

論文 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

金好 昭彦^{*1}・内田 博之^{*2}・狩野 裕之^{*3}

要旨：リチウムを含むASR抑制剤をコンクリート内部に加圧注入し、コンクリート全体に浸透・拡散させることにより、これまで抜本的な対策方法の無かった大型コンクリート部材でのASRを抑制する工法について、供試体を用いてASR抑制効果の期待できる圧入規模の検討を行った。その結果、圧入孔より抑制剤を0.5～1.0MPaで約1ヶ月～2ヶ月間加圧注入することにより、ASRによる内部膨張を低減させる効果が期待できることを確認した。

キーワード：ASR, 亜硝酸リチウム, 抑制, 大型部材

1. はじめに

日本で最も多く見られるアルカリ骨材反応（以下；AAR）は、コンクリート中のアルカリ金属イオン（ Na^+ , K^+ ）と骨材中の反応性シリカ成分が化学反応を起こし、膨張性のゲル状物質を生成するアルカリ・シリカ反応（以下；ASR）と呼ばれるものであり、この膨張作用により外観上、コンクリート表面に亀甲状あるいは部材拘束方向のひび割れが発生することが多い。ASRを抑制するための補修材料としては、亜硝酸リチウム水溶液あるいは水酸化リチウム水溶液を主成分とする抑制剤があり、フレッシュコンクリート中に混和¹⁾ および硬化コンクリート表面から抑制剤を含浸²⁾ させることにより、リチウムイオンがコンクリート中の反応性骨材の表面に非膨張性の反応性物質を生成し、ASRによる膨張を抑制し³⁾、また、亜硝酸イオンは鉄筋への防錆効果も期待できることが知られている。この抑制剤を使用した従来の補修工法には、対象構造物の表面に抑制剤を塗布し、コンクリートに含浸させる工法、抑制剤を染みこませたシートを張り付ける工法、または、かぶり部分をはつり取り、抑制剤を添加した補修用モルタル

で埋め戻す工法等がある。これらの工法は、いずれもコンクリート表面から内側への濃度勾配による拡散効果およびセメントマトリックスの毛細管現象により抑制剤が含浸・拡散し、コンクリート中の反応性骨材と結びつくことによりASRを抑制することを目的としている。しかし、上述の従来工法では、コンクリート表面から内部に抑制剤が含浸する距離は、コンクリート表面より数cm程度であるのが実状である。実際には橋脚等の部材断面の大きな構造物などでは、コンクリート内部においてもASRが進行し部材表面部のみならず内部においてもひび割れが発生しており⁴⁾、コンクリート強度および弾性係数が著しく低下してきている。さらには、鉄筋がコンクリートの膨張により破断した例もあるとの報告⁵⁾もある。従来工法ではコンクリート表面でのASRは抑制できるが、内部でのASRの抑制は難しいことから、本研究では、大断面部材内部のASR抑制を目的としてASRによるひび割れを有する供試体を用い、その内部より亜硝酸リチウムを主成分とした抑制剤を加圧注入した場合のASRの膨張作用に対する抑制効果について検討を行った。

*1 (株) 鴻池組 土木本部 技術部 工博（正会員）

*2 (株) 鴻池組 土木本部 技術部 工修

*3 (株) 鴻池組 土木本部 技術部 工修

2. 試験概要

2.1 供試体

試験に用いたコンクリート供試体の配合を表-1に示す。細骨材は非反応性の山砂（兵庫県垂水産），粗骨材は非反応性の碎石（兵庫県亀岡産）と反応性骨材として二上山系飛島山産碎石（ガラス質安山岩 $Sc=648m\cdot mol/l$ ， $Rc=238m\cdot mol/l$ ；50％）・長崎産碎石（輝石安山岩 $Sc=548m\cdot mol$ ， $Rc=119m\cdot mol/l$ ；50％）であり，両者を重量比で1：1で混合したものを使用した。なお，等価 Na_2O 量が $8kg/m^3$ になるよう練混ぜ水に $NaCl$ を添加し，アルカリ量を調節した。製作した供試体はRC梁であり，Aタイプ；寸法 $200\times 200\times 1,800mm$ （引張鉄筋比 $p=1.24\%$ ，スターラップ

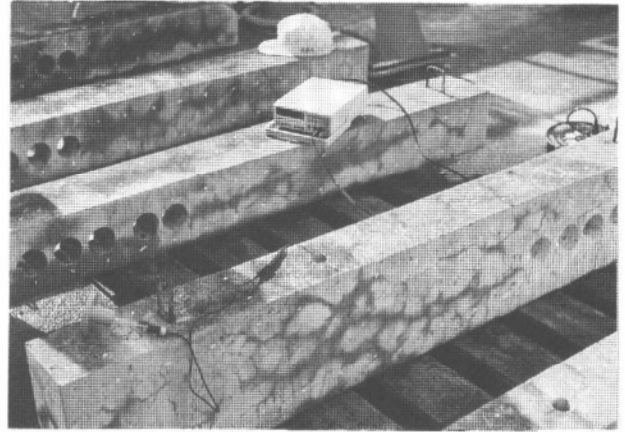


写真-1 供試体（奥：Aタイプ，手前：Bタイプ）

筋比； $P_w=0.71\%$ ），Bタイプ；寸法 $150\times 300\times 1,800mm$ （引張鉄筋比 $p=2.00\%$ ，スターラップ

表-1 コンクリート供試体の配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						等価 Na ₂ O (kg/m ³)
					水 w	セメント C	細骨材 S	粗骨材G		AE 減水剤	
								非反応性	反応性		
20	10±2.5	50	4.0±1.0	44	176	352	761	507.5	507.5	1.056	8.0

反応性骨材混入率；50%

反応性骨材；二上山系飛島山産碎石（ガラス質安山岩）と長崎産碎石（輝石安山岩）の2種類を混合

等価 Na_2O ； $NaCl$ で調整

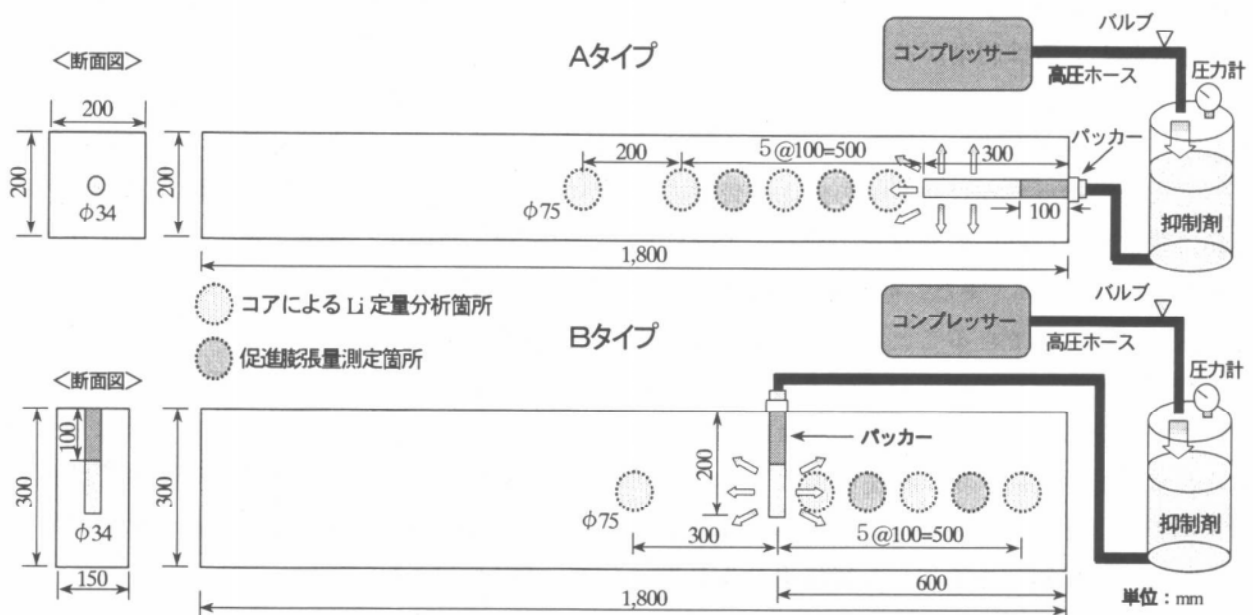


図-1 試験装置（上；Aタイプ，下Bタイプ）

筋比； $P_w=0.28\%$ ）の2種類とした。供試体は平成4年に作製し、材齢7年・屋外暴露7年が経過したものである（写真-1）。また、供試体表面よりの抑制剤の漏出を防ぐために、供試体全面に有機無機複合厚膜型水系塗料を塗布した。

2.2 ASR抑制剤

抑制剤は亜硝酸リチウムを主成分とし、コンクリートへの圧入・浸透・拡散性を阻害しない範囲内で高濃度化（40%重量濃度）した水溶液を使用した。

2.3 試験方法

試験装置を図-1に示す。圧入は $\phi 34\text{mm}$ の孔をAタイプで300mm、Bタイプで200mm削孔し、圧入孔とした。圧入に際しては圧入孔の口で液漏れを防ぐため、図-2に示した中空パッカー（長さ；100mmシングルパッカー）を配置した。パッカーは図中のナットを締め込むことにより、ゴムスリーブを膨張させ最大4.0MPaの注入圧力に耐える構造とした。試験ケースを表-2に示す。圧入パターンは長辺方向圧入（Aタイプ）、短辺方向圧入（Bタイプ）の2パターンとし、各パターンにおいて注入圧力を、低圧・高圧注入工法で一般に設定されている注入圧を基本に0.1、0.5、1.0MPa（低圧注入～高圧注入）の3段階に変化させ試験を行った。必要圧入量としては、供試体アルカリ総量（ Na_2O 換算）2.3%とし、過去の研究報告³⁾をもとに Li^+/Na^+ モル比が1.0（必要リチウム量 1.83kg/m^3 ）となるように抑制剤 34.6kg/m^3 （ 1.80kg/供試体 ）とした。

2.4 試験項目

(1)リチウムイオンの定量分析

浸透・拡散状況の確認を行うため、抑制剤圧入完了後、圧入孔位置から100,300,500,700mm（短辺方向圧入は100,300,500mm）の位置（図-1）よりコンクリートコア（ $\phi 75\text{mm}$ ）を採取し、リチウムイオンの定量分析を行った。また、亜硝酸イオン0.1%以上で明らかな着色が見られる呈色液による呈色試験も行った。

(2)促進膨張試験

ASR抑制効果の確認のため、抑制剤圧入完了

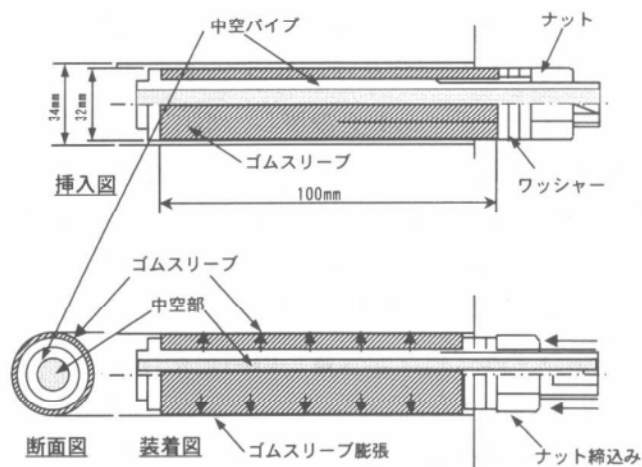


図-2 中空パッカー

表-2 試験ケース一覧

圧入パターン	圧入期間 (ヶ月間)	注入圧力(MPa)			供試体の 種類
		0.1	0.5	1	
長辺方向 圧入	2	A4	A6	A8	Aタイプ
	1	—	A5	—	
短辺方向 圧入	2	—	—	B1	Bタイプ
	1	—	B2	—	

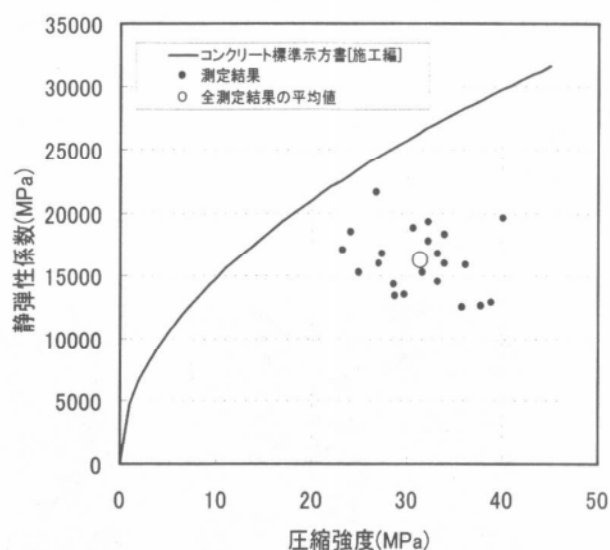


図-3 強度試験結果

後、圧入孔位置から200,400mmの位置（図-1）より採取したコンクリートコア（ $\phi 75\text{mm}$ ）にコンタクトポイントを設置し、ポイント間の変化量を膨張量として測定した。コアの養生条件を 20°C 、RH100%として約4週間程度コアの膨張ひずみ（開放膨張量）を測定し、引続き 40°C 、RH100%で約9週間程度促進養生し、コアの膨張ひずみ（残存膨張量）の測定を行った。

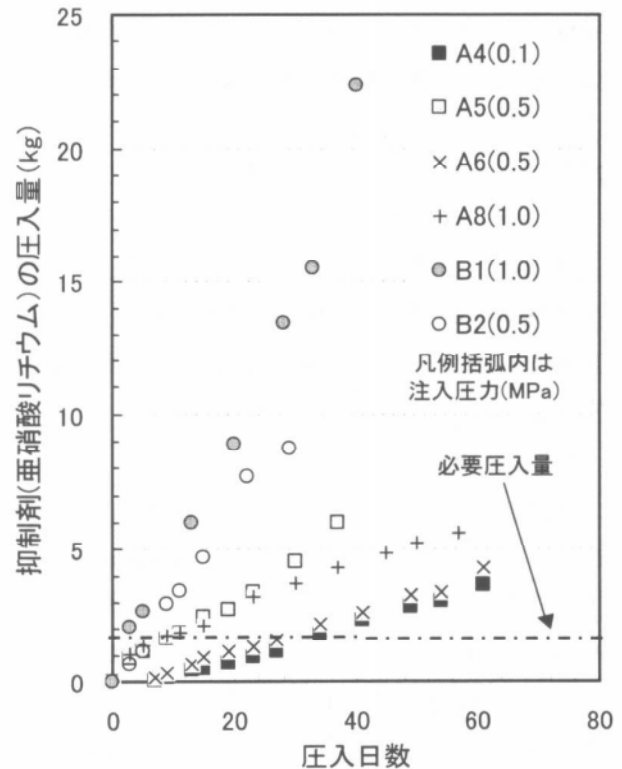
3. 試験結果

3.1 供試体の力学的特性

試験開始前（材齢7年、自然暴露7年）に、各供試体よりコア（ $\phi 75\text{mm}$ ）を採取し、圧縮強度および静弾性係数を測定した結果を図-3に示す。供試体表面にはASRによる亀甲状のひびわれ（ひび割れ幅最大1.0mm）が発生していた。圧縮強度は約30MPaで7年前（材齢28日、40MPa）と比較するとASRにより約10MPa程度強度が低下し、また、健全な圧縮強度30MPaのコンクリートから推定される静弾性係数と比較すると供試体の弾性係数は約60%程度まで低下していた。

3.2 抑制剤の浸透・拡散状況

抑制剤（亜硝酸リチウム水溶液）の圧入量と圧入日数との関係を図-4に示す。Aタイプ（A4,A6,A8タイプ）においては圧入日数2ヶ月経過時点で注入圧力が高い程、浸透・拡散に対して効果があり、注入圧力0.1MPa（A4タイプ）では所定の圧入量を浸透・拡散するのに約40日程度を要した。また、圧入パターンで比較した場合、短辺方向圧入（Bタイプ）の方が、浸透時



間に対しては有効であると考えられる。また、注入圧力1.0MPa（B1タイプ）においては、圧入孔付近より抑制剤の滲み出しが確認された。これは、圧入孔近傍に存在するひび割れがコンクリート表面まで貫通しており、高圧のためコンクリート表面へ浸透したためと考えられる。浸透状況を写真-2に示す。抑制剤の圧入完了後、リチウム定量分析用コアに呈色液を吹き付け、リチウムの浸透・拡散状況を観察したものである。圧入孔から距離が離れるに従い、浸透量が低減していることが認められたが、内部のひび割れを通じて圧入孔から500mm程度の位置ま

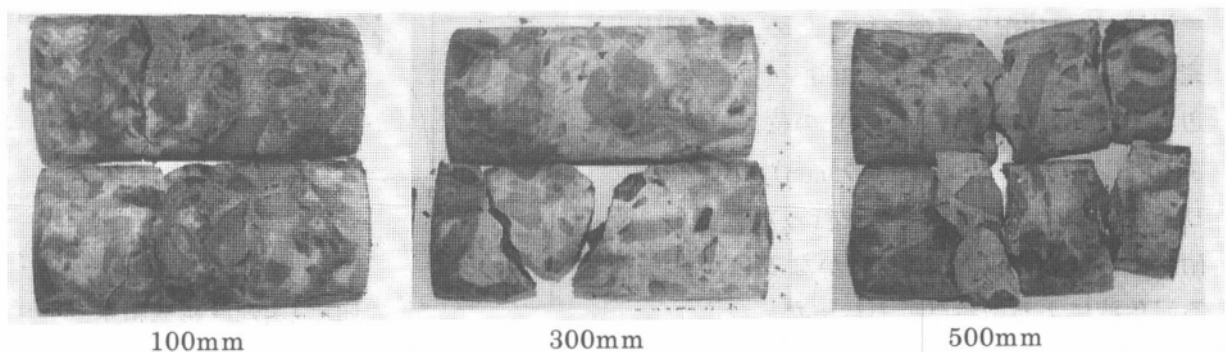


写真-2 浸透状況（呈色状況）；B2（注入圧力=0.5MPa）

では浸透していることが確認された。

3.3 リチウム定量分析結果

各タイプでのリチウム含有量と圧入孔位置からの距離（浸透距離）の関係を図-5に示す。リチウム含有量は圧入孔から離れるに従い、減少する傾向を示した。また、Aタイプにおいて注入圧力が高い程、浸透・拡散性が大きくなっているが、注入圧力0.5MPa（A5タイプ）と1.0MPa（A8タイプ）との間には明らかな差異は見られなかった。Bタイプにおいて1.0MPaのB1タイプの効果が現れていないのは、抑制剤の漏出が原因と考えられる。本供試体での必要リチウム量（ 1.83kg/m^3 , Li^+/Na^+ モル比1.0）を満足する浸透距離は、注入圧力0.5MPaで比較した場合、A5タイプで約150mm、B2タイプで約300mmに達する事が確認された。しかし、一般構造物（単位セメント量 300kg/m^3 ）として、アルカリ総量（ Na_2O 換算）をセメント量の1%重量濃度と想定した場合、必要リチウム量は 0.68kg/m^3 となり、図-5に示したように、浸透距離はA5タイプで約200mm、B2タイプで約600mm程度までは浸透

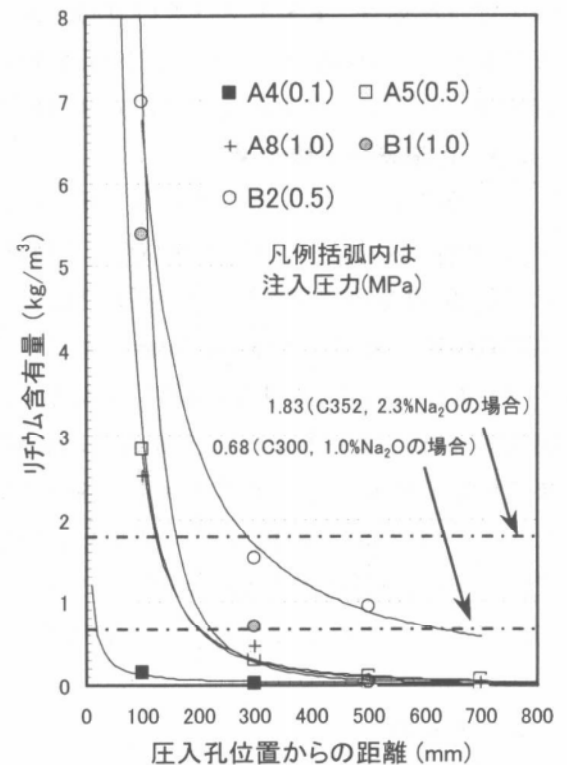


図-5 リチウム含有量と圧入孔位置からの距離（浸透距離）の関係

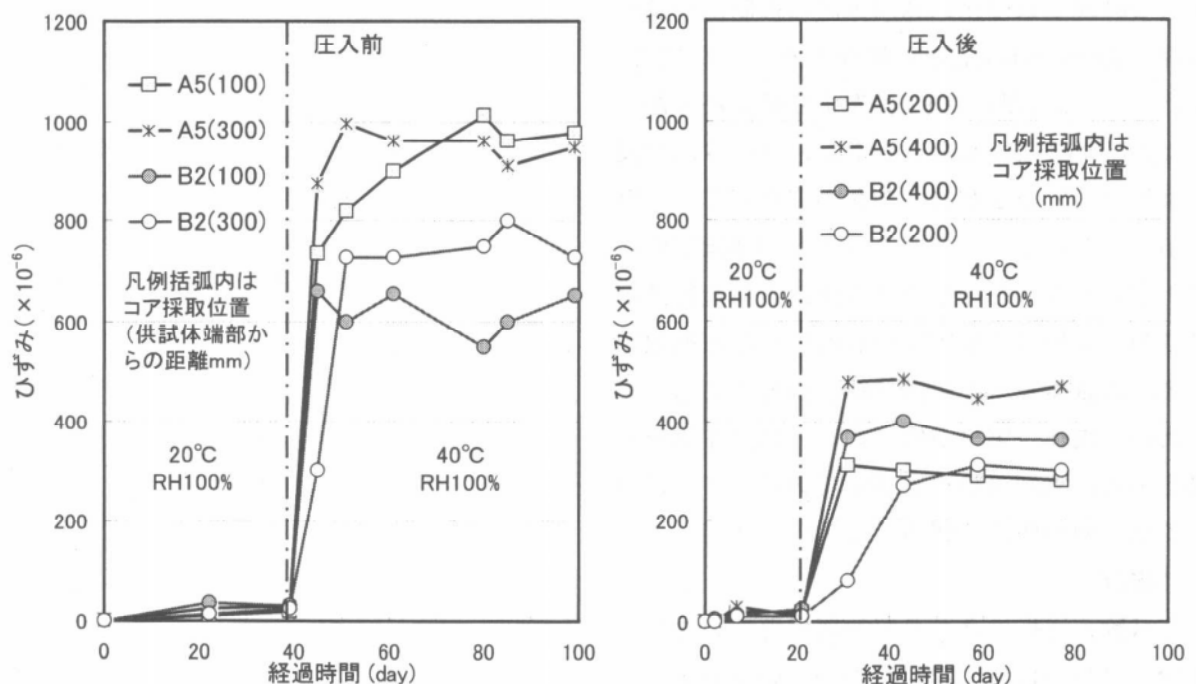


図-6 促進膨張試験結果

可能と考えられる。また、圧入パターンでの比較を行った場合、Bタイプ（短辺方向圧入）の方がAタイプ（長辺方向圧入）より約2倍程度浸透距離に対して効果があることが確認された。

3.4 促進膨張試験結果

圧入後のコンクリート供試体から圧入孔より200, 400mmの位置でコアを採取し、開放膨張量・残存膨張量の測定を行った。図-6に示す促進膨張試験結果（注入圧力0.5MPa）より、各タイプとも圧入孔に近い程抑制効果が大きく、抑制剤の圧入によりASRによる膨張が約1/2程度まで抑制されることが確認された。各位置でのモル比（ Li^+/Na^+ ）はB2タイプが200mmの位置で1.5, 400mmの位置で0.7, A5タイプが200mmの位置で0.3, 400mmの位置で0.1であった。

4. まとめ

本研究では、今回の限定された条件のもとでASRにより劣化した供試体を用い、その内部に亜硝酸リチウムを主成分とする抑制剤を圧入することにより、ASR抑制効果が期待できる圧入規模の検討を行った。その結果、圧入孔（φ34mm）を用い、抑制剤を0.5MPaで1～2ヶ月、圧入を継続すれば圧入孔周方向に抑制剤の浸透距離が約300～600mm迄確保することができ、また、コア膨張量の約1/2程度まで低減が可能であることが確認された。しかし、リチウムの浸透条件としてひび割れの存在が重要であり、ひび割れからの浸透でコンクリート内部まで直接リチウムイオンを供給できるが、実構造物内部ひび割れ規模の不確実性や長期にわたる拡散効果等、供試体レベルでは確認が困難である。このため、現在、実構造物において供試体試験結果をもとに実証試験を実施中である。これについては、別の機会に報告する予定である。

【謝辞】

本試験の遂行にあたり終始御指導頂いた京都大学大学院 宮川豊章教授、また、御協力頂いた（株）大阪防水建設社、大日本塗料（株）、三興塗料（株）の各社に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M.D.A.Thomas, et al.: Use of Lithium-Containing Compounds to Control Expansion in Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.783-792, Jun.2000
- 2) David B.Stoks, et al.: Development of A Lithium-Based Material for Decreasing ASR-Induced Expansion in Hardened Concrete, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1079-1087, Jun.2000
- 3) 高倉・坂口・友沢・阿部: Li化合物によるアルカリ骨材反応の膨張抑制に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, PP.761-766, 1988
- 4) 小野紘一・田口守: AAR橋脚の長期挙動と内部劣化, 第53回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部, PP.192-193, 1998.10
- 5) 土木学会, コンクリート標準示方書〔維持管理編〕制定資料, PP.75, 2001.1