

委員会報告 物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会

山口 明伸*1・加藤 佳孝*2・宮里 心一*3・兼松 学*4・皆川 浩*5・小林 浩之*6・山本 誠*7

要旨: 本研究委員会は、各種電気化学的計測手法をコンクリート構造物に適用する際に考慮すべき物理化学的理論を体系的に整理するとともに、信頼性の高い測定の実施とその解釈方法に関するノウハウなど、実務において有益な資料をとりまとめることを目的とした。報告書では、コンクリート工学における電気化学の基礎、電気化学的手法を用いた性能/物性評価方法の概要とメカニズム、電気化学的物性値に基づくコンクリートの物性評価、コンクリート中の鋼材に対する電気化学的腐食診断、実構造物および供試体での測定、電気化学的防食工法についてまとめている。

キーワード: 電気化学, 鋼材腐食, かぶり, 保護性能, 計測技術, 体系化

1. はじめに

わが国では、2012年12月発生した笹子トンネル天井板落下事故以前から、社会インフラの維持管理に関する取り組みがなされていたものの、明らかにこの事故を契機として維持管理に関する取り組みが活発となった。表-1は、最近の国土交通省の動きをまとめたものであるが、その一つとして、確実なメンテナンスの実行に向けて民間資格の登録制度が開始されている。コンクリート構造物は、社会インフラの整備において重要な役割を担っており、日本コンクリート工学会においても、2001年よりコンクリート診断士の資格制度を開始している。コンクリート構造物の変状の種類は多く、実構造物での診断には、目的に応じて適切な調査手法を選定する必要がある。調査手法には、書類調査、目視調査、各種非破壊計測を用いた調査、コアを用いた調査など、様々な種類が提案され、実際に活用されている。非破壊計測やコアを用いた化学的な分析手法の多くは、他分野で開発された手法をコンクリート工学分野に応用しており、測定結果の解釈には専門的な知識が必要となる。高度な知識が必要となる計測手法の一つに、主にコンクリート中の鋼材の腐食状態を把握するために用いられる電気化学的計測手法がある。電気化学的計測手法は、その名の通り、電気化学の知識を活用した計測手法であり、電気化学は物理化学の一領域と位置づけられる。コンクリート工学分野で最も用いられる手法は、自然電位法であるが、最近の研究発表等を見ると、必ずしも十分に理論的背景を理解し

表-1 最近の維持管理に関する動向

2012.7	社会資本メンテナンス小委員会設置
2012.12	笹子トンネル天井板落下事故
2013.1	社会資本の老朽化対策会議設置
2013.3	「社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置」発表
2013.10	インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議設置
2013.11	「インフラ長寿命化基本計画」発表
2013.12	「今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について」答申
2014.5	「インフラ長寿命化計画(行動計画)」発表
2014.8	「社会資本メンテナンスの確立に向けた緊急提言：民間資格の登録制度の創設について」発表
2015.1	民間資格として、10団体から申請があった延べ50資格を26日付で登録
2015.2	「市町村における持続的な社会資本メンテナンス体制の確立を目指して」、「社会資本のメンテナンス情報に関わる3つのミッションとその推進方策」発表

ていないと思われる適用事例が見られる。これは、電気化学がわかりにくいと言われる分野であることに加えて、コンクリート工学分野での測定では、かぶりコンクリートを介した測定が一般的であるため、より一層測定結果の解釈が困難になることによると考えられる。

本研究委員会は、各種電気化学的計測手法をコンクリート構造物に適用する際に考慮すべき物理化学的理論を体系的に整理するとともに、信頼性の高い測定の実施とその解釈方法に関するノウハウなど、実務において有益な資料をとりまとめることを目的とし、2013年度から

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 博(工) (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部准教授 博(工) (正会員)

*3 金沢工業大学 環境・建築学部教授 博(工) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部准教授 博(工) (正会員)

*5 東北大学大学院 工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*6 (株)ナカボーテック 事業開発本部 博(工) (正会員)

*7 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 博(工) (正会員)

JCI-TC134A：物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会

委員長 山口明伸（鹿児島大学大学院） 幹事長 加藤佳孝（東京理科大学）

幹事 宮里心一（金沢工業大学），兼松学（東京理科大学），皆川浩（東北大学大学院），小林浩之（㈱ナカボーテック），山本誠（住友大阪セメント㈱）

委員（50音順） 東洋輔（オリエンタル白石株式会社），伊代田岳史（芝浦工業大学），岡崎慎一郎（港湾空港技術研究所），親本俊憲（鹿島建設株式会社），金田尚志（日鉄住金テクノロジー㈱），胡桃澤清文（北海道大学），染谷望（東京理科大学大学院），高谷哲（京都大学大学院），花岡大伸（東亜建設工業），福山智子（北海道大学），細川佳史（太平洋セメント），山本悟（日本防蝕工業㈱）

2年間活動した。報告書は、コンクリート工学における電気化学の基礎、電気化学的手法を用いた性能/物性評価方法の概要とメカニズム、電気化学的物性値に基づくコンクリートの物性評価、コンクリート中の鋼材に対する電気化学的腐食診断、実構造物および供試体での測定、電気化学的防食工法についてまとめている。本報告は、報告書の概要を示すものであるが、詳細については報告書を是非参照いただきたい。

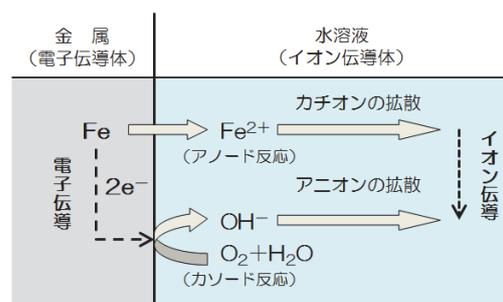


図-1 鉄の表面で生じている電気化学反応の模式図

2. コンクリート工学における電気化学の基礎

2.1 腐食のメカニズム

腐食は、金属が環境の作用によって化学的に侵食される現象である。腐食が起きるためには、溶液の水が存在するか、あるいは高温であることが少なくとも必要である。高温環境では、環境物質と直接化学反応して腐食が進行するのに対し、常温環境では水が存在する場合に電気化学反応によって腐食が進行する。前者を『乾食』、後者を『湿食』と言う。なお、コンクリートは、連続した毛細管空隙を有する多孔材料と見ることができ、その空隙内に存在する水溶液（セメントの水和により生成する水酸化カルシウムの存在によりアルカリ性となる）を介して鋼材が腐食することから、『湿食』に分類される。

ここからは、中性環境で生じている鉄の腐食を例として、腐食のメカニズムを説明する。なお、実構造物では、純鉄に0.2~0.6wt%の炭素を添加した鋼（Fe-C合金）が一般的に用いられるが、本稿では最も基本となる鉄（純鉄）に着目して説明する。鉄の表面で生じている電気化学反応の模式図を図-1に示す。

水に浸漬された鉄の表面では無数の電池（腐食電池または局部電池）が形成され、アノードとカソードが生じている。腐食反応の始まりは、鉄原子が結晶格子を離れ、水中に鉄イオン（ Fe^{2+} ）として移行する過程であり、鉄1原子当たり2個の電子を金属に遊離する。これをアノード反応（酸化反応）と呼ぶ。しかしながら、この反応は単独では起こらず、電気的中性条件により対の反応が必要である。すなわち、水中の溶存酸素は鉄表面上で電子を受け取り、自身は還元されて水酸化物イオン（ OH^- ）を生成する。これをカソード反応（還元反応）と呼ぶ。アノードとカソードが、時間の経過とともに位置を交換

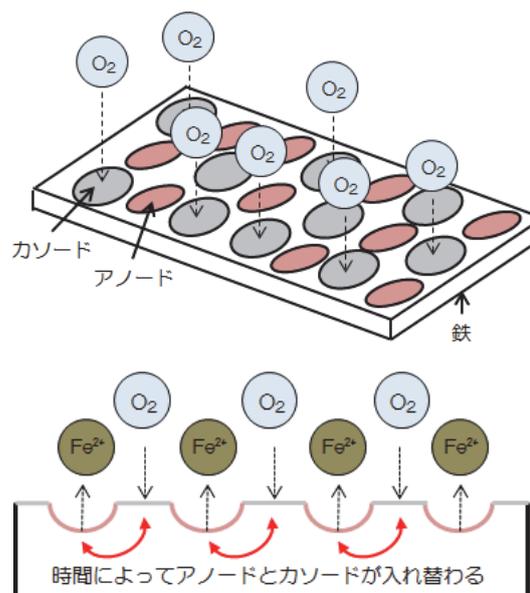
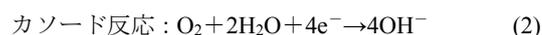
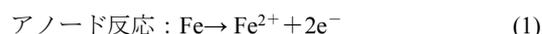


図-2 局部電池モデル²⁾

していく場合には均一腐食（マイクロセル腐食）となり、固定される場合には孔食などの局部腐食（マクロセル腐食）となる（図-2）。



鉄が水中で腐食する過程の総反応式は、次式で表される。



アノード反応とカソード反応が、同一金属上で対になって進行していることを裏付ける実験例を以下に示す。3%食塩水を含有する寒天ゲル中に折り曲げた1本の釘を浸漬する。食塩水中にフェノールフタレインとフェリシアン化カリウムを添加しておくと、図-3のように青

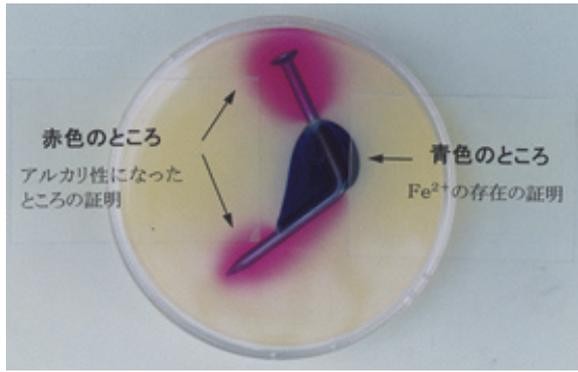


図-3 アノードとカソードの存在

色部分と赤色部分が出現する。青色部分は Fe^{2+} の存在、赤色部分はアルカリ性であることを証明するものである。したがって、このことから、腐食反応が電気化学反応で進行していることを確認できる³⁾。

さて、健全なコンクリートの pH は約 12.5 と言われており、高アルカリ環境下では鋼材表面に不動態皮膜が形成（不動態化）しているため、ほとんど腐食が進行しない。しかし、大気中の CO_2 によって細孔溶液の pH が 11 よりも低下すると不動態皮膜が破壊するため、水と酸素によって腐食が進行する（中性化による腐食）。また、海からの飛来塩分や冬季に散布される凍結防止剤により、コンクリートの外部から塩化物イオンが濃度拡散によって侵入してくると、不動態皮膜が破壊して腐食が進行する（塩害による腐食）。塩害の場合、腐食が始まると $FeCl_2$ を生成するが、さらに加水分解反応によって H^+ を放出するため、腐食部分の pH は低下して腐食が加速される。そのため、腐食速度は中性化よりも塩害の方が大きい。

2.2 コンクリート中の物質および電荷の動き

コンクリート中の鋼材の腐食が発生あるいは進行するためには、 CO_2 や Cl^- といった腐食を誘引する物質や、腐食反応そのものに関与する H_2O や O_2 といった物質が外環境からコンクリート中へ侵入しなければならぬ。したがって、コンクリート中鋼材の腐食を考えると、コンクリート中の物質移動のメカニズムの解明や評価方法は避けて通れない問題である。

セメント硬化体を構成する気、液、固の 3 相では、含水率の変動による気相水（水蒸気）の拡散や空隙水の移流、移流する空隙水中の各種溶存化学種の移動、溶存化学種を固定化する水和物の生成・溶解といった様々な現象が相互作用的に生じている。このようにセメント硬化体中で生じている諸現象を考慮して鋼材腐食に関与する物質の移動を予測するためには、水分移動と Multi-Species 物質移動モデルに、相平衡モデルを組み合せ、これらを動的に連成させる必要がある。

Multi-Species 物質移動モデルにおいて、溶存化学種（イオン）の空隙水中における速度を記述するために

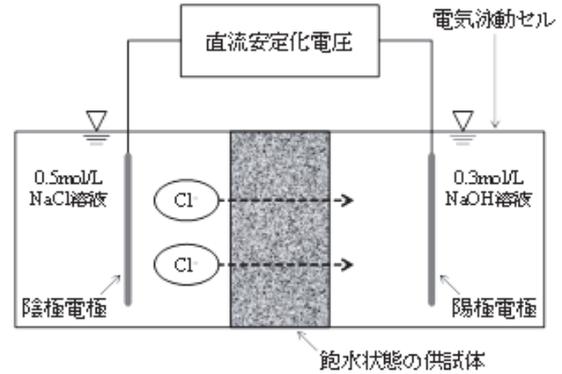


図-4 電気泳動試験（定常法）の例⁴⁾

Nernst-Planck 式が用いられる。Nernst-Planck 式では溶存化学種は濃度勾配および電位勾配を駆動力として移動するとして、拡散係数および移動度を用いてその移動速度が記述される。このうち移動度は単位電位勾配におけるイオンの移動速度で定義され、電場におけるイオンの移動のし易さを示す指標と考えることができる。また、拡散係数と移動度の関係式としては Nernst-Einstein の式が知られており、コンクリート工学分野でもこの知見をベースとして移動度から拡散係数（実効拡散係数として定義される）を算定する方法が規準化されている^{例えは 4), 5)}。

移動度を測定する方法としては電気泳動試験が知られており、例えば、図-4 に示すような電気泳動セルに飽水状態とした円盤型の供試体を設置して、直流安定化電源を用いて直流定電圧を印加し、電気泳動セル内の溶液の pH や各種イオンの濃度を測定することが多い。

コンクリート中の電気伝導は、絶縁体である骨材や固相である水和生成物ではほとんど生じず、コンクリート細孔内に存在する細孔溶液によって生じる。コンクリートの細孔溶液内のイオンの移動は前述の Nernst-Planck 式によって表され、さらに任意断面の電流密度とイオン濃度を考慮すれば、拡散係数と電気抵抗率（あるいはその逆数の導電率）の関係式を導出できる。これらを踏まえると、コンクリート中の電気伝導は、硬化体中の空隙構造（空隙率、屈曲度、収斂度）、各種イオンの濃度、さらには、乾燥環境下においては空隙水量に支配されることが理解できる。

物質の電気的特性としては移動度や電気抵抗率の他に誘電率がある。誘電率は外部から媒質に対して電場を与えたときの誘電分極のし易さの指標である。実務においては誘電率よりも真空の誘電率に対する比である比誘電率がよく用いられる。

3. 電気化学的物性値の測定方法

3.1 鋼材腐食に関連するコンクリートの物性の評価

かぶりの鉄筋保護性能はコンクリートの物質移動抵抗性や含水状態と直接リンクしている。かぶりコンクリー

ト、すなわち、保護層を対象とした電気化学的測定は、コンクリートの物質移動抵抗性や含水状態を評価することを目的として実施される。具体的には、電気化学的物性値として電気抵抗率（導電率）、移動度、誘電率を測定し、それらと理論的あるいは経験的に関連性のある物性が直接的あるいは間接的に評価される。

測定方法については、供試体を対象とした試験方法および非破壊試験方法がある。

例えば、電気抵抗率の測定方法については、電極の形状や配置によって、二電極法、四電極法、4プローブ法（Wenner法）、対極法（一電極法）、埋設電極法に分類される。いずれの方法においても、供試体に電極を設置し、電極間に流れる電流と電圧を計測して電気抵抗を求める。そしてこれを供試体と電極の形状や寸法を考慮したセル定数で除すことで電気抵抗率を評価する。

セル定数は長さの逆数の次元で示され、測定系によっては静電ポテンシャルの偏微分方程式を解くことで理論的に求めることができる。供試体や電極の形状が複雑な場合には、電気抵抗率が既知の溶液に対して電気抵抗を測定し実験的にセル定数を求める方法や、三次元有限要素法により数値的にセル定数を評価する必要がある。

移動度については、図-4に示す電気泳動試験の他に、図-5に示す非定常法に基づく電気泳動試験もある。両試験とも電気泳動によって測定対象イオンを移動させる点では共通しているが、移動度あるいはそれから算出される実効拡散係数の算定式はそれぞれ異なる前提条件下で導かれており、適用にあたっては注意が必要である。

コンクリートの誘電率を測定する方法としては電磁波を用いる方法とインピーダンスを用いる方法がある。国内では、鉄筋探査用の電磁波レーダを用いる事例が多い。国内で普及している主な鉄筋探査用の電磁波レーダ装置は、機種によって電磁波の周波数は異なるが、2.0GHzを中心とした周波数帯である。ただし、誘電率は周波数依存性があるので、市販の電磁波レーダ鉄筋探査機を用いて反射法でコンクリートの比誘電率を調査する場合は、それぞれの機器の特性、測定周波数を考慮する必要がある。

電気化学的物性値に及ぼす諸要因については、機器類の測定条件として電極の形状・寸法や印加電流の周波数など、測定対象側の条件として配筋、コンクリート配合、コンクリートの状態（含水率、塩化物イオンなどの電解質質量、ひび割れなど）、環境条件（温度、湿度など）などがある。これらの詳細については報告書に電気化学的物性値ごとにまとめられている。

3.2 腐食診断方法

(1) 自然電位

コンクリート中鉄筋の自然電位を計測する方法は、ASTMがその評価基準（ASTMC876）を決めて以来、簡

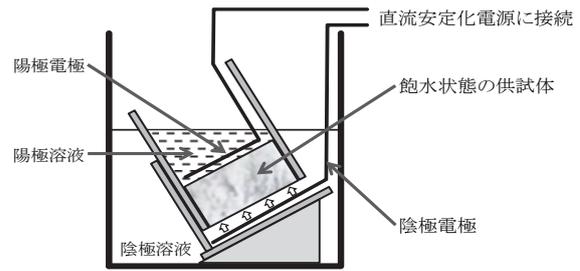


図-5 電気泳動試験（非定常法）

表-2 電位測定に用いられる代表的な基準電極

基準電極	電解液	電位 (V vs. SHE 25°C)
飽和硫酸銅電極 (CSE)	飽和硫酸銅溶液	+0.316
鉛電極(PRE)	Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ (固体)	-0.483
二酸化マンガン電極(MNO)	飽和 Ca(OH) ₂ 溶液	+0.120
飽和塩化銀電極 (SSE)	飽和 KCl 溶液	+0.196
海水塩化銀電極 (SSE[sw])	海水	+0.250
飽和カロメル電極(SCE)	飽和 KCl 溶液	+0.242

表-3 自然電位法による腐食判定基準

-ASTM C 876-

自然電位法 E (mV vs. CSE)	腐食確率
E > -200	90%以上の確率で腐食なし
-200 ≥ E > -350	不確定
E ≤ -350	90%以上の確率で腐食あり

便に実施可能な点からも、各種団体がこれに準じた規格・基準を発行しており、一般に良く使われている。日本でも、土木学会基準（JSCE-E 601-2007）が制定されており、その方法は次のとおりである。すなわち、散水してコンクリート表面を湿潤状態にし、基準電極（飽和塩化銀電極、硫酸銅電極など）を測定面に押し当てて、鉄筋との間の電位差を高抵抗電位差計で測定する。また、コンクリート内部に基準電極（二酸化マンガン電極、鉛電極）を埋め込み、モニタリングする場合もある。なお、表-2に示すように、様々な種類の基準電極が存在する。

さて、本測定に対して広く適用されている判定基準の例を表-3 および表-4に示す。電位が卑なほど腐食している可能性が高く、貴なほど腐食していないとする傾向は共通しているものの、腐食の有無を判定する境界値を明確に規定することはできない点、自然電位判定に関する共通の認識である。

表-4 自然電位法による腐食判定基準
—健全度診断マニュアル—

自然電位 E (mV vs. CSE)	鋼材の腐食のしやすさ
$E > -150$	なし
$-150 \geq E > -250$	軽微
$-250 \geq E > -350$	やや大
$E \leq -350$	大

ここで、ASTM C 876 の電位判定基準は、硫酸銅電極 (CSE)基準で記されている。したがって、他の基準電極を用いて測定した場合には、CSE 基準に換算し直してから判定しなければならない。例えば、25°C の環境下で飽和塩化銀電極(SSE)を用いた場合、鋼の防食電位は-725mV となる。これを CSE 基準に換算するためには、SSE と CSE との電位差を防食電位に加えればよく、 $-725\text{mV} + (-125\text{mV}) = -850\text{mV}$ となる。

(2) 分極抵抗

自然電位法がコンクリート中の鋼材の腐食の可能性を定性的に評価する方法であるのに対して、分極抵抗法は鉄筋の腐食速度を推定する定量的な評価手法である。また、この分極抵抗法は、溶液中の金属材料の腐食性状を評価する手法として、電気化学の分野では良く知られた手法であるが、コンクリート中の鋼材の分極抵抗測定に関しての統一された測定方法や技術が確立されていないのが現状である。

金属と溶液の界面では水分子の吸着などにより、一つの面に正電荷が、もう一方の面に負電荷が連続的に分布する「電気2重層」と呼ばれる領域 (0.01~0.1 μm 程度) が形成されている。この部分は静電容量を持つことから、一定の電荷が充電されることになり、電気回路のコンデンサ C としての性質を持つ。また、対極からの印加電流は、溶液を介して与えられる。ここで、コンクリート構造物中の鉄筋の分極抵抗を測定する場合、コンクリート表面に設置された対極と鉄筋までのかぶりコンクリートが溶液に相当する。よって、この測定系で測定される全抵抗には、液抵抗 (コンクリート抵抗) R_s が含まれることになる。さらに、 Fe^{2+} になるための電荷のやり取りや、酸素が鉄の表面まで移動するにはある程度の時間を要するので、これらの移動のし易さ・し難さ W (ワールブルグインピーダンス) 等が電荷移動抵抗を示す。このような複雑な電気的特性に対して、電氣的に等価な応答を表す等価回路として、図-6 に示す簡易型モデルなどが提案されている。

このモデルに示される分極抵抗 R_p を直接求めることはできないので、鋼材の自然電位の状態から電気化学的外乱 (分極) を与えて、その応答から求める。すなわち、

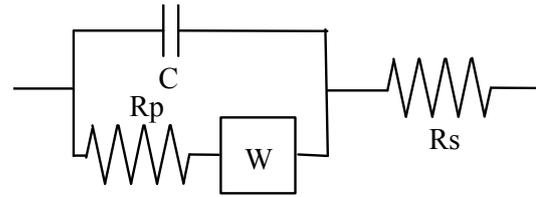


図-6 等価回路モデルの例

表-5 分極抵抗法による腐食判定基準

腐食速度測定値 I_{corr} (iA/cm ²)	腐食速度の判定	分極抵抗の値 R_p (k $\Omega \cdot \text{cm}^2$)
0.1~0.2 未満	不動態状態	130~260 より大
0.2 以上 0.5 以下	低~中程度の腐食速度	52 以上 260 以下
0.5 以上 1.0 以下	中~高程度の腐食速度	26 以上 52 以下
1.0 より大	激しい、高い腐食速度	26 未満

対極から鋼材に対して微弱な電流 (ΔI) を印加して、鋼材の自然電位を中心として微小に電位を変化させる (ΔE)。この電位変動と印加電流をエレクトロメーターと電流計で測定して、次式に示す抵抗 R を算出する。この時、過度な電流を印加すると線形分極範囲を逸脱するため、電位変動 ΔE は $\pm 10\text{mV}$ 以内となるように制御される。

$$R = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (4)$$

なお、一例として、CEB による腐食判定基準を表-5 に示す。

4. 電気化学的物性値に基づくコンクリートの性能/品質の評価

硬化過程の物性評価、硬化コンクリートの含水状態および物質透過性の評価方法、コンクリートの電氣的物性値に基づく鋼材腐食リスクの評価方法など、電気化学的測定方法に基づく評価手法は多岐にわたり、研究段階の試験方法から規格化・規準化に至った試験方法など、その開発レベルも手法によって大きく異なる。ここでは評価対象ごとにそれらの特徴について述べる。

4.1 硬化過程の物性評価

凝結またはコンクリートの硬化度合を把握する手法として、フレッシュ時にコンクリート中へ電極を挿入して導電率を測定し、その経時変化とプロクター貫入抵抗値の相関関係から凝結を推測する方法、ならびに、型枠存置中に消費される水分量を間接的に評価して圧縮強度を推定する方法がある。

表-6 AASHTO Designation: TP 95-11 における
遮塩性能の判定区分⁶⁾

Surface Resistivity Test		
Chloride Ion Penetration	100-mm × 200-mm (4-in. × 8-in.) Cylinder (kilohm-cm) <i>a</i> = 1.5	150-mm × 300-mm (6-in. × 12-in.) Cylinder (kilohm-cm) <i>a</i> = 1.5
Hgih	< 12	< 9.5
Moderate	12-21	9.5-16.5
Low	21-37	16.5-29
Very Low	37-254	29-199
Negligible	> 254	> 199

a = Wenner probe tip spacing

4.2 硬化コンクリートの含水状態の評価

一般に、乾燥状態が進むとコンクリートの電気抵抗率（導電率）は増加（減少）する。また、飽和度（各相対湿度での含水率／飽和含水率）で整理すると、コンクリートの種類によらず同一の飽和度で同一の電気抵抗率を示す。この関係性を利用して、電気抵抗率または導電率を測定することでコンクリート中の含水量を測定することが可能である。同様に、空隙水の連続性に影響を受ける比誘電率によっても、含水状態を評価することが可能である。

4.3 遮塩性の評価

コンクリートの電気化学的測定による性能／品質評価の方法において、最も開発が進んでいるものとしては、急速塩化物イオン透過試験（Rapid Chloride Penetration Test）に代表される遮塩性能の迅速評価手法とそれを活用した耐久性設計法が挙げられる。

コンクリートの遮塩性能の評価方法としては、以前から電気泳動セル試験時の通過電荷量に基づく ASTM C 1202 (AASHTO T-277) が知られている。近年では、非定常法あるいは定常法と呼ばれる電気泳動試験が国内外で規準化されている。非定常法としては NT BUILD 492 が、定常法としては JSCE-G 571 や NT BUILD 355 が認知されている。また、4プローブ法（Wenner 法）により飽水状態の円柱型供試体の電気抵抗率を評価し、その試験結果と表-6 に基づいて遮塩性能を評価する AASHTO TP-95 もある。なお、表-6 に示される電気抵抗率は $\phi 100 \times 200$ mm または $\phi 150 \times 300$ mm の円柱供試体に対して電極間隔 1.5-in. にて得られたものを対象としており、供試体形状・寸法ならびに電極間隔が異なる場合はこの基準値を適宜修正する必要がある。

報告書内では、これらの試験結果を用いた耐久性評価に関して、北米、北欧、シンガポール、インド、中国の

表-7 電気抵抗率による腐食リスクの
判定規格案の事例⁸⁾

Concrete resistivity			Risk of corrosion
Ω m	k Ω cm	Ω cm	
> 1000	> 100	> 100 000	Negligible
500 – 1000	50 – 100	50 000 – 100 000	Low
100 – 500	10 – 50	10 000 – 50 000	Moderate
< 100	< 10	< 10 000	High

事例を解説しているもので、併せて活用されたい。

4.4 透水性や透気性との関連性

電気抵抗率と不飽和透水係数の関係については、地盤工学分野での検討例が非常に豊富であり、Archie 式ならびに Worthington による地層電気抵抗率係数と透水係数の関係式およびその適用限界が示されている一方で、それらの発展的な研究も精力的に実施されている。コンクリート工学分野でも数は少ないが、電気抵抗率と水の拡散係数の関係について実験的研究がなされており、結合材の種類によらず、電気抵抗率の増加により、水の拡散係数は概ね減少傾向にあるものの、その程度は結合材の種類によって大きく異なることが報告されている⁷⁾。

コンクリートの透気性については、それによってコンクリートの品質を評価する場合には、電気化学的特性値によってコンクリートの含水率を評価し、コンクリート中の含水の影響を排除したり、コンクリート中の含水率と透気性を組み合わせ、ノモグラムなどによりコンクリートの品質を評価したりする事例がある。

4.5 鋼材腐食リスクの評価

電気抵抗率を利用したコンクリート中の鋼材の腐食リスクを評価する方法として、グレーディングによって半定量する方法が複数提案されている。例として、RILEM TC 154-EMC の報告書のサマリーに記載されている評価方法を表-7 に示す。報告書には表-7 以外の提案についても取り纏めているので参考にされたい。いずれの提案においても、電気抵抗率が小さいほど鋼材の腐食リスクは大きくなるようにグレーディングされている。このような方法が成立するのは、以下の理由によると考えられる。

- (1) 腐食因子である塩化物イオンや水が多いコンクリートでは、コンクリートの電気抵抗率は小さくなる傾向を示す。
- (2) 鋼材の腐食電池の回路にコンクリートも介在しており、コンクリートの電気抵抗率が小さいと、腐食電流が流れやすくなる。
- (3) 腐食因子である塩化物イオン、水、酸素は空隙構造がポーラスであると容易にコンクリート中へ浸透する。鋼材腐食が問題になるようなコンクリートの含

水率は一般的に高く、そのような条件であれば、電気抵抗率を、物質移動抵抗性を評価する指標として利用することが可能である。

5. コンクリート中の鋼材に対する電気化学的手法による腐食の評価

電気化学的手法によってコンクリート中の鋼材腐食の状態を把握する場合、コンクリート表面から鋼材の自然電位や分極抵抗を測定することが一般的である。そのため、介在するかぶりコンクリートが測定結果に影響を及ぼすと考えられる。したがって、本委員会では、セメント・混和材の種類、かぶりコンクリートの状態、および鋼材の種類が、測定結果に及ぼす影響を整理した。

例えば高木らは、自然電位と鉄筋腐食度の関係から、中性化による鋼材腐食は、腐食度 1（腐食無し）と腐食

度 2（鉄筋表面に僅かな錆を生じる）の境界が -50mV vs. SSE となり、塩害による鋼材腐食を対象とした既往の基準より、貴な電位で鉄筋腐食が生じるとしている。このことは、中性化により、かぶりコンクリートの電位降下が大きくなるためと考察している⁹⁾。

この様な文献調査を踏まえると、コンクリート中の鋼材腐食の状態を電気化学的手法によって正しく把握するためには、かぶりコンクリートの諸特性や鋼材の種類等が測定結果に及ぼす影響を定量的に理解することが重要であると考えられる。本委員会活動を通じてまとめられたコンクリート中の鋼材に対する電気化学的腐食診断・測定における諸要因の関係を、図-7 に示す。また、各種要因が電気化学的測定結果に及ぼす影響を表-8 に示す。さらに、実構造物において、電気化学的測定する際の留意点を表-9 に整理する。

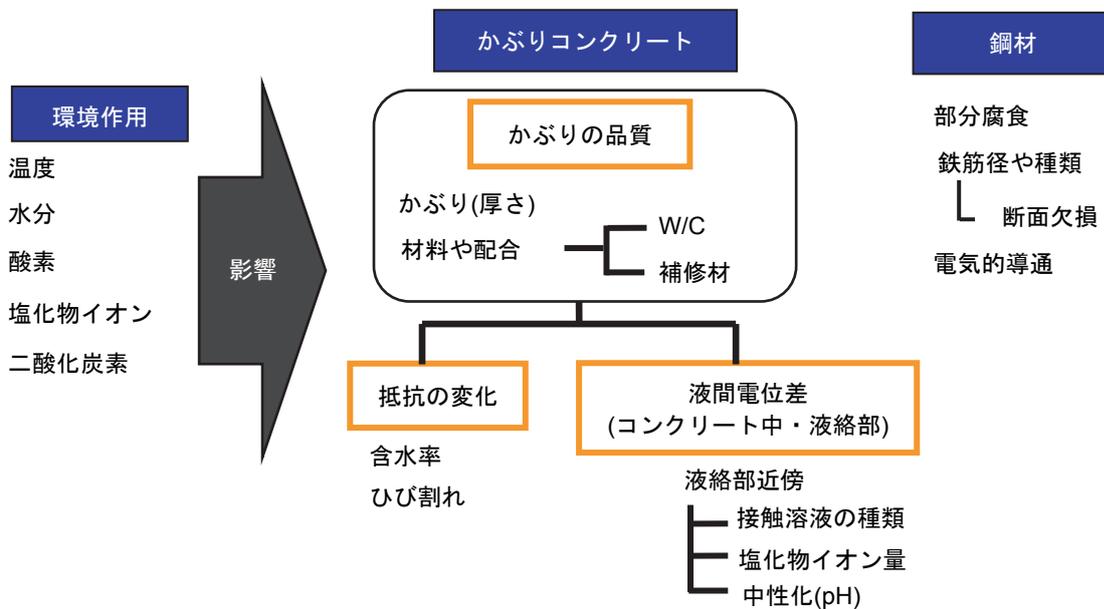


図-7 各種条件が測定結果に及ぼす影響

表-8 各種要因が電気化学的測定結果に及ぼす影響

		比抵抗 (大)	pH (低)	塩化物イオン量 (多)	鋼材同士の電氣的導通	脱気環境 (水中)	ピッチ (狭い)	鋼材の分極抵抗 (大)	鋼材径 (大)
自然電位法	自然電位								
	貴	○	○						
	卑			○	○	○			
分極抵抗法	液間抵抗	大	○	○					
		小			○		○		
	分極抵抗	大							○
		小	○			○		○	○

表の読み方：かぶりコンクリートの比抵抗が大きいと、自然電位の測定結果が貴になり、分極抵抗の測定結果が小さく、示される可能性がある。

表-9 実構造物で電気化学的手法により鋼材の腐食を評価する際の留意点

対象の方法	留意点
共通	気温やコンクリートの含水率など、測定時の諸条件の影響を受けて変動するため、予め測定値の変動要因を適切に把握しておき、構造物の置かれた状態を踏まえた上で、測定結果を評価することが重要である。
	必要に応じて塩化物イオン濃度や中性化深さの測定、およびはつり調査などを同時に行い、電気化学的測定結果を補完し、鋼材の腐食を診断することが望ましい。
	鋼材はコンクリートと直接に接していなければならない。すなわち、腐食ひび割れが進行し、鋼材とコンクリートとの付着（導通状態）が確保されていないような場所には適用できない。したがって、測定箇所は、事前にテストハンマー等で打音調査を行い、コンクリートの浮き・剥離・ひび割れ等のない位置を選定する。
	エポキシ樹脂塗装鉄筋や亜鉛メッキ鉄筋などの表面被覆鉄筋には原則として適用できない。なお、ステンレス鉄筋については、研究レベルでの適用事例が多数ある。
	コンクリート表面が常に水でおおわれているような箇所（常時水に浸かっている場合）には適用できない。また、散水時の余剰水（浮き水）は排除してから測定をすること。
	迷走電流が存在しているところや強い磁場が作用している箇所には適用できない。
	作用電極接続箇所の腐食生成物等は除去し、導通を確保する。
自然電位法	実際の鋼材の腐食状態と腐食判定基準による評価が一致しない場合がある。このため、電位の等高線図などを作成して、構造物全体の自然電位の分布を確認することが重要である。
分極抵抗法	コンクリート表層部が非常に乾燥し電氣的に絶縁状態に近い場合や、コンクリート表面が塗装等の絶縁材で被覆されている場合には適用できない。2004年のRILEMの報告書 ¹⁰⁾ によると、コンクリートの電気抵抗率が1000Ωmより大きい場合には測定が困難であるとされている。したがって、電気抵抗率の高い断面修復材などが用いられている箇所での適用には十分に注意する必要がある。ただし、塗装されている場合でも、コンクリート表面の塗装を剥し、表層部を湿潤状態にすれば測定できる。
	コンクリート表面が平滑な面で測定する。もし平滑でない場合には、グラインダー処理や水溶性ジェルを塗布するなどして、コンクリート表面とプローブの対極の接触抵抗が大きくなるようにする。

7. おわりに

本研究委員会では、コンクリート工学分野で初めて電気化学を学ぶ技術者・研究者や、実務で電気化学的計測手法を活用しながら、理論的な背景を十分に理解していない技術者・研究者に、正しく電気化学的測定を理解していただける報告書を作成した。本報告書は、一般的にわかりにくいと言われる電気化学の理論についても言及しているため、“わかりやすい〇〇”といったガイド本や“How to 本”のような、読みやすくわかりやすい反面必ずしも本質的な議論となっていない書籍類と異なり、根気よく読み進める必要があるが、熟読することで理論的な知識、最新の技術、実構造物の測定での留意点等に対する本質的な理解が得られる内容となっている。

なお、本研究委員会の報告会は、2015年9月7日（月）に芝浦工業大学豊洲キャンパスにて、委員会活動の成果発表と論文発表を予定している。

最後に、本報告書を取り纏めるに当たりご協力いただいた各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 西澤紀昭, 岸谷孝一: コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I), 技報堂出版, p.23, 1986.5
- 2) 藤井哲雄: 初歩から学ぶ防錆の化学, 工業調査会, p.39, 2001.3
- 3) (株)ナカボーテック: 新入社員研修テキスト, p.5, 2014.4
- 4) JSCE-G 571-2013: 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案), 2013年制定コンクリート標準示書[規準編]土木学会規準および関連規準, 土木学会, pp.363-371, 2013
- 5) NT BUILD 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from

Non-steady-state Migration Experiments, Nordtest, 1999

- 6) AASHTO TP 95-11: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Association of State and Highway Transportation Officials, 2011
- 7) 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, pp.49-57, 1992
- 8) R. Polder, et al.: RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, 'Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete', Materials and Structures, Vol. 33, pp. 603-611, 2000
- 9) 高木猛志, 中川元宏, 服部篤史, 宮川豊章: コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1655-1660, 2003.7
- 10) RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Materials and Structures, Vol.37, pp.623-643, 2004