

分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究

小林孝一¹・宮川豊章²

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)

²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)

近年、RC構造物の早期劣化が問題となっている。中でも代表的なものに電気化学反応である鋼材腐食を伴う塩害があげられるが、そのモニタリング手法としては分極抵抗法が有効であると考えられる。しかし、腐食量を正確に推定するのは困難であるのが現状である。

そこで本研究は実構造物への実用性に優れた重畳矩形波法と、より正確な交流インピーダンス法のそれぞれの特徴を把握したうえで、両者を組み合わせることによって、塩害による鋼材の腐食量を定量的に把握することを目的とし、マクロセル腐食の場合のように同一鉄筋内で腐食速度の異なる場合の腐食速度をより高い精度で推定することを可能とした。

Key Words : chloride induced corrosion, polarization resistance, macrocell corrosion, double rectangular pulse method, AC impedance method

1. はじめに

土木構造物はその公共性の高さから極めて重要なインフラストラクチャーであり、我が国においても積極的に整備が行われてきた。

なかでも、鉄筋コンクリート構造物（以下RC構造物）は適切に設計、施工された場合、本来極めて耐久性に富む構造形式であり、多くの土木構造物に用いられてきたが、そのRC構造物も供用開始から時間の経過とともに構造物としての耐荷力およびその他の機能が低下する場合がある。特に、RC構造物はメンテナンスフリーで半永久的な寿命を有すると従来考えられてきたにもかかわらず、近年その早期劣化が問題となっており、また、供用開始後徐々に劣化が進行し、数十年たってから耐荷力、その他の機能の低下が顕在化することもある。

したがって、構造物を耐久性に富むものとするにはもちろん、適切に維持管理を行って長寿命とすることも極めて重要である。

上記のようなRC構造物の劣化の直接的な原因としては様々なものがあげられるが、なかでもコンクリート中の鋼材の腐食は代表的な劣化形態の一つであり、RC構造物の健全性を考えた場合、鋼材の不動態被膜の破壊につながる塩化物イオン、炭酸ガスの進入を防

ぐ密実で耐久性に優れたコンクリートを用いることが必要となる。

一方、腐食ひび割れの発生した段階で鋼材の腐食は目視によっても発見可能となるが、その場合には腐食はすでに進行しており、さらに腐食ひび割れの発生によって腐食が加速されることが多い。また腐食が進行するほど補修による対策も困難となるので、コンクリート構造物に対してモニタリング等を用いた適切な維持管理を行ない、腐食ひび割れによって鋼材の腐食が顕在化する前にそれを把握することが極めて重要である。

現在、コンクリート中の鋼材の腐食を判定するために広く用いられている非破壊調査法に、電気化学的手法がある。鉄筋の腐食反応は本来電気化学的反応であるために、その特性を利用した各種非破壊調査法が開発、実用化されている。なかでも分極抵抗法は、直流法、交流法等についての研究が行われており^{1)~5)}、分極抵抗の経時変化を測定すれば、理論的には腐食反応量を定量的に把握することが可能である。

分極抵抗法は、鋼材の腐食反応にともなう腐食電流量が、その鋼材を分極させた場合の負荷電圧とそれにより生じる電流の変化量の比である分極抵抗に、理論的に比例することを利用するものである。コンクリートの細孔溶液などの水溶液と鋼材の界面にはヘルムホ

表-1 使用材料一覧

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ ，ブレン比表面積：3260cm ² /g
石灰石微粉末	CaCO ₃ 含有率：95%以上，密度：2.73g/cm ³ ，ブレン比表面積：6770cm ² /g
細骨材	川砂，密度：2.57g/cm ³ ，吸水率：1.80%，粗粒率：2.63
粗骨材	碎石，密度：2.64g/cm ³ ，最大寸法：15mm，粗粒率：6.18
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
AE助剤	陰イオン系界面活性剤

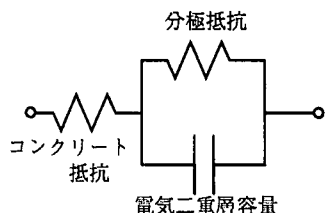


図-1 等価電気回路モデル

ルツ層と拡散二重層からなる電気二重層が存在する。この電気二重層を分極抵抗と電気二重容量と呼ばれるコンデンサの並列接続からなるとみなし、さらにコンクリート抵抗を直列で接続した回路を想定するのが、最も基本的な考え方である(図-1)。したがって、鋼材を単純に分極させるのみでは、コンクリート抵抗、電気二重容量の応答も含む結果しか得られないため、それらの影響を除去し分極抵抗のみの測定を可能にするいくつかの手法が考案されている。

それらのなかで我が国で研究例が比較的多いのは、交流インピーダンス法と2周波数法である。上記回路に極めて大きな周波数を有する電圧、電流を印可した場合には、コンデンサの抵抗に相当するリアクタンスは無視でき、電流はすべて回路のコンクリート抵抗部分とコンデンサを流れるため、応答はコンクリート抵抗のみに対するものと見なすことができる。逆に小さな周波数の電圧、電流を印可した場合には、コンデンサの抵抗は無限大となり、この回路はコンクリート抵抗と分極抵抗の直列回路と見なすことができるため、2つの周波数を与え、低周波の結果から高周波の結果を差し引くことで分極抵抗を得ることができる。これが2周波数法の原理である。

しかし、コンクリート中の鋼材の場合には、拡散抵抗の影響、鉄筋の黒皮の影響も無視できないため、上記のような単純なモデルでは表すことができず、2周波数のみからは正確な分極抵抗を求めることができないため、交流インピーダンス法の適用が有効であると考えられる。交流インピーダンス法は種々の異なる周波数の電圧、電流を印可した場合の応答をコールコールプロット、あるいはボードプロットとして図示し、分極抵抗を求める手法である。

2周波数法の一つであり、2周波数を重ね合わせて用いる重畳矩形波法は、測定が簡便であり実構造物への適用性に優れるという利点を有する。一方、交流インピーダンス法は、より正確な分極抵抗の測定および腐食速度の推定が可能であると考えられるが、測定が煩雑で長時間となる。したがって、分極抵抗の経時変化から鉄筋の腐食量の推定を行なうという観点からすれば、実構造物の維持・管理への適用に対しては今後解決すべき課題も多いものと考えられる。

また、コンクリート中の鋼材の分極抵抗を測定する場合には、分極電流は、任意の形状を有するRC部材表面上に設置された対極と鋼材間をコンクリートを介して流れるため、鋼材の分極挙動は必ずしも一様とはならず、正確に鋼材の腐食量を推定することが可能な段階に至っていないのが現状である。

そこで本研究は、上記の2種類の分極抵抗法について検討を行い、それぞれの特徴を把握したうえで、塩害により劣化したRC部材における鉄筋の腐食量と分極抵抗との関係を明らかにし、分極抵抗法により腐食量を定量的に把握することを目的とするものである。

2. 実験概要

(1) 使用材料と配合

使用材料を表-1に、用いた配合を表-2に示す。ここでは普通コンクリートと2種類の高流動コンクリートを用いた。

ここで高流動コンクリートを用いたのは、その変形、流動性能が優れるために、例えば塩害により劣化した橋梁等において断面修復を行なう際に多くなる逆打ち、または狭窄部に対する打設の場合での適用が極めて有効であると考えられ、今後そのような適用例も増加するものと考えられるためである。

普通コンクリートは塩害を想定し、塩化物イオン(Cl⁻)を練混ぜ時に単位水量の1.5% (2.75kg/m³) 混入したもの(N15)、3.0% (5.5kg/m³) 混入したもの(N30)、全く混入しないもの(NN)の3種類とした。これらの塩分量は、従来複数の研究者によって

表-2 配合一覧

	W/C (%)	W/(C+Lp) (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)					減水剤 (C+Lp)×%	AE助剤 (C+Lp)×%	材齢28日での圧縮強度 (N/mm ²)	
				W	C	Lp	S	G				NaCl
NN	60	60	50.0	183	305	0	867	891	0	0.25*	0.0053	32.4
N15			49.9				863		4.575			30.1
N30			49.7				858		9.150			29.2
SL	60	32.4	50.0	170	283	242	780	800	0	2.1**	0.01	34.9
SH	45	33.1	50.1	174	387	138	783			2.2**	0.01	49.0

*AE減水剤, **高性能AE減水剤

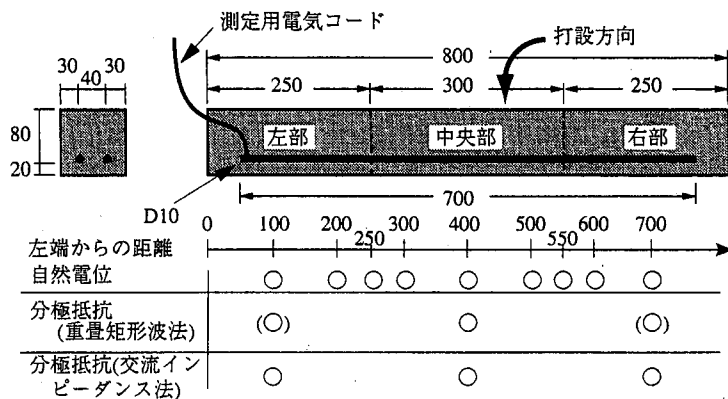


図-2 鉛直打継目供試体 (単位: mm)

報告されている鉄筋発錆に対するコンクリート中の塩分量のしきい値である1.2~2.5kg/m³を若干上回る量と、その2倍の量に相当する^{6),7)}。Cl⁻の混入はNaClで行い、NaClの増量分は単位細骨材量を減じた。ここで単位細骨材量を減じたのは、海砂に対する塩分の付着を想定した場合と実験条件を同一にするためである。なお水に塩分を溶解させた場合、水溶液の体積の増加は、その塩分と同質量の砂の体積より15%程小さいことを実験により確認した。したがって、表-1に示した単位量では配合N15とN30は練上り時に1m³とならない。

高流動コンクリートは石灰石微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートで、普通コンクリートと同一水結合材比 (W/C=60%) で普通強度のもの (SL) と、低水結合材比 (W/C=40%) で比較的高強度のもの (SH) の2種類を用いた。

(2) 供試体

本研究では2種類の供試体を作製した。

鉛直打継目供試体 (図-2) は、桁部材下面のパッチング補修により同一部材内で塩分濃度差が生じマクロセルが形成された場合を想定した100×100×800mmの供試体で、鉛直打継目を有し、測定用コードを接続した長さ700mmの黒皮つきD10鉄筋を2本、鉄筋径の2倍に相当するかぶり20mmで配筋した。測定用コード (14Ω/m vs100V, 長さ500mm) は、鉄筋

の端部をグラインダーで研磨して黒皮を取り除いた部分にハンダ付けした上を自己融着テープとエポキシ樹脂で被い、この部分で水分が鉄筋に達し腐食が生じるのを防いだ。同様に、鉄筋の切断面もすべてエポキシ樹脂で被い、腐食が切断面で生じるのを防いだ。

供試体中央部の長さ300mmの部分には断面補修材に相当する配合NN, SL, SHを打設した。供試体の両端部分それぞれ250mmは既存部として塩分量の異なる普通コンクリート配合NN, N15, N30を打設した。打設方法は、1日目に中央部300mmの打設を行ない、2日目に中央部コンクリートの打継目を霧吹きで湿らせた後、その左と右に各250mm打継ぎ打設を行ない、3日目に脱型した。このようにして作製した供試体の一覧を表-3に示す。

また、打継目からの塩化物イオンの浸透や打継目でのコンクリート抵抗の変化が予想され、結果に影響を与える恐れがある。そこで、打継目を有せず、同一配合で一体打設を行なった供試体 (供試体NN, N15, N30, SLおよびSH) と、中央部と左右両端部で同一の配合のコンクリートを使用するが、他の供試体と同様に2日にわたって打設を行ない打継目を設けた供試体 (供試体NN-NN-NN, N30-N30-N30, SL-SL-SL) も作製し、検討を行なった。

水平打継目供試体 (図-3) は、塩分濃度差によるマクロセル腐食の発生の有無を確認するために作成

表-3 供試体一覧
(鉛直打継目供試体)

	左	中央	右
N15-NN-N15	N15	NN	N15
N15-NN-N30			N30
N30-NN-N30			N30
NN-SL-N15	NN	SL	N15
N15-SL-N15	N15		N30
NN-SL-N30	NN		
N15-SL-N30	N15		
N30-SL-N30	N30		
NN-SH-N15	NN	SH	N15
N15-SH-N15	N15		N30
NN-SH-N30	NN		
N15-SH-N30	N15		
N30-SH-N30	N30		
NN	NN		
NN-NN-NN	NN	NN	NN
N15	N15		
N30	N30		
N30-N30-N30	N30	N30	N30
SL	SL		
SL-SL-SL	SL	SL	SL
SH	SH		

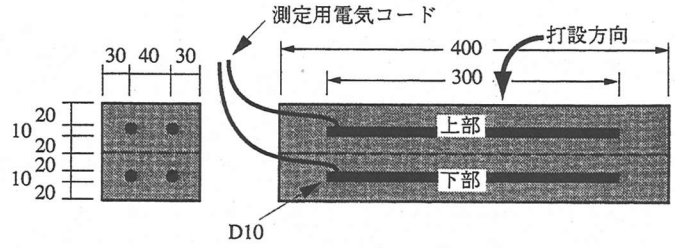


図-3 水平打継目供試体 (単位: mm)

表-4 供試体一覧
(水平打継目供試体)

	上	下
N30-SL	N30	SL
N30-SH		SH
N30-NN		NN
NN	NN	
N30	N30	

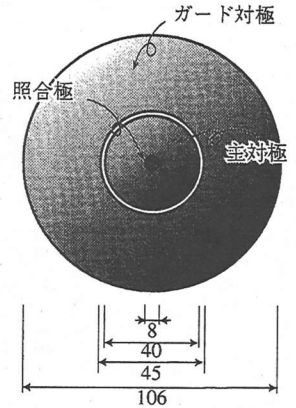


図-4 二重対極 (単位: mm)

した100×100×400mmの供試体で、水平打継目を有し、鉛直打継目供試体と同様に測定用コードを接続した長さ300mmのD10鉄筋を、打設面および底面からのかぶり20mmとしてそれぞれ2本ずつ、計4本配筋した。供試体の下部50mmには断面補修材に相当する配合NN, SL, SHを打設した。また供試体上部50mmには、既存部として塩分を含む配合N30を打設した。打設方法は、1日目に供試体下部を打設し、2日目にあらかじめ打設面を霧吹きで湿らせた後、その上に供試体上部を打継ぎし、3日目に脱型した。

供試体一覧を表-4に示すが、鉛直打継目供試体と同様に、打継ぎを行わずに一体打設した供試体(供試体NN, N30)も作製した。

鉛直打継目供試体、水平打継目供試体とも、脱型後、大気中にある実験室内で、塩分濃度3% (Cl⁻換算)の塩水を一日一回、鉛直打継目供試体と水平打継目供試体、合わせて52体の供試体に合計で約0.012m³散水した。脱型以後も供試体は常に打設面を上にし、木材のスペーサ上に静置したが、供試体底面は常に湿潤状態となった。

なお、表-1に示した各配合のコンクリートの材齢28日での圧縮強度は、これら供試体と同様の脱型、散水を行なったφ100×200mmの供試体から得られたものである。

(3) 測定項目

鉛直打継目供試体は図-2に示したように、100mm間隔および打継目位置での鉄筋の自然電位を測定した。照合電極には飽和塩化銀電極 (Ag/AgCl) を用い、鉄筋のかぶり側のコンクリート表面から測定を行なった。また重畳二重矩形波法 (電圧: ±2~20mVp-p, 周波数: 0.1Hzと800Hz) により鉄筋の分極抵抗、コンクリート抵抗を測定した。ただし分極抵抗測定時には100×800mmの矩形の銅板を湿布を介して供試体のかぶり側表面に密着させ対極とし、照合電極は供試体側面の鉄筋中央部に設置して (図-2参照) 測定を行なった。これら測定は各供試体の第1日目の打設を基準として材齢3日, 5日, 7日, 14日, 以降は1~2週間間隔で行なった。

また材齢160日の時点で、電流分散抑制機能つきの二重対極を用いた交流インピーダンス法 (交流電圧: ±1~10mVp-p, 周波数: 10Hz~10mHz) による分極抵抗も測定した。測定位置は図-2に示したとおりで、主対極とそれを囲むガード対極の二重円盤からなる二重対極 (図-4) を用いてかぶり側から測定を行ない¹⁰⁾、コールコールプロットで描かれる半円の半径から分極抵抗を求めた。ガード対極は主対極と同一の電位となるが、分極抵抗は主対極のみの電流応答から求められる。

このとき同時に重畳矩形波法でも照合電極を通常

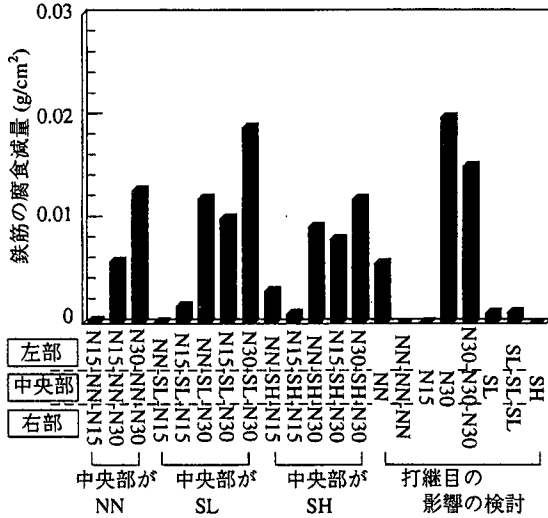


図-5 鉄筋の腐食減量 (鉛直打継目供試体)

の設置位置に加え、供試体左右部 (図-2中の○) の位置) にそれぞれ設置した場合の分極抵抗も測定した。ただしこの場合にも、対極は通常の測定時と同じく100×800mmの矩形銅板を供試体のかぶり側の全表面に密着させたものとした。

水平打継目供試体は、4本の鉄筋に接続されたコードを測定時以外は常時結線して、マクロセル腐食電流が流れるようにした。また供試体下部の鉄筋から供試体上部の鉄筋に流れるマクロセル腐食電流量を、無抵抗電流計で測定した。

さらに、鉛直打継目供試体、水平打継目供試体ともに材齢160日の時点で供試体を解体して鉄筋をはつりだし、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」⁸⁾により、鉄筋の腐食減量を測定した。

3. 鉄筋の腐食状況

鉛直打継目供試体の鉄筋の腐食減量を鉄筋の単位面積あたりに換算したものを図-5に示す。同様に、水平打継目供試体の鉄筋の腐食減量を図-6に示す。さらに、水平打継目供試体で測定したマクロセル電流量からマクロセル腐食量を算出し (図-7)、塩分濃度差によりマクロセル腐食が発生していることを確認した。したがって、同様に塩分濃度差を有する鉛直打継目供試体の場合にもマクロセル腐食が生じていると考えたが、鋼材の腐食状況に関する詳細な考察は、既報⁹⁾を参照されたい。

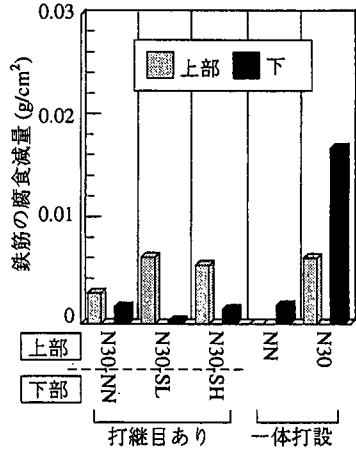


図-6 鉄筋の腐食減量 (水平打継目供試体)

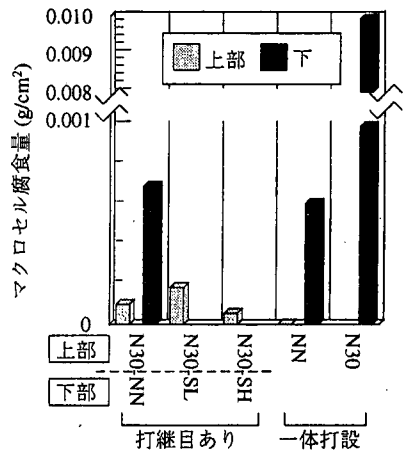


図-7 鉄筋のマクロセル腐食量 (水平打継目供試体)

4. 分極面積の検討

(1) 解析上の仮定

腐食反応時にFeがすべて二価のイオンになると仮定すると、鉄筋の腐食減量と分極抵抗の間には、以下のような関係がある。

$$G = \frac{M}{2F_a} \int I_{corr} dt = K \times \frac{M}{2F_a} \times \int \frac{1}{R_p} dt \quad (1)$$

- G: 腐食減量 (g/cm²)
- M: 鉄の原子量 (=55.8)
- F_a: ファラデー数 (=96500C)
- I_{corr}: 腐食電流密度 (A/cm²)
- R_p: 分極抵抗 (Ω·cm²)
- K: 比例定数 (V)

したがって、単位面積あたりの分極抵抗R_pと比例

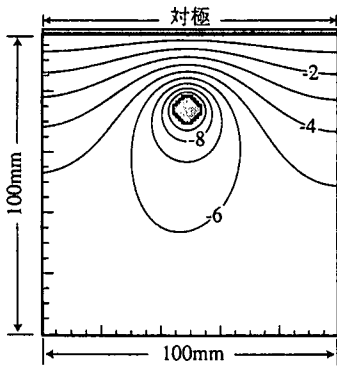


図-8 供試体横断面内の電位分布 (矩形対極) (図中の数字は mV)

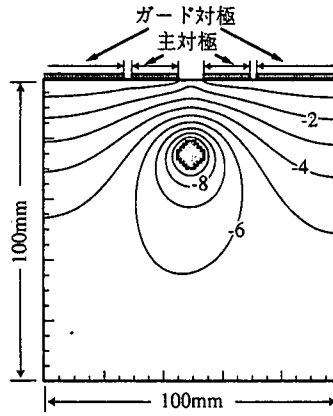


図-9 供試体横断面内の電位分布 (二重対極) (図中の数字は mV)

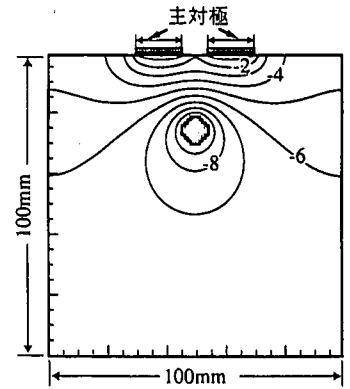


図-10 供試体横断面内の電位分布 (二重対極の主対極のみ) (図中の数字は mV)

定数 K を求めることができれば、腐食減量 G が得られる。ただし、コンクリート中に埋設された鉄筋の分極抵抗 R_p を求める際には、分極電流が鉄筋表面に均一に流入するわけではないため、これを考慮し、適切な分極面積を設定する必要がある。

そこで以下のような条件のもとで、二次元の差分法による解析を行ない、分極抵抗測定時の供試体内の電位・電流分布を検討し、分極面積を求めることとした。

- 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。

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

- ②モデルの寸法は鉛直打継目供試体と同一の100×100×800mmとし、長さ700mmのD10鉄筋は供試体上面からのかぶり20mmで供試体軸方向における中央に1本配置する。
- ③対極はかぶり面全体を覆う場合と、幅40mmと106mmの二重構造で中央に幅8mmの孔を有するものを鉄筋直上に設置した場合の2種類とする。
- ④対極中および鉄筋中は等電位で、両者の電位差は10mVとする。ここでは簡単のため、鉄筋の自然電位を E_0 mV、対極の自然電位も E_0 mVとしたうえで、鉄筋を $(E_0 - 10)$ mVに分極するものとする。
- ⑤供試体端の節点のうち、対極に接しないものの電位は、隣接する供試体内部の節点と同電位とする。
- ⑥コンクリート中を流れる電流は、上下左右の4方向に隣接した節点間をコンクリート抵抗を介して流れ、電流量は隣接する節点間の電位差とコンク

リート抵抗から求める。

- ⑦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。

ここでは供試体モデルに対して、横断面および縦断面のそれぞれに対して二次元解析を行ったが、100×100mmの横断面の場合には、コンクリートおよび鉄筋を示す節点間の距離は1×1mmとした。

また分極抵抗測定時に得られた鉛直打継目供試体の鉄筋-矩形対極間のコンクリート抵抗の実測値は、配合によっても異なるが材齢160日の時点ではほとんどが20~60 Ω の範囲にあった。

そこで簡単のために、幅100mm、高さ20mmのコンクリート平面の上に幅100mmの対極が、下に幅100mmの鋼材が接していると見做し、コンクリート平面は格子状に連結された抵抗から構成されるとした。その上で上記の実測値から対極と鋼材間のコンクリート抵抗を40 Ω として、コンクリート節点間の抵抗を $R=200\Omega (=40\Omega \times (\text{供試体幅}100\text{mm} / \text{節点間距離}1\text{mm}) \div (\text{かぶり}20\text{mm} / \text{節点間距離}1\text{mm}))$ と仮定した。

100×800mmの縦断面に対しても、前出の①~⑦と同様の解析条件を用いたが、コンクリート、鉄筋を示す節点間の距離は2.5×2.5mmとした。

また、先程の横断面の場合と同様に、簡単のために、幅800mm、高さ20mmのコンクリート平面の上に幅700mmの対極が、下に幅700mmの鋼材が接していると見做し、コンクリート平面は格子状に連結された抵抗から構成されるとした。その上で対極と鋼材間のコンクリート抵抗を40 Ω として、コンクリート節点間の抵抗を $R=1400\Omega (=40\Omega \times (\text{鉄筋長}700\text{mm} / \text{節点間距離}2.5\text{mm}) \div (\text{かぶり}20\text{mm} / \text{節点間距離}2.5\text{mm}))$ と仮定した。

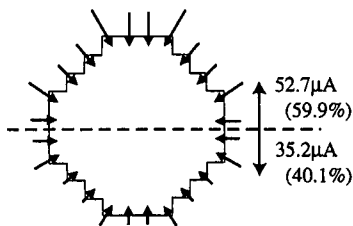


図-11 鉄筋への流入電流量 (矩形対極)

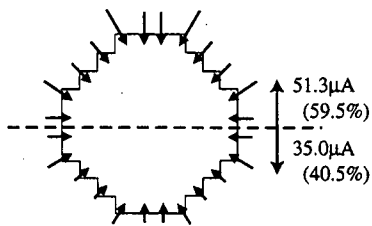


図-12 鉄筋への流入電流量 (二重対極)

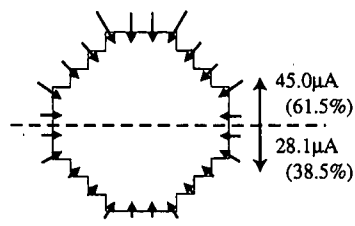


図-13 鉄筋への流入電流量 (二重対極の主対極のみ)

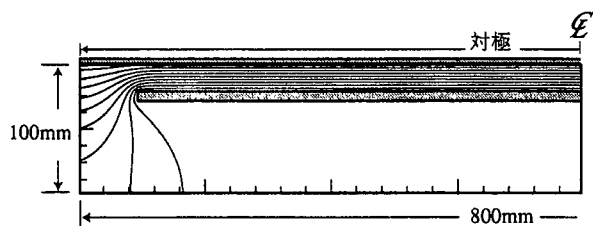


図-14 供試体縦断面内の電位分布 (矩形対極)

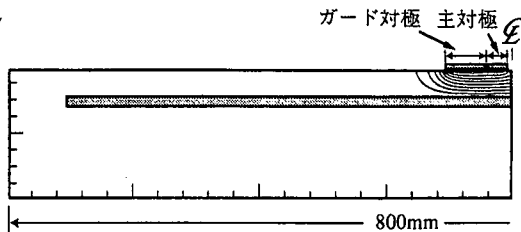


図-15 供試体縦断面内の電位分布 (二重対極)

2.5mm)) と仮定した。

(2) 横断面の検討

まず、100×100mmの横断面における電位分布の二次元解析結果を図-8, 9, 10に示す。

ここで図-8は重畳矩形波法で用いた100×800mmの矩形対極を用いた場合の結果に相当し、図-9は交流インピーダンス法で用いた二重対極(図-4参照)を用いた場合に相当する。さらに、図-10は、本研究では実際には測定を行っていないが、二重対極のガード対極を用いず中央の主対極のみを使用した場合に相当する。

またそれらの場合の鉄筋への電流の流入量を図-11, 12, 13に示す。ここでは矢印の大きさと向きが電流の大きさと向きを示している。

コンクリート中の電位分布は、矩形対極および二重対極を用いた場合にはほとんど同様である(図-8, 9参照)。また、鉄筋への電流の流入分布は、3種類のいずれの対極を用いた場合にも相違はそれほどなく、鉄筋のかぶり側だけでなく供試体内部側表面にも電流が流入しており、その割合はいずれの対極を用いても40%程度にもなる(図-11, 12, 13参照)。

しかし二重対極を用いた場合、鉄筋直上の主対極から流出する電流量を算出した結果、対極全体から流出する電流量の59.6%となった。したがって、二重対極の場合には主対極から流出する電流量と鋼材のかぶり側の表面に流入する電流量(59.5%)がほぼ一致するため(図-12参照)、鋼材のかぶり側表面に流入する電流は直上の主対極から流出したものに一致

すると見做し、単位面積あたりの分極抵抗 R_p を求めるには、鉄筋の周長の半分の値を用いることとした。

一方、本研究において重畳矩形波法で用いた矩形対極のように、かぶり面を一様に覆う対極の場合には、鉄筋の裏面に流入する電流量が無視できない大きさであるため、単位面積あたりの分極抵抗 R_p を求めるには、鉄筋の周長を用いることとした。

また、二重対極の主対極のみを対極として用いた場合には、対極面積は他の2つと比較して小さいにも関わらず、鉄筋の供試体内部側表面に流入する電流量は全体の38.5%であり、矩形対極を用いた場合とほぼ同程度となっている。したがって、ガード対極を用いることによって主対極から流出する電流の分散が抑制されることが確認できた。

(3) 縦断面の検討

対極として長さ800mmの対極を用いた場合の供試体内の電位分布の解析結果を図-14に、交流インピーダンス法で用いた二重対極を用いた場合の結果を図-15に示す。

横断面の場合と異なり、二重対極に対して解析対象となる供試体モデルの寸法が大きいため、コンクリート内の電位分布は対極の種類により大きく異なる結果となった。

二重対極を用いた場合の対極近傍の電流の大きさと方向を図-16に示す。ガード対極からの電流は対極から左右方向へ分散する傾向にあるのに対し、対極中央の孔も含む主対極直下部分においては、電流は分散することなく、ほぼ鉄筋に垂直に流入してい

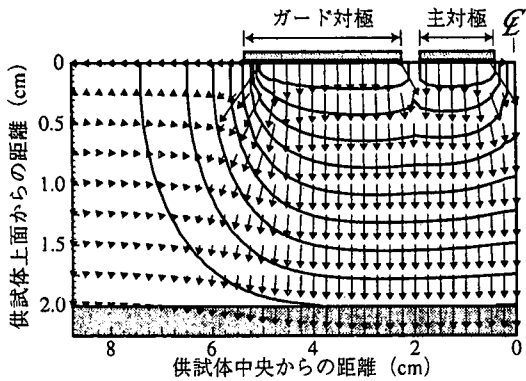


図-16 供試体縦断面内の電位分布と電流流線 (二重対極)

る。

それぞれの対極を用いた場合にかぶり側の各鉄筋節点に流入する電流量を図-17に示すが、二重対極の場合には、対極中央の孔も含む主対極直下部分の鉄筋に流入する電流量は、鉄筋全体に流入する電流量の31.7%であった。それに対し、主対極から流出する電流量は、対極全体から流出する電流量の33.3%となり、主対極直下の鉄筋に流入する電流量の割合にはほぼ一致する。したがって、横断面での解析結果とあわせて考えると、二重対極を用いた場合には、対極中央の孔も含む主対極直下の鉄筋の表面積の半分を分極面積と考えればよいことになる。

二重対極は円形であるため、ここでの解析結果は実際とはやや異なる可能性もあるが、鉄筋としてD10を用いた本研究の場合には、分極面積は 6cm^2 (=主対極の直径 $4\text{cm} \times \text{D10}$ の公称周長 $3.0\text{cm}/2$)となる。

一方、 $100 \times 800\text{mm}$ の対極を用いた場合には、縦断面の解析においては、図-17に示したように、鉄筋の端部を除き、電流は鋼材かぶり面にほぼ均等に流入し、また二次元解析であるためもあり鋼材裏面から流入する電流の割合は数%であった。

しかし、横断面の解析からはかなりの割合の電流が鉄筋の裏面からも流入しており、これを考慮する必要があるため、この対極を用いた場合の鉛直打継目供試体における分極面積は、 210cm^2 (=鉄筋の長さ $70\text{cm} \times \text{D10}$ の公称周長 3.0cm)とすることとした。

5. 2種類の対極、分極抵抗法による測定値の比較

(1) 2手法による腐食速度の推定

前章で分極面積が明らかとなったため、その結果を用いて、 $100 \times 800\text{mm}$ の矩形対極を用いた重畳矩形波法、および二重対極を用いた交流インピーダンス

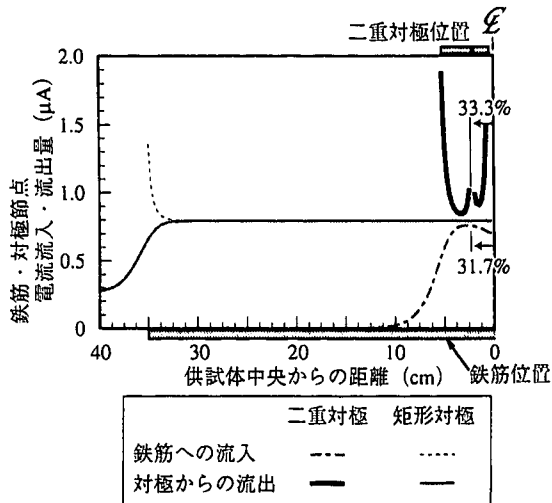


図-17 各鉄筋節点への電流流入量

法のそれぞれの測定値から、分極抵抗および腐食速度指標を求めた。

ここでは分極抵抗 R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)と腐食減量、あるいは腐食速度に対応する腐食電流密度が式(1)の関係にあることから、 R_p の逆数を腐食速度指標と定義した。この腐食速度指標を時間積分し、 $M/2F_a$ および比例定数 K を乗ずれば腐食減量が得られることになる。

また、交流インピーダンス法においては、分極抵抗が極めて大きい場合にはコールコールプロットの軌跡が直線状となり、分極抵抗を求めるのが困難であるため、腐食速度指標 $1/R_p \leq 0.01(1/\text{k}\Omega/\text{cm}^2)$ の場合には、すべて $1/R_p = 0.01(1/\text{k}\Omega/\text{cm}^2)$ とした。この範囲の値を示す鉄筋はほとんど腐食が生じていないため、このように見做しても問題はないものと考えられる。

材齢160日の時点で重畳矩形波法と交流インピーダンス法によって求められた鉛直打継目供試体における腐食速度指標の関係を図-18に示すが、両手法から求めた腐食速度指標が大きく相違するという結果が得られた。

これは、前章の検討では鉄筋の分極抵抗を無視しているのに対し、実際の供試体内では塩分量の不揃いによって場所により分極抵抗が異なるため、小さな面積のみを分極させることが可能な二重対極を用いた場合と、鉄筋全体を同時に分極させる場合では異なる結果が得られているためであると考えられる。

そこで、前節での検討をさらに進め、分極抵抗の影響を考慮して、供試体内のより正確な電位・電流分布を算出することとした。

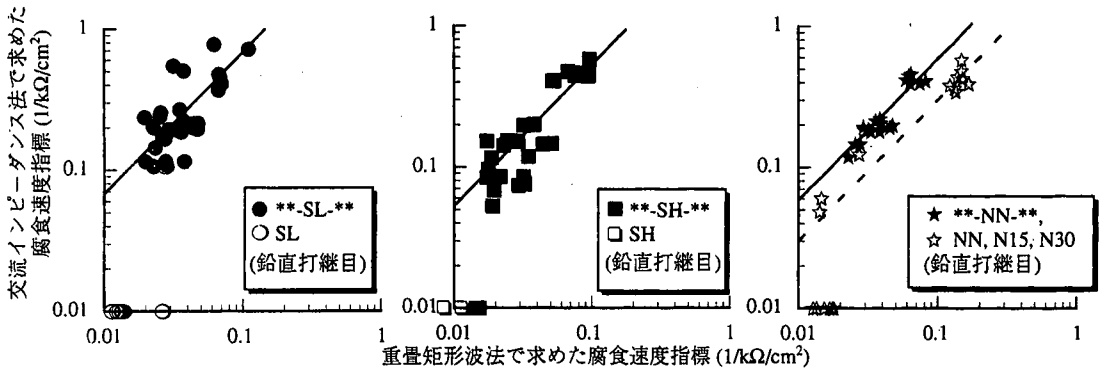


図-18 二つの分極抵抗法による腐食速度指標の関係 (鉛直打継目供試体)

表-5 解析で用いた節点間の抵抗および節点の自然電位

	N30-NN-N30		N30-SH-N30	
	左右部	中央部	左右部	中央部
コンクリート抵抗 (Ω)	$1400=R_1$	R_1	R_1	$1.5R_1$
分極抵抗 (Ω)	$4R_1$	$10R_1$	$4R_1$	$13R_1$
自然電位 (mV)	-420	-350	-420	-350

(2) 分極抵抗を考慮したモデルの設定

条件は前章で行なった電位・電流解析の場合の①～⑦と同様であるが、さらに、

- ⑧供試体の左右端から250mmの部分は塩分を混入し、中央300mmは塩分を混入しない健全部とする。

として、鉄筋中に腐食部と健全部が混在する供試体N30-SH-N30の場合の分極抵抗測定時における縦断面中の電位・電流分布を検討することとした。

ここでは、コンクリートおよび鉄筋を示す節点間距離を $2.5 \times 2.5\text{mm}$ としたが、塩分を含むN30を用いた左右部のコンクリート節点間の抵抗は、鉛直打継目供試体NBで重畳二重矩形波法による分極抵抗測定時に得られた矩形対極-鉄筋間のコンクリート抵抗の実測値が 40Ω であったため、前節と同様に $R_1=1400\Omega$ ($=40\Omega \times (\text{鉄筋長}700\text{mm} / 2.5\text{mm}) \div (\text{かぶり}20\text{mm} / 2.5\text{mm})$)と仮定した。同様に中央部においては鉛直打継目供試体SHで得られた実測値 (60Ω)を用いて、コンクリート節点間の抵抗 $R_2=1.5R_1$ と仮定した。

さらに鉄筋とコンクリートの界面に分極抵抗節点を設け、隣接するコンクリート節点との間の抵抗を分極抵抗とした。分極抵抗の値は、交流インピーダンス法と二重対極を用いて測定した鉛直打継目供試体N30-SH-N30の右部、左部において分極抵抗が約

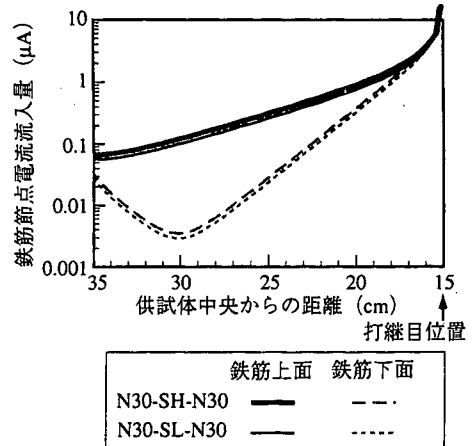


図-19 供試体N30-SH-N30におけるマクロセル腐食電流量の解析結果

$2000 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ であったことから、塩分を含む部分においては $R_{p1}=5333\Omega$ ($=2000\Omega \cdot \text{cm}^2 \times (1\text{cm} / 2.5\text{mm}) / 1.5\text{cm}$ ($=D10$ の周長の半分)) $\approx 4R_1$ とした。中央部においては、同様に鉛直打継目供試体N30-SH-N30の中央部において測定された分極抵抗 ($7000\Omega \cdot \text{cm}^2$)を用いて $R_{p2} \approx 13R_1$ とした。

(3) モデルの検証

まず、ここで用いたモデルの妥当性を検証するために、このモデルを用いてマクロセル腐食量の検討を行うこととした。

マクロセル腐食解析の対象としたのは鉛直打継目供試体N30-NN-N30およびN30-SH-N30であり、供試体N30-SH-N30における節点間のコンクリート抵抗および分極抵抗の値は表-5に示すとおりである。また、鉄筋の自然電位は左右部では -420mV 、中央部では -350mV で一様であるとした(表-5)。これらの値はそれぞれ実験により得られた材齢160日の時点での実測値を用いている。供試体N30-NN-N30の場合も同様に実測値から表-5の値を求めた。その他、供試体

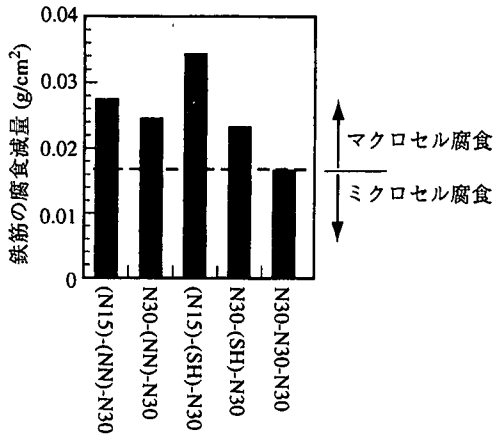


図-20 鉛直打継目供試体のマクロセル腐食

の寸法、境界条件等は対極を用いないこと以外は前述の条件①～⑧と同一であり、節点間距離も2.5×2.5mmとしたうえで、分極抵抗節点も用いた。

腐食部（供試体左部）の鉄筋節点に流入する腐食電流量の分布を図-19に示す。鉄筋のかぶり側（図中の鉄筋上面）と供試体内部側（図中の鉄筋下面）で電流量の分布形状は若干異なるものの、いずれの面においても腐食電流は打継目に近い部分に集中して流入している。これら電流量の合計から、式（1）を用いて供試体左部におけるマクロセル腐食減量を求めると供試体N30-SH-N30で8.30mg/cm²、N30-NN-N30で5.70mg/cm²となった。

一方、実際のマクロセル腐食量を求める。図-5に示した腐食減量の実測値から、供試体N15, SL, SHの腐食減量は極めて小さく、これらと同一の配合N15, SL, SHを配合N30と打継いだ供試体の場合には、腐食が生じているのはほとんどN30を用いた部分であると考え⁹⁾、これら供試体の腐食減量をN30を用いた部分の鉄筋の表面積あたりに換算したものを図-20に示す。

ここで、図-5に示した全腐食量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とする、塩分濃度が供試体内で一定でマクロセル腐食が生じておらずマイクロセル腐食のみが生じていると考えられる供試体N30-N30-N30の腐食減量を上回った分はマクロセル腐食に起因するものと考えられ¹²⁾、供試体N30-SH-N30の場合には6.58mg/cm²、N30-NN-N30の場合には7.87mg/cm²であった。

実験値と解析結果の誤差がやや大きい、実際には打設直後から材齢160日までの間に、セメントの水和、鉄筋の腐食の進行にともなってコンクリート抵抗、鉄筋の自然電位、分極抵抗は変化し、また供試体中央部あるいは左右部におけるこれらの値も同一

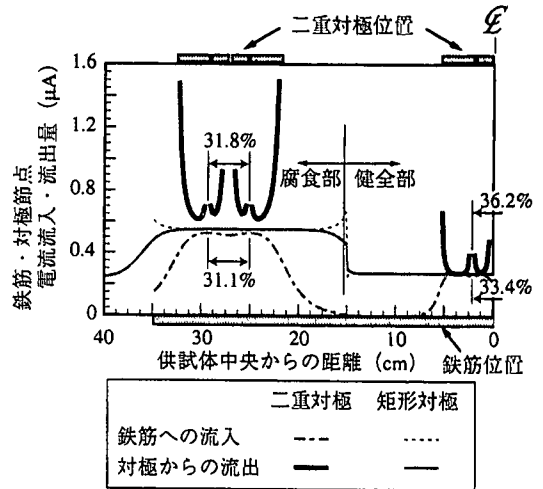


図-21 鉄筋・対極節点の電流入入・流出量（鉄筋の分極抵抗考慮）

ではないのに対し、ここではこれらを不変、均一と仮定して検討しているためであると考えられる。

また、次節で述べるように、二重対極を用いた場合には、分極抵抗を過小に見積もっている可能性もある。

本来は上記のような事項を考慮する必要はあるものの、実験値と解析値はそれほどかけ離れた値でないことから、ここで仮定したRC部材のモデルはほぼ適切であると思われ、このモデルを用いて分極抵抗測定時の供試体縦断面中の電位・電流分布を検討することとした。

(4) 分極抵抗を考慮した場合の鉄筋の分極挙動

実際の供試体においては、同一の鉄筋上でもその自然電位は腐食部と健全部において異なった値を示すが、ここでは鉄筋を外部電圧によって強制的に分極させる場合には同一鉄筋内の電位分極は等しくなると考えて、鉄筋は一様に($E_0 - 10$)mVに分極されたとした。その他、コンクリート抵抗および分極抵抗は表-5の値を用いた。

ここでは供試体N30-SH-N30において、供試体かぶり面を一様に覆う矩形対極、および二重対極を用いた場合の、各鉄筋節点へのコンクリート節点からの電流の流入量および各対極節点からのコンクリート節点への電流の流出量の解析を行なった。二重対極に関しては供試体中央に設置した場合と左部中央に設置した場合の2ケースについて解析を行っており、矩形対極を用いた場合とあわせて計3ケースの解析結果を図-21に重ねて示す。

矩形対極を用いた場合には、コンクリート抵抗および分極抵抗の大きな健全部における鉄筋への電流

流入量が腐食部におけるものよりも小さい。

また、分極抵抗を考慮しない場合(図-17参照)と比較すると、腐食部のコンクリート抵抗は同一の値を用いているにもかかわらず、いずれの対極を用いても鉄筋への電流流入量は小さくなり、分極抵抗を考慮しない図-17の場合とコンクリート抵抗が同一の腐食部においても、6~7割程度の値となっている。これはコンクリート抵抗よりも大きな分極抵抗の影響が加味されたためであると考えられる。さらに分極抵抗の影響はその値が大きい健全部でより顕著であると考えられ、前節で行なったようなマクロセル腐食解析を行う場合には、分極抵抗を考慮した方が、より正確な解析が可能になるものと考えられる。

矩形対極を用いた場合、各鉄筋節点に流入する電流量の合計は68.6 μ Aであるため、供試体全体をコンクリート抵抗 R' と分極抵抗 R_p が直列に接続された回路と考えると、オームの法則より $R_p' = V/I - R' = 10$ (mV)/68.6(μ A) - 40 Ω (or 60 Ω) = 106 Ω (or 86 Ω)となる。よって分極抵抗 $R_p = 106\Omega$ (or 86 Ω) \times (鉄筋のかぶり側表面積52.5cm²) \div 5600 $\Omega \cdot$ cm²(or 4500 $\Omega \cdot$ cm²)となり、ここで仮定した健全部の分極抵抗7000 $\Omega \cdot$ cm²より小さく、腐食部の分極抵抗2000 $\Omega \cdot$ cm²の2.5~2.8倍の値となった。

したがって分極範囲のあいまいな対極を用いた場合には、腐食部と健全部が混在する鉄筋の“見掛けの”分極抵抗は、両部分の影響を受けるため、マクロセル腐食が生じている場合におけるこのような対極の使用は適していないと考えられる。

ただし、ここでの解析においては分極中の鉄筋の電位分極は一様であると仮定したが、実際に分極挙動は不明である。本研究における矩形波法による分極抵抗の実測値は、腐食部の鉄筋直上と健全部の鉄筋直上に照合極を置いた場合には異なる測定結果となっている。さらにマクロセル腐食におけるカソード部分においては腐食が生じていないにもかかわらず分極抵抗が小さくなるとの報告もあり¹⁰⁾、コンクリート中の鉄筋の分極挙動について今後さらに検討を行う必要があるものと考えられる。

一方、二重対極を供試体中央に設置した場合には、中心の主対極部分から流出する電流量は対極全体から流出する電流量の31.8%であったのに対し、対極中央の孔も含む主対極直下部分の鉄筋に流入する電流量は鉄筋全体に流入する電流量の31.1%となった。同様に、二重対極を供試体左部に設置した場合には、中心の主対極部分から流出する電流量は対極全体から流出する電流量の36.2%であったのに対し、対極中央の孔も含む主対極直下部分の鉄筋に流入す

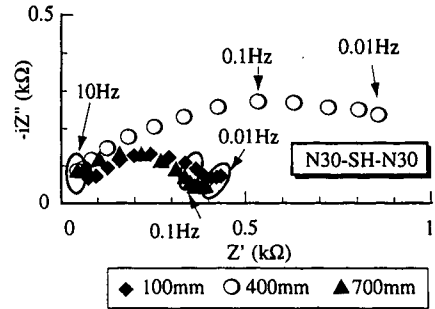


図-22 実測したコールコールプロットの例

る電流量は鉄筋全体に流入する電流量の33.4%となった。特に供試体中央に二重対極を設置した場合には、電流が分散する傾向にあるが、おおよそ主対極から流出する電流は鉄筋の主対極直下部分に流入するものと考えられる。

さらに、本研究で交流インピーダンス法を用いて実際に測定したコールコールプロットの例を図-22に示すが、この図からも明らかのように、2周波数(本研究においては0.1Hzと800Hz)のみから分極抵抗を判定する重畳波法の場合には、正確な分極抵抗を測定しているとは言い難い。特に分極抵抗が大きい場合にこの傾向は顕著で、図-18において、横軸上に測定点が存在するのはこのためである。

したがって、正確な分極抵抗を測定するためには、二重対極を用いて交流インピーダンス法にて測定を行なう必要があるということになる。

6. K値の検討

4章に示したように、分極抵抗から腐食減量を求めるためには、比例定数 K が既知である必要がある。そこで本章では、この K 値を求めることを目的とする。

前節では供試体内のマクロセル腐食量の算出を極めて単純化したモデルによって試みたが、実際には供試体内ではマイクロセル腐食も併発しており、測定されたアノード部の分極抵抗はマクロセル腐食回路におけるアノード反応およびマイクロセル腐食の両者に対応するものと考えられる¹⁰⁾。本研究において矩形対極を用いた場合には、さらにマクロセル腐食におけるカソード反応の影響も含めた測定値が得られているものと考えられる。

しかし分極抵抗の測定値のみからこれらの影響の寄与分を正確に分離し、マイクロセル腐食減量とマクロセル腐食減量を別個に求めるのは現段階では困難であり、マクロセル回路が形成された場合の分極抵抗が有する物理的、電気化学的意味については、今

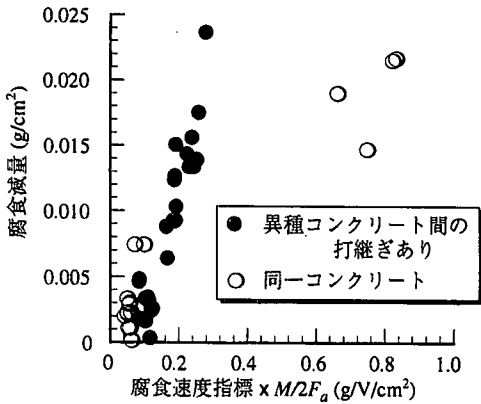


図-23 腐食減量の測定値と重畳矩形波法から求めた腐食速度指標との関係 (鉛直打継目供試体)

後さらに詳細に検討する必要があるものと考えられる。また二重対極を用いた交流インピーダンス法による分極抵抗の測定点数を大幅に増加し、その結果から腐食減量を推定するのも、通常想定される維持管理の範疇を逸脱し現実的ではないと考えられる。

そこで、矩形対極を用いた供試体全体の分極抵抗から全体の腐食量を求めることを考える。

まず、重畳二重矩形波法と矩形対極により測定した鉛直打継目供試体の分極抵抗から求めた腐食速度指標を材齢160日まで時間積分し $M/2F_a$ を乗じた値と、材齢160日の時点での鉄筋の単位面積あたりの腐食減量の関係を図-23に示す。なおここで用いた腐食減量は、マクロセル腐食およびミクロセル腐食の両者からなる図-5に示した全腐食減量を、鉄筋の表面積 210cm^2 で除した値である。

両者の関係から得られる傾きは式(1)より K 値に相当する。しかし、ここで得られた関係は非常にばらつきが大きく、特に異種コンクリートの打継ぎを行なった供試体と同一コンクリートを用いた供試体では異なった傾向を示し、異種コンクリートの打継ぎを行なった供試体の場合には $K=0.0566(\text{V})$ 、同一コンクリートを用いた供試体の場合には $K=0.0252(\text{V})$ となった。これは前節で検討したように、重畳矩形波法では供試体のかぶり面全体を覆う対極を用いたために、特に異種コンクリートを打継いだ場合には分極面積があいまいで、正確な分極抵抗を算出できなかったためであると考えられる。

そこで図-18に示した材齢160日の時点での鉛直打継目供試体のデータのうち、腐食量の大きい配合N30を用いた部分において、重畳二重矩形波法と交流インピーダンス法からそれぞれ得られた腐食速度指標の比を求め、表-6に示す。

塩分が供試体内に均一に分布しており、鋼材の分極抵抗が軸方向でほぼ一定であると考えられる供試

表-6 鉛直打継目供試体における腐食速度指標の比 (交流インピーダンス法/重畳矩形波法、括弧内はN30, N30-N30-N30を1とした場合)

供試体	比
**SL-N30	6.47 (2.15)
**SH-N30	5.31 (1.76)
**NN-N30	5.75 (1.91)
N30, N30-N30-N30	3.01 (1.00)

**=NN, N15, N30

体NN, N15, N30においても、交流インピーダンス法を用いた腐食速度指標は重畳二重矩形波法を用いたものの3倍程度という結果となった。

コンクリートのフレッシュ時にブリーディングによって鉄筋下面に水膜が形成されるため、鉄筋の腐食はその下面側に生じやすく、また本実験においては供試体下面は湿润状態となったため、供試体上面側がカソード、下面側がアノードとなる環境に置かれていたと考えられる。一方、本研究では分極抵抗はすべて鉄筋の下面側から測定を行っている。したがって、主対極による分極範囲が鉄筋のかぶり側半面に限定される二重対極を用いた場合には、測定によって得られた腐食速度指標は鉄筋全周の腐食反応量の平均よりも大きくなり、交流インピーダンス法による腐食速度指標が大きくなったものと考えられる。そのため、場合によっては分極電流を鉄筋表面に回り込ませるような対極を用いて測定を行なった方が、正確な腐食量の推定が可能となることも予想される。

さらに両手法において分極抵抗測定時の使用周波数が異なることも結果に影響を与えているものと考えられる。

ここでは上記のような理由から、鉄筋の周方向の腐食速度の分布は均等でなく、また、二重対極を用いた場合にはいずれの供試体においても腐食速度を同程度過大に見積もると考え、表-6に示した値を供試体NN, N15, N30から得られた比3.01で除することによって正規化した(表-6の括弧内)。

前節で解析により検討した場合には、マクロセル腐食による分極抵抗の不均一により、供試体全体を一樣に覆う矩形対極を用いて測定する供試体全体の分極抵抗は、腐食部単独のもの2.5~2.8倍であるという結果が得られた。それに対し、ここで得られた両手法による測定値から算出した腐食速度指標の比を正規化した値は、異種配合を打継いだ供試体で2倍程度となっている。したがって、前述した両手法による適用周波数の相違の他に、マクロセルの形成による供試体内での分極抵抗の不均一が、二つの分極

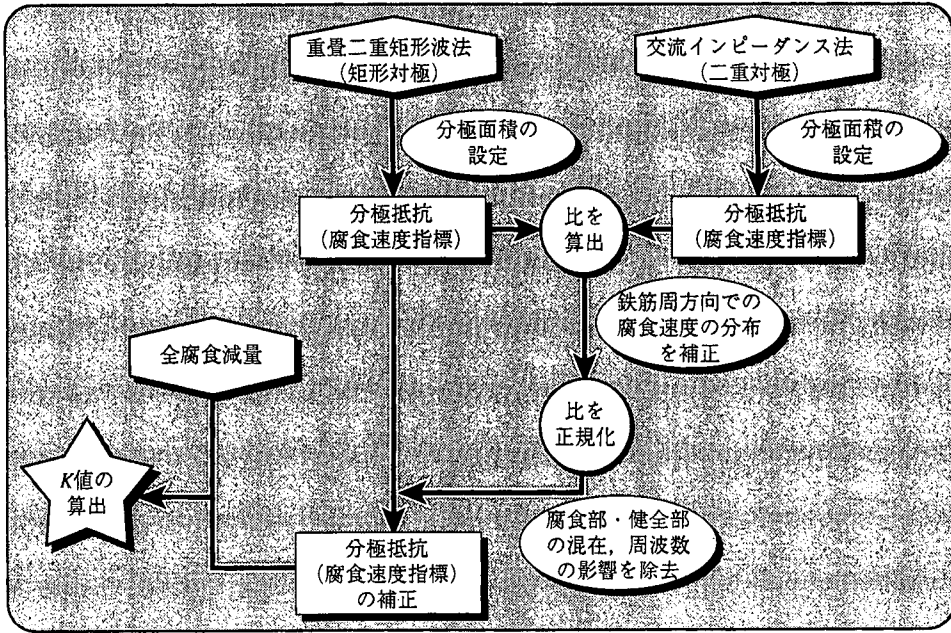


図-25 本研究において検討した各要因およびK値算出まで

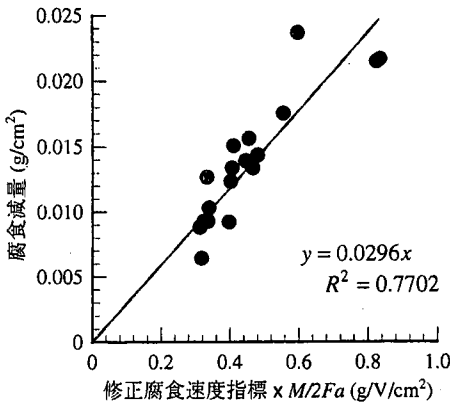


図-24 腐食減量の測定値と重畳矩形波法から求めた修正腐食速度指標との関係 (鉛直打継目供試体)

抵抗法による測定結果の相違に影響を与えていると考えられる。

そこで、この正規化した比 (表-6の括弧内の値) を図-23の重畳二重矩形波法の結果から求めた腐食速度指標の時間積分値に乗ずることによって補正し、腐食減量との関係を図-24に示す。ここで対象としているのは、配合N30を用いた供試体のみであり、腐食減量はマクロセル腐食およびマイクロセル腐食の両者からなる図-5に示した全腐食減量を、鉄筋の表面積 210cm^2 で除した値である。

その結果、コンクリートの打継ぎの有無の影響は小さくなり、供試体全体で $K=0.0296(\text{V})$ となった。測定対象面積がより明確な二重対極を用いた分極抵抗

の結果を加味することにより、“見掛けの”分極抵抗が真の分極抵抗に近い値に修正されたため、分極抵抗と腐食減量とのよりよい相関が得られ、より正確な腐食の進行状況の予測が可能になったものと考えられる。また従来の研究においては K 値は $0.017 \sim 0.050(\text{V})$ と報告されており¹¹⁾、本研究から得られた値はほぼ妥当なものであると考えられる。

最後に、本研究で行なった各検討をフローチャートにまとめて図-25に示す。

7. 結論

本研究では、鉄筋腐食の非破壊検査法として有効であると考えられている分極抵抗法について検討を行った。

ここでは腐食部と健全部が混在する部材に対して、測定時間が短く実用性に優れた矩形対極と重畳矩形波法を併用したものと、より信頼性の高い電流分散抑制機能つき二重対極と交流インピーダンス法を併用したものの2ケースを適用し、解析を行うことによってそれぞれの特徴について比較、検討を行った。また両手法による分極抵抗の測定結果を用いて、鉄筋の実際の腐食状況と対比することによって、分極抵抗法による鉄筋腐食量の推定について考察を行った。

その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) いずれの対極を用いた場合にも、分極にとも

ない発生する電流は、大きな割合が鉄筋の裏側にも流入する。

(2) 電流分散抑制機能つき二重対極を用いた場合には、主対極から流出する電流量と鉄筋のかぶり側半面に流入する電流量はほぼ一致する。

(3) マクロセル腐食が生じている場合には、電流分散抑制機能つき二重対極を用いて分極範囲を限定することによって、正確な分極抵抗の測定が可能となる。

(4) 本研究で用いたRC部材の解析モデルは、実際の腐食状況がある程度再現可能である。

(5) 実用性に優れる矩形対極と重畳矩形波法を併用した測定結果に、より信頼性の高い電流分散抑制機能つき二重対極と交流インピーダンス法を併用した測定結果を組合せることによって、鉄筋の腐食減量を正確に求めることが可能となる。

(6) 本研究の範囲内では、 K 値は鉛直打継目供試体全体で $K=0.0296(V)$ となった。

二重対極を用いた交流インピーダンス法は、分極面積を限定したうえで低周波を用いることによって正確な分極抵抗が求められる半面、測定時間が長くなるため、第1章で述べたように、例えば実構造物の維持管理を行なう上では、やや実用性に欠ける面があるといえる。したがって通常は簡易な2周波数法で大きな対極を用いて測定を行ない、ある時点でより厳密な手法、例えばここでは二重対極を用いた交流インピーダンス法による測定結果により補正を加えることによって、比較的現実的な腐食量を測定することが可能になると考えられる。

さらに、ここでは腐食速度指標の補正を行なったが、実際にはこの補正係数は同一鉄筋内の電位差、腐食の分布状況によって変化する可能性があり、また同一の供試体であっても材齢の経過、腐食の進行によっても変化する可能性がある。したがって、 K 値および既に述べた鉄筋の分極挙動に関してはさらに

詳細な検討が必要であるものと考えられる。

参考文献

- 1) 岡田潜, 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, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 5, pp. 249-252, 1983.
- 2) 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.
- 3) 武若耕司: 鋼材腐食, コンクリート工学, Vol. 33, No. 3, pp. 123-128, 1995.
- 4) 松村卓郎, 金津努, 西内達雄: 交流インピーダンス法による海岸暴露供試体の鉄筋腐食調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 1309-1314, 1997.
- 5) 荒木弘祐, 関博, 金子雄一: コンクリートのかぶりを考慮した分極抵抗および分極電流の分布について, 土木学会論文集, No. 592/V-39, pp. 53-62, 1998.
- 6) 大即信明, 横井聡之, 下沢治: 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, No. 360/V-3, pp. 111-118, 1985.
- 7) 宮川豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学博士論文, 1985.
- 8) 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.
- 9) 小林孝一, 渡邊佳彦, 服部篤史, 宮川豊章: 高流動コンクリートを打ち継いだ塩害コンクリート部材の鉄筋腐食特性について, 土木学会論文集, No. 627/V-44, pp. 147-160, 1999.
- 10) 横田優: 交流インピーダンス法によるコンクリート中でマクロセル腐食を起こしている鉄筋の腐食速度評価について, 四国電力・四国総合研究所研究期報, No. 68, pp. 42-47, 1997.
- 11) 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, 1997.
- 12) 小林孝一, 渡邊佳彦, 宮川豊章: 高流動コンクリートによる塩害補修とマクロセル腐食について, 第43回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集, pp. 261-262, 1999.

(2000. 3. 16受付)

STUDY ON ESTIMATION OF CORROSION RATE OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE BY MEASURING POLARIZATION RESISTANCE

Koichi KOBAYASHI and Toyo MIYAGAWA

Recently, early deterioration of concrete structure has caused many serious troubles. Chloride induced corrosion of reinforcing steel, that is an electrochemical reaction, is a typical cause of such deterioration. Although polarization resistance method is considered effective for monitoring corrosion in reinforcing steel, it is still difficult to determine the exact amount of corrosion loss.

In this study, characteristics of the double rectangular pulse method and the AC impedance method are investigated, and quantitative estimates of corrosion loss of reinforcing steel are accomplished, even in the case where macro-cell corrosion occurs, in which corrosion progresses at different speeds in a same steel bar.