

論文 塩害劣化環境下における亜硝酸 Li の圧入量が異なるコンクリートの長期的な防錆性能の評価

児島 あかり*1・樋原 弘貴*2・岡部 倅大*3・江良 和徳*4

要旨：本研究は、塩害劣化を受けたコンクリート構造物を想定して、亜硝酸リチウム内部圧入工法による防錆効果について検討を行ったものである。その結果、亜硝酸リチウムを圧入することで腐食鉄筋の程度に関らず、防錆効果が発揮され、その効果は、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ （モル比）によって評価できることが分かった。また、圧入工法を適用後に塩化物イオンが供給される環境では、塩化物イオンの浸透に伴って $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ が低下するため、このような環境では、予め $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ を高く設定するか、腐食が進行しているものに対しては、塩化物イオンの浸透抑制を目的とした対策工と併用することが望ましいと考えられた。

キーワード：亜硝酸リチウム、鉄筋腐食、塩化物イオン、自然電位、分極抵抗

1. はじめに

凍結融解剤や飛来塩分によるコンクリート構造物の塩害劣化が多数報告されている。これらの長寿命化対策の一つとして、亜硝酸リチウムを用いた補修技術の適用が増加してきている¹⁾。亜硝酸イオンによる腐食抑制効果やリチウムイオンによる ASR の膨張抑制を期待して、断面修復材への混和や ASR 対策等の補修技術として用いられてきている^{2) 3)}。

近年では、潜伏期から進展期における塩害劣化を受けているコンクリート構造物に対しても、亜硝酸リチウムを圧入し、鉄筋近傍位置に直接供給することで劣化の進行を抑制する取り組みがなされている⁴⁾。ただし、コンクリート内部へ圧入する工法（以下、内部圧入工法と称す）における亜硝酸リチウムの防錆効果に関する知見の多くは、健全な状態の鉄筋に対する報告が多い^{5) 6)}。これらの報告では、防錆性能が高い補修技術として示されてきているが、実際の塩害劣化を受けているコンクリート構造物に内部圧入工法を適用する場合には、腐食の程度が軽微なものからひび割れを伴う腐食が見られているものなど、同部材でも腐食の程度が異なっている。また、内在している塩化物イオン量も同部材で様々であると想定されることから、当然、亜硝酸リチウムによって付与される防錆効果も異なると考えられる。さらに、内部圧入工法を適用した後も塩化物イオンの供給環境に曝されるため、経時的に防錆効果は低下していくと予想される。

そこで本研究は、塩害劣化が進行しているコンクリートへの内部圧入工法を適用した後の防錆効果、ならびに、その後も継続して塩化物イオンが供給される環境を想定した実験を行い、長期的な防錆効果についても検討を行

った。具体的には、腐食程度が異なる鉄筋が埋設された初期塩化物を含有するコンクリートに、亜硝酸リチウム水溶液の圧入量を変化させ圧入を行った供試体を作製した。その後は、湿潤環境に静置させながら、自然電位や分極抵抗法の測定による非破壊検査によつての防錆性能の確認、ならびに供試体の一部を解体して内部鉄筋の腐食状況について調査を行った。さらに、未解体の供試体は、塩水浸透試験を行い、長期的な塩害劣化に対する防錆効果について評価を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要および配合

供試体は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)、細骨材に福岡県玄界灘産海砂($2.58\text{g}/\text{cm}^3$)、粗骨材に福岡県産砕石($2.67\text{g}/\text{cm}^3$)を用いて水セメント比 55%で、 $150\times 150\times 150\text{mm}$ の亜硝酸リチウム圧入供試体ならびに $100\times 100\times 150\text{mm}$ の非圧入供試体の 2 種類を作製した。表-1 には、作製したコンクリート配合を示しており、塩害環境を模擬するために、予め内在 Cl^- 量として $5\text{kg}/\text{m}^3$ 添加した。また、いずれの供試体も図-1 に示す所定の位置に $\Phi 10\times 130\text{mm}$ の磨き丸鋼鉄筋を 2 本、同形状のステンレス丸棒を 1 本配筋した。

埋設した鉄筋は、腐食無し鉄筋と腐食グレード I 相当および腐食グレード II 相当の鉄筋であり、それぞれの腐食程度ごとに供試体内へ埋設した。図-1、図-2 には、作製した供試体の概要を示す。写真-1 に示す腐食鉄筋は、銅板と磨き丸鋼鉄筋を電氣的に通電させて濃度 1% の NaCl 水溶液中に浸漬させながら、直流電源装置にて一定の電流密度を流すことによって作製した。グレード

*1 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 博士 (工学) (正会員)

*3 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻 (学生会員)

*4 極東興和 (株) 営業本部補修技術課 博士 (工学) (正会員)

I 相当の鉄筋は電流密度 $6.12 \times 10^{-2} \text{A}/\text{cm}^2$ を 15 分間流した後、温度 20°C 、湿度 60% の環境下に 24 時間静置させて作製した。グレード II 相当では、電流密度 $6.12 \times 10^{-2} \text{A}/\text{cm}^2$ を 30 分間流し、24 時間同環境で静置させた後、再び電流密度 $6.12 \times 10^{-2} \text{A}/\text{cm}^2$ を 30 分間流して作製した。なお、腐食鉄筋作製時の電流密度は腐食程度にばらつきが出ないように、一定にした。腐食グレードは、腐食が進行しているものほど、電気抵抗が増加することから、打設前に DC/AC マルチメータより鉄筋のみの抵抗値を写真-1 に示す位置で測定し、腐食グレードごとに同程度の抵抗値を示すものを複数の腐食鉄筋の中から選別した。表-2 には、腐食鉄筋の抵抗値を示す。鉄筋の抵抗値が $25\text{k}\Omega \sim 75\text{k}\Omega$ まで範囲を示したものを腐食グレード I、 $90\text{k}\Omega \sim 130\text{k}\Omega$ の範囲を示したものを腐食グレード II としている。なお、以降の本文中、表中、図中における表記は、腐食無：G0、グレード I：G1、グレード II：G2 としている。

供試体の作製後は、供試体内部の含水率が高い状態であるとコンクリートの吸水作用が低減するため、亜硝酸リチウムの圧入期間が長くなってしまいうため、養生は温度 20°C 、湿度 60% の 28 日間の気中とした。亜硝酸リチウムの内部圧入方法は、図-1 に示すように $\phi 10\text{mm}$ のドリルで深さ 80mm まで削孔し、圧入ピンを取り付けて 40% 濃度の亜硝酸リチウム水溶液を所定量入れたカプセルを取り付けた。その後は、コンプレッサーを用いて、 $0.3 \sim 0.5\text{MPa}$ で所定量の亜硝酸リチウム水溶液を最大 7 日間かけて圧入した。圧入量はこれまでの知見を踏まえたうえで、 NO_2/Cl^- (モル比) (以下、 NO_2/Cl^- と示す) が 1.0 程度以上で防錆効果が得られていることから²⁾、内在 Cl 量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ に対して NO_2/Cl^- (1.0) とした。また、圧入後も塩化物イオンが新たに浸入する場合の長期的な防錆効果も検討対象としている。よって、新たに塩化物イオンが浸入すると NO_2/Cl^- が低下する。試験期間内に鉄筋位置に浸入する塩化物イオン量を予測し、塩化物イオン浸入後の NO_2/Cl^- が 1.0 程度にするために、基準の 2 倍量を圧入した NO_2/Cl^- (2.0) も実験水準として設けた。

(以下、図表内において M1, M2, 非圧入を M0 と記す。)
内部圧入工法を適用する場合、削孔深さを 75mm ~ 250mm 程度に設定しなければならない。そのため、圧入はかぶり 100mm の方向から行った。実験工程を図-3 に示しているが、圧入後は腐食を促進させるため、図-2 に示すかぶり 20mm の位置までカットし、試験面とした。一方の非圧入供試体も圧入供試体と同じように、塩水浸漬を行うため、かぶり 20mm になる様にカットし、塩化物イオンの浸透距離を統一した。その後は、温度 20°C 、湿度 90% の湿潤環境に 174 日間静置させながら、自然電位および分極抵抗の定期測定を行い、174 日目の一部の

表-1 作製したコンクリート配合

W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				AE減水剤	AE剤	Cl量 (kg/m^3)	空気量 (%)
	水	C	S	G				
55	165	300	831	1009	4.8	1.2	5	5

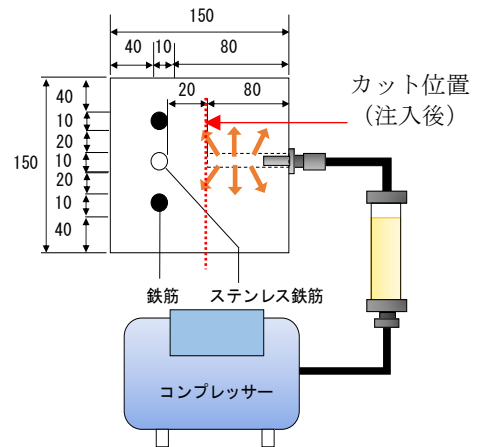


図-1 亜硝酸リチウムの圧入供試体および圧入方法

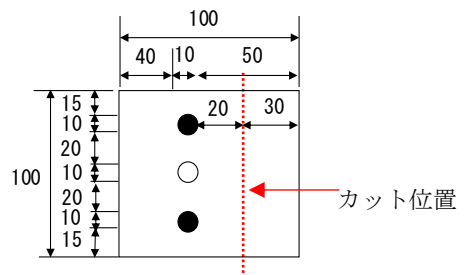


図-2 非圧入供試体

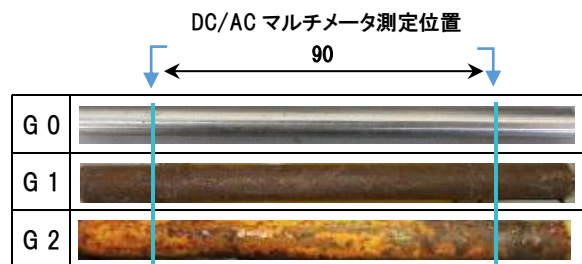


写真-1 埋設した鉄筋

表-2 腐食グレードと抵抗値

供試体 No	腐食無		供試体 No	腐食グレード I		供試体 No	腐食グレード II	
	鉄筋	抵抗値 (k Ω)		鉄筋	抵抗値 (k Ω)		鉄筋	抵抗値 (k Ω)
1	G0-I	0.49×10^{-4}	7	G1-I	72.55	13	G2-I	119.70
	G0-II	0.42×10^{-4}		G1-II	48.28		G2-II	120.35
2	G0-III	0.40×10^{-4}	8	G1-III	76.50	14	G2-III	110.76
	G0-IV	1.33×10^{-4}		G1-IV	34.35		G2-IV	127.25
3	G0-V	1.85×10^{-4}	9	G1-V	63.29	15	G2-V	97.23
	G0-VI	1.13×10^{-4}		G1-VI	25.26		G2-VI	106.25
4	G0-VII	1.42×10^{-4}	10	G1-VII	70.55	16	G2-VII	112.34
	G0-VIII	1.72×10^{-4}		G1-VIII	43.51		G2-VIII	109.33
5	G0-IX	1.24×10^{-4}	11	G1-IX	61.72	17	G2-IX	112.14
	G0-X	1.69×10^{-4}		G1-X	75.49		G2-X	116.77
6	G0-XI	1.02×10^{-4}	12	G1-XI	47.68	18	G2-XI	92.56
	G0-XII	0.50×10^{-4}		G1-XII	57.70		G2-XII	95.83

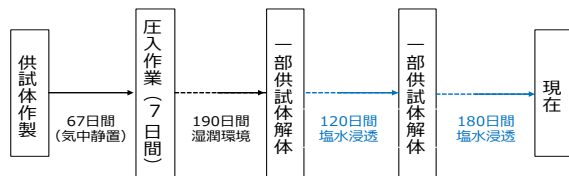


図-3 試験の流れ

供試体を解体して腐食状況について調査を行った。試験環境に湿潤環境を組み込んだ理由として、亜硝酸リチウムは高い保水性を有していることから、コンクリート内部の含水率が非圧入供試体に比べて高い状態で推移することになる。そのため、酸素供給量も異なってくることから亜硝酸リチウムの添加量や分極抵抗の違いを明確にできないと考えられた。相対含水率は、非圧入：74%， NO_2/Cl^- (1.0)：85%， NO_2/Cl^- (2.0)：87%であり、内部含水率をある程度同程度にするために試験面以外の面には被覆等といった処理を行わず、一定期間、湿潤環境で静置して試験を行った。なお、相対含水率は、供試体重量と絶乾燥時の重量の差を飽水時の重量と絶乾燥時の重量の差で除して算出した。一方で、未解体の供試体は、カット面以外をアルミテープで被覆した後に、カット面を試験面として10%濃度の塩水を浸透させながら、自然電位および分極抵抗の測定を継続して行った。さらに、塩水浸透開始から124日目には、供試体の一部を解体して、鉄筋位置の全塩化物イオン量および鉄筋の腐食状況について調査を行った。

2.2 試験方法

(1) 自然電位

自然電位は、鉛照合電極を用いて DC/AC デジタルマルチメータにより測定を行った。測定した後は、銅硫酸銅電極(CSE)の電位に変換した。

(2) 分極抵抗

分極抵抗の測定方法は、銀塩化銀電極(Ag/AgCl)と埋設したステンレス丸棒を鉄筋の対極として用い、二周波数の矩形波交流で分極抵抗測定器にて測定した。分極抵抗値は、測定周波数(高周波 400Hz, 低周波 0.1Hz)で測定された見かけの分極抵抗値に埋設している鉄筋の表面積を乗じて算出した。

(3) 全塩化物イオン量測定

供試体を解体した後、鉄筋跡に沿って、深さ 2mm まで $\phi 9\text{mm}$ のコンクリートドリルを断続的に当てながら粉体を採取した。粉体採取は、鉄筋跡のほぼ全面で行った。粉体試料は、0.15mm のふるいを通過したものを、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン試験方法」に準拠して、電位差滴定装置により全塩化物イオン量を測定した。算出した全塩化物イオン量は、塩水浸透後の NO_2/Cl^- の補正に用いた。

(4) 亜硝酸イオン量測定

今回、採取できた粉体量は $0.5 \pm 0.1\text{g}$ 程度であり、全塩化物イオン量の測定を優先したため、イオンクロマトグラフによる NO_2 量の測定に必要な粉体量を確保することができなかった。そこで、供試体全体に亜硝酸リチウムが均等に拡散したと仮定し、 NO_2 量は実際に圧入した量から換算して算出した。なお、圧入量は実供試体に対して NO_2/Cl^- (1.0) で 304g, NO_2/Cl^- (2.0) で 608g である。今回の試験では、亜硝酸リチウムが供試体内に均一に拡散していると仮定し、濃度 40% の亜硝酸リチウム水溶液(分子量 $\text{Li}=6.94$, $\text{NO}_2=46.0$) を圧入した場合の NO_2 の濃度の算出式を mol 質量の計算式をモデルとして、式(1)に示す。

$$y = M \cdot 46.0 \cdot k / 52.94 \quad (1)$$

このとき、 y は NO_2 の供試体内在量 [kg/m^3] を、 M は亜硝酸リチウムの実圧入量 [kg/m^3]、 k は亜硝酸リチウム水溶液の濃度(本試験では 0.4)を表す。次に、実測値 Cl^- 量が a [kg/m^3] であった場合の NO_2/Cl^- の算出方法を式(2)に示す。

$$\text{NO}_2/\text{Cl}^- = y/a \quad (2)$$

(5) 鉄筋腐食状況評価

解体後に取り出した鉄筋は、デジタルカメラを用いて外観観察を行った。孔食などの細かな部分は、市販のマイクロスコープを用いて撮影を行った。腐食面積率は、鉄筋にセロハンを巻きつけて、腐食箇所を油性マジックで描写した後に、画像処理により算出した^{7) 8)}。腐食重量は、鉄筋に付着しているモルタルを除去した後に、モルタル JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して、濃度 10% のクエン酸二アンモニウム水溶液に 2 日間浸漬した後に、腐食生成物を除去した。その後、腐食生成物除去前と腐食生成物除去後の重量差から腐食重量を算出した。

(6) 分極曲線

分極曲線の測定は、塩水浸漬試験開始 290 日目に銀塩化銀電極(Ag/AgCl)と埋設したステンレス丸棒を鉄筋の対極として用い、ポテンショスタットを用いて、アノード・カソード分極曲線により腐食速度を算出した。自然電位から、+200mV, -300mV 分極させて、電位速度は、40mV/min とした。

3. 結果および考察

写真-2 には、湿潤期間後および塩水浸透後の G0 鉄筋(錆無し鉄筋)における腐食生成物の除去後の外観を示す。いずれの非圧入供試体の鉄筋では、孔食が点在しており、最大孔食直径は 0.5mm であった。 NO_2/Cl^- (1.0) では、微小な点錆が全体的に発生している程度であった。さらに NO_2/Cl^- (2.0) になると、僅かに点錆が見られて

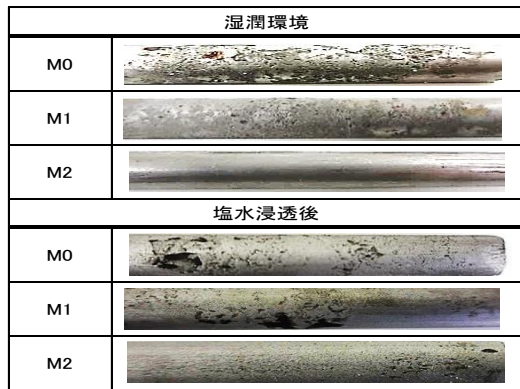
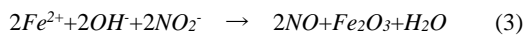


写真-2 G0 鉄筋の腐食状況

いるが、埋設前と遜色なく健全性が保たれている状況であった。さらに、塩化物イオンが浸透した場合では、いずれの鉄筋も腐食が進行する結果であった。

図-4 は、湿潤期間から塩水浸透にかけての分極抵抗の変化を $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ 量ごとに示す。なお、塩分浸透後の $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ は、浸透した塩化物イオンも加味しているため、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ (1.0) で 0.5 程度、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ (2.0) で 1.0~1.5 程度に当初設定した $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ よりも低く変化している。また、今回の試験では、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ を算出する際に、圧入量から見かけの NO_2^- を算出しており、 Cl^- は実測である。そのため、 NO_2^- が Fe^{2+} により消費されていることを考慮すると、実際はさらに低い $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ を示すと考えられる⁹⁾。ここで、 Fe^{2+} により NO_2^- が消費される化学式を式(3)に示す。



圧入供試体の分極抵抗は、いずれも非圧入供試体よりも高くなっており、腐食速度が抑制されているのが分かる。また、分極抵抗値は、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ が大きくなるに従って、高くなっており、腐食グレードや塩分量の違いに関らず相関性が確認された。図-5 には G0 鉄筋における単位面積当たりの腐食重量と腐食面積率の関係を示す。腐食面積率は、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ (1.0) が最も大きくなっているが、これは、微小な点錆びが点在したことが影響している。圧入供試体の腐食状況は、いずれも湿潤期間終了後から塩水浸透終了後までの間で両者とも増加する結果を示した。これは、塩化物イオンが浸透したことで、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ が低下したため、それに伴い防錆性能も低下したと考えられる。一方の、非圧入供試体は、腐食面積率は増加していたが、腐食重量は減少する結果となった。この原因としては、鉄筋の解体した際に、図中の写真に示す様に、腐食生成物の多くがモルタルの片側面に集中しており、全体的な腐食になっていなかったことが要因と考えている。次に、図-6 には、解体調査を行った全鉄筋の腐食重量と $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ の関係を示す。この結果、腐食重量は、 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ が高く保持されていたものほど小さいことが分かる。また、同 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ において腐食重量の値が異なっているのは、

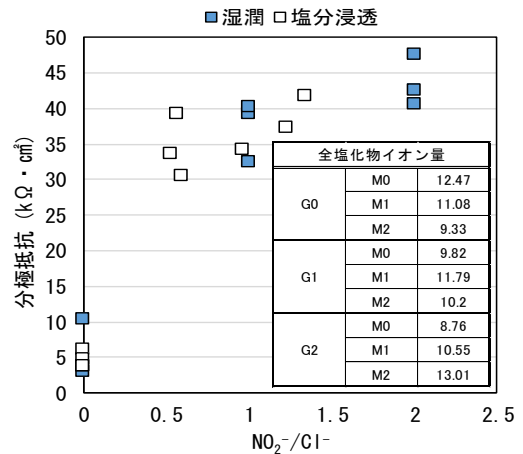


図-4 湿潤環境から塩水浸透にかけての分極抵抗の変化

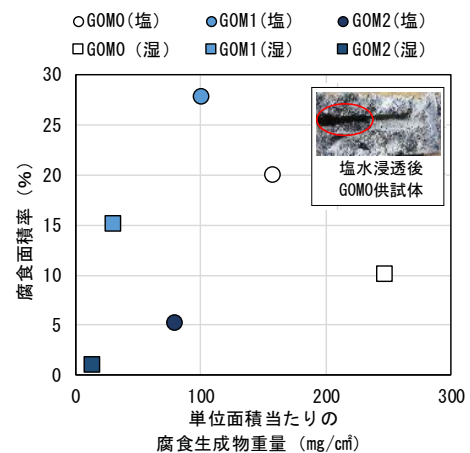


図-5 G0 鉄筋における腐食面積率と単位面積当たりの腐食生成物重量の関係

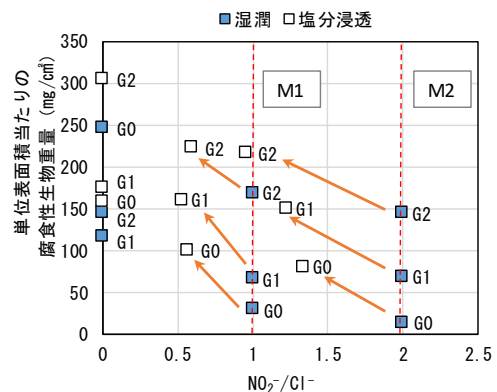


図-6 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ ごとの腐食生成物重量

初期の腐食グレードの違いによるもので、腐食グレードが高いものほど同 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ において腐食重量が大きくなっている。

次に、解体調査後に継続して塩水浸透を行い自然電位の経時変化によって亜硝酸リチウムの防錆効果を検討した。非圧入と $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ (1.0) の結果を図-7 に示す。非圧入では湿潤環境の時点で、すでに自然電位は卑化しており、塩水浸透後ではさらに腐食が進行していると予想で

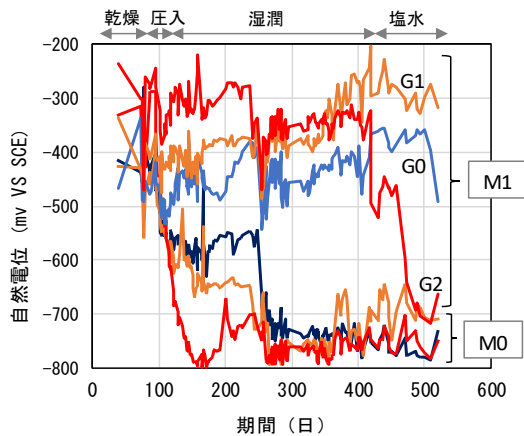


図-7 M0シリーズおよびM1シリーズにおける自然電位の経時変化

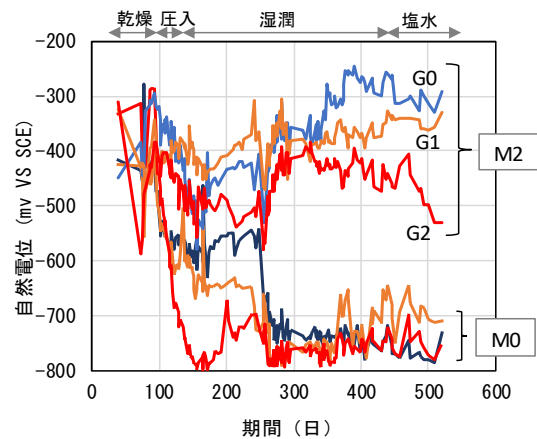


図-8 M0シリーズおよびM2シリーズにおける自然電位の経時変化

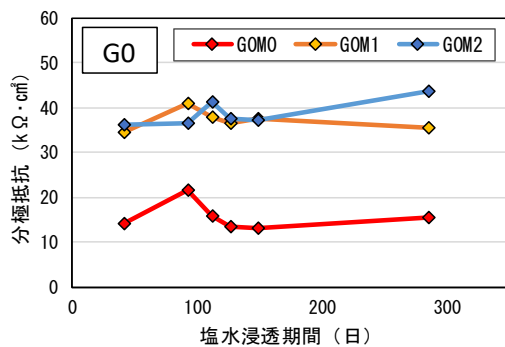


図-9 G0の分極抵抗の経時変化

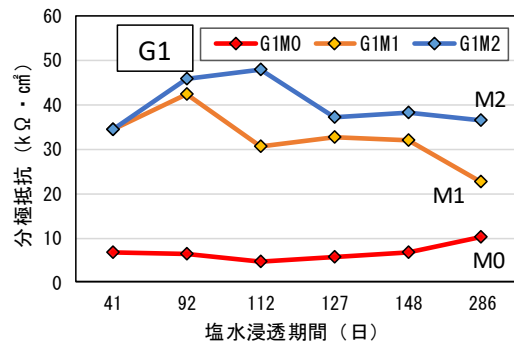


図-10 G1の分極抵抗の経時変化

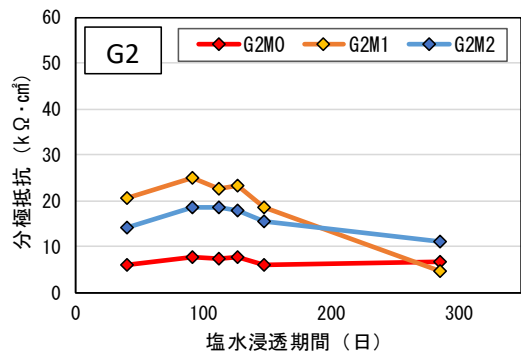


図-11 G2の分極抵抗の経時変化

きる。一方で NO_2/Cl^- (1.0) の自然電位は、湿潤期間において保持されていたが、塩水浸透期間になると G2 で卑化を示し、腐食が進行したものと考えられる。図-8 には、非圧入と NO_2/Cl^- (2.0) の自然電位の経時変化を示す。 NO_2/Cl^- (2.0) における G0, G1 では、塩水浸透期間でも自然電位が保持されており、亜硝酸リチウムによる防錆効果が機能していると考えられる。一方の G2 では、若干の卑化傾向が見られおり、G2 相当になると圧入量の多い NO_2/Cl^- (2.0) でも鉄イオン量が多いため、亜硝酸イオンが鉄イオンとの反応に消費されたことで、防錆効果も低下したと思われる。以上より、亜硝酸リチウムを圧入することで G2 相当の腐食鉄筋においても腐食の進行を抑制できるが、圧入量を多くしても塩害環境に曝されるような状況では、長期的な防錆効果は期待できないと考えられた。

次に、図-9、図-10、図-11 に NO_2/Cl^- ごとの塩水浸透開始後の分極抵抗の経時変化を示す。非圧入供試体(非圧入シリーズ)では、分極抵抗値が低く腐食速度も速いことが分かる。 NO_2/Cl^- (1.0) では、G0 および G1 の分極抵抗が高く保持されており、非圧入に比べると 1/10 から 1/20 程度に腐食速度が抑制されている。一方の自然電位が卑化していた G2 では、圧入後に分極抵抗値は上昇しており、腐食環境の改善がみられるものの、塩水浸透期間 286 日目にて、非圧入供試体と大差ない結果となっ

た。図-10 に示す NO_2/Cl^- (2.0) の分極抵抗値は、 NO_2/Cl^- (1.0) と同様に G2 が他よりも低くなっている。25k $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下になると激しい腐食環境とされ、現時点では、その範囲に入っていないものの、おそらく近日にそれ以下になると予想される。

次に、一例として 290 日目における腐食グレード G0 鉄筋のアノード・カソード分極曲線の結果を図-12 に示す。アノードとカソード分極曲線の交点にあたる電流密度は、 NO_2/Cl^- が大きくなるに従って、カソードよりもアノード側が抑制され電流密度も小さくなって傾向にある¹⁰⁾。この傾向は、図-13、図-14 に示すように他の供試体でも同様であった。

以上のことから、腐食グレード G0, G1 相当に対しては、補修後において塩化物イオンが侵入する環境であっ

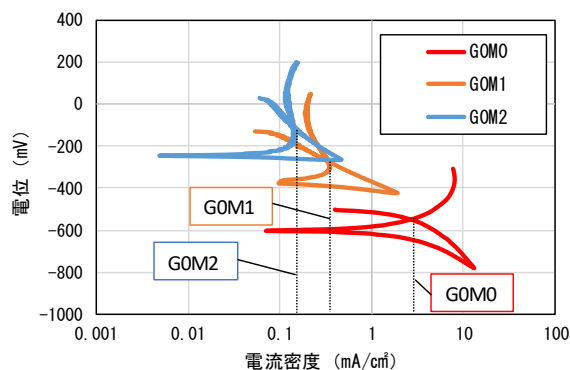


図-12 G0 鉄筋における分極曲線

でも長期的な防錆が期待できる。ただし、G2 程度の腐食鉄筋に対しては、 Fe^{2+} との反応に消費される NO_2 量が増加するため、圧入量を増加させても塩化物イオンの侵入によって NO_2/Cl が容易に低下するため、長期的な防錆効果を期待することは難しいと思われる。このような場合には、注入後に塩化物イオン侵入の抑制を目的とした表面含浸工などの対策工と併用することが望ましいと考えられた¹¹⁾。

4.まとめ

本研究は、塩害劣化を想定し腐食グレードが異なる供試体に亜硝酸リチウムの圧入量を変えた場合の防錆効果について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 圧入後の防錆効果は、塩化物イオンが侵入し、 NO_2/Cl が変化しても NO_2/Cl によって評価できる。
- 2) 腐食が G1 程度までの腐食鉄筋に対しては、防錆効果を期待できたが、G2 相当の腐食鉄筋では、塩化物イオンが侵入すると早期に防錆効果は低下した。
- 3) G2 相当の腐食鉄筋に対しては、長期的な防錆効果の確保の観点から、圧入後の塩化物イオンの浸透を抑制する対策工と併用する必要があると考えられた。
- 4) 亜硝酸リチウムの防錆効果は、アノード反応を抑制することで発揮されることが分かった。

5.参考文献

- 1) 西嶋大貴ら：断面修復材に混和した亜硝酸リチウムがマクロセル腐食に及ぼす影響に関する研究，土木学会 71 回年次学術講演会，pp.477-478，2016
- 2) 金好昭彦ら：大型コンクリート部材におけるリチウムの ASR 抑制効果に関する研究，日本コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.403-408，2001
- 3) 横山直哉ら：フライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復材の適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1675-1680，2017

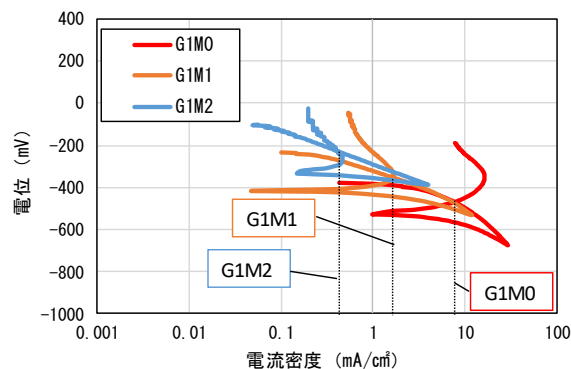


図-13 G1 鉄筋における分極曲線

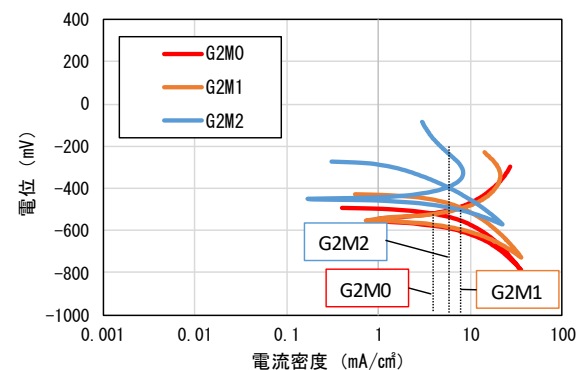


図-14 G2 鉄筋における分極曲線

- 4) 江良和徳ら：リチウムイオン内部圧入工を施工した構造物の長期耐久性について，アップグレード論文報告集，Vol.10，pp.167-172，2010
- 5) 李春鶴ら：相対湿度および亜硝酸リチウムが鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的研究，日本コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.973-978，2017
- 6) 松本涼ら：亜硝酸塩の濃度や種類の違いがモルタル中への塩化物イオンの浸透および鉄筋防錆に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1222-1227，2014
- 7) 濱田秀則ら：鉄筋周囲に発生する空隙と鉄筋腐食の関係に関する実験的考察，セメントコンクリート論文集，Vol.63，No.1，pp.428-434，2009
- 8) 前原聡ら：鉄筋腐食での腐食形態がモルタル表面のひずみ挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1113-1118，2016
- 9) 大塚柚人ら：腐食鉄筋に対する亜硝酸リチウムの防錆性能効果に関する基礎的研究，アップグレード論文報告集，Vol.18，pp.13-18，2018
- 10) 竹子賢士郎ら：分極曲線測定によるコンクリート中鋼材の腐食速度測定方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2092-2097，2014
- 11) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー119，2005