

亜硝酸リチウム内部圧入工による ASR補修の適用性に関する検討

橋爪大輔¹・堀岡良則¹・佐藤彰紀¹

¹ 大阪管理局保全部保全設計課

要約

平成27年度から開始した大規模更新・修繕事業では鉄筋コンクリート橋脚のうち、アルカリ骨材反応（ASR）により損傷している橋脚の健全性を調査・評価し、その結果に応じて補強や予防保全の対応を行うこととしている。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、アルカリ骨材反応（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: アルカリ骨材反応, 膨張抑制, 亜硝酸リチウム内部圧入

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、アルカリ骨材反応（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。現在進めている大規模更新・修繕事業では、鉄筋コンクリート橋脚修繕として、ASR劣化度Ⅲ、Ⅳの橋脚に対し、健全性を調査・評価し、その結果に応じて補強や予防保全の対応を行うこととしている。ASRの予防保全としては、外部からの水分供給を防ぐために従来から実施しているコンクリート表面保護工や、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などがある。

今回、この亜硝酸リチウム内部圧入の抑制効果の検証をコミュニケーション型共同研究で実施したところであり、その検証結果について報告する。

2. 共同研究の目的と内容

(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的な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。現在、阪神高速道路で進めている西船場JCT改築事業（大阪市西区）において、ASR損傷したRC梁（写真-1）を更新することに伴い撤去することとなったRC梁も用いて、供用下において実際にASR損傷したRC梁を供試体として、以下6項目の亜硝酸リチウム内部圧入工の効果検証を行うものである。

1. 膨張抑制効果の定量評価
2. 浸透状況の確認
3. 浸透状況の定量分析
4. 表面保護工（F種）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



写真-1 ASR損傷RC橋脚（東下P41）

(2) 高強度供試体での圧入効果検証

今後の大規模修繕ではASR損傷を有するPC梁への抑制工法も必要となることが予想されることから、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ため、高強度コンクリート供試体を作成し、圧入量、圧入時間、圧入状況の確認を行うものである。

3. RC梁供試体の基礎データ

亜硝酸リチウム圧入工施工前のASR損傷した撤去RC梁の基礎データを得るため、橋脚天満面より下方向に900mmのコアを採取した（図-1）。以下に基礎データの測定結果を示す。

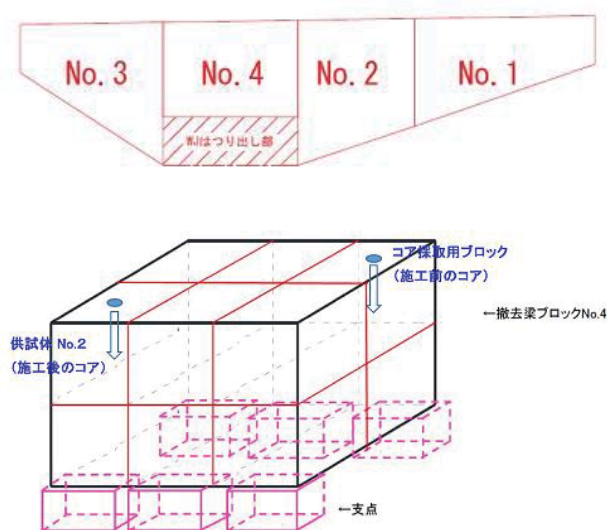


図-1 ASR損傷梁の切り出しブロック図
（供試体に撤去ブロックNo. 4を使用）

(1) 圧縮強度・弾性係数

コンクリート面より内部側（500～700mm）と表面側（100～250mm）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。

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)
500～700	24.7 (27.0)	12.0 (25.35)
100～250	27.5 (27.0)	8.1 (26.75)

※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

(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。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であることが多いが、今回3.6kg/m³となっている。

表-2 アルカリ含有量の測定値

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

(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。測定値は、表面側、内部側のいずれの値も腐食発生限界値（1.2kg/m³）を大きく下回っている。

表-3 塩化物イオン含有量の測定値

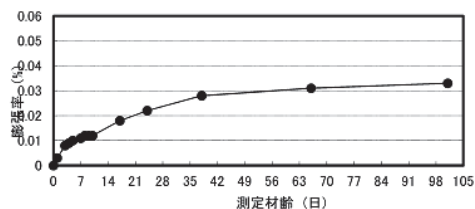
表面からの位置	塩化物イオン含有量
100mm	0.36kg/m ³
800mm	0.28kg/m ³

(4) 膨張量試験

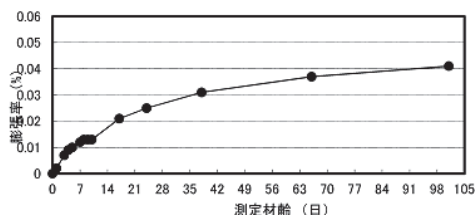
膨張量試験を行った表層側と内部側供試体の試験結果を表-4と図-2に示す。膨張量試験を行ったコアの深さ方向の位置に着目した場合、表層に近い試料の残存膨張量のほうが小さく、内部側の試料の残存膨張量のほうが大きい傾向にある。これは表層に近いコンクリートはひび割れ発生による膨張力解放の影響により残存膨張量としては減少するためであると考えられる。

表-4 膨張試験（JCI-DD2）³⁾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



試料名: コア試料1（表面側）



試料名: コア試料2（内部側）

図-2 圧入前の膨張量試験結果

(5) 岩種調査

供試体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の観察を実施を行った（写真-2参照）。

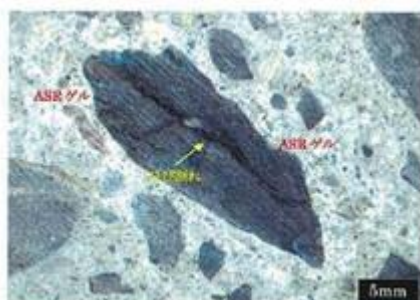


写真-2 安山岩粗骨材のASRゲル写真

粗骨材は、砂利（砂岩・頁岩など）および安山岩砕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。コンクリートには、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。

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いた。

4. RC梁供試体への圧入仕様

亜硝酸リチウムの圧入仕様の設定に際しては、共同研究者が所属する協会の技術資料²⁾（以下、「協会資料」という）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、協会の標準値やアルカリ含有量試験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に示す。

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	標準値
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	

5. RC梁供試体への圧入効果検証と考察

供用下において実際にASR損傷した撤去RC梁を供試体として実施した亜硝酸リチウム内部圧入工

の効果検証と考察を行う。



写真-3 内部圧入孔の削孔状況



写真-4 内部圧入状況

(1) 膨張抑制効果の定量評価

抑制効果を検証するため、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供試体の膨張量の比較を表-6、7及び図-3に示す。表層側、内部側に関わらず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低減しており、亜硝酸リチウム内部圧入に期待される残存膨張量の低減率は表面側で62%、内部側で64%と高く、将来的なASR膨張の可能性を大幅に低減できているものと判断される。

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

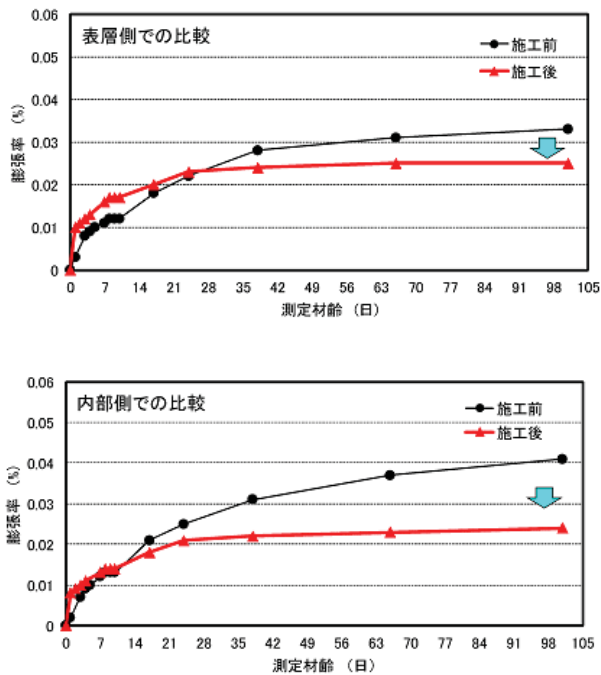


図-3 圧入前後の膨張量試験結果

(2) 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、圧入後の供試体切断面に呈色試薬を噴霧し浸透範囲の確認を行った。その結果、供試体に4孔設けた圧入孔（圧入孔間隔@400mm）からそれぞれ4つの同心円状に浸透し、最終的にそれらが閉合することによって部材全体に亜硝酸リチウムが分布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（写真-5、6参照）。



写真-5 圧入前の供試体切断面

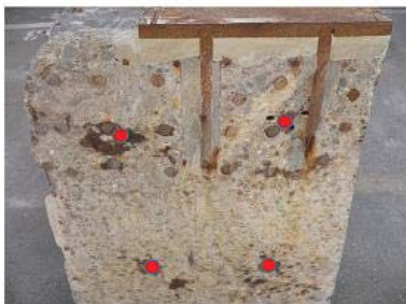


写真-6 圧入後の供試体切断面

(3) 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-4参照）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協会資料²⁾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以上の場合のリチウムイオン含有量 0.36kg/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な圧入が行われていることを確認した（図-4、5、6参照）。

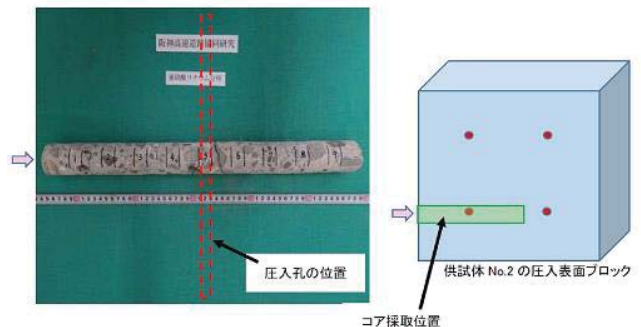


図-4 圧入状況の定量評価のためのコア採取状況

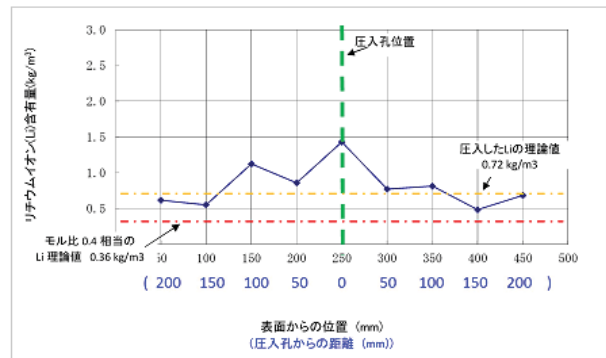


図-5 分析断面におけるリチウムイオンの濃度分布

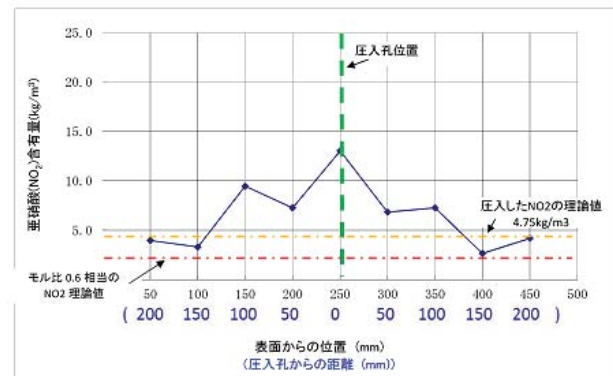


図-6 分析断面における亜硝酸イオンの濃度分布

(4) 表面保護工（F種）との比較

従来より行っているASR対策としての表面保護工との比較を目的として、ASR損傷した撤去RC梁から

得た供試体に表面保護工（F種含侵系）を行い、亜硝酸リチウム圧入供試体とコンタクトゲージによる膨張量の比較を行うものであるが、長期観測項目であり、評価にあたっては数年単位の期間を要すると推察され、今後も引き続き追跡検証を行うこととしている（写真-7参照）。

(5) 表面保護工（F種）との組み合わせによる相乗効果

亜硝酸リチウム圧入後に、ASR対策として従来より行っている表面保護工（F種含侵系）を行った場合の相乗効果を確認するため、圧入後の供試体に表面保護工を行い比較するものであるが、この項目も長期観測項目であり引き続き追跡検証を行うこととしている。

(6) 亜硝酸リチウム部分圧入の有効性検証

通常の亜硝酸リチウムの圧入長は対象コンクリートの全厚に対して行われるが、これを表層からの部分的な圧入（300mm）とした場合の圧入効果を検証するものである。これについても長期観測が必要な項目であり、引き続き追跡検証を行う。



写真-7 圧入後の切り出し供試体の状況

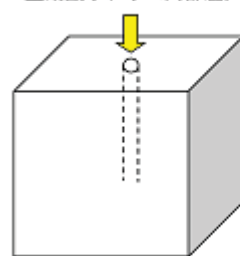
6. 高強度供試体での適応性検証

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。

(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の寸法は500*500*500mmで作成し（図-7参照）、コンクリートの圧縮強度は40N/mm²と50N/mm²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。圧入仕様を表-8に示す。

亜硝酸リチウム内部圧入



供試体寸法
500×500×500mm

図-7 高強度コンクリート供試体

表-8 供試体ごとの圧入仕様

No	供試体 圧縮強度 (N/mm ²)	圧入機 種類	圧力 (MPa)	目標値	
40-1	40	油圧	1.5	設計圧入時間まで	3.2(2)で算出した設計圧入時間でどれだけの量が圧入できるか
40-2				設計圧入量まで	3.2(1)で算出した設計圧入量を全て圧入するのにどれだけの時間を要するか
40-3		電動ポンプ	3.0	設計圧入量まで	電動ポンプ式圧入装置を用いることで設計圧入量を全て圧入することができるか
50-1	50	油圧	2.0	設計圧入時間まで	3.2(2)で算出した設計圧入時間でどれだけの量が圧入できるか
50-2				設計圧入量まで	3.2(1)で算出した設計圧入量を全て圧入するのにどれだけの時間を要するか
50-3		電動ポンプ	3.0	設計圧入量まで	電動ポンプ式圧入装置を用いることで設計圧入量を全て圧入することができるか

(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-9に示す。油圧式圧入装置では圧縮強度40N/mm²と50N/mm²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、高圧力電動ポンプ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、浸透状況を確認したが、全供試体ともコンクリート部材全体への浸透は得られていなかった（写真-8、9参照）。

表-9 高強度供試体への圧入量と圧入時間

No	供試体 圧縮強度 (N/mm ²)	圧入機 種類	圧力 (MPa)	設計値		実測値	
				圧入量 (kg/体)	圧入時間 (h)	圧入量 (kg/体)	圧入時間 (h)
40-1	40	油圧	1.5	1.71	96	0.266	96.0
40-2				1.71	96	0.724	1000
40-3		電動ポンプ	3.0	1.71	42	1.71	77.8
50-1	50	油圧	2.0	1.71	234	0.176	190 ^(注1)
50-2				1.71	234	0.439 ^(注2)	734.1
50-3		電動ポンプ	3.0	1.71	101	1.71	74.4



40N/mm²=1.5MPa



50N/mm²=2.0MPa

写真-8 油圧式圧入装置による圧入

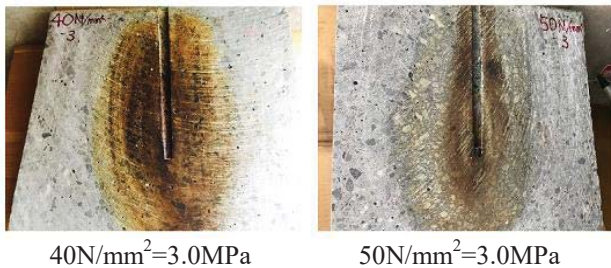


写真-9 電動ポンプ式圧入装置による圧入

参考文献

- 1) 亜硝酸リチウム内部圧入工によるASR補修の適用性に関する研究（阪神高速道路(株)・極東興和(株)）
- 2) アルカリ骨材反応抑制工法ASRリチウム工法技術資料（ASRリチウム工法協会）
- 3) 日本コンクリート工学協会 「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）」

7.まとめ

ASRを発症したRC橋脚においては、亜硝酸リチウム内部圧入によって膨張量の大幅な低下が確認された。ASR橋脚は将来にわたり有害な膨張が継続する可能性があるため、残存膨張量が大きいRC橋脚には抑制対策として亜硝酸リチウム内部圧入が有効に機能すると思われ、大規模修繕事業に組み込んでいくことを考えている。

一方、PC梁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の浸透が得られず、現時点では実構造物への適用性は低いと考えられる。

また、ASRにより多数のひび割れを有しているPC構造物にどれだけの高圧力を掛けることが許されるかなど課題が多いことからPC梁のASR抑制工法については、ASRを有するPC梁の補強方法と合わせて、引き続き検討を進めていく必要がある。