

コンクリートに埋設された鋼材の マクロセルおよびミクロセル腐食に関する研究

川東龍夫¹・小林孝一²・宮川豊章³

¹正会員 博(工) 近畿大学講師 理工学総合研究所 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

²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)

³フェロー会員 工 博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

コンクリート中の鋼材腐食を非破壊手法によつて的確に把握することは、コンクリート構造物を維持管理する上で重要な項目の一つである。しかし、現在用いられている非破壊手法は、手法の種類と条件、測定値の評価方法などの点で方法論的な検討が行われている段階にあり、手法と評価方法の確立が望まれている。

本研究は、鋼材の腐食をマクロセル腐食、ミクロセル腐食に分けて評価することを目的に、大きさの異なる鋼板を用いたモデル試験供試体の電気化学的な経時変化を非破壊的に測定し、腐食に関する解析を行った。

これらの解析結果と腐食減量測定結果から、鋼材腐食をマクロセル腐食とミクロセル腐食によって区別することができ、それらを用いた鋼材の腐食量推定が可能であることを示した。

Key Words : chloride, steel corrosion, electrochemical method, half-cell potential, polarization resistance, concrete resistance, electric current, macro-cell, micro-cell, numerical analysis

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食を非破壊的に評価する手法として、自然電位法および分極抵抗法があげられる。このうち、自然電位法は、測定 の 簡便性と測定値の評価の再現性から鉄筋腐食判定方法として現在最も広く用いられている手法の一つである。また、分極抵抗法は、鉄筋腐食速度の推定、あるいは腐食部位の劣化状態の将来予測ができると考えられている。しかし、分極抵抗法は、測定手法の種類と条件、あるいは測定値の評価方法などの方法論的な検討が行われている段階にあり、測定手法と評価方法の確立が望まれている¹⁾。

一方、コンクリート中の鋼材腐食はマクロセル腐食とミクロセル腐食によって生じ、腐食はこれら両者が混在して進行するものと考えられる。しかし、現況の非破壊手法では両者を区別して推定することが難しい。したがって、鋼材腐食のメカニズムを充分に把握した上で、非破壊手法による鋼材腐食の評価方法を確立することは重要である。

最近、この種の研究は種々の手法が用いられ検討されてきている。たとえば、各種の数値解析により腐食を評価する^{2), 3)}、あるいは実測値を用いてマクロセル腐食およびミクロセル腐食を評価する⁴⁾などの手法が用いられている。しかし、実際の現象と整合性を保たせながら腐食をごく限られた部分に限定し、分極抵抗法などの電気化学的な非破壊測定および解析によって、マクロセル腐食とミクロセル腐食の区別を行った上で腐食量の推定を試みた報告は少ない。

本研究は、塩分による鋼板腐食をマクロセル腐食、ミクロセル腐食に区別して把握することを目的に、電気化学的な非破壊手法を用いた測定と解析によって、主として以下の2項目について検討を行った。

(1) 自然電位とコンクリート抵抗の測定結果を用いたマクロセル腐食解析結果と、それらに分極抵抗も加えた場合におけるマクロセル腐食解析結果の比較

(2) 解析から得られるマクロセル腐食、鋼板間電流測定から得られるマクロセル腐食、および分極抵抗から得られる腐食の相互関係と腐食量の推定

2. 試験概要

(1) 使用材料とコンクリート配合

使用材料を表-1に示し、コンクリートの示方配合、空気量、スランプ、28日強度の実測値を表-2に示す。

(2) 供試体

コンクリートおよび鋼板の形状を図-1(a)に示す。

供試体は、以下の2種類をそれぞれ2体作成した。

シリーズ1：マクロセル腐食を検討する目的で長い鋼材を用いたもの(以下、Lと略称)

シリーズ2：マクロセルおよびマイクロセルを検討する目的で、短い鋼材の各リード線を接続あるいは一時的な切り離しをしたもの(以下、Sと略称)

いずれの鋼板も材質、厚さ、幅は同一とし、腐食を目的とした所定の露出面以外のエポキシ樹脂塗装、供試体中の塩水添加用セルを以下のように施した。

シリーズ1(L)の鋼板は、厚さ1.6mm、幅15mm、長さ1930mmの形状のものを用い、片面の15×1810mmを除いた側面、および裏面全てを樹脂塗装した。コンクリート打設時に、鋼板露出面の端部1カ所に内径約10mmの円筒を鋼板直上約5mmまで挿入し、円筒はコンクリート凝結後に取り除いた。この形成された空洞を塩水添加用セルとした。次に、シリーズ2(S)に用いた鋼板は厚さ1.6mm、幅15mm、長さ98mmで、各供試体の両端にリード線取付用突起が設けられたものを用いた。両端に使用する鋼板は塩水添加用セル側を168mm、もう一端を158mmとした。各鋼板の露出面以外の裏面、側面、リード線取付後の突起部分はLと同様に樹脂塗装し、露出面長さの合計を1720mmとした。塩水添加用セルを形成するための円筒設置と除去もLと同様である。

鋼板は型枠の内側に敷設された絶縁粘着シール上に貼りつけ、その上からコンクリートを打設する方法とした。なお、脱型時および養生期間中に供試体にひび割れ発生の可能性が考えられたが、脱型時および試験期間中におけるひび割れは全く生じなかった。

(3) 養生および環境条件

供試体は打設48時間後から14日間水中養生し、その後室内乾燥養生を行った。室内乾燥を所定期間行った後、塩水添加用セル下にある鋼板を腐食させた。特に、腐食位置を限定することと、実際の現象と同じようにコンクリート供試体内へ塩分を浸透・拡散させ

るため、設けられた塩水添加用セルへ塩水を定期的に供給した。塩水は、NaCl換算で3%質量濃度とし、塩水ボトルから内径1mmのシリコンチューブを介して塩水添加用セルが常時満たされるように一日あたり約5~6ccの割合で供給した。

(4) 測定項目

測定は、電気化学的測定とコンクリートから鋼板を取り出した後の腐食減量測定とした。

a) 測定条件

電気化学的測定は、湿布により供試体を十分に湿らせた後に、自然電位、交流法による分極抵抗とコンクリート抵抗、および供試体Sにおける鋼板間電流の各項目について行った(図-1(a)参照)。交流法の測定条件は、電圧を±10mVとし、周波数は10Hzと0.01Hzの2種類とした。自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗の照合電極は全て飽和塩化銀電極を用い、交流法の対極は、センター対極がφ40mm、ガード対極がφ106mmの二重対極型⁹⁾を用いた。

腐食減量は、鋼板試料を10%質量濃度のクエン酸2アンモニウム溶液に24時間浸漬し、その浸漬前後の質量差から腐食減量を算出した。なお、塗装の溶解と付着細骨材が腐食減量へ影響を与えると考えられたため、塗装された同じ種類の鋼板3枚を同一溶液に浸漬すること、浸漬後の溶液を濾過して剥離した細骨材の質量を求めることにより影響を除くこととした。

b) 測定点数

それぞれの供試体における電気化学的測定の測定位置と測定点数を図-1(b)に示す。

供試体Lの測定は、自然電位を50mm間隔の37箇所、分極抵抗およびコンクリート抵抗測定を100mm間隔の18箇所で行った。供試体Sの測定は、自然電位を各鋼板の中央と、塩水添加セル付近および塩水添加セルから最も離れた鋼板における端部を含めた21箇所とし、分極抵抗とコンクリート抵抗測定についても塩水添加セル内と両端部を除く同一箇所の18箇所とした。また、供試体Sの測定は、小鋼板のリード線を接続した状態と一時的に接続を切り離した状態についてそれぞれ行った。なお、リード線の切り離し時の測定には直前の接続時の状態が、接続時の測定には直前の切り離し時の状態が、それぞれの測定に影響を与えると考えられたため、測定までの間電位測定を行い、電位が安定するのを確認した後、各測定を行った。

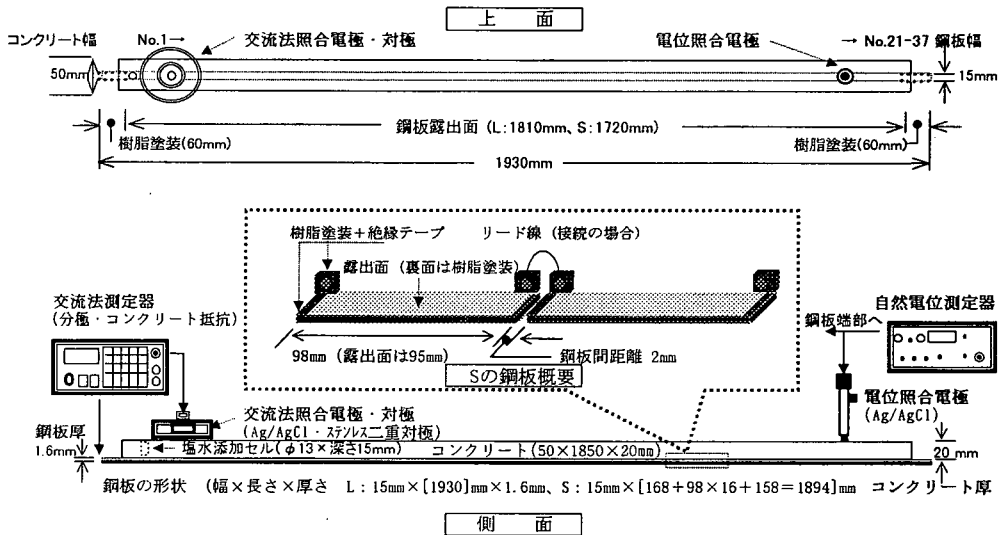
供試体Sの電流は、鋼板間のリード線を接続したままの状態各鋼板間の電流を測定した。

表-1 使用材料

セメント	化学成分(%)	高炉セメントB種, スラグ量:40%, 密度:3.05g/cm ³ , プレーン比表面積:3980cm ² /g SiO ₂ :25.4, Al ₂ O ₃ :8.3, Fe ₂ O ₃ :2.3, CaO:55.9, MgO:3.6, SO ₃ :1.9, Na ₂ O:0.25, K ₂ O:0.43, TiO ₂ :0.55, P ₂ O ₅ :0.09, MnO:0.16, ig. loss:0.7
	鉱物組成(%)	C ₃ S:31, C ₂ S:13, C ₃ A:5, C ₄ AF:5
骨材	細骨材	川砂, 密度:2.55g/cm ³ , 粗粒率:2.74, 吸水率:2.19
	粗骨材	碎石, 密度:2.67g/cm ³ , 粗粒率:6.29, 吸水率:0.95, 最大寸法:15mm
鋼材		鋼板, 種類:一般構造用圧延鋼材, SS41(SS400), 材質:酸洗材, 板厚:1.6mm

表-2 コンクリートの示方配合と実測値

W/C	細骨材率 s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)					実測空気量 (%)	実測スランプ (cm)	28日強度の実測値 (N/mm ²)	
		W	C	S	G	AE剤			圧縮	曲げ
0.5	46.8	185	370	755	899	—	2.0	8.5	33.9	5.6



(a) 鋼板・供試体形状, および測定概要

セルの端部を起点とした 距離(mm) →	0	10	60	250	500	750	1000	1250	1500	1810	測定点数	
L 電位	●◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	□	37
L 分極・コンクリート抵抗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18
S-MA 電位	●◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	□	21
S-MA 分極・コンクリート抵抗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18
S-MA 鋼板間電流	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17
S-mi 電位	●◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	□	21
S-mi 分極・コンクリート抵抗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18

注1) L: 大鋼板, S-MA: 小鋼板のリード線接続状態, S-mi: 小鋼板のリード線切り離し状態

注2) ●: 塩水添加セル内電位, ◎: 塩水添加セル近傍電位, □: 鋼板露出面端部電位

(b) 各測定の測定位置

図-1 供試体の形状, 主たる測定の概要と測定位置

3. 試験結果と考察

(1) 各測定値の経時変化

a) 平均電位の経時変化と電位分布

塩水添加前後の供試体Lおよび供試体Sにおける供試体全体の平均電位経時変化を図-2に示す。

図-2(a)では、水中養生および塩分添加前における各供試体の平均電位が同じ様な変化を示している。

供試体Lおよび供試体Sの中から塩水を添加する供試体をそれぞれ1体選び、塩水を塩水添加セル中に定期的に添加した。これらの供試体をそれぞれL1, S1とする。

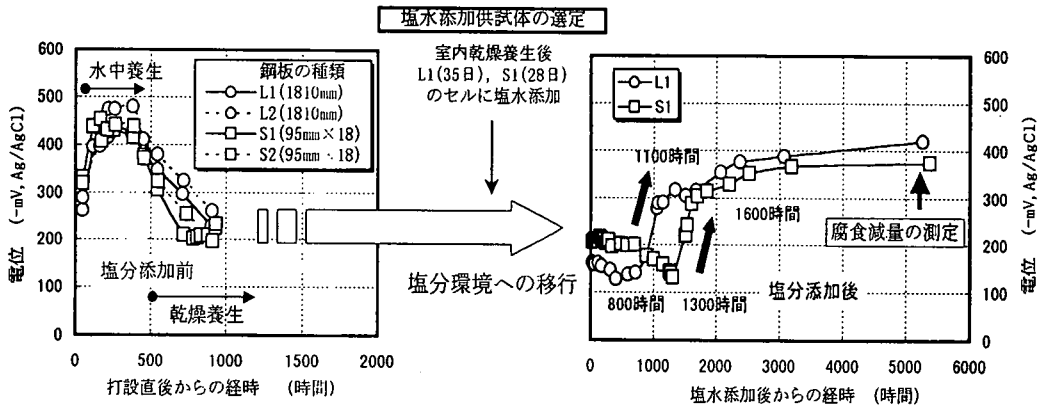
塩水を添加した後も室内乾燥養生を行っているが、平均電位が著しく卑変する時期は、図-2(b)に示されるように、L1で塩水添加後約800時間、S1で約1300時間となった。また、図-2(b)中の黒い矢印に示されるように、L1, S1とも著しく卑変している期間は卑変開始より約300時間と同程度で、その後緩やかな卑変を示した。卑変開始時期が異なったのは、塩水添加セル直下のモルタル厚さの違いが影響し、鋼板への塩分

到達時期が異なったために生じたものと考えられる。このため、腐食開始は、L1で塩水添加後約800時間、S1で塩水添加後約1300時間と考えられる。なお、後述するマクロセル腐食の数値解析には、卑変が緩やかになる時期(L1で約1100時間、S1で1600時間)以降の測定値を用いた。

塩水が添加された後の平均電位が卑変する前後における供試体各点の電位分布を図-3に示す。

L1(335時間)、およびリード線が接続された状態のS1(336時間)の電位は、測定点間に大きな差が認められない。しかし、塩水添加セル付近の電位が卑変した後はL1, S1とも塩水添加セル付近が最も卑で、この点から離れるにしたがい塩水添加セル付近より貴の値を示している。また、L1, S1とも塩水添加セルから最も遠い部分でも自然電位はやや卑変しており、塩水添加セル付近における不動態皮膜が塩分によって破壊された影響を受けていると考えられる。一方、リード線が切り離された状態のS1の電位は、塩水添加セル付近での変化は認められるものの、他の部分では各鋼板個別の変化を示している。

各養生の期間	水中養生	室内乾燥養生 (塩水添加前)	室内乾燥養生 (塩水添加後)	腐食減量の測定
	14日	L1=35日, S1=28日	L1=219日, S1=224日	
各期間の累積日数	16日	L1=51日, S1=44日		L1, S1=268日
電位の変化	卑変	貴変	塩分添加後の電位の卑変	L1≒33日~, S1≒54日~



(a) 塩水添加前の平均電位経時変化

(b) 塩水添加後の平均電位経時変化

図-2 各供試体における供試体全体の平均電位経時変化

b) 分極抵抗とコンクリート抵抗の分布

供試体 L1 および S1 における真の分極抵抗と見かけのコンクリート抵抗の分布をそれぞれ図-4の(a)および(b)に示す。コンクリート抵抗は見かけの値であるが、これは次項の解析に用いるためである。

塩水添加後における分極抵抗、コンクリート抵抗は、平均電位が著しく卑変した時期以降にセル付近の値が減少⁶⁾し、自然電位結果と同様な腐食傾向を示している。L1 の 1075 時間経過時において、塩水添加セルからの距離 1200mm 以上における分極抵抗およびコンクリート抵抗が、1200mm 以下に比較して大きな

値を示している。また、供試体 S1 の切り離し時におけるセル付近以外の分極抵抗とコンクリート抵抗は、塩水添加後 341 時間より 1709 時間の方が大きい。後述する腐食減量測定時において、供試体 L1, S1 の鋼板とコンクリート間に付着切れは認められなかった。したがって、このような現象は、不動態皮膜形成の進行、およびコンクリートと鋼板間の乾燥が進んだために生じたものと考えられる。なお、L1 と S1 のコンクリート抵抗が異なっているのは、測定時期の環境、あるいはコンクリートの水分状態などの違いが影響を与えたものと考えられる。

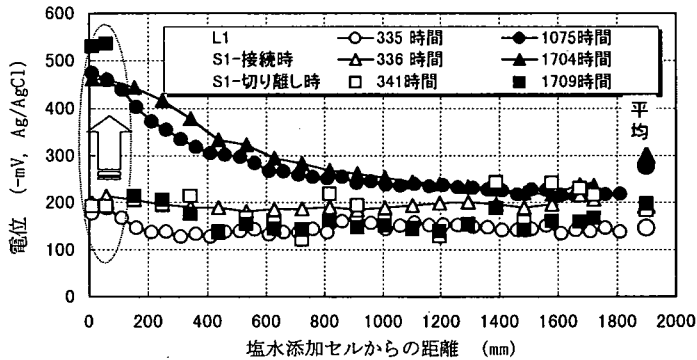
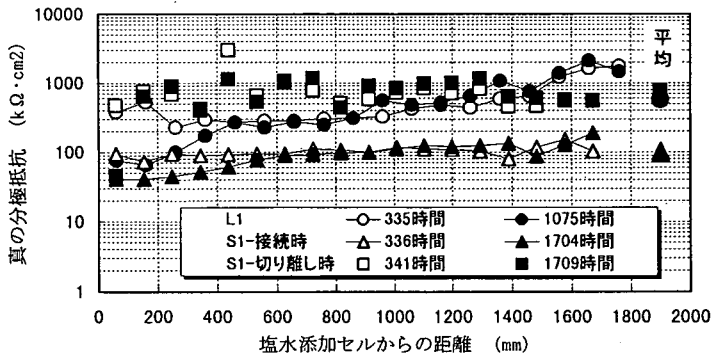
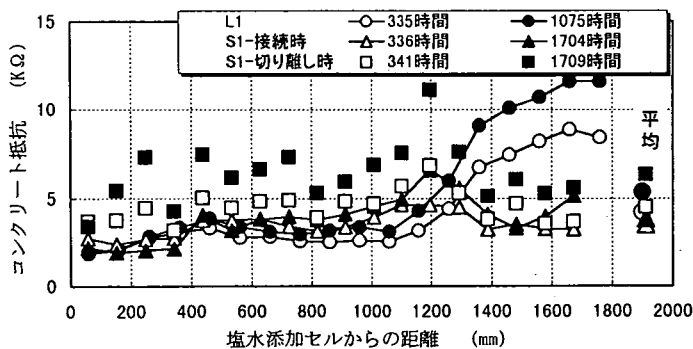


図-3 塩水添加後における L1, S1 の電位分布



(a) 分極抵抗分布



(b) コンクリート抵抗分布

図-4 塩水添加後における L1, S1 の分極抵抗、コンクリート抵抗の分布

表-3 各測定と解析によって得られる腐食の場合分け

	L1:大鋼板 (露出面:15×1810 mm)	S1:小鋼板 (露出面:15×95 mm×18枚+10 mm)
連続した鋼板のマクロセル腐食	L1-MA	S1-MA
連続した鋼板の腐食	L1- MA・mi	S1- MA・mi
分離した鋼板のミクロセル腐食	—	S1- mi

(2) 測定結果の解析

ここで、3.(1)b)の測定結果を用いて腐食の解析を行う。測定と解析で得られる腐食の場合分けを表-3に示す。

なお、測定値および解析値から算出する鋼板の推定腐食量(W)は次式によって求めた。

$$W(\text{g/cm}^2) = \frac{a}{c} \int I_{\text{corr}} dt = \frac{a}{c} \int K (1/R_p) dt \quad (1)$$

ここで、 I_{corr} :腐食電流密度(A/cm²)、 K :比例定数(V)、 R_p :分極抵抗(Ω・cm²)、 a :鉄を2価とし原子量を価数で除した値(27.9g)、 c :ファラデー定数(96500C)

ここで、表-3に示されているL1, S1の両者から検討する腐食のケースは以下のように分類される。

L1:マクロセル解析から推定される腐食(L1-MA:①)

と分極抵抗から推定される腐食(L1-MA・mi:②)

S1:鋼板のリード線接続時におけるマクロセル解析から推定される腐食(S1-MA:③)と各点の分極抵抗から推定される腐食(S1-MA・mi:④)、鋼板の接続を切った場合の分極抵抗から推定されるミクロセル腐食(S1-mi:⑤)

一般に、マクロセル腐食の検討はL1における①を解析することである。②の検討はマクロセル腐食とミクロセル腐食全体の推定を行うものであるが、図-3および図-4に示したように、腐食部が非腐食部に対しても見かけ上電位を卑変させるような影響を与えることが考えられる。このため、腐食部付近の非腐食部も腐食と見なす場合があり、腐食部のみの厳密な値を得ることは難しいものと考えられる。一方、S1のケースは、④と⑤の比較から②の検討が可能となり、さらに、①との比較も可能である。このように、S1のケースを検討することは、マクロセル腐食とミクロセル腐食を個別に評価し、L1のような一般的なケースを検討する上でも重要と考えられる。

なお、S1の分離された状態では、各鋼板内でマクロセル腐食が生じていないものと仮定した。

次に、マクロセル腐食の数値解析について述べる。

a) マクロセル腐食の解析

一般に、コンクリート中の二次元電位(u)の分布は(2)で示されるラプラス方程式が適用されている。

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

式は差分法⁷⁾、あるいは有限要素法⁸⁾などによって解かれているが、ここでは差分法を用いて以下のような条件と手順によって解析した。

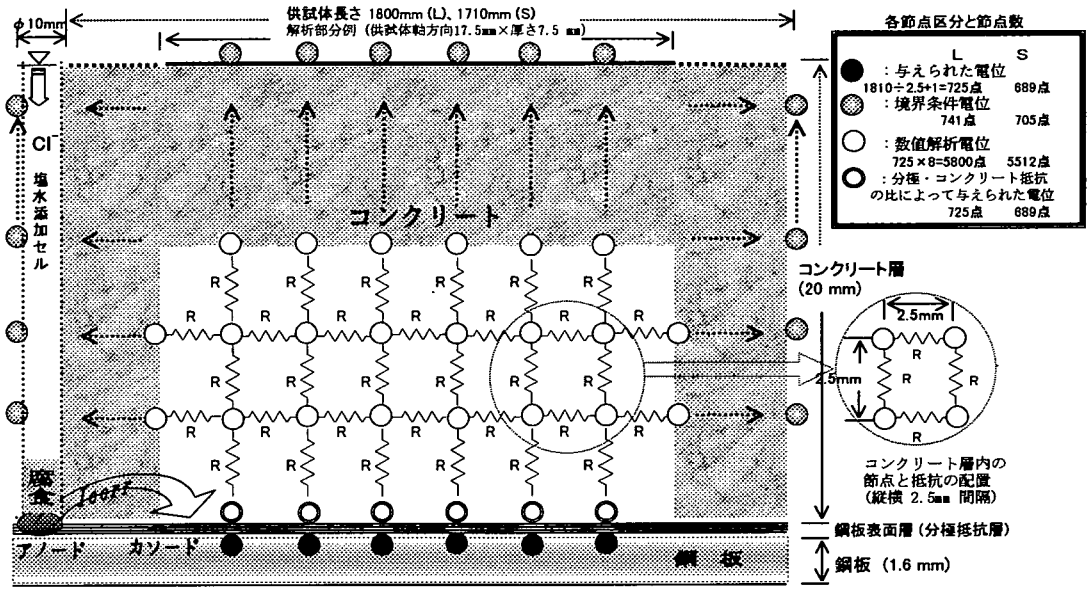
(a) 電位は、所定間隔(L1:50mm, S1:95mm)毎に測定された電位を多項式の曲線で近似し、差分法で解析する間隔の2.5mm毎に与えた。

(b) コンクリート厚を20mmと薄くしたことから、鋼板表面電位を(a)で求められた電位と仮定⁹⁾して与えた。また、境界条件として、コンクリート表面および両端部をその内部方向の隣接電位と等しいものとした。なお、供試体の軸方向の解析節点数は、725点(L1)または689点(S1)とし、全解析節点数は(鋼板軸方向)×8(コンクリート深さ方向)=5800点(L1)または5512点(S1)とした。計算は繰り返し計算とし、各節点の電位とその直前に得られた電位との差が0.0001mV以下となるまで計算を繰り返した。

(c) (b)で得られた電位分布と比抵抗⁹⁾に相当するコンクリート抵抗、あるいは各測定点から得られた分極抵抗を加えることによって鋼板表面における電流の流出入および腐食電流密度を求めた。なお、差分法の複雑な解析過程を避けるため、コンクリート抵抗を供試体内で均一と仮定し、測定値の平均、最大、最小値のそれぞれを用いた3通りについて解析を行った。

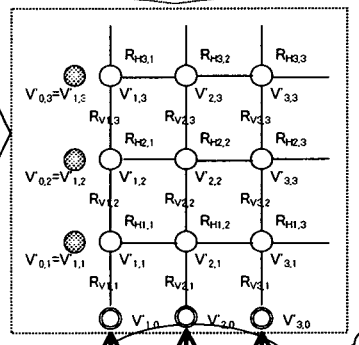
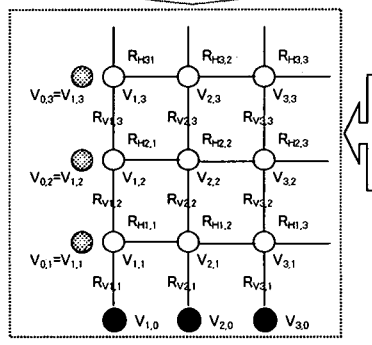
解析概要を図-5に示す。

図-5に示すように、コンクリート中の2.5mm間隔に節点とその間に抵抗を配置し、たとえば鉛直方向の場合、深さ方向の縦20mm区間に8個の直列抵抗が軸方向の40mm区間に16列あるとし、抵抗の直列と並列の関係から節点間抵抗を求めた。分極抵抗は、真の分極抵抗を鋼板幅1.5cmと区間0.25cmの面積で除して図-5に示される分極抵抗層の抵抗とした。



I 電位とコンクリート抵抗で解析する場合

II Iに分極抵抗も加えて解析する場合



電位と抵抗の配置

● V_{j0} , ○ V_{j0} : 測定、或いは与えられた電位
○ V_{jk} , ● V_{jk} : 数値解析によって求める電位
(j: 1~725 または 1~689, k: 1~8)

分極抵抗層 R_{k0} と R_{k1} の比によって、 V_{k0} を決定する

$R_{V1,1} = R_{V1,2} = \dots = R_{Vjk} = R_{H1,1} = R_{H1,2} = \dots = R_{Hk,(G-1)}$
(j: 1~725 または 1~689, k: 1~8)
(n: 2~725 または 2~689, k: 1~8)

$R_{V1,1} = R_{V1,2} = \dots = R_{Vjk} = R_{H1,1} = R_{H1,2} = \dots = R_{Hk,(G-1)}$
(j: 1~725 または 1~689, k: 1~8)
(n: 2~725 または 2~689, k: 1~8)

分極抵抗層の抵抗 (鉛直のみ)
 $R_{i0} \Rightarrow R_{pm} \times (1.5 \times 4.0) \div (1.5 \times 0.25)$
 R_{pm} : 測定された見かけの分極抵抗 (m: 1~18)

$$I'_{Vj0} = (V_{j0} - V_{i0}) / R_{i0}$$

コンクリート層の節点間抵抗
 $R_{Vjk} = R_{Hk,(G-1)} = R'_{cm} \times (40 \div 2.5) \div (20 \div 2.5)$
 $R'_{cm} \Rightarrow R_{cm}$ (最大, 最小, 平均)
 R_{cm} : 測定されたコンクリート抵抗 (m: 1~18)

コンクリート層の節点間抵抗
 $R_{Vjk} = R_{Hk,(G-1)} = R'_{cm} \times (40 \div 2.5) \div (20 \div 2.5)$
 $R'_{cm} \Rightarrow R_{cm}$ (最大, 最小, 平均)
 R_{cm} : 測定されたコンクリート抵抗 (m: 1~18)

$$I_{V_i1} = (V_{i0} - V_{i1}) / R_{i1}$$

$$I'_{V_i1} = (V'_{i0} - V'_{i1}) / R_{i1}$$

$$I_{H_i1} = (V_{(G-1),1} - V_{i1}) / R_{H_i,(G-1)}$$

$$I'_{H_i1} = (V'_{(G-1),1} - V'_{i1}) / R_{H_i,(G-1)}$$

鋼板表面電流の鉛直成分

鋼板表面電流の水平成分

図-5 コンクリート中の電位分布および電流を求めるための解析概念

b) マクロセル解析による電位分布と電流分布

銅板表面電位として、図-3に示されている卑変後の電位分布へ多項式の近似曲線を適用した場合の分布を図-6に示す。

a)の マクロセル腐食解析手順(a)で述べたように、マクロセル腐食解析のための電位分布は、測定点以外における値を多項式の近似曲線で回帰した値を用いている。適用には種々の式を用いたが、4次の多項式の相関性が最も高く、 R^2 で0.99程度の精度が得られた。また、10mm 毎の電位測定も行い近似式から得られた値と比較したが、その適用に殆ど問題は無いと判断

された。

解析で得られた銅板表面の電流分布を図-7に示す。横軸方向を拡大した図では電位とコンクリート抵抗で算出された L1, S1 の塩水添加セル付近における電流が分極抵抗も考慮したものより大きい。しかし、これは分布波形の見かけ上の違いであって、後で述べるアノード電流量に相当する波形の積分値に大きな差は認められなかった。この結果から、電位とコンクリート抵抗で算出された電流量は、分極抵抗も加えた場合と殆ど差はなく、腐食電流あるいはマクロセル腐食量に関して解析上大きな差は生じないものと考えられた。

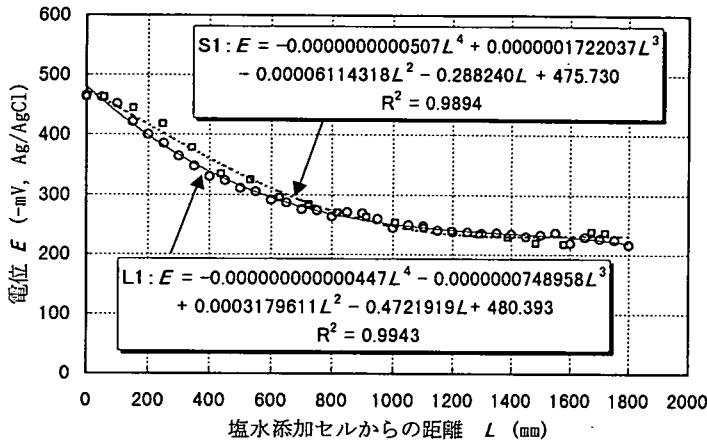


図-6 L1, S1 の電位分布と近似曲線の適用

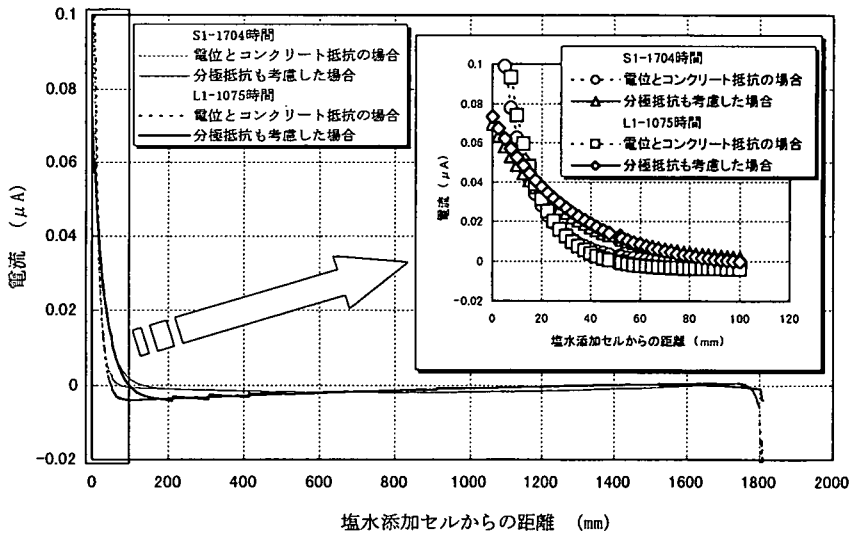


図-7 電位とコンクリート抵抗、あるいは分極抵抗を考慮した場合の電流分布 (銅板近傍鉛直成分)

c) S1のリード線接続状態 (S1-MA) における鋼板間電流の実測と流出入電流の推定

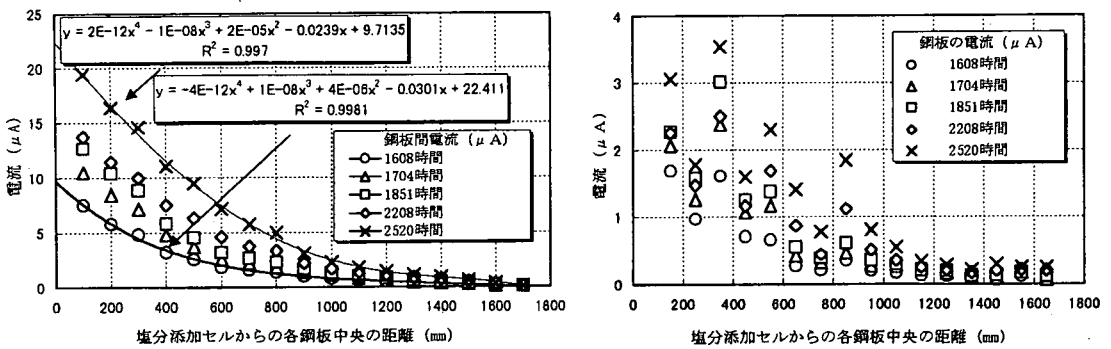
解析値と比較するため、無抵抗電流計により鋼板間電流を測定し、各鋼板電流を求めた。鋼板間電流を図-8の(a)、各鋼板間電流の差から求められた塩水添加セル鋼板を除く各鋼板電流を図-8の(b)に示す。

電流測定は、電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を測定する際に行った。このため、コンクリートは養生時の乾燥状態ではなく、一時的な湿潤状態下にある。

図-8(b)に示される各鋼板電流をマクロセル腐食による電流と仮定すると、アノード・カソード電流として分ける必要がある。そこで、図-7に示された電流分布と算出された各鋼板電流の関係から、図-9の

ような電流の流れによって表すことができるものと考えられる。なお、この図は電流の流れを概略したもので、矢印の方向あるいは始点と終点が全ての電流の方向や大きさとして厳密に表されているものではない。

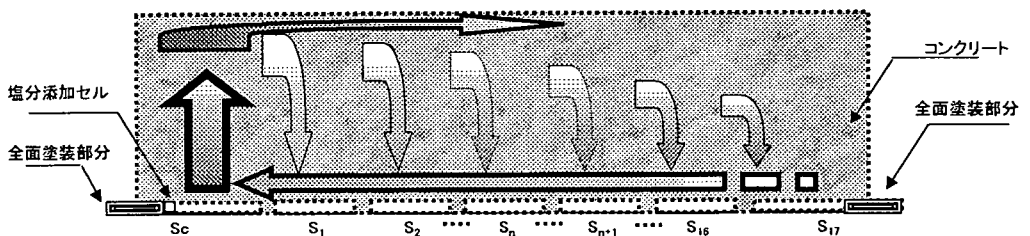
これらの関係をもとに、図-8(b)に示された各鋼板電流 ($C_1 \sim C_{17}$) をカソード電流と見なし、その合計を S_c から流出するアノード電流 (C_c) と見なした場合の電流分布を図-10に示す。ここで、図-10と図-7の電流量に大きな差が認められるが、これは、図-7が2.5mm 間隔の各節点における電流の分布を示しているのに対し、図-10が各鋼板1枚あたりの電流量を示しているためである。既に述べたように、これらの結果は供試体を湿潤状態下で測定し得られたものである。



(a) 無抵抗電流計により測定された鋼板間電流

(b) 鋼板間電流から算出された鋼板電流

図-8 無抵抗電流計により測定された鋼板間電流と算出された鋼板電流 (湿潤状態下)



ここで、矢印は電流の流出入の概略、 S_c :セルのある鋼板、 $S_1 \sim S_{17}$:各鋼板 とすると、
 上図より、 $C_c = (C_{B(C-1)} - C_{B(1-2)}) + (C_{B(1-2)} - C_{B(2-3)}) + \dots + (C_{B(15-16)} - C_{B(16-17)}) + C_{17}$
 $= C_1 + C_2 + \dots + C_n + C_{n+1} + \dots + C_{16} + C_{17} = C_{B(C-1)} - C_{B(16-17)} + C_{17}$ が成立する
 ここで、 C_c :セルのある鋼板の電流、 $C_{B(C-1)}$:セルのある鋼板 S_c と鋼板 S_1 間の電流、
 $C_{B(n-(n+1))}$:n番目とn+1番目の隣合う鋼板間電流、 C_n :n番目の鋼板電流、 $n:1 \sim 16$

図-9 本研究のモデル試験におけるマクロセル電流の流れの概念

一方、測定時以外の供試体は乾燥状態にあるため、乾燥状態で得られる電流を把握することも重要と考えられた。これは、湿潤状態下における測定電流量と乾燥状態下における測定電流量に差が生じるようであれば、解析結果に影響を与える可能性があると考えられたからである。

そこで、湿潤状態下（各測定を行った直後）と乾燥状態下（各測定を行う直前）で測定された電流を比較した。塩水添加後 3192 時間の湿潤状態および乾燥状態における鋼板間電流と鋼板電流の分布を図-11 (a) に、湿潤および乾燥状態下におけるアノード電流の経時変化を図-11 (b) に示す。なお、乾燥状態下における鋼板間電流は 2520 時間以降が実測で、それ以前は湿潤状

態下のみで測定を行ったため、各鋼板間電流において既知の乾燥-湿潤状態下の比を求めて推定している。

図-11(a)における乾燥状態下の鋼板間電流は、湿潤状態下に比較して小さくシフトした分布を示している。図には各鋼板電流も示しているが、塩水添加セルに最も近い鋼板電流は、湿潤状態と乾燥状態における差が他の鋼板電流に比較して少ない。これは、塩水添加セル付近の鋼板が塩水によって常に湿潤状態にあるため、このような結果になったものと考えられる。したがって、図-11(b)に示された各状態におけるアノード電流の差は、塩水添加セル付近以外の電流の差によるものと考えられる。これらの結果をもとに、次項で解析値との比較検討を行った。

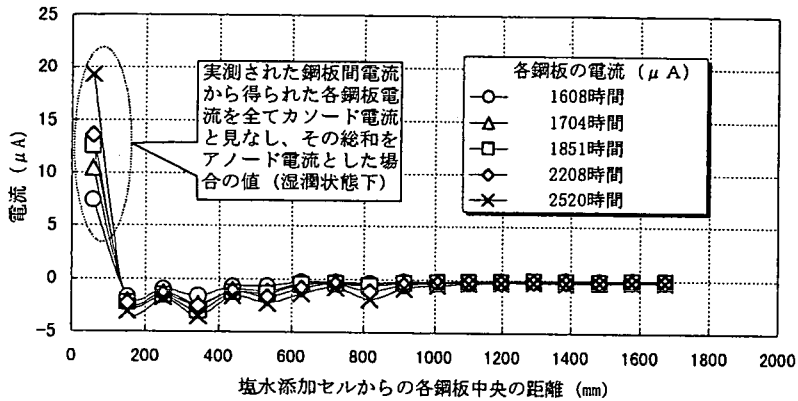
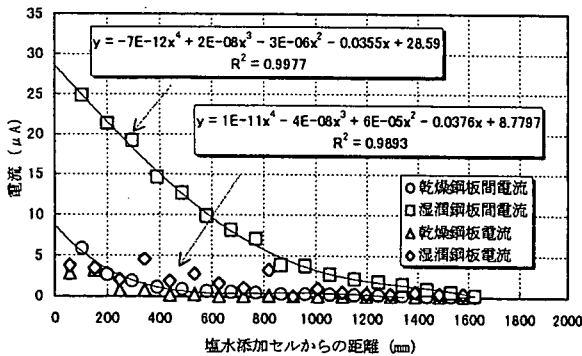
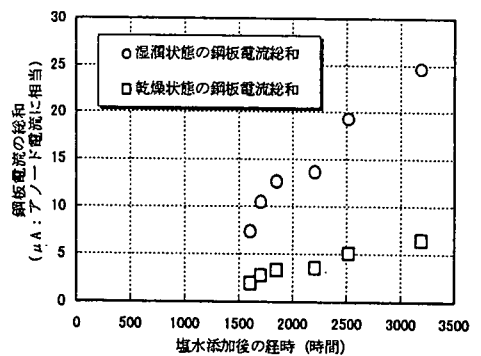


図-10 塩水添加セルのある鋼板をアノード、他の鋼板をカソードとした場合の鋼板電流の分布（湿潤状態下）



(a) 鋼板間電流と鋼板電流分布（塩水添加後 3192 時間の場合）



(b) アノード電流の経時変化

図-11 湿潤状態下と乾燥状態下における電流の関係

d) S1のマクロセル腐食 (S1-MA) に関する実測値と解析値の評価

解析結果による塩水添加セルのある鋼板 (Sc) におけるアノード電流の積分値を表-4に示す。

自然電位とコンクリート抵抗のみ、あるいは自然電位とコンクリート抵抗に分極抵抗を考慮した場合の2通りについて解析を行った。この2通りのそれぞれに、コンクリート抵抗は同一供試体内で均一と仮定し、その最大値、最小値、平均値を用いて電流を算出した。

電位とコンクリート抵抗のみで求めた電流は分極抵抗も考慮した場合より数%増加する程度で、顕著な差は認められなかった。したがって、各場合で求めた電流の分布に差は認められるものの、解析結果には大きく影響を与えないものと考えられる。アノード電流は、コンクリート抵抗の最小値を用いた場合が最も大きく、平均値あるいは最大値を用いるとその値に応じて減少する。解析結果では Sc の長さ 0-105mm を僅かに超えて電流が流出する場合も認められたが、流出電流の殆どは 0-105mm 区間に存在する結果となった。この結果から、電流の流出は塩水添加セルのある鋼板 Sc のみで生じているものと考えられる。

湿潤状態で実測された自然電位、コンクリート抵抗および分極抵抗による解析結果と、鋼板間電流から求められた乾燥状態下のアノード電流の経時変化を図-12に示す。また、図-12の関係をもとに、解析と乾燥状態下のアノード電流の関係を図-13に示す。

図-12 および図-13の乾燥状態下の各鋼板間電流から得られたアノード電流と解析から得られたアノード電流を比較すると、解析値は鋼板間電流から得られた値より低い結果となった。これらの関係は、期間が2500時間まで解析値が実測値の約50~60%であるが、期間がそれ以上になると約20~25%となった。乾燥状態下の鋼板間電流から得られた値がマクロセル腐食電流を表すものと仮定すると、本モデル試験に適用された解析手法は、マクロセル電流を実際より低く見積もる可能性がある。解析値が低くなった原因として、コンクリート抵抗の影響があげられる。今後、コンクリート抵抗の実測値を解析へどのように取り込むかなどの詳細な検討が必要と考えられる。これらの関係を充分に把握することができれば、解析値から得られたマクロセル腐食に関する電流をより正確に推定することが可能になるものと考えられる。

表-4 数値計算結果によるアノード電流量
(Sc 鋼板の 0-105mm 区間で鋼板直上 0-2.5mm を通過する電流の鉛直成分積分値)

塩水添加後の経時(時間)	電位とコンクリート抵抗の場合			分極抵抗も考慮した場合		
	鋼板直上0-2.5mmを通過する電流(μA)	Rc最大	Rc最小	Rc平均	Rc最大	Rc最小
1608	0.3267	1.1189	0.5890	0.3261	1.0731	0.5839
1704	0.4866	1.6764	0.8332	0.4804	1.5899	0.8105
1851	0.4974	1.8982	0.8143	0.4897	1.8524	0.8006
2208	0.4669	1.7667	0.8089	0.4657	1.7495	0.8049
2520	0.5640	2.2234	0.8884	0.5590	2.1940	0.8796
3192	0.3957	2.0584	0.7381	0.3955	2.0507	0.7375

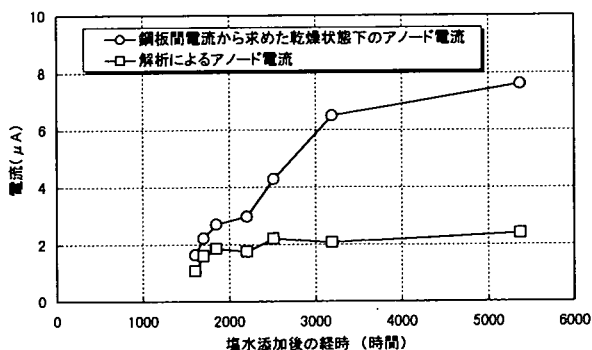


図-12 実測と解析によるアノード電流の経時変化

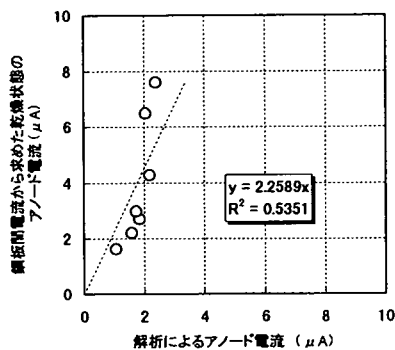


図-13 解析と実測のアノード電流の関係

e) S1 のマイクロセル腐食に関する評価

既に述べたように、腐食はマクロセル腐食とマイクロセル腐食が同時に進行するものと考えられ、ここではマイクロセル腐食について検討を行った。

S1 のリード線を切り離した場合 (S1-mi) と接続時 (S1-MA-mi) における各分極抵抗から求めた腐食電流密度の関係を図-14 に示す。なお、(1)式で使用されている係数 K は既往の報告^{10) 11) 12) 13)}から 0.026V と仮定した。図中の楕円で囲まれた点はアノード部に相当する塩水添加セルのある鋼板の電流密度を示しており、その他はカソード部に相当する鋼板の電流密度を示している。楕円外の関係ほど著しくはないが、楕円内の切り離し時と接続時の電流密度のほとんどは、接続時が切り離し時より大きい。このことから、アノードと考えられる楕円内の接続時における分極抵抗から求められた電流量は、マクロセル腐食とマイクロセル腐食によるものを表していると考えられる。

接続時と切り離し時における電流量の総計の関係を図-15 に示す。接続時の総計は、切り離し時に比較して大きく、約5倍となっている。一般に、連続した鋼材の腐食・非腐食部位あるいはアノード・カソード部の特定を電位測定や分極抵抗測定から明確に区別することが難しい場合、実際にはカソード部であるにもかかわらず、その部分の自然電位や分極抵抗からアノードとして判断される可能性があるものと考えられる。このようなカソード部における分極抵抗から求めた電流が加算される場合には、図-14 に示されたアノード部の電流密度は切り離し時も接続時と大きく変わらないことから、全体の腐食電流密度が大きく見積られるものと考えられる。したがって、マクロセルとマイクロセル混在下の腐食を推定する場合、カソード部の電流を加算しかつ過大に見積もる可能性がある¹⁴⁾。しかし、図-15 に示した関係を把握しているならば、マクロセル状態下においてもマイクロセル腐食の把握は可能と考えられる。

f) 推定腐食量と腐食減量

S1 と L1 について、各条件下で解析された腐食量の累積値から推定される最終的な腐食量の算出過程を表-5 に示す。また、表-5 から得られた結果および腐食量の経時変化と腐食減量の関係を図-16(a) および (b) に示す。なお、目視によって腐食がセル付近と確認されたため、解析結果の採用と腐食減量の測定は、S1, L1 ともセルのある鋼板 (L1 は S1 の鋼板 Sc 部分と同一長さ) の範囲に限定した。また、腐食減量の算出は、2. (4) (a) で述べたように樹脂塗料の減少、付着モルタルの影響などを考慮して行ったが、これらの

影響はほとんどなかった。

既に述べたように、本研究のモデル試験では、S1 の分極抵抗の逆数による腐食量は接続時と一時的な切り離し時で僅かに接続時が大きいものの、大きな差は認められなかった。接続時の分極抵抗から得られる腐食量に対して切り離し時の腐食量は約 90%以上であり、残りの腐食量は数%程度となっている。

図-16(a) および表-5 において、S1 の切り離し時の腐食量をマイクロセル腐食量、また、乾燥状態下の鋼板間電流から得られる腐食量をマクロセル腐食量とすると、その合計は 120.2mg と推定され、腐食減量 123.3mg に近い値となった。一方、図-16(b) および表-5 において、L1 の塩水添加セル付近鋼板に関する分極抵抗の逆数から得られる腐食量の累積は 50.7mg となった。S1 の切り離し時と接続時との関係から 50.2mg をマイクロセル腐食量とし、L1 の解析によるマクロセル腐食量を次に示す比によって、

$$\frac{[S1 \text{ の実測による乾燥状態下のマクロセル腐食量}]}{[S1 \text{ の解析マクロセル腐食量}]}$$

倍したものを L1 のマクロセル腐食量とすると合計は

63.1 mg となり、腐食減量 72.1mg の約 88%となった。

このように、実際より推定値は低いものの、S1 のようなモデル (短い鋼板の接続と一時的な切り離し) を用いることにより、連続した鋼板の腐食についても評価することが可能と考えられる。特に、腐食部位を的確に特定できる場合には、その鋼材に関するマクロセル解析腐食量、および腐食部位付近の分極抵抗から得られるマイクロセル腐食量によって全腐食量の推定が可能と考えられる。

このように、コンクリート構造物の鋼材腐食を検討する場合には、①：自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗などの測定結果からマクロセル腐食による電流分布、アノードとカソード領域の明確な区分、およびマクロセル腐食量の推定を行い、②：①で得られたアノード部の分極抵抗の逆数からマイクロセル腐食量を推定し、③：①と②の関係から、全腐食量を推定することが必要と考えられる。

一方、今回のモデル試験ではマイクロセル腐食の全腐食に占める割合が大きいのが、これは供試体の置かれた環境が室内乾燥の状態であり、マクロセル腐食が大きく進展しない環境であったことによるものと考えられる。今後は、マクロセル腐食解析結果の再現性、分極抵抗の逆数から腐食を求める場合の比例係数 K の決定などに関する検討とともに、主たる腐食がマクロセル腐食の場合も含め、各種塩分環境下におけるこの種の試験に関する詳細な検討が必要である。

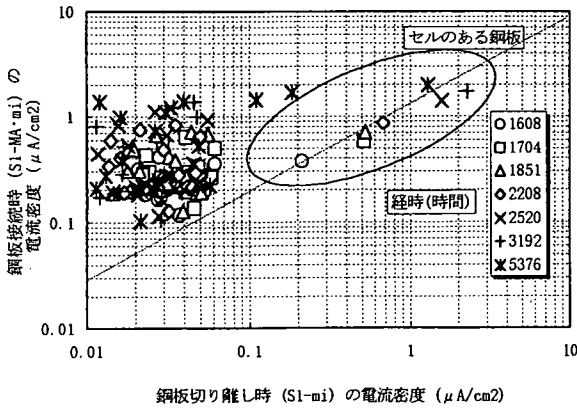


図-14 S1 の分極抵抗から求めた電流密度

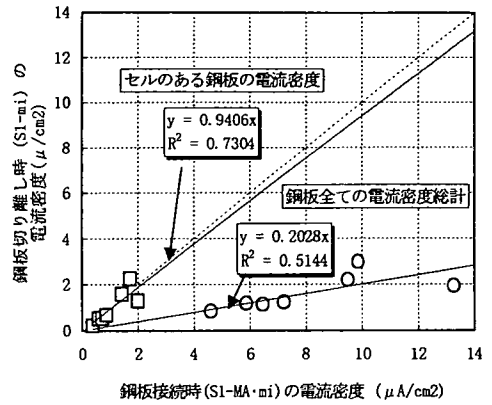


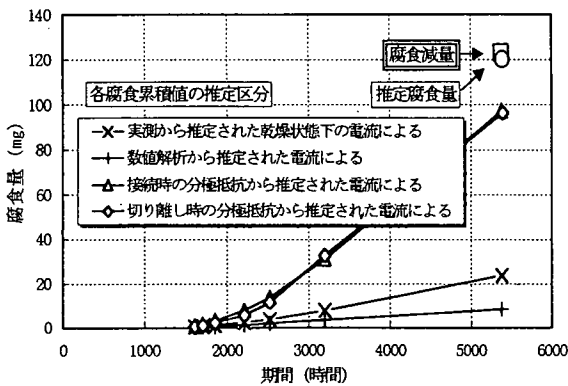
図-15 S1 の分極抵抗から求めた電流密度 (セルのある鋼板と各鋼板の総計)

表-5 腐食減量測定までの累積値による各腐食量の関係と腐食減量との比較

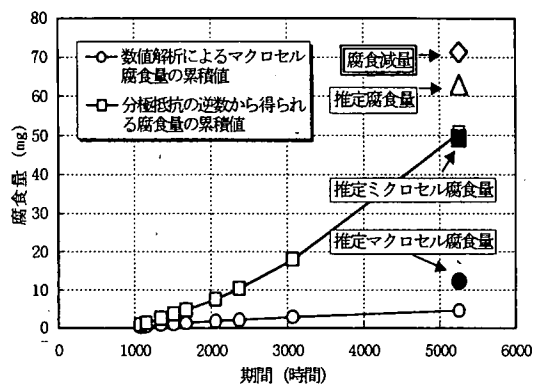
	解・MA	実・乾・MA	*-mi	*-MA-mi	推・総・腐	腐食減量
S1	8.424 ①	23.750 ②	96.453 ③	97.522 ④	②+③より 120.204 ⑤	123.300
L1	4.574 ⑧	⑥と③↓ 12.899 ⑩	⑦と⑨↓ 50.158 ⑪	→→→→ 50.714 ⑨	⑩+⑪より 63.057 ⑫	71.400

(単位: mg)

注) 解・MA: 解析のマクロセル腐食量, 実・乾・MA: 鋼板間電流から得られた乾燥状態下のマクロセル腐食量, S1-mi, S1-MA-mi: S1 の切り離し時, 接続時の分極抵抗から求めた腐食量, 推・総・腐: 推定の総腐食量
*: S1 と L1 の両方があり, L1-mi は L1-MA-mi を S1-MA-mi と S1-mi の関係から推定したもの



(a) S1 の推定腐食量と腐食減量



(b) L1 の推定腐食量と腐食減量

図-16 S1 と L1 の推定腐食量と腐食減量

4. 結論

腐食部位を限定したモデル試験を行い、非破壊手法と数値解析を用いてコンクリート中の鋼材腐食を評価した。その結果、以下のような結論が得られた。

(1) 供試体を一定期間水中環境と乾燥環境下に置き、塩水添加セルに塩水を定期的に添加したが、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗などの非破壊手法により鋼板の腐食時期を特定することができた。

(2) 供試体 L1 および S1 のマクロセル腐食解析において、解析に考慮する要因を自然電位とコンクリート抵抗のみで行った場合と分極抵抗も加えた場合で電流分布に差が生じるものの、アノード電流の総量に大きな差は認められなかった。

(3) 供試体 S1 のリード線を接続した場合において、解析から得られたアノード電流は、鋼板間電流の実測から得られた値と比較すると大きな差が生じる場合もあるが、これらの関係を把握することは可能である。

(4) 供試体 S1 のリード線を接続した場合とリード線を一時的に切り離した場合において、分極抵抗から求められた電流密度は、腐食部位のセル付近で接続時が大きいものの、その差は小さく、他の部分では接続した場合が切り離した場合より大きな値となった。

(5) 本研究におけるモデル試験の場合、マイクロセル腐食の全腐食量に占める割合が大きい結果となった。これは供試体が室内乾燥状態にあり、このような環境条件が影響したものと考えられる。

(6) 供試体 S1 のリード線を一時的に切り離した場合の分極抵抗から得られた腐食量をマイクロセル腐食とし、リード線を接続した場合のマクロセル電流量の解析値と実測値の関係を検討した上で得られた腐食量をマクロセル腐食とすると、総腐食量の推定が可能となり、一般的な場合に相当する L1 についてもマクロ・マイクロ腐食量と総腐食量の推定が可能である。

したがって、鋼材腐食を各部分で測定される分極抵抗のみで把握することは難しいと考えられ、自然電位、分極抵抗とコンクリート抵抗、マクロセル腐食解析によってアノードとカソードを的確に区分した上で、マクロセル・マイクロセル腐食を推定することが必要と考えられる。一方、マクロセル解析の再現性、マイクロセル解析に適用される K 値の設定などが腐食の推定へ影響を与えるため、今後も各種塩分環境下におけるこの種のモデル試験に関する詳細な検討が必要である。

謝辞：本論文の作成にあたり、株式会社四国総合研究所横田優氏に貴重なご助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) コンクリート委員会腐食防食小委員会 (305 委員会) 報告：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、コンクリート技術シリーズ 26、土木学会、1997。
- 2) 宮川豊章：Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985。
- 3) 小山理恵, 矢島哲司, 魚本健人, 星野富夫：自然電位法を用いた鉄筋腐食状態の推定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。
- 4) 長瀬重義, 大即信明, 守分教郎, 宮里心一：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, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.109-119, 1996。
- 5) 横田優, 田村博：鉄筋腐食診断のための電気化学的非破壊検査法, 非破壊検査, 第 47 巻, 第 9 号, pp.649-645, 1998。
- 6) Elsener, B. : Corrosion Rate of Steel in Concrete From Laboratory to Reinforced Structures, *Materials Science Forum*, Vol.247, pp.127-138, 1997。
- 7) 小林孝一, 宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋腐食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。
- 8) 本間利久, 田中康博 訳：有限要素法による電磁界解析, Silvester, P. P. and Ferrari, R. L. 『FINITE ELEMENTS FOR ELECTRICAL ENGINEERS』, サイエンス社, 1988。
- 9) 関博, 宮田克二, 北峯博司, 金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察, 土木学会論文集, No.451/V-17, 1992。
- 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講演論文集, pp. 249-252, 1983。
- 11) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.545-550, 1990。

- 12) Flis, J., Sabol, S., Pickering, H. W., Sehgal, A., Osseo-Asare, K., and Cady, P. D. : Electrochemical Measurements on Concrete Bridges for Evaluation of Reinforcement Corrosion Rates, *Corrosion*, Vol.49, No.7, pp.601-613, 1993.
- 13) Andrade, C., Castelo, V., Alonso, C., and González, J.A. : The determination of the corrosion rate of steel embedded in concrete by the polarization resistance and AC impedance methods, *Proc. of Int. Symp.*, Williamsburg, USA, ASTM STP 906, pp.43-63, 1986.
- 14) Gulikers, J. : Numerical Simulation of Corrosion Rate Determination by Linear Polarization, Measurement and Interpretation of the On-site Corrosion Rate, *Proc. of Int. Workshop MESINA*, Madrid, Spain, RILEM Publications, pp.145-156, 1999.

(2001. 10. 11 受付)

A STUDY OF MACRO-CELL AND MICRO-CELL CORROSION OF STEEL IN CONCRETE

Tatsuo KAWAHIGASHI, Koichi KOBAYASHI and Toyoaki MIYAGAWA

In order to evaluate the corrosion of reinforcing steel in concrete with non-destructive methods is one of indispensable items for maintenance of concrete structures. It is expected that some evaluation methods are established in this subject. Through a model experiment using different sized steel plates, the change in electrochemical response of steel was grasped with non-destructive methods such as half-cell potential, polarization resistance (AC impedance), and electric current. The numerical analysis of macro-cell corrosion and calculation of micro-cell corrosion were performed by applying experiment results. This study showed that it was possible to divide the corrosion into the macro-cell and micro-cell corrosion and was possible to estimate the steel corrosion from these results.