

電気化学ノイズ法による耐候性鋼と亜鉛めっき鋼のコンクリート用鉄筋としての適用性の確認

立命館大学 ○福山智子 1* 立命館大学 川崎佑磨 1*
Hanbat National University 金侖美 2**

電気化学ノイズ 溶融亜鉛めっき 耐候性鋼
保護性錆 腐食形態

研究の目的

溶融亜鉛めっき鋼（以下、めっき鋼）と耐候性鋼は、大気中で耐食性の高い金属としてさまざまな構造物で用いられている。その耐食性の高さからコンクリートの補強筋としての活用が期待され、めっき鋼については「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物の・施工指針・同解説」や「亜鉛めっき鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」などが発刊されている。しかし、pH が高く水分の多いコンクリート中でのこれら鋼材の電気化学的挙動や耐食性に不明点があるため、普及しているとはいえないのが実情である。

本研究では、コンクリート用鉄筋としての用途が期待される各種鋼材をモルタルに埋設して電気化学ノイズ（以下、EN）を測定し、表層特性の違いが腐食形態に及ぼす影響や EN による腐食形態判別について検討を行った。

研究の内容

・試験体と EN 測定の概要

めっきの施されていない磨き丸鋼（RS）、黒皮付き鋼（BS）、溶融亜鉛めっき鋼（GS）、耐候性鋼（WS）を対象としてモルタルに埋設し、EN を測定した。

腐食促進のための電食 4 時間と 0.5 秒ごとの EN（電位ノイズと電流ノイズ）測定 44 時間を 1 サイクルとし、電食前に測定した EN を EN①、その後の電食と EN 測定を電食①・EN①として 9 サイクル行った。

また、鋼材の腐食状態を観察するため奇数回の電食後に鋼材をはつり出し、観察を行った。

・ウェーブレット変換による腐食形態評価の概要

コンクリート中の鉄筋の腐食形態（全面／局部腐食）の評価は鉄筋の断面欠損などに関連するため重要である。本研究では EN の波形データをウェーブレットにより 8 つの詳細係数 D1 から D8 に分解し、得られた D1~D8 の振幅を 2 乗して積算したものをエネルギーと定義した。

D1~3 が全面腐食、D4~6 が局部腐食、D7~8 が突発的な応答を反映するとされ、そのエネルギーを各事象の発生量として、観察による腐食形態との相関を確認した。

研究の成果、新発見

鋼材腐食は電荷移動に起因するため、表層保護皮膜がある場合腐食進展は妨げられる。この保護皮膜について、コンクリート分野では鉄の不働態皮膜が知られている。

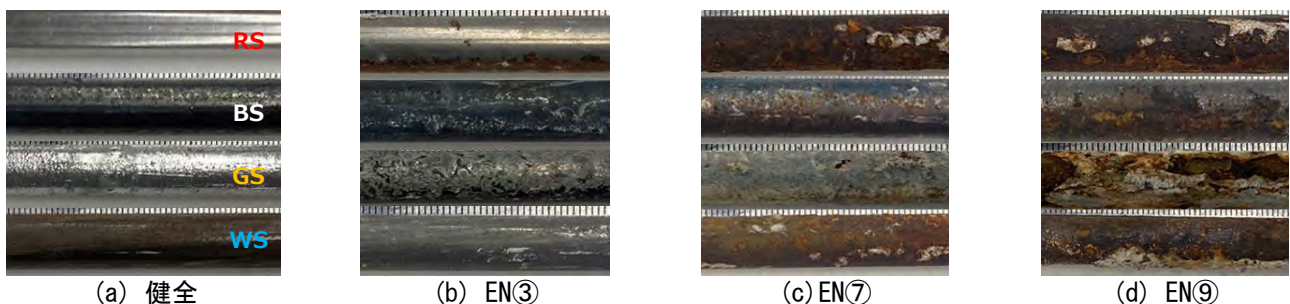


図 1 鋼材の様子（直径 9mm：高さ方向＝直径）

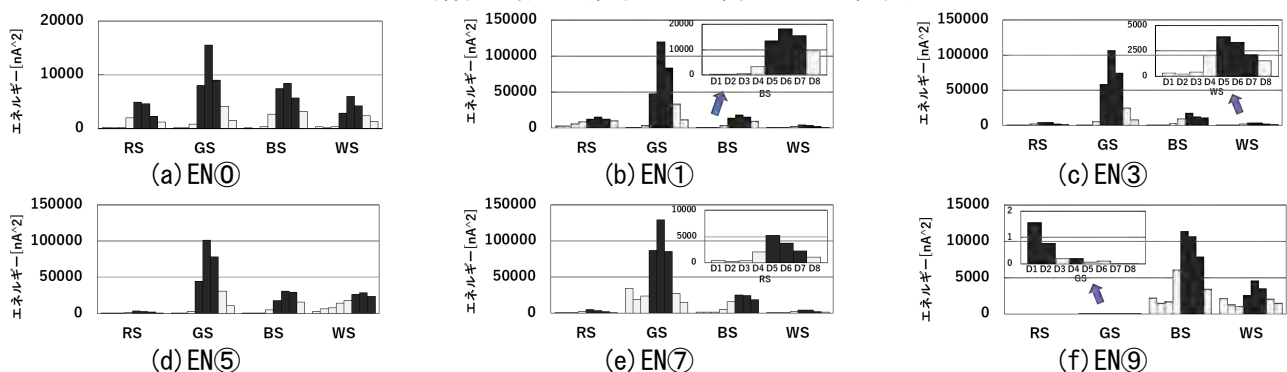


図 2 エネルギーによる各サイクルの腐食形態評価

また、めっき鋼はめっき層により鉄を保護するだけでなく、亜鉛と鉄のイオン化傾向の違いによる犠牲防食効果を有している。これに加えて、コンクリート中の亜鉛はセメント中のカルシウムイオンと反応し不働態皮膜 ($\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$) を形成する¹⁾とされ、耐候性鋼も鋼材表面に形成される緻密な錆(以下、保護性錆)が内部を保護している。さらに、仮に腐食が発生した場合であっても、鉄の腐食生成物が緻密である場合 (Fe_3O_4) には、アノード電流を抑制²⁾したり、アノード・カソード反応に必要な水や酸素の鋼材素地への到達を妨げたりするなどの効果³⁾が期待される。

しかし、鉄の腐食生成物がポーラスである場合 ($\beta\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$) は腐食進展を抑制することはできず、まためっき鋼では腐食が進行して亜鉛めっき層が失われると鉄は腐食を開始する。

そこで、本研究では、EN の測定のほかに、各種鋼材の保護皮膜の破壊と腐食生成物形成について、はつり出した各種鋼材の表面を目視(図 1) とデジタルマイクروسコープにより観察した。その結果を以下に概説する。なお、紙面の関係上、明確な保護層を有する GS, WS, BS に説明をしぼり、マイクروسコープの結果は省略する。

・腐食生成物の観察

GS はモルタル埋設前には銀色の金属光沢を有している(図 1(a))。電食①③後に観察される黒色のランダムな凹凸(図 1(b)) は、亜鉛の不働態皮膜であると推察される。サイクルが進むにつれ亜鉛層が断面欠損して局所的に鉄が露出することで赤褐色の錆が生じ、最終的には付着力の低い層状の錆が全面にみられるようになった(図 1(d))。

WS には電食前から表面に薄く褐色の錆がみられた(図 1(a))。これは、鋼材に含まれている微量の金属元素により大気中において形成された緻密な保護層と考えられる。しかし、電食⑦後に観察される赤褐色の薄い層については、層が剥離して段差が生じている様子も確認された。耐候性鋼の保護性錆の破壊条件について不明な点も多いが、強制的な腐食促進により、サイクルが進むにつれ鋼材表面の保護性錆が滅失し腐食が進行したと考えられる。

BS は電食③後から黒皮が局所的に剥離し鋼材素地が露出しており、その後のサイクルでは黒皮が破壊された箇所を起点に腐食が進行している。サイクルに伴い、黒皮が剥離した箇所には赤褐色の錆層が形成され厚みも増したことから、鋼材素地の腐食が進行したと推察できる。

以上のように、初期のサイクルでは各鋼材の表層条件に応じた保護皮膜の変化(破壊・剥離、局所/全面)が観察されたが、サイクルが進むことで最終的には赤褐色で脆い層状の腐食生成物が全面を被覆するようになり、保護皮膜の機能が失われたと考えられる。

・ウェーブレット解析の結果と考察

図 2 ではエネルギー評価の一部を示したものである。エネルギーを各事象の発生量として腐食形態を推定し、実際の観察結果との相関を確認した

GS のエネルギーは EN⑧, ⑨を除きほかの鋼材よりも大きいことから亜鉛層の腐食が鉄に比べて活発であること、EN⑨ではエネルギーが急激に小さくなったことから鉄の腐食に切り替わったことが推測できる。実際に、図 1(d) では赤褐色の錆が表面全面を覆っている。また、GS は全サイクルを通じて D3~D5 が大きくマクロセル腐食傾向にあると評価できるが、これは亜鉛層が均一に減少せず鋼材素地の一部が露出して腐食したためと考えられる。

WS のエネルギーは初期のサイクルではほかの鋼材に比べて明らかに小さい。しかし EN⑤では、それ以前に比べて大きくなり、また D6~D8 であったのが EN⑨で D3~5 に移行している。これは、保護性錆が健全な間は突発的な応答優位であったところが、図 1(d) に示すように保護性錆が失われた後は鉄筋の腐食が進んだためと考えられる。

BS については、鋼材素地の腐食開始(赤褐色の錆の生成)とエネルギー増加は相関がみられた。

今後の予定

研究を発展させるため、以下について検討を行う。

- 1) 電流密度を変えることでイオン化した鉄の鋼材表面への歩留まり(保護性錆形成状況)を変化させ耐食性について評価する。
- 2) 分極曲線は金属の耐食性の評価に広く用いられていることから、劣化環境(塩害、中性化、乾湿繰返し)やコンクリートの物性(水セメント比による透水性や透気性の違いなど)をパラメータに測定を行い、各種鋼材の耐食性や使用に適した環境を評価する。
- 3) 成分分析や SEM 観察から腐食生成物の緻密度を評価し、保護性能や断面欠損の進行速度を EN の結果と紐づけして評価する。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針・同解説，日本建築学会，2022
- 2) 高谷哲ほか：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集 E2, 71(3), pp.235-247, 2015
- 3) 三沢俊平他：耐候性鋼の安定さび層，まてりあ, 35(7), pp.783-789, 1996

謝辞

本研究の実施に際し、神園若葉氏をはじめとする立命館大学の学生諸子に協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

*立命館大学

**Hanbat National University

*Ritsumeikan University

**Hanbat National University