

論文

亜硝酸リチウム圧入によって補修した ASR 劣化部材の耐荷性能に関する実験的研究

高木 雄介^{*1}, 福嶋 孝啓^{*1}, 大畑 卓也^{*2}, 小林 孝一^{*3}, 六郷 恵哲^{*3}

An Experimental Study on the Mechanical Performance of ASR-Deteriorated RC Member Repaired by Lithium Nitrite Injection

Yusuke TAKAGI^{*1}, Takahiro FUKUSHIMA^{*1}, Takuya OHATA^{*2},
Koichi KOBAYASHI^{*3} and Keitetsu ROKUGO^{*3}

要旨：本研究では、ASRによるコンクリートの膨張量を2水準設定し、それぞれに達した時点で亜硝酸リチウム圧入による補修を実施。膨張抑制効果の劣化程度による違い、また、耐荷性能への影響について検討を行った。リチウム圧入した供試体では膨張が収束しており、膨張抑制効果が確認された。円柱供試体の圧縮試験より、圧入を行わなかった供試体と比較し静弾性係数の増大が見られ、はり部材のASRによる曲げ剛性の低下の緩和が確認されたが、はり部材の力学特性に対する顕著な影響は確認できなかった。

キーワード：ASR, 亜硝酸リチウム圧入, 補修, 耐荷性能

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応(以下、ASR)によるコンクリート構造物の劣化が問題となっている。ASR劣化によるコンクリートの強度、静弾性係数の低下や、隅角部での鉄筋破断が構造性能に深刻な問題を及ぼす可能性がある。しかし、これに対する有効な対策方法が見出されていないのが現状である。そのような中、ASRの補修工法の一つとして亜硝酸リチウムを圧入することにより、膨張を抑制させるASRリチウム工法が注目されている。¹⁾²⁾

本研究では、ASR劣化した供試体に対して亜硝酸リチウム圧入を適用し、主に力学的性能について検討を行うこととした。またリチウムを圧入する時のASRによる劣化度が異なることが、その後の性能に影響を及ぼすかを検討するため、劣化程度の異なる供試体に圧入を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は57%として、普通骨材を用いた普通コンクリート(以下、NC)、細骨材および粗骨材の両方に反応性骨材を用いたASRコンクリート(以下、ASR)の2種類を用いた。ASRコンクリートは細骨材のうち70%を北海道産の安山岩の砕砂である反応性骨材とし、粗骨材のうち50%を北海道産の安山岩の碎石である反応性骨材とした。この混合比率は、福嶋らの研究³⁾で最も大きい膨張を示したペシマム比率である。また、コンクリート中の等価アルカリ量が 12kg/m^3 となるようにNaClを添加した。

リチウム圧入に使用した材料について、以下に示す。ASR抑制剤は亜硝酸リチウム40%水溶液を使用した。ひび割れ注入材は、適用ひび割

*1 岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 博士前期課程

*2 岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 博士後期課程

*3 岐阜大学工学部社会基盤工学科 教授

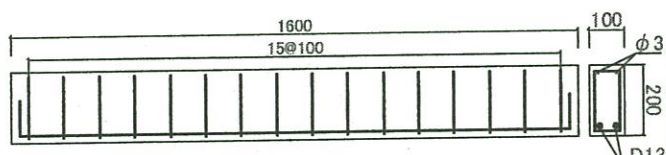


図-1 供試体概要図 (mm) 有効高さ 177.5mm
劣化小圧入時

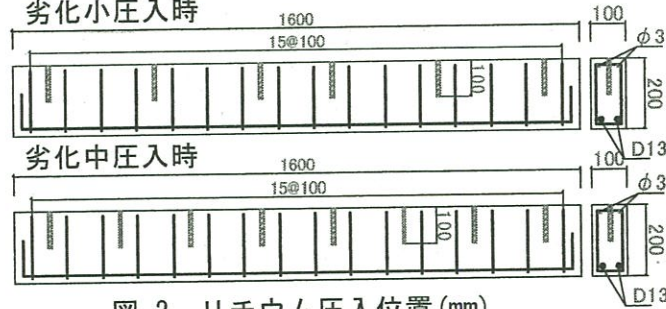


図-2 リチウム圧入位置 (mm)



図-3 プラグ取り付け位置 (mm)

表-1 供試体一覧

供試体名	供試体番号	劣化の有無	圧入時期	載荷時期
NC	1,2	なし	なし	打設後28日
劣化あり リチウムなし	1,2 3,4 5~12	あり	なし	促進81日
				促進147日
				—
劣化小 リチウムあり	1,2 3,4 5,6		促進81日目 約2000 μ	促進147日
				促進249日
				—
劣化中 リチウムあり	1,2 3,4 5,6		促進147日目 約4000 μ	促進249日
				—

れ幅 0.2~0.5mm のセメント系注入材とし、表面漏出防止材としてポリマーセメントモルタルを使用した。

2.2 供試体概要

供試体の寸法を図-1 に示す。引張側鉄筋に 2-D13($f_y=390$)、せん断補強筋には D6 鉄筋を配筋し、せん断スパン比 a/d を 3.10 として、曲げ引張破壊が先行するように設定した。

普通コンクリート(NC)供試体を比較用として2体作製し、打設28日後に載荷試験を行った。ASR 供試体は24体作製し、リチウム圧入の時期を劣化度により、リチウム圧入を実施しないものも含めると3種類設定した。ASR 供試体はすべて打設28日後に劣化促進室(温度 35~40℃、湿度 100%)に静置し、劣化促進を開始した。

表-1 に供試体一覧を示す。過去の同様の骨材、配合を用いた研究成果により鉛直膨張量が 6000 μ 程度に達すると予測されたため、劣化の程度を小(2000 μ 程度)、中(4000 μ 程度)、大(6000 μ 程度)となった時にリチウム圧入を実施することとした。なお、劣化大についてはリチウム圧入、載荷を未実施で ASR の促進を継続している。促進 81 日目(膨張量 2000 付近の時点)に、“劣化小リチウムあり”へのリチウム圧入を行った。また、比較用に“劣化ありリチウムなし”2体の載荷試験を行った。“劣化小リチウムあり”については、リチウム圧入後再び促進室に戻し、再度 ASR 促進を行った。

次に、促進 147 日目(“劣化ありリチウムなし”

の膨張量が 4000 μ 付近の時点)に、“劣化中リチウムあり”へのリチウム圧入と、“劣化ありリチウムなし”および“劣化小リチウムあり”のうち各2体の載荷試験を行った。

促進日 249 日目に各劣化程度におけるリチウム圧入後の耐荷性能への影響を確認するため、“劣化小リチウムあり”と“劣化中リチウムあり”各2本の載荷を行った。

なお、全ての劣化度に対して $\phi 100\text{mm} \times \text{H}200\text{mm}$ の円柱供試体を3本ずつ作製し、梁供試体と同条件下で促進させ、梁の載荷試験と同時期に圧縮試験を行った。

2.3 リチウム圧入手順

圧入する亜硝酸リチウムはコンクリート中の Li/Na モル比が 0.8 となる量とし、圧入施工時のリチウム圧入量および圧入時間の算定では、ASR リチウム工法協会の基準書²⁾に準拠した。まず、圧入したリチウムが表面に漏出するのを防止するために、幅 0.2mm 以上のひび割れに、ひび割れ注入材を注入し、リチウム表面漏出防止材として供試体全面にポリマーセメントモルタルを厚さ 2mm で被覆した。次にリチウム圧入のための $\phi 10 \times 100\text{mm}$ の圧入孔を削孔した。

圧入孔の位置を図-2(図中斜線が圧入孔)に示す。そして、注入圧力を 5MPa に設定し、コンクリート内にリチウムを供給した。円柱供試体は打設時上面に同様に $\phi 10 \times 100\text{mm}$ の圧入孔を削孔して圧入を行った。なお、梁供試体劣化小の段階でリチウム圧入を実施した際に、リチ

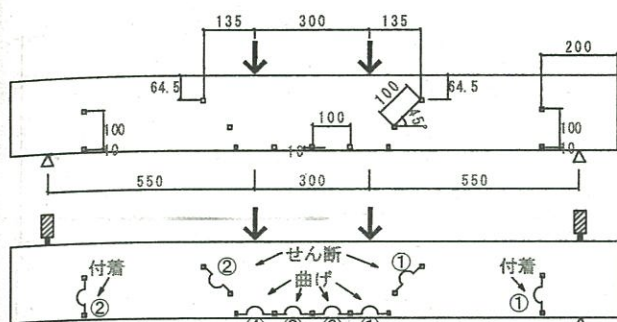


図-4 π型ゲージ設置位置(mm)

ウム圧入に要した時間が長かったため、劣化中では圧入孔を増やした。

2.4 膨張量測定

膨張量測定を行うために埋め込んだコンタクトゲージ用プラグの位置を図-3に示す。プラグは供試体側面に埋め込み、端部から200mmの地点より片面8ヶ所にプラグを埋め込んだ。鉛直方向は100mm、供試体軸方向は200mmを基長とし、供試体軸方向の上面側2ヶ所(区間1, 3)下面側2ヶ所(区間2, 4)および鉛直方向4ヶ所(区間5~8)、計8ヶ所で長さ変化を測定し、各供試体の膨張量の経時変化を調査した。なお、各測定箇所において膨張の変化量に差があるため、本研究では劣化度の判定の際に鉛直方向の膨張量を用いた。円柱供試体も同様に180°正対する側面2ヶ所に基長100mmでプラグを埋設し、膨張量を測定した。

2.5 曲げ載荷試験

リチウム圧入を実施した梁、円柱供試体は、載荷の直前に圧入孔を市販の無収縮グラウト材1袋(25kg)当たり水4.3ℓで練混ぜ、埋め戻した。

曲げ載荷試験は、等モーメントスパン300mm、せん断スパン550mmの2点載荷とし、変位は高感度変位計により、支点位置2ヶ所、荷重載荷位置2ヶ所およびその中点、計5ヶ所で計測した。また、ひび割れ幅の計測のためのπ型ゲージを、曲げひび割れが発生すると想定した4ヶ所、せん断ひび割れが発生すると想定した2ヶ所、主鉄筋位置での付着割裂ひび割れが発生すると想定した2ヶ所に設置した。図-4にπ型ゲージの設置位置を示す。

表-2 はり供試体膨張量

供試体名		最終膨張量(μ)			リチウム圧入	測定時期
		鉛直方向	軸方向上側	軸方向下側		
劣化あり リチウムなし	1	2125	2728	1050	無し	促進81日
	2	1998	2725	1013		
	3	3728	5145	1818		
	4	3650	5713	1920	無し	促進147日
	5	4303	7310	2043		
	6	4555	5753	2248		
	7	3808	6155	1318	無し	促進247日*
	8	3963	6350	2013		
	9	3593	5428	1730		
	10	3045	4893	1708		
	11	3923	4660	1893		
	12	3945	5053	1820		
劣化小 リチウムあり	1	2243	3563	1548	促進81日目約2000μ	促進147日
	2	2623	5048	1278		
	3	2720	4555	1820	促進81日目約2000μ	促進249日
	4	2900	3950	1318		
	5	3510	4603	1563	促進81日目約2000μ	促進249日*
	6	4395	4830	1828		
劣化中 リチウムあり	1	4293	5873	2245	促進147日目約4000μ	促進249日
	2	4325	5995	1813		
	3	5068	6743	2283	促進147日目約4000μ	促進249日*
	4	4840	5743	1888		
	5	4955	5343	2005		
	6	3658	5293	2068		
*は載荷未実施						

*は載荷未実施

3. 実験結果および考察

3.1 膨張量

はり供試体の載荷直前の膨張量の測定結果一覧を表-2に示す。また、表中の「軸方向上側」の値は図-3における区間1, 3の膨張量の平均値、「軸方向下側」の値は区間2, 4の平均値、「鉛直方向」の値は区間5~8の平均値となっている。それぞれの値のプラスは膨張を表す。

表-2より、各供試体を比較すると2000μ時にリチウム圧入を行った載荷を行っていない供試体の膨張量は、4000μ時に圧入を行った供試体の膨張量よりも小さく、リチウムによる膨張の抑制が見られる。一方、リチウム圧入を行っていない供試体は行った供試体より膨張量が小さい。本研究では、ASR供試体を24体作製し、すべて同時に促進を開始した。その後、定期的に膨張量測定を行い、第1回リチウム圧入時の目標膨張量である2000μ付近に、先に到達した供試体6体に対しリチウム圧入を実施した。次の第2回リチウム圧入時についても同じく、先に膨張量が4000μ付近に達した供試体6体にリチウム圧入を実施したため、結果的に比較的膨張量の小さかった供試体が残ったと考えられる。

図-5に円柱供試体の膨張量の変化を示す。図中の長鎖線は左からそれぞれ“劣化小リチウムあり”と“劣化中リチウムあり”に対するリチ

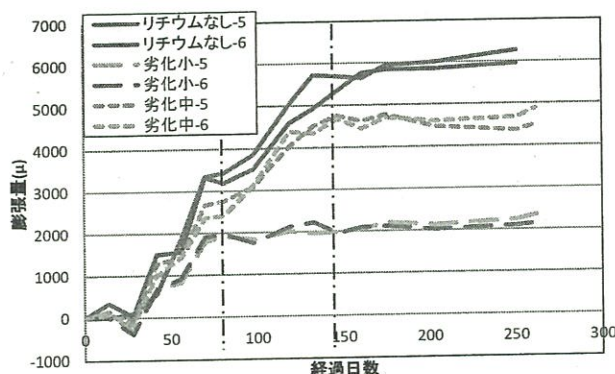


図-5 円柱供試体膨張量変化

ウム圧入時期を表す。個体差が少ない円柱供試体の膨張量を比較すると、リチウム圧入をしていない供試体は膨張が 6000 μ 程度まで達したのに対し、2000 μ 時、4000 μ 時にリチウムを圧入した供試体はそれぞれ圧入直後に収束傾向にある。このことからリチウムによって ASR 膨張が十分に抑制されていることが確認された。

一方、同様に、図-6 にはり供試体の鉛直方向(区間 5~8)の膨張量の経時変化を示す。円柱供試体の場合と比較すると、リチウム圧入の実施の有無や適用の時期が膨張の進展に与える影響は小さい。これは鉄筋による拘束の影響があること、また、円柱供試体と比較して、一つの圧入孔でカバーするコンクリート中の体積が大きいことから、リチウムのコンクリート中への浸透にばらつきが生じたものと考えられる。しかし、圧入により膨張が抑制される傾向は見られる。

3.2 圧縮強度試験

円柱供試体の圧縮強度試験を、各パターン 3 体ずつ行い、その結果を表-3 に示す。なお、グラウトの断面積と強度に対しては、今回の試験では考慮をしていない。

“リチウム圧入なし”については、促進 81 日目の圧縮強度は劣化前と比べてほぼ同じであるが、ASR 劣化により静弾性係数が 7 割程度低下している。促進 147 日目では圧縮強度が 3 割程度低下し、静弾性係数もさらに低下している。しかし、促進 81 日目(2000 μ 付近)にリチウム圧入を行った供試体では促進 147 日目でも圧縮強度は維持され、静弾性係数の低下率も 4 割程度に留まった。さらに劣化させた促進 249 日目の圧

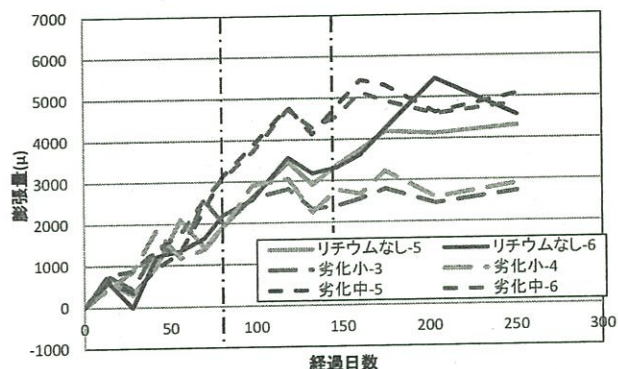


図-6 はり供試体膨張量変化

表-3 圧縮試験結果

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	圧入時期	載荷時期
NC	37.8	28.8	なし	打設後28日
劣化あり リチウムなし	32.7	28.8	なし	劣化前
	31.6	8.4		促進81日
	25.3	7.1		促進147日
劣化小 リチウムあり	31.9	15.7	促進81日目	促進147日
	27.3	18.7	約2000 μ	促進249日
劣化中 リチウムあり	23.0	9.1	促進147日目 約4000 μ	促進249日

縮試験では、圧縮強度の若干の低下は見られるものの静弾性係数では低下することはなかった。

以上より、リチウム圧入によって圧縮強度は十分に、静弾性係数はある程度、低下が抑制されるという結果が得られ、補修による効果を確認することができた。また、2000 μ 時にリチウム圧入した供試体“劣化小リチウムあり”については、リチウム圧入により、圧入時の力学的特性がそのまま維持され、リチウム圧入無しの供試体の促進日数 81 日の時点と同等の物性が得られることを予想していた。しかし、圧縮強度はほぼ同等であるが、静弾性係数についてはリチウムを圧入した供試体の値が上回る結果となった。さらに、促進 249 日目ではさらに静弾性係数の増加が確認された。これは、リチウムによってゲルが改質された効果によって静弾性係数が増加した可能性もあるが、リチウム圧入時に、その表面漏出防止を目的としてひび割れ注入を実施したことも原因と考えられるため、今後の検討課題としたい。

3.3 曲げ載荷試験

はり部材の曲げ載荷試験時の最大荷重および曲げ剛性の計算値および実験値を表-4 に、荷重-たわみ関係の実験値を図-7、図-8 に示す。表

-4の計算値は、表-3に示したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数より、等価応力ブロックを用いて求めた。

また、梁中の鉄筋は発錆が生じているが、本実験では錆の考慮はしていない。

3.2で述べたように圧縮強度は約3割程度低下していた。曲げ載荷試験でも同様にASRによる若干の耐力の低下が見られるが、低下率は1割程度でありそれほど大きくはない。はりの耐力にコンクリートの強度が及ぼす影響がそれほど大きくないため、コンクリートの強度がASRによって大きく低下してもはり自体の耐力には影響が小さいのである。

普通コンクリート供試体や、比較的劣化の少ない供試体はたわみ15mm程度で圧壊が生じ、荷重の急激な低下が見られるのに対して、ASRが進行したものは急激な低下は見られない。これはASRによって生じたひび割れが多数存在し、これらが載荷によって徐々に開口し、急激な圧壊が生じにくかったためであると考えられる。

また、現時点ではリチウムを圧入したことによるRCはり部材の耐力性能への影響は殆ど見

られない。圧縮試験の結果から、リチウム圧入によってその後のASRの進展が抑制され、コンクリートの強度がある程度維持されていることが分かったが、促進期間も短い為、劣化が大きく進行してから再度調査をする必要がある。

一方、部材の曲げ剛性のうち、ひび割れ発生時までの曲げ剛性の計算値を次式にて求めた。

$$EI = E_c \cdot I_g \quad (1)$$

ここで、 E_c ：圧縮試験から求めた静弾性係数、 I_g ：コンクリートの全断面を有効とした時の断面二次モーメント。

また、引張鉄筋降伏時の曲げ剛性の計算値は、次式にて求めた。

$$EI = E_c \cdot I_{cr} \quad (2)$$

ここで、 E_c ：圧縮試験から求めた静弾性係数、 I_{cr} ：引張域のコンクリートを無視したひび割れ断面の断面二次モーメント。

一方、部材の曲げ載荷試験の結果から、曲げ剛性の実験値を次式に求めた。なお、本来は部材内で断面剛性は一定ではなく、特に本研究の場合のようにASRが生じて膨張ひび割れが多数発生している場合にはさらにそのばらつきは大きい、ここでは簡易的に一定として求めている。

$$EI = \frac{Pa}{24\delta_{max}}(3l^2 - 4a^2) \quad (3)$$

ここで、 P ：載荷点1つにかかる荷重、 l ：スパン長、 a ：支点から載荷点までの距離、 δ_{max} ：スパン中央のたわみ。

また、実験値から求める曲げ剛性のうちの載荷初期の値については、NC供試体では曲げ載

表-4 曲げ載荷試験結果

供試体名	供試体番号	計算値			実験値			破壊性状
		最大荷重(kN)	曲げ剛性(kN/m ²) 初期	降伏時	最大荷重(kN)	曲げ剛性(kN/m ²) 初期	降伏時	
NC	1	58.0	2199	903	61.6	1398	592	曲げ破壊
	2							曲げ破壊
劣化あり リチウムなし	1	56.9	794	583	58.6	753	602	曲げ破壊
	2							曲げ破壊
	3							曲げ破壊
	4							曲げ破壊
劣化小 リチウムあり	1	57.0	1308	749	59.3	1452	713	曲げ破壊
	2							曲げ破壊
	3							曲げ破壊
	4							曲げ破壊
劣化中 リチウムあり	1	54.4	844	604	53.4	956	694	曲げ破壊
	2							曲げ破壊

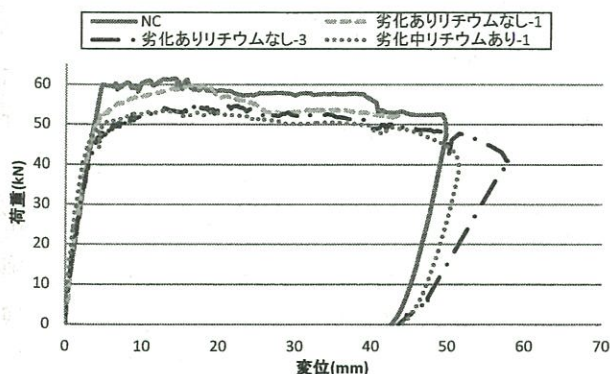


図-7 曲げ載荷試験結果-1

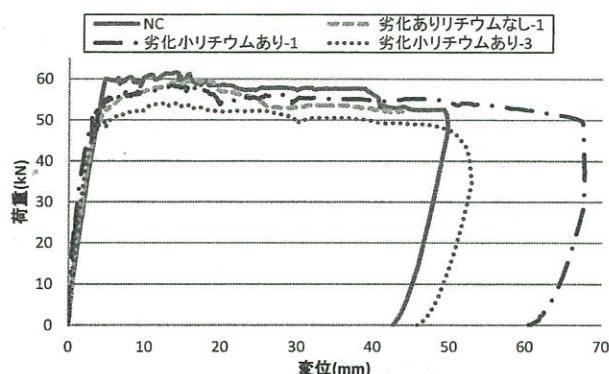


図-8 曲げ載荷試験結果-2

荷中のひび割れ発生時における荷重および変位を用いて算出したが、ASR 供試体では劣化によるひび割れが載荷前から生じており、 π ゲージによる測定結果からも曲げひび割れ発生点が不明瞭である。そこで図-7、図-8における載荷初期のグラフの傾きの変曲点(約 10kN 程度)の荷重と変位を用いて曲げ剛性を算出した。

耐荷力とは異なり、曲げ剛性には ASR の影響が大きいことが表-4 から明らかである。

実験値の曲げ剛性を比較してみると、促進 147 日目に載荷した“劣化ありリチウムなし”の 3, 4 では、引張鉄筋降伏時の値が低下していることがわかる。次に“劣化小リチウムあり”1~4 では、載荷初期では NC とほぼ同等の値を示し、引張鉄筋降伏時ではばらつきはあるものの、リチウム圧入していない供試体よりも高い値となった。“劣化中リチウムあり”の供試体も同様に“劣化小リチウムあり”の供試体よりも低い値になっているが圧入を行っていない供試体よりも高い値となっている。

ASR による静弾性係数の低下を考慮して計算した曲げ剛性が実験結果の傾向をよく再現していることから、上記のような ASR やリチウム圧入の部材剛性への影響は、主にコンクリートの物性の変化によるもの、と推察される。リチウムの効果によってゲルが改質された効果による影響、圧入孔に充填したグラウト材の強度や弾性係数がコンクリートよりも高いことや、充填したグラウト材がひび割れに侵入し、劣化した供試体が再び一体性を持ち、部材の剛性が回復したと考えた。

4. まとめ

本研究では、ASR 劣化した RC 部材に亜硝酸リチウム圧入を行い、再度 ASR 促進環境下に一定期間置き、その後載荷試験を行うことで、圧入後における部材の耐荷性能を評価することを目的とした。反応性骨材を用いた供試体を ASR 促進させ、膨張量を基準とした劣化度によってリチウムの圧入時期および載荷時期を分けた。

また、劣化の大きい供試体に対してもリチウム圧入を行い、この補修方法による膨張抑制効果について検討を行った。本研究より得られた結論を以下に示す。

1) 膨張量

- ・リチウム圧入を行った供試体では膨張が収束している傾向にあり、リチウム圧入による効果が見られた。

2) コンクリートの物性

- ・リチウム圧入によって圧縮強度および静弾性係数の低下を軽減できた。
- ・リチウムを圧入した供試体では、リチウムによってゲルが改質された効果によって静弾性係数が増加した可能性がある。
- ・グラウト材がひび割れに侵入したことにより、部材の剛性が回復した。

3) はり部材の物性

- ・曲げ剛性の計算値、実験値ともに、リチウムの供給がなく膨張が大きい“リチウムなし 劣化あり”の値が特に低下していた。
- ・リチウム圧入工を実施することで剛性の低下が緩和され、補修の効果を確認したが耐荷性能には大きな影響は見られなかった。

本研究のように、劣化が大きく進行してからリチウム圧入を実施した検討例はなく、各供試体の膨張量や耐荷性能の評価を、今後もある必要があると考える。

参考文献

- 1) 江良和徳：リチウムイオン内部圧入による ASR 抑制効果に関する研究，京都大学 博士論文，2010.3
- 2) 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 2012 月 4 月 1 日改訂。
- 3) 福嶋孝啓，小林孝一，六郷恵哲：ASR 劣化した RC 部材のせん断耐荷性能および後施工型鉄筋によるせん断補強効果に関する検討，アップグレード論文報告書，第 12 巻，pp.1042-1049，2012。