論文 マクロセル環境が自然電位測定結果に与える影響に関する研究

古賀 裕久*1・渡辺 博志*2・中村 英佑*3

要旨:自然電位法で測定できる鉄筋の電位はマクロセル腐食の影響を受け、アノード部は実際よりも貴な電 位が測定されることが知られている。そこで、マクロセル腐食環境を模擬した供試体を作製して、その影響 程度を検討した。その結果、連続した鉄筋の測定結果では、アノード部とカソード部の面積比が1:200と著 しく大きい場合でも、アノード部の分極量は100mV程度にとどまっていたこと、アノード部の自然電位が相 対的に卑であったことから、腐食反応が活発であれば、局所的であっても腐食の有無を検出できるものと考 えられた。ただし、アノード部とカソード部の境界を正確に把握することは困難であった。 キーワード:腐食、自然電位、マクロセル、非破壊試験

1. はじめに

塩害によるコンクリート中の鋼材の腐食は,コンクリ ート構造物の劣化現象の中でも耐荷性状への影響が大 きく,最も注意すべき劣化の一つである。塩害を受ける 構造物の維持管理では,劣化が顕著になると効果的な補 修を行うことが困難になるため,鋼材腐食などの劣化現 象を早期に発見することが重要と考えられている。

塩害による鋼材の腐食可能性を評価できる試験方法 の一つとして,自然電位法がある。自然電位法を用いる と,比較的簡易に面的な調査を行うことができるため, 塩害を受けるおそれのある構造物の維持管理技術の一 つとして期待される。

しかし,自然電位法による腐食可能性の評価にも種々 の課題がある。その一つとして、マクロセル腐食が生じ ると分極により自然電位が本来の値から離れてしまう ことがある。実環境ではコンクリート中の鋼材の腐食環 境が一様であることは考えにくく、マクロセル腐食の影 響が生じることは避けられない。

マクロセル腐食の影響が大きいと,アノード部では本 来の電位よりも自然電位が貴側に測定されるので,自然 電位の値のみで腐食可能性を評価すると,腐食がないよ うに誤って判定してしまうおそれがある。特に腐食範囲 が比較的限定されている場合は、そのおそれが大きい。 これについて筆者らは、アノード部の面積(Aa)に対 してカソード部の面積(Ac)が 90 倍となるような供試 体を用いて検討してきた¹⁾が、今回、Ac/Aa が最大 400 とより大きくなる供試体を作製して検討したので、その 結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試体

(1) 形状

供試体の形状を図-1 に示す。上面と底面を測定面と し、側面にはエポキシ樹脂系の塗装を施した。配置した 鋼材(鉄筋)を表-1 に示す。鉄筋 m1~m3 は、カソー ド部の長さを変えることで Ac/Aa を 10 から 200 まで変 化させた。鉄筋 a1, c1~c4 は、測定時に順次結線するこ とでマクロセル腐食を模擬し、Ac/Aa を 10 から 400 まで 変化させることが可能なように計画した。

(2) 材料

用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。アノード 部のコンクリートには、塩化物イオン濃度が 10kg/m³に なるように練混ぜ水に塩化ナトリウムを混入した。コン クリートは、カソード部を先に打設し、翌日にアノード



*1	(独)	土木研究所	材料地盤研究グループ基礎材料チーム主任研究員	工修	(正会員)
*2	(独)	土木研究所	材料地盤研究グループ基礎材料チーム上席研究員	工博	(正会員)

*3 国土交通省国土技術政策総合研究所企画部国際研究推進室 工修 (正会員)

表-1 配置した鋼材

名称*	長さ	配置		
	(mm)	(図-1上面図参照)		
m1	1005	アノード側 5mm, カソード側 1000mm		
m2	505	アノード側 5mm, カソード側 500mm		
m3 55		アノード側 5mm, カソード側 50mm		
al	5	 アノード側、アノード/カソードの境界から 30~35mm ※長さ約 20mm の鉄筋を塗装して用い、 無塗装部が 5mm になるようにした。 		
c1	50 カソード側,アノード/カソードの境界 から 30~80mm			
c2	450	カソード側,アノード/カソードの境界 から 110~560mm		
c3	500	カソード側,アノード/カソードの境界 から 590~1090mm		
SS	40	分極抵抗測定用に埋設したステンレス丸 棒 (アノード側)		
c4	1000	カソード側, アノード/カソードの境界 から 30~1030mm		

* 図-1の上面図で左上から右下の順に記載した。

表-2 コンクリートの配合

W/C		Air			
(%)	W	С	S	G	(%)
55	172	314	810	982	4.5

※セメントは普通ポルトランドセメント,細骨材は川砂(表乾 密度 2.57g/cm³),粗骨材は硬質砂岩(最大寸法 20mm,表乾 密度 2.67g/cm³)を用いた。また,AE 減水剤を用いた。

※スランプは,塩分を混入/混入していない場合共に 18cm 程 度であった。

部を打設した。その後、20℃の恒温室内で、材齢 28 日 まで湿布を用いて養生した。また、材齢 28 日経過後の 一連の測定終了後から、次の測定(材齢約 270 日)まで の間は、供試体を屋外(つくば市)に暴露した。

なお,鉄筋 m1~m3, a1, c1~c4 には, SD345D13 を 黒皮付きのまま用いた。

2.2 測定

自然電位等の測定には、銀塩化銀電極を用いた。この 電極の先端は直径約 8mmの円形であった。

測定前には湿布を用いて約 60 分吸水させた。特に断 りのない限り、かぶりが 30mm となる側から測定した。

分割した鉄筋 al 及び cl~c4 を用いてマクロセル腐食 を再現する場合は,鉄筋 al 単独の場合から測定を開始し, 鉄筋 al を cl と結線した場合,鉄筋 al を cl および c2 と 接続した場合と接続するカソード部鉄筋を増やして測 定した。腐食電流を安定させるため,接続する鉄筋を増 やすごとに,1時間が経過するまで待って測定した。

鉄筋 al 及び cl に対しては, 交流インピーダンス法に よる分極抵抗の測定も行った。このとき照合電極(銀塩 化銀電極)は鉄筋 al または cl 上のコンクリート表面に 設置し, 対極には表-1 でいう ss (鉄筋 al の場合), ま



※2種類のコンクリートの境界をゼロとし、塩分を含まない側 への距離をプラス側として位置を表現した(以降、同様)。

図-2 マクロセル腐食の影響がない場合の自然電位

たは鉄筋 c2 (鉄筋 cl の場合)を用いた。得られた分極 抵抗から,式(1)を用いてアノード面積あたりのミクロセ ル腐食電流を推定した。

$I_{corrr} = B / (R \cdot A)$					
ここに, I _{corrr} :ミクロセル腐食電流 (A/cm ²)					

- B:定数,26mV
- R:分極抵抗(Ω)

A:アノード部分の面積 (cm²)

鉄筋 al 及び cl~c4 を用いてマクロセル腐食を模擬し た際には,無抵抗電流計を使用して鉄筋 al と他の鉄筋の 間に流れる電流量を測定し,アノード面積あたりのマク ロセル腐食電流量を求めた。

測定は,養生終了後(材齢28日前後)と,屋外暴露後(材齢約270日前後)の2回行った。測定は,気温20℃の恒温室内で行った。

2.3 測定結果の評価

自然電位の値から腐食可能性を判定する際に,本論文では,ASTMC 876²⁾の参考情報として示された値を参考にした。ただし,自然電位の値だけでは適切に評価できないことが指摘されているところであり,適宜電位の分布を図化するなどして考察した。

3. 測定結果

3.1 マクロセルの影響がない場合

(1) 自然電位

鉄筋 a1, c1~c3 の測定結果を図-2 に示す。アノー ド部(a1)の自然電位は測定時期に関わらず-350mV vs CSE を大きく下回っており,腐食の可能性が高いと判定 できる。一方,カソード部(鉄筋 c1~c3)の自然電位は,



不確定か腐食の可能性が低い値で,養生終了後と比較し て,屋外暴露後の方が貴な電位を示していた。

(2) ミクロセル腐食電流

鉄筋 a1, c1 の測定結果を図-3 に示す。分極抵抗から



[※]鉄筋 c4 を結線した場合もあるが,自然電位分布の傾向を読み 取りやすいように,鉄筋 c4 上での測定結果は省略した。

図-6 結線した鉄筋の自然電位分布

推定されるミクロセル腐食電流の電流量は,測定時期に よって大きく異なり,屋外暴露後の方が大きかった。

3.2 マクロセルの影響がある連続鉄筋の場合

(1) かぶり 30mm 側から測定した自然電位

鉄筋 ml~m3 の測定結果を図-4 に示す。養生終了後の測定では、アノード部の自然電位が最も卑で、カソード側ではアノード・カソードの境界面から遠ざかるほど 貴になる傾向が見られた。自然電位の値は鉄筋 ml~m3 で大きくは変わらなかった。

一方,屋外暴露後の測定結果では,鉄筋 ml~m3 のア ノード部の自然電位が,養生終了後の測定結果より貴に なっており,Ac/Aa が大きくなるほど,その傾向が強ま った。

(2) かぶり 100mm 側から測定した自然電位

測定結果を図-5 に示す。自然電位の分布の傾向は、 図-4 と大きくは異ならなかった。

3.3 複数の鉄筋を結線してマクロセル腐食を模擬した場合(1)自然電位の分布

結線から1時間後の測定結果を図-6に示す。結線に よりマクロセル腐食を模擬した場合は、アノード部の鉄 筋 al の自然電位は結線していない場合(図-2)より貴 側に、カソード部の鉄筋 cl~c3 の自然電位は結線してい ない場合より卑側に測定された。結線するカソード部の 鉄筋を増やすほど、アノード部の鉄筋 al の分極量は大き くなった。





図-7 マクロセル腐食電流

※鉄筋 al と鉄筋 cl~c3 を接続し、これらの間に流れる電流量 を測定した。
図-8 マクロセル腐食電流の経時変化



※経過時間は、マクロセル腐食を再現するために鉄筋 al と鉄筋 cl~c3 を結線してからの経過時間を示す。なお、鉄筋 ml の 電位分布については、この期間の供試体の状態を把握する上 で参考になると考えられるので、鉄筋 al および cl~c3 の測 定とほぼ同時期に測定した結果を示した。

図-9 マクロセル腐食環境を継続した際の自然電位

(2) マクロセル腐食電流量

結線から1時間後の測定結果を図-7に示す。結線す

るカソード鉄筋が多くなるほどマクロセル腐食電流量 は大きくなったが、Ac/Aa が 100 以上の場合は、その増 加量はわずかであった。

(3)時間経過の影響

屋外暴露後の測定では、マクロセル腐食電流の変化を 見るために、鉄筋 al と cl~c3 を結線した状態で約 1 箇 月間 20℃の恒温室内に保管し、随時自然電位等の測定を 行った。このときのマクロセル腐食電流の変化を図-8 に示す。また、ほぼ同時期に測定した自然電位を図-9 に示す。

4. 考察

4.1 マクロセル腐食の再現について

図-4 および図-6 に示したように、マクロセル腐食 環境を模擬した場合の自然電位の測定結果は、マクロセ ル腐食の影響が無い場合と比較し、アノード部の鉄筋で は貴側の、カソード部の鉄筋では卑側の値となった。特 に、複数の鉄筋を測定の1時間前に短絡して測定した場 合は、アノード部の鉄筋の自然電位が大きく貴側に変化 した。

ここで、ミクロセル腐食電流とマクロセル腐食電流を 比較すると、例えば鉄筋 al と鉄筋 cl~c3 を結線した場 合、ミクロセル腐食電流に対するマクロセル腐食電流の 大きさは 9~13 倍と大きかった。両者の大小関係は、 Ac/Aa や鉄筋の位置関係、環境条件などによっても大き く異なると考えられるので一概には比較できないが、既 往の研究では、マクロセル腐食電流量はミクロセル腐食 電流量と同等か小さいとする報告が多い。

今回の実験で複数の鉄筋を用いたケースでは、結線後 約1時間で測定を行っており、鉄筋の電気的環境が十分 に定常となっておらず、マクロセル腐食の影響が顕著に 生じている可能性がある。

そこで、屋外暴露後の測定では、結線後、より時間を 経過させてから測定することも試みた。このとき経過時 間と共にマクロセル腐食電流は著しく低下した(図-8)。 ただし、同時に鉄筋の自然電位も貴側に変化する傾向が、 常にマクロセル腐食環境にある鉄筋 ml でも認められて いる(図-9)。したがって、図-8 で認められたマクロ セル腐食電流の低下には、結線後の時間経過という要因 とともに、供試体全体の腐食環境の変化という要因もあ り、今回の実験では両者の影響を分離することはできな かった。

このように複数の鉄筋を結線してマクロセル腐食環 境を再現した際には、定常な状態での測定といえるかと いう点について疑問も残ったので、以降の考察は連続し た鉄筋のデータに着目して行った。









※カソード側にある鉄筋の自然電位の代表的な値として, cl で 測定された電位の平均値を用いた。





4.2 局所的に腐食環境にある鉄筋の評価

(1) アノード部の自然電位

マクロセル腐食環境が自然電位の測定結果に影響を 評価するため,鉄筋 m1~m3の自然電位とマクロセル腐 食の影響を受けていない状態の鉄筋 al の自然電位から 分極量を求めた。その結果を図-10に示す。

マクロセル腐食の影響が最も大きいと見られたのは, Ac/Aa が最大(Ac/Aa=200)の鉄筋 ml を,屋外暴露後 に測定した場合であった。このとき,アノード部の自然 電位は,マクロセル腐食の影響で本来の値からおおよそ 100mV 貴に分極していた。

(2) カソード部の自然電位

同様にマクロセル腐食の影響を受けている鉄筋 ml~ m3 のカソード部の自然電位に着目すると,大きく卑側 に変化している。マクロセル腐食の影響を受けていない 状態の鉄筋 cl の自然電位と比較して分極量を求めた結 果を図-11 に示す。その程度は,アノード部とカソード 部の面積比やアノード部からの距離によって異なるが, おおよそ 100~300mV 卑になっていると見られた。この ため,ASTM C 876 の判定基準(参考値)の値のみで判 断すると,高確率で腐食が生じていると誤って判定され るおそれがある。

ただし、一本の鉄筋の自然電位分布に着目すると、実 験のほとんどのケースで、アノード部が相対的に卑な電 位を示していた。このため、自然電位の分布に着目すれ ば、腐食箇所を検出することも可能と考えられる。

(3) 自然電位分布の傾き

局所的に腐食が生じている場合は,腐食箇所の周辺で 局所的に大きな電位の勾配が生じることが知られてい る²⁾³⁾。一方,分極の影響があるので,腐食している/い ない場所の境界を明確にすることは困難との実験結果 もある⁴⁾。そこで,鉄筋 m1~m3 の自然電位分布につい て検討した。

図-12 に鉄筋 ml~m3 のアノード・カソード部境界付 近の自然電位分布を示す。分布の形状は測定ケースごと に若干異なるが、アノード部から 10mm 程度までの範囲 では、測定位置を変化させても自然電位に顕著な違いが 認められない場合が多かった。

次に,測定位置間の差に着目し,式(2)から,電位の傾 きを求めた。

$$A = \frac{E_x - E_y}{l} \tag{2}$$

ここに,A:電位の傾き(mV/mm)

E_x , E_y:位置 x または y における電位 (mV)

1: 位置 x および y 間の距離 (mm)

求めた電位の傾きを図-13に示す。傾きはアノードに 近い部位で比較的大きかった。しかし,測定位置によっ てはカソード部でも大きな傾きが生じた部位もあった。 このように今回の供試体では,自然電位の測定結果か



※100mm 間隔で測定されたデータから,電位の傾きを算出した。

図-13 電位の傾き

ら腐食が生じているリスクが相対的に高い箇所を把握 することはできるものの,腐食している/していない箇 所の境界を推測することは困難であった。

4.3 自然電位測定におけるかぶりの影響

コンクリート表面の照合電極から測定対象(鉄筋)ま での距離が大きくなると平均化された電位が測定され るため,かぶりの大小によって測定される電位の分布形 状が異なるとの指摘がある³⁾。

しかし、今回の実験では、かぶり 100mm 側から測定 した自然電位の値や分布形状は、かぶり 30mm 側から測 定した場合とほぼ同等であった。この原因の一つとして は、文献 3)で紹介されている実験ではかぶりが 5~20mm と小さいのに対し、今回の実験では、かぶりが実構造物 と同程度で、比較的大きいことが挙げられる。

5. まとめ

マクロセル腐食電流が自然電位の測定結果に与える 影響について検討するため供試体を製作して実験を行 った。その結果,今回の供試体(アノード部の塩化物イ オン濃度が 10kg/m³で,マクロセル腐食の影響がない場 合の自然電位は約-450mV vs CSE)では,以下の結果が 得られた。

(1) マクロセル腐食を模擬した場合、その影響がない場合と比較して、アノード部は貴な、カソード部は卑な電位が測定されることが確認された。

- (2) ただし、Ac/Aaが200と非常に大きいケースでも、マクロセル腐食環境が長期間継続している連続鉄筋の場合は、アノード側の分極量はカソード側と比較すると小さかった。
- (3) ほとんどの測定ケースで、一本の鉄筋の中では、ア ノード部の電位が相対的に卑になっていた。
- (4) (1)~(3)から、Ac/Aa が 200 と局所的なマクロセル腐 食の状態にあっても、アノード部の腐食が活発であ れば、自然電位の測定結果から腐食可能性が高いと 推定できるものと考えられる。
- (5) アノード部とカソード部の境界付近では、電位分布の傾きが比較的大きかった。ただし、傾きの情報だけで、アノード部とカソード部の境界を推定することは困難と考えられた。
- (6) かぶり 30mm の場合と 100mm の場合で,自然電位の 値や分布には大きな違いがなかった。
- (7) 複数の鉄筋を結線してマクロセル腐食環境を再現し、 比較的短時間の内に測定した場合、ミクロセル腐食 電流に対してマクロセル腐食電流が大きく、自然電 位の変化も顕著であった。

謝辞

本研究は科研費(20560438)の助成を受けたものであ る。

参考文献

- 中村英佑ほか:塩害環境下にあるコンクリート構造 物への自然電位法の適用に関する研究、土木学会論 文集 E, Vol.64, No.1, pp.263-275, 2008.3
- Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated reinforcing Steel in Concrete, ASTM C876-09, 2009
- RILEM TC 154-EMC : 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion', Recommendations Half-cell Potential Measurements – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures, Materials and Structures, Vol.36, pp.461-471, Aug./Sep. 2003
- 山本悟ほか:自然電位測定によるコンクリート中の 鉄筋の腐食診断,コンクリート構造物の耐久性診断 に関するシンポジウム論文集,pp.67-72,1988.5