

ASR と塩害の複合劣化により生じる鉄筋の腐食特性に関する研究

京都大学 学生会員 花田 真里 正会員 高谷 哲
 正会員 山本 貴士 フェロー会員 宮川 豊章

1. 研究目的

本研究では、アルカリ骨材反応（以下 ASR）により鉄筋位置まで到達していないひび割れを生じた構造物において、ひび割れを通じて水や塩化物イオンが侵入する現象を想定し、ASR ひび割れを模擬した供試体に対して、総アルカリ量、塩化物イオン量を実験要因として、外部から塩化物イオンを供給し、高アルカリ環境下における鉄筋の腐食特性について検討した。

2. 実験概要

供試体は 100×100×400mm の角柱供試体で、かぶり 20mm の位置に鉄筋（D19）を 1 本設置した。鉄筋中央から左右に 50mm 離れた位置に長さ 100mm の腐食範囲を設定し、腐食させない部位についてはブチルゴムテープで防食処理を行った。養生後、ダイヤモンドカッターを用いて幅 1.7mm、深さ 15mm のスリットをかぶり部分に設け、ひび割れの模擬とした。供試体概要を図 1 に示す。



図 1 供試体概要（単位：mm）

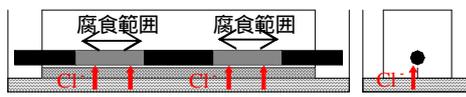


図 2 供試体の浸せきの様子

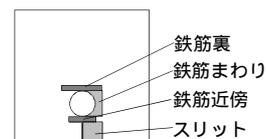


図 3 塩化物イオン量測定位置

供試体はモルタルで作製し、W/C=0.50、C=508kg/m³とした。

実験要因は、総アルカリ量、塩化物イオン量とした。総アルカリ量は水酸化ナトリウムを添加して調整し、2.7、4.0、8.0kg/m³の 3 種類とした。なお、2.7 kg/m³はセメント由来のアルカリ量である。塩化物イオン量は浸せき溶液の塩化物イオン濃度により調整し、1.5、3.0、6.0%の 3 種類とした。作製した供試体は脱型後、所定の濃度の塩化カルシウム水溶液に浸せきした。浸せきの様子を図 2 に示す。

浸せき期間中は、腐食範囲の鉄筋直上において自然電位および分極抵抗の測定を行った。測定には飽和塩化銀照合電極を使用した。自然電位が-230mV（ASTM C876）、分極抵抗が 26k \cdot cm²（CEB）となった時点腐食開始と判断し、鉄筋をはつり取り、鉄筋近傍のコンクリート（図 3 参照）について腐食発生限界塩化物イオン量を測定した。また、鉄筋裏、鉄筋まわり、スリット部分の塩化物イオン量もあわせて測定した。

3. 実験結果および考察

本研究では、自然電位および分極抵抗の経時変化から腐食開始を判定した。浸せき開始後 5～60 日程度でほぼ全ての供試体で腐食開始が確認された。浸せきした塩化カルシウム水溶液の濃度が大きいほど早く腐食開始する傾向にあった。総アルカリ量と腐食開始までにかかった日数との間に相関関係は見られなかった。同一要因でも供試体によって腐食開始までの日数は 30 日程度の開きが出たものもあり、スリット深さが一定でなかったこと、自然電位および分極抵抗の測定位置から離れた部分の腐食は検知しにくく腐食開始判定が遅れたことなどが原因と考えられる。

腐食開始判定された供試体について、塩化物イオン量の測定結果を浸せき時の底面からの距離で整理したものを図 4 に示す。この図より、水溶液中に浸せきしているスリット部分で塩化物イオン量は最大となり、浸せき面から離れるに従って、塩化物イオン量は減少している。鉄筋に接触している部分

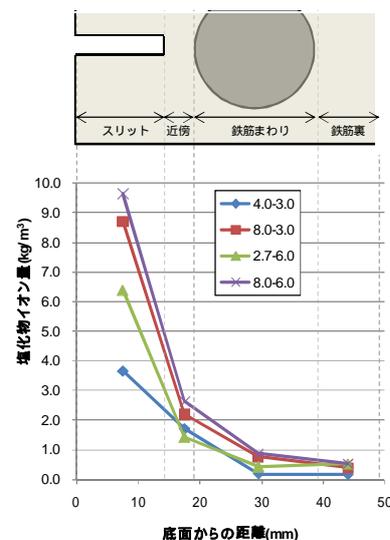


図 4 各測定位置での塩化物イオン量

キーワード 鉄筋腐食，塩害，ASR，ひび割れ

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 TEL：075-383-3173 FAX：075-383-3177

の塩化物イオン量を見ると、スリットの先端と鉄筋表面との間（鉄筋近傍）での塩化物イオン量が最も多い。このことより、鉄筋近傍の塩化物イオン量が腐食開始を決定づけていると言え、本研究では鉄筋近傍での塩化物イオン量の測定結果を腐食発生限界塩化物イオン量と定義することとする。

総アルカリ量を pH に換算し、腐食発生限界塩化物イオン量との関係を図 5 に示す。総アルカリ量が多いほど、つまり、pH 値が大きいほど、腐食発生限界塩化物イオン量も多くなる傾向が読みとれる。これは、総アルカリ量が多いほど鉄筋近傍の pH は高く保たれて、不動態被膜が破壊されにくいいためであると考えられる。また、総アルカリ量が多いほど腐食開始までの潜伏期間は長くなることが確認された。しかし、総アルカリ量 8.0 kg/m^3 の供試体の腐食発生限界塩化物イオン量は $2.2 \sim 2.6 \text{ kg/m}^3$ 程度であり、通常言われている $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の範囲にほぼおさまっており、高アルカリ環境下であっても不動態被膜の破壊は起こることが認められる。

Hussain ら¹⁾は、外部から塩化物イオンを供給する条件でモルタル中の鋼材腐食に関する実験を行い、pH 値が大きくなるほど腐食発生限界塩化物イオン量が増加することを示している。これは、本実験の結果と一致している。また、pH 13.3 の範囲では $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] < 1.28 \sim 1.86$ の場合に腐食が発生しないと報告している。しかし、本実験結果から求めた $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 値は、pH 13.4 のとき 0.262 であり、Hussain らの報告している $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 値よりも小さな値で腐食が発生することが確認された。一方、横田ら²⁾は、反応性骨材を使用せずに総アルカリ量と塩化物イオン量を調整したモルタル供試体について、腐食発生限界塩化物イオン量を求めている。横田らの研究では、総アルカリ量が多いほど腐食発生限界塩化物イオン量は少なくなっており、本研究とは逆の傾向を示しているが、総アルカリ量も変化しても腐食発生限界塩化物イオン量が通常言われている $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の範囲にほぼおさまっていることは共通している。横田らはあらかじめ内部に塩化物イオンを含有しているのに対して、本研究は外部から塩化物イオンを供給している。塩化物イオンが内部に存在しているか、外部から供給されるかによってアルカリの影響割合は大きく異なり、腐食の傾向にも違いが生じるのではないかと考えられる。この理由については明確には分からないが、塩化物イオンの事前混入と事後混入とは、不動態被膜の形成や破壊のメカニズムが異なるためと考えられる。

本研究の結果より、鉄筋位置までひび割れが到達していない場合には、鉄筋近傍のコンクリートまで浸透した塩化物イオンが腐食の進行に影響を与えていることが分かった。既報²⁾により、鉄筋位置までひび割れが到達している場合には、ひび割れから侵入した塩化物イオンが直接鉄筋に作用しており、鉄筋近傍コンクリートの塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量に達していなくても、鉄筋腐食が生じるという結果が出ている。本研究の結果とあわせると、ひび割れが鉄筋位置まで到達しているか否かにより、鉄筋腐食の傾向が大きく異なると言える。

4. 結論

- 1) 腐食開始までに要する日数は、塩化物イオン濃度が大きいほど短くなる傾向にある。
- 2) 鉄筋位置までひび割れが到達していない場合には、塩化物イオンの浸透により、鉄筋近傍コンクリートの塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量に達したときに腐食が開始すると考えられる。
- 3) 総アルカリ量が多いほど、腐食発生限界塩化物イオン量は多くなる傾向にあったが、総アルカリ量 8.0 kg/m^3 の高アルカリ環境下においても、腐食発生限界塩化物イオン量は $2.2 \sim 2.6 \text{ kg/m}^3$ 程度であった。

参考文献

- 1) Syed Ehtesham Hussain, Ahmad S.Al-Gahtani, and Rasheeduzzafar: Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete, ACIMaterials Journal, Vol.93, No.6, 1996
- 2) 横田 優, 松場 新吾, 立川 貴重, 米澤 和宏: アルカリ量が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的研究, 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.9, pp.275-280, 2009
- 3) 花田 真里, 高谷 哲, 山本 貴士, 宮川 豊章: ASR と塩害の複合劣化により生じる鉄筋の腐食特性に関する研究, 土木学会関西支部年次講演会概要集, 2010 (投稿中)

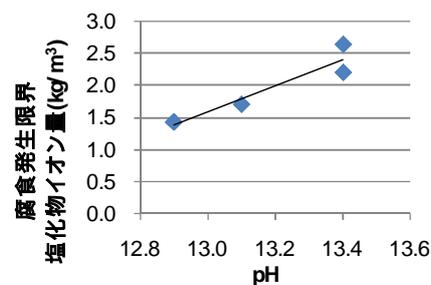


図 5 pH と腐食発生限界塩化物イオン量の関係