

論文 電磁誘導による鉄筋防食効果に及ぼすコイル角度の影響に関する研究

倪 稚茗*1・大下 英吉*2

要旨: 本研究は、電磁誘導の原理を利用して非接触・非破壊にて RC 構造物内部の鉄筋に誘導電流を誘起し、鉄筋表面の健全部と腐食部における電位差の形成を抑制することによって鉄筋腐食を防止するものである。本論文では、まず三次元電磁誘導解析により防食電流密度の特性について基礎的検討を行なった。次に鉄筋一本を対象とし、塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験を行い、本手法の防食効果および防食効果に及ぼすコイル角度の影響を検討した。

キーワード: RC 構造物, 鉄筋腐食, 電気防食, 電磁誘導, コイル角度

1. はじめに

RC 構造物に埋設された鉄筋は、表面に形成された不動態皮膜によって防食が可能である。しかしながら、海岸近くに建設された RC 構造物では、塩化物イオンなどの腐食環境因子がコンクリート内に侵入することで、不動態皮膜が破壊¹⁾され、鉄筋腐食が発生する。このようなことから、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生し、RC 構造物の構造性能および耐久性能が大幅に低下する。この対策として電気防食工法が普及している。

現在、実用化されている電気防食工法には、外部電源方式²⁾と流電陽極方式³⁾であり、いずれの手法においても、コンクリート表面に設置した陽極材からコンクリートを介して鉄筋表面に防食電流を流し、腐食領域の電位をマイナス方向に下げることによって、腐食を抑制するものである。しかしながら、外部電源方式は電極の配置作業が複雑であること、流電陽極方式は電気防食を行う際に使用する陽極材の寿命が比較的短く、取替えに係るコストが大きいなどの欠点がある。また、電気防食工法の多くは、陽極材を設置するためにかぶりコンクリートをはつり、鉄筋を露出さなければならない、RC 構造物に損傷を与えるという大きな欠点がある。

上述した問題点を解決するため、著者らは、電磁誘導コイルを用いて鉄筋表面に誘導電流を強制的に誘起され、この誘導電流が防食電流としての役割を果たし、鉄筋表面の腐食電流を抑制することが可能な電気防食手法の構築を行った。本手法の大きな特徴は電磁誘導方式を用いることにより、RC 構造物に損傷を与えることはなく、非破壊かつ非接触で防食が実施可能である。

既往の研究⁴⁾では、図-1 に示すように柱やはり部材を構成する鉄筋単体を防食対象物とし、コイル角度(コイルと水平面の角度)はほぼ 0° の電磁誘導コイルを用いて防食実験を行った。腐食生成物の定量的評価に

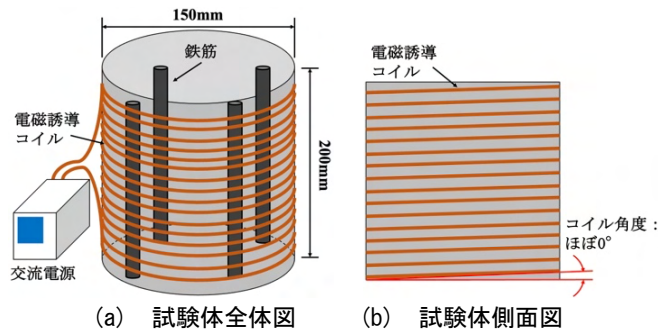


図-1 既往の研究の試験体

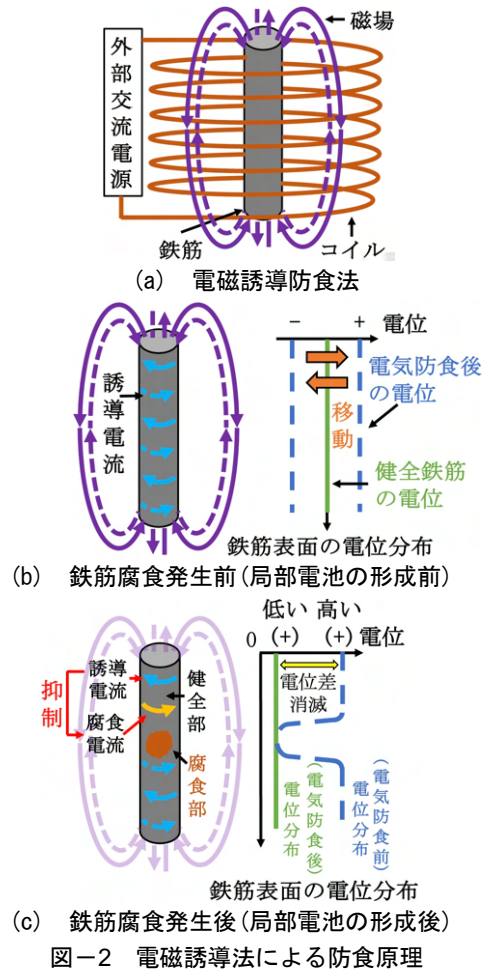


図-2 電磁誘導法による防食原理

*1 中央大学 理工学部都市環境学科 (学生会員)

*2 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

よって、著者らが提案した手法の有効性が確認された。しかしながら、コイル角度はほぼ 0° の電磁誘導コイルを使用する際には、鉄筋軸方向における防食誘導電流密度(詳細は第3章で述べる)はほぼ誘起されておらず、鉄筋軸方向の腐食電流を抑制することができないという問題点がある。そこで本研究では、鉄筋軸方向における防食誘導電流密度を誘起するため、コイル角度は 30° および 45° の電磁誘導コイルを使用し、鉄筋一本を対象とし、本手法による防食実験を実施した。コイル角度はほぼ 0° の電磁誘導コイルを使用した試験体の実験結果と比較することで、電磁誘導による鉄筋防食効果に及ぼすコイル角度の影響を定量的に検討することとした。

2. 電磁誘導防食法の概要

2.1 鉄筋防食のメカニズム

電磁誘導防食法を一本の鉄筋に適用した際の概要を図-2に示す。鉄筋が腐食していない状態では、鉄筋表面に局部電池が形成されてないため、電位差が存在しない。このような状態で電磁誘導により誘起された誘導電流が鉄筋表面を流れることで、同図(b)に示すように鉄筋表面の電位を強制的にプラス方向とマイナス方向に移動させる。一方、鉄筋が腐食している状態では、鉄筋表面に局部電池が形成されるが、同図(c)に示すように鉄筋表面における腐食電流を抑制することで、健全部の電位が腐食部と同じ程度まで下がり電位差が消滅し、形成した局部電池を破壊する。

2.2 防食条件

本手法では、電磁誘導により鉄筋表面に生じる誘導電流を利用し、腐食電流を抑制する方法である。すなわち、腐食電流を抑制するためには、腐食電流密度よりも大きな誘導電流密度を鉄筋表面に誘起しなければならない。このような誘導電流密度を防食誘導電流密度と呼ぶこととする。

本研究で対象とした腐食環境は塩水による乾湿繰返しの作用を受ける海岸付近である。松村ら⁵⁾および篠田⁶⁾の研究成果を参考にすると、余裕度を持たせて $1\text{A}/\text{m}^2$ を鉄筋の単位面積当りの防食誘導電流密度の基準値に設定することとした。

3. 電磁誘導防食条件の解析的検討

前章では、本手法の防食メカニズムおよび防食条件が明らかになった。そこで本章では、解析パラメータ(電流値および周波数)を設定し、三次元電磁誘導解析により、コイル角度ほぼ 0° 、 30° および 45° の電磁誘導コイルを使用する際に、鉄筋表面に生じる防食誘導電流密度を求めた。解析結果を用いて前章で設定した防食誘導電流密度の基準値を満たすか否かを検証し、電流密度の

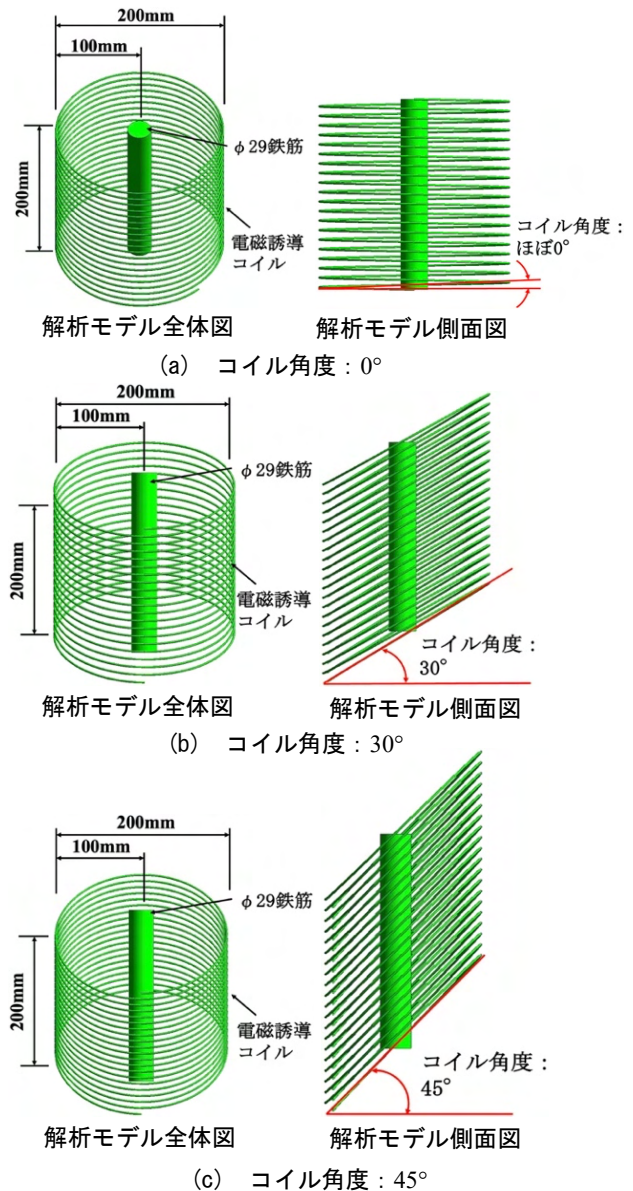


図-3 解析モデル
表-1 解析パラメータ

解析名称	F10-A0.2	F10-A0.05
周波数(Hz)	10	
電流値(A)	0.2	0.05
コイル角度	0°, 30°, 45°	

特性について基礎的検討を行った。

3.1 解析概要

解析モデルは、図-3に示すように径2mmの銅線を内外径200, 202mm、鉄筋の軸方向に10mm間隔で20段巻きした長さ200mmの電磁誘導コイルの内表面から100mmの位置に、長さ200mmの $\phi 29$ 丸鋼鉄筋を配置したものである。また、同図に示すようにコイル角度はそれぞれほぼ 0° 、 30° および 45° に設定した。RC構造物では一般的に異形鉄筋が使用されるが、異形鉄筋と普通丸鋼表面に誘起される誘導電流密度の差異は微小であるため⁷⁾、本解析では丸鋼を使用することとした。

解析パラメータは、表-1 に示すような 2 種類である。ここで、解析名称は、周波数-電流値-コイル角度の順に記載する。例えば、周波数 10Hz、電流値 0.2A、コイル角度 0° の場合は F10-A0.2- 0° と表記する。なお、鉄筋の導電率は測定により 3.4×10^5 (S/m) に設定し、比透磁率は浅野ら⁸⁾の研究成果を参考に 2000 と設定した。

3.2 防食電流密度に関する解析的検討

(1) コイル角度ほぼ 0° における防食誘導電流密度分布

鉄筋表面における円周方向および軸方向の誘導電流密度分布を図-4 に示す。円周方向の防食誘導電流密度は第 3 章で設定した基準値 ($1A/m^2$) を満足しているが、軸方向の防食誘導電流密度は基準値に比べて小さいことが確認された。したがって、コイル角度はほぼ 0° の電磁誘導コイルを使用する場合、本実験で設定した電磁誘導パラメータの範囲内では、軸方向の腐食電流を抑制することができないと考えられる。

同図に示すように円周方向の防食誘導電流密度においては、コイル中央領域(約 100mm)では誘導電流密度が高く、ほぼ均一な状態であることに対して、コイル上下端領域(約 50mm)では低く、急激な低下を示している。これはコイル端部すなわち境界条件の影響によるものであり、仮に防食効果に及ぼす要因が防食電流密度の大きさであるとするならば、中央領域が効果的であると言える。

また、中央領域における防食電流密度に注目し、F10-A0.2- 0° および F10-A0.05- 0° の防食電流密度の最大値はそれぞれ $98.8A/m^2$ 、 $24.7A/m^2$ であった。したがって、電流値を 4 倍にすると、防食電流密度も 4 倍大きくなり、防食電流密度は電流値に応じて線形的に変化することが確認できた。

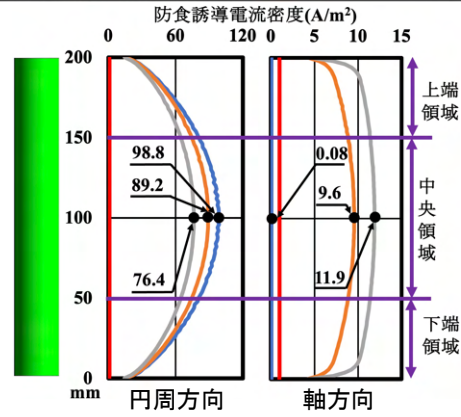
(2) コイル角度 30° および 45° における防食誘導電流密度分布

コイル角度 30° および 45° の鉄筋表面における誘導電流密度分布は図-4 に示すように、円周方向および軸方向の防食誘導電流密度は第 3 章で設定した基準値 ($1A/m^2$) を満足していることが確認された。

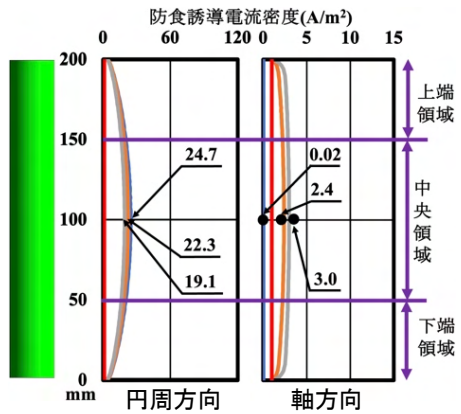
防食誘導電流密度に及ぼすコイル角度の影響に関しては、同図に示すようにコイル角度の増加とともに、円周方向における防食誘導電流密度は減少していることが確認できる。例えば、試験体 F10-A0.2 に着目すると、試験体 F10-A0.2- 30° および F10-A0.2- 45° 防食誘導電流密度の最大値は、それぞれ $89.2A/m^2$ および $76.4A/m^2$ であり、試験体 F10-A0.2- 0° に比べて、誘導電流密度はそれぞれ 9.7% および 22.7% 低減した。

一方、軸方向における防食誘導電流密度はコイル角度の増加とともに、増加していることが確認できる。

コイル角度： 0° — コイル角度： 30° — コイル角度： 45° —
防食誘導電流密度の基準値： $1A/m^2$ —

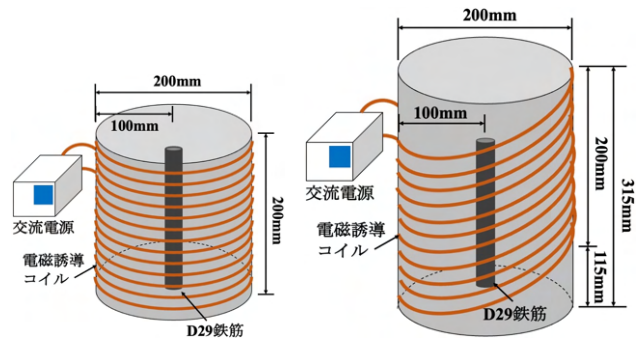


(a) F10-A0.2

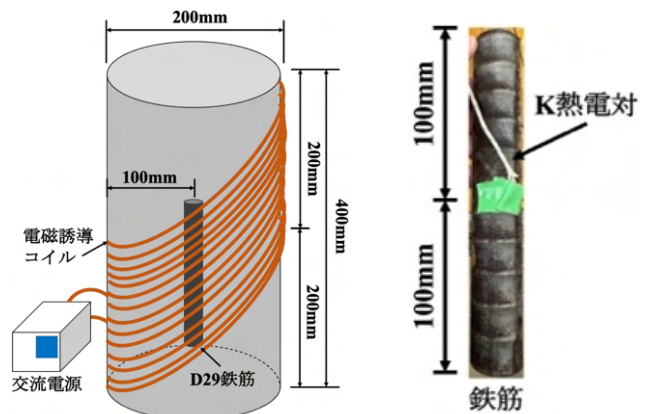


(b) F10-A0.05

図-4 防食誘導電流密度分布



(a) コイル角度ほぼ 0° 試験体 (b) コイル角度 30° 試験体



(c) コイル角度 45° 試験体 (d) K熱電対の配置方法

図-5 試験体概要

例えば、試験体 F10-A0.2-30°および F10-A0.2-45°防食誘導電流密度の最大値は、それぞれ 9.6A/m² および 11.9A/m²であり、F10-A0.2-0°に比べてはるかに増加した。なお、試験体 F10-A0.2-30°に比べて、試験体 F10-A0.2-45°の誘導電流密度は 19.3%増加した。

4. 電磁誘導防食実験

本章では、前節で設定した解析パラメータにおいて防食効果を検証するため、解析モデルと同様な形状寸法の試験体を作製し、鉄筋一本を対象とし、本手法の防食効果および防食効果に及ぼすコイル角度の影響を定量的に検討することとした。なお、コンクリート内部に埋設されている鉄筋に比べて塩水による乾湿繰返しの作用を受ける鉄筋は必要な防食電流密度⁹⁾が高い。このような環境条件で鉄筋の防食効果が確認できた場合、コンクリート内部に埋設されている鉄筋に対しても防食効果があると想定し、本研究では鉄筋単体を用いて防食実験を実施した。

また、第2章では本手法による防食の主たる要因は誘導電流であるという仮説を立てたわけである。それ以外の要因として、誘導電流によるジュール熱により生じる鉄筋の温度上昇も存在する¹⁰⁾。すなわち、温度上昇により腐食反応の化学種である水分が蒸発することで防食が得られる可能性もある。したがって、本手法のメカニズムを確定的にするためには、電磁誘導による鉄筋表面の温度測定が重要となる。

4.1 実験概要

解析モデルと同様な形状寸法の試験体を作製し、図-5に示す。使用した鉄筋は、前処理として濃度 10%のクエン酸二アンモニウム溶液に一週間浸漬することにより不動態皮膜を除去した。温度 20°C、濃度 5%塩化ナトリウム水溶液浸漬 5 分+温度 20°C、湿度 60%に制御された恒温恒湿室で中乾燥 2 日を 1 サイクルとした塩水乾湿繰返し環境に暴露し、鉄筋腐食を促進させた。

平均腐食率の測定方法は、実験開始前に不動態皮膜を除去した鉄筋の質量を測定し、実験開始後 30 日および 60 日の時点で、腐食鉄筋を濃度 10%クエン酸二アンモニウム溶液に浸漬させることで腐食生成物を除去した鉄筋質量を測定する。そして、実験前後の鉄筋質量の減少量を求め、実験前の鉄筋質量で除したものを平均腐食率と定義した。また、電磁誘導の有無による鉄筋の腐食量の変化率を腐食低減率と定義した。

平均腐食率算出後、約 20mm の長さで鉄筋を分割し、各部分の腐食率を算出した。なお、電磁誘導による防食効果の比較を行うため、電磁誘導を適用しない試験体 F0-A0 を前述と同様の前処理と腐食促進方法を実施した。

また、図-5(b)に示されるように、鉄筋の中心位置に

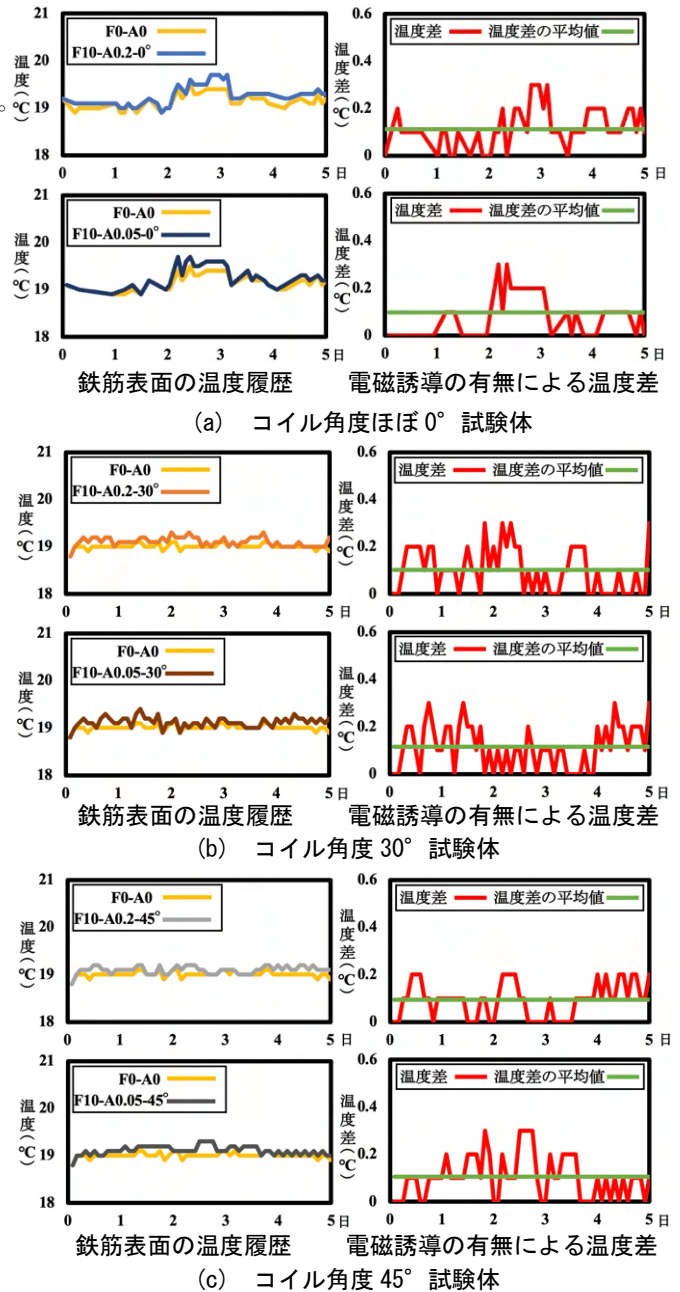


図-6 鉄筋表面温度の経時変化

K 型熱電対を貼り付け、温度 20°C、湿度 60%に制御された恒温恒湿室で 5 日間鉄筋表面の温度履歴を測定した。なお、測定間隔は 2 時間に 1 回とした。

4.2 鉄筋表面の温度経時変化

鉄筋表面の温度履歴および電磁誘導の有無による温度差を図-6に示す。いずれのコイル角度においても、電磁誘導を適用した試験体 F10-A0.2 および F10-A0.05 は電磁誘導を適用しない試験体 F0-A0 に比べると、温度差の平均値は約 0.1°C である。これを基に、電磁誘導の有無による水分蒸発速度の比は文献¹¹⁾により算出すると、電磁誘導を適用した試験体の水分蒸発速度は電磁誘導を適用しない試験体に比べて約 1.001 倍であり、差異が無いことが確認された。すなわち、水分蒸発速度の差異は

無視できると考えられる。したがって、本実験で設定した電磁誘導パラメータの範囲内では、腐食速度に及ぼす温度の影響は無いと判断し、本手法のメカニズムを裏付けることができた。

4.3 本手法による防食効果

(1) 鉄筋の腐食性状

実験 30 日における鉄筋の腐食状況は図-7 に示す。電磁誘導を適用しない試験体 F0-A0 に比べて電磁誘導を適用した試験体 F10-A0.2 および F10-A0.05 では、腐食物の生成量が少ないことが確認できる。

(2) コイル角度ほぼ 0° における防食効果

各試験体における鉄筋の平均腐食率および腐食低減率を図-8 に示す。電磁誘導を適用した F10-A0.2-0° および F10-A0.05-0° の平均腐食率は、それぞれ 0.08% と 0.10% となり、電磁誘導を適用しない鉄筋の腐食率 0.15% に比べて小さい。また、両試験体の腐食低減率は 46% および 31% であり、電流値が大きくなるほど腐食率が低いことがわかる。しかしながら、電流値と腐食低減率が線形関係になく、電流値は 4 倍になると、腐食低減率は 1.5 倍になることが示された。これは、いずれの試験体においても、鉄筋軸方向の防食電流密度は $1\text{A}/\text{m}^2$ に比べて低いいため、軸方向の腐食電流を抑制することができなかつたと考えられる。

鉄筋各部分における腐食率は図-9 に示すように中央領域における腐食率が上下端部領域に比べて、低いことが確認できた。これは、中央領域における防食電流密度が高いことに起因する。

以上のことから、電磁誘導を適用しない試験体に比べて、電磁誘導を適用した試験体では腐食物の生成量が極めて少なくなり、コイル角度はほぼ 0° の電磁誘導コイルを使用する場合、本手法による防食効果が確認された。

(3) コイル角度 30° および 45° における防食効果

図-8 に示すように、コイル角度の増加とともに、防食効果は高くなることが確認できる。例えば、試験体 F10-A0.2 では、実験開始後 30 日においてコイル角度 30° および 45° の腐食率はそれぞれ 0.07% および 0.06% であり、コイル角度 0° 試験体に比べて、腐食率はそれぞれ 10% および 15% 低減した。これは、図-4 に示したようにコイル角度の増加とともに、鉄筋軸方向における防食誘導電流密度が増加していることに起因する。したがって、本実験で設定した電磁誘導パラメータの範囲内では、コイル角度の増加とともに、腐食率は低くなることが確認された。

(4) 腐食率の経時変化

鉄筋腐食率の経時変化は図-10 に示す。まず、試験体 F10-A0.2-30° に着目すると、実験開始後 30 および 60

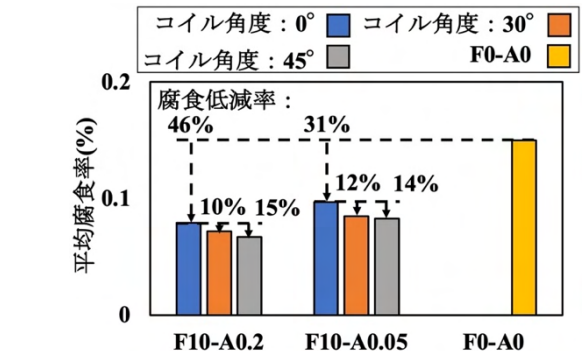
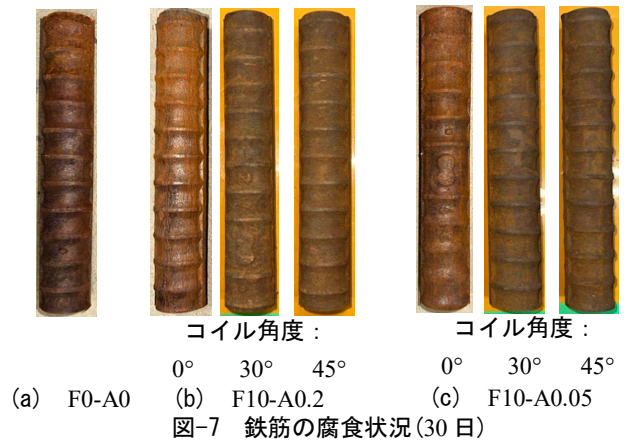


図-8 各試験体の平均腐食率および腐食低減率 (30 日)

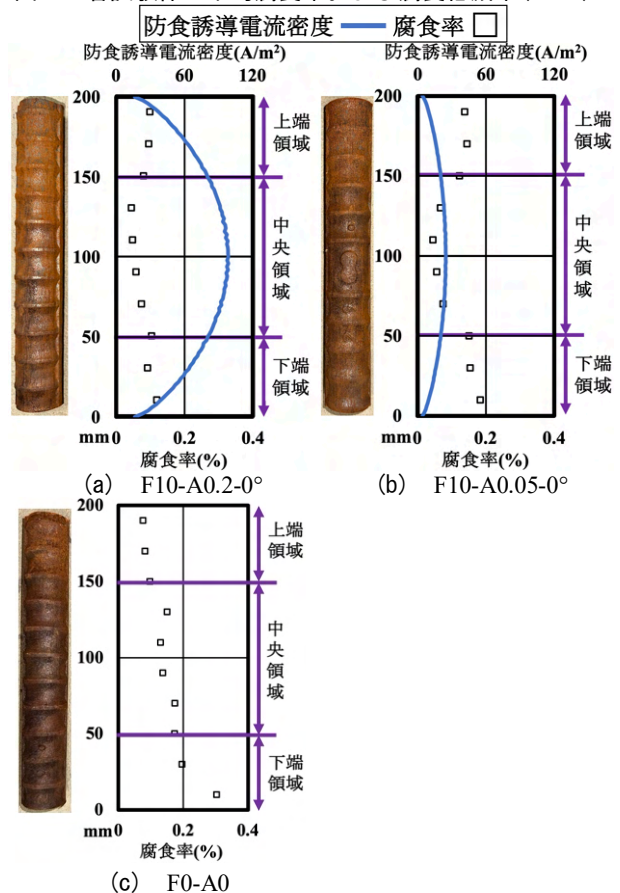


図-9 鉄筋腐食状況および各領域の腐食率

日の腐食率はそれぞれ 0.07% および 0.09% であり、電磁誘導を適用しない試験体 F0-A0 に比べて、腐食率はそれぞれ 52% および 57% 低減した。したがって、実験の経過

日数とともに、本手法適用の有無による差異が増加している。これは、電磁誘導を適用しない試験体に比べて、電磁誘導を適用した試験体の腐食速度は低いことに起因する。

一方、試験体 F10-A0.05-30°に関しては、実験開始後 30 および 60 日の腐食低減率はそれぞれ 43% および 47% である。試験体 F10-A0.2-30°に比べて防食効果が低い。したがって、防食誘導電流密度は高くなるほど、防食効果が大きい。

5. 結論

本研究では、鉄筋一本を対象とし、解析的および実験的手法を用いて、鉄筋表面における防食電流密度の特性および本手法の防食効果に及ぼすコイル角度の影響を定量的に評価した。

以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) いずれの試験体においても、電磁誘導を適用した試験体の平均腐食率は、電磁誘導を適用しない試験体に比べて小さいため、本手法の防食効果が確認できた。
- (2) 電磁誘導解析により、鉄筋中心領域における防食電流密度は上下端領域に比べて高いことがわかる。また、中心領域の腐食率は上下端領域に比べて低いことが確認できた。したがって、防食電流密度が高くなるほど、防食効果が高いことがわかる。
- (3) 電磁誘導解析により、コイル角度の増加とともに、鉄筋円周方向における防食誘導電流密度が減少し、軸方向における防食誘導電流密度が増加していることが確認できた。
- (4) 実験結果により、コイル角度の増加とともに、鉄筋の腐食率が減少し、腐食低減率が増加することが確認できた。したがって、本実験で設定した電磁誘導パラメータの範囲内では、コイル角度の増加とともに、防食効果は高くなる。
- (5) 実験結果により、実験の経過日数とともに、本手法適用の有無による鉄筋の腐食低減率が増加している。したがって、本手法の適用日数が長くなるほど、鉄筋に対する防食効果が高い。

参考文献

- 1) 荒牧 國次：塩化物イオンを含むホウ酸塩緩衝溶液中における鉄不動態皮膜破壊に及ぼすヨウ化物イオンの影響，材料と環境，Vol.64，No.9，pp.401-404，2015.4
- 2) 鎌原 正夫：外部電源方式電気防食の理論と実際，日本造船学会誌，Vol.476，pp.86-91，1969
- 3) 重野 隼太：流電陽極による電気防食法，金属表面技術，Vol.8，No.1，pp.25-30，1957

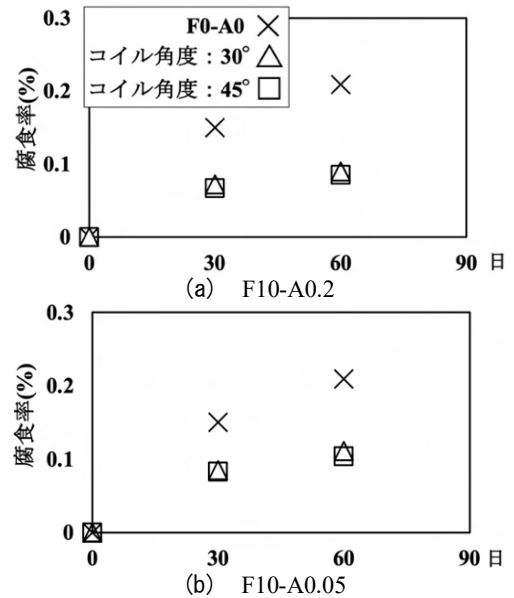


図-10 鉄筋腐食率の経時変化

- 4) 倪 稚茗，大下 英吉：電磁誘導法を用いた RC 構造物の鉄筋防食手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.688-693，2022
- 5) 松村 卓郎，金津 努，西内 達雄：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法，土木学会論文集，Vol.1999，No.634，pp.303-314，1999.11
- 6) 篠田 吉央：鉄筋防錆の観点からコンクリート構造物の健康寿命を考える電気化学的防食技術と健康寿命，JCMA：一般社団法人コンクリートメンテナンス協会主催コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム 2019，2019.6
- 7) 寺井望巳，倪稚茗，大下英吉：電磁誘導法を利用した電気防食効果に及ぼす鉄筋リブの影響の解析的検討，第 49 回土木学会関東支部技術研究発表会，2022
- 8) 浅野 勇，増川 晋，田頭 秀和，林田 洋一：鉄筋およびコンクリートがワイヤレスコンクリートセンサの通信性に与える影響，農村工学研究所技報，No.211，pp.187-203，2011.3
- 9) 腐食防食協会：金属防蝕技術便覧，日刊工業新聞社，pp.580，1977
- 10) 大下 英吉，堀江 宏明，長坂 慎吾，谷口 修，吉川 信二郎：電磁誘導によるコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法，土木学会論文集，Vol.65，No.1，pp.76-92，2009
- 11) 上田 政文，芝 亀吉：水の蒸発速度に及ぼす自然対流の影響，応用物理，Vol.33，No.4，pp.269-273，1964