

論文 コンクリート中の酸素還元反応の特徴

左藤 眞市*1・土井 康太郎*2・高谷 哲*3

要旨: 本稿では「JCI-TC222A コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会」の活動の一環として、コンクリート中の酸素還元反応の特徴について研究した成果を発表する。水を十分含んだコンクリート中の鉄筋の腐食進行は、還元反応によって律速される。一方、これまではコンクリート中の電気化学測定によるカソード分極曲線において酸素拡散限界電流を明確に測定できていなかった。そこで本研究では分極速度の影響を調べ、水溶液中で通常行われる分極速度の 100 分の 1 以下にすることで酸素拡散限界電流が見いだされることを示した。また、コンクリート中の酸素拡散に対するかぶりの影響について検討した。

キーワード: 腐食, 酸素還元反応, 電気化学, 分極速度, 拡散限界電流

1. はじめに

著者らは「JCI-TC222A コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会 (委員長: 高谷哲)」の活動の一環として、コンクリート中の酸素還元反応の特徴について研究した。これは、雨がかり環境など水が定期的に浸入することが考えられるコンクリート中では、かぶり 20 mm の位置においても湿潤状態を維持しやすい (乾燥しにくい) ことが既往の研究¹⁾で示されており、このようなコンクリート内部が湿潤状態を維持しやすい環境に対し、コンクリート中の腐食進行過程にある鉄筋腐食の律速と考えられる還元反応において、酸素還元反応の役割を明確にするためである。一方、腐食反応の検討において、短時間で計測可能という特長から電気化学測定が行われることが多い。この電気化学測定において水溶液中で自然電位から動電位法で分極する場合、電極界面でのヒステリシスを避けるために、分極速度を十分遅くして 20 mV/min 程度で測定されることが多い。しかしながら、コンクリート中でこの 20 mV/min 程度の分極速度を適用して酸素還元反応の拡散現象を考察しようとしても、分極に対して得られる電流密度が一定にはならない²⁾。すなわち、拡散限界現象をとらえることができない。著者らは、このような結果となる理由として、コンクリート中の酸素拡散現象が水溶液中とは異なると考え、分極速度すなわちヒステリシスの影響を調べることとした。また、水溶液中では電極表面の酸素の拡散層厚みは無攪拌を想定しても 1 mm 以下と考えられている⁴⁾。しかし、湿潤状態にあるコンクリートでは、かぶりによる酸素の拡散抑制を考慮する必要がある⁶⁾。この点を考慮したコンクリート中の酸素拡散モデルを本研究で検討し、コンクリート中の酸素還元反応の特徴を考察することとする。

2. 実験方法

2.1 電気化学測定に供した供試体

供試体のコンクリート配合は、表-1 のとおりである。なお、粗骨材の最大粒径は 15 mm である。

表-1 コンクリート配合

| 水セメント比 | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------|--------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | 水 <i>W</i> | セメント <i>C</i> | 細骨材 <i>S</i> | 粗骨材 <i>G</i> |
| 0.6 | 172 | 287 | 873 | 968 |

※高性能 AE 減水剤をセメント重量比で 1% 加えた。

スランブ値は 12.5 cm、空気量は 4.8% であり、打設の際に過振動を行った。供試体のサイズは、100 mm × 100 mm × 300 mm であり、100 mm × 300 mm 面の長手方向中央に沿って、かぶり 20 mm の位置に直径 19 mm の黒皮付き丸鋼 (長さ 350 mm、両端 75 mm エポキシ塗装、無塗装部 200 mm) を埋設した。養生は気中養生を 28 日間行い、電気化学測定に供するまでに 1 年以上温度と湿度が調整された実験室 (20 °C, 60%RH) 内に放置した。以上の条件を満たす供試体を 2 体用意した。

2.2 供試体への酸素供給方法

コンクリート中の水に十分空気を溶存させるため、各電気化学測定を行う前に供試体を 60 °C の恒温槽内で 7 日間乾燥させたのち、室温の水道水に 1 日間浸せきして湿潤状態とした。一例として、前節のとおり用意した供試体 2 体のうちの 1 体の供試体について 7 日間乾燥に対する重量変化率を測定した結果を図-1 に示す。ここで、乾燥前の供試体重量は 7,715 g であった。乾燥 7 日後の供試体重量は 7,589 g (重量変化率: -1.63%) と減少し、その後の 1 日間の水道水浸せきによって供試体重量は 7,871 g となり、乾燥前の重量以上に戻ることを確認した。

*1 大阪産業技術研究所 金属表面処理研究部研究部長 博士 (工学) (正会員)

*2 物質・材料研究機構 構造材料研究センター主任研究員 博士 (工学)

*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士 (工学) (正会員)

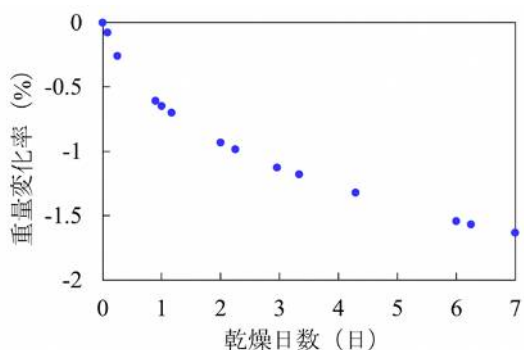


図-1 供試体の乾燥による重量変化率

2.3 電気化学測定条件

供試体のかぶり面 (100 mm×300 mm) に対し、100 mm×150 mm のステンレス鋼板 (電気化学測定中のかぶり面での通気を確保するためにパンチングメタル製を使用) を、含水した紙ワイパーを介して接触させ対極とした。また、同じかぶり面に対し、参照極として銀・塩化銀電極 (NaCl 濃度 : 3 M, 0.195 V vs. SHE) を、含水したスポンジを介して接触させた。埋設した鉄筋を作用極 (面積は、無塗装部の 200 mm 全面、すなわち $1.9 \times 3.14 \times 20 \text{ cm}^2$) とし、室温の大気中にて自然電位から -1.2 V を目安に動電位法でカソード分極を行った。

分極速度は、 20 mV/min を基準に、それよりも 10 倍、100 倍速い分極速度 (200 mV/min , 2000 mV/min) と、 $1/10$, $1/100$ となる遅い分極速度 (2 mV/min , 0.2 mV/min) の 5 水準を行った。何れの水準も 2.1 節に示した供試体 2 体に対して行い、前節に示した供試体への酸素供給を行ったのちに電気化学測定を行った。なお、最も遅い分極速度 0.2 mV/min の測定については、測定に 4 日間程度を要するため、その期間中に供試体の濡れ状態の変化および供試体のかぶり面に接触させた対極ならびに参照極の接触抵抗の影響を避けるために、写真-1 のとおり供試体を深さ 1 cm 程度の水道水を張ったコンテナの中に入れ、ラップで全体を覆い乾燥を防いだ。ほかの水準に対しては、このような操作を行わずに大気中で測定を行った。



写真-1 0.2 mV/min 測定時の様子
(測定後にラップをはずした状態で撮影)

3. 結果と考察

3.1 供試体の乾燥

図-1 に示した供試体の乾燥について検討することで本実験の乾燥に関する考察を行う。表-1 のコンクリート配合と供試体サイズとから、供試体には計算上打設時で水が 516 g, セメントが 861 g 含まれていることになる。一方、 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ での 7 日間乾燥によって、1 日間の水道水浸せき前後の重量差から 282 g の水が供試体打設時から乾燥したことになる。このことは、 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ での 7 日間乾燥によって、供試体中に含まれる水の総量 (配合した水を基準にして 234 g) が、セメント量の 0.27 倍になったと考えることができる。

配合した水のうち、セメントの水和反応によって化学的に消費される水の量 (水和水 (結晶水) を含む) は、セメント量の約 0.27 倍以上^{7,8)}と言われている。このほかに、コンクリート中には物理的に拘束されるゲル水が、セメント量の約 0.15 倍⁹⁾あると言われており、残りは自由水と考えられている⁸⁾。このため、本実験の $60 \text{ }^\circ\text{C}$ での 7 日間乾燥によって、供試体中の自由水とゲル水のほとんどが供試体外に散逸したと考えることができ、このような乾燥によって供試体中に十分空気を侵入させることができたと考えることができる。すなわち、本実験の供試体乾燥条件は、本実験の目的である「コンクリート中の水に十分空気を溶存させる」手段として有効であったと考えることができる。

3.2 速い分極速度について

図-2 に、供試体に対して分極速度を、 20 mV/min , 200 mV/min , 2000 mV/min とした結果を供試体別に示す。

自然電位にバラツキが見られるものの、 20 mV/min の分極速度を基準にした場合、これよりも速い分極速度で供試体をカソード分極すると、同じ電位に対して電流密度が増加する傾向が見られた。分極速度が速くなると、その電位の本来の定常状態に追いつくことができない状態となり、見かけより貴な (高電位な) 電位状態の電流密度計測になることを考慮すると、この同じ電位に対する分極速度増加による電流密度増加は、図-2 の見かけより、実際はさらに大きかったと推察することができる。このような結果となったのは、分極速度を速くすると、ある電位で作用極界面で起きる酸素還元反応の絶対量が、時間が短いために減り、作用極界面で消費されないまま残存する酸素量が多くなるためと考えられる。その結果、その後の動電位法による測定中の電位に対して、反応する物質 (酸素) が相対的に多くなるため作用極界面での反応量、正確には電流密度が大きくなったと考えることができる。なお、供試体 2 の 2000 mV/min 分極で見られる電流密度の振動は、分極速度が速すぎて作用極界面の状態が安定しないために起きる現象と考えられる。

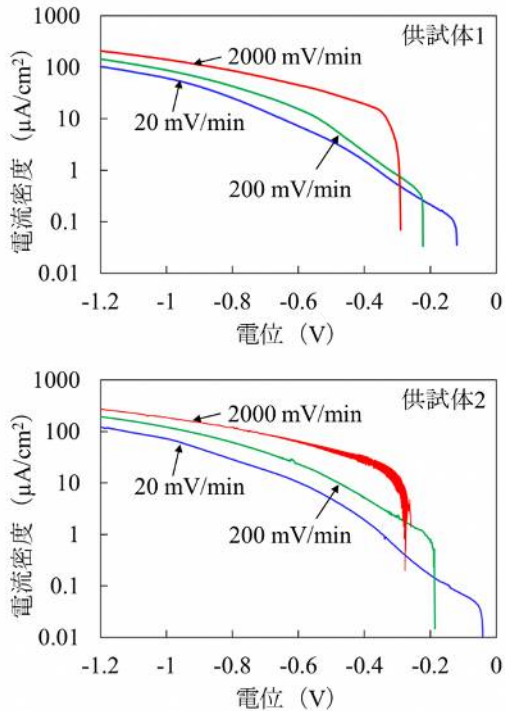


図-2 カソード分極曲線（分極速度が速い場合）

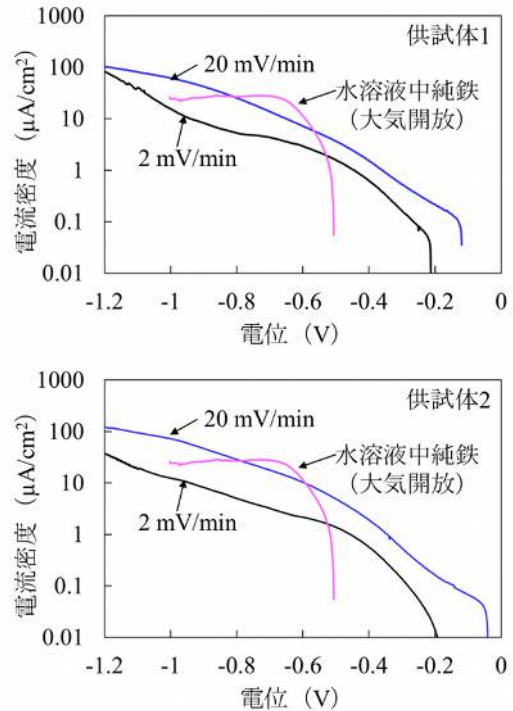


図-3 カソード分極曲線（20 mV/minと2 mV/min）

3.3 分極速度 20 mV/minと2 mV/minについて

図-3に、供試体に対して分極速度を、20 mV/min、2 mV/minとした結果を供試体別に示す。合わせて図-3には、比較のために室温の大気開放下にある0.1 MのNaOH水溶液中にて純鉄（99.5%以上）を作用極とし、参照極として2.3節に記したものを使用した20 mV/minによるカソード分極曲線（自然電位から-1.0 Vまで、対極：白金線）を示す。なお、作用極とした純鉄は、電気化学測定に供する前に、作用面を耐水研磨紙（SiC）で#800まで研磨したのち、室温のイソプロパノール中で5分間超音波洗浄を行った。

(1) 実験結果

図-3のとおり、水溶液中の拡散限界電流密度は20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となり、既往の文献⁵⁾のとおりとなった。一方、供試体については、前節と同じ傾向となった。すなわち、分極速度の上昇にともない（低下にともない）、同じ電位に対して電流密度が増加する（減少する）傾向が見られた。

また、水溶液中では拡散限界電流密度が確認された分極速度である20 mV/minの1/10である分極速度（2 mV/min）を供試体に適用しても、分極に対して得られる電流密度が一定にはならなかった。このことは、本実験の供試体に対して分極速度として2 mV/minを適用してカソード分極を行っても、酸素の拡散限界現象をとらえることができなかつたことを意味する。すなわち、作用極界面での反応において拡散律速にはならなかつたことを意味し、Tafel式に従う電荷移動律速から拡散律速に移

行する途中段階を、この分極速度2 mV/minで計測したと考えることができる。このことは、本実験の供試体に対して分極速度20 mV/minを適用した場合にも、同様のことが言える。すなわち、-0.8 Vより卑な（低電位な）電位では、水溶液中で見られる酸素拡散限界電流密度より大きな電流密度が得られたことから、電荷移動律速から拡散律速に移行する途中段階を計測したと考えることができる。

(2) 考察

この電荷移動律速から拡散律速に移行する途中の段階についてさらに詳しく考察する。水溶液中では電極（今の場合、作用極）表面の酸素の拡散層厚み（最大1 mm程度^{4,5)}より遠くの領域（以下、沖合と称する）には酸素が十分存在するため、20 mV/minによるカソード分極を行っても沖合の酸素濃度は一定濃度に維持される。しかし、コンクリートの場合は、この沖合に相当する酸素濃度が容易に低下すると考えられる。これは、コンクリートが酸素拡散の妨げになると考えることができるためである⁶⁾。したがって、自然電位からのわずかな分極によって、コンクリート中では沖合と拡散層（拡散層の最大厚みとして1 mm程度）との界面にあたる拡散層最外位置の酸素濃度が容易に低下する。この影響で電極界面の酸素濃度も低下するが、その酸素濃度の低下によって電極界面と拡散層最外位置との間に酸素濃度の勾配（電極界面の酸素濃度の方が低下する）が起きる可能性が考えられるが、仮にこの濃度勾配が発生したとしても、その濃度勾配は拡散律速となる濃度勾配より小さい（電極界

面への濃度勾配による酸素供給速度はあまり上昇しないと考えられる。図-3 のとおり、結果的にコンクリート中では、このわずかな分極によって電極界面の酸素濃度が、Tafel 式に従う電荷移動律速の場合に必要な酸素濃度より小さくなる傾向が容易に起こり得ると考えることができる。すなわち、カソード分極において、電極界面の酸素濃度が拡散律速となる濃度より高かつ Tafel 式に従う電荷移動律速に必要な濃度より低くなる状態が、水溶液中に比べてコンクリート中では起きやすくなると考えることができる。

今までの考察から分かるとおり、コンクリート中ではカソード分極を行うと、酸素の拡散層最外位置（電極界面から最大 1 mm 程度）の酸素濃度が容易に低下し電極界面への酸素供給が小さくなるが、動電位法で分極を継続すると、徐々に電荷移動反応が起きやすくなるため電極界面の酸素消費が速くなる。この電極界面での酸素消費速度上昇による酸素濃度低下と酸素拡散層の最外位置（電極界面から最大 1 mm 程度）での酸素濃度低下とのバランスによって、この拡散層における酸素の濃度勾配が決まり電極界面への酸素供給速度が決定される。ここで水溶液中では、後者の酸素拡散層の最外位置での酸素濃度低下が起これないため、自然電位からの分極によって単調に酸素拡散層の濃度勾配が上昇し、容易に拡散律速に達するが、コンクリート中では、後者の酸素拡散層の最外位置での酸素濃度低下が、コンクリートの酸素拡散の抑制の影響によって比較的容易に起きるため、自然電位からの分極による酸素拡散層の濃度勾配が容易に大きくなり得ると考えることができる。すなわち、本実験の供試体に対する分極速度 2 mV/min の結果において、酸素拡散限界電流密度を確認することができなかったのは、まだこの分極速度 (2 mV/min) では、動電位法で分極している最中のある電位での状態が定常状態となっていない、すなわち酸素拡散層の最外位置での酸素濃度が定常状態にはならず低下が起きることが原因と考えられる。

また、本実験の供試体に対する分極速度 20 mV/min の結果において、水溶液中で見られる酸素拡散限界電流密度より大きな電流密度が見られたのは次のとおり考察することができる。すなわち、自然電位から分極にしたがって、酸素拡散層の最外位置での酸素濃度低下が起こることで作用極界面への酸素供給量が小さくなり、作用極界面の酸素濃度が低下し、分極前半（自然電位から -0.8 V 付近まで）では水溶液中での分極に比べて電流密度が小さくなった。一方、このことは結果的に作用極界面で酸素が消費されずに残存する量が多くなることにつながり、その濃度が拡散律速となる濃度より高かつたために、分極後半（-0.8 V より卑な電位）では水溶液中で

見られる酸素拡散限界電流密度より大きな電流密度が見られたと考えることができる。ここで言うコンクリート中の拡散律速と考えられる電流密度は、コンクリートの酸素拡散抵抗を考慮に入れると、水溶液中で考えられる酸素拡散層の最外位置での酸素濃度よりコンクリート中ではこの酸素濃度が低下すると考えられることから、水溶液中で見られる 20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度より低下することが推察される。

3.4 分極速度 0.2 mV/min について

前節の考察から、さらに分極速度を小さくすると酸素拡散層の最外位置（電極界面から最大 1 mm 程度）での酸素濃度の低下が分極中のある電位で起きない状態、すなわち定常状態をつくることができる。図-4 に、供試体に対して分極速度を、20 mV/min, 0.2 mV/min とした結果を供試体別に示す。合わせて図-4 には、比較のために室温の窒素脱気下（電気化学測定前に溶液に対して数時間の窒素脱気を行い、電気化学測定中には作用極に影響を与えない程度の軽微な窒素脱気を溶液で行った）にある 0.1 M の NaOH 水溶液中にて純鉄 (99.5 %以上) を作用極とし、参照極として 2.3 節に記したものを使用した 20 mV/min によるカソード分極曲線（自然電位から -1.2 V まで、対極：白金線）を示す。なお、作用極とした純鉄は、前節と同様に電気化学測定に供する前に、作用面を耐水研磨紙 (SiC) で #800 まで研磨したのち、室温のイソプロパノール中で 5 分間超音波洗浄を行った。

図-4 のとおり、本実験の窒素脱気下にある水溶液中の実験結果については、分極に対して電流密度が一定 (4

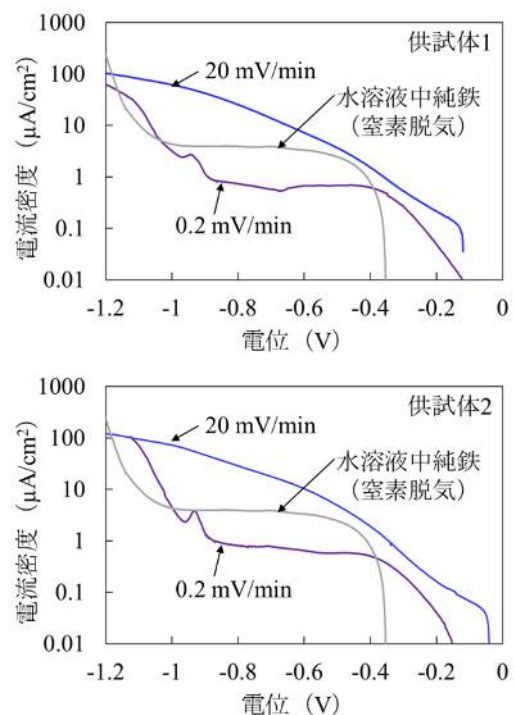


図-4 カソード分極曲線 (0.2 mV/min)

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度)となる現象が確認された。これは酸素の拡散限界現象を確認したことを意味し、本実験では完全に酸素を脱気することができなかつたと考えられる。このように水溶液から完全に酸素を除去することは困難である。一方、図-4 から分かるとおり、本実験の供試体に対して分極速度を $0.2\text{mV}/\text{min}$ とした場合、分極に対して電流密度が一定となる領域が見られた。すなわち、酸素の拡散限界現象をとらえることができた。このときの拡散限界電流密度は、供試体2体とも $0.65\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度であり、前節の大気開放下にある水溶液中の拡散限界電流密度のおよそ $1/30$ であった。この酸素拡散限界電流密度は、本実験で比較のために行った窒素脱気下の水溶液中で得られる酸素拡散限界電流密度 ($4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度)より小さいことから、水で満たされたコンクリート中では、水溶液中の窒素脱気よりも酸素欠乏が容易に起こると推察することができる。

なお、図-4 の分極速度 $0.2\text{mV}/\text{min}$ に対して、何れの供試体についても -0.9 から -1.0V 付近にピークが見られた。このピークは、2.2 節に示した乾燥によって生じたオキシ水酸化鉄 (FeOOH) がマグネタイト (Fe_3O_4) に還元することによって起きる反応に帰属すると考えられる¹⁰⁾。すなわち、2.2 節に示した乾燥によって、それまで水で濡れていた状態の鉄筋に対し、酸素が供給されることにより酸素が十分存在する環境下で生成するオキシ水酸化鉄が生成したが¹¹⁾、このオキシ水酸化鉄が本実験のカソード分極によってマグネタイトに還元されたと考えられる。

3.5 コンクリート中の酸素拡散モデル

今までの考察から、コンクリートには酸素拡散の抑制となる作用が確認された。本節では、このことを反映するコンクリート中の酸素拡散モデルを検討し、本実験の供試体から得られた酸素拡散限界電流密度 ($0.65\mu\text{A}/\text{cm}^2$) からコンクリートの酸素拡散係数を求める試みを行う。

(1) コンクリート中の酸素拡散モデル

コンクリート中の鉄筋に対しては、鉄筋と接触している水の水膜による酸素拡散抵抗のほか、その外側に存在するコンクリートによる酸素拡散抵抗を検討する必要がある。このとき、定常状態では、鉄筋と接触している水膜中の酸素拡散速度と、その外側に存在するコンクリート中の酸素拡散速度とが同じになると考えることができる。このような定常状態近似¹²⁾を適用することで、コンクリート中の酸素拡散モデルを検討することとする。

ここで、簡単のために水溶液中の電極界面に生成する酸素の静止拡散層厚み δ を既往文献⁵⁾を参考に $500\mu\text{m}$ とし、鉄筋と接触している水の水膜厚さ t が $500\mu\text{m}$ 以上の場合を考える。このとき、この水膜の外側に存在するコンクリートの厚みを L とすると、かぶりは $t+L$ となる。

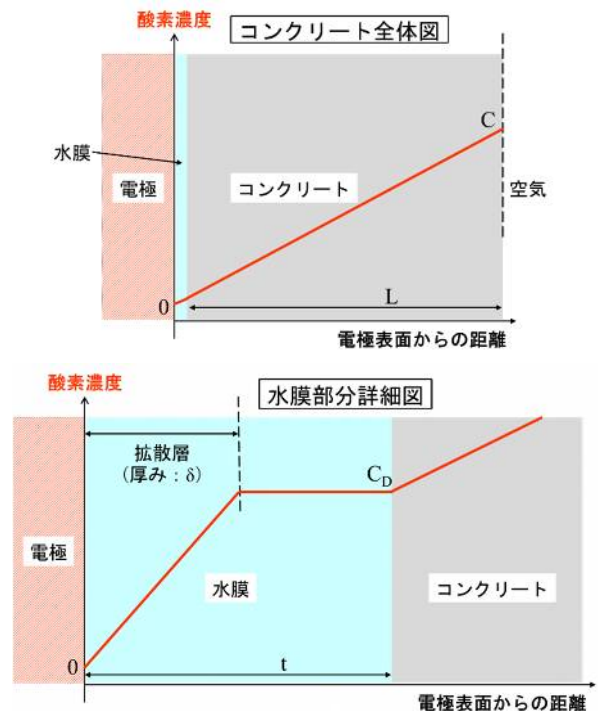


図-5 コンクリート中の酸素拡散モデル

水、コンクリートの拡散係数をそれぞれ D_w 、 D_c とし、水及びコンクリート全体に対する平均的な拡散係数を D とする。さらに、鉄筋と接触している水膜とコンクリートとの界面での溶存酸素濃度を C_D とし、コンクリートが空気と接触する表面側の溶存酸素濃度を C とする。このとき、定常状態近似を適用すると式(1)のとおりとなる。

$$D_w \frac{C_D}{\delta} = D_c \frac{C - C_D}{L} = D \frac{C}{\delta + L} \quad (1)$$

ただし、簡単のため、鉄筋界面での酸素濃度はゼロとした。ここで式(1)の右の等号の右辺について、式(2)のとおり近似する。

$$D \frac{C}{\delta + L} = D \frac{C}{L} \quad (2)$$

この両者の式から、以下の関係式が導出できる。

$$D_c = D \frac{C}{C - C_D} \quad (3)$$

また、鉄筋と接触している水の水膜厚さ t が $500\mu\text{m}$ 以下の場合 (酸素の静止拡散層厚み δ 以下の場合) を考えると、酸素の拡散限界電流密度 J_D は、式(1)の左の等号の左辺について、 δ が $500\mu\text{m}$ 、 C_D が 8ppm のときに $20\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であることが既往の文献⁵⁾で分かっていることから、以下の関係式が成立する。

$$C_D = J_D \times t \times 8 \times 10^{-4} \quad (4)$$

この式(4)において、 C_D 、 J_D 、 t の各単位は、それぞれ ppm 、 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、 μm である。この式(4)は、鉄筋と接触している水の水膜厚さ t が $500\mu\text{m}$ 以上の場合には $t = 500$ (t の最大値を 500) とすれば t と δ との間のすべての関係で (すな

わち水膜厚さに関係なく) 使用することができる。

参考まで, 以上の概要を簡単に図-5 に示した。なお, この図-5 の水膜厚さ t は, 酸素の静止拡散層厚み δ より大きな場合で示している。

(2) コンクリートの酸素拡散係数

式(4)に対して, 本実験の供試体から得られた酸素拡散限界電流密度 ($0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) を適用する。ここで t を最大値 $500 (\mu\text{m})$ とすると, C_D は $0.26 (\text{ppm})$ となる。また, t が $500 (\mu\text{m})$ 以下の場合, C_D は式(4)にしたがって $0.26 (\text{ppm})$ 以下となる。室温の水溶液中に溶存可能な最大の酸素濃度が 8 ppm 程度⁹⁾であることから, 本実験の鉄筋と接触している水膜とコンクリートとの界面における溶存酸素濃度 (0.26 ppm 以下) は, 非常に小さいことが分かる。

また式(3)において C に 8 ppm (溶存可能な最大酸素濃度) を適用すると, C_D の最大値が 0.26 ppm であることから, 電気化学測定で直接的に得られる D が近似的に D_c に等しいと考えることができる。このことから, 本実験の供試体 (かぶり 20 mm) に対して得られた酸素拡散限界電流密度 ($0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) を, 式(1)に対して C を 8 ppm として適用すると, $D (D_c)$ として $1.3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ を得る。これは水溶液中の酸素拡散係数が, 同じ計算で $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ となる⁹⁾ことから, 本実験のコンクリートの酸素拡散係数が, 水溶液中の酸素拡散係数と同等のオーダーになることを示している。

4. まとめ

水に十分空気を溶存させたコンクリート供試体 (水セメント比 0.6 , かぶり 20 mm) を用いてカソード分極を行ったところ, 以下の知見を得た。

- (1) 分極速度を, 水溶液中で通常行われる 100 分の 1 , すなわち $0.2 \text{ mV}/\text{min}$ とすることで, コンクリート中の酸素の拡散限界現象をとらえることができた。
- (2) コンクリート中で得られた酸素拡散限界電流密度は, 本実験の脱気下にある水溶液中の酸素拡散限界電流密度より小さく, コンクリート中の鉄筋に接している水に溶存している酸素濃度が非常に低いことが分かった。
- (3) コンクリートに酸素拡散抑制があると考え, 定常状態近似を適用することにより, コンクリートの酸素拡散係数を求めた。その結果は, 水溶液中の酸素拡散係数と同等のオーダーであった。

以上の知見を得たが, コンクリートの酸素拡散係数は, コンクリートの構造 (細孔分布など) や含水状態, 酸素

の含み方などに依存すると考えられる。このため, 同様のさらなる実験を行うことで鉄筋の腐食反応にとって重要なコンクリート中の酸素還元反応の特徴をさらに知ることができると考えられる。

謝辞

本研究は, JCI-TC222A「コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会 (委員長: 高谷哲)」の一環として研究したものである。関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 左藤眞市, 川上圭司, 齊藤亮介, 高谷 哲: 鉄筋の腐食環境としてのコンクリート内の湿度挙動とぬれ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.773-778, 2020. 7
- 2) 土井康太郎, 廣本祥子, 秋山英二: セメントペーストおよびモルタル内部の鉄の高酸素腐食促進試験, 日本金属学会誌, Vol.82, pp.1-7, 2018. 1
- 3) 深川大輔, 河合慶有, 西田孝弘, 氏家 勲: 相対湿度の上昇に伴う水・酸素の供給が中性化によるマクロセル腐食に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.22, pp.19-24, 2022. 10
- 4) Tomashov, N. D.: Theory of Corrosion and Protection of Metals, Macmillan, pp.367-375, 1966
- 5) 腐食防食協会編: 材料環境学入門, 丸善出版, pp.247-276, 1993
- 6) 大谷俊介, 小林浩之, 若林 徹, 望月紀保: コンクリート中鋼材のカソード分極特性と電気防食に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1063-1068, 2013. 7
- 7) 笠井順一: セメント化学概論 (その 3), コンクリート工学, Vol.21, No.11, pp.100-106, 1983. 11
- 8) 田代忠一: セメント硬化体中の水分, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.12-15, 1994. 9
- 9) 伊代田岳史, 魚本健人: 初期乾燥における水和反応停止時期の推測に関する一考察, 生産研究, Vol.53, No.1, pp.79-82, 2001. 1
- 10) 三沢俊平: 鉄さび生成の現状と未解明点, 防食技術, Vol.32, No.11, pp.657-667, 1983. 11
- 11) U. R. Evans: Mechanism of Rusting, Corr. Sci., Vol.9, No.11, pp.813-821, Nov.1969
- 12) W. J. Woore (訳: 藤代亮一): ムーア 物理化学 (上) 第 4 版, 東京化学同人, pp.331-426, 1974