

ASR 劣化した RC 部材に対するリチウム圧入工法の影響

高木 雄介^{*1}, 恩田 尚明^{*2}, 六郷 恵哲^{*3}, 小林 孝一^{*3}

Influence of Lithium Nitrite Injection on ASR-Deteriorated RC Member

Yusuke TAKAGI^{*1}, Naoaki ONDA^{*2}, Keitetsu ROKUGO^{*3} and Koichi KOBAYASHI^{*3}

要旨: 本研究では, ASR 劣化した供試体に補修の目的で亜硝酸リチウム圧入を実施した. 最大で 1 年以上経過観察を行い, リチウム圧入実施時の劣化程度の違いによる膨張抑制効果の違い, 耐荷性能への影響, 圧入の際に行う表面被覆の影響, 注入用の削孔位置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, 膨張抑制効果が 1 年後も確認された. また, ひび割れ注入や表面被覆は部材の耐荷性能に影響を与えると考えられるが, それらの影響は顕著ではなく, すくなくとも悪影響は与えないといえる.

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 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. 膨張への対策としては, ASR の劣化因子の一つである水に着目し, 外部からの水分供給を遮断することを目的とした表面被覆等の補修が施されることが多いが, 水分供給を完全に止めることは難しく, 再劣化が生じる構造物も多い. そのような中, 近年では亜硝酸リチウムを構造物の内部に圧入する補修工法が注目されてきている. これは, ASR の生じた構造物に亜硝酸リチウムを加圧注入 (以下, リチウム圧入とする) してコンクリート内部に浸透させることにより, ASR による膨張を抑制する手法である.¹⁾

著者らの研究²⁾では, リチウム圧入により ASR に起因するはり部材の剛性低下が緩和され, 補修が部材の耐荷性能に悪影響を及ぼさないことを確認した. これらの結果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の低下が抑制されたことが原因の可能性もあるが, 一方, リチウム圧入に際して併用した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可能性, リチウム圧入時に行う表面被覆の影響の可能性も指摘された.

本研究では, 既報²⁾よりさらに 1 年後の部材の物性の変化について検討するとともに, 表面被覆の影響を考慮するため, 載荷前にリチウム圧入を行わず

表面被覆のみを行った供試体を作製した. また, 既報²⁾と同様にはり上面から削孔を行った場合に加え, はり下面から削孔を行った場合も検討した. これは, 実際に構造物に適用する際に, 部材下面に対して下から施工する場合があり, 上面削孔では削孔位置に圧縮力が作用するのに対し, 下面には引張力が作用するため, 削孔位置による影響を考慮する必要があると考えたためである.

2. 実験概要²⁾

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, ASR 無害と判定された骨材のみ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 コンクリートの 2 種類を用いた. ASR コンクリートは細骨材のうち 70%, 粗骨材のうち 50% を北海道産の安山岩の砕砂, 砕石である反応性骨材とし, ASR 無害骨材と混合した. この混合比率は, 福岡らの研究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.

ASR 抑制剤として圧入するリチウム化合物は, 国内での使用実績が最も多い亜硝酸リチウム (LiNO_2) を使用し, コンクリート中への浸透性が阻害されない範囲で最も高濃度である 40% 水溶液とした. ひび割れ注入材は, 適用ひび割れ幅 0.2~0.5mm のセメント系注入材, 表面漏出防止材にはポリマーセメン

*1 岐阜大学大学院工学研究科生産開発システム工学専攻 博士後期課程

*2 岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 博士前期課程

*3 岐阜大学工学部社会基盤工学科 教授

表-1 供試体一覧

供試体名	供試体番号	劣化	圧入時期	載荷時期
NC	N-1,2	なし	なし	打設 28 日後
補修なし	A-1,2	あり	なし	促進 81 日目
	A-3,4			促進 147 日目
	A-5,6			促進 513 日目
	A-7,8			—
上面削孔	B-1,2	あり	なし	促進 513 日目
下面削孔	C-1,2			—
劣化小 リチウムあり	D-1,2		促進 81 日目 約 2000 μ	促進 147 日目
	D-3,4			促進 249 日目
	D-5,6			促進 513 日目
劣化大 リチウムあり	E-1,2	あり	促進 147 日目 約 4000 μ	促進 249 日目
	E-3,4			促進 513 日目
	E-5,6			—

トモルタルを用いた。リチウム圧入のために削孔跡を充填するグラウト材には、非金属骨材系高性能無収縮グラウト材を用いた。

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 ($f_y=390\text{N/mm}^2$)、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、リチウム圧入を実施しないものも含めると、リチウム圧入の時期を劣化度により 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。同様の骨材、配合を用いた研究成果²⁾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、劣化の程度が小（2000 μ 程度）、大（4000 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。前者は劣化促進 81 日目、後者は 147 日目である。供試体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。

その後、表-1 に記す時点で載荷試験を実施した。また、表面被覆が部材の力学的特性に与える影響を考慮するため、載荷前にリチウム圧入を行わないものの、それにとまう表面被覆と削孔等のみを行った供試体を 4 体準備した。この内の 2 体は、下面から削孔し、修復することを模擬した。

全ての劣化度に対して $\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$ の円柱供試体を 3 本ずつ作製し、はり供試体と同条件下で促進させ、はり部材の載荷試験と同時期に圧縮試験を行った。

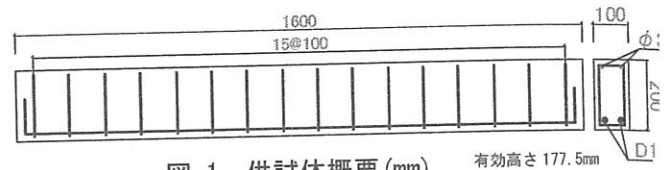


図-1 供試体概要 (mm)

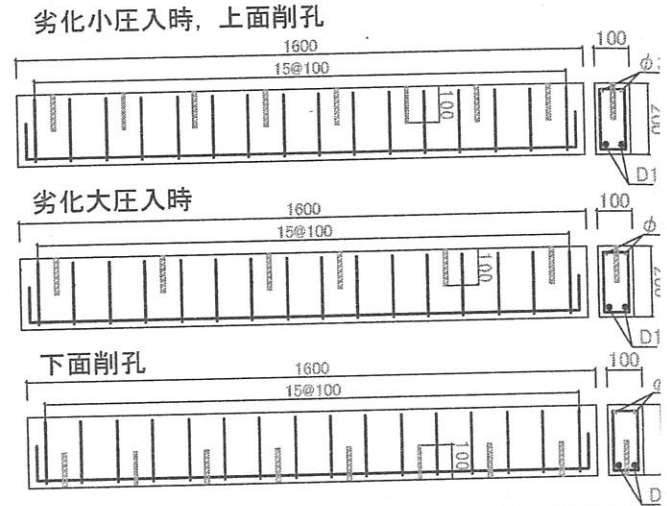


図-2 供試体概要 (mm)

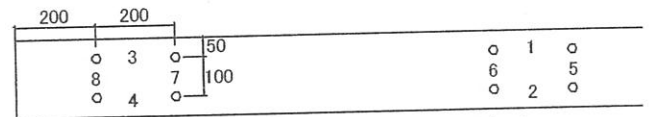


図-3 プラグ取り付け位置 (mm)

なお、さらに長期劣化させた場合の耐荷性能を評価するため、“補修なし”の 2 本（供試体番号 A-7, 8）と“劣化大”の 2 本（供試体番号 D-5, 6）については ASR 促進を継続中である。

2.3 リチウム圧入の手順

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、リチウムが圧入時に部材表面から漏出することを防止するために供試体全面にポリマーセメントモルタルを厚さ 2mm で表面被覆した。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。供試体“上面削孔”“下面削孔”は、以上の工程のみ劣化促進終了後の載荷直前に実施した。

劣化小と劣化大に対しては、注入圧力を 5MPa に設定し、コンクリート内に亜硝酸リチウムを供給した。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は、ASR リチウム工法協会の基準書⁴⁾に準拠した。“劣化小”には圧入孔を 8 ヶ所、“劣化大”には圧入孔を 6 ヶ所設けた。これは、8 ヶ所の削孔で圧入が実施できることが確認でき、次の圧入時には削孔と圧入作業の省力を図ったためである。

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。通常であれば圧入完了後に、圧入孔を無収縮グラウト材にて埋め戻す必要がある。しかし、本研究ではリチウム圧入後に再度 ASR 促進を行い、リチウムによる膨張抑制効果を評価するため、圧入孔をそのままにし、圧入後の再度の ASR 促進中にもコンクリート内に水の供給を行えるようにした。その後、載荷試験直前に無収縮グラウトで充填した。

2.4 膨張量測定

図-3 に膨張量測定を行うためのプラグの位置を示す。プラグを供試体側面の片面 8ヶ所に埋め込んだ。鉛直方向は 100mm、供試体軸方向は 200mm を基長とし、供試体軸方向の上側 2ヶ所 (区間 1, 3)、下側 2ヶ所 (区間 2, 4)、および供試体軸直角方向 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。

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はり部材、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にて埋め戻した。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。

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。なお、現段階で載荷を未実施のものについても劣化促進 513 日の時点の値を示す。

同じ促進日数の供試体同士を比較すると、2000 μ 時に圧入を行った劣化小の供試体と圧入を行わなかった供試体では、促進 147 日目では若干の差しか見られなかったが、513 日目においては軸方向上側では約 2500 μ 程度差が生じており、リチウムによる膨張の抑制が見られる。

図-4 に円柱供試体の膨張量の変化を示す。図中の垂直の一点鎖線は“劣化小リチウムあり”と“劣化大リチウムあり”に対するリチウム圧入時期を表す。約 550 日程度経過した現在でもリチウムによる膨張

表-2 はり供試体膨張量

供試体名		膨張量(μ)			圧入時期	促進日数
		鉛直方向	軸方向上側	軸方向下側		
補修なし	A-1	1998	2725	1013	なし	81 日間
	A-2	2125	2728	1050		147 日間
	A-3	3728	5145	1818		
	A-4	3650	5713	1920		513 日間
	A-5	4865	9685	2975		
	A-6	5185	7233	2888		
	A-7	6475	9115	3105		
	A-8	5250	9293	3083		
上面削孔	B-1	5450	7648	1980	なし	513 日間
	B-2	5310	7503	2375		
下面削孔	C-1	4013	8078	2835		513 日間
	C-2	5640	7085	2705		
劣化小 リチウムあり	D-1	2243	3563	1548	促進 81 日目 約 2000 μ	147 日間
	D-2	2623	5048	1278		249 日間
	D-3	2970	4405	1633		
	D-4	2898	3943	1278		513 日間
	D-5	4220	5833	2075		
	D-6	4965	6853	2443		
劣化大 リチウムあり	E-1	4180	5820	2138	促進 147 日目 約 4000 μ	249 日間
	E-2	4385	6043	1860		513 日間
	E-3	4743	6330	2443		
	E-4	3405	6225	2816		
	E-5	4433	7393	2563		
	E-6	4905	6593	2538		

抑制効果が継続している。

一方、同様に、図-5 にはり供試体の膨張量の鉛直方向の経時変化を示す。先に示したように膨張が抑制される傾向が見られるが、“劣化小”では若干の膨張が認められる。実際に促進 513 日目の載荷前には“劣化小”供試体の表面被覆にひび割れが生じていた。リチウム圧入時に表面被覆を行っているため、ひび割れはリチウム圧入後に発生したことになる。これは、はり供試体では円柱供試体に比べ体積が大きいために、リチウムが供試体の隅々まで到達しにくく、抑制効果が低下したものと考えられる。ただし、リチウム圧入を実施しなかった供試体の膨張量変化と比較すると、少なくとも膨張を緩和する効果は認められた。また、上面・下面削孔供試体は、被覆を行ってから再劣化をさせていないため、膨張量の比較は行っていない。

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、その平均値を表-3 に示す。いくつかの供試体パターンについては、膨張量測定用の埋め込みプラグを用いていないものを用いているが、プラグを埋め込んだ供試体の方が埋め込んでいないものよりも

圧縮強度、静弾性係数が約15%小さいことが分かる。また、表面被覆を行った供試体とそうでない供試体を比較すると表面被覆によって圧縮強度は1割、静弾性係数は4割程度大きい。ただし、供試体間のばらつきが大きく、膨張によって不均一な変形が生じ、コンクリートの物性を正確に反映していない可能性はある。

リチウム圧入を実施していない供試体については、促進513日目になると圧縮強度は6割程度、静弾性係数は4割程度まで低下している。しかし、リチウム圧入を行った供試体では、強度がリチウム圧入以降、促進513日目までは低下していないことが確認できる。先に示した表面被覆の圧縮強度の影響を考慮してもリチウム圧入によって圧縮強度は低下が抑制されるという結論が得られ、補修による効果を確認することができた。

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実験値および計算値を表-4に、荷重-たわみ関係の実験値を図-6～図-9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および等価応力ブロックを用いて求めた。また、はり部材の鉄筋は発錆しているが、計算においては

鉄筋の物性の変化は考慮していない。部材の実験値の曲げ剛性には次式を使用した。²⁾

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。

$$EI = \frac{Pa}{24\delta_{\max}}(3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

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, $\delta_{\max}$: はり中央のたわみ。

図-6に示す“補修なし”供試体の荷重たわみ曲線、あるいは表-4の結果によると、ASR劣化することによる耐力の低下は小さかった。ただし、NCでたわみ17mm程度の時点で生じたようなコンクリート圧壊にともなう荷重の急激な低下はASR供試体では見られない。これは、ASRが生じた場合には、載荷前から無数の膨張ひび割れが生じているため急激な圧壊が生じなかったこと、また、コンクリートの終局ひずみがASRにより大幅に増加していること、などによる。

一方、図-7に促進147日目に曲げ載荷試験を行った供試体の荷重たわみ曲線を、図-8に促進513日目に曲げ載荷試験を行った供試体の荷重たわみ曲線を

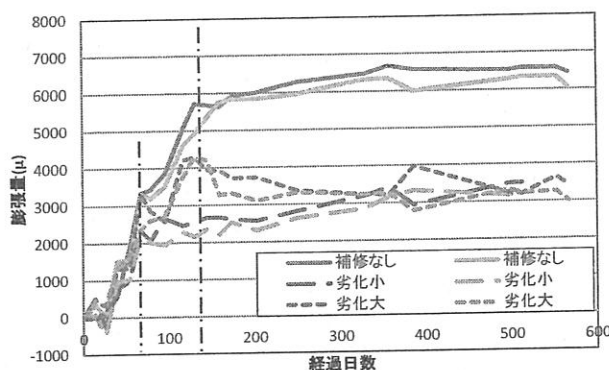


図-4 円柱供試体膨張量変化

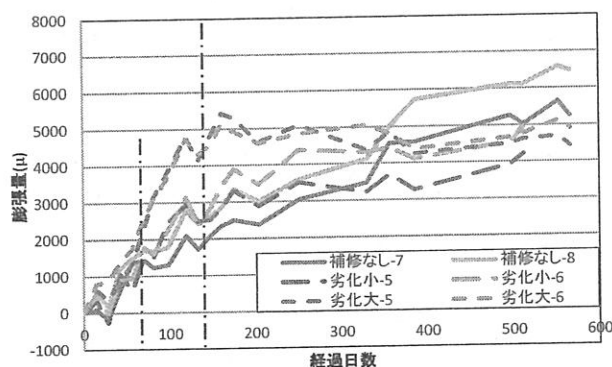


図-5 はり供試体膨張量変化(鉛直方向)

表-3 圧縮強度試験結果

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	圧入時期	膨張量測定用 プラグ	削孔	表面 被覆	載荷時期
NC	37.8	28.8	なし	なし	なし	なし	打設28日後
補修なし	32.7	28.8	なし	あり	なし	なし	劣化前
	31.6	8.4					促進81日目
	25.3	7.1					促進147日目
	20.9	11.9					促進513日目
	24.2	13.7		なし	あり	あり	促進513日目
	22.4	11.5					促進513日目
	24.5	16.2					促進513日目
劣化小 リチウムあり	31.9	15.7	促進81日目 約2000μ	あり	あり	あり	促進147日目
	27.3	18.7					促進249日目
	27.7	16.4					促進513日目
劣化大 リチウムあり	23.0	9.1	促進147日目 約4000μ	あり	あり	あり	促進249日目
	26.8	17.1					促進513日目

表-4 曲げ載荷試験結果及び計算値

供試体名		計算値			実験値			破壊性状
		最大荷重 (kN)	曲げ剛性(kN・m ²)		最大荷重 (kN)	曲げ剛性(kN・m ²)		
			初期 (全断面有効)	降伏時 (引張側無視)		初期※	降伏時	
NC	N-1	58.0	2199	903	61.5	1398	499	曲げ破壊
	N-2				61.6	874	686	曲げ破壊
補修なし	A-1	56.9	794	583	59.9	614	596	曲げ破壊
	A-2				57.3	892	608	曲げ破壊
	A-3	55.2	697	539	55.8	899	552	曲げ破壊
	A-4				55.0	756	511	曲げ破壊
	A-5	54.8	1170	713	57.1	723	549	曲げ破壊
	A-6				58.1	1363	671	曲げ破壊
	上面削孔	B-1	54.9	1343	757	56.8	1049	577
B-2		60.8				952	687	曲げ破壊
下面削孔	C-1	54.9	1343	757	57.8	854	612	曲げ破壊
	C-2				58.8	1104	629	曲げ破壊
劣化小 リチウムあり	D-1	57.0	1308	749	59.8	1219	698	曲げ破壊
	D-2				58.8	1684	727	曲げ破壊
	D-3	55.8	1514	794	54.0	836	663	曲げ破壊
	D-4				53.5	1474	724	曲げ破壊
	D-5	56.0	1357	760	57.9	922	755	曲げ破壊
	D-6				58.3	1331	723	曲げ破壊
劣化大 リチウムあり	E-1	54.4	844	604	53.5	884	659	曲げ破壊
	E-2				53.3	1028	729	曲げ破壊
	E-3	55.7	1405	771	57.7	1331	665	曲げ破壊
	E-4				58.3	707	602	曲げ破壊

※NC は曲げひび割れ発生まで、NC 以外は、荷重 10kN までの曲げ剛性とした。²⁾

示す。劣化促進 81 日目にリチウム圧入を実施した“劣化小-1”と“劣化小-5”の結果を比較しても耐荷力の低下はないと考えられる。しかし、この影響がリチウムによる劣化抑制効果が保持されている効果とは断言できないため、さらに長期劣化させた場合の耐荷性能を評価する必要がある。また、既報²⁾の結論より、リチウムを劣化が進んだ段階で圧入した供試体では、膨張そのものは収束傾向にあったが、耐荷力が減少した。と示したが、“劣化大”供試体を見るとそのような傾向は見られず、早期に注入を行った“劣化小”供試体と同等の耐荷性能を示した。

表-4 より注入時の耐荷性能である“補修なし-3, 4”の値と比較しても“劣化小”同様に注入時の性能を保持していることが分かる。

図-9 に示すように、上面・下面削孔を行った供試体間での荷重たわみ関係ではほとんど差が見られない。下面削孔した場合には、曲げ載荷時に削孔位置からひび割れが生じて発達し、耐荷性状に影響を与えることを懸念したが、コンクリートと無収縮グラウトとの間の付着は強固で、両者の界面からひび割

れが生じることはなかった。これは、はり供試体そのものが ASR によって予め劣化し、ひび割れが生じていたため、削孔の影響よりも先に ASR でのひび割れが進行したためだと考えられる。このことから削孔方向の違いによる影響は無視できるという結論を得られた。

“上面削孔”“下面削孔”の供試体と“補修なし”の供試体の促進 513 日目の値（補修なし-5）を比較すると最大荷重に大きな差は見られないが、荷重たわみ曲線を比較すると、“補修なし”供試体では降伏後、暫く右上がりに荷重が増加し、最大荷重に達している。すなわち、リチウム圧入を実施しない場合には上記のように圧壊が不明瞭となる傾向があるのに対し、リチウム圧入を実施しなくとも、ひび割れ注入や表面被覆を実施した供試体は、たわみ 10mm 程度で最大荷重に達し、その後徐々に荷重が低下している。これは、ひび割れ注入や表面被覆によって部材の一体性が回復された影響と考えられる。

したがって、ASR 劣化したはり部材にリチウム圧入による補修を実施した場合には、反応の進行を抑

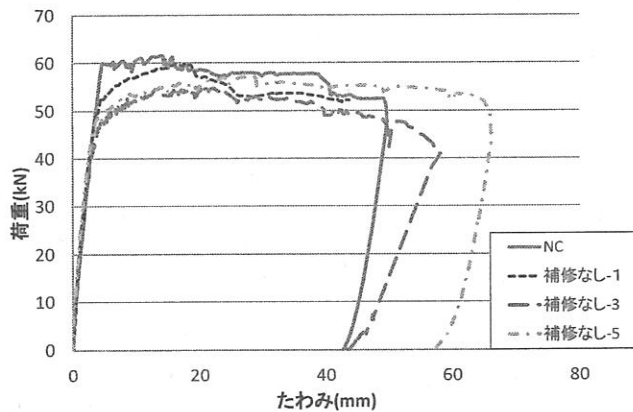


図-6 曲げ載荷試験結果(補修なし)

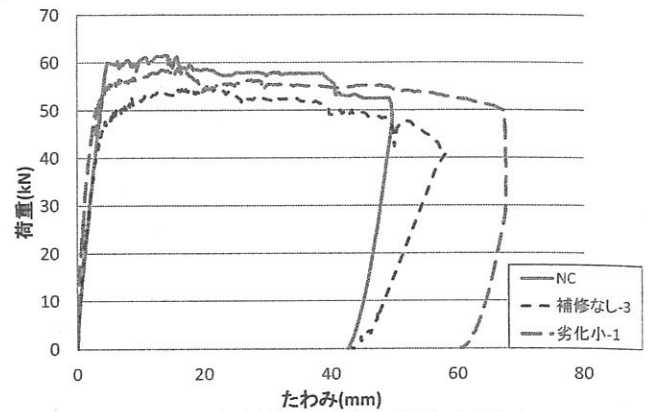


図-7 曲げ載荷試験結果(147 日)

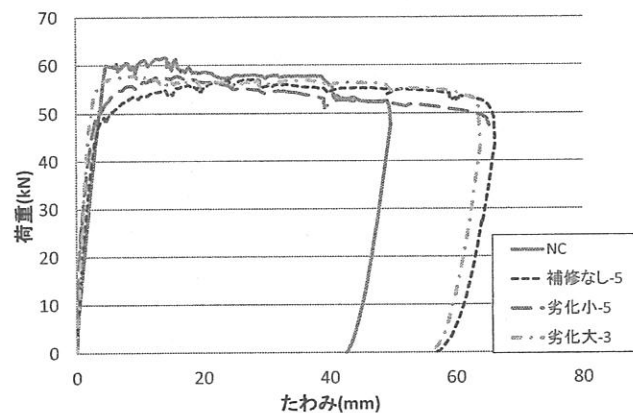


図-8 曲げ載荷試験結果(513 日)

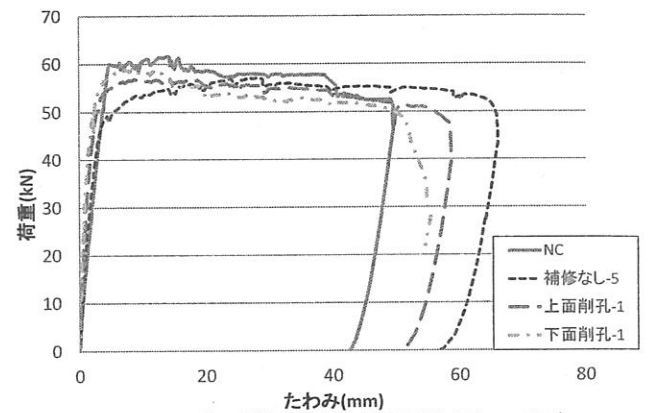


図-9 曲げ載荷試験結果(上面・下面)

制するという本来の効果に加え、補修にともなう附帯工も、部材の耐荷性能に影響を与えられが、それらの影響は顕著ではなく、すくなくとも悪影響は与えないといえる。

4. まとめ

本研究では、ASR 劣化した RC 部材にリチウム圧入を行い、再度 ASR 促進環境下に長期間置き、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。また、表面被覆や削孔等、補修施工の影響を考慮するため、これらを行い、リチウム圧入は実施しなかった供試体についても検討した。本研究より得られた結論を以下に示す。

- ・ 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、513 日経過した現在でもリチウム圧入による膨張抑制効果がみられた。リチウム圧入を行うことで劣化の段階に拘わらず、部材の性能を保持することができる傾向が見られた。
- ・ ひび割れ注入や表面被覆によって部材の一体性が回復し、部材の耐荷性能に影響を与え、リチウムによる劣化抑制効果と相まって作用する。

謝辞

本研究の実施にあたっては、極東興和(株)の江良和徳氏をはじめとする ASR リチウム工法協会の諸氏にご指導、ご協力頂きました。ここに記し、謝意を表します。

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) 高木雄介，福嶋孝啓，大畑卓也，小林孝一，六郷恵哲：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，アップグレード論文報告書，第 14 巻，pp.61-66，2014.
- 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.
- 4) 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。