

亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応抑制効果の検証

江良 和徳^{*1}, 岡田 繁之^{*2}, 三原 孝文^{*3}, 河原 健児^{*4}

Verification of Controlling Effect of the Alkali-Aggregate Reaction by Nitrous Acid Lithium Power Injection

Kazunori ERA^{*1}, Shigezuki OKADA^{*2}, Takafumi MIHARA^{*3} and Kenji KAWAHARA^{*4}

要旨：アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物に亜硝酸リチウム水溶液を高圧で注入し、以後の ASR 膨張を抑制する補修工事を実施した。亜硝酸リチウムによる膨張抑制効果を検証するために、亜硝酸リチウム浸透確認試験、リチウムイオン定量分析試験および促進膨張試験を実施した。これらの試験結果より、本工法によるリチウムの浸透効果、ASR 膨張の抑制効果に十分期待ができることを確認した。

キーワード：アルカリ骨材反応，亜硝酸リチウム，高圧注入，残存膨張率

1. はじめに

コンクリート構造物中の鉄筋がアルカリ骨材反応（以下、ASR と称す）によるコンクリートの膨張によって破断するという深刻な事態が明らかになったこともあり、現在、ASR は極めて注目を集めている劣化現象であると言える。

従来、ASR の補修工法は、外部からの水分供給遮断を目的とする表面保護工を中心とした工法が適用されてきた。しかしこれらの施工事例の中には、十分な効果が得られず再劣化しているケースも見受けられ、より根本的な対策方法が模索されてきた。

一方、リチウムによる ASR 膨張の抑制効果に関する研究¹⁾ が国内外でなされており、亜硝酸リチウムに代表されるリチウム塩をコンクリート中に供給することで、アルカリシリカゲルが非膨張性の物質へと変化し、ASR 膨張が抑制されるというメカニズムが提案されている。この

ようなりチウムの ASR 膨張抑制効果を期待し、コンクリート内部に亜硝酸リチウムを高圧で注入して骨材周囲のアルカリシリカゲルの膨張を抑制する ASR 補修工法の開発、実用化が図られている^{2) 3)}。

本稿では、亜硝酸リチウム高圧注入工の施工を実施した日御碕擁壁と海田高架橋の 2 件に関して、施工後に実施した ASR 膨張抑制効果の検証結果について報告する。

2. 施工概要

2.1 工事概要

(1) 工事その 1 “日御碕擁壁” (写真-1)

工事名：日御碕地区 砂防修繕工事

発注者：島根県出雲土木建築事務所

施工場所：島根県大社町日御碕地内

施工数量：擁壁 15m³

工期：H15 年 8 月～H15 年 11 月

*1 極東工業株式会社 技術本部技術部補修課

*2 極東工業株式会社 技術本部技術部補修課 課長

*3 極東工業株式会社 技術本部技術部補修課

*4 福德塗装工業株式会社 コンクリート補修部 次長



写真-1 日御碕擁壁施工状況

(2) 工事その2 “海田高架橋” (写真-2)

工事名：国道2号海田高架橋橋脚補強工事
 発注者：国土交通省広島国道事務所
 施工場所：広島県安芸郡海田町地内
 施工数量：橋脚7基 150m³，橋台2基 50m³
 工期：H16年6月～H16年10月



写真-2 海田高架橋施工状況

2.2 工法概要

日御碕擁壁および海田高架橋下部工は、ともに昭和50年代後半に建設されたRC構造物であり、ASRによる劣化が顕著に見られていた。特に海田高架橋の下部工は、過去にASR対策工事として有機系表面被覆材による表面保護工が施工されてい

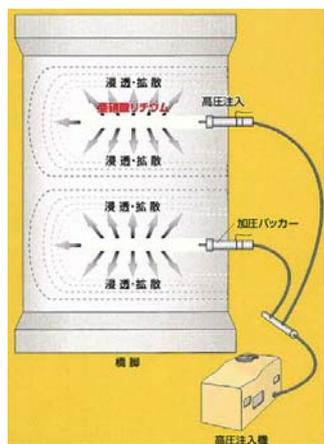


図-1 工法概要図



図-2 施工フロー

るが、再劣化により塗膜表面にまでひび割れが生じていた。このような構造物に対して今回施工した工法は、コンクリートに圧入孔を削孔し、そこから亜硝酸リチウム水溶液（重量濃度40%）を圧入するASR補修工法である。図-1に工法概要図を、図-2に施工フローを示す。

亜硝酸リチウムの必要量は、対象構造物のアルカリ総量(Na₂O換算)におけるNa⁺に対して、Li⁺のモル比が1.0となるように定めた。注入圧力や圧入時間などの施工仕様はコンクリートの物性や劣化状態に応じて設定する必要がある、過去の試験施工や供試体実験などで得られた知見をもとに定めた。表-1に両工事における施工仕様を示す。

表-1 施工仕様一覧

項目	単位	日御碕擁壁	海田高架橋
コンクリート試験結果			
圧縮強度	N/mm ²	10.9～18.3	20.8～33.3
アルカリ総量	kg/m ³	4.1	3.5～5.7
施工仕様			
亜硝酸リチウム必要量	kg/m ³	17.5	15.0～24.4
標準注入圧力	MPa	0.5～0.6	0.8～1.0
圧入孔間隔	mm	500	500
平均圧入時間	時間	40	60

3. 効果検証のための試験方法

3.1 亜硝酸リチウムの浸透確認

コンクリート中の亜硝酸リチウムの浸透状況を確認するために、日御碕擁壁、海田高架橋ともに呈色反応試験を実施した。試験実施時期は本注入作業完了の2日後とし、圧入孔間の中央部付近より $\phi 20\text{mm}$ 、 $L=200\text{mm}$ 程度のコアを採取し(図-3)、その表面に呈色液 TDI(トルエン・ジイソシアナート；亜硝酸イオンと反応して茶褐色に呈色)を噴霧して呈色反応状況を観察した。試験頻度は $5\sim 10\text{m}^2$ につき1箇所とした。

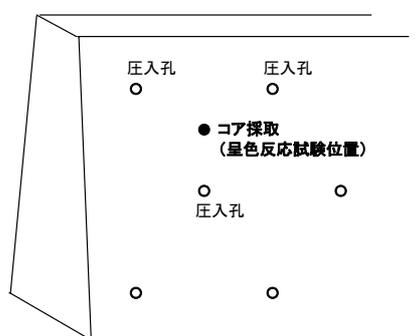


図-3 呈色反応試験位置の例

3.2 リチウムイオン定量分析

コンクリート中に供給されたリチウムイオンの分布状況を定量的に確認するために、日御碕擁壁にてリチウムイオン定量分析を実施した。工事完了の1ヵ月後に擁壁天端より長さ1.2mの長尺コアを鉛直方向に1本採取し(図-4)、それを50mm間隔で粉碎採取した各粉末試料中に含まれるリチウムイオンを、ICPプラズマ発光分光光度法により定量分析した。

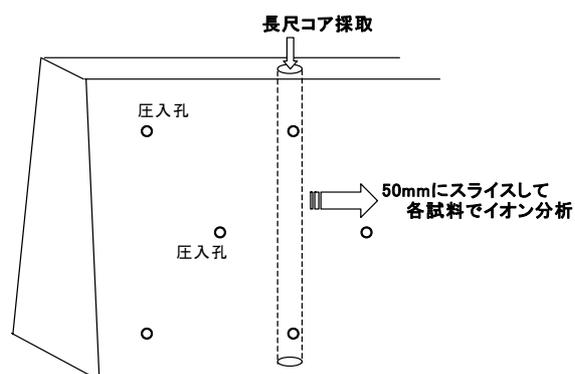


図-4 リチウムイオン分析試料の採取

3.3 促進膨張試験

亜硝酸リチウムによる ASR 膨張の抑制効果を定量的に確認するために、日御碕擁壁、海田高架橋ともに施工前、施工後に採取したコンクリートコア($\phi 100\text{mm}$ 、 $L=250\text{mm}$)を用いて促進膨張試験を実施した。施工前のコアは本注入工開始の14日前に、施工後のコアは本注入完了の7日後に採取した。コアの採取位置は圧入孔から250mm離れた位置とした。膨張率の測定は「 40°C 、RH100%」および「 80°C 、 1mol/l NaOH 溶液」の促進養生条件にて行った。

「 40°C 、RH100%」条件下での測定は、JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法(案)」に準拠し、コアの基長測定後、温度 20°C 、相対湿度100%の条件下で約2週間の標準養生を行い、その間の膨張ひずみを測定して開放膨張率とした。その後、温度 40°C 、相対湿度100%の条件下で13週間の促進養生を行い、その間の膨張ひずみを測定して残存膨張率とした。膨張ひずみの測定は、ゲージプラグを接着したステンレス製バンドをコアに取り付け、コンタクトゲージにて計測した。

「 80°C 、 1mol/l NaOH 溶液」条件下での測定は、 80°C の温水中に24時間保ち、 80°C における基長を測定した後、 80°C 、 1mol/l NaOH 溶液中にて14日~21日間の促進養生を行い、その間の膨張ひずみを測定した。

4. 試験結果と ASR 抑制効果の検証

4.1 亜硝酸リチウムの浸透状況

日御碕擁壁4本と海田高架橋43本の呈色反応試験結果を表-2に示す。全採取コアの約74%に当たる35本において、コア表面の70%程度以上の範囲に呈色反応がみられた(写真-3)。また、残り26%に当たる12本の採取コアにおいても、コア表面に斑状の呈色反応、またはコンクリート内部のひび割れ(コアの不連続箇所)に沿った範囲の呈色反応がみられており、全く呈色反応を示さないコアはみられなかった。

表-2 呈色反応試験結果

施工対象	施工面積 (m ²)	試料数 (本)	コア試料表面の呈色反応状況 (φ20mm, L=200mm程度)
日御碕擁壁	20	4	4本中3本に表面積の70%以上呈色. 1本はひび割れ付近に呈色.
海田高架橋	A2橋台	39	6本中5本に表面積の70%以上呈色. 1本は斑状に呈色.
	A3橋台	36	6本すべてに表面積の70%以上呈色.
	UP3橋脚	51	7本中4本に表面積の70%以上呈色. 2本は斑状, 1本はひび割れ付近に呈色.
	P15橋脚	58	10本中6本に表面積の70%以上呈色. 2本は斑状, 2本はひび割れ付近に呈色.
	RP27橋脚	24	4本中3本に表面積の70%以上呈色. 1本はひび割れ付近に呈色.
	RP28橋脚	12	3本すべてに表面積の70%以上呈色.
	RP29橋脚	11	2本すべてに表面積の70%以上呈色.
	RP31橋脚	10	2本中1本に表面積の70%以上呈色. 1本は斑状に呈色.
RP34橋脚	17	3本中2本に表面積の70%以上呈色. 1本はひび割れ付近に呈色.	



写真-3 呈色反応状況

亜硝酸リチウムのコンクリート中の浸透は、主にコンクリート中の微細なひび割れを通じて、また一部はコンクリート中の連続空隙を通じて各圧入孔からその周囲へ広がっていくものと考えられる。圧入孔間の中央部付近のコアで実施した呈色反応試験の結果、全ての箇所に呈色反応がみられたことから、各圧入孔間の範囲のコンクリート中には亜硝酸リチウムが浸透したと判断することができる。

これらの試験結果より、圧縮強度が 10.9~33.3N/mm² のコンクリートに対し、圧入孔間隔を 500mm、注入圧力を 0.5~1.0MPa と設定して亜硝酸リチウム水溶液を圧入した場合、亜硝酸リチウムはコンクリート中に概ね満遍なく浸透している状況が確認できた。

4.2 リチウムイオン定量分析結果

日御碕擁壁にて実施したリチウムイオン定量分析結果を図-5 に示す。既往の研究成果¹⁾により、亜硝酸リチウムによって ASR を抑制するために必要な Li⁺/Na⁺モル比を 0.5 と設定すると、本擁壁の ASR 抑制対策に必要なリチウムイオン量は 0.459kg/m³ となる。全 24 試料のうち 3 試料において 0.459kg/m³ を若干下回ったものの、全体の 88% の範囲には必要量以上のリチウムイオンが供給されていることがわかる。

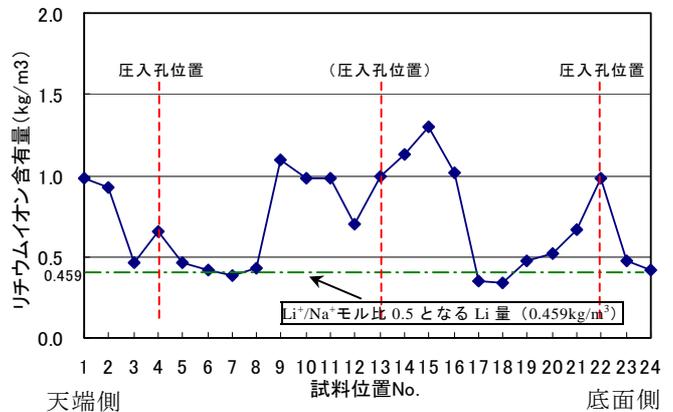


図-5 リチウムイオン含有量

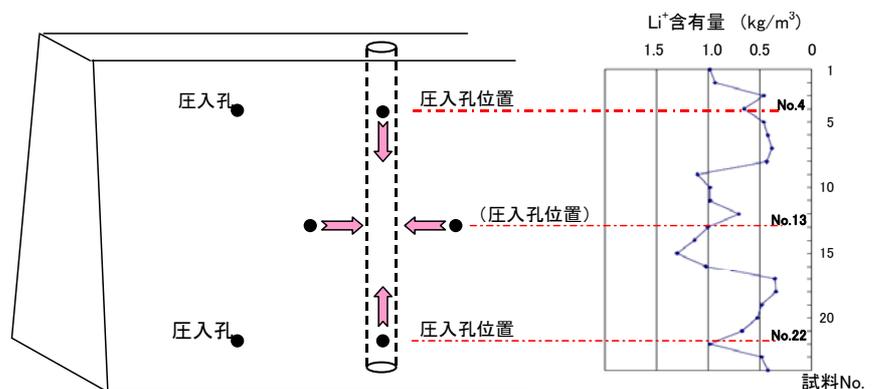


図-6 リチウムイオンの分布状況

また、全 24 試料におけるリチウムイオン含有量の平均値は 0.715 kg/m^3 であり、必要量リチウムイオン量 0.459 kg/m^3 を大きく上回る。

リチウムイオンの分布状況と圧入孔の位置との関係を図-6 に示す。リチウムイオンは各圧入孔からその周囲へ広がっていくと考えられるため、圧入孔付近のリチウムイオン濃度がより高く、圧入孔から離れるに従って濃度が低くなると予測していたが、実際の分布状況ではむしろ上下の圧入孔間の中央部付近（試料 No.9~16）に高濃度のリチウムイオンが検出された。このリチウムイオン分布の凹凸と圧入孔位置との関係に着目すると、図-6 の中に矢印で示したように、試料 No.9~16 付近には上下左右の圧入孔から浸透してくるため、結果的にリチウムイオン量が多く供給されていたと考えられる。

これらの試験結果より、圧縮強度が $10.9 \sim 18.3 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートに対し、圧入孔間隔を 500 mm 、注入圧力を $0.5 \sim 0.6 \text{ MPa}$ と設定して亜硝酸リチウム水溶液を圧入した場合、概ねコンクリート全範囲において ASR 抑制に必要な量以上のリチウムイオンが分布している状況が確認できた。

4.3 促進膨張試験結果

日御碕擁壁における「 40°C 、RH100%」条件下での促進膨張試験結果を図-7 に示す。施工前の試験体の全膨張率は 0.055% を示した。それに対し施工後の全膨張率の平均値は 0.013% であり、施工前の値に比べて 23.6% に低減されていた。残存膨張率で比較すると、施工前は 0.041% 、施工後の平均値は 0.010% であり、施工前に比べて 24.4% に低減されていた。

海田高架橋における「 40°C 、RH100%」条件下での促進膨張試験

結果を図-8 に示す。施工前の全膨張率の平均値は 0.049% を示した。それに対し施工後の全膨張率の平均値は 0.020% であり、施工前に比べて 40.8% に低減されていた。残存膨張率で比較すると、施工前の平均値は 0.039% 、施工後の平均値は 0.009% であり、施工前に比べて 25.0% に低減されていた。

これらの試験結果より、圧縮強度が $10.9 \sim 33.3 \text{ N/mm}^2$ 、アルカリ総量が $3.5 \sim 5.7 \text{ kg/m}^3$ のコンクリートに対し、 Li^+/Na^+ モル比を 1.0 とする量の亜硝酸リチウム水溶液を圧入することにより、亜硝酸リチウム圧入後のコンクリートの膨張率は注入前の $25\% \sim 40\%$ 程度にまで低減されており、以後の ASR 膨張を十分抑制することが可能であると考えられる。

本工法施工後の効果確認試験として促進膨張

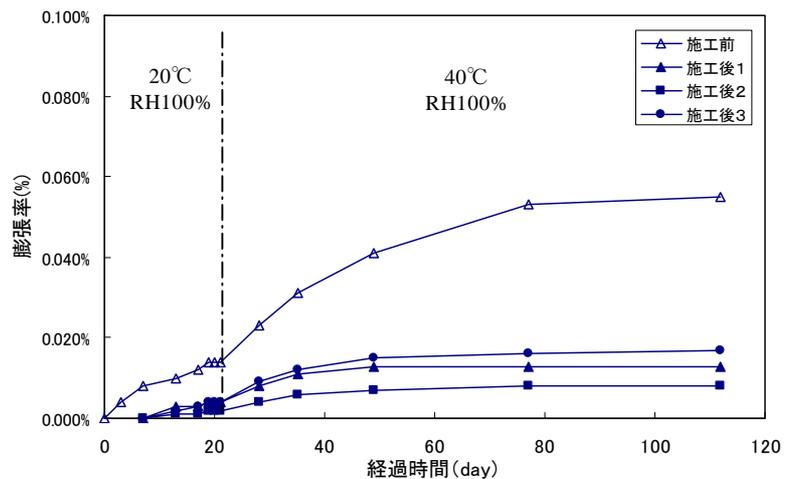


図-7 促進膨張試験結果（日御碕擁壁、 40°C 、RH100%）

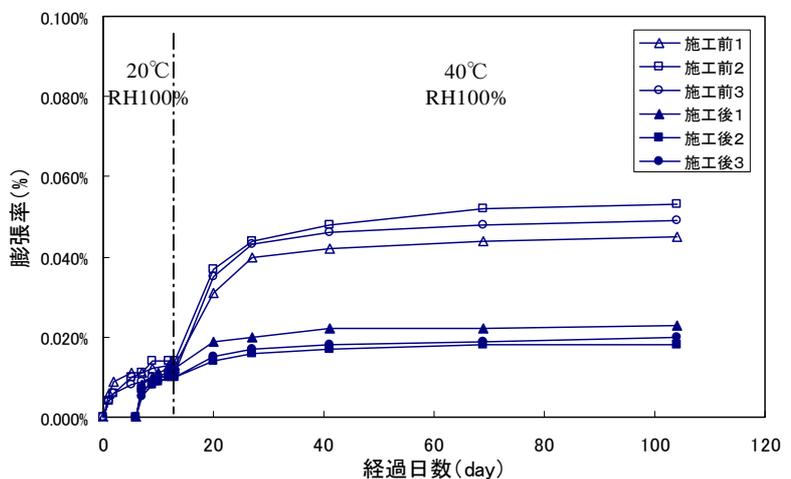


図-8 促進膨張試験結果（海田高架橋、 40°C 、RH100%）

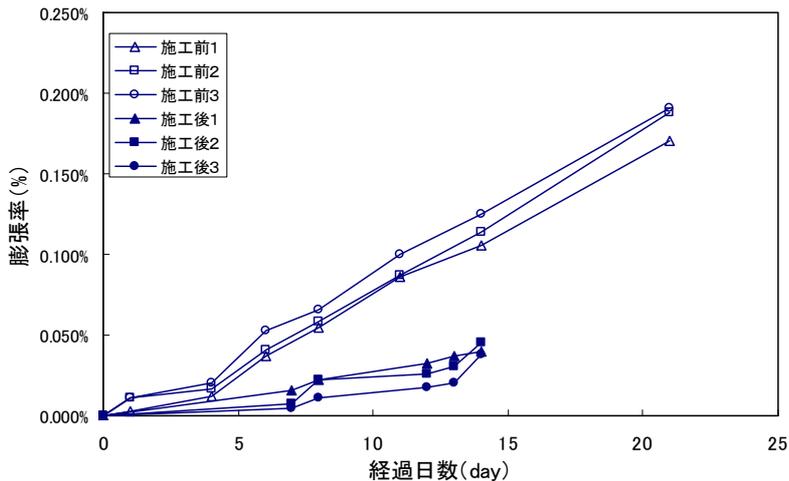


図-9 促進膨張試験結果 (海田, 80°C, 1mol/l NaOH)

試験を実施する場合、「40°C, RH100%」条件下での促進膨張試験 (JCI-DD2 法) では, 試験結果を得るまでに 3 ヶ月~6 ヶ月を要する. これでは施工工期内に収めることが困難となるため, より短期間で結果を得ることのできる「80°C, 1mol/l NaOH 溶液」条件下での促進膨張試験に着目した. 海田高架橋における「80°C, 1mol/l NaOH 溶液」条件下での促進膨張試験結果を図-9 に示す. 施工前の膨張率は 14 日間で 0.115%, 21 日間で 0.183% 値を示した. それに対し施工後の膨張率は 14 日間で 0.041% であり, 14 日間の膨張率で比較すると, 施工前の 35.7% に低減されていた.

図-8 に示す海田高架橋の「40°C, RH100%」条件下での試験結果と, 図-9 の「80°C, 1mol/l NaOH 溶液」条件下での結果とを比較すると, 示される膨張率の値は当然異なるものの, 膨張率の低減率に着目すると, どちらも施工後の膨張率が施工前の 35~40% 程度に低減されていることが分かり, 本試験の範囲内では両者からほぼ同等の評価が得られたと言える. ただし, 促進膨張試験の結果はコアの形状寸法に大きく依存することが指摘されており⁴⁾, 異なる促進養生条件で得られる膨張率の相関関係を把握するにはさらに多くの比較データを必要とすると考え.

5. まとめ

(1) 本工法の定める圧入孔間隔, 注入圧力にて亜硝酸リチウムをコンクリートに圧入した場合, 亜硝酸リチウムはコンクリート中に概ね満遍なく浸透しており, リチウムイオンも ASR 抑制に必要な量以上でほぼ分布している状況が確認できた.

(2) Li^+/Na^+ モル比を 1.0 とする量の亜硝酸リチウム水溶液をコンクリート中に圧入することにより, 亜硝酸リチウム圧入後のコンクリートの膨張率は注入前の 25%~40% 程度にまで低減されていることが確認できた.

(3) 亜硝酸リチウムの良好な浸透状況と, 膨張率の低減効果が示されたことにより, 本工法の ASR 膨張の抑制効果は十分に期待できるものとする.

参考文献

- 1) 例えば齊藤満, 北川明雄, 柳場重正: 亜硝酸リチウムによるアルカリ骨材膨張の抑制効果, 材料, Vol. 41, No. 468, pp. 1375-1381, 1992
- 2) 江良和徳, 岡田繁之, 三原孝文, 河原健児: 亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応抑制工法(リハビリ高圧注入工法)の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol. 4, pp. 117-122, 2004
- 3) 金好昭彦, 内田博之, 狩野裕之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, pp. 403-408, 2001
- 4) 大脇英司, 宮原茂禎, 上東泰, 野島昭二: 促進膨張試験によるコンクリートコアのアルカリ骨材反応性の検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集第 5 部, pp. 137-138, 2003