

論文 炭酸化環境におかれた鋼材に対する MDEA の防食効果

齊藤 亮介^{*1}・YOGANANDAN GOVINDARAJ^{*2}・矢野 慧一^{*3}・坂入 正敏^{*4}

要旨：MDEA の利用により，コンクリート中への CO₂ 固定促進効果のみならず，内部鉄筋の防食効果が期待できる。本研究では，水酸化カルシウム水溶液あるいはセメントペースト環境下にて，CO₂ を系内に溶解した場合の，MDEA による鋼材の防食効果を評価した。水溶液環境では，MDEA が鋼材へ吸着することで，MDEA 濃度が 5.0 mass% 以上であれば，CO₂ 溶解によって系内の pH が 8.0～9.0 の範囲に低下した場合でも良好な防食効果が得られ，塩分に対しても一定の防食効果を示した。セメントペースト環境では，セメントペーストが炭酸化した条件においても，MDEA が存在することで鋼材の耐食性を高められることを確認した。

キーワード：カーボンニュートラル，MDEA，耐久性，鉄筋腐食，炭酸化，塩分

1. はじめに

二酸化炭素（以下，CO₂）は地球温暖化の原因となる主要な温室効果ガスであるため，地球温暖化の進行を防ぐために回収が求められる。その手法として CCUS（carbon capture, utilization, and storage）への期待が高く，コンクリートあるいはコンクリート廃材に CO₂ を炭酸カルシウム（以下，CaCO₃）として固定する技術について，様々な検討が行われている¹⁾。

コンクリートは高アルカリ性の材料であるため，湿潤な状態であれば大気中の CO₂ が溶解し，コンクリート内部に CaCO₃ として固定される。この現象は，中性化と呼ばれ，これまで鉄筋腐食の原因となる劣化現象として扱われてきた。コンクリートに CO₂ を固定しても，耐久性が失われてしまえば，補修・更新が早期に必要となり，ライフサイクルにおける CO₂ 削減は達成できない。カーボンニュートラルの実現に向けては，CO₂ 固定を促進し，かつ内部鉄筋を腐食から守ることで構造物を長寿命化できる技術が必要である。

アルカノールアミンは金属の防錆剤のほか²⁾，火力発電所等にて CO₂ 吸収液としても活用される材料である³⁾。ただし，用途によって要求性能が異なるため，同じアルカノールアミンが双方に使用されるわけではない。防錆剤として使用されるアルカノールアミンは，例えば酸性環境のような過酷な腐食環境において防食効果を発揮するよう，分子量が大きいものが主に選定される。CO₂ 吸収液として代表的なものにエタノールアミンや N-メチルジエタノールアミン（以下，MDEA）があるが，これらは分子量が小さく，防食性能は決して高くないため，一般的に防錆剤として利用されることはない。しかし，炭酸化が進んだ場合でも，コンクリート内部の pH はせいぜい中性域までしか低下せず，そのような環境での使

用であれば，分子量の小さいアミン化合物であっても防食性能は十分である可能性がある。すなわち，このようなアミン化合物をコンクリートに適用することで，鉄筋腐食対策と CO₂ 固定促進を両立できる可能性がある。

アミン系のコンクリート用防錆剤は既に存在し，その防食効果に関する先行研究はあるが^{例えば 4)}，CO₂ 吸収による pH 低下を対象とした事例はほとんどない。本研究では，アミン化合物として MDEA に着目し，MDEA による鉄筋の防食作用を評価した。具体的には，コンクリート中を模擬した水酸化カルシウム（以下，Ca(OH)₂）水溶液中に MDEA を溶解させた環境にて，炭素鋼の腐食試験を実施した。その際，水溶液に CO₂ ガスを溶解させて炭酸化を模擬し，MDEA の防食作用に及ぼす pH と塩化物の影響を評価した。さらに，MDEA を練り込んだセメントペースト環境中の鋼材に対して，セメントペーストを炭酸化させた際の耐食性を評価した。

2. CO₂ 溶解による MDEA 水溶液の pH 変化に関する検討

2.1 実験概要

異なる濃度の MDEA 水溶液に CO₂ を溶解し，MDEA 濃度および CO₂ 溶解量による pH の変化を取得した。

(1) 使用材料

MDEA は純度 99.0% 以上の試薬を使用した。CO₂ ガスは純度 95% のものを使用した。

(2) 実験方法

MDEA 濃度と pH の関係を取得するため，1.0 mass%，5.0 mass%，10 mass% の MDEA 水溶液を調整し，pH を計測した。さらに，各 MDEA 水溶液を容器に汲み取り，大気開放条件で CO₂ ガスを吹き込んで溶解させ，溶解量と pH を計測した。その際，ガス吹き込み流量の管理はせず，一定時間毎に溶液の質量を計測し，質量変化から CO₂ の

^{*1} 清水建設（株） 技術研究所 建設基盤技術センター（正会員）

^{*2} 北海道大学大学院 工学研究院 材料科学部門 Ph. D in chemistry

^{*3} 清水建設（株） 技術研究所 環境基盤技術センター 博士（工学）

^{*4} 北海道大学大学院 工学研究院 材料科学部門 准教授 工学博士

溶解量を取得した。

2.2 実験結果

MDEA 水溶液の MDEA 濃度および CO₂ ガス溶解量と pH の関係を図-1 に示す。CO₂ が溶解していなければ、濃度 10 mass%までの範囲において、MDEA 濃度が高くなるほど pH が上昇する傾向を示す。CO₂ が溶解すると、MDEA に対する CO₂ 溶解量比の増加に伴って pH は低下する。MDEA 濃度が高いほど溶解可能な CO₂ 量は増加するため pH の変動幅が小さく、1.0 mass%および 5.0 mass%では、pH が 7.0 の中性付近まで低下すると、それ以上 CO₂ の溶解はほとんど進まない。

2.3 考察

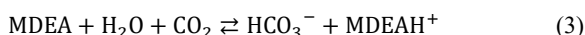
MDEA は水に溶解すると、次式のように H₂O から H⁺ を受容するブレンステッド塩基として働く。



すなわち、MDEA 水溶液は塩基性を示し、その濃度が高まると、系内の水からより多くの H⁺ を受け取ることとなるため pH が高くなる。MDEA 水溶液に CO₂ が溶解すると、式(2)のようにバイカーボネートが生成することで OH⁻ が消費され、pH が低下する。



式(1)と式(2)を併せると式(3)のように記載できる。



MDEA 水溶液の酸乖離定数(pKa)は濃度によって異なるが、概ね 8.6~9.1 の範囲の値をとる⁵⁾。pH が pKa を下回ると、MDEA の緩衝作用が働き、時間経過によって pH は pKa の値に近づく傾向が見られた。アミン水溶液への CO₂ 溶解可能量はこの pKa から決定されるアミンの塩基性のほかに、系の CO₂ 分圧に依存する⁶⁾。本試験では系内の CO₂ 分圧を管理しておらず、MDEA 中の CO₂ 溶解量が安定した条件で評価するためには、pKa 以上の pH 環境にて試験することが望ましいと判断し、以降の実験にて pH 調整をする際に 8.6~9.1 を目安とした。

3. MDEA を含む水溶液中における鋼材の腐食特性

3.1 実験概要

飽和 Ca(OH)₂ 水溶液に MDEA を添加し、さらに CO₂ ガスを溶解させることでコンクリートが炭酸化する環境を模擬し、その環境下にて鋼材の腐食特性を評価した。

(1) 試料

φ25mm、厚み 2.5mm の SS400 鋼材を供試材として使用した。供試材の 1 面を #1000 の研磨紙で研磨し、アセトンで洗浄した後、評価面積が 1.0cm² となるように作られた樹脂製のホルダーにセットしたものを試料とした。試料の概要を図-2 に示す。

(2) 実験手順

試料を、Ca(OH)₂ 水溶液に MDEA を添加した溶液に浸

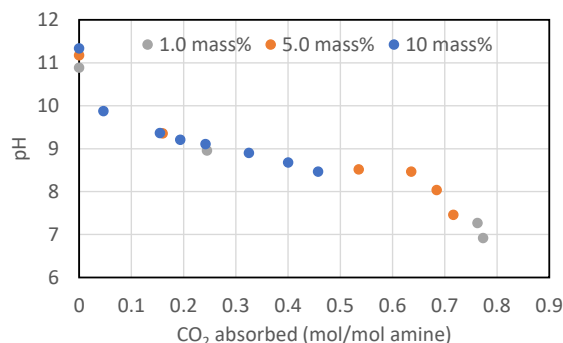


図-1 MDEA 水溶液の MDEA 濃度および CO₂ 溶解量と pH の関係

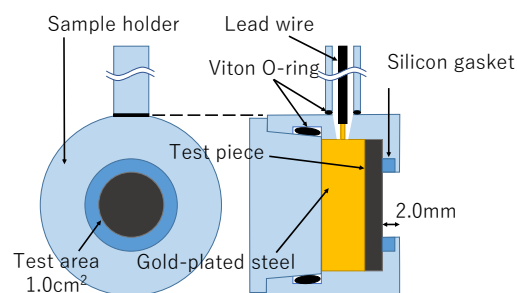


図-2 試料の概要

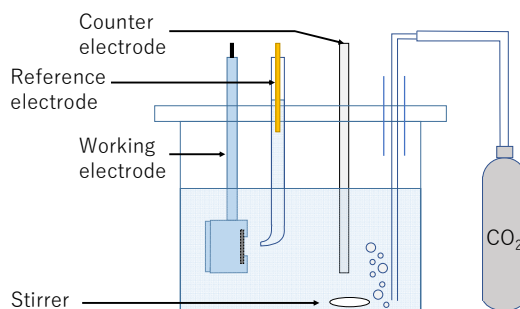


図-3 腐食セルの概要

表-1 初期溶液の一覧

名称	内容
C+mdea0	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液
C+mdea0+Cl0.1	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液+NaCl 0.1mol/L
C+mdea1	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液+MDEA 1.0mass%
C+mdea5	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液+MDEA 5.0mass%
C+mdea5+Cl0.1	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液+MDEA 5.0mass%+NaCl 0.1mol/L
C+mdea5+Cl0.2	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液+MDEA 5.0mass%+NaCl 0.2mol/L
C+mdea10	飽和 Ca(OH) ₂ 水溶液+MDEA 10mass%

漬し、その溶液に CO₂ を溶解させて段階的に pH を低下させ、自然電位およびインピーダンスの変化を取得した。最後のインピーダンス計測を終えた試料に対して、動電位分極試験を行い、アノードおよびカソード分極曲線を得た。本章の実験では、計測期間中の水分蒸発による MDEA 濃度の変化等を防止するため、CO₂ ガス溶解以外のすべての工程を密閉容器内で行った。

試料を最初に浸漬した溶液を初期溶液と定義し、その一覧を表-1 に示す。実験フローは次のとおりとした。なお、C+mdea0+Cl0.1, C+mdea5+Cl0.1, C+mdea5+Cl0.2 については、下記手順のi~ivまでとした。

- i. 初期溶液に試料を浸漬し、自然電位の計測を開始
- ii. 24 時間経過後、インピーダンスを計測
- iii. 初期溶液に CO₂ ガスをバブリングし、pH を目標値 10.0 まで低下
- iv. 24 時間経過後、インピーダンスを計測
- v. さらに CO₂ ガスをバブリングし、pH を 8.0-9.0 の範囲に低下
- vi. 24 時間経過後、インピーダンスを計測
- vii. 4 時間経過後、動電位分極試験を実施

電気化学計測は図-3 に示すように 3 電極系とし、参照電極に Ag/AgCl 電極、対極に $\phi 6\text{mm}$ の白金めっきチタン棒を使用した。インピーダンス計測は、交流電位の振幅を 10mV、周波数範囲を 500kHz~10mHz とした。動電位分極試験は、電位の掃引速度を 1mV/s とし、自然電位からカソード側に 250mV 分極した後、30 分休止し、次にアノード側に 250mV 分極した。

3.2 実験結果

(1) 炭酸化に対する防食効果

NaCl を添加していない初期溶液から試験を開始した試料の自然電位の計測結果を図-4 に示す。C+mdea1 については、参照電極と計測器との接続に不良があり、ばらつきが大きいほか、数値の欠落した期間がある。インピーダンス計測から得たボード線図を図-5 に示す。ボ

ード線図の凡例の内、初期溶液の末尾の数値はインピーダンス計測時の pH である。また、これ以降、本節で示すインピーダンスの結果は、試験溶液の pH 調整をした後 24 時間が経過した時点の結果である。

MDEA を添加していない C+mdea0 では、計測開始から自然電位が徐々に貴化している。pH が 10.0 に低下すると、数十分で自然電位は卑化し、脱不動態化によって 10mHz~10Hz の周波数帯でインピーダンス低下が生じる。自然電位は pH が小さいほど卑であり、インピーダンスは全周波数帯において pH10.0 と 8.45 で同等である。

C+mdea1, C+mdea5, C+mdea10 では、初期水溶液の pH は、MDEA 濃度によらず 12.6 である。C+mdea5 および C+mdea10 では、計測開始から、C+mdea0 と同様に自然電位は時間経過に伴って徐々に貴化している。しかし、図-5 より、pH の低下に伴うインピーダンス変化の傾

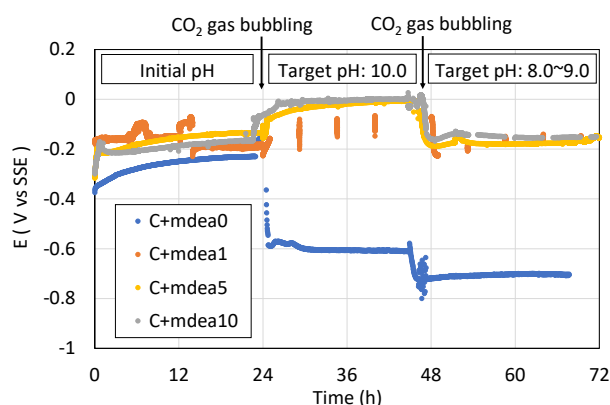
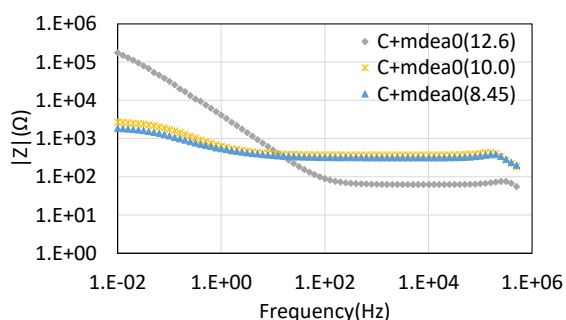
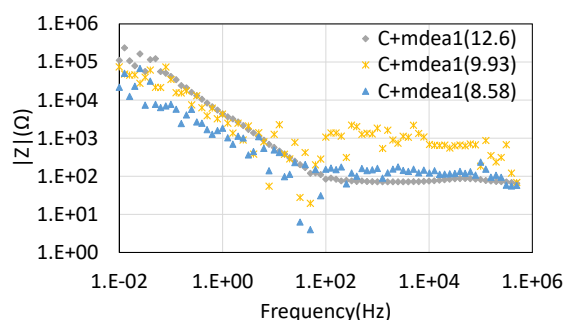


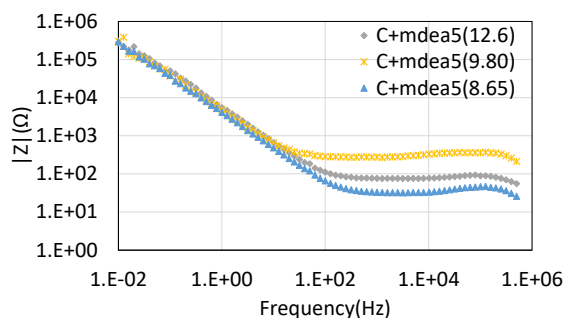
図-4 NaCl を含まない条件の自然電位の経時変化



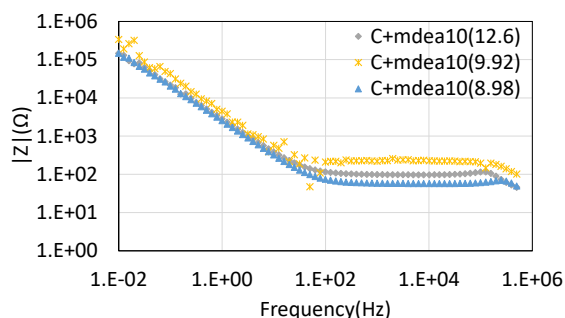
(a) C+mdea0



(b) C+mdea1



(c) C+mdea5



(d) C+mdea10

図-5 NaCl を含まない条件の pH によるインピーダンススペクトルの変化

向は、MDEA の濃度によって異なる。C+mdea5 および C+mdea10 では、pH が 9.0 以下に低下しても、10mHz~10Hz の周波数帯においてインピーダンススペクトルはほとんど変化せず鋼材の不動態が維持されている。一方で、C+mdea1 では、pH10.0 以下の計測結果でばらつきが大きいものの、pH 低下により同周波数帯のインピーダンスが低下する傾向がみられる。

動電位分極試験の結果を図-6 に示す。本実験では、MDEA を添加した溶液と無添加溶液のカソード分極測定領域が異なる。C+mdea0(8.45)のカソード分極曲線に対応する電位領域における MDEA 添加溶液で予想されるカソード電流を破線で図中に示す。C+mdea0 と比較して、C+mdea1 では自然電位が貴であり、アノード電流が低減されているが、カソード電流は増加している。C+mdea5 と C+mdea10 は概ね等しい分極曲線が得られ、C+mdea0 と比較して、特にアノード電流が顕著に小さくなることを確認できる。

(2) 塩分に対する防食効果

NaCl を添加した初期溶液から試験を開始した試料の自然電位の結果を図-7 に、インピーダンス計測から得たボード線図を図-8 に示す。

C+mdea0+Cl0.1 では、pH12.6 の環境においても塩分が存在することで10mHz~10Hz の周波数帯においてインピーダンスは小さく、鋼材表面は活性な状態である。pH が低下すると、さらにインピーダンスは低下し、pH を 10.0 に調整した数時間後には鋼材表面に腐食生成物が生じた。C+mdea5+Cl0.1 では、pH12.6 でも塩分を添加しない場合と同等の高いインピーダンスを示している。しかし、pH の低下および塩分量の増加によって自然電位は卑化し、インピーダンスも低下する。

3.3 考察

(1) CaCO₃ 生成の確認

C+mdea1 の初期溶液を pH10.0 に調整した際に生成した CaCO₃ を濾過し、生成量を確認した。初期溶液である飽和 Ca(OH)₂ 水溶液の濃度は 22.3mmol/L で、これに対して実際の CaCO₃ 生成量は 21.7mmol/L とほぼ一致した。したがって、MDEA を添加したすべての初期溶液において、pH を 10.0 以下に調整した時点で、溶液中にカルシウムイオンはほとんど存在していないことがわかる。すなわち、計測された pH は、Ca(OH)₂ 由来ではなく、式(3)に示した MDEA のプロトン化によって決定されている。

図-5 にて、100Hz 以上の周波数帯のインピーダンスに注目すると、MDEA を加えた水準では、pH を 12.6 から 10.0 程度に低下させるとインピーダンスが増加し、さらに pH を 9.0 程度まで低下させるとインピーダンスは低下に転じている。本実験において、100Hz~10kHz の周波数帯のインピーダンスは溶液の抵抗を表し、溶液のイ

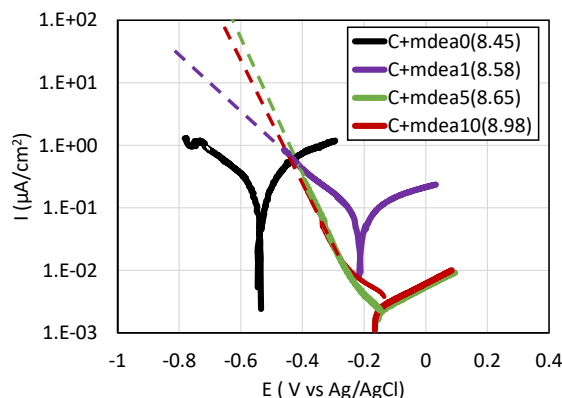


図-6 MDEA 濃度による分極曲線の比較

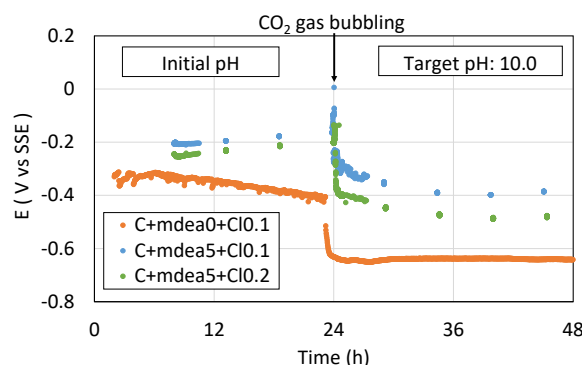


図-7 塩分存在下の自然電位の推移

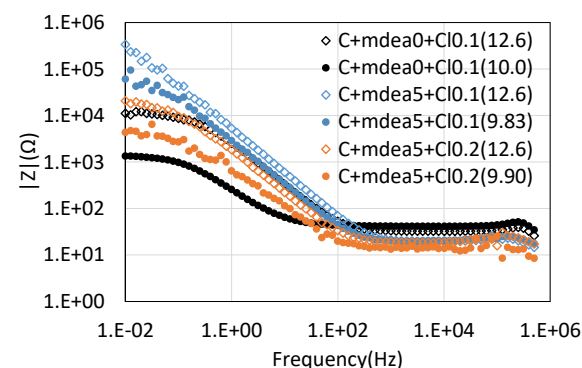


図-8 塩分存在下のインピーダンス変化

オン量の影響を受ける。CO₂ のバブリングによって Ca²⁺ が炭酸化されると CaCO₃ として析出するため、溶液中のイオン量が減少し、溶液の抵抗は増加する。さらに CO₂ を溶解させると、式(3)の反応により溶液中のイオン量が増加し、インピーダンスが低下する。反対に、MDEA を含まない C+mdea0 では、Ca(OH)₂ と反応した後、CO₂ は溶液にほとんど溶解しないため、インピーダンス値は pH10.0 と pH8.45 で概ね同等である。

(2) 炭酸化に対する MDEA の防食メカニズム

アルカノールアミンは一般に、アノード反応を抑制する吸着型の防錆剤として利用されている。吸着には静電

吸着と化学吸着が考えられる⁷⁾。静電吸着はイオンの静電気力による吸着であり、鋼材表面が負に帯電していれば、正に帯電する MDEAH⁺の吸着が考えられる。初期溶液の pH は 12.6 であるため、試験開始後、鋼材表面には Fe₃O₄ が形成する。Fe₃O₄ の等電位点 (pzc) は pH6.2 付近にあり、それより高い pH において Fe₃O₄ は負に帯電する⁸⁾。すなわち、本試験では、全ての条件で鋼材表面に MDEAH⁺が静電吸着していたと考えられる。

化学吸着は、アミン化合物の極性基の非共有電子対を金属原子と共有する結合によるものである。MDEA は次のように、配位結合により鋼材上に吸着する。

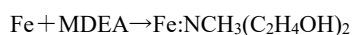


図-6 にて、MDEA 濃度が増加することでアノード分極曲線の電流密度が明確に低下しており、MDEA によってアノード反応が抑制されていることがわかる。ただし、その効果には MDEA 濃度の影響がみられる。pH が 8.0~9.0 に低下すると系内の MDEA が MDEAH⁺へとプロトン化し、鋼材への静電吸着の割合が増加する。静電吸着の結合力は、pH が pzc に近づくほど小さくなるため、特に系内の MDEA 濃度の小さい C+mdea1 において防食効果が失われやすかった。

また、カソード分極曲線に着目すると、過電圧の小さい領域において C+mdea0 と C+mdea1 に比べて、C+mdea5 および C+mdea10 の電流密度は小さい。この電位域のカソード反応は試験溶液中の溶存酸素の還元反応と考えられる。実際に溶存酸素濃度値を取得していないが、CO₂ ガスを多量に溶解できる C+mdea5 および C+mdea10 では、それ以外の 2 水準に比べて溶存酸素濃度が低くなる。一方、-0.6 V 付近で外挿線と C+mdea0 の結果を比較すると、MEDA を添加することで電流は増加している。これは、MDEA 存在下では、カソード反応として酸素の還元のほか MDEAH⁺の還元が生じるためと考えられる。

(3) 塩分に対する MDEA の腐食抑制効果メカニズム

図-8 に示したインピーダンス計測の結果から、塩分が存在しても MDEA の防食効果があることは明らかであり、この理由についても MDEA が鋼材表面に吸着することで説明できる。MDEA は置換基に 2 つの OH 基を有する。OH 基は極性基であり、O 原子側に強く負に分極しているため同じ負の極性をもつ Cl⁻を反発する。そのため、鋼材表面への Cl⁻の到達が阻害され、塩分による腐食の影響を受けにくくなる⁹⁾。しかし、塩分濃度が高いほどインピーダンス低下が見られることから、MDEA 濃度に対する Cl⁻濃度が高い場合には MDEA の吸着膜を透過して、鋼材表面への到達を許してしまう。その閾値についてはさらに検討が必要である。

4. MDEA を含むセメントペースト中の鋼材の腐食特性

4.1 実験概要

セメントペースト環境下において MDEA の防食効果を確認するため、練混ぜ時に MDEA を添加したセメントペーストを鋼材表面に打ち込み、硬化後に鋼材の耐食性を電気化学インピーダンス法により評価した。その際、セメントペーストの養生後に試料を促進炭酸化環境に存置し、セメントペースト層を炭酸化させた条件とした。その後、さらに試料を MDEA 溶液に浸漬し、CO₂ を溶解していない MDEA 溶液を内部に浸透させた条件で鋼材の耐食性を再評価した。

(1) 試料

3 章の実験で使用した試料の鋼材表面にセメントペーストを打ち込んだものを試料とした。セメントペーストは水セメント比 50%、セメントには研究用セメントを使用した。練混ぜ水に超純水を使用した試料を CP-mdea0、5.0 mass% の MDEA 水溶液を使用した試料を CP-mdea5 と定義した。セメントペーストの練混ぜ後、ブリーディング水が停止した後に打ち込んだ。セメントペースト層の厚みは鋼材表面とサンプルホルダーの端面との距離である 2.0mm とした。打設後、材齢 3 日まで封緘養生し、その後、CO₂ 濃度 5.0%、温度 20℃、湿度 60%RH の促進炭酸化環境に存置した。腐食評価用とは別に、同じセメントペーストを用いて炭酸化深さ計測用サンプルを用意した。炭酸化深さ計測用サンプルの炭酸化深さが 2.0mm を超えるまで促進炭酸化期間を設けることとし、存置日数は、CP-mdea0 では 35 日、CP-mdea5 では 14 日であった。炭酸化深さの確認は JIS A 1152 に準拠して行った。

(2) 腐食評価方法

促進炭酸化の後、電気化学インピーダンス法により、試料のインピーダンススペクトルを取得した。計測環境は、中性程度に低下したセメントペースト中の pH が大きく変化せず、且つセメントペーストの組成に影響を与えないことを目的に、0.1mol/L の硝酸カルシウム水溶液中とした。

その後、5.0 mass% の MDEA 水溶液に試料を 14 日間浸漬した後、インピーダンス評価を再度実施した。その際、試験溶液は浸漬に使用した 5.0 mass% MDEA 水溶液とした。いずれの計測も、試験溶液以外の計測条件は、3 章の実験と同様とした。

(3) CaCO₃ の生成量

TG/DTA 分析を用いて、腐食評価用サンプルのセメントペースト中に生成した CaCO₃ 量を取得した。腐食評価後のサンプルホルダーからセメントペーストを剥離し、乾燥させたのち、直径 150μm 以下に粉碎して分析試料を得た。TG/DTA 分析は窒素ガス環境下(流量 150mL/min)とし、昇温速度は 10℃/min として実施した。

4.2 実験結果および考察

(1) 炭酸化深さおよび CaCO_3 生成量

炭酸化深さと CaCO_3 生成量を表-2 に示す。炭酸化深さ計測用サンプルにて計測した炭酸化深さは CP-mdea5の方が大きく、腐食評価用サンプルにて取得した CaCO_3 生成量は両水準で同等であった。すなわち、腐食評価用サンプルはどちらも厚さ 2.0mm まで炭酸化していたと判断できる。

(2) 鋼材の腐食評価

インピーダンス計測から得たボード線図を図-9 に示す。末尾に re と記載した凡例は、促進炭酸化後に MDEA 水溶液に浸漬した後の計測結果である。3 章の溶液実験の結果と比較するため、図-9 には図-5 中の C+mdea0(12.6)および C+mdea0(10.0)を併せて示した。促進炭酸化後、CP-mdea0 のインピーダンスは全周波数帯で C+mdea0(10.0)と同等であり、インピーダンス計測結果からも鋼材位置までセメントペーストの炭酸化が進んでいたことが確認できる。CP-mdea5 では CP-mdea0 よりも 100Hz 以下の周波数帯で高いインピーダンスを示すが、10mHz 時と 10kHz 時のインピーダンス値の差分から得られる分極抵抗は 30k Ω 程度であることから、CEB の基準値¹⁰⁾をもとに、鋼材は不動態化していないと判断される。インピーダンス計測に使用した 0.1mol/L の硝酸カルシウム水溶液の pH は 7.2 程度であり、pKa を考慮すると MDEA はそのほとんどが MDEAH^+ として存在しているはずである。そのため、水溶液環境の実験と同様に、pH が pzc に近づくことで静電吸着力が小さくなり、防食効果が低下したと考えられる。

その後、試料を 5.0 mass% MDEA 水溶液に浸漬すると、CP-mdea5 は C+mdea0(12.6)と同等の水準までインピーダンス値は回復した。これは、セメントペースト中が MDEA 水溶液で満たされて pH が回復したことで MDEA が増加したためであり、他のアルカリ溶液に浸漬した場合も同様の効果が得られるものと推察される。また、CP-mdea0-re でもインピーダンス値が増加しており、セメントペースト内部が炭酸化した状態でも、MDEA を浸透させることで、鋼材の防食効果が得られると示唆される。

5. まとめ

本研究では、水溶液あるいはセメントペースト環境下において、 CO_2 を系内に溶解した際の MDEA による鋼材の防食効果を評価した。水溶液環境では、MDEA が鋼材表面に吸着することで、 CO_2 溶解による pH 低下および塩分に対する防食効果を示した。

セメントペースト環境下では、セメントペーストが炭酸化した条件においても、MDEA が存在することで、鋼材の耐食性を高めることを確認した。

表-2 炭酸化深さと CaCO_3 生成量

水準名	促進炭酸化期間	炭酸化深さ ^{※1}	CaCO_3 生成量 ^{※2}
CP-mdea0	35 日	2.12mm	15.4%
CP-mdea5	14 日	4.56mm	14.8%

※1：炭酸化深さ計測用サンプルで取得
※2：腐食評価用サンプルにて取得

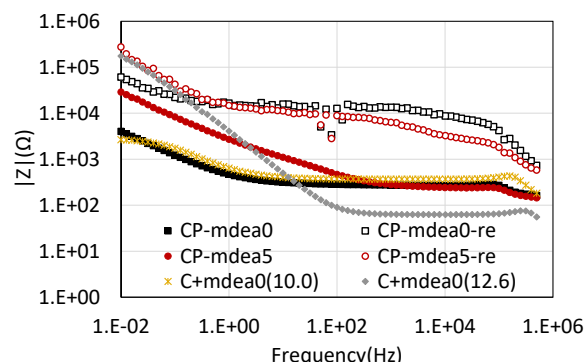


図-9 促進炭酸化後と MDEA 溶液浸漬後のインピーダンスの変化

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁資料
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/concrete_cement.html (閲覧日：2022年1月10日)
- 2) 藤井晴一：金属の腐食抑制剤，高圧力，Vol.3，No.1，pp.410-414，1965
- 3) 山口健一：石炭ガス化プラントにおける CO_2 分離回収技術（物理吸収法），火力原子力発電大会論文集，Vol.10，pp.95-100，2014
- 4) Lee HS et al.: Comparative Study on Corrosion Protection of Reinforcing Steel by Using Amino Alcohol and Lithium Nitrite Inhibitors, Materials (Basel), Vol.8, No.1, pp.251-269, 2015
- 5) Ardi Hartono, Muhammad Saeed, Inna Kim and Hallvard F. Svendsen: Protonation Constant (pKa) of MDEA in Water as Function of Temperature and Ionic Strength, Energy Procedia, Vol.63, pp.1122-1128, 2014
- 6) 山田秀尚： CO_2 回収用アミン溶液の反応とその圧力依存性，高圧力の科学と技術，Vol. 29，No. 3，pp.199-205，2019
- 7) 荒巻國次：腐食抑制剤の作用（その 1），Zairyo-to-Kankyo, Vol.56, No.6, pp. 243-251, 2007
- 8) 田村紘基，古市龍三郎：金属酸化物表面水酸基のイオン交換機能の評価，分析化学，Vol.40, No.11, pp.635-640, 1991
- 9) Al-Sodani, K. A. A. et al.: Performance of corrosion inhibitors in cracked and uncracked silica fume cement concrete beams. European Journal of Environmental and Civil Engineering journal, Vol. 24, No.10, pp.1573-1588, 2020
- 10) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft4) BBRI-CSTC-WTCB, Dec.