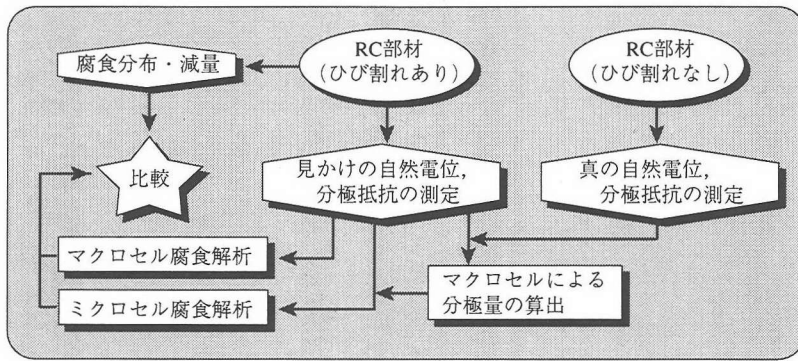


図-5 ひび割れがマクロセル腐食に与える影響の検討過程

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランド, 密度: 3.16g/cm ³ , ブレン値: 3260cm ² /g
細骨材	川砂, 密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 1.50%, 粗粒率: 2.88
粗骨材	碎石, 密度: 2.60g/cm ³ , 最大寸法: 15mm, 粗粒率: 6.43
AE減水剤	リグニンスルホン酸

表-2 配合

供試体 No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	WRA*
1~6	40	45.3	170	425	759	905	1.06
7~12	50	45.4	170	340	793	941	0.85
13~18	60	45.5	158	263	838	991	0.66

*AE減水剤

そこでスパン中央部分に曲げひび割れを有するRCはり部材を対象とし, 外来塩化物イオンによる鉄筋腐食状況を実験的に検討することとした。また非破壊的に測定したコンクリート中の鋼材の見掛けの分極抵抗と自然電位, すなわち測定値 R_p' と E_{nm} , E_{bm} を用いることにより, マクロセル腐食速度 I_{ma} , あるいはマイクロセル腐食速度 I_b や I_n を解析的に求め, 検討に用いることとした。

なお本研究では, 図-1における E_b , E_n , すなわちマクロセル腐食回路が形成されない状態において金属が示す本来の電位を「真の自然電位」と呼び, マクロセル腐食回路が形成され分極が生じている金属が示す電位 E_{bm} , E_{nn} は単に「電位」あるいは「見掛けの自然電位」と呼ぶことにより, 両者を区別している。「真の分極抵抗 R_p 」と「見掛けの分極抵抗 R_p' 」についても同様の呼び分けを行なうこととする。

本研究で行った検討を図-5にフローチャートとして示す。本研究では見掛けの自然電位と見掛けの分極抵抗の測定値を用いて, マクロセル腐食量を数値解析にて算出した。また, 曲げひび割れにより形成されたマクロセル腐食回路による鉄筋の分極量を求め, これを考慮することにより, マクロセル腐食下でのマイクロセル腐食量も算出した。これらの結果と実際の腐食状況との比較を行ない, 本研究にて設定したモデルの検証を行なった。

2. 実験概要

(1) 使用材料と配合

コンクリートに使用した材料を表-1に, 配合を表-2に示す。ここでは3種類の水セメント比のコンクリートを使用した。ここで水セメント比60%という値は, 塩害の発生が想定される海洋環境等に対しては過大な値ではあるが, 施工不良等を想定してこの値を用いた。同様の理由でこれら3種類のコンクリートのスランプは, いずれも15~18cmとやや大きな値とした。

また鉄筋は異形鉄筋D10 (SD295) を黒皮付きのまま使用した。

(2) 供試体

供試体は各水セメント比で6体ずつ, 計18体作製した。供試体は幅100mm, 高さ150mm, 長さ1200mmのRCはり部材で, 長さ1100mmの異形鉄筋が2本ずつ(記号BとW), 鉄筋径の2倍に相当するかぶり20mmで配置されている(図-6)。これら異形鉄筋は, 端部20mmほどをグラインダーで研磨して黒皮を取り除いた部分に測定用の被覆付きコードをハンダ付けした。さらにその上を自己融着テープとエポキシ樹脂で覆って, この部分で水分が鉄筋に達して腐食が生じるのを防いだ。同様に鉄筋の切断面も全てエポキシ樹脂で覆い, 腐食が切断面で生じるのを防いだ。

供試体は打設翌日に脱型した後に屋外に暴露し,

表-3 鉄筋直下における残留ひび割れ幅 (単位: mm)

供試体 No.	鉄筋		供試体 No.	鉄筋		供試体 No.	鉄筋	
	B	W		B	W		B	W
1	0.75	0.75	7	0.35	0.35	13	0.15	0.15
	&0.35	&0.35		14	0.20	0.15		
2	0.30	0.25	8	0.85	0.85	15	0.15	0.10
				&0.45	&0.40			
3	0.05	0.05	9	0.25	0.30	16	0.70	0.50
4	0.10	0.10	10	0.40	0.20		&0.30	&0.45
5	0.30	0.25	11	0.20	0.15	17	0.30	0.10
6	-	-	12	-	-	18	-	-

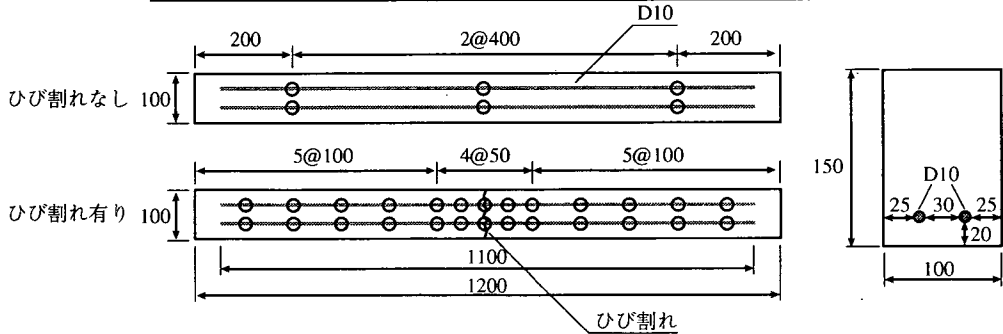


図-6 供試体 (単位: mm)

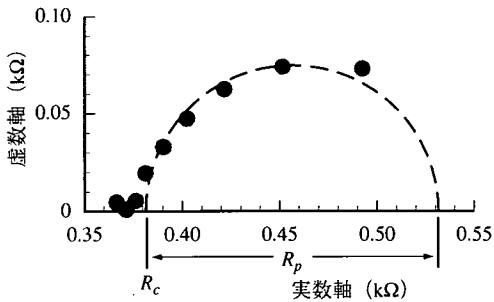


図-7 Nyquist プロットの例

後述する第1回目の測定まで散水養生を行なった。なお供試体は、脱型以後は常に打設面が上面、鉄筋のかぶり面が底面となる向きで、スペーサ上に設置した。ただし、分極抵抗と自然電位の測定時には、供試体の上下を反転させて、かぶり面から測定を行なった。

(3) 分極抵抗と自然電位の測定 (その1)

材齢約2ヶ月に達した時点で、第1回目の自然電位と分極抵抗の測定を行なった。測定には電流拡散抑制機能付き対極を用いる交流インピーダンス測定装置を用いた⁷⁾。印可した電圧は $V_{pp} = \pm 3\text{mV}$ 、周波数 $10\text{mHz} \sim 10\text{Hz}$ の範囲の13周波数で測定を行なった。また測定は供試体のかぶり面側から、図-6の上の図に示す○の位置、すなわち各鉄筋において3ヶ所ずつ行なった。同時に自然電位 (対飽和銀-塩化銀電極)

も測定した。

測定後、上記の分極に対する応答を複素平面上に表示したNyquistプロットから分極抵抗の測定値 R_p あるいは R_p' 、およびコンクリート抵抗の測定値 R_c を求めた (図-7)。なおその際、鉄筋とコンクリートとの界面は図-3に示したもっとも単純な等価電気回路モデルにて近似した。また分極抵抗を単位面積あたりに換算する場合には、分極面積は既報に基づき、鉄筋の半周長である 1.5cm と主対極の直径 4cm の積、すなわち 6cm^2 を用いた⁸⁾。

(4) 曲げひび割れの導入

上記の測定が終わった後、各水セメント比で6体ずつある供試体のうち、5体について曲げ荷重を行ない、中央部に曲げひび割れを発生させた。荷重はスパン中央の打設面側に一点集中荷重を行ない、ひび割れ発生後に除荷した。表-3に除荷後に残留したひび割れ幅の一覧を示すが、供試体表面において $0.05 \sim 0.85\text{mm}$ である。またこの表に示した値は、鉄筋の直下位置、すなわち供試体の両側面からそれぞれ 30mm の位置におけるひび割れ幅であり、ひび割れ幅は一定ではないため、同一供試体内であっても鉄筋によって値が異なる。またひび割れを2本有する供試体については両方のひび割れ幅を併記した。

その後ひび割れを有さない供試体も含め、すべての供試体を養生期間中と同様の状態で静置し、直ち

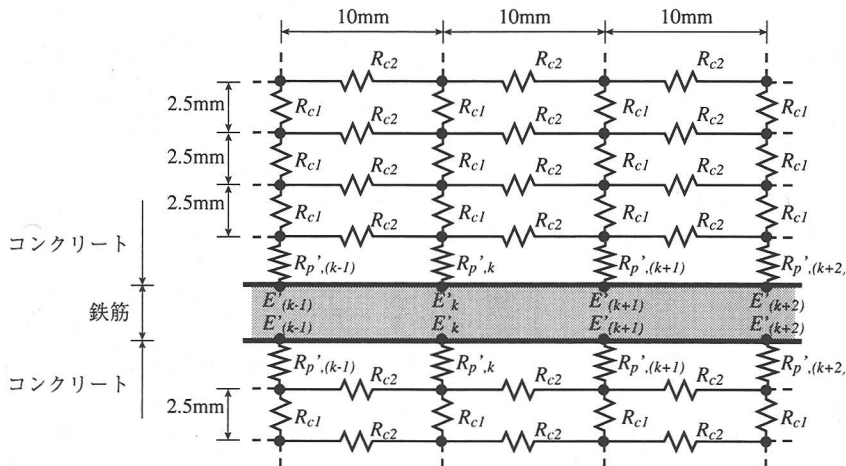


図-8 マクロセル解析に用いた供試体モデル

に5%NaCl水溶液の散布を開始した。NaCl水溶液の散布は供試体の解体まで週に2~3回行なった。1回あたりの水溶液の散布量は約0.01m³で、上記の状態に置かれた供試体の打設面全体に散布した。

(5) 分極抵抗と自然電位の測定 (その2)

NaCl水溶液の散布開始後1週間程度で、第2回目の分極抵抗と自然電位の測定を行なった。用いた装置は上記のものと同じであり、印可した電圧も $V_{p-p} = \pm 3mV$ であるが、ひび割れを有する供試体に関しては周波数 100mHz ~ 10Hz の範囲の9周波数で測定を行なった。測定箇所は図-6の下の図に示す○の位置、すなわち各鉄筋において13ヶ所とした。ただし、ひび割れを有さない供試体における測定は、上記の第1回目の測定と全く同様の条件にて行なった。

この測定を1ヶ月での測定とし、以後、同様の条件で2ヶ月、3ヶ月、5ヶ月、8ヶ月および11ヶ月の時点で測定を繰返し、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を求めた。

(6) 腐食後の鉄筋の調査

材齢約13ヶ月で、供試体を解体し、内部の鉄筋を取り出した。ただちに鉄筋の腐食状況をスケッチし、さらにJCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」⁹⁾に従い、腐食減量を測定した。

3. マクロセル腐食解析の概要

測定した自然電位と分極抵抗を用いて、鉄筋の腐食量を解析的に推定することを試みた。ここでは二次元の差分法により、供試体縦断面を対象として電

位およびマクロセル電流の分布を解析的に求めた。

(1) 解析モデルの形状

本研究の実験で用いた供試体は鉄筋を2本ずつ有しており、本来はこれらの電気化学的特性はお互いに影響を与えているものと考えられる。しかし、ここでは二次元の解析を行なうため、解析モデルは高さ150mm、長さ1200mmのコンクリート中に直径10mm、長さ1100mmの鉄筋が1本、かぶり20mmで配置されているものとした。

この解析モデルは、高さ方向は2.5mm間隔、長手方向は10mm間隔で配置された節点で構成され、コンクリートに相当する節点同士はコンクリート抵抗に相当する抵抗で結合されている。またコンクリートに相当する節点と鉄筋に相当する節点の間には分極抵抗を表現する抵抗を配置した。モデルの概要を図-8に示す。

なお図-3に示したように、鉄筋とコンクリートとの界面に形成される電気二重層はコンデンサのように蓄電する性質を有している。しかし、コンデンサによる蓄電が問題となるのは外部から強制的に電荷を与えるなどして電気回路が組み変わった直後のみであり、ここで対象とする定常状態においてはその影響は無視できると考えられるため、ここでは電気容量については考慮しなかった。

(2) コンクリート抵抗の値

コンクリートは不均一で、かつ、コンクリートの導電性は供試体内での湿度分布の影響も受けるため、本来これを考慮したコンクリート抵抗の値を用いる必要があると考えられる。実際に分極抵抗と同時に測定されたコンクリート抵抗の値は同一供試体内で

も場所によって異なっていた。しかし供試体内でのコンクリート抵抗の三次元的な分布については本研究の方法では測定できず、また解析を簡略化するために、ここでは供試体内でその値は等しいと見做し、3点あるいは13点で測定された値の平均値を解析モデル全体に適用した。ただし、節点間距離が上下方向と左右方向では異なるため、モデル高さ方向と長手方向では節点間の抵抗の値は異なり、それぞれ図-8中の R_{c1} と R_{c2} に相当する。対局の直径が40mm、かぶりが20mmであり、節点間隔が高さ方向に2.5mm、横方向に10mmであることから、コンクリート抵抗の測定値 R_c (図-3参照)を用いて、 $R_{c1}=R_c \times (40/10) / (20/2.5)$ とし、さらに $R_{c2}=R_{c1} \times (10/2.5)$ として求めた。

(3) 自然電位と分極抵抗の値

マクロセル腐食解析においては第1章で行なった考察に基づき、第2章に記した方法にて測定した自然電位および分極抵抗の実測値を用いて解析を行なった。すなわち、マクロセル腐食回路が形成されている場合には、見掛けの自然電位、分極抵抗をそのまま用いることとなる。

なお測定された自然電位は、かぶりコンクリート内での電位降下の影響を受けていると考えられるが、かぶり20mmの場合には供試体表面で測定された電位と実際の鋼材の電位の差は小さいと考えられるため¹⁰⁾、鉄筋表面に相当する節点に自然電位の測定値をそのまま与えた。

解析に用いた分極抵抗 $R_{p,k}'$ は、主対極の直径が40mmで、横方向の節点間隔が10mmであることから、分極抵抗の測定値 R_p' (図-3では R_p)を用いて、 $R_{p,k}'=R_p' \times (40/10)$ として求めた。

また、自然電位、分極抵抗は各鉄筋あたり3ヶ所ないし13ヶ所で測定を行なったが、実際の自然電位、分極抵抗の鉄筋上における分布は不連続ではないため、各測定点間における値を適切に補完する必要がある。ここでは3次の自然スプライン関数を用い¹¹⁾、測定を行っていない箇所における自然電位、分極抵抗の値を与えることとした。

本研究では、自然電位および分極抵抗はいずれもかぶり側から測定した。一方、供試体の内部と外部では湿度、および酸素供給量などが異なるため、同一鉄筋でも鉄筋のかぶり側と内部側では自然電位、分極抵抗は異なると考えられるが⁸⁾、ここでは供試体の内部側の鉄筋表面に対してもかぶり側と同一の自然電位、分極抵抗の値を与えた。

(4) 解析方法

既報^{8),12)}と同様の条件を用いた二次元の差分法によ

り、モデル縦断面内の電位分布およびマクロセル電流量を以下の条件にて求めた。

- ①コンクリートは均質で、コンクリート中の電位 $u(x,y)$ の分布は次のラプラス方程式を満たす。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

- ②コンクリートと外環境との間で電流の出入りはないとする。
- ③隣接する節点間の電流量は、節点間の電位差 Δu と抵抗 R_{c1} 、 R_{c2} 、 $R_{p,k}'$ から求める。
- ④各節点の電位が収束するまで計算を繰り返す。収束条件は、すべての節点において前ステップとの電位差が0.0001mV以下となるまでとする。

上述したように約1~3ヶ月ごとに自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗の測定を行なっているため、それぞれの時点でのマクロセル電流量を求め、さらにそれを時間積分することにより、最終的に供試体解体までに生じたマクロセル腐食量を算出した。

4. 結果と考察

(1) 腐食の状況

図-9に各鉄筋(供試体18体×鉄筋2本=計36本)の腐食状況のスケッチ図を、鉄筋直下位置におけるかぶりコンクリート表面でのひび割れ幅と併せて示す。なお、供試体No.1, 8, 16に関しては、それぞれ曲げひび割れを2本ずつ有するが、図-9中に記したのはそれらのうち大きな方のひび割れの幅である。図-10にはひび割れ幅と鉄筋全体での腐食減量の実測値との関係を水セメント比別に示す。

なおコンクリート標準示方書[構造性能照査編]¹³⁾に規定された、(激しい腐食環境に対する許容ひび割れ幅0.0035C(C:かぶり)を本研究の供試体に当てはめると0.070mmとなり、ここでのひび割れ幅はほとんどの供試体においてこの値を上回っている。

これらの図から明らかなように、水セメント比が40%である供試体No.1~6における腐食は、かぶりコンクリートのひび割れの有無に拘わらず、他の水セメント比のものと比較して著しく小さい。また水セメント比が40%の供試体については、腐食は曲げひび割れの存在する供試体スパン中央付近に集中しているのに対し、水セメント比が50%、60%の場合には、スパン中央に限らず、鉄筋長全体にわたって腐食が生じている。これはかぶりコンクリートの水セ

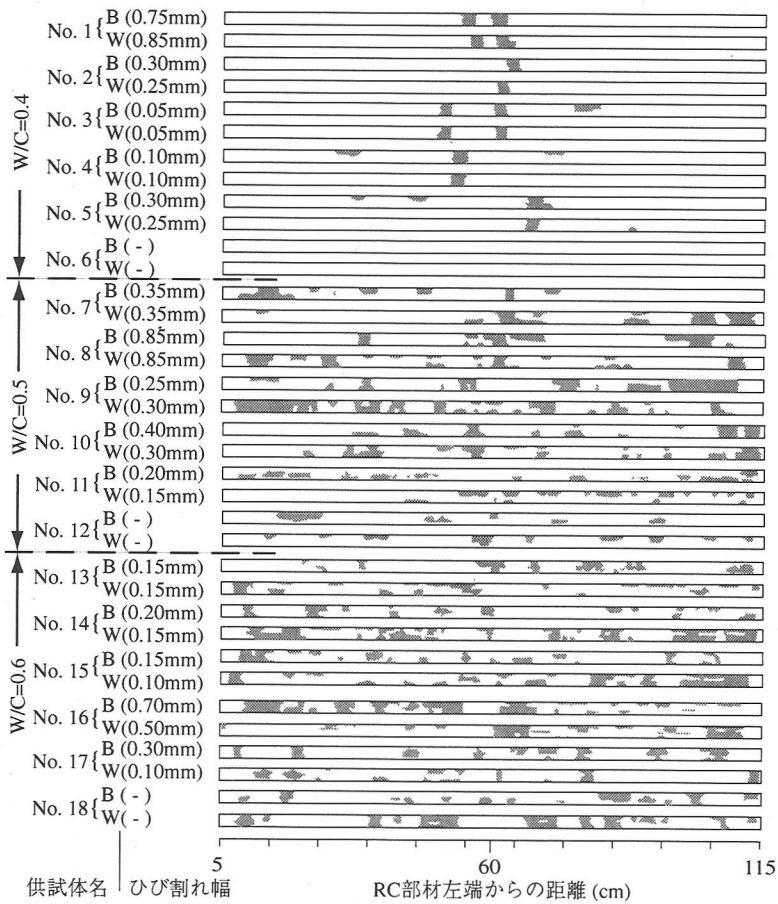


図-9 全鉄筋の腐食状況 (全面展開図)

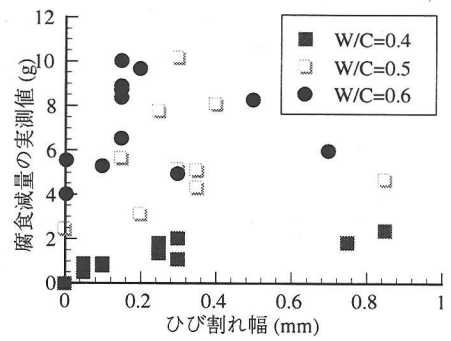


図-10 ひび割れ幅と腐食減量の実測値

メント比が大きく組織が粗であるため、ひび割れ以外の部分でも塩化物イオンがかぶりコンクリートを浸透して、鉄筋に腐食を生じさせたものと考えられる。ただし図-10によれば、水セメント比が50%、60%の場合にも、ひび割れを有する供試体は有さないものと比較して腐食量が大きいため、ひび割れの存在が腐食を加速しているものと考えられる。これは海洋環境における防食上、ひび割れ制御が意味を持つ

のは水セメント比60%程度以下であるとする従来の見解と一致する¹⁴⁾。

また、水セメント比が40%の供試体の場合には、ひび割れ幅の増大とともに腐食量も大きくなる傾向がみられた。水セメント比が40%の場合には、腐食の発生はひび割れ部にほぼ限定されているため、ひび割れ幅の増大、あるいはそれにともなって生ずる鉄筋とコンクリートとの剥離の増大¹⁵⁾¹⁶⁾により、塩化物イオンによる鉄筋不働態の破壊面積が大きくなり、腐食量増大につながったと考えられる。

一方、水セメント比が50%、60%の場合には、前述のようにひび割れの有無は腐食量に影響を与えているものの、腐食量にひび割れ幅が与える顕著な影響は見られなかった。ひび割れ部分以外での腐食量が大きいために、相対的にひび割れ部の腐食、さらにはひび割れ幅がひび割れ部の腐食量に与える影響が小さいためであると考えられる。

(2) 自然電位と分極抵抗

ひび割れを有さない供試体中の鉄筋の自然電位、

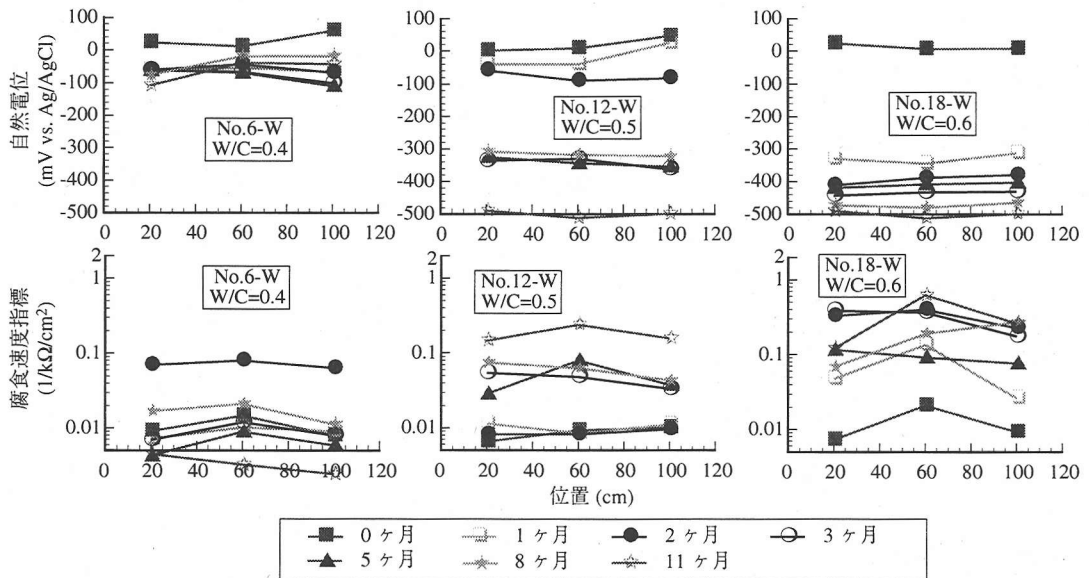


図-11 自然電位，分極抵抗の推移（ひび割れ無し供試体）

腐食速度指標の推移を図-11に示す。なお分極抵抗と腐食速度は式(2)に示したような関係にあることから、分極抵抗の逆数を腐食速度指標と呼び、腐食速度の評価に用いることとする⁸⁾。また図の凡例に示した時間は、塩化物イオン散布期間を表す。

水セメント比60%の供試体の場合には、塩化物イオン散布開始直後(図中1ヶ月)から自然電位は卑変し、腐食速度指標も大きくなった。これは早期の時点で塩化物イオンがかぶりコンクリートを通じて鉄筋に達したためであると考えられる。

一方、水セメント比50%の供試体の場合には、塩化物イオン散布開始後2ヶ月程度までは、自然電位、腐食速度指標ともに散布開始前(図中0ヶ月)とほぼ同じ値を示しており、この時点までは鉄筋がかぶりコンクリートによって保護されていたものと推察される。また水セメント比40%の場合には、自然電位、分極抵抗ともに腐食の兆候を示すことはなく、試験期間中を通じて鉄筋がかぶりコンクリートによって十分保護されていたものと考えられる。

図-12にかぶりコンクリートにひび割れを有する供試体における自然電位、腐食速度指標の推移の例を示すが、ここに示さない供試体においても同様の結果が得られている。

塩化物イオン散布前の時点(図中0ヶ月)においては、いずれの供試体においても自然電位は貴な値を示し、また腐食速度指標も小さく、この時点ではひび割れが腐食に与える影響は見られない。

しかし塩化物イオン散布開始後は、水セメント比が40%である供試体においては、かぶりコンク

リートにひび割れの存在する部材中央付近において自然電位の卑の傾向が強くなり、また腐食速度指標も大きいため、この部分において特に腐食が生じやすい、あるいは実際に腐食が進行している状態にあるといえる。

一方、水セメント比が50%である供試体の場合には、塩化物イオン散布開始直後においては、水セメント比が40%の配合と同様に、供試体中央部において自然電位が卑で腐食速度指標が大きく、ひび割れから離れるにしたがって腐食傾向が小さいという傾向を示すものの、その傾向は塩化物イオン散布期間が長くなるとともに次第に不明瞭となる。

水セメント比が60%の供試体の場合には、その傾向はさらに不明瞭で、塩化物イオン散布開始直後に、すでにひび割れ部以外での自然電位は卑で腐食速度指標も大きい。ひび割れを有しない供試体と同様に、水セメント比が50%、あるいは60%の場合には、ひび割れがない部分においても塩化物イオンがかぶりコンクリートを浸透して鉄筋に到達したため、供試体全体で腐食が生じるようになったものと考えられる。

ここで示したような、ひび割れを有する部材における腐食分布の経時変化が水セメント比によってそれぞれ異なる傾向は、大即らによって行われた水セメント比30~70%のモルタル部材における研究の結果とも一致する¹⁰⁾。

また水セメント比が40%でひび割れを有する供試体をひび割れを有しないものと比較した場合、ひび割れが存在する供試体中央部分のみならず、供試体

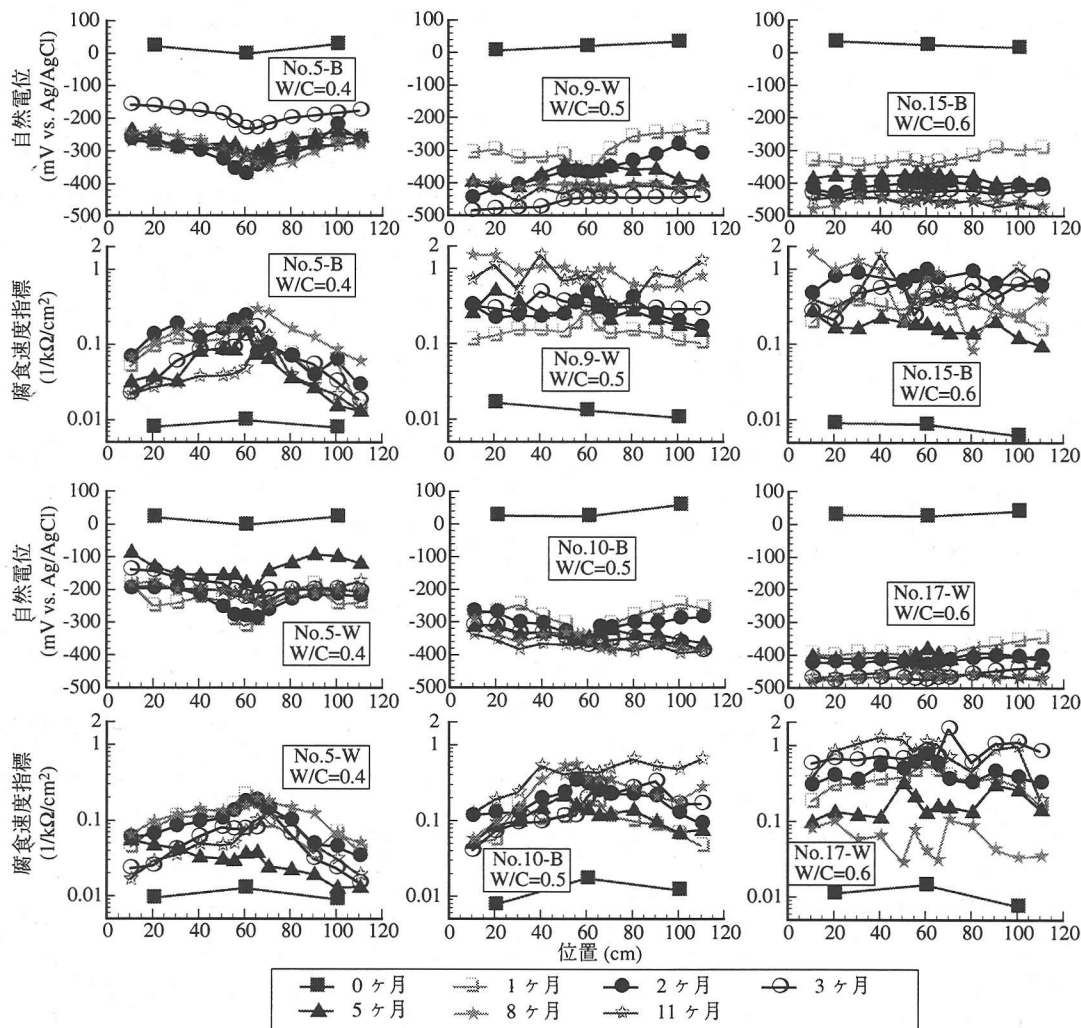


図-12 自然電位, 分極抵抗の推移 (ひび割れ有り供試体)

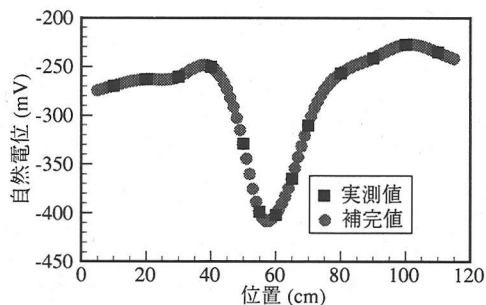


図-13 スプライン補完の例

両端部においても自然電位が卑の傾向が強く、またこの部分の腐食速度指標も大きい。これはひび割れから浸透した塩化物イオンが鉄筋に到達し、供試体中央部をアノード、それ以外の部分をカソードとするマクロセル腐食回路が形成されたため、図-1に示

したように腐食の生じていないカソード部分がカソード分極されたためであると考えられる。水セメント比40%の場合、図-9から判断して供試体両端部分では発錆していないと考えられるが、この部分においても、ひび割れの有無により電位、腐食速度指標が異なるため、マクロセル腐食回路形成による分極は供試体全長、すなわち本研究の場合にはひび割れから50cm程度離れた場所でも生じていると考えられる。

そのような傾向は水セメント比が50%の供試体においてもみられ、ひび割れを有さない供試体においては自然電位の卑変、腐食速度指標の増大は塩化物イオン散布開始後、徐々に進行しているが、ひび割れを有する供試体の場合には、塩化物イオン散布開始直後から供試体両端部分でも自然電位、腐食速度指標とも腐食の傾向が強い値を示している。これはひ

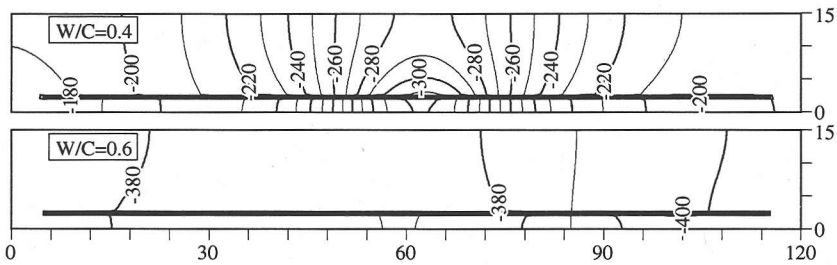


図-14 RC 供試体内における電位分布の解析例 (長さ単位: mm, 電位単位: mV vs. Ag/AgCl)

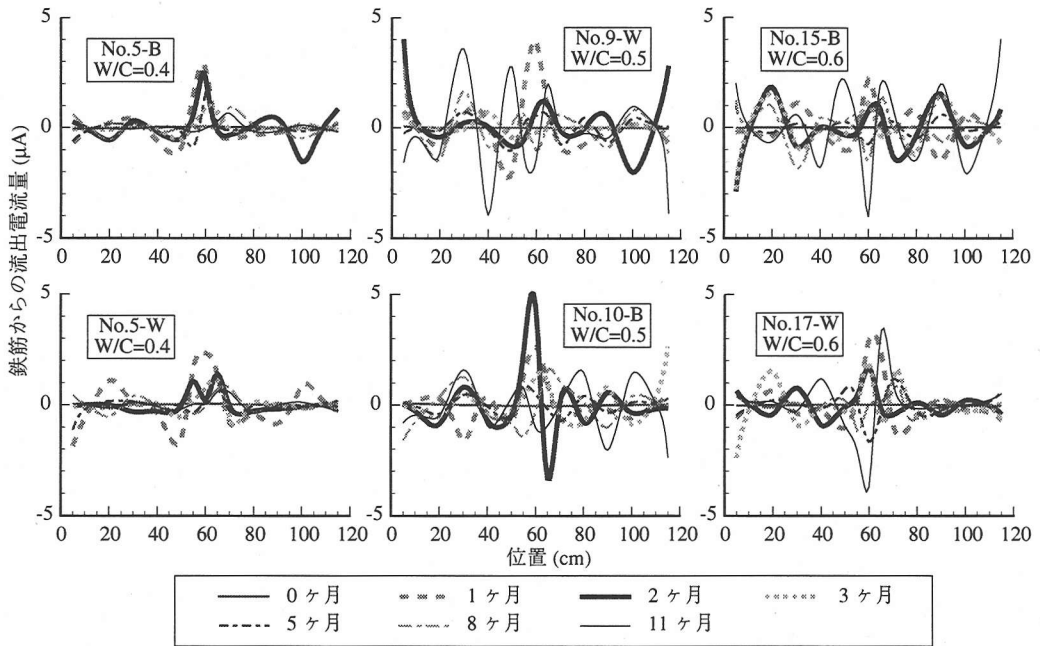


図-15 マクロセル電流の解析結果の例

び割れを有しない供試体の場合には、塩化物イオンが材齢の経過とともににかぶりコンクリートを浸透し、腐食が徐々に進行していったのに対し、ひび割れを有する供試体の場合には、塩化物イオン散布を開始した直後に塩化物イオンがひび割れを通じて鉄筋に到達し、鉄筋のそれ以外の部分全体がカソード分極されたためであると考えられる。

このように、供試体においてマクロセル腐食回路が形成されていると考えられるため、それを解析的に求めることとした。

(3) マクロセル腐食解析結果

図-13に3次の自然スプライン関数を用いて実測値を補完して求めた自然電位の分布の例を示す。このようにしてそれぞれの鉄筋の各測定時における自然電位、分極抵抗の分布を求めた上で、第3章に示した方法によってマクロセル電流の解析を行なった。

供試体内の電位分布の解析例を図-14に示す。この図から明らかなように、鉄筋の下側に位置するかぶりコンクリート内での垂直方向での電位勾配は小さい。したがって、本研究で用いた供試体の場合には第3章で述べたように、かぶりコンクリート上で測定した自然電位を鉄筋の自然電位に等しいと見なしても支障はないものと考えられる。

解析により求めた供試体内のマクロセル腐食電流の分布の例を図-15に示すが、ここに示していない供試体においても同様の結果が得られている。ここでは供試体内の鉄筋節点にかぶりコンクリート側から流入する電流のみを示した。また、鉄筋からコンクリートに流出する電流、すなわちアノード電流を正として表した。

既にこれまでに示した腐食の分布、あるいは自然電位と分極抵抗の分布と同様、水セメント比40%の供試体に関しては、供試体中央部に鉄筋からのマク

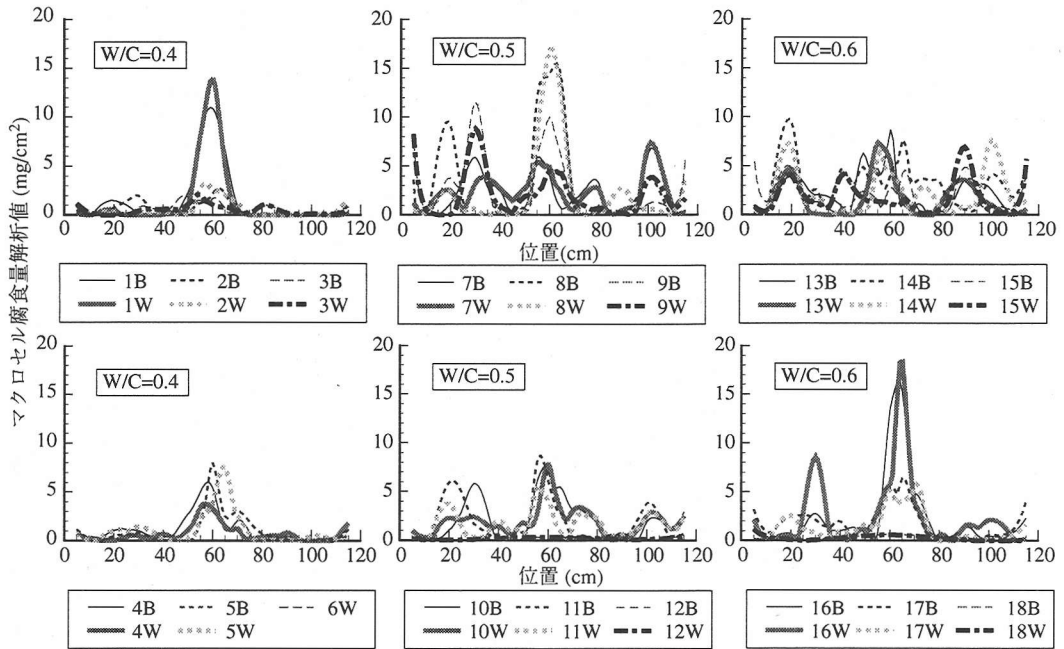


図-16 マクロセル腐食の分布の解析結果

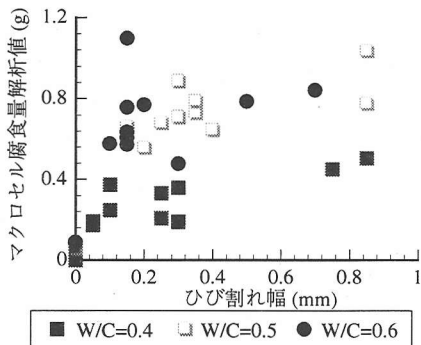


図-17 ひび割れ幅とマクロセル腐食量の関係

ロセル腐食電流の流出が集中し、この部分がマクロセル腐食回路のアノードとなっている。

それに対し、水セメント比50%および60%の供試体においては、供試体中央部以外からの腐食電流の流出量も大きい。また水セメント比50%および60%の供試体では、材齢の経過に対して、電流が流出するアノード部の位置が必ずしも一定していないことも特徴であり、かぶりコンクリート中を浸透した塩化物イオンが鉄筋に到達、蓄積してゆく過程で、当初はもっとも腐食の傾向が強かったひび割れ部とその他の部分との間の電位差の縮小、あるいは電位の大小関係の逆転が生じ、このような現象が生じているものと考えられる。

このマクロセル腐食電流の解析結果から式(2)を用いてマクロセル腐食量を求め、図-16に示す。算出

の際には、鉄筋から流出するアノード電流量だけを時間積分することによって腐食量を求めた。また、鉄筋に流出入する電流量の解析値はかぶりコンクリート側と供試体内部側と異なるが、それを鉄筋周方向で平均した値をここでは示した。

ここでも水セメント比の違いが腐食の分布に与える影響は明らかで、水セメント比40%の場合にはひび割れ部以外でマクロセル腐食がほとんど生じていないのに対し、水セメント比50%、60%の場合にはスパン中央部以外でもマクロセルによる腐食が生じている。

また、マクロセル腐食量の解析値を鉄筋全体で積算した値、すなわち各鉄筋あたりのマクロセル腐食量とひび割れ幅との関係を求め、図-17に示す。

第(1)節で述べたように、水セメント比が50%と60%の場合には腐食減量の実測値とひび割れ幅との関係は不明瞭であったが、ここでは水セメント比が50%の供試体においても、ひび割れ幅の増大にともなうマクロセル腐食量は増加している。腐食減量の実測値はマイクロセル腐食による腐食量も含むため、ひび割れ部において生じたマクロセル腐食の影響が相対的に小さいのに対し、ここでの解析値はひび割れ部以外でのマクロセル腐食回路の形成による腐食も含むものの、ひび割れ部をアノードとするマクロセル腐食の影響が大きいためであると考えられる。

なおここでは、水セメント比が50%あるいは60%の場合にもひび割れを有さない供試体のマクロセル

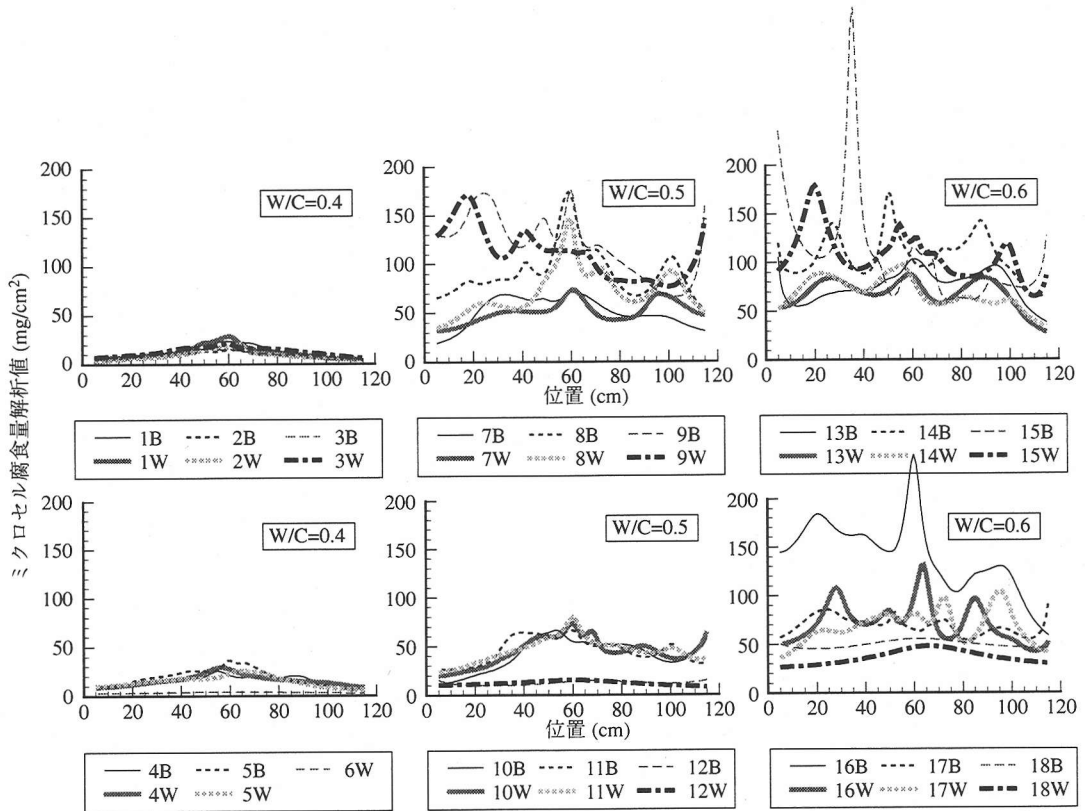


図-19 ミクロセル腐食の分布の解析結果

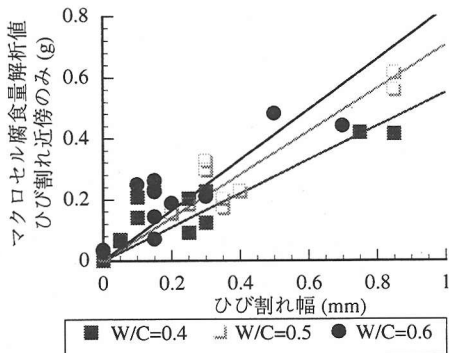


図-18 ひび割れ幅とひび割れ近傍のマクロセル腐食量との関係

腐食量の解析値は非常に小さいが、これはひび割れを通じての塩化物イオンの浸透がないのに加え、測定データ数が少ないためでもあると考えられる。実際には図-9に示したように、かぶりコンクリートの組織の粗密からマクロセル腐食が生じていると考えられ、また図-11からも特に水セメント比が60%でひび割れを有さない供試体No. 18の自然電位、分極抵抗は供試体内での差が大きい。したがって、これら供試体におけるマクロセル腐食量は実際にはここに

示したものよりも大きいものと考えられる。

さらに図-18に、ひび割れ近傍に限定したマクロセル腐食量とひび割れ幅との関係を示す。本研究では3種類の水セメント比のコンクリートを用いているうえに、供試体によってひび割れ幅も異なるため、それぞれにおける不働態被膜の破壊範囲、あるいはアノード、カソード分極曲線の形状が異なると考えられる。したがって本来は、マクロセル腐食に対するひび割れの影響範囲は供試体によって異なるが、ここでは図-16に示した解析結果におけるマクロセル腐食の分布形状から、一律に全ての供試体の中央部分20cmの範囲をひび割れによってマクロセル腐食回路のアノードとなった部分であると見做した。

この図ではひび割れ幅の影響はさらに明瞭であり、いずれの水セメント比の供試体においても、ひび割れ幅が大きいほど、その近傍のマクロセル腐食量は大きくなることがわかる。さらに、ここでのマクロセル腐食量は水セメント比が大きいほど、すなわち硬化体組織が粗であるほど大きかった。これは、アノードとカソードを電気的に接続するかぶりコンクリートの導電性が異なることに加え、カソード反応速度に影響するコンクリートの酸素透過性が異なるため

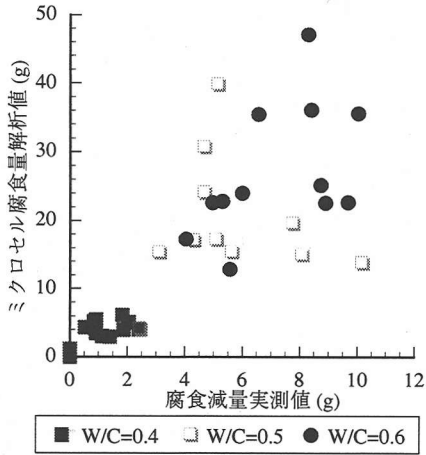


図-20 腐食減量の実測値とマイクロセル腐食量解析値との関係

であると考えられる。

(4) ミクロセル腐食量の算出

既に述べたように、マクロセル腐食が生じていない小型供試体においては、式(2)を用いることにより分極抵抗からマイクロセル腐食に起因する腐食量を求めることが可能であるとされている。

ここではまず、本研究にて測定された分極抵抗をそのまま式(2)に代入してマイクロセル腐食量を求め、図-19に示す。なお、本研究では式(2)中の K 値は既往の研究を参考にして 26mV とした¹⁷⁾。また、本研究の実験供試体における腐食減量の実測値と、図-19に示したマイクロセル腐食量を各鉄筋毎に積算した値との関係を図-20に示す。

図-20より明らかなように、マクロセル腐食とマイクロセル腐食の両者による腐食の合計である腐食減量の実測値と比較して、分極抵抗の測定値および式(2)を用いて求めたマイクロセル腐食量が供試体によっては5倍程度大きいという結果となった。また図-9に示したように、鉄筋には腐食が生じていない部分があったにも拘わらず、図-19によれば鉄筋の全長にわたって腐食が生じていることになり、さらにその量は、第(3)節で求めたマクロセル腐食量の10倍ほどの量となっている。

第1.(2)節で述べたように、マクロセル腐食が生じている場合には鉄筋は既に分極された状態にあり、測定された電位、分極抵抗ともに本来の自然電位 I_0 および分極抵抗 R_p とは異なった「見掛けの」値を示しているため、このような結果となったと考えられる。

そこで次項では、マクロセル腐食回路形成による分極の影響を考慮することにより、より現実に近い

マイクロセル腐食量を解析的に求めることとした。

(5) マクロセルの影響を考慮したマイクロセル腐食量の算出

一般に金属の外部分極曲線は式(1)で表すことができる。さらに図-1に示したように、同一金属内にてマクロセル腐食回路が形成されている場合には、回路中のアノード部、カソード部はそれぞれ既に分極された状態にあると見なすことができる。したがって、マクロセル腐食回路形成に伴う分極量を η ($=E-E_n$ あるいは $E-E_c$)、マクロセル腐食電流量を I_{ma} とすると式(1)から、

$$I_{ma} = I_0 \left[\exp\left(\frac{(1-\beta)\eta F}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\beta\eta F}{RT}\right) \right] \quad (4)$$

が成り立つ。この状態からさらに微小過電圧 ΔE を負荷して分極すると、その時の外部電流量 I は、

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{(1-\beta)(\eta + \Delta E)F}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\beta(\eta + \Delta E)F}{RT}\right) \right] \quad (5)$$

と表すことができる。

ここで $\beta=1/2$ とし、 $\exp(\pm x) \cong 1 \pm x$ ($x \ll 1$)なる近似を用いると、上式は、

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_0} &= \exp\left(\frac{\eta F}{2RT}\right) - \exp\left(\frac{-\eta F}{2RT}\right) \\ &+ \frac{\Delta E \cdot F}{2RT} \left[\exp\left(\frac{\eta F}{2RT}\right) + \exp\left(\frac{-\eta F}{2RT}\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

となり、この式の右辺に式(4)を代入すると、

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_{ma}}{I_0} + \frac{\Delta E \cdot F}{2RT} \left[\exp\left(\frac{\eta F}{2RT}\right) + \exp\left(\frac{-\eta F}{2RT}\right) \right] \quad (7)$$

となる。ここで ΔE の負荷による外部電流量の変化を $I-I_{ma}=\Delta I$ とおき、さらに $K=RT/F$ なる関係を用いると、

$$\frac{I-I_{ma}}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{\Delta E}{2K} \left[\exp\left(\frac{\eta}{2K}\right) + \exp\left(\frac{-\eta}{2K}\right) \right] \quad (8)$$

と変形される。したがって、マクロセル腐食回路の形成によって既に分極された状態にある金属の見掛けの分極抵抗を $R_p' = \Delta E/\Delta I$ とすれば、マイクロセル腐食電流 I_0 は、マクロセル形成による分極量 η と見掛けの分極抵抗 R_p' の関数となり、

$$\therefore I_0 = \frac{K}{R_p'} \times \frac{2}{\exp\{\eta/(2K)\} + \exp\{-\eta/(2K)\}} \quad (9)$$

として求めることができる。

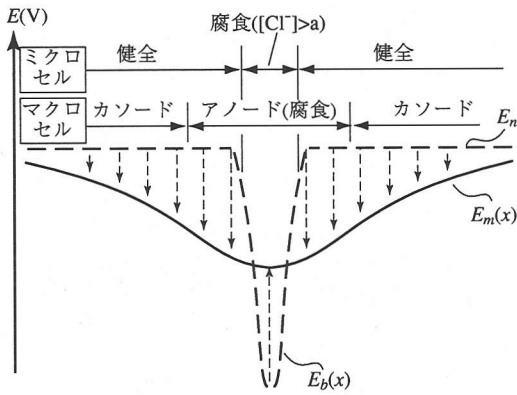


図-21 マクロセル腐食回路の形成による電位分布の変化

この式(9)を用い、マクロセル腐食回路のアノード部とカソード部が比較的明瞭に区別可能な水セメント比40%の供試体を対象として、真のミクロセル腐食量を求めることとした。

さて、コンクリートは複合材料であり、また施工時の分離の影響等により均一な組織を有しているとは言いがたい。したがって厳密に言えば、ひび割れを有さない供試体No.6についても、腐食反応で消費される物質の供給量は供試体内にて均一でなく、マクロセル腐食回路が形成されていると考えられる。しかし水セメント比40%の供試体においてはひび割れ近傍以外での腐食量は小さいため、かぶりコンクリートの組織の不均一の影響は無視できるほど小さいと考えた。

その場合、水セメント比40%の供試体中の電位分布は、図-21のようであると考えられる。供試体中の鉄筋が微小要素に分割され、なおかつそれら各要素が電気的に接続されていない場合には、スパン中央のひび割れ近傍の真の自然電位は、塩化物イオン濃度が高いためにひび割れ位置にてもっとも卑となる分布となるものと考えられる(図中では破線 $E_b(x)$ と表現)。それに対し、それ以外の部分では鉄筋がかぶりコンクリートにより保護され、比較的貴な値(破線 E_n)を示すはずである。またこのうち、ひび割れ近傍で塩化物イオン濃度 $[Cl^-]$ が発錆限界濃度(a)以上となる個所においてミクロセル腐食が生じるものと考えられる。

ところが実際には鉄筋は連続で電気的に一体化しているため、マクロセル腐食回路が形成されることにより、電位が比較的貴である部分はカソード分極され、また本来卑である部分はアノード分極され、結局、鉄筋上の見掛けの自然電位分布は図中で $E_m(x)$ としてあらわされる分布の形態をとっているものと考えられる。

ここで、塩化物イオンの影響を受けない部分の真の自然電位 E_n は、ひび割れを有さない供試体No.6の自然電位に等しいと考えられる。また $E_m(x)$ はひび割れを有する供試体No.1~5の見掛けの自然電位の測定結果に他ならない。

そこでひび割れ近傍以外の部分に関しては、図-11に示した供試体No.6の自然電位の測定結果を、図-12に示した他の供試体の自然電位の測定結果から差し引くことにより、各測定時、供試体、位置におけるマクロセル分極量、すなわち式(9)中の η を求めることとした。なおここで計算に用いた供試体No.6の自然電位は、それぞれの測定時における3測点での値の平均値を用いた。

一方、ひび割れ近傍部に関しては、本研究で行った実験の範囲からは、各微小鉄筋要素が電気的に接続されていないと仮定した場合の真の自然電位分布 $E_b(x)$ が不明である。そのため、 $E_b(x) \cong E_m(x)$ として、実測値をそのまま代用することとした。

またひび割れがミクロセル腐食に影響を与える範囲、すなわち $E_b(x)$ が存在する x の範囲については、以下のように考えた。

鉄筋の腐食状況、あるいは自然電位電位、分極抵抗の推移から、2cmのかぶりコンクリート中を浸透した塩分の濃度が、鉄筋位置で発錆限界を大幅に上回っているとは考えにくい。ところが曲げひび割れから供試体内部に進入する塩化物イオンは、曲げひび割れのみならず、曲げひび割れ生成時に発生する鉄筋とコンクリート間の剥離、あるいは打設時のブリーディングにより鉄筋下面に形成される組織的に粗な部分も通じて供試体内に進入すると考えられる。この場合、ひび割れから2cm以上離れた位置においても、塩化物イオン濃度が発錆限界を上回る可能性がある。

神山によれば、直径13~25mmの丸鋼、異形鉄筋を用いた両引供試体で残留ひび割れ幅が0.02~0.13mmの範囲において、鉄筋-コンクリート間の剥離長さは14~37mmに達し、また結果のばらつきが非常に大きいものの、ひび割れ幅が大きいほど剥離長さは大きい¹⁵⁾。本研究での曲げひび割れ幅は0.05~0.85mmであるため、上記の値よりも大きな剥離が発生している可能性もある。

一方、図-9に示したように、水セメント比40%の供試体での腐食はひび割れ近傍に集中しており、あきらかに目視で判断可能な供試体軸方向への分布は4~5cm程度である。

これらを考慮し、ひび割れから供試体軸方向への塩分の浸透によりミクロセル腐食が発生しているのは、ひび割れから一律に ± 3 cm以内の位置であると仮

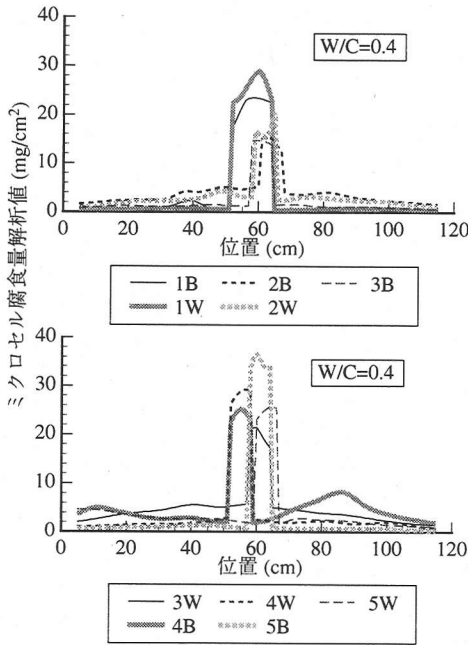


図-22 ミクロセル腐食の分布の解析結果 (マクロセル腐食回路の影響を考慮)

定した。これを図-21中の表記を用いてまとめれば、以下のようになる。

ひび割れ近傍 (ひび割れから $\pm 3\text{cm}$ の範囲)

$$E_{i,b}(x) \cong E_{i,m}(x), \quad \therefore \eta = 0 \quad (10a)$$

それ以外の場所

$$E_{i,m}(x) \cong \sum E_{6,n}(x)/3, \quad \therefore \eta(x) = E_{i,m}(x) - \sum E_{6,n}(x)/3 \quad (10b)$$

ただし、添字 l は供試体番号 (1~5) を表す。

また供試体No. 1の場合には約6cmの間隔で2本のひび割れを有するため、それらの間の区間を含め、計12cm (=3×2+6)の範囲をひび割れ近傍と定義した。

このようにして得た η と、測定した見掛けの分極抵抗 R_p' を式(9)に代入し、式(2)を用いてミクロセル腐食量を求めた結果を図-22に示す。なお、ここでも K 値は26mVとした。

ひび割れ近傍の腐食の分布は図-19に示したものと全く同一であるが、それ以外の区間での腐食はほとんど無視できるレベルにまで減少し、図-9に示した実際の腐食状況に近い結果となった。ただし、図から明らかなように、ひび割れ近傍区間とそれ以外の区間の境界が不連続であり、歪な分布となっていることは否めないため、今後さらに実験データを収集し、より現実に則した境界条件を設定する必要がある。

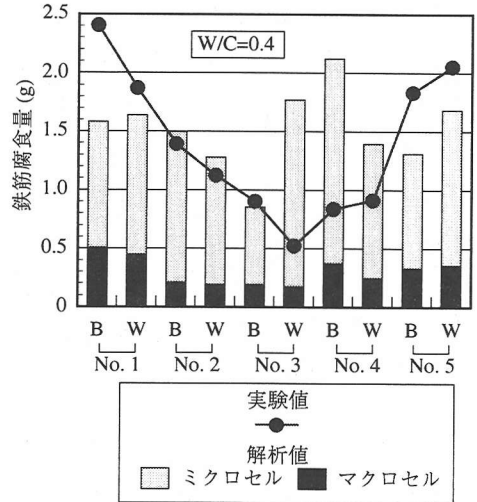


図-23 腐食減量の実測値とマクロセル腐食、ミクロセル腐食の解析値 (W/C=0.4)

ると考えられる。

(6) 実測値と解析値の比較

水セメント比40%でひび割れを有する供試体No. 1~5に関して、前項までに解析的に求めたマクロセル腐食量 (第(3)節参照)、マクロセルの影響を考慮したミクロセル腐食量 (第(5)節参照)と、腐食減量の実測値との関係を図-23に示す。なおここで用いたマクロセル腐食量は、図-17で用いたものと同一であり、ミクロセル腐食量は図-22に示した結果を鉄筋全長にわたって積算した結果である。

腐食量が実際には小さかったNo. 3WとNo. 4Bにおいて実測値と解析値の乖離が見られた。これら供試体の場合には、ひび割れ部以外でのミクロセル腐食量の計算値が他の供試体と比較して大きかった (図-22参照) ことが、このような実測値との大きな差につながっている。したがってこれら供試体に関してはマクロセル腐食回路形成による分極量 η の設定が不適切だった可能性もある。

しかしそれ以外の供試体においては、マクロセル腐食量とミクロセル腐食量の解析値の和が実測値とほぼ一致するという結果となった。したがって、本研究で設定した各種腐食解析モデルは、現実の腐食状況をほぼ適切に再現できているものと考えられる。

一方、水セメント比50%の供試体と60%の供試体に関しては、アノード分極された部分とカソード分極された部分との判別が困難で、さらに、ひび割れを有さない供試体においてもかぶりコンクリートを通じての塩化物イオンの浸透によって腐食が生じているため、前節で水セメント比40%の供試体を対象と

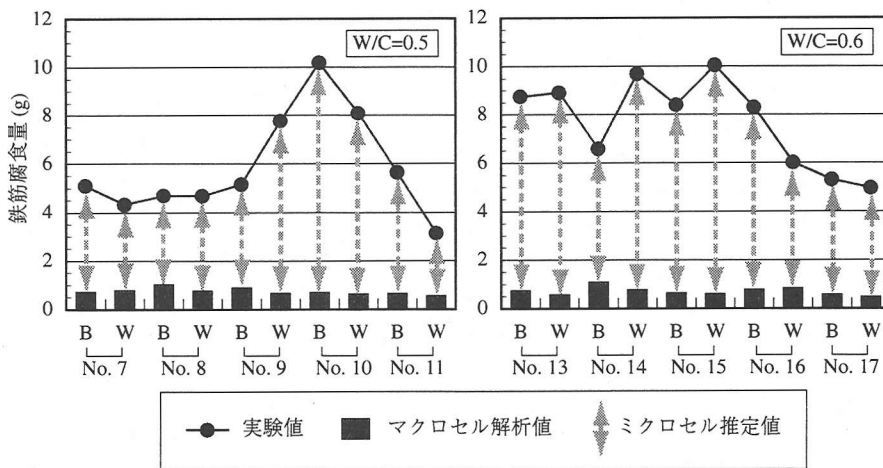


図-24 腐食減量の実測値とマクロセル腐食の解析値 (W/C=0.5, 0.6)

して行なったようなマイクロセル腐食量の解析は、現時点では困難である。

そこでこれら供試体については、腐食減量の実測値から第(3)節で求めたマクロセル腐食量の解析値を差引いた値をマイクロセル腐食量と見做し、これらの関係を図-24に示した。

マイクロセル腐食量は図-20に示した値と比較して、かなり小さいものとなった。水セメント比が50%、60%の供試体においては、ひび割れ以外の部分での不動態被膜の破壊が生じてはいるが、その部分での腐食の進行は均一ではないため、図-21に示したようなマクロセル腐食回路が形成され、マクロセル腐食が生じている。したがって、供試体内の鉄筋を仮想的に分割した各微小要素はそれぞれアノード分極あるいはカソード分極されていると見なすことができる。この場合、既に示したように見掛けの分極抵抗は小さくなるため、図-20で示したような過大なマイクロセル腐食量が算出されたものと考えられる。

また図-23, 24によると、水セメント比40%の供試体において、全腐食中に占めるマクロセル腐食量の割合は20~30%程度であった。一方第(3)節で述べたように、水セメント比が増加するにつれマクロセル腐食量は増加はするが、水セメント比50%、60%の供試体の場合にはそれ以上にマイクロセル腐食量の増加が著しいため、マクロセル腐食が全体の腐食中で占める割合は小さく、マイクロセル腐食が卓越する状態となった。第(1)節で述べたように、水セメント比50%および60%の供試体の場合にはひび割れ幅が腐食減量の実測値に与える影響が小さかったが、これら供試体ではひび割れ部以外でのマイクロセル腐食の寄与する割合が高かったために、ひび割れ幅等の影響が不明瞭になったものと考えられる。

(7) 今後の課題

本研究ではマクロセル腐食の生じている供試体において、電気化学的手法を用いた非破壊検査の結果から、マクロセル腐食量とマイクロセル腐食量を求めることを目指し、ある程度その目標は達することができたと考えているが、いくつかの課題も残されている。

例えば本研究の結果からはマクロセル腐食量の解析値は、ひび割れ幅と、あるいはマクロセル腐食量とマイクロセル腐食量の合計である腐食減量の実測値と比較的よい相関関係にあった。それに対し、マイクロセル腐食の解析値に関しては、図-21, 22に示したように改善の余地があるものと考えられる。特に、マクロセル腐食回路のアノードとなる部分が、マクロセル腐食回路が形成されない状態とされたときにどのような電位を示すか、あるいはマクロセル腐食回路の形成によってアノード分極、カソード分極されるのはそれぞれどの部分かを正確に把握することにより、マイクロセル腐食量の解析値の精度は向上するものと考えられる。

そのためには例えば、ひび割れ幅とコンクリートと鉄筋間での剥離発生面積の関係を定量的に把握して¹⁰⁾、正しい境界条件を設定することが必要であると考えられる。またコンクリート断面内での水分量、電気抵抗の分布を考慮し、鉄筋の周方向の腐食速度の分布を検討することも必要であると考えられる。

さらに、本研究では鉄筋の分極曲線として式(1)の関係を仮定したが、実際には金属の腐食反応速度は酸素の供給量に大きく依存し、特に電流量の大きな領域ではカソード分極曲線の非線形性が大きくなる。また不動態が存在する場合のアノード分極曲線

に関しても同様に式(1)で表記することはできないと考えられる。したがって腐食量の解析精度をさらに向上させるためには、コンクリート中の鉄筋の分極曲線について詳細に検討することも必要となるであろう。

5. 結論

本研究では、RC部材に発生した幅0.05～0.85mmの曲げひび割れがマクロセル腐食に与える影響について明らかにすることを目的とし、1年間塩化物イオン水溶液を散布したRC部材内の鉄筋の腐食性状を調査した。その過程において、マクロセル腐食の生じているRC部材における自然電位、分極抵抗を測定し、その結果を用いて、鉄筋腐食量を解析的に求め、実際の腐食量との比較を行なった。

その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 水セメント比が40%の場合には鉄筋はほぼひび割れの近傍のみにて発錆したのに対し、水セメント比が50%、60%の場合には供試体全長にわたって発錆が見られた。
- (2) 水セメント比が40%の場合にはひび割れ幅と腐食量との間により相関関係が見られたが、水セメント比が50%、60%の場合には相関は低かった。ただしその場合にもひび割れの有無の影響は認められた。
- (3) マクロセル腐食が生じている場合、鉄筋はそれぞれの位置において分極され、本来の自然電位、分極抵抗を示さない。したがってStern-Gearyの式は成り立たない。
- (4) マクロセル腐食解析によれば、水セメント比が40%の場合にはひび割れ位置が常にマクロセル腐食のアノードとなっているが、水セメント比が50%、60%の場合にはアノードの位置は一定しない。
- (5) マクロセル腐食の解析量とひび割れ幅の間にはよい相関関係がある。
- (6) マクロセル腐食が生じている場合にも、マクロセル腐食回路の形成による鉄筋の分極量を考慮することによって、正しいマイクロセル腐食量を求めることができる可能性がある。
- (7) 腐食全体に対してマクロセル腐食とマイクロセル腐食がそれぞれ寄与する割合は、水セメント比によって異なる。

謝辞：本研究の一部は文部省のハイテク・リサーチ・

センター整備事業の援助を受けて行われた。また実験に関しては、竹島進介氏、福嶋学氏、猪田俊哉氏、金村龍和氏(平成12年および13年度中部大学土木工学科小林研究室卒業生)の協力を頂いた。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮里心一、大即信明：既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定、コンクリート工学論文集、第12巻第2号、pp.93-103、2001。
- 2) 武若耕司：鋼材腐食、コンクリート工学、Vol.33、No.3、pp.123-128、1995。
- 3) 青木繁、天谷賢治、宮坂松甫：境界要素法による腐食防食問題の解析、裳華房、pp.6-16、1998。
- 4) Bookris, J. O. and Reddy, A. K. N.: *Modern electrochemistry 2*, Plenum Publishing, p. 883, 1977。
- 5) 米山宏：電気化学、大日本図書、p. 100、1986。
- 6) 酒瀬川唯、井上晋、築地光雄、宮川豊章、藤井學：鉄筋の腐食等価電気回路モデルについて、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.530-531、1990。
- 7) Feliú, S., González, J. A., Feliú, S. Jr. and Andrade, C.: Confinement of the electrical signal for in-situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, p. 457, 1990。
- 8) 小林孝一、宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究、土木学会論文集、No. 669/V-50、pp.173-186、2001。
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)、1987。
- 10) 小山理恵、矢島哲司、魚本健人、星野富夫：自然電位を用いた鉄筋腐食状態の予測方法に関する基礎的研究、土木学会論文集、No. 550/V-33、pp.13-21、1996。
- 11) 鈴木誠道、矢部博、飯田善久、中山隆、田中正次：現代数値計算法、オーム社、pp.165-173、1994。
- 12) 川東龍夫、小林孝一、宮川豊章：コンクリートに埋設された鋼材のマクロセルおよびマイクロセル腐食に関する研究、土木学会論文集、No. 732/V-59、pp.1-15、2003。
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、2002。
- 14) 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割れが鉄筋腐食に与える影響について、セメント技術年報、第33巻、pp.494-497、1979。
- 15) 神山一：コンクリートのひびわれと鉄筋の腐食—6～8年暴露試験結果—、セメント技術年報、第26巻、pp.491-493、1972。
- 16) 大即信明、宮里心一、柴田常德、久田真、Tarek Uddin Mohamed、長滝重義：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、土木学会論文集、No. 606/V-41、pp.63-73、1998。
- 17) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、p.145、1997。

(2002.10.9受付)

NUMERICAL ANALYSIS OF MACRO-CELL CORROSION CAUSED BY CRACKS IN COVER CONCRETE BY USING ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF STEEL BAR

Koichi KOBAYASHI, Ikuo HIRASAWA and Toyo MIYAGAWA

Chloride induced corrosion of reinforcing steel is a typical cause of the deterioration of RC structure. It is known that macro-cell increases the corrosion rate of steel bar. However, the amount of deterioration caused by macro-cell corrosion cannot be determined from the Stern-Geary formula.

This study aims at taking into account the effect of pre-polarization of steel caused by macro-cell when calculating macro- and micro-cell corrosion rates from polarization resistance and halfcell potential, thereby clarifying how the presence of concrete cracks generated by bending moment affects the corrosion rate of reinforcing steel.