

飛騨地方における ASR と塩害の複合劣化に対する亜硝酸リチウム内部圧入工法の適用

維持管理工学研究室 榎野海太

1. はじめに

積雪寒冷地など凍結防止剤が散布される地域では、コンクリート構造物にアルカリシリカ反応(ASR)や塩害、またそれらが複合的に発生する場合があることが報告されている¹⁾。近年、ASR の抑制対策として、亜硝酸リチウム内部圧入工法が注目されている。これは ASR ゲルを非膨張化させる働きがあるリチウムイオンを、コンクリート構造物に加圧注入しコンクリート内部に浸透させることで、ASR による膨張を抑制する手法である。ASR に対する補修としての亜硝酸リチウム内部圧入工法は既に多数の実績があるもの、ASR は骨材が産出する地域によって性状が大きく異なり、ASR を受けたコンクリートの物性は、使用する骨材によって大きく異なることが懸念される。飛騨地方の骨材による ASR に対する亜硝酸リチウム内部圧入工法が適用された例はこれまでなく、その検討もされてこなかったのが現状である。

また、亜硝酸イオンには鉄筋腐食抑制効果があるため、ASR と塩害の複合劣化が発生している場合には、塩害対策としての劣化抑制効果も同時に期待されている。これまでの亜硝酸イオンによる防食効果の検討では、補修を施す時点での腐食の進行程度によって期待できる防錆性能が異なっており、腐食グレードⅡまでは亜硝酸イオンによる防錆効果を得ることができるのに対し、腐食グレードⅢになると十分な防錆性能が得られないことが報告されている²⁾。実情としては、ASR と塩害の複合劣化に対する補修として亜硝酸リチウム圧入工法を適用する場合には、すでに部材表面に ASR の膨張ひび割れに加え腐食ひび割れも発生していることも多く、腐食グレードⅢに相当するようなレベルにまで既に劣化が進行している場合もある。

本研究では、飛騨地方の反応性骨材を使用した ASR 供試体に対して、異なる量の亜硝酸リチウムを圧入した上で、ASR 劣化促進を行うことで、飛騨地方の反応性骨材に対する亜硝酸リチウム内部圧入工法の適用性について検討した。また、塩害によって鉄筋腐食が進行した供試体を用い、亜硝酸リチウムによる補修を施したうえで腐食促進を行い、腐食が進行している鉄筋に対する亜硝酸イオンの防錆効果を評価することで、ASR と塩害の複合劣化が生じているコンクリート構造物に対する亜硝酸リチウム内部圧入工法の適用性を検討した。

2. 亜硝酸リチウム内部圧入による ASR 劣化抑制効果

2.1 実験概要

2.1.1 配合および供試体概要

供試体概要を図-1 に示す。コンクリートの W/C は 65% とし、側面に膨張量計測用のプラグを取り付けた。コンクリート中のアルカリ総量が 6.50, 8.75 (kg/m³) となるように NaCl を添加している。亜硝酸リチウム量は、[Li/Na]が 0, 0.4, 0.8 (従来の規定量), 1.2 としており、圧入またはプレミクスによって添加した。実験要因を表-1 に示す。

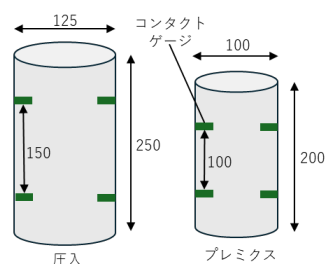


図-1 供試体概要 (mm)

表-1 実験要因

要因	水準
等価アルカリ総量	6.50, 8.75 (kg/m ³)
亜硝酸リチウム量	[Li/Na] : 0, 0.4, 0.8, 1.2
亜硝酸リチウム添加方法	圧入, プレミクス

2.1.2 使用した骨材

使用した骨材の岩種を偏光顕微鏡によって判定し、鉱物の特徴から岩種ごとの急速・遅延膨張性の判別を行った。得られた結果を図-2 に示す。粗骨材、細骨材ともに反応性骨材である割合が高く、遅延膨張性を示す骨材が多く含まれていた。また、発生した ASR ゲルについて、実体顕微鏡下および偏光顕微鏡下で観察を行うことで、本研究で発生した ASR の発生状態について推定した。表-2 に ASR が認められた骨材を示す。現状では、粒径が小さく比表面積の大きな細骨材粒子に ASR が主に発生していた。細骨材粒子中において、ASR は急速膨張性の安山岩のほか、遅延膨張性のチャートなどにも確認できるが、本研究の範囲で発生した ASR は、現段階では急速膨張性の安山岩の反応が主体であった。

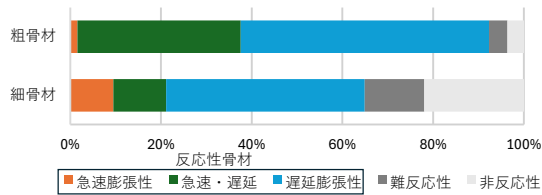


図-2 岩石の分類

表-2 ASR が認められた岩石

岩石		ASR 進行段階					劣化度 評価
		i	ii	iii	iv	v	
粗骨材	砂岩	+					< 1
	チャート	+					< 1
	溶結凝灰岩	+					< 1
	流紋岩	+					< 1
細骨材	安山岩	◎	◎	○	○		2
	流紋岩	+	+	+	+		1~2
	溶結凝灰岩	+	+				1
	チャート	+	+	+	+		1~2
	頁岩	+					< 1
総合評価							2

ASR の程度 : ◎ 顕著, ○ あり, + 微量, 空欄 なし
 劣化度の評価 : 1 軽微(潜伏期に相当), 2 中程度(進展期・加速期に相当), 3 顕著(加速期・劣化期に相当)
 ASR 進行段階: i 反応リム, ii ゲルの滲み・取り巻き, iii ひび割れ
 ゲル補填, iv セメントペーストのひび割れゲル補填

2.1.3 実験方法

供試体打設後翌日に脱型し、50℃の水中に浸漬することで、ASR 劣化を促進した。亜硝酸リチウムの圧入は、一般的に亜硝酸リチウム内部圧入工法が適用される段階である膨張量 2000 μ に到達したタイミングで劣化促進を中断し、実施した。圧入作業完了後は、再び 50℃の水中に浸漬し劣化促進を行った。定期的にコンタクトゲージ法によって膨張量の計測を行い、飛騨地方の骨材による ASR に対する亜硝酸リチウム内部圧入による劣化抑制効果を評価した。

2.2 リチウムイオンの膨張抑制効果

図-3 にアルカリ量 8.75 (kg/m³)、亜硝酸リチウムを圧入した供試体の膨張量の経時変化を示す。亜硝酸リチウムを圧入していない供試体は急激な膨張が継続していたのに対し、亜硝酸リチウムを圧入した供試体は大きく膨張が抑制された。なお、亜硝酸リチウム圧入量による違いはほぼなく、[Li/Na] が 0.4 であったとしても、従来の工法の規定量である 0.8 と同様の膨張抑制効果を示した。アルカリ量や亜硝酸リチウム添加方法を変化させても同様の結果が得られ、飛騨地方の反応性骨材による ASR に

対する亜硝酸リチウム内部圧入による膨張抑制効果を確認することができた。

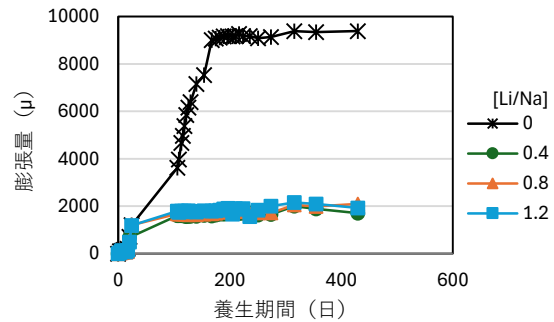


図-3 膨張量の経時変化

3. 腐食鉄筋に対する亜硝酸イオンの防錆効果の評価

3.1 実験概要

3.1.1 供試体概要

供試体概要を図-4 に示す。使用する供試体は、200×200×400mm のコンクリート角柱であり、 ϕ 13mm, L=440mm の丸鋼 (SR235) を 4 本配置している。本研究では、芯かぶりが 30mm である上側の鉄筋 2 本について測定、評価している。W/C は 65% であり、塩化物イオンを 5.0kg/m³ 配合した。材齢 7 日まで 20℃で気中養生を行い脱型し、3 年間の屋外曝露を行ったものを本研究の供試体として用いた。この時点で供試体を 1 体解体し、腐食促進を実施する前の鉄筋の腐食状態を確認した。取り出した鉄筋の腐食面積率は 75%、質量減少率は 5%であり、腐食グレード III に相当していることを確認した。

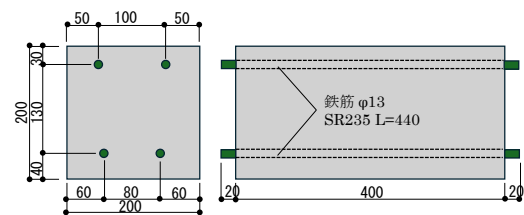


図-4 供試体概要 (mm)

3.1.2 実験方法

実験フローを図-5 に示す。塩害により劣化した構造物に対する補修を想定し、劣化が進行した供試体に対して、補修を行い、劣化促進を行った。実験要因は表-3 に示すように補修方法と劣化促進方法である。補修方法は表面含浸の有無、亜硝酸リチウム圧入の有無の組み合わせとし、腐食促進環境は乾湿繰返し (40 サイクル, 70 サイクル), 屋外曝露とした。腐食促進を行っている間、腐食状況の経時変化を評価するため、定期的に電気化学的測定

(自然電位、分極曲線)をした。自然電位は、銅／硫酸銅電極（CSE）を用いて、マルチメータによって測定した。分極曲線は、自然電位から+650mV までアノード分極し、24 時間経過後にその時点の自然電位から-250mV までカソード分極し得た。腐食促進終了後、試体を切断し、TDI 噴霧によって供試体内部における亜硝酸リチウムの浸透範囲を確認した。また、鉄筋をはつり出し、鉄筋腐食面積率、質量減少率を算出し、鉄筋の腐食状況と電気化学的測定の結果を整理した。

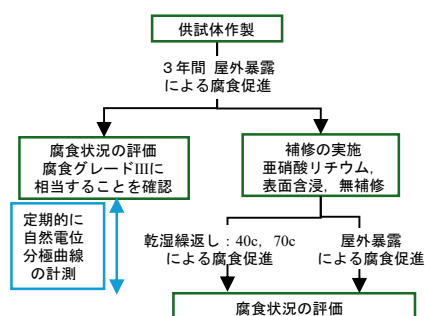


図-5 実験フロー

表-3 実験要因

要因	水準
補修方法	無補修 (N), 表面含浸 (S), 亜硝酸リチウム圧入 (Li)
劣化促進方法	乾湿繰返し (40c, 70c), 屋外暴露 (E)

3.1.3 腐食促進方法

乾湿繰返しを行う供試体には、供試体上面に貯留槽としてアクリル板製水槽（外寸：97mm×255mm×51mm）を2 個並列で、鉄筋直上にシーリング材を用いて設置した。乾湿繰返しは、この貯留槽に深さ約 2cm の水道水を2 日間貯留した後に、貯留させた水を水槽から取り除き、45~50℃で 5 日間乾燥させる工程を 1 サイクルとするものである。屋外暴露は、岐阜大学工学部棟の屋上に供試体を静置することにより実施した。

3.2 鉄筋腐食状況

3.2.1 質量減少率

試験開始の時点で腐食がかなり進んでおり、各条件における腐食状況の違いを鉄筋の腐食面積からは評価することが難しかったため、鉄筋の質量減少率から腐食状況の評価した。図-6 に質量減少率を示す。供試体名は、(補修方法) - (劣化促進方法) である。乾湿繰返し 40 サイクルを行った場合の質量減少率は、Li-40c, S-40c, N-40c の順に大きくなる傾向を示しており、各補修の防錆効果が発揮されていたことが確認された。特に Li-40c の質量

減少率は、腐食促進を開始する前の質量減少率に近く、腐食が進行していた鉄筋に対しても、亜硝酸リチウム圧入が高い防錆効果を持つことが示された。Li-70c においても、質量減少率は初期値とほぼ同等の値を示しており、サイクル数を増やした場合においても高い防錆効果が示された。一方で、屋外暴露における質量減少率は、補修方法間の差はあまり表れておらず、乾湿繰返しを行った供試体と比較して腐食もあまり進行していなかった。屋外暴露では、劣化因子のひとつである水の外部からの供給が少なかったため、腐食があまり進行せず、各要因の差が小さくなったと考えられる。

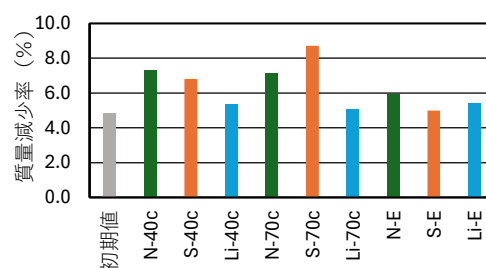


図-6 鉄筋の質量減少率

3.2.2 電気化学的測定との関係

(1) 自然電位との関係

図-7 に自然電位の経時変化を示す。N-40c, N-70c は実験開始直後から卑化する傾向にあり、腐食が進行しているものと判定される。S-40c, S-70c も実験開始直後から卑化する傾向にあり、13 サイクルで N-40c や N-70c と同程度まで卑化した。しかし、20 サイクル手前から貴化する傾向を示し、その後再び急激に卑化している。これは約 20 サイクル経過時に水槽の水が漏れ出し始めており、ひび割れが進展して、鉄筋の腐食環境が変化したためと考えられる。Li-40c, Li-70c は、2 本の鉄筋で大きく傾向が異なっていたため、図-8 に鉄筋ごとの自然電位の経時変化を示した。Li-40c-1 は ASTM C 876 の基準で腐食の確率が低いと判定される -200mV よりも貴となる傾向にあった。一方で Li-40c-2 は、実験開始前よりも卑化する傾向にあり、自然電位からは腐食が進行していると判定できる。しかし、質量減少率を見てみると、初期値と同等の値であった。これより、電気化学的測定による腐食の判定と実際の腐食状況は異なる可能性があることが考えられる。そのため、亜硝酸イオンによる補修では、自然電位測定による腐食モニタリングが従来の基準値ではできない可能性がある。Li-70c については約 40 サイクルを境に卑化する傾向にあった。ただし、このように卑化す

る傾向にあったとしても、質量減少率は初期値と同等の値を示していたため、腐食速度は非常に遅いと考えられる。同一供試体の鉄筋で自然電位に差が生じた原因として、亜硝酸イオンの浸透程度の違いが原因として考えられる。自然電位が貴な 40c-1 では、鉄筋近傍における TDI 噴霧に対する呈色が濃かった。ひび割れの分散状況、あるいは鉄筋の錆層を通じた浸透により供試体内の亜硝酸リチウム濃度に粗密が生じ、鉄筋に対する防食効果に差が生じたと考えられる。図-8 に屋外曝露供試体の鉄筋の自然電位の経時変化を示す。S-E と N-E は終始近い値を示しており、表面含浸材の適用の有無は鉄筋の自然電位に影響を与えていなかった。一方で、Li-E の自然電位は屋外曝露開始直後は卑化する傾向にあった。これは、保水性の高い亜硝酸リチウムを圧入したことにより、コンクリート含水率が高くなったためと考えられる。養生開始から約 300 日後からは、S-E や N-E と同等の自然電位まで貴化する傾向にあった。その後は補修ごとの差はほぼなかった。

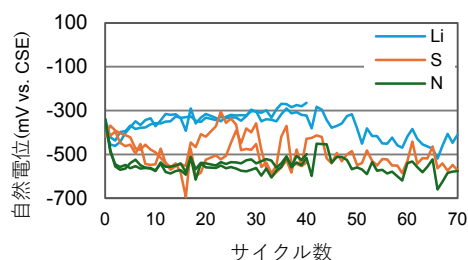


図-7 自然電位の経時変化

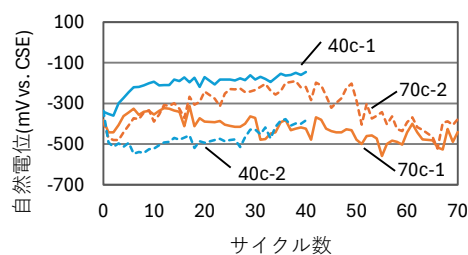


図-7 Li の鉄筋ごとの自然電位の経時変化

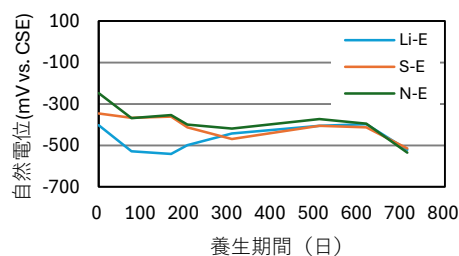


図-8 屋外曝露供試体の自然電位の経時変化

(2) 分極曲線との関係

図-9 に Li-40c-2 における分極曲線の経時変化を示す。コンクリートやモルタル中では、アノード電流が減少することによって腐食が抑制されると報告³⁾されており、本研究においてもアノード電流の減少による腐食の抑制効果が確認できた。一方で、屋外曝露を行った供試体では、アノード電流の減少を確認することはできなかった。亜硝酸イオンの腐食抑制メカニズムについては諸説あるが、コンクリート構造物が置かれる環境や、鉄筋の腐食の状態によって異なるものと考えられる。

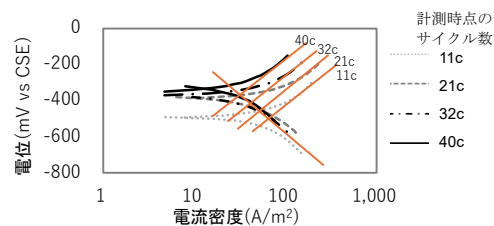


図-9 Li-40c-2 における分極曲線の経時変化

4. 結論

飛騨地方の骨材による ASR と塩害によって腐食が進行しているコンクリート構造物に対する亜硝酸リチウム内部圧入工法の適用性を検討した。その結果、得られた知見を以下に示す。

・亜硝酸リチウム内部圧入による ASR 劣化抑制効果

(1) 飛騨地方の反応性骨材には、遅延膨張性を示す骨材が多く含まれていた。ただし、本研究の範囲で発生した ASR は、細骨材に含まれる急速膨張性の安山岩の反応が主体である。

(2) 飛騨地方の反応性骨材による ASR では、[Li/Na] が従来の施工仕様の半分であっても膨張を抑制でき、急速膨張性を示す ASR に対して亜硝酸リチウム内部圧入工法による膨張抑制効果が改めて確認できた。

・腐食鉄筋に対する亜硝酸イオンの防錆効果

(1) 腐食グレードⅢに相当するような腐食が進行した鉄筋であっても、高温が作用する乾湿繰返し作用下のような厳しい環境において、亜硝酸イオンによる防錆効果が腐食促進前後の質量減少率から確認できた。

(2) 亜硝酸リチウムを圧入した供試体では、自然電位が卑な場合であっても、腐食が進行しない、または腐食の進行の程度が著しく遅い可能性が示された。そのため、自然電位での腐食モニタリングが難しいと考えられる。

参考文献

- 1) 熊谷善明ほか：凍結防止剤の影響を受けた ASR 損傷コンクリート橋脚の残存膨張性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.173-178，2000
- 2) 久保田崇嗣ほか：亜硝酸塩の鉄筋防錆性能に及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1765-1770，2017
- 3) 高谷哲ほか：コンクリート中における亜硝酸イオンの鋼材腐食抑制メカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1270-1275，2014