

[1135] 塩害による鉄筋腐食の補修工法に関する研究

小泉 徹*¹・高桑信一*²・柳場重正*³

1. はじめに

今日、色々な方面でコンクリート構造物の劣化が問題となっているなかで、特に島国で海接地域の多い我国では、海からの塩分によるコンクリート構造物の塩害が生じている。石川県下の北陸自動車道においても海岸線に接近する区間が長く、また気象条件等の激しさなどから塩害による鉄筋コンクリート構造物の損傷が見られ、その対策工事が繰り返し行われている。

一般的に塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物の補修工事は劣化損傷部分の断面修復と表面被覆の組合せで行われている。このような組合せにおいても、塗膜などの被覆により、外部からの塩分侵入の遮断が確認されている補修済みの箇所で、再補修の必要性が生じた事例も報告されている [1]。これらは補修前にコンクリート内部にすでに蓄積された塩分（以下蓄積塩分とする）による再損傷と考えられ、蓄積塩分を考慮した補修対策が必要であるといえる。

蓄積塩分への対策のひとつとして亜硝酸塩系防錆剤の使用が考えられる。亜硝酸塩系防錆剤による補修工法に関する研究には、亜硝酸塩の水溶液をコンクリート表面から塗布含浸させたもの [2] や鉄筋腐食により生じたひびわれに低圧注入させたもの [3]、亜硝酸塩含有モルタルによりコンクリート表面を被覆したもの [4] などがある。いずれの場合にも鉄筋周辺に高濃度の亜硝酸塩を存在させうるかが重要な問題である。

我々は蓄積塩分に対して、鉄筋の発錆を防ぐに必要とされる量の亜硝酸塩（亜硝酸リチウム）を含むポリマーセメントモルタルを鉄筋に巻き付ける（以下巻き付け工法とする）ことで、より高い防錆効果が期待されることを報告した [5]。コンクリート構造物の塩害による損傷パターンとしては、図-1に示す損傷程度の軽微なものから、線状剥離、うろこ状剥離、面状剥離が考えられる。損傷程度が大きく鉄筋裏側までのはつり、断面修復を行う場合には巻き付け工法が可能となる。しかし、軽微な損傷で、鉄筋裏側までのはつりを行わない場合には巻き付け工法は不可能であり、この場合には亜硝酸塩の浸透による防錆効果を期待して、亜硝酸塩を含むポリマーセメントモルタルで断面修復を行う（以下打設工法とする）補修が考えられる。

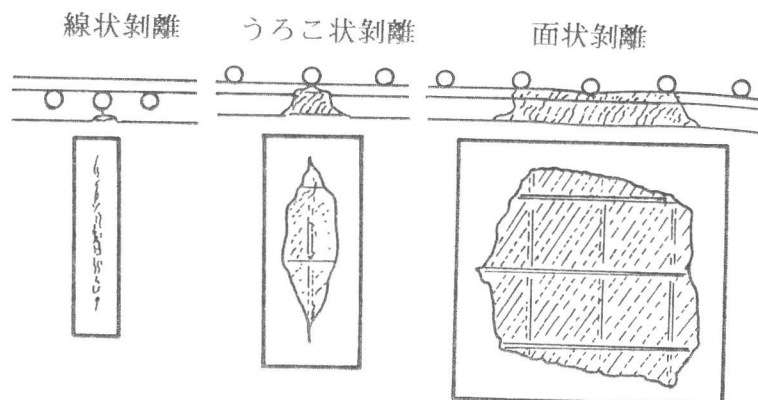


図-1 塩害による損傷パターン

本研究はポリマーセメント

* 1 石川工業高等専門学校助教授 土木工学科、工修（正会員）

* 2 石川工業高等専門学校技官 土木工学科

* 3 北陸建設技術研究所所長、工博（正会員）

モルタルに含まれる亜硝酸塩濃度を変化させて、巻き付け工法と打設工法による防錆効果を比較検討するものである。図-2に巻き付け工法と打設工法の概略を示す。

2. 実験方法

2.1 実験条件および供試体作製

本実験では外部からの塩分が遮断されても、蓄積塩分により鉄筋が腐食する状況を想定している。したがって、 $\phi 10 \times 310\text{mm}$ のみがき鉄筋を中心にしたモルタル中の NaCl が Cl^- 換算で 0.12、0.30% (以下 $\text{NaCl}/\text{モルタル} = 0.2, 0.5\%$ とする) である $5 \times 5 \times 30\text{cm}$ の角柱モルタル (以下コアモルタルという) を作製し、さらにその周囲を、塩分を含まないモルタル (以下周囲モルタルという) で取り囲み、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を作製した。

巻き付け工法ではコアモルタルの塩分に対し、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0、0.3、0.6、1.0 となるようにポリマーセメントモルタルを巻き付けた。したがって、各供試体の巻き付け量は塩分量と $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比により異なるものとなる。

打設工法では実構造物で損傷部分をはつた後、ポリマーセメントモルタルで修復することを想定して、コアモルタルの一部をポリマーセメントモルタルで置き換えたものに周囲モルタルを

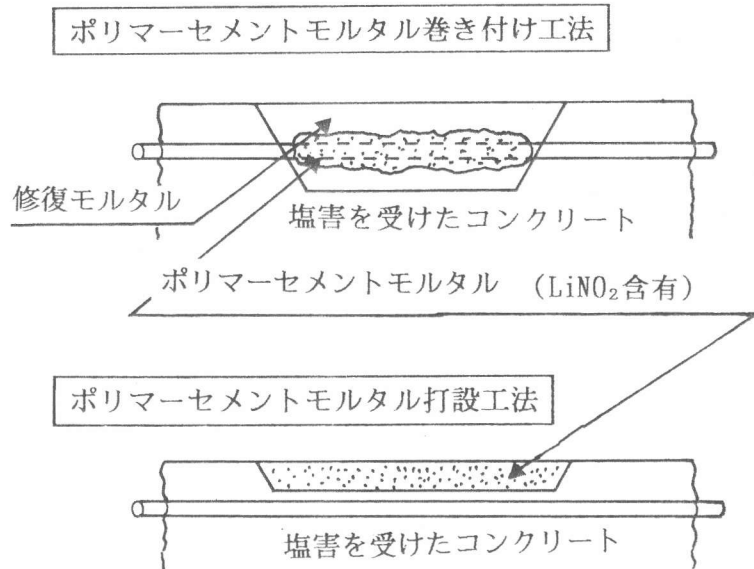


図-2 巻き付け工法、打設工法

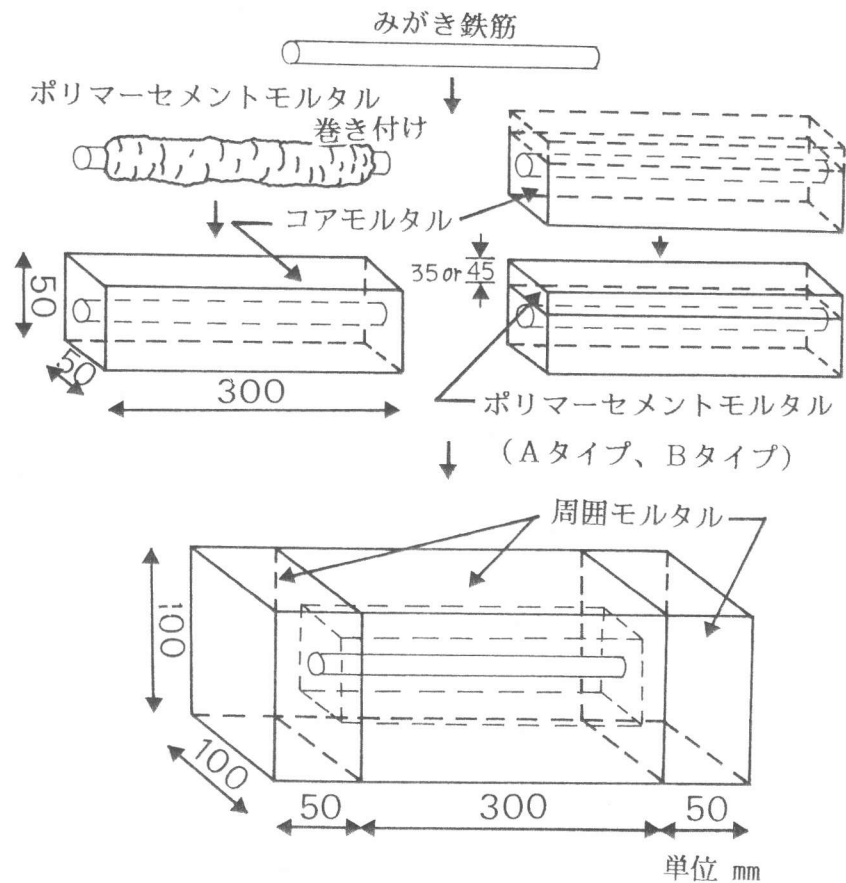


図-3 供試体作製の概要

打設して供試体を作製した。打設工法でははつり深さを鉄筋表面までとするAタイプと、鉄筋に対し、かぶり5mmまでとするBタイプとした。

このためポリマーセメントモルタルに含まれるNO₂⁻は、ポリマーセメントモルタル以外のコアモルタル中に存在するCl⁻に対しNO₂⁻/Cl⁻モル比=0.6、1.0となるようにしたものである。それぞれの供試体作製の概要を図-3に示す。

供試体は材令14日まで20℃水中養生後、乾湿繰り返しにより腐食の促進試験を行った。腐食促進試験は、温度条件が一定の70℃で湿度95%以上が期待される湿気箱に84時間、湿度50%以下の乾燥炉に84時間の計1週間を1サイクルとしたものである。腐食促進試験の概要を図-4に示す。

促進サイクル数はNO₂⁻/Cl⁻モル比=0の場合、NaCl/モルタル=0.2%で4、8、12、16、20、24、28、32、36サイクルを、NaCl/モルタル=0.5%では2、4、6、8、10、12、14、16、18サイクルとした。巻き付け工法、打設工法ではNO₂⁻/Cl⁻モル比=0の腐食促進試験の結果より腐食促進サイクル数を10サイクルとした。

いずれの供試体においても所定のサイクル、または所定サイクル前に供試体表面に錆の発生によるひびわれが観察された時点で腐食促進を終了し、ただちに供試体を割裂して鉄筋を取り出し、臭酸アンモニウムにより除錆して腐食減量を測定した。腐食減量は、全く錆びていないみがき鉄筋の臭酸アンモニウムによる減量を考慮して、補正して求めた。

また供試体作製本数は、NO₂⁻/Cl⁻モル比=0では各促進サイクルごとに2本、巻き付け工法ではNO₂⁻/Cl⁻モル比ごとに4本、打設工法ではNO₂⁻/Cl⁻モル比ごとにAタイプ2本、Bタイプ2本である。

2.2 使用材料と配合

(1) 使用材料

使用セメントは市販の普通ポルトランドセメント（N社製）である。細骨材は豊浦標準砂を用い、コアモルタル、周囲モルタルの練り混ぜ水は蒸留水を使用した。使用した鉄筋はφ10mmのみがき棒鋼で、コアモルタルに使用する塩分は試薬1級のNaClを用いた。亜硝酸塩はLiNO₂を使用した。

ポリマーセメントモルタルは早強セメントと珪砂を1：2で混ぜたものにLiNO₂を重量の27wt%含むポリプロピレン系ポリマーを主成分とする混和剤を2.5：1の割合で混練して作製した。この2.5：1の比率は、鉄筋にポリマーセメントモルタルを巻

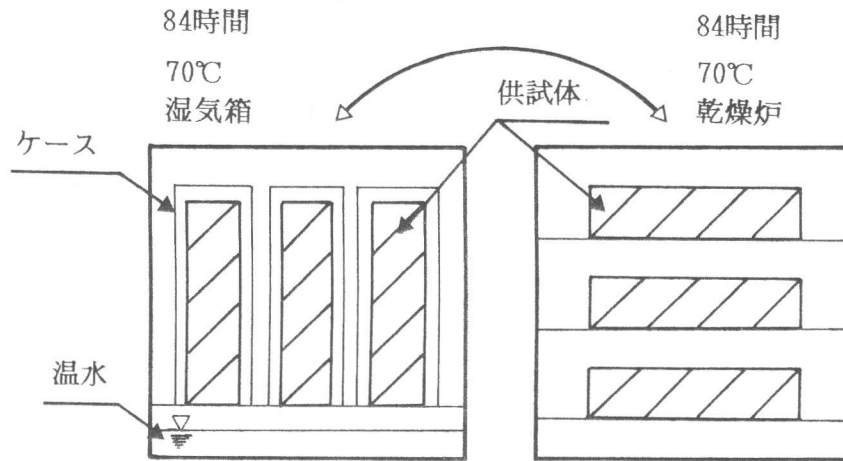


図-4 腐食促進試験の概要

表-1 コアモルタル、周囲モルタルの配合

| モルタル種類 | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------|---------------------------|-----|------|----------|
| | C | W | S | NaCl |
| コアモルタル | 602 | 331 | 1204 | 4.3、10.7 |
| 周囲モルタル | 602 | 331 | 1204 | 0 |

き付けるのに適した軟度をうるために予備試験により決定したものである。

(2) コアモルタル、周囲モルタルの配合

コアモルタルと周囲モルタルは、普通ポルトランドセメントと豊浦標準砂をC : S = 1 : 2とした W/C = 55% のモルタルである。コアモルタルに混入する塩分は練り混ぜ水に外割で混入した。表-1 にその配合を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 NO₂⁻/Cl⁻モル比 = 0 の場合

NO₂⁻/Cl⁻モル比 = 0 はコアモルタル中にみがき鉄筋が存在する場合である。このときの腐食促進サイクルと腐食減量の関係を図-5 に示す。図中○●印は NaCl/モルタル = 0.2%、◇◆印は同じく 0.5% の結果である。●◆印は所定の促進サイクル前に供試体に鉄筋の腐食によると考えられるひびわれが観察されたものである。

図より NaCl/モルタル = 0.2% では、促進サイクルの増加にともない緩やかな直線的な腐食減量の増加が見られたのに対し、NaCl/モルタル = 0.5% では、6 サイクル付近から急激な腐食減量の増加を示し、促進サイクル10近傍で鉄筋は激しく腐食を示した。

3.2 巻き付け工法による防錆効果

NO₂⁻/Cl⁻モル比 = 0 において、NaCl/モルタル = 0.5% のとき、10 サイクル近傍までで激しい腐食を示すことより、巻き付け工法においては促進サイクル10で鉄筋の防錆効果を比較した。

図-6 は、NaCl/モルタル = 0.2% での NO₂⁻/Cl⁻モル比 = 0、0.3、0.6、1.0 での腐食減量を示したもので、NO₂⁻/Cl⁻モル比 = 0 は、図-5 における腐食促進サイクル 8~12 の結果である（以下の図にても同じ）。また図中所示サイクル前と表示したものは10サイクル以前にひびわれを起こした供試体の結果である（以下の図にても同じ）。

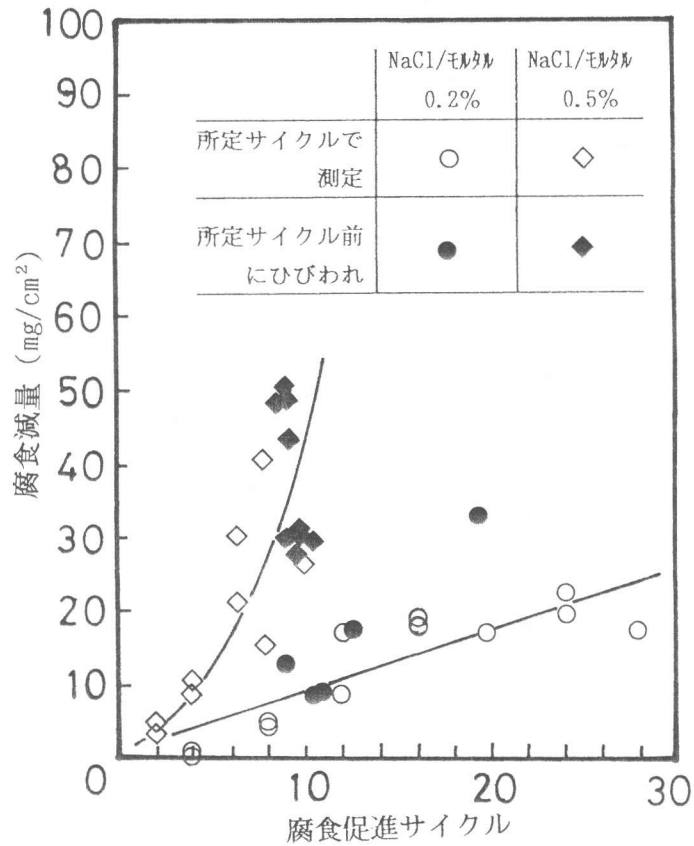


図-5 腐食促進サイクルと腐食減量の関係

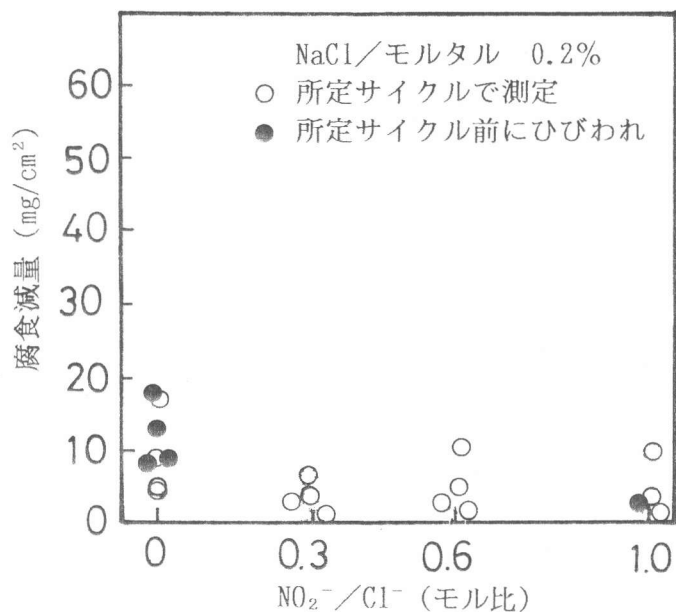


図-6 NO₂⁻/Cl⁻モル比と腐食減量の関係

図より $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0の平均腐食減量が $10.4\text{mg}/\text{cm}^2$ であるのに対し $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.3では $3.8\text{mg}/\text{cm}^2$ 、0.6で $5.0\text{mg}/\text{cm}^2$ 、1.0で $3.6\text{mg}/\text{cm}^2$ となった。 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.6、1.0で0.3の時よりも大きな腐食減量を示したが、これは $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.6、1.0の4個の供試体中1個が約 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ の腐食を示したためであり、供試体割裂後の鉄筋の目視観察でその一部に大きな腐食が認められた。したがって、これらはマクロセルによる腐食の進行とも考えられる。

また、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.6、1.0で腐食減量が小さくてもひびわれが観察されたが、これは腐食と無関係なヘアークラックを腐食によるものと誤認して供試体を割裂したと考えられる。

図-7に、 $\text{NaCl}/\text{モルタル} = 0.5\%$ での結果を示す。図より、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0で平均 $36.0\text{mg}/\text{cm}^2$ と大きな腐食を示したのに対して、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.3では平均で $16.2\text{mg}/\text{cm}^2$ と約1/2に減少し、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.6、1.0では平均で1.4、 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ と極めて少なく、防錆効果の高いことが示された。

これまでの研究により NO_2^- が防錆効果を発揮するのは $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比が0.6~1.0といわれているが[6]、巻き付け工法では $\text{NaCl}/\text{モルタル}$ が0.2%程度ならば $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0.3でも防錆効果が期待されるが、しかし、 $\text{NaCl}/\text{モルタル}$ が0.5%では、やはり $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比が0.6以上必要と考えられる。

3.3 打設工法による防錆効果

図-8、図-9に、 $\text{NaCl}/\text{モルタル} = 0.2\%$ 、 0.5% の結果を示す。巻き付け工法と同じく腐食促進サイクル10のものである。図中の○：Aタイプは、はつり深さとして鉄筋表面まで考えたもの、⊖：Bタイプは鉄筋より5mmのかぶりをもつものである。図中の $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0の結果は図-6、図-7と同じである。

$\text{NaCl}/\text{モルタル} = 0.2\%$ では $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 = 0での平均腐食減量が $10.4\text{mg}/\text{cm}^2$ であるのに対して、

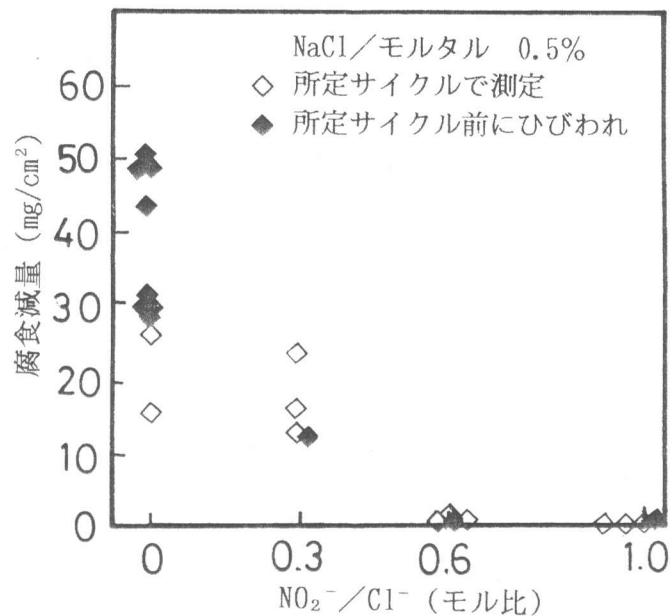


図-7 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比と腐食減量の関係

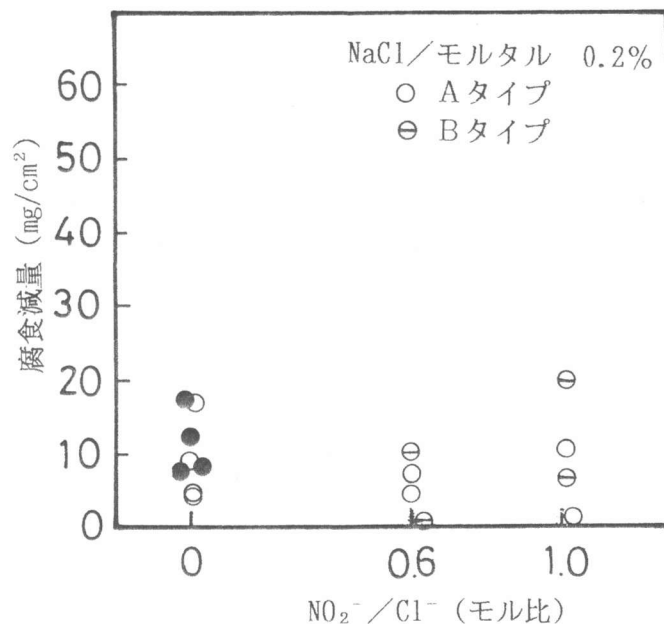


図-8 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比と腐食減量の関係

NO₂⁻/Cl⁻モル比= 0.6、1.0での腐食減量はそれぞれ平均で 5.8、12.5mg/cm²となり、NO₂⁻/Cl⁻モル比= 1.0は腐食が増大した結果となった。しかし、NaCl/モルタル=0.5%では、NO₂⁻/Cl⁻モル比= 0での平均腐食減量が36.0mg/cm²と大きいものに対して、NO₂⁻/Cl⁻モル比=0.6で平均16.5mg/cm²、NO₂⁻/Cl⁻モル比= 1.0で平均 9.8mg/cm²となり、防錆効果が認められる。しかし、打設工法は巻き付け工法と比べればその効果は小さく、NO₂⁻の浸透による再不動態化で防錆効果を発揮するには、より高濃度のNO₂⁻をモルタル中に存在させることが必要と考えられる。また、Aタイプ、Bタイプのかぶりの違いによる差は本実験の範囲では見られず、5mm程度のかぶりならばNO₂⁻の浸透による防錆効果に影響しないと考えられる。

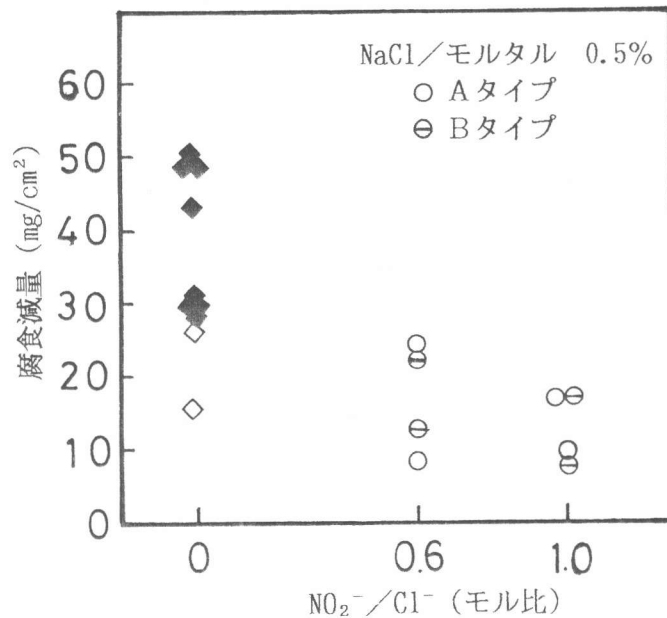


図-9 NO₂⁻/Cl⁻モル比と腐食減量の関係

4. まとめ

本研究はNO₂⁻を使用して塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物の有効な補修工法の開発を目的として行なわれたものであるが、本研究より得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 亜硝酸塩を含むポリマーセメントモルタル巻き付け工法は、防錆効果が高く補修工法として有効と考えられる、特に NaCl/モルタル= 0.2%の場合はNO₂⁻/Cl⁻モル比が 0.3であっても防錆効果が認められる。
- (2) 亜硝酸塩を含むポリマーモルタル打設工法の防錆効果は巻き付け工法に劣り、同程度の効果を発揮させるにはより高濃度の NO₂⁻が必要である。

参考文献

- 1) 財団法人高速道路技術センター「北陸自動車道コンクリート橋塩害対策検討報告書」、平成3年3月
- 2) 小林明夫・牛島 栄・越川松宏：コンクリート中の鉄筋発錆に対する塗布型腐食抑制剤の効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、NO.1、pp.539-544、1991
- 3) 友沢史紀・野口貴文・廖 年祈：防錆剤の低圧注入による鉄筋の防食工法の開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、NO.1、pp.793-796、1992
- 4) 北川明雄・堀 孝廣・中村裕二：コンクリート表面被覆型亜硝酸塩含有モルタルの防錆効果、セメントコンクリート論文集、NO.43、pp.714-719、1989
- 5) 小泉 徹・高桑信一・榑場重正：ポリマーエマルジョンと亜硝酸リチウムによる鉄筋の防錆効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、NO.1、pp.777-780、1992
- 6) 友沢史紀ほか：防錆剤大量添加による環境塩害の抑制に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.291-292、1987