論文　ひび割れを有するモルタル中の鉄筋腐食速度解析

親本　俊憲[*1]・横関　康祐[*2]・宮里　心一[*3]・長谷川　裕介[*4]

要旨：コンクリートの欠陥の有無は内部鉄筋の腐食機構や腐食速度に大きな影響を与える。本研究では，ひび割れを有するモルタル中の鉄筋腐食速度を解析するためのモデルを提案し，数値解析を行った。また，ひび割れを模擬したスリットを入れたモルタル試験体に分割鉄筋を埋め込み，マクロセル電流とミクロセル電流を測定して解析結果との比較を行った。解析では，鉄筋の分極曲線と酸素拡散から求められる腐食電流を個別に計算し，比較・評価することで，一部に課題は残るものの，実測に近い値を得ることができた。

キーワード：鉄筋腐食，マクロセル，ミクロセル，分極曲線，酸素拡散，分割鉄筋

1. はじめに

RC 構造物は，かぶりコンクリートの品質が確保されており，かつ，厳しい腐食環境になければ，コンクリート内部の高アルカリ環境下にある鉄筋は不動態化しているため，問題になるほどの鉄筋腐食は起こらない。しかし，一旦かぶりコンクリートにひび割れなどの欠陥が生じると，ひび割れからの炭酸ガスの侵入による中性化に加え，塩化物イオンなどの腐食促進物質や酸素の侵入を容易にするため，腐食の進行が速められる。また，鉄筋周辺の環境が不均一となり，マクロセル腐食と呼ばれる局部腐食が進行することは広く知られている。

これまでもミクロセル腐食やマクロセル腐食を個別に扱った実験・解析例は数多く存在する。しかし，ミクロセル腐食とマクロセル腐食を同一試験体を用いて評価し，解析・検討を行っている例は少ない。

本研究の最終目標は，コンクリートの欠陥の有無や中性化，塩害などを考慮しながら，実構造物中の鉄筋腐食を解析し，RC 構造物の耐久性を評価・予測することにある。その第一段階として，本報では，ひび割れを模擬したスリットを入れたモルタル試験体を対象に，マクロセルにより単位時間に流れる腐食電流の大きさ（以下，腐食速度と呼ぶ）とミクロセル腐食速度を解析するための手法を提案し，実験結果と比較することで手法の妥当性や改善点を検討した。

2. 解析モデル

2.1 腐食速度解析のための基本的な考え方

活性態にある鉄筋は水と溶存酸素の作用によって腐食を引き起こす。このとき鉄筋表面では，式(1)に示すように鉄が電子を失いイオン化するアノード反応と，酸素が電子を受け取るカソード反応が進行する。

$$\begin{aligned} &\text{アノード：} 2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^{-} \\ &\text{カソード：} O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \end{aligned} \qquad (1)$$

コンクリートにひび割れが生じている場合は，ひび割れから酸素や水分，二酸化炭素や塩化物イオンなどの腐食を促進する原因となる物質の侵入が盛んになる。また，鉄筋周辺の環境が不均一となり，電気化学的な性質が変化することで，マクロセルと呼ばれる腐食電池が形成され，局所的に急激な腐食を生じやすい。

*1 鹿島技術研究所　建築生産グループ　主任研究員　(正会員)
*2 鹿島技術研究所　材料・LCE グループ　主任研究員　(正会員)
*3 金沢工業大学　工学部土木工学科　講師　博士（工学）　(正会員)
*4 金沢工業大学　工学部土木工学科

2.2 解析方法

(1) 解析フロー

本報で考慮した鉄筋の腐食速度の解析フローを**図－１**に示す。鉄筋の腐食速度に影響を及ぼす要因には，コンクリートの pH や塩化物イオンの他に，酸素や水分の供給条件，コンクリートの調合，かぶり厚さなど，種々のものが考えられる。いずれの要因も腐食解析には重要であるが，本報では，**図－１**の網掛けを行った要因を考慮する。

(2) マクロセル・ミクロセル腐食速度の求め方

コンクリートにひび割れが生じた場合，ひび割れ近くの鉄筋にはマクロセルが形成され局所的に腐食が進行する。一方，ひび割れから離れた部分の鉄筋や，ひび割れが生じていないコンクリート中の鉄筋では，マクロセル腐食とミクロセル腐食が並行して腐食が進むと考えられる。したがって，実際の腐食速度の測定や解析にあたっては，マクロセル腐食とミクロセル腐食を区別することで，腐食速度と，ひび割れを初めとする種々の要因の関係を理論的に明らかにすることが可能となる。

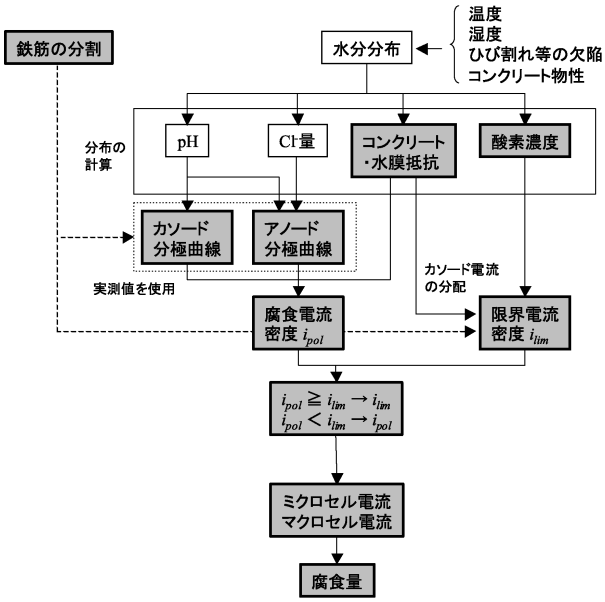
マクロセル腐食速度・ミクロセル腐食速度の評価は，宮里らの分割鉄筋を用いた方法を使って行う[1)]。分割鉄筋は一本の鉄筋を所定の長さに切断し，これらの鉄筋要素の端部にリード線を取り付けた後，鉄筋要素間をエポキシ樹脂等で絶縁した状態で接着した鋼材をいう。

測定や解析では，**図－２**のようにアノード・カソードが単一の鉄筋要素内に存在する場合をミクロセル腐食，異なる鉄筋要素内に存在する場合をマクロセル腐食と見なす。

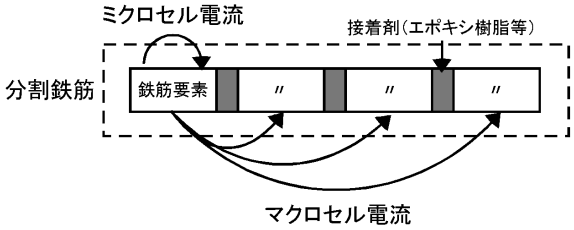
2.3 腐食速度の計算方法

(1) 分極曲線から求める腐食速度

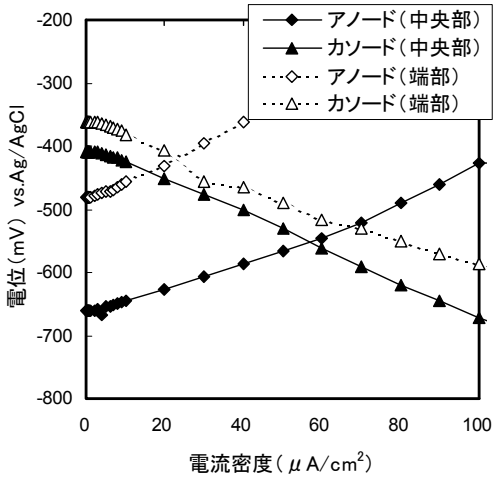
分極曲線は電位と電流を座標として電極の分極状態を示すものであり，反応物質の濃度や反応の早さに加え，酸素の供給量にも影響を受けると考えられる。後述するスリット入りの試験体 No.2-a の分極曲線の例を**図－３**に示す。No.2 の試験体では，中央部の鉄筋要素はひび割れを模擬したスリットに接しており，端部の鉄筋要素に比べて酸素の供給量が多いため，中央部の鉄筋要素の電流密度が端部に位置した鉄筋要素の電流密度に比べて大きいことが確認できる。腐食電流量は，**図－４**に示すように，アノードおよびカソードの鉄筋要素の分極曲線と，両鉄



図－１　解析フロー



図－２　ミクロセル・マクロセルの考え方



図－３　分極曲線の例（試験体：No.2-a）

筋要素間の抵抗にもとづいて計算される電位降下を考慮して求める。ただし，今回の実験では鉄筋要素間の抵抗を正しく測定することができず，分極曲線と電位降下から求めた腐食電流量は，後述のように，実測値より一桁大きい値となった。そこで本報では，腐食電流量を求める際，分極曲線を使う方法と 2)などで検討された限界電流を用いる方法を併用することにした。

(2) 酸素拡散から求める腐食速度

酸素拡散支配における腐食速度は，カソード鉄筋表面への酸素の供給速度（流束）によって計算できる[2),3)]。

鉄筋表面近傍を拡大した**図－5**に示すように，コンクリートと水膜近傍のコンクリート側の酸素濃度を C_1（mol/mm^3），水膜側の酸素濃度を C_2（mol/mm^3）とする。このとき，それぞれの酸素の分圧は以下の理想気体の状態方程式を使って求める。

$$PV = nRT \tag{2}$$

ここで P は酸素の分圧(Pa), V は体積(mm^3), n はモル数，R は気体定数（8.314J/K mol），T は絶対温度（K）である。

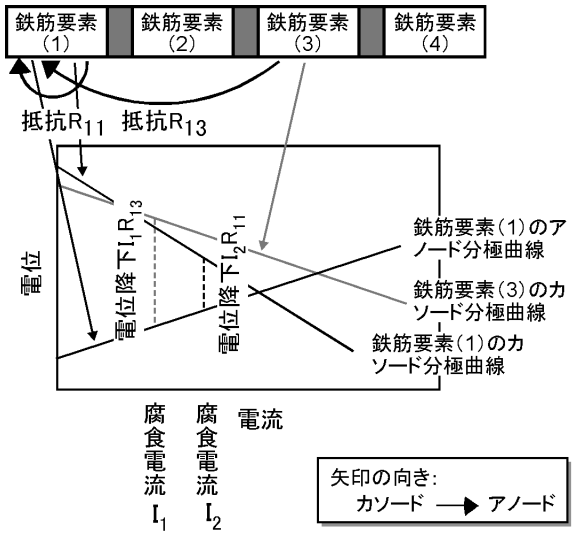
酸素の水への溶解度 X は, Henry の法則 $P = kX$（P は気体の圧力(Pa), k はヘンリー定数(Pa), X は酸素の溶解度）で求めることができる。コンクリート中の酸素が水膜に溶け込む量 C_2（molO_2/molH_2O）は, 式(2)の状態方程式と Henry の法則から，式(3)となる。

$$C_2 = \frac{C_1 RT}{k} \tag{3}$$

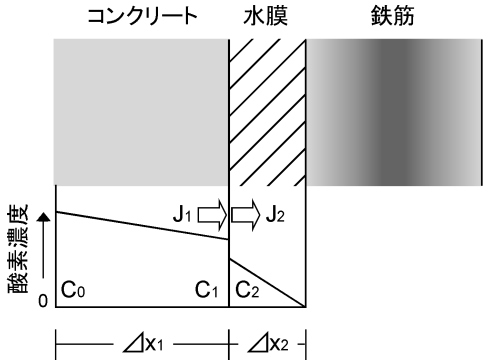
一方，コンクリートと水膜の前後での酸素の流束 J_1, J_2（mol/mm^{2}s）は同一であり，$J_1 = J_2$ である。酸素のコンクリート中の拡散係数を D_1（mm^2/s），水膜中の拡散係数を D_2（mm^2/s）とし，鉄筋表面の酸素は全てカソード反応に消費されると仮定すると，

$$\begin{aligned} J_1 &= D_1(C_0 - C_1)/\Delta x_1 \\ J_2 &= D_2(C_2 - 0)/\Delta x_2 \end{aligned} \tag{4}$$

式(3)と式(4)より，



図－4　分極曲線を用いた腐食電流の求め方



図－5　鉄筋近傍の酸素濃度と流束の概念図

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{A}{Ak/RT + 1} C_0 \\ A &= \frac{D_1}{\Delta x_1} \cdot \frac{\Delta x_2}{D_2} \end{aligned} \tag{5}$$

式(4)と式(5)から鉄筋表面への酸素の流束が求まる。電流量はカソード反応により消費される電子のモル数に等しいため，鉄筋要素の表面積を S（cm^2）, Faraday 定数を F（C/mol）とすると，次式より酸素拡散により発生する電流量が決まる。

$$I^c = 4 \cdot J_2 \cdot S \cdot F \tag{6}$$

任意の鉄筋要素の全カソード電流 I^c を，対になるアノード鉄筋要素に分配するには，鉄筋要素 i が生じるカソード電流量を I^c_i, 鉄筋要素 j との間の全抵抗を R_{ij} とし，鉄筋要素の数を n とすると，i, j 間に分配される電流量 I_{ij} は，式(7)とおくことができる。

$$I_{ij} = I_i^c \times \frac{1/R_{ij}}{\sum 1/R_{ik}} \quad (k = 1..n) \qquad (7)$$

(3) 腐食速度の決定方法

任意の鉄筋要素の分極曲線から得られたカソード電流と酸素拡散から求めた限界電流を比較し，当該鉄筋要素のカソード電流量は両者のうち小さい方の値で決まると考える。この作業をそれぞれの鉄筋要素ごとに行い，最終的に鉄筋要素ごとのマクロセル電流・ミクロセル電流を決定する。

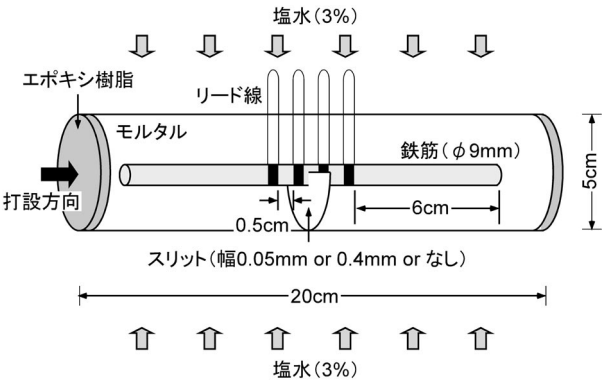
3. 数値解析と実験の比較

3.1 実験方法

マクロセル，およびミクロセルによる腐食速度解析の妥当性を検証するため，**図－６**に示すような分割鉄筋を埋め込んだモルタル試験体を作製した。試験体は，作製後 28 日間湿空養生（20℃，RH90%）した後，腐食を促進させるために，１日塩水噴霧・2.5 日乾燥の乾湿繰り返し養生を行った。試験体の作製に使用した材料を**表－１**に，試験体の作製・試験条件を**表－２**に示す。いずれも，S/C は 2.5 である。試験体は，各実験ケースに対して２個ずつ作製した。

試験体 No.1 と No.2 では，試験体中央部に，断面の半分にわたってひび割れを模擬したスリットを入れ，マクロセル腐食が起こりやすい状況を作った。分割鉄筋は，試験体中央部に位置する３つの鉄筋要素の長さが各々0.5cm，両端の鉄筋要素が 6cm の，合計５つの鉄筋要素からなる。物質の侵入を防ぐために，試験体の両端はエポキシ樹脂でコーティングを施した。

腐食電流や分極曲線，分極抵抗などの測定は塩水噴霧開始後７週目に行った。



図－６　試験体の概要

表－１　使用材料

セメント	普通ポルトランド，密度：3.16g/cm^3， ブレーン値：3270cm^2/g
細骨材	陸砂，密度：2.59g/cm^3， 吸水率：2.83%，粗粒率：2.85%
混和剤	高性能減水剤（ナフタレン系）
	増粘剤（セルロース系）
鉄筋	SR295（φ9）黒皮付

3.2 電気化学的諸性質の測定方法

各鉄筋要素の分極曲線の測定方法は次の通りである。まず，鉄筋要素間を接続しているリード線を一旦切断した後，鉄筋要素上のモルタル表面に照合電極として Ag/AgCl を，対極としてステンレス板を設置する。その後，鉄筋要素の電位を１mV/秒にて強制的に貴または卑へ変化させ，その時に流れる電流を記録して分極曲線とした。各鉄筋要素の分極抵抗は，Ag/AgCl を照合電極，ステンレス板を対極とし，交流インピーダンス法により測定を行った。

モルタルの比抵抗は，分割鉄筋を埋め込んだ試験体から直接測定することができなかった。そこで，試験体とは別に作製しておいた，分割

表－２　試験体の作製・試験条件

試験体No.	W/C	塩水濃度（NaCl%）	スリット幅（mm）	スリット本数（本）	試験条件	
					温度（℃）	湿度（RH%）
No.1-a,b	0.5	3	0.05	1	20	90
No.2-a,b			0.4	1	40	
No.3-a,b			なし	0	20	

鉄筋を埋め込まないモルタル試験体の比抵抗を測定して，その値を用いた。

3.3 解析条件

解析の設定条件を**表－３**に示す。表の中で，酸素の拡散係数は文献 2)を，水膜の厚さは宮里らの研究[3)]を参考に設定した。

モルタル内部の酸素の濃度は，定常状態での Fick の第二法則を差分法で解いて求めた。スリット内部の酸素濃度は境界の酸素濃度と同じと仮定している。また，試験体のコーティングを施した両端の境界の酸素濃度は０と仮定した。

3.4 比較と考察

図－７から**図－11** に，解析結果と実験結果を，マクロセル電流密度とミクロセル電流密度別に比較したグラフを示す。ただし，No.3-b 試験体は測定結果が異常値を示したため，以後の考察からは除外した。横軸は，試験体の中央を０としたときの各鉄筋要素の中心位置である。

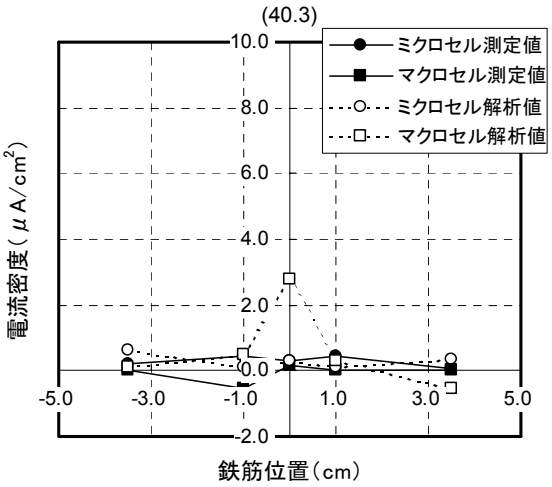
今回の解析では，カソード電流密度はほとんどが酸素拡散から決まる結果となった。分極曲線からカソード電流密度が決まった鉄筋要素には，図中，黒い下向きの矢印を入れた。スリット近傍の鉄筋要素は全て，酸素拡散から求めた限界電流量によって決定されている。逆に分極曲線から求めた電流密度（試験体中央部での値を，図の上の括弧内に示す）は，実測値に比べ一桁大きい値となった。鉄筋要素間のモルタル抵抗を正確に測定できなかったことが一因と考えられるが，分極曲線を用いる場合，同時にコンクリートやモルタルの抵抗を把握するための工夫が求められる。

表－３　解析条件

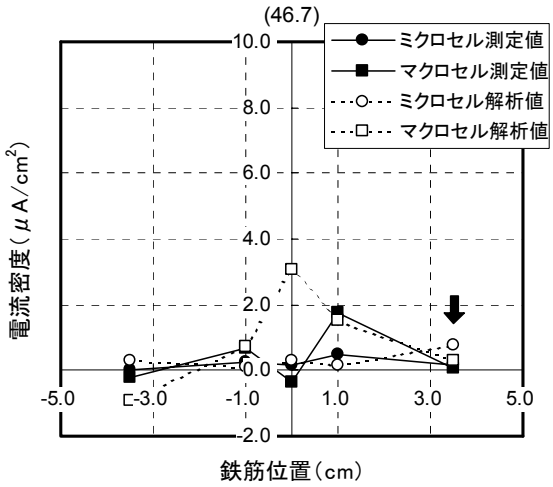
説明	値	単位
境界の酸素濃度（20℃）	8.93×10^{-9}	mol/mm^3
境界の酸素濃度（40℃）	8.17×10^{-9}	mol/mm^3
酸素の拡散係数（不飽和）	2.0×10^{-3}	mm^2/s
酸素の拡散係数（飽和）	2.0×10^{-5}	mm^2/s
分極曲線	実測による	－
分極抵抗	実測による	Ωmm^2
モルタル比抵抗	9817.0	Ωmm
水膜の厚さ	0.04	mm
Henry 定数（20℃）	3.93	$K/10^9Pa$
Henry 定数（40℃）	5.52	$K/10^9Pa$

図－７と**図－８**では，スリット位置での電流密度が実測値では小さく，解析と異なる結果となった。スリット幅が 0.05mm と小さいため，スリットが水やモルタルなどで充填され，酸素の供給が遅れたことが考えられる。このような細いひび割れの扱いについては今後の課題である。

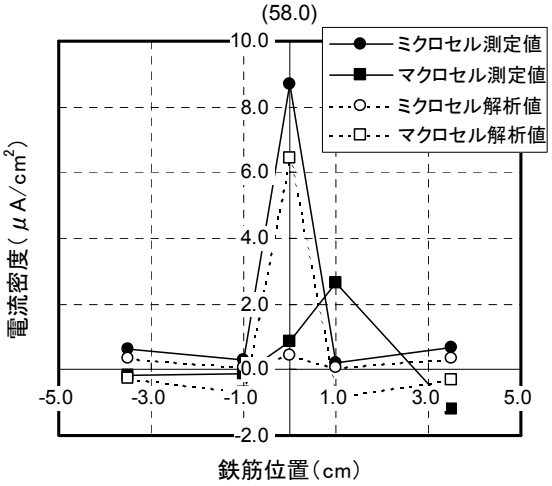
図－９と**図－10** では，実測値・解析値ともにマクロセル電流密度とミクロセル電流密度の合計がスリットの入った試験体中央で最大値を示しているが，同位置でのマクロセル電流密度とミクロセル電流の大小が逆転する結果となった。



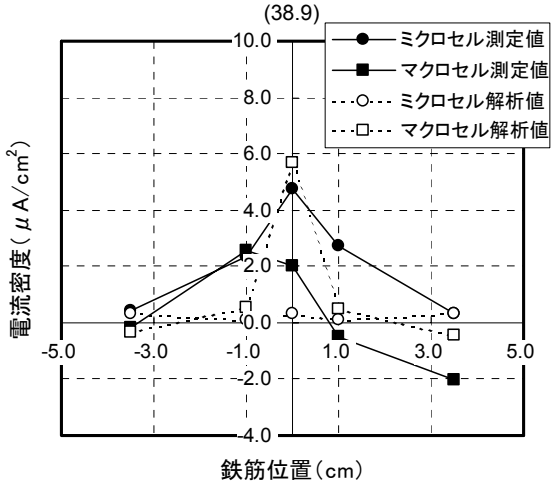
図－７　腐食電流比較（No.1-a**）**



図－８　腐食電流比較（No.1-b**）**



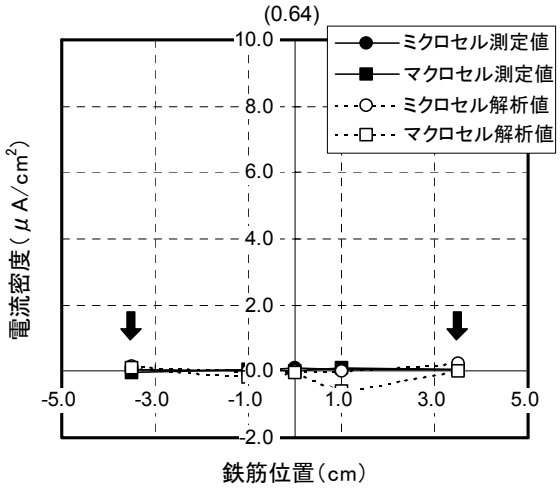
図－９　腐食電流比較（No.2-a）



図－10　腐食電流比較（No.2-b）

腐食電流量の決定には，各鉄筋要素へのカソード電流の分配が重要な意味を持つ。その際，式(7)に示したように分極抵抗やモルタル抵抗が関与する。今回の実験では，腐食電流の測定に用いた試験体から，直接，鉄筋要素間のモルタル抵抗を測定することができなかった。鉄筋近傍のモルタル抵抗を，直接，測定する方法については今後の課題である。

図－11 はスリットのない試験体の実測値および解析値である。1cm の位置にある鉄筋要素におけるマクロセル電流密度の解析値を除けば，実測値・解析値ともマクロセル電流密度・ミクロセル電流密度の絶対値が 0.25μA/cm² 以下であり，両者ともスリット入りの試験体より腐食の進行が遅い結果となった。



図－11　腐食電流比較（No.3-a）

4. まとめ

(1) ひび割れを考慮したモルタル中の鉄筋腐食速度を解析するための基本的な考え方を示した。本報では，分極曲線と酸素拡散から得られるカソード電流を併用して腐食速度を求めた。

(2) 分割鉄筋を用いて腐食電流を測定し，解析と比較した結果，全量では両者は概ね近い値を示した。しかし一部の試験体でマクロセル電流とミクロセル電流の大きさが逆になっており，今後，実験や解析方法の見直しと今回の結果の再検討が必要である。

(3) 分極曲線から腐食速度を求める場合，分極曲線の測定と同時に，モルタル抵抗を把握する工夫が必要である。

参考文献

1) 宮里心一，大即信明，小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.547-552，2001

2) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（III），1996

3) 宮里心一：鉄筋コンクリート欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究，東京工業大学博士論文，2001.4