

ASR 劣化した RC 部材の耐荷性能およびその補修の効果に関する検討

破壊診断工学研究室 福嶋 孝啓

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。劣化が進行すれば、コンクリートの強度・静弾性係数の低下や鉄筋破断などへと繋がり、構造物の安全性が損なわれるが、ASR 劣化構造物に対する有効な補修方法が見出されていないのが現状である。そこで、本研究は、ASR 劣化によるコンクリートへのひび割れや鉄筋破断が、RC 部材の耐荷性能に与える影響を明らかにすること、また、劣化した部材に対する補修の効果について検討を行うことを目的とした。本概要では、論文の第3章である、ASR 劣化した RC 部材の亜硝酸リチウム内部圧入後の性能評価について記すこととする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

反応性骨材を用いた ASR コンクリートと、比較対象とする普通コンクリート（以下、NC）で供試体を作製した。どちらも普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 57%とした。ASR コンクリートには、反応を促進するため等価アルカリ量（ Na_2O 換算）が 12kg/m^3 となるように NaCl を添加した。

リチウム内部圧入施工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、適用ひび割れ幅 0.2~0.5mm のセメント系注入材とし、表面漏出防止材にはアロンカチオクリート（ポリマーセメントモルタル）を使用した。内部圧入のための掘削孔を充填する際には、グラウト材であるマスターフロー870 を用いた。

2.2 供試体概要

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 3 段階に分けた（表-2.1）。また、載荷時期を 3 回に分け 2 体ずつ載荷するため、各劣化度でそれぞれ 6 体ずつ準備した。ASR 供試体はすべて打設 28 日後に劣化促進を開始した。圧入および載荷の時期については図-2.1 を用いて説明する。促進 81 日目（膨張量 2000μ 付近の時点）に、“劣化小リチウムあり”へのリチウム圧入と、“リチウムなし 劣化あり”へのリチウム圧入と、“リチウムなし 劣化あり” 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（“リチウムなし劣化あり”の膨張量が 4000μ 付近の時点）に、“劣化中リ

チウムあり”へのリチウム圧入と、“リチウムなし劣化あり”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。なお、現段階（促進 161 日目）では 6000μ まで膨張が進行せず、劣化大についてはリチウム圧入を行えていない。そのため、劣化促進 147 日目までの実験を行った。

作製した供試体の寸法を図-2.2 に、リチウム圧入時の削孔位置を図-2.3（図中赤色が掘削孔）に示す。引張側鉄筋に 2-D13（SD345）、せん断補強筋には D6 鉄筋を配筋し、せん断支間比を 3.10 とした。

2.3 リチウム圧入施工手順

圧入する亜硝酸リチウムは 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¹⁾に準拠した。まず、表面漏出防止工として、幅 0.2mm 以上のひび割れに、ひび割れ注入材を注入し、全面をポリマーセメントモルタルにより被覆した。次に、直径 10mm、深さ 100mm の圧入孔を削孔した。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。（写真-2.1）

2.4 試験方法

2.4.1 ASR 促進、膨張量測定

供試体を劣化促進室（温度 $35\sim 40^\circ\text{C}$ 、湿度 100%）に静置し、劣化促進を行った。膨張量測定については、片面 8ヶ所にプラグを埋め込み（図-2.4）、上面側 2ヶ所、下面側 2ヶ所および鉛直方向に 4ヶ所で、2週間おきに長さ変化を測定し、膨張量の経時変化を観察した。なお、各測定箇所において差があるため、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。

2.4.2 曲げ載荷試験

等モーメントスパン 300mm、せん断スパン 550mm の 2 点載荷とし、計測項目は、荷重、変位、ひび割れ幅とした。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、せん断ひび割れ、付着ひび割れが発生すると想定した箇所に設置した。

表-2.1 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28日後	
リチウムなし 劣化あり	1.2	あり	なし	促進81日目	
	3.4			促進147日目	
	5.6			—	
劣化小 リチウムあり	1.2			促進81日目	促進147日目
	3.4				—
	5.6				—
劣化中 リチウムあり	1.2		促進147日目	—	
	3.4			—	
	5.6			—	
劣化大 リチウムあり	1.2	—	—		
	3.4				
	5.6				

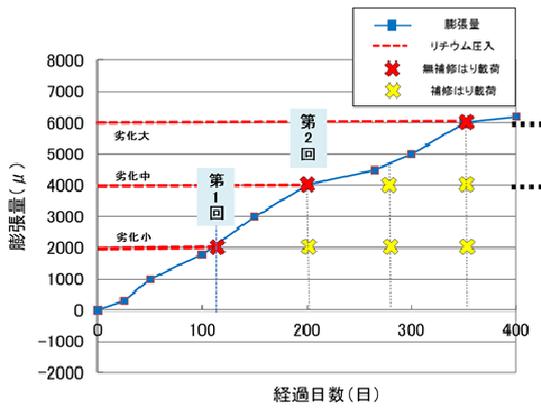


図-2.1 圧入および载荷時期のイメージ



写真-2.1 リチウム圧入状況

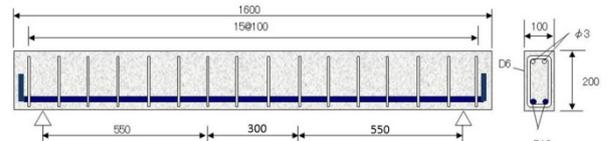
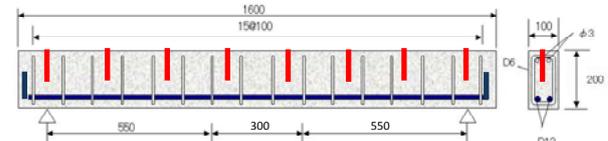
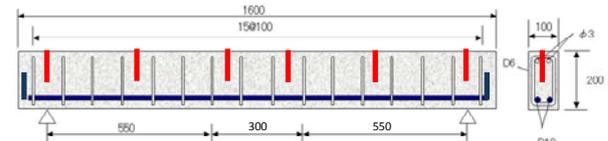


図-2.2 供試体概要図 (単位:mm)



(a) “劣化小 リチウムあり”の場合



(b) “劣化中 リチウムあり”の場合

図-2.3 掘削孔位置 (単位:mm)

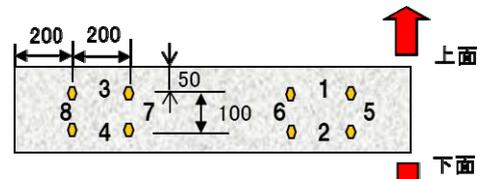


図-2.4 プラグ埋め込み位置 (単位:mm)

3. 実験結果および考察

3.1 膨張量

はり部材の膨張量測定結果一覧を表-3.1に、膨張量の経時変化(鉛直方向のみ)を図-3.1に示す(赤線はリチウム圧入を実施した時期)。曲げ载荷試験を行った供試体は、試験を行う直前に測定した膨張量の値とした。(※“劣化大 リチウムあり”の測定結果も載せてあるが、前述したように、こちらについてはリチウム圧入を実施していない。)

表-3.1や図-3.1において、促進81日目と161日目の膨張量の値を比べると、リチウム圧入を行っていない供試体では、鉛直方向で1187 μ 、軸方向上側で1795 μ 、軸方向下側で637 μ 膨張しているのに対し、促進81日目に圧入を行った“劣化小リチウムあり”の膨張量はやや小さく、鉛直方向では1131 μ 、軸方向上側では769 μ 、軸方向下側では387 μ であり、ほとんどの供試体が収束傾向を示している。圧入後に若干の膨張はあるが、供試体が大きいため、リチウムがコンクリート内部でシリカ骨材と十分に反応するのに時間を要したことが要因であると考えた。次に、“劣化中リチウムあり”における促進81日目と161日目の値を比べると、鉛直方向で1995 μ 、軸方向上側で1907 μ 、軸方向下側で357 μ 膨張していた。上述のように、リチウム圧入を実施していない供試体と“劣化小リチウムあり”では大きな差は認められなかったが、“劣化中リチウムあり”では大きく膨張している。これは、本研究の進め方と大きな関連があると考えた。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2000 μ 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4000 μ 付近に達した供試体6体にリチウム圧入を実施した。測定結果から、リチウム圧入を実施していない供試体は、膨張量の進行が収束しつつある。このことから、単に促進期間を延ばせば膨張が進行するのではなく、劣化促進開始後初期における膨張が大きく出る場合、長期的に膨張が大きくなる可能性が高いと推察した。よって、“劣化小リチウムあり”は初期膨張が大きかったものであり、大きな膨張を示す可能性の高い供試体であったと言えるため、今回の結果から、ASR膨張を十分に抑制出来たとと言える。

3.2 圧縮強度試験

はり部材と同様の劣化促進を行った $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体の圧縮強度試験を、各パターン3体ずつ行ったので、その結果を表-3.2に示す。

“リチウムなし 劣化あり”については、促進81日目で“リチウムなし 劣化なし”と比べ圧縮強度はほぼ同じであるが、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日目にリチウム圧入を行った“劣化小 リチウムあり”では圧縮強度を維持し、静弾性係数の低下率も4割程度に留まった。以上より、リチウム圧入によって圧縮強度においては十分に、静弾性係数においてはある程度、性能

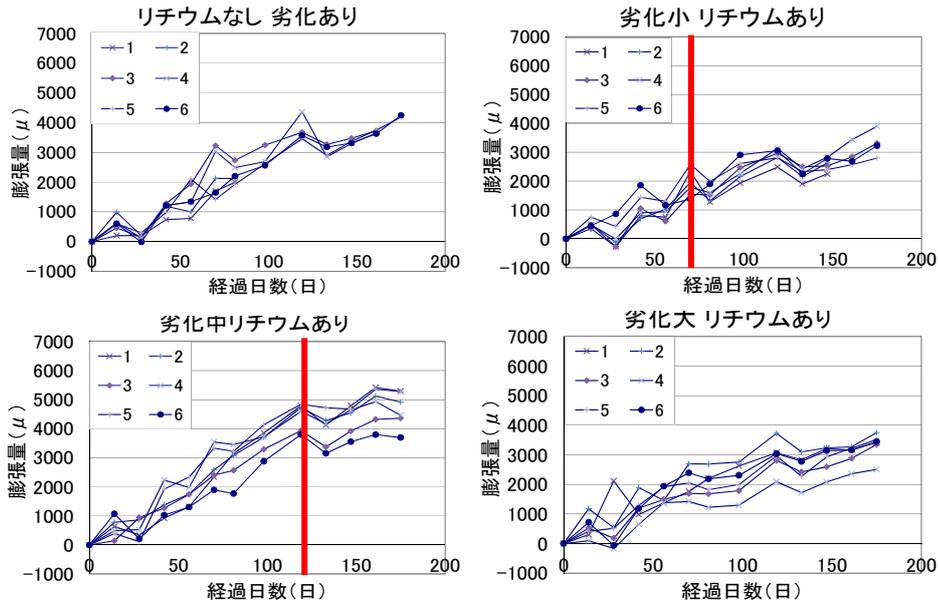


図-3.1 膨張量の経時変化（鉛直方向のみ）

表-3.1 膨張量測定結果

供試体名	供試体番号	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		
リチウムなし 劣化あり	1	1998	2725	1013	なし	81日間
	2	2125	2728	1050		
	3	3728	5145	1818		147日間
	4	3850	5713	1920		
	5	3748	6288	1818		161日間
	6	3628	4730	1850		
劣化小 リチウムあり	1	2243	3563	1548	促進81日目	147日間
	2	2623	5048	1278		
	3	2840	3728	1400		161日間
	4	3435	3985	1788		
	5	2565	3875	1648		
	6	2680	3405	1170		
劣化中 リチウムあり	1	5418	6393	2180	促進147日目	161日間
	2	5125	5535	1760		
	3	4323	5480	1860		
	4	4935	5800	1650		
	5	5363	5125	1718		
	6	3798	4995	1955		
劣化大 リチウムあり用 (※リチウムなし)	1	3163	5275	1388	促進161日目	161日間
	2	3267	5623	1920		
	3	2878	4665	1588		
	4	2358	4085	1415		
	5	3218	4168	1735		
	6	3163	4205	1658		

表-3.2 圧縮強度試験結果

供試体名	供試体番号	圧縮強度(N/mm ²)		静弾性係数(kN/mm ²)		圧入時期	載荷時期
		平均値	平均値	平均値	平均値		
NC	1	36.5	37.9	28.7	28.8	なし	打設28日後
	2	38.7		27.5			
	3	38.4		30.1			
リチウムなし 劣化あり	1	34.7	31.6	7.2	8.4	なし	促進81日目
	2	28.4		7.1			
	3	31.8		10.9			促進147日目
	4	25.5		8.6			
	5	25.6		6.9			
	6	24.9		5.9			
劣化小 リチウムあり	1	31.8	32.0	14.8	15.7	促進81日目	促進147日目
	2	31.3		17.1			
	3	32.8		15.1			

を維持す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、“劣化小リチウムあり”については、リチウム圧入により、圧入後にそのままの性能を維持し、“リチウムなし 劣化あり”の促進日数81日の段階での強度等と同等の結果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“劣化小リチウムあり”の方が値が上回る結果となった。これについて、リチウムによってゲルが改質された効果によるものであるかは、今回の実験結果からは断定できない。例えば、圧入のための削孔跡を埋めたグラウト材の静弾性係数が、今回作製したコンクリートの静弾性係数よりも高いために、供試体の静弾性係数が回復した可能性もある。また、圧入孔に付着強度の強いグラウト材を充填することで、劣化した供試体が再び一体性を持ち、圧縮試験時に供試体の変位量が小さくなった可能性もある。

3.3 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験時の最大荷重、曲げ剛性の計算値および

実験値を表-3.3に、荷重と変位の関係を図-3.2に示す。計算値は、表-3.2の圧縮強度試験結果を用いて算出した。実験値の載荷初期の値は、NCでは曲げ載荷中のひび割れ発生時の荷重および変位を用いたが、ASR供試体では劣化によるひび割れが載荷前からコンクリートに生じていたため、図-3.2における載荷初期に傾きが少し変わる時(10kN程度)の荷重および変位を用いて算出した。

表-3.3によると、最大荷重は、計算値と実験値がほぼ同じ値であった。圧縮強度の低かった“リチウムなし 劣化あり”の3, 4は、計算値、実験値ともに曲げ載荷時の最大荷重も低い値となった。次に、曲げ剛性のひび割れ発生時の計算値と、載荷初期の実験値をみると、NCでは値に大きな差があるが、その他については比較的近い値が得られた。“リチウムなし 劣化あり”の3, 4は圧縮試験時における静弾性係数の低下も大きかったため、計算値でも他より低い値となっているが、実験値ではさらに低い値となった。引張鉄筋降伏時までの曲げ剛性では、NCと“劣化小 リチウムあり”の実験値で大きな差が出たが、これは、載荷を行った供試体が各2体のみであったため、2体の平均値をとることとする。計算値、実験値ともに、NCと“劣化小 リチウムあり”に比べ、“リチウムなし 劣化あり”が低い値となっているが、“リチウムなし 劣化あり”では実験値の方がさらに低い値が得られた。その理由としては、“リチウムなし 劣

表-3.3 最大荷重・曲げ剛性の計算値および実験値

供試体名	供試体番号	計算値			実験値			圧入時期	載荷時期
		最大荷重(kN)	曲げ剛性(kN・m ²) ひび割れ発生時	引張鉄筋降伏時	最大荷重(kN)	曲げ剛性(kN・m ²) 載荷初期	引張鉄筋降伏時		
NC	1	58.0	2199	903	61.6	1041	859	なし	打設28日後
	2					—	2055		
リチウムなし 劣化あり	1	56.9	794	583	58.6	970	494	なし	促進81日目
	2					1492	539		
	3	55.2	697	539	55.4	—	386		促進147日目
	4					387	367		
劣化小 リチウムあり	1	57.0	1308	749	59.3	—	1656	促進81日目	促進147日目
	2					938	543		

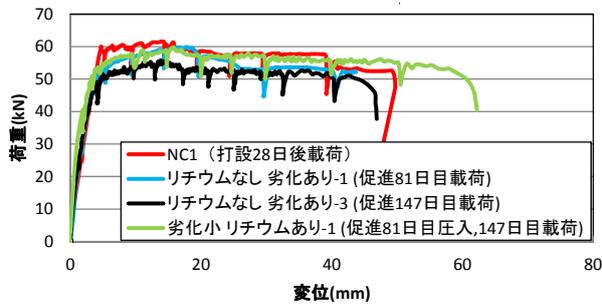


図-3.2 荷重-変位曲線

化あり”は、リチウム供給もなく促進日数も長いためにASRによるコンクリートの劣化が他よりも進展していたことや、それに加えて鉄筋も腐食し、ASR膨張によって一体性が著しく損なわれたことが原因であると考えた。

曲げ載荷試験において、NC、“リチウムなし 劣化あり”の1・2、および“劣化小リチウムあり”は最大荷重がほぼ同等であり、“リチウムなし劣化あり”の3・4だけが、他よりも少し低い値であった。図-3.2をみると、NCは最大荷重である60kN付近までグラフがほぼ直線で進んでいる(変形が小さい)のに対し、リチウム圧入を行っていない供試体では40~50kN付近から大きな変位を伴いながら最大荷重に達した。これは、劣化によりコンクリート表面や内部へのひび割れや鉄筋腐食が生じており、部材の一体性が失われ、荷重の増加とともにこれらひび割れが開口し、部材の剛性が低下したためであると考えられる。ただし、リチウム圧入を行った“劣化小リチウムあり”では、NCほどではないが、部材の剛性が維持されている(グラフの傾きが急である)ように見て取れる。そこで、表-3.3におけ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“リチウムなし劣化あり”の3、4では、NCに比べ、載荷初期および引張鉄筋降伏時ともに大きく低下していることがわかる。促進81日目に載荷した“リチウムなし劣化あり”の1、2では、引張鉄筋降伏時に大きく低下している。次に“劣化小リチウムあり”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。これについて、今回の実験結果からはリチウムの効果による回復であるとは断定はでき

ないため、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、付着強度の高いグラウト材により、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。

また、曲げひび割れやせん断ひび割れの計測結果では、NCおよび“劣化小リチウムあり”の方が、“リチウムなし劣化あり”よりも、若干ではあるがひび割れ幅が大きかった。これは、NCや“劣化小リチウムあり”では部材の剛性が高く、載荷時に供試体にひびが生じた際の衝撃によりひび割れが大きく開口した。しかし、“リチウムなし劣化あり”では部材の剛性が低く、表面や内部に劣化によるひび割れが生じており、載荷時にはそのひび割れが徐々に静かに開口していくだけに留まり、載荷時のひび割れ幅が小さかったものと考えられる。

4. まとめ

得られた結論を以下に示す。

- リチウム圧入した供試体では膨張が収束しており、リチウムによる膨張抑制効果が確認できた。
- 劣化促進開始後初期における膨張が大きい供試体は、長期的に膨張が大きくなる可能性が高い。
- リチウム圧入を行っていない供試体では荷重40~50kN付近から変位が大きくなり始め、部材の剛性の低下を確認した。
- 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、これがリチウムの効果によるものかは、今回の実験からは断定できない。
- 曲げ載荷時のひび割れ幅の計測結果から、NCおよび“劣化小リチウムあり”の方が、“リチウムなし劣化あり”よりも若干ひび割れ幅が大きいことがわかり、これが部材の剛性の違いを生じさせていると考えた。
- 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、今後も続ける必要がある。

参考文献

- 1) 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年4月1日改訂, 平成24年4月