

報告

亜硝酸リチウム内部圧入工による ASR 補修の実構造物への適用性に関する検討

鈴木 英之^{*1}, 橋爪 大輔^{*2}, 藤原 理絵^{*3}, 江良 和徳^{*4}, 三原 孝文^{*5}

Study on Application of Lithium Nitrite pressurized Injection Method to repairing ASR Structures

Hideyuki SUZUKI^{*1}, Daisuke HASHIDUME^{*2}, Rie FUJIWARA^{*3}, Kazunori ERA^{*4} and Takafumi MIHARA^{*5}

要旨： コンクリート橋脚は、その材料に対する管理指針が制定される昭和 60 年度以前に構築した構造物において、アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートひび割れや鉄筋破断などの構造物損傷が報告されているが、その原因の一つである ASR による膨張の抑制に効果があるとされる亜硝酸リチウムを主成分とする抑制剤圧入の効果検証を実施したので、その結果を報告するものである。

キーワード： アルカリシリカ反応（ASR）、亜硝酸リチウム内部圧入、膨張抑制

1. はじめに

コンクリート橋脚は、その材料に対する管理指針が制定される昭和 60 年度以前に構築した構造物において、アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートのひび割れや鉄筋破断などの構造物損傷が報告されている。ASR によって損傷した構造物に対する対策は、鉄筋破断のように既に耐荷性能の低下を引き起こしている場合は補強を実施し、ひび割れ等は発生しているものの、耐荷性能の顕著な低下を引き起こす前の段階の構造物に対しては、コンクリート表面保護工によって外部からの水の供給を抑制することによって更なる損傷の進行を防止する予防保全対策が取られることが多い。

予防保全対策としての表面保護工は、一定の ASR

抑制効果は得られているものの、表面保護工の施工後、ある程度の年月が経過した構造物ではひび割れ等の損傷が進行するケースが多く確認されている。この原因として、表面保護工の性能や劣化の問題だけでなく、コンクリートに内在する水の影響や橋脚梁上のように物理的に空間が小さく表面保護工の完全な施工が困難なケースもあり、表面保護工の性能の向上では解決できないケースも多い。

このため、表面保護工による予防保全対策では不十分な構造物への対策として、反応性骨材のゲルの膨張抑制の効果があるとされる亜硝酸リチウムを主成分とする抑制剤のコンクリート内部への圧入工（以下、亜硝酸リチウム内部圧入工）に着目し、ASR 抑制効果の検証を実施したので、その検証結果について報告する。



図-1 試験に用いた ASR 損傷 RC 橋脚

2. 検討概要

2.1 RC 梁での圧入効果検証

亜硝酸リチウム内部圧入工は、コンクリート内部でのアルカリシリカ反応によるゲルの膨張抑制を主目的として、構造物に削孔した圧入孔より亜硝酸リチウムを主成分とした抑制剤を圧入することで、構造物内部のコンクリートの微細ひび割れを介して抑制剤を劣化範囲に効果的に浸透拡散させ、コンクリートの将来の膨張を低減することにより、以後の ASR による劣化を抑制する工法である。本検討では、

*1 阪神高速道路（株）管理本部管理企画部保全技術課 課長代理

*2 阪神高速道路（株）保全交通部保全調整・点検課 担当課長

*3 阪神高速道路（株）管理本部管理企画部保全技術課

*4 極東興和（株）営業本部補修部補修技術課 課長

*5 極東興和（株）営業本部補修部補修工事課 課長

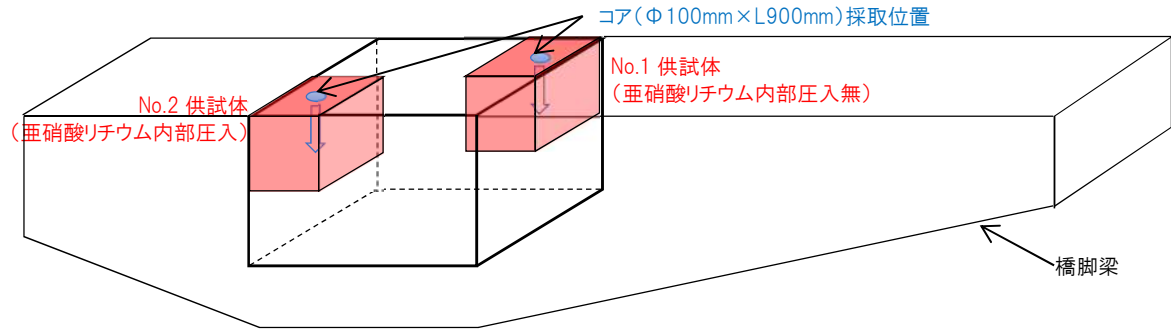


図-2 供試体切り出し位置図

表-1 圧縮強度・静弾性係数の測定値

表面からの位置 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
100～250	27.5 (27.0)	8.1 (26.75)
500～700	24.7 (27.0)	12.0 (25.35)

※圧縮強度の下段は設計基準強度

※静弾性係数の下段は圧縮強度測定値に対する計算値

表-2 アルカリ含有量の測定値

表面からの位置(mm)	アルカリ含有量(kg/m ³)
750	3.6
900	2.8

表-3 塩化物イオン含有量の測定値

表面からの位置(mm)	塩化物イオン含有量(kg/m ³)
100	0.36
800	0.28

表-4 膨張試験の測定値 (%)

表面からの位置 (mm)	解放膨張 標準養生 10 日	残存膨張 促進養生 13 週目	全膨張
100～350	0.012	0.021	0.033
600～850	0.013	0.028	0.041

供用下の高速道路構造物から撤去した ASR によって損傷した RC 梁（図-1）を供試体として、亜硝酸リチウム内部圧入工の効果検証を、以下 6 項目について行っており、うち④～⑥については長期観測中であるため、本報告では①～③について報告する。

- ① 膨張抑制効果の定量評価
- ② 亜硝酸リチウムの浸透状況の確認
- ③ 亜硝酸リチウムの浸透状況の定量分析
- ④ 表面保護工との比較
- ⑤ 表面保護工との組み合わせによる相乗効果
- ⑥ 部分圧入の有効性検証

2.2 高強度供試体での圧入効果検証

ASR 損傷を有するコンクリート構造物は、RC 構造物だけでなく PC 構造物も存在するため、PC 構造物への亜硝酸リチウム内部圧入工の適応性を確認するため、高強度で緻密なコンクリートを用いて製作した供試体に対して、圧入量、圧入時間、圧入状況の確認を行った。

3. RC 梁供試体による圧入効果検証

3.1 RC 梁供試体の基礎データ

亜硝酸リチウム内部圧入工施工前の ASR 損傷した撤去 RC 梁の基礎データを得るため、図-2 の No.1 供試体の天端面より下方向に 900mm のコアを採取

した。以下に基礎データの測定結果を示す。

(1) 圧縮強度・弾性係数

コンクリート面より表面側（100～250mm）と内部側（500～700mm）の圧縮強度及び静弾性係数の測定値を表-1 に示す。圧縮強度は内部側で設計基準強度（27N/mm²）を下回る測定値を確認した。また、静弾性係数はいずれも圧縮強度測定値から算出する計算値¹⁾を下回っていた。特に表面側に近い箇所での測定値にて顕著な低下が認められる。

(2) アルカリ含有量

亜硝酸リチウムの設計圧入量設定に用いるアルカリ含有量測定値を表-2 に示す。測定は、「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法(案)」²⁾に準拠し実施した。ASR を生じたコンクリート中のアルカリ含有量は一般的に 3.0kg/m³ 以上であることが多いが、今回最大で 3.6kg/m³ となっている。

(3) 塩化物イオン含有量

塩化物イオン含有量の測定結果を表-3 に示す。測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法（塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法）」に準拠し実施した。測定値は、表面側、内部側のいずれの値も腐食発生限界値（1.2～2.5kg/m³）³⁾を大きく下回っている。

(4) 膨張量試験

JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリー

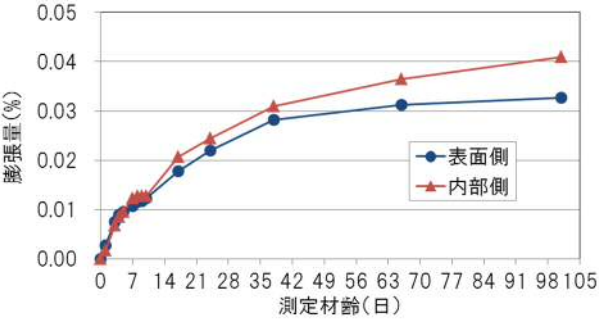


図-3 圧入前の膨張量試験結果

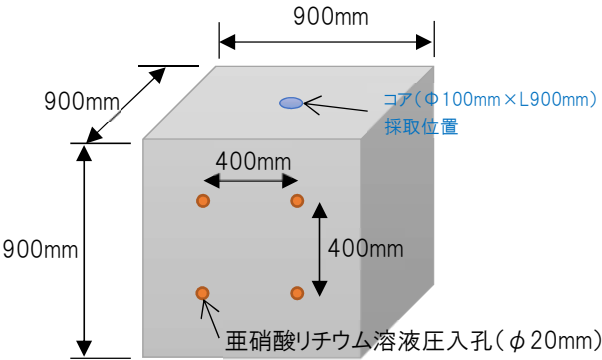


図-4 供試体寸法

ト構造物のコア試料による膨張量の測定方法（案）」⁴⁾より、表層側と内部側供試体を用いて膨張量試験を行った。試験結果を表-4と図-3に示す。膨張量試験を行ったコアの深さ方向の位置に着目した場合、表層に近い試料の残存膨張量のほうが小さく、内部側の試料の残存膨張量のほうが大きい傾向にある。これは表層に近いコンクリートはひび割れ発生による膨張力解放の影響により、残存膨張量としては減少していた可能性が考えられる。

(5) 岩種判定

構造物から採取したコンクリートコア試料にて、骨材の種類及び岩石種の観察、および ASR の発生状態並びにその他の特徴を観察した。

粗骨材は、砂利（砂岩・頁岩など）および安山岩碎石との混合であった。細骨材は、岩片（砂岩・頁岩など）および結晶片（石英・斜長石など）から構成される砂と、安山岩砕砂との混合であった。ASR 反応性鉱物として、安山岩にはガラスが、砂岩・凝灰岩・石英片岩には隠微晶質石英が含まれており、中程度（進展期・加速期）の ASR が、主に安山岩により生じていた。

3.2 RC 梁供試体への圧入効果の検証

図-2 に示した No.2 供試体（900mm×900mm×900mm、図-4）を用い、400mm 間隔で設けた φ20mm の圧入孔より亜硝酸リチウム溶液を圧入し、その効果検証を行った。

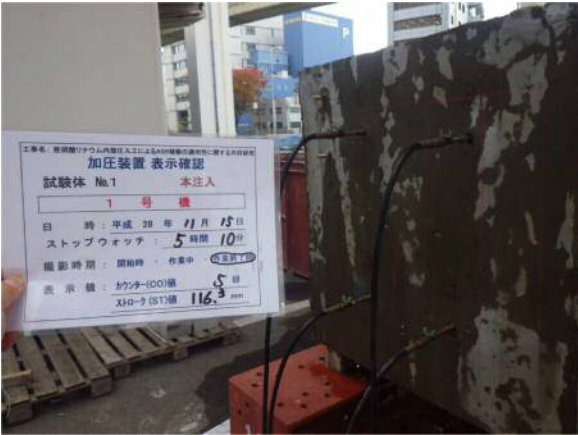


図-5 内部圧入状況

表-5 RC 梁供試体への圧入仕様

項目	数値	備考
Li/Na モル比	0.8	
アルカリ総量	4.0kg/m ³	
亜硝酸リチウム必要量	5.471kg/m ³	
亜硝酸リチウム水溶液	13.68kg/m ³	水溶液濃度 40%
標準注入圧力	0.5Mps	

表-6 表層側膨張試験の測定値

項目	解放膨張	残存膨張	全膨張
	標準養生 10 日	促進養生 13 週目	
圧入前	0.012%	0.021%	0.033%
圧入後	0.017%	0.008%	0.025%
低減率	+42%	△62%	△24%

表-7 内部側膨張試験の測定値

項目	解放膨張	残存膨張	全膨張
	標準養生 10 日	促進養生 13 週目	
圧入前	0.013%	0.028%	0.041%
圧入後	0.014%	0.010%	0.024%
低減率	+8%	△64%	△41%

(1) RC 梁供試体への亜硝酸リチウム圧入仕様

亜硝酸リチウム圧入仕様の設定に際しては、ASR リチウム工法協会の技術資料⁵⁾（以下、「協会資料」）を参考に設定した。亜硝酸リチウム設計圧入量はコンクリート中のアルカリ含有量に応じて Li/Na モル比=0.8 となる量とする。

基本データとして測定した供試体中のアルカリ総量測定値は 3.6kg/m³であるが、アルカリ含有量のばらつきも考慮して 4.0kg/m³を採用することとした。設計圧入量や圧入力などの圧入仕様を表-5 に、圧入状況を図-5 に示す。

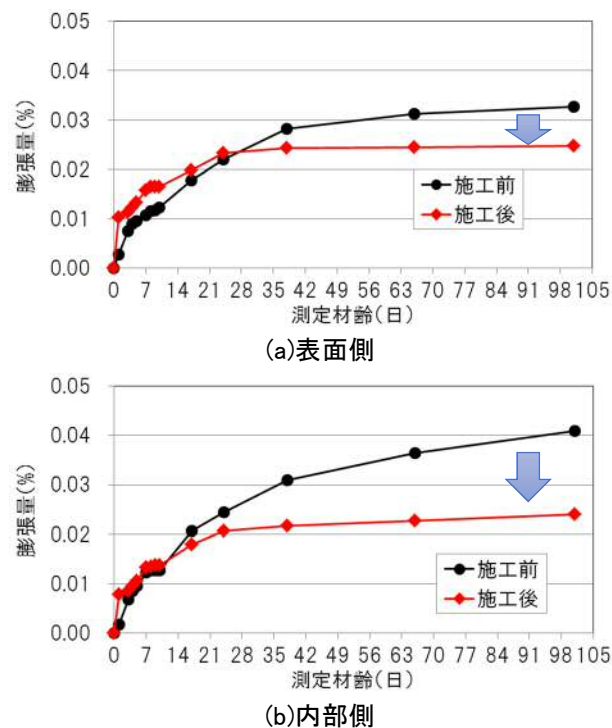


図-6 圧入前後の膨張量試験結果

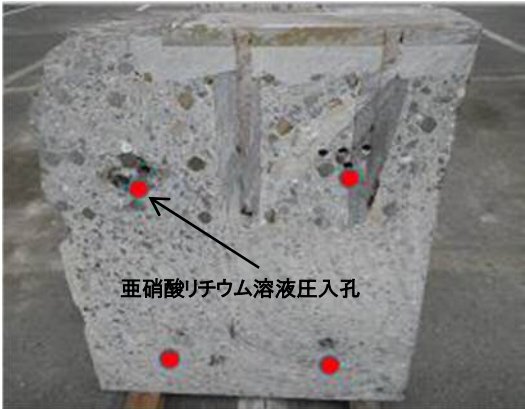


図-7 供試体切断面（試薬噴霧前）

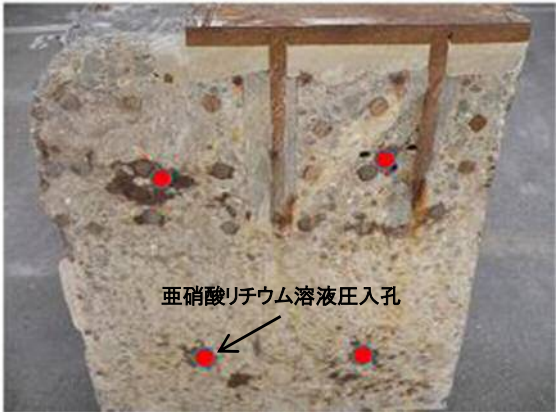


図-8 供試体切断面（試薬噴霧後）

(2) 膨張抑制効果の定量評価

抑制効果を検証するため、亜硝酸リチウム圧入前の膨張量と圧入後3週間が経過した供試体から採取したコアを用い、残存膨張量を測定した。測定は、

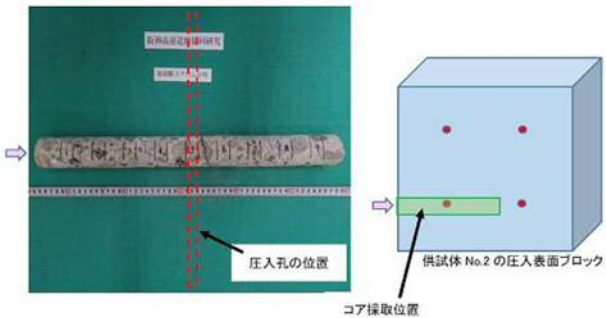


図-9 圧入状況の定量評価のためのコア採取状

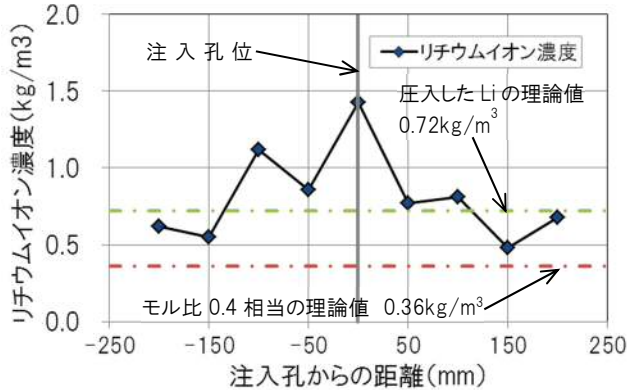


図-10 分析断面のリチウムイオンの濃度分布

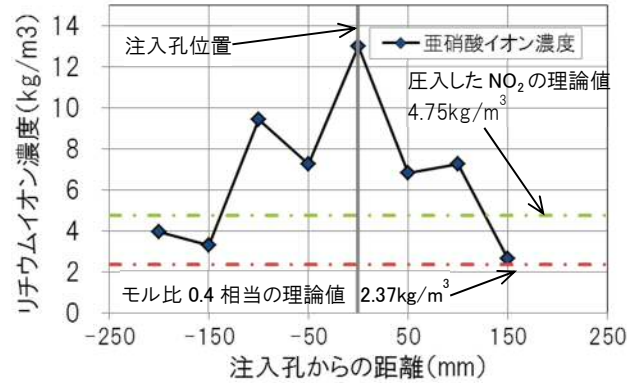


図-11 分析断面での亜硝酸イオンの濃度分布

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量の測定方法（案）」⁴⁾により実施した。膨張量の比較を表-6，7及び図-6に示す。表層側，内部側ともに，亜硝酸リチウム内部圧入後の残存膨張量は施工前に比べて6割以上低減しており，コア採取位置の違いによるばらつきを考慮しても，将来的なASR膨張の可能性を低減できているものと考えられる。

(3) 亜硝酸リチウムの浸透状況の確認

亜硝酸リチウムの浸透状況を確認するために，圧入後の供試体を切断し，切断面に呈色試薬（トリレン 2,4-ジイソシアナート）を噴霧し浸透範囲の確認を行った。トリレン 2,4-ジイソシアナートは，亜硝酸イオンと接触すると無色透明から茶褐色へと変色するため，呈色試薬を噴霧し茶褐色に変色した範囲

を浸透範囲とみなした。

試薬噴霧前の切断面の状況を図-7 に、試薬噴霧後の切断面の状況を図-8 に示す。両者を比較すると、呈色試薬を噴霧することによって、切断面全体が茶褐色に呈色しており、4 つの圧入孔から部材全体に亜硝酸リチウムが浸透していることが確認できた。呈色状況は全範囲について概ね同一の色調であり、内部圧入によって亜硝酸リチウムがコンクリート中に均一に浸透している状況が確認できた。

(4) 亜硝酸リチウムの浸透状況の定量分析

圧入した亜硝酸リチウムの分布状況を定量的に把握するために、圧入後の供試体からコアを採取し、50mm 毎にスライス（図-9 参照）した試料を粉碎して亜硝酸イオン、リチウムイオンの含有量を定量分析し、各イオンの濃度分布を確認した。ASR 膨張抑制効果に期待するリチウムイオンに着目すると、図-10 に示したとおり協会資料において抑制効果が発揮されるとされている Li/Na モル比 0.4 の場合のリチウムイオン含有量 $0.36\text{km}/\text{m}^3$ に対し、全ての分析断面においてリチウムイオン含有量が上回っており十分に圧入できていることを確認した。また、ASR 抑制効果には直接影響はないが、図-11 に示したとおり亜硝酸イオンについても、同様に浸透しており、亜硝酸リチウム溶液が浸透していることが確認できた。

4. 高強度供試体での適応性検証

ASR 損傷を有する PC 梁を想定した高強度コンクリートへの亜硝酸リチウム内部圧入工の適応性を確認する。確認する項目は圧入量、圧入時間及び浸透状況確認とした。

4.1 強度供試体の基礎データと圧入仕様

高強度コンクリート供試体は $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 500\text{mm}$ の寸法で製作し、中央に設けた圧入孔から亜硝酸リチウム溶液を圧入した。（図-12 参照）コンク

リートの圧縮強度は配合強度 $39.5\text{N}/\text{mm}^2$ と $51.6\text{N}/\text{mm}^2$ の 2 種類とした。また、高圧入による圧入能力を検証するため、圧入工で一般的に使用されている油圧式圧入装置に加え、高圧域までの圧入作業が可能な電動ポンプ式圧入装置による圧入の検証も行うこととした。各供試体の仕様を表-8 に示す。

4.2 高強度供試体への圧入結果

高強度供試体への圧入量と圧入時間について設計値と実験結果を表-8 に示す。油圧式圧入装置では配合強度 $39.5\text{N}/\text{mm}^2$ と $51.6\text{N}/\text{mm}^2$ の供試体ともに設計圧入時間を大幅に超過しても設計圧入量まで圧入することはできなかった。また、高圧力の電動ポンプ式圧入装置では設計圧入量まで圧入は可能であったが、設計圧入時間を大きく超過する結果となった。

圧入実験後、高強度供試体を切断し、呈色試薬を噴霧し、浸透状況を確認したが、図-13 に示したとおり、油圧式圧入装置で圧入した供試体は非常に狭い範囲で茶褐色に呈色したのみであった。

また、図-14 に示した電動ポンプ式圧入装置によって高圧で圧入した供試体では、設計圧入量を圧入したにもかかわらず、浸透範囲は限定的で、かつ茶褐色の呈色が図-8 に示した RC 供試体に比べて濃いことから、高圧で圧入した場合でも、高強度コンクリートでは圧入孔近傍に濃縮され広い範囲に浸透しないものと考えられる。

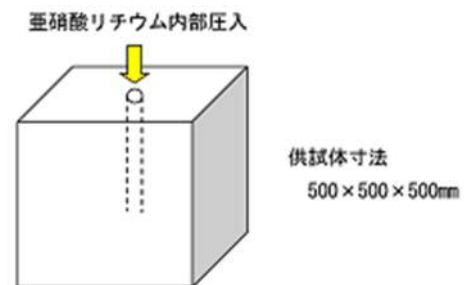


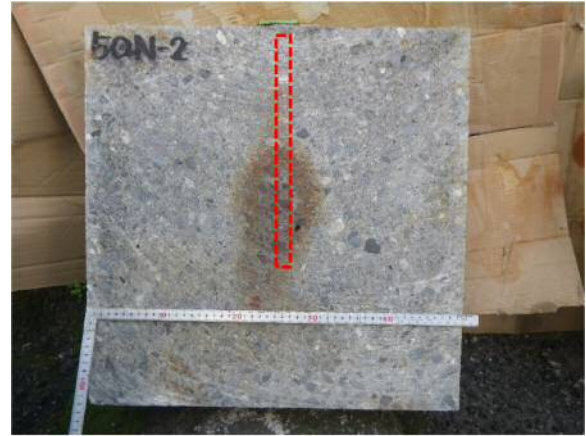
図-12 高強度コンクリート供試体

表-8 高強度供試体の圧入仕様と圧入結果

No	供試体 配合強度 (N/mm^2)	圧入機 種類	圧力 (MPa)	目標値	目的	設計値		実測値	
						圧入量 (kg/体)	圧入時間 (時間)	圧入量 (kg/体)	圧入時間 (時間)
40-1	39.5	油圧	1.5	設計圧入時間まで	設計圧入時間で注入できる量の確認	1.71	96	0.266	96.0
40-2				設計圧入量まで	設計圧入量を注入するのに必要な時間の確認			0.724	1000
40-3		電動ポンプ	3.0		電動ポンプで設計圧入量を全て圧入できるかを確認		42	1.71	77.8
50-1	51.6	油圧	2.0	設計圧入時間まで	設計圧入時間で注入できる量の確認		234	0.176	190
50-2				設計圧入量まで	設計圧入量を注入するのに必要な時間の確認			0.439	734.1
50-3		電動ポンプ	3.0		電動ポンプで設計圧入量を全て圧入できるかを確認		101	1.71	74.4



No.40-2 供試体



No.50-2 供試体

図-13 油圧式圧入装置による圧入結果



No.40-3 供試体



No.50-3 供試体

写真-14 電動ポンプ式圧入装置による圧入結果

5. まとめ

亜硝酸リチウム内部圧入工を RC 構造物に適用した場合、十分にコンクリート内部に亜硝酸リチウム溶液が浸透し、ASR による膨張を抑制できることを確認した。このため、残存膨張量が大きい RC 構造物に対して、亜硝酸リチウム内部圧入工を適用することは有効であると考えられる。

一方、PC 構造物を想定した高強度コンクリートへの適用については、高圧力の電動ポンプ式圧入装置を用いても供試体全体へ浸透させることができず、現時点では実構造物への適用性は低いと考えられる。

現在、表面保護工との比較、表面保護工との組み合わせによる相乗効果の検証および部分圧入の有効性検証のために長期の屋外暴露試験を実施中であり、継続して効果の検証を行っていく。

謝辞

本研究の実施にあたり、(一社)コンクリートメ

ンテナンス協会および ASR リチウム工法協会に多大なご協力をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書 設計編，2018.3
- 2) 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発 土木構造物に関する研究成果 付属資料 3.3，1989.5
- 3) 土木学会：2018 年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編，2018.10
- 4) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集（1977～2002 年度），2004.4
- 5) ASR リチウム工法協会：アルカリ骨材反応抑制工法 ASR リチウム工法 技術資料 改訂版，2015.4