

が生じたためであると考察していたが、本実験の結果を踏まえると、時間の経過とともにマクロセル電流が減少したのは亜硝酸イオンの拡散によるものではなく、コンクリートの硬化が進み、コンクリート抵抗が高くなったことによると推察される。

一方で、本研究において亜硝酸イオンを塗布後 1 週間の分極試験を行った結果 (Fig.4) を見ると、塗布後 1 週間時点で亜硝酸イオンの腐食抑制効果が表れており、亜硝酸イオンが 1 週間である程度鉄筋位置まで到達したことが確認されている。この原因として、亜硝酸イオンは拡散で内部に侵入したのではなく、亜硝酸リチウム水溶液として塗布していたため、水分の移動とともに亜硝酸イオンが浸透したと考えられる。実験室で作製した供試体は、打設してから圧入・測定するまでの期間が短く、比較的高含水率が高く保たれていると考えられるが、建設後長い時間が経過した構造物では含水率が低下していることも考えられ、圧入した際の亜硝酸イオンの分布が供試体とは異なる可能性も考えられ、実構造物と供試体の違いについては今後検討が必要であると考えられる。

3・3 断面修復後に生じるマクロセル腐食

各鉄筋間を流れるマクロセル電流の経時変化を Fig.13 ~ Fig.15 に示す。Fig.13 を見ると、断面修復部に PCM を用いた場合には、養生後 2 週間の時点から母材部と補修部の界面におけるマクロセル電流がほとんど生じていないことが分かる。これは PCM の電気抵抗が高いため、マクロセル電流が流れにくかったためと考えられる。一方で、補修部に亜硝酸イオンを添加した場合を見てみると、断面修復部に PCM を用いた場合でも養生後 2 週間後の時点では比較的大きなマクロセル電流が生じていることが分かる。補修部は塩化物イオンが混入されていないため、亜硝酸イオンを添加しない場合でも鉄筋が不動態化していると考えられ、亜硝酸イオンを添加することによるマクロセル腐食の起電力 (補修部と母材部の電位差) が大きくなることは考えられない。したがって、亜硝酸イオンを添加することによりマクロセル電流が大きくなったのは、亜硝酸イオンを添加することにより補修部の電気抵抗が低下したためであると推察される。

次に、マクロセル電流の経時変化を見てみると、すべての供試体において時間の経過とともにマクロセル電流は小さくなっており、養生後 8 週目の時点で $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下になっている。これは、時間の経過とともに断面修復材の水和反応が進行し、電気抵抗が高くなったためと考えられる。このことから、断面修復部に亜硝酸イオンを添加することによりマクロセル腐食が促進される危険性は少ないと考えられる。

4 亜硝酸イオンの適用方法と今後の課題

本研究では、亜硝酸イオンの添加方法や鋼材の腐食状態を要因として、モルタル中の鋼材の分極試験を行った。その結果、亜硝酸イオンは酸化剤として鋼材を不動態化させるという現象は明確には確認できなかった。ただし、亜硝酸イオンが作用してから分極試験を行うまでに時間が経過しているため、酸化反応が終わった後で試験を行っている可能性も考えられる。そのため、酸化剤として効果を発揮するのか、吸着など別のメカニズムで効果を発揮するのかは明言できないが、主にアノード反応を抑制する働きがあることは確認された。また、コンクリート表面に塗布した場合でも、水の移動とともに亜硝酸イオンが浸透し、塗布後 1 週間以内である程度腐食抑制効果が得られることが明らかとなった。

一方で、亜硝酸イオンを添加すると鋼材の電位が貴化するため、亜硝酸イオンが十分な箇所と不十分な箇所

で電位差が生じ、マクロセル腐食が生じることが懸念されたが、断面修復部に亜硝酸イオンを添加した場合でも時間の経過とともにマクロセル電流は小さくなることが確認され、亜硝酸イオンの濃度の違いによるマクロセル腐食はほとんど問題にならない可能性が示された。

ただし、実構造物に対して適用することを考えると、断面修復部における塩化物イオンは少なく、鉄筋は不動態化していると考えられ、断面修復部に亜硝酸イオンを添加することによるメリットは小さいと考えられる。本研究の成果を踏まえると、亜硝酸イオンを断面修復部に添加するのではなく、腐食が進行する可能性の高い母材部に亜硝酸イオンを塗布するのが、より効果的な亜硝酸イオンの適用方法であると推察される。しかし、本研究では、コンクリート表面に亜硝酸イオンを塗布することによる亜硝酸イオンの浸透深さや鉄筋近傍の亜硝酸イオン濃度については検討できていない。したがって、亜硝酸イオンの塗布による鋼材腐食抑制効果については、今後さらなる検討が必要であると考えられる。

5 結 言

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 亜硝酸イオンは酸化剤として鋼材を不動態化させるのか、あるいは鋼材表面に吸着することにより鉄の溶解を妨げて腐食抑制効果を発揮するのかが明確にはできなかったが、主にアノード反応を抑制することで腐食抑制効果を発揮すると考えられる。また、コンクリート表面に塗布した場合でも、塗布後 1 週間である程度の腐食抑制効果が得られたことから、コンクリート表面に塗布した場合には、水の移動とともに亜硝酸イオンが浸透する可能性が示された。
- (2) 腐食鋼材については、亜硝酸イオンの添加による鋼材表面の pH 変化により、生じている腐食生成物が複雑な還元挙動を示す可能性が考えられ、腐食鋼材への亜硝酸イオンの効果については今後さらに検討が必要であると考えられる。
- (3) 亜硝酸イオンは鋼材の電位を貴化させるが、コンクリートの電気抵抗が大きいため、亜硝酸イオン濃度の違いによるマクロセル腐食はほとんど生じない可能性が示された。

本研究を行うに当たり、福徳技研 (株) の徳納武使氏、井上建設 (株) の峯松昇司氏、広島ガステクノ (株) の向井康氏の各氏より多大なるご協力をいただいた。また考察するに当たり、(株) ナカボーテックの望月紀保氏、小林浩之氏、ならびに慶應義塾大学名誉教授の荒牧國次博士に多大なるご助言をいただいた。ここに謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) S.Takaya, S.Nakamura, T.Yamamoto and T.Miyagawa, "Influence of steel corrosion products in concrete on crack opening weight loss of corrosion", Journal of Materials, Concrete, Structures and Pavement, E2, Vol.69, No.2, pp.154-165 (2013)
- 2) Y.Hama, O.Senho and R.Akita, "Influence of nitrite ion and chloride ion on reinforcement corrosion in concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.22, No.2, pp.55-60 (2000)
- 3) K.Aramaki, "Action of corrosion inhibitors (Part 2)", Zairyo-to-Kankyo, Vol.56, No.7, pp.292-300 (2007)

- 4) N.Mochizuki, S.Otani, H.Kobayashi, T.Wakabayashi, Y.Sone and N.Nakatani, Proceedings of the 57th Japan Conference on Zairyo-to-Kankyo, pp.410-413 (2010)
- 5) S.Takaya, T.Naito, Y.Sudoh, T.Yamamoto and T.Miyagawa, "Basic investigation about influence of NO₂ gradient on macrocell corrosion", Proceedings of the Concrete Structures Scenario, Vol.12, pp.483-488 (2012)
- 6) T.Naito, S.Takaya, Y.Sudoh, T.Yamamoto and T.Miyagawa, "Concentration distribution of NO₂ caused by LiNO₂ injection method", Proceedings of the Concrete Structures Scenario, Vol.13, pp.529-534 (2013)
- 7) A.Nishizawa, S.Takaya, S.Nakamura and T.Miyagawa: "Influence of corrosion products on relationship between crack width and corrosion weight loss", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.35, pp.1051-1056 (2013)
- 8) S.Miyazato, N.Ohtsuki and A.Konagai, "Experimental and theoretical investigation on macrocell current measurement method with divided steel bar", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.23, pp.547-552 (2001)