

コンクリート中鉄筋の電位変化が腐食発生限界塩化物イオン濃度に与える影響

東京理科大学 学生会員 ○橋本 永手

東京理科大学 正会員 加藤 佳孝

1. はじめに

鉄筋の腐食は、鉄が鉄イオンになるアノード反応と、水と酸素が反応し水酸化物イオンになるカソード反応との酸化還元反応である。酸化還元反応は古くから電気化学分野で体系化されており、コンクリート中鉄筋の腐食現象も電気化学理論で体系化することで、腐食発生予測や防食技術等に応用が可能であると考えられる。しかし、コンクリート中鉄筋の腐食に関しては、理論的解釈を与えた先行研究は僅少である。

筆者らは既報¹⁾にて、アルカリ水溶液中鉄筋の腐食発生条件を整理した。本論では、既報で整理した腐食発生条件式を応用し、コンクリート中鉄筋の電位変化が腐食発生限界塩化物イオン濃度に与える影響を把握した。また、コンクリート中鉄筋の電位が変化する要因として、電気防食工法を例に挙げ、腐食発生条件式を用いて腐食発生限界塩化物イオン濃度を検討した。

2. 鉄筋腐食条件式

既報¹⁾にて、アルカリ水溶液中鉄筋の腐食発生条件を次の通り整理した。

$$a_{Cl^-} > A \times \exp(B \times E) \quad (1)$$

ここに、 $E[V]$ は鉄筋電位、 a_{Cl^-} は腐食発生限界塩化物イオン濃度[mol/L]、 A 、 B は定数である。この式の物理的意味は、「鉄筋電位等により決定する右辺より、鉄筋表面の塩化物イオン濃度が高くなるのが腐食の発生条件である」と捉えることができる。なお、この鉄筋電位は鉄筋に腐食が発生する前の不動態状態での鉄筋電位である。図-1は高 pH 水溶液中の鉄筋を様々な電位に制御し、腐食発生限界塩化物イオン濃度を測定した結果である。鉄筋電位の低下に伴って、腐食発生限界塩化物イオン濃度は指数関数的に上昇することがわかる。また、図中各線の傾きが pH にかかわらず同程度であることから、係数 B は水溶液の pH に依存しない定数であると考えられる。各線

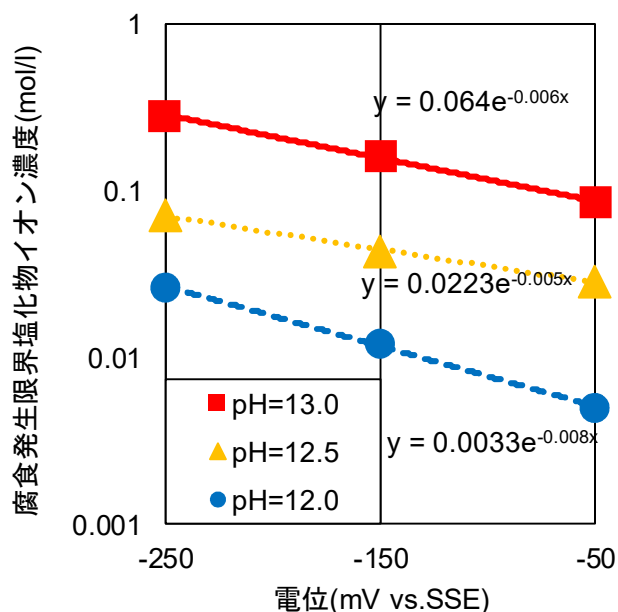


図-1 鉄筋電位と腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係

の傾きの平均値をとり、定数 B を定量化すれば次の通りである。

$$a_{Cl^-} > A \times \exp(-0.006 \times E) \quad (2)$$

3. コンクリート中鉄筋の腐食に対する考察

式(2)より、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は鉄筋電位に依存することがわかる。したがって、コンクリート中鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度を推定するためには、コンクリート中鉄筋の電位を考慮する必要がある。鉄筋電位は、図-2に示すようにアノード内部分極曲線とカソード内部分極曲線の交点として決定される。したがって、アノード内部分極曲線およびカソード分極曲線が変化すれば必然的に鉄筋電位も変化する。一般に、高 pH 水溶液中で不動態皮膜を形成した鉄のアノード内部分極曲線は、不動態保持電流密度で定常状態になっていることから、電位の変化に対する電流密度の変化が小さい。したがって、カソード内部分極曲線との交点である鉄筋電位は、カソード内部分極曲線の変化に依存して上下する。

キーワード 腐食発生限界塩化物イオン濃度、電位、内部分極曲線、平衡電位、電気防食工法

連絡先 〒278-0022 千葉県野田市山崎 2641 TEL 04-7124-1501 (4054)

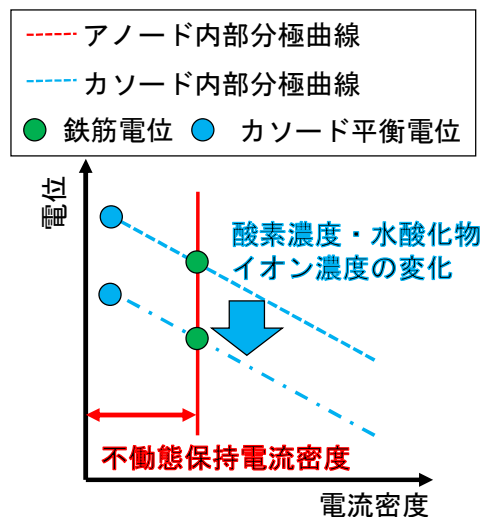
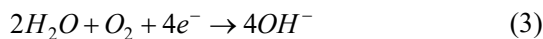


図-2 コンクリート中鉄筋の内部極曲線

コンクリート中鉄筋のカソード内部分極曲線は次の反応に従っている。



この反応の平衡電位は Nernst の式より次の通りである。

$$E_{cathode} = E_{cathode}^0 - \frac{2.3RT}{F} \log_{10} \frac{a_{OH^-}}{a_{O_2}} \quad (4)$$

ここに、 $E_{cathode}$ は本系のカソード反応の平衡電位 [V] であり、図-2 中青丸に示される。また、 $E_{cathode}^0$ は本系のカソード反応の標準電極電位 [V]、 R は気体定数、 T は絶対温度 [J/(K・mol)]、 F はファラデー定数 [C/mol]、 a_{OH^-} は水酸化物イオンの活量 [mol/L]、 a_{O_2} は酸素の活量 [mol/L] である。式(4)第二項の係数を計算すると次の通りとなる。

$$E_{cathode} = E_{cathode}^0 - 0.059 \log_{10} \frac{a_{OH^-}}{a_{O_2}} \quad (5)$$

したがって、酸素濃度が 1/10 倍、あるいは水酸化物イオン濃度が 10 倍に変化すると、カソード内部分極曲線は 59mV 卑側に平行移動する。これにともなって、アノード内部分極曲線との交点である鉄筋電位も 59mV 卑化すると考えられる。さらに、式(2)の鉄筋電位に 59mV の電位変化を代入すれば、腐食発生限界塩化物イオン濃度は 1.42 倍に増加することがわかる。

4. 鉄筋の電位変化による腐食抑制現象の応用例

ここでは、前章で示した現象の応用例として、鉄筋腐食が生じる前に電気防食工法を適用する場合を挙げ、その効果について考察する。

電気防食工法はコンクリート外部から内部の鉄筋

に電気を流し、鉄筋電位を卑化させ、腐食を抑制する工法である。電気防食工法の特徴の一つに、腐食の激しい鉄筋やかぶりが乾燥した構造物に対しては、鉄筋の分極に大きな電流密度を要する一方で、不動態状態にある鉄筋に対しては容易に分極することができることが挙げられる。したがって、健全鉄筋に対して電気防食を適用することで、鉄筋電位を容易に卑化させることができるとともに、前章で示したように腐食発生限界塩化物イオンも増加させることが可能となり、より効果的に鉄筋を防食することができると考えられる。式(2)より鉄筋電位 ΔE [mV] の変化に対して、 $1.006^{\Delta E}$ 倍に腐食発生限界塩化物イオンが変化する。この値は -100mV の分極で 1.822 倍、-1000mV の分極で 403 倍となる。特に、外部電源方式の電気防食であれば分極量を自由に設定できるため、飽和塩化ナトリウム濃度であっても鉄筋が腐食しない状態を実現することも可能である。

5. まとめ

本研究で得られた知見は次の通りである。

- ・ 酸素濃度が 1/10 倍あるいは水酸化物イオン濃度が 10 倍変化することによって、鉄筋電位は 59mV 変化し、それに伴って腐食発生限界塩化物イオン濃度は 1.4 倍変化する。
- ・ 健全鉄筋に対して電気防食工法を適用することで鉄筋電位を容易に卑化させることができるとともに、腐食発生限界塩化物イオン濃度を上昇させることが可能であり、効果的に鉄筋を防食することが可能である。
- ・ 健全鉄筋に対しての電気防食工法では、飽和塩化ナトリウム濃度であっても鉄筋を腐食させない状態を実現することも可能である。

謝辞

本研究の一部は、平成28年度土木学会吉田奨励賞、SIP インフラ維持管理・更新マネジメント技術の「港湾構造物のライフサイクルマネジメントの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 橋本永手, 加藤佳孝: 塩化物イオンによる鉄筋の不動態皮膜の破壊を定量的に把握する実験手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, 2018