

論文 実寸法大のコンクリート供試体を用いたマクロセル腐食の挙動に関する研究

竹子 賢士郎*1・山本 悟*2・高谷 哲*3

要旨: 塩害を受けたコンクリート中の鋼材はマクロセルを形成して腐食する。マクロセル腐食の挙動に関しては小型供試体による研究は数多く報告されている。しかし、小型供試体でのマクロセル腐食は、腐食部であるアノードと健全部であるカソードとの面積比や鋼材の表面性状などが実際の部材中での挙動と異なることが予想される。そこで本試験では、電氣的に独立した試片で構成した分割鋼管を実寸法大の供試体中に埋設して、試片間で形成されるマクロセルの挙動を電気化学的に調べた。その結果、アノード部は、マクロセル電流および自己腐食によって腐食したことがわかった。

キーワード: 塩害, マクロセル腐食, 分割鋼管, マクロセル電流, 自己腐食

1. はじめに

コンクリート中の鋼材は、コンクリートの強アルカリ環境によって不動態化しており腐食しない。しかし、塩害やブリーディングによる局所欠陥、中性化などによってコンクリート中鋼材の不動態が局部的に破壊されると、その部分をアノード、周辺の健全部をカソードとして、**図-1**に示すようなマクロセルを形成し腐食が進行する。ここでは、鋼材が腐食するアノード反応と見合うだけの、酸素の還元反応などのカソード反応が生じ、腐食が進行することによって、アノード部のpHは低く維持される。このようなマクロセル電流のやり取りは、試料を分割し、特定の試料をアノードとすることで測定できる。また、小型供試体におけるマクロセル腐食は、アノードとカソードとの面積比や鋼材表面性状などが実際の部材中での挙動と異なることが予想される。そこで本試験では、それぞれが電氣的に独立した試片で構成した分割鋼管を実寸法大の床版供試体および梁供試体に埋設して、試片間で形成したマクロセルの挙動を電気化学的に調べたので報告する。

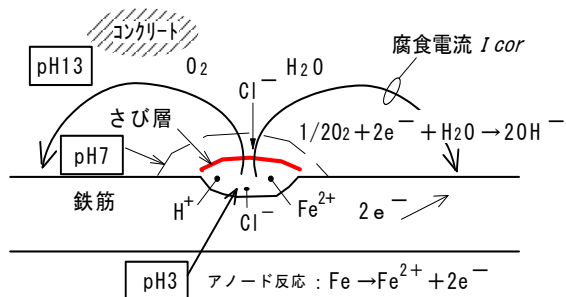


図-1 コンクリート中鋼材の腐食

2. 試験方法

2.1 分割鋼管供試体

(1) 分割鋼管

コンクリート供試体中に鉄筋として埋設する複数本の分割鋼管を作製した。分割鋼管に用いた試片の形状の例を**図-2**に、分割鋼管の設置状況を**図-3**に示す。黒皮付きの鋼管 (JIS G 3452 配管用炭素鋼鋼管 SGP20A) を長さ方向に半割にし、リード線 (0.3sq) を半田付けした後、長さが 0.5~1.4m の硬質塩化ビニル管 (VP13) にシリコン製シール材でシールしながら M4 のステンレス製皿ねじで固定した。リード線はすべて硬質塩化ビニル管内に通して端子が供試体外に出るようにした。また、固定用のねじも試片固定後にシールした。半割試片の長さは、アノード部用の腐食試片とその裏側試片は 98mm、それらの近傍の試片は 198mm とした。また、腐食試片から 200mm 以上離れる試片は半割せずに使用した。また、試験片間の隙間も同様にシールした。半割試片の仕上がり外形は、30mm に調整した。

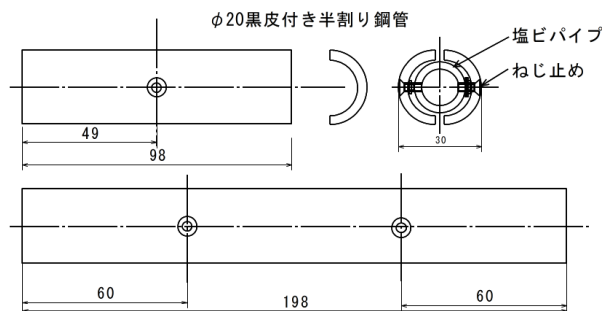


図-2 分割鋼管に用いた半割試片の形状

*1 日本防蝕工業株式会社 技術研究所 (正会員)

*2 日本防蝕工業株式会社 技術研究所長 工博 (正会員)

*3 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 助教 工博 (正会員)

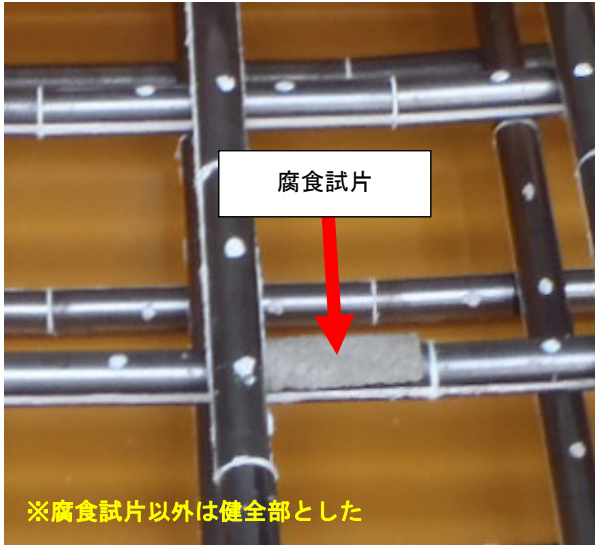


図-3 分割鋼管設置状況

(2) 腐食試片の準備

腐食試片は、供試体コンクリートが硬化した後にアンロード溶解して腐食させる必要があるため、塩化物イオン濃度が 20kg/m^3 相当の食塩を添加した 1:3 モルタルを腐食試片にのみ厚さ 5mm ほど塗布し、硬化、付着させた。なお、事前に腐食試片は秤量、記録した。

(3) 供試体形状および寸法

本試験では床版供試体 ($280 \times 1,200 \times 800\text{mm}$) および梁供試体 ($580 \times 1,000 \times 610\text{mm}$) の 2 体を作製した。それぞれの供試体の形状および寸法を図-4 および図-5 に示す。床版供試体では、腐食試片のかぶりが実測値として 25mm および 45mm であった。梁供試体では、腐食試片の実測したかぶりが梁側面で 25mm および 50mm、ならびに梁下面で 20mm であった。また、マクロセルを形成させない単独の腐食試片を図-5 に示すように合計

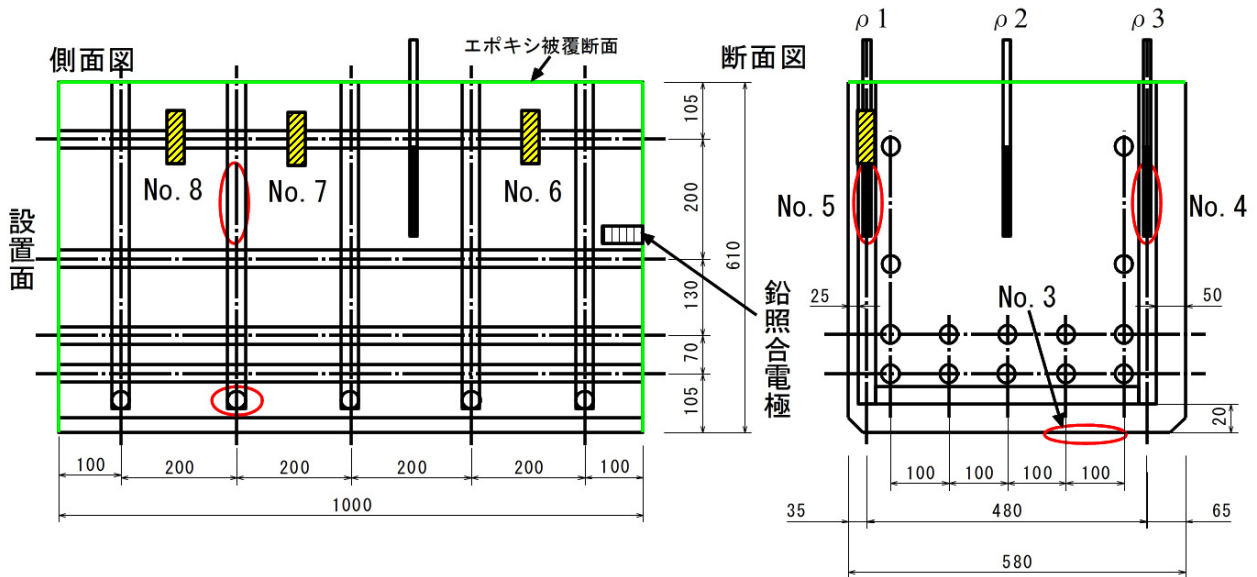


図-4 床版供試体形状・寸法

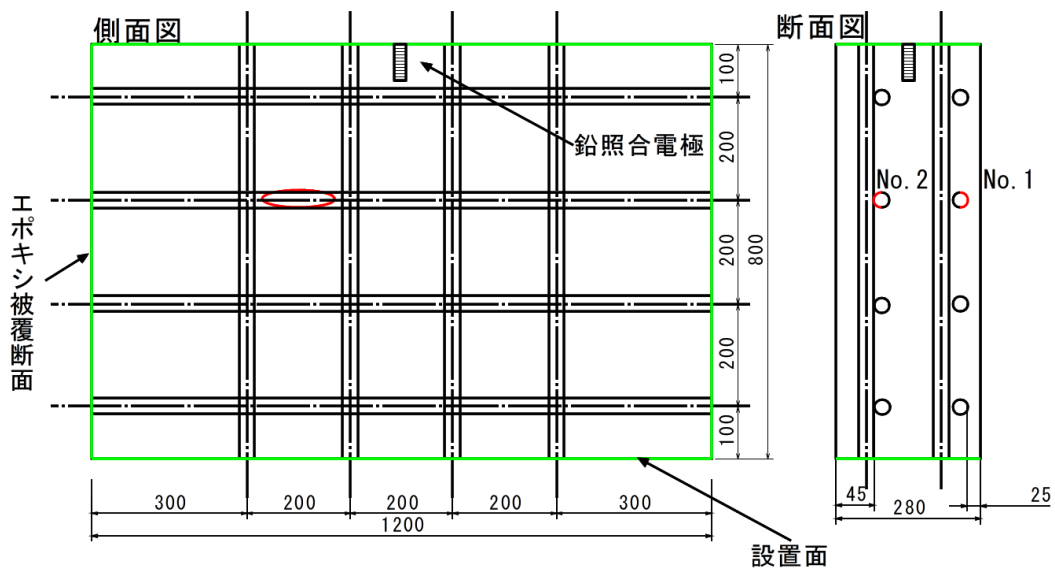
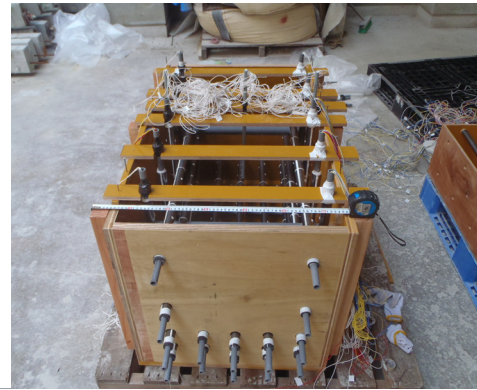


図-5 梁供試体形状・寸法



床版供試体

梁供試体

図-6 分割鋼管配置状況

3個設置した。腐食試片の位置は、図中に楕円で記した。分割鋼管を型枠に配置した状況を図-6に示す。また、各腐食試片の番号と名称を表-1に示す。

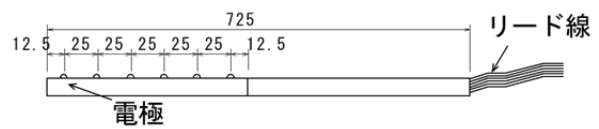


図-7 抵抗率センサ図

表-1 腐食試験片の位置

腐食試片番号	名称
No.1	床版 25mm
No.2	床版 45mm
No.3	梁下面 20mm
No.4	梁 50mm
No.5	梁 25mm
No.6	単独梁 20mm
No.7	単独梁 20mm
No.8	単独梁 20mm

(4) コンクリートの抵抗率測定方法

硬化コンクリートの抵抗率を測定するためのセンサを図-5に示すように梁供試体の側面から20mm($\rho 1$), 50mm($\rho 3$), および240mm($\rho 2$)に設置した。抵抗率センサは図-7に示すように、硬質塩化ビニル管(VP9)の側面に6点の電極を取り付けたもので、このうち、隣り合う4点の電極の両端2点から交流電流 I (80Hzの矩形波)を流し、中央2点間に生じる電圧 V から電極近傍のコンクリート抵抗率を計算した。電極の間隔は25mmとし、電極の位置を25mmずつ変えることで、合計3点の抵抗率を測定し、平均値を求めた。なお抵抗率センサ $\rho 2$ は、一部の電線に異常が生じ、もっとも浅い箇所一点の値を採用した。抵抗率の計算式を式(1)に示す。ここで ρ は抵抗率($\Omega \cdot m$)、 k は定数(m)、 V は電圧(V)、 I は電流(A)である。定数 k は抵抗率が既知の水道水(約 $70 \Omega \cdot m$)中で予め求めた。

$$\rho = k \cdot V/I \quad (1)$$

(5) コンクリートの打設

供試体コンクリートの配合表を表-2に示す。コンクリートに塩化物イオンを含ませるために、練り混ぜ時に塩化物イオン濃度が 5kg/m^3 相当の食塩を添加した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。打設19日目に脱型し、腐食試片を設置した面を除いてエポキシ樹脂でコンクリート面を被覆した。

表-2 コンクリート配合

配合表 kg/m^3					W/C
C	W	S	G	混和剤	
325	169	709	1060	2.93	52%

(6) 供試体の暴露条件

実験室内に用意した水槽内に供試体を設置し、大気開放状態で暴露した。床版供試体および梁供試体は図-4, 5に示す面を下にして設置した。また、乾燥によるマクロセル電流の低下を防ぐため、定期的に散水や水槽内に水道水を入れて供試体を浸漬した。

(7) 腐食試片のアノード溶解処理方法

腐食試片(合計8個)のみを強制的に腐食させるために、供試体打設29日後において 1A/m^2 の電流密度で6日間それぞれにアノード電流を流した。

2.2 マクロセル電流測定

各試片からのリード線を端子台に導き、 1Ω の固定抵抗を介して流れる試片間のマクロセル電流を、データロガーを用いて2時間間隔で測定、記録した。

2.3 自然電位の測定方法

試験開始から約 800 時間経過後に、暴露供試体上面の中央部に鉛照合電極を設置し、自然電位の経時変化を測定、記録した。また、腐食診断計の電位センサを用いて、供試体表面における自然電位分布も測定した。

2.4 腐食試片の秤量および腐食速度の計算方法

試験終了時に供試体を解体し、全ての腐食試片を取り出した。除錆処理方法は、JIS Z 2371 塩水噴霧試験法の化学的腐食生成物除去方法に準じたもので、塩酸-ヘキサメチレンテトラミン溶液で酸洗した。酸洗による秤量誤差は、ブランクとなる試片を 3 個用意し、同様の酸洗処理を行ってその減量を補正值 W_a (g) とした。また、アノード溶解処理についても補正值 W_p (g) を求め、腐食量から減じた。補正後の実腐食減量 W_r (g) は式(2)に示すように計算した。また、データロガーで測定したマクロセル電流の電流密度 i (A/m^2) と測定間隔の時間 Δh の積から電気量 q (Ah) を求め、これらの積算値に鉄の電気化学当量の 1.042 g/Ah を掛けることで、期間中の理論腐食量 W_t (g) を計算した。計算式を式(3)に示す。

$$W_r = W_1 - W_2 - W_a - W_p \quad (2)$$

$$W_t = \Sigma(i \times \Delta h) \times 1.042 \quad (3)$$

3. 試験結果

3.1 腐食試験片に流れたマクロセル電流の経時変化

梁供試体中の腐食試片から流出した電流の経時変化の例を図-8 に、梁供試体における抵抗率ならびに自然電位の経時変化を図-9 に示す。

矢印で示した部分が供試体を水道水中に浸漬した時期である。浸漬時期はマクロセル電流の低下に合わせて行い、2 回目の浸漬以降は 1 週間おきに散水を行った。試験片 No.4 以外の試験片は、試験期間中常に $0.1mA$ 以上 (約 $27mA/m^2$) のマクロセル電流が流れていた。腐食試片 No.5 (梁 25mm) では、マクロセル電流は暴露開始から徐々に上昇し約 250 時間経過後では $0.35mA$ (約 $94mA/m^2$) の値を示したが、その後 $0.25mA$ (約 $67mA/m^2$) まで低下した。しかし、供試体を湿らせると電流は $0.4mA$ (約 $107mA/m^2$) まで上昇した。これは、供試体を湿らせることで、腐食反応に必要な水分の供給がなされること、および図-9 に示すように、コンクリートの抵抗率が低下してマクロセル電流が流れ易くなったためと考えられる。このことは、他の腐食試片についても同様である。

暴露約 600 時間経過後における各腐食試片の電流を比較すると、流出する電流は No.5 (梁 25mm) : $0.27mA$, No.2 (床版 45mm) : $0.14mA$, No.1 (床版 25mm) : $0.1mA$, No.3 (梁 下面 20mm) : $0.09mA$ および No.4 (梁

50mm) : $0.05mA$ の順に高かったなお、腐食試片 No.4 (梁 50mm) の電流は他の腐食試片に比較して非常に少なかった。この理由としては、抵抗率の測定結果でも述べるが、腐食試片 No.4 への水分の供給性が最も悪く、腐食の進行が抑えられたためと考えられる。約 600 時間経過後と約 1700 時間経過後、約 2700 時間経過後にマクロセル電流の急激な上昇がみられた。これは、供試体の乾燥を防ぐために供試体を水道水中に浸漬した時期と重なっており、抵抗率の変化からも水分の浸透によるコンクリート抵抗の低下が原因と考えられる。また、抵抗率の変化と同時に自然電位の卑下が起こっており、コンクリート抵抗の低下とともに腐食が促進されていることがわかる。

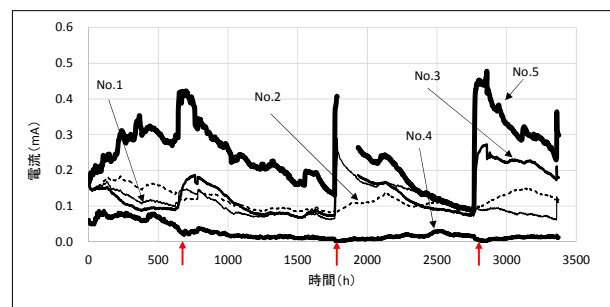


図-8 マクロセル電流経時変化

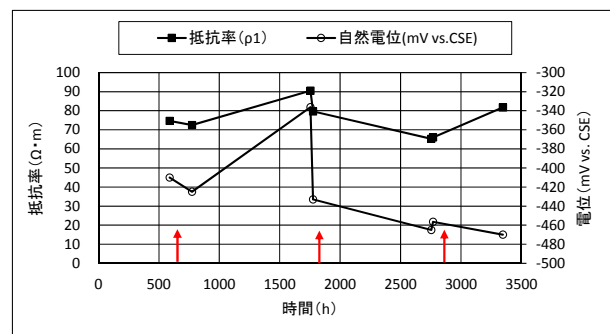


図-9 抵抗率および自然電位経時変化

3.2 梁供試体の抵抗率とマクロセル電流

梁供試体に設置した抵抗率センサ $\rho 1 \sim \rho 3$ の経時変化を図-10 に示す。

いずれの抵抗率も暴露 600 時間過後においては $\rho 1$ (かぶり 20mm) が $95 \Omega m$, $\rho 2$ (かぶり 240mm) が $68 \Omega m$ および $\rho 3$ (かぶり 50mm) が $66 \Omega m$ であったが、その後供試体を湿らせるとかぶりが最も小さい $\rho 1$ のみ抵抗率は $72 \Omega m$ まで低下したが、他のかぶりでは $\rho 2$ が $85 \Omega m$, $\rho 3$ がほぼ変化なし ($65 \Omega m$) であった。その後、暴露 1,774 時間経過後までにそれぞれの抵抗率は $\rho 1$ が $118 \Omega m$, $\rho 2$ が $85 \Omega m$, $\rho 3$ が $77 \Omega m$ まで上昇した。し

かし、暴露 1,776 時間経過後に供試体を湿らせると $\rho 1$ が $84\Omega\text{m}$ まで低下、 $\rho 2$ がほぼ変化なし ($86\Omega\text{m}$)、 $\rho 3$ が $74\Omega\text{m}$ まで低下したが、その値は、かぶりが小さい $\rho 1$ が最も低かった。コンクリートの抵抗率は一般に、含水率によって大きく影響をうける。図-10 の結果から、コンクリート供試体を湿らせても、その湿らせる時間内では水分が深い位置まで到達しなかったと考えられる。

図-8 に示す腐食試片の電流の経時変化の結果では、電流値が上昇と抵抗率の低下が対応していることから、コンクリートの水分はマクロセル電流に与える影響が大きいものと考えられる。

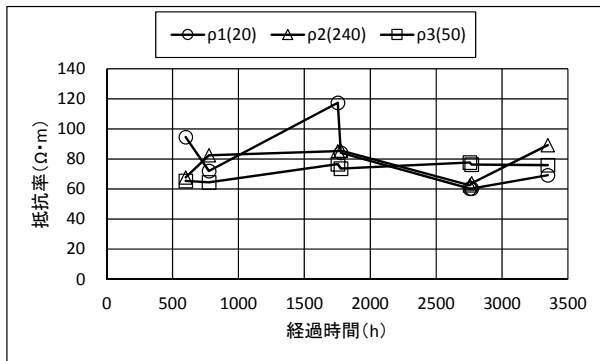


図-10 抵抗率経時変化

3.3 自然電位分布

自然電位分布の例として、梁供試体下面における自然電位分布図を図-11 に示す。

通常自然電位分布測定は、腐食箇所が未知の場所において腐食箇所を推定する際に行われる。この供試体では、あらかじめ腐食試片の位置が分かっているため、自然電位は腐食試片 No. 3 の位置で、最も卑な値である -500mV vs. CSE を示した。このことから、自然電位分布によって腐食位置が明らかになることが分かった。

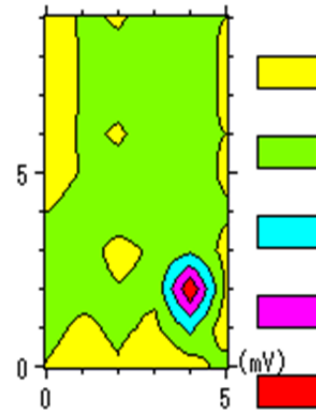


図-11 梁供試体下面

3.4 実腐食量、理論腐食量の比較

(1) 実腐食量と理論腐食量の比較

各条件における実腐食量および理論腐食量の比較と単独試験片の腐食量を表-3 に示す。

腐食試片 No.4 以外の試験片において、実腐食量は通過電気量から求めた理論腐食量に対して、約 2 倍程度に多くなった。これは、実腐食量 W_r が腐食試片内で生じる自己腐食を含んでいるためである。従って、今回の試験では、全体の腐食に占めるマクロセル腐食の割合はおよそ 50% と考えられる。なお、腐食試片 No. 4 については、上述したように腐食試片表面への水分の供給性が他の腐食試片に比較して悪かったため、マクロセル腐食および自己腐食が共に小さかったものと考えられる。

次に、単独腐食試片の実腐食量 W_r を他の腐食試片と比較すると、単独腐食試片の値が非常に少ないことが分かる。これは、同様な処理によって腐食させた試片であっても、マクロセルを形成しないと図-1 に示すようにマクロセル腐食が進行せず、腐食部の電位が貴側に変化せず、また、腐食部で生じた電子 e^- を消費する部分がないためである。なお、マクロセル電流が継続的に流れる

表-3 実腐食量と理論腐食量の比較と単独試験片の腐食量

腐食試片番号	名称	実腐食量 (g)	理論腐食量 (g)	比率 (%)
No.1	床版 25mm	0.7339	0.3968	54%
No.2	床版 45mm	0.8097	0.4190	52%
No.3	梁下面 20mm	1.0354	0.4477	43%
No.4	梁 50mm	0.5778	0.0860	15%
No.5	梁 25mm	1.6717	0.8245	49%
No.6	単独梁 20mm	≒0	-	-
No.7	単独梁 20mm	0.0308	-	-
No.8	単独梁 20mm	≒0	-	-

ことによって、腐食部の pH が低下し、塩化物イオンの集積が維持されるが、単独腐食試片では周囲のコンクリートからのアルカリ成分の拡散によって腐食が停止したりと考えられる。

これらのことから、コンクリート中の鋼材は局部的なアノードと大きなカソードが存在するマクロセル腐食によって、腐食が継続的に進行することが確認できた。

(2) 腐食試片の表面状態

供試体解体時の腐食試験片の代表的な表面状態として腐食試片 No. 5 の写真を図-12 に示す。腐食試片のほぼ全面が腐食していた。なお、腐食試片近傍の試片に腐食は認められなかった。



図-12 腐食試験片はつり出し

3.5 マクロセル電流の分布

マクロセル電流の分布の結果例として、床版供試体および梁供試体の腐食試片近傍における電位分布図例を図-13、14 に示す。図中央は凡例を示し、極性がマイナスの場合流出、プラスの場合流入する電流を示している。これを見ると、両供試体とも腐食試片から大きな電流が流出し、周りの健全部にわずかず電流が流入したことが分かる。

4. 結論

塩害を受けたコンクリート部材を模擬して、実寸大の供試体試験によるマクロセル腐食の挙動を調べた結果、以下のことが分かった。

1. 大きな面積のカソードと組み合わさった腐食試片から、マクロセル電流が継続的に流れた。
2. 腐食試片の腐食量に占めるマクロセル腐食の割合は約 50%であった。

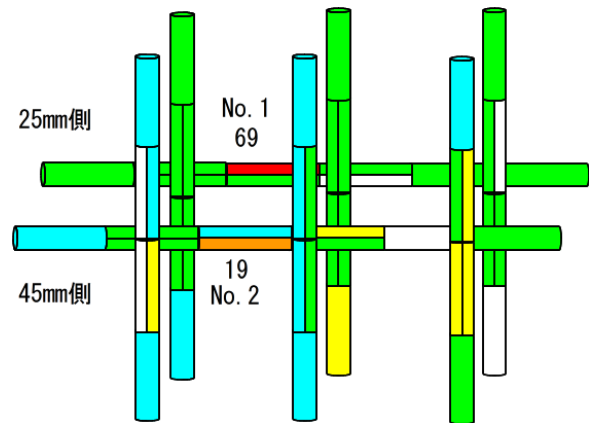


図-13 床版供試体電流分布

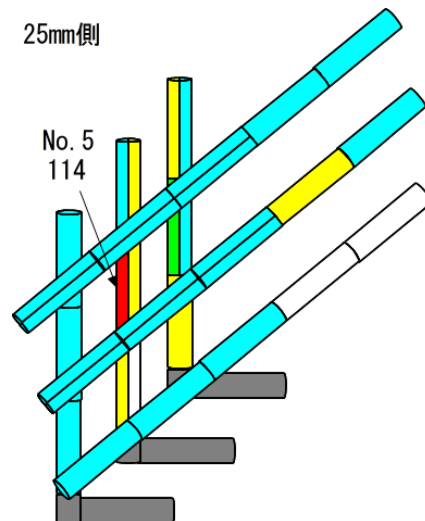
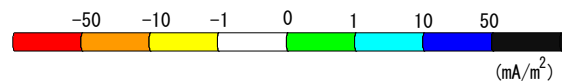


図-14 梁供試体電流分布

3. 供試体の抵抗率は、水分の供給によって変動した。
4. 腐食試片から流出する電流は、コンクリートが湿ると増加し、乾燥すると低下した。
5. 腐食試片からの電流は、付近の健全な試片へ少しずつ流入した。

参考文献

- 1) 竹子賢士郎, 山本悟, 高谷哲: 異なる環境条件におけるコンクリート中鋼材の腐食速度測定方法の精度確認試験, 第 62 回材料と環境, pp.378, 2015.11

謝辞

本試験に際して供試体作製をお手伝いいただいた、京都大学構造材料学研究室学生御一同に深く感謝の意を表します。