

既設コンクリートにおけるアルカリシリカ反応 の進行抑制に関する基礎的研究 —ゼオライト等を活用したコンクリート構造物の延命化を 目指して—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○白井 良明
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 遠藤 裕丈
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

近年、寒冷な北海道においてもアルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートの劣化事例が確認され始めている。ASRが発生した既設コンクリートの補修技術として、骨材周囲のシリカゲルの吸水膨張を抑える亜硝酸リチウムの注入が行われているが、コストや施工性に課題がある。そこで、イオン交換機能を有し、コンクリート内のアルカリイオンを捕集するゼオライトの注入によるASR抑制効果の検証を目的に実験を行っており、その内容を紹介する。

キーワード：コンクリート、アルカリシリカ反応、リチウム、ゼオライト

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR）は、骨材に含まれる反応性のシリカ鉱物（ SiO_2 ）とコンクリートに内在もしくは外部から供給されるアルカリイオン（ Na^+ 、 K^+ ）が反応し、骨材周囲に吸水膨張性を有するアルカリシリカゲル（以下、ゲル）が形成され、このゲルが外部から浸入する水の作用で大きく膨張し、コンクリートにひび割れを生じさせる劣化現象である。

ASRによるコンクリートの劣化は、1982年に阪神地区で発見されて以降、各地で被害が報告されており、近年は北海道でも確認されている¹⁾。研究に先立ち、北海道開発局の協力を得て、2010～2014年度の橋梁定期点検結果をもとに北海道におけるASRの疑いのある橋梁を分析したところ、管理橋梁4234橋のうち2.1%にあたる89橋がASRの疑いありと報告されている。この89橋の内訳をさらに分析すると、図-1に示すように96.6%が旧建設省通達「アルカリ骨材反応抑制対策について」に基づくアルカリ総量規制（ $3\text{kg}/\text{m}^3$ ）がなされた1989年以前に架設竣工された橋梁である。一方で、3.4%は1989年以降に架設竣工された橋梁であり、アルカリ総量規制の下で建設されているにも関わらず、ASRが疑われる劣化が発生した橋梁も北海道内に存在している。

新設構造物におけるASR抑制対策は、無害な骨材の使用、抑制効果のある混合セメントの使用、コンクリート中のアルカリ総量の規制（ $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下）のうち、いずれか一つを選択、実施することとなっている。一方、無対策のまま既に造られた既設構造物においては、こ

ASR疑いの橋梁(全89橋)

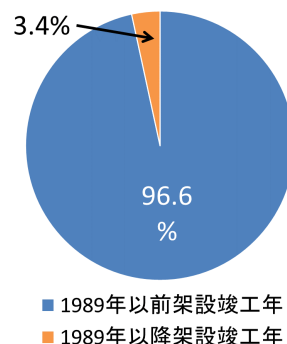


図-1 2010～2014年度定期点検結果（北海道開発局提供）

れらの対策を実施することは不可能なため、補修で対処するしかない。

現在は補修工法として外部からの水の遮断や断面修復が一般的であるが、ゲルの膨張が未収束であるために、一部で再劣化も確認されている。そのため、水処理に加えて、リチウムイオン等を活用してゲルを非膨張化させる方法も提案されている。例えば、亜硝酸リチウムによる補修事例²⁾もあるが、亜硝酸リチウムは環境面の理由から使用量が定められていること、また、高価なリチウムを大量に使用すること等、施工性やコスト面での課題もある。

一方、近年は、空隙を多数有するゼオライトのイオン交換機能に着目し、リチウムイオンなどのASR抑制機能を有する成分を含ませたゼオライトをコンクリートへ注入し、ゲルの生成につながるコンクリート内のアルカリイオンを吸着し、代わりにゲルを非膨潤化させ

表-1 実験で使用したゼオライトの種類

名称	記号
リチウム型(Li 型ゼオライト)	Li-EDI
酸処理型(H 型ゼオライト)	H-MOR

表-2 ひび割れ注入材の配合

記号	単位量(kg/m ³)				高性能 AE 減水剤 ^{※2} (P×%)
	水	粉体P			
		セメント系 注入材 ^{※1}	リチウム 型	酸処理 型	
N	678	968	－	－	－
L10	669	860	95	－	－
L10-S8	669	860	95	－	8
L15	664	807	142	－	－
L15-S8	664	807	142	－	8
L20	660	754	189	－	－
L20-S1	660	754	189	－	1
L20-S2	660	754	189	－	2
L20-S4	660	754	189	－	4
L20-S8	660	754	189	－	8
L25-S4	655	702	234	－	4
L30-S3	651	651	279	－	3
L30-S4	651	651	279	－	4
L40	643	551	368	－	－
L40-S4	643	551	368	－	4
L40-S8	643	551	368	－	8
H20	664	759	－	190	－
H20-S1	664	759	－	190	1
H20-S2	664	759	－	190	2
H40	651	558	－	372	－

※1) 超微粒子セメント系ひび割れ注入材のことであり、ここでは「セメント注入材」と表記する

※2) 本論文では「SP」と表記している箇所もある

るリチウムイオンや高アルカリ環境を改善する酸物質など ASR の抑制機能を有する成分を放出することで、既設構造物の ASR 進行を抑える取り組みもなされている³⁾。これに着目し、著者らは現在、コンクリート内のアルカリイオンを捕集し、ASR 抑制機能を有する成分を放出する交換機能を有するゼオライトを、ASR によって生じたひび割れへ注入した際の ASR 抑制効果ならびに寒冷地での適用性を評価するための実験を行っている。本論文ではその取り組みについて述べる。

2. ひび割れ注入材の配合に関する検討

ASR によって生じたひび割れへのゼオライトを含有させたひび割れ注入材の注入に先立ち、ひび割れ注入材の配合条件を決定する実験を行った。

(1) 実験概要

a) 実験で使用したゼオライト

表-1 は今回の実験で使用したゼオライトを示している。ゼオライトの種類は数多く存在するが、本研究で

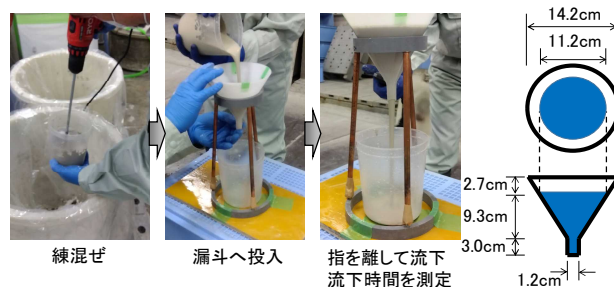


写真-1 練混ぜ状況および小型P漏斗試験

は既報等³⁾を参考に、アルカリイオン吸着の代わりに、リチウムイオンを放出する Li 型ゼオライト（以下、リチウム型）およびアルカリ濃度を下げるための酸を放出する H 型ゼオライト（以下、酸処理型）の 2 種類を使用した。国際ゼオライト学会(IZA)では、アルファベット 3 文字によるゼオライトの結晶構造の分類がなされている³⁾。今回使用したゼオライトの結晶構造は、リチウム型が EDI、酸処理型が MOR に該当する。

b) ひび割れ注入材の配合

表-2 に配合を示す。水粉体比は一般的なセメント系注入材の配合を参考に 70%とした。ゼオライトはセメントの内割置換とし、置換率は既報³⁾を参考に 40%以下の範囲で設定した。記号は、N:ゼオライト無混入、L ○:リチウム型○%内割混入、H ○:酸処理型○%内割混入、S ○:高性能 AE 減水剤を粉体量の○%添加（記号に S ○がないケースは高性能 AE 減水剤未混入）の組み合わせで構成されている。練混ぜは写真-1 の左に示すように、ハンドミキサーを使用して行った。水とセメント系注入材を容器に投入して 1 分間練混ぜた後、続けてゼオライトを投入して 1 分間練混ぜた。

c) 流動性

ゼオライトをコンクリート内へ広く行き渡らせるには、ひび割れ注入材に高い流動性が求められる。そこで、流動性に及ぼすゼオライトの影響を確認するため、漏斗試験を実施した。なお、漏斗試験はプレパックドコンクリートへのモルタル注入を想定した P 漏斗による方法 (JSCE-F521-1999) があるが、この規定で 사용되는 P 漏斗の容積は 1700ml であり、ひび割れ注入材としては極めて多い。実際の練混ぜ量がハンドミキサーによる 400~600ml 程度であることに鑑み、ここでは規定の試験方法を参考に、写真-1 の右に示すように P 漏斗を模した小型 P 漏斗を作製し、漏斗に投入したひび割れ注入材がすべて流下するまでの時間を調べ、この時間をもとに流動性を簡易的に評価することとした。

d) 圧縮強度

ゼオライトの内割置換率が大きくなるほど、セメント系注入材の割合が減少することになるため、ひび割

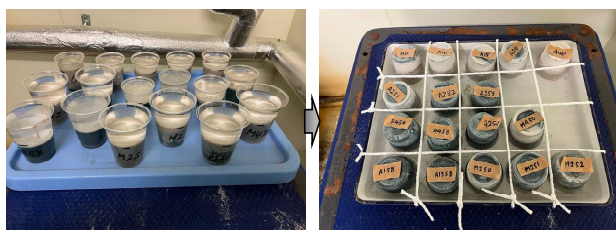


写真-2 凍結融解試験（左は供試体作製、右は試験の様子）

れ注入材の圧縮強度に及ぼす影響が懸念される。そこで、練混ぜたひび割れ注入材を用いてφ5cm×10cmの供試体を作製し、28日間水中養生させた後、アムスラー試験機でひび割れ注入材の圧縮強度測定を行った。

e) 凍結融解試験

北海道は寒冷地であり、北海道で適用する場合、ひび割れ注入材には高い凍結融解抵抗性が求められる。ここでは写真-2に示すように、練混ぜたひび割れ注入材を用いて、上面半径 3.3cm、下面半径 2.5cm、高さ 5.6cmの円錐台状の供試体を作製し、28日間養生させた後に脱型し、バットに淡水を入れ、下面から約 3cm 部分を浸漬させた状態で、ASTM C 672 を参考に、-18℃で 16 時間、23℃で 8 時間の 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を与え、供試体の変状の推移を観察した。

(2) 実験結果

a) 流動性

小型 P 漏斗試験による流動時間の測定結果を図-2 に示す。ゼオライトを混入していない N の流下時間は 4 秒であった。今回使用したセメント系ひび割れ注入材のカタログには JSCE-F521-1999 規定の P 漏斗による流下時間に及ぼすポリマー含有有無の影響に関するデータが掲載されており、注入可能なポリマー量を含有させた場合、流下時間は 2 倍に増加するデータが示されていた。そこで、セメント系ひび割れ注入材に別の成分を含有させた場合の流下時間の増加上限を 2 倍に設定し、今回の小型 P 漏斗試験における流動性評価の許容上限を、4 秒の 2 倍にあたる流下時間 8 秒とした。

リチウム型は、混入率を増やすと流下時間が増加した。40%まで置換した L40 に至っては流下せず、単独使用では L10 が限界であった。流動性確保を目的に高性能 AE 減水剤を添加したケースをみると、添加によって流動時間が低下しており、流下時間を短縮する効果は認められた。それでも、ゼオライトの内割置換率が 25%を上回ると流下時間が 8 秒を上回る結果が示され、今回の検討では最適配合の限界は L25-S4 であった。

一方、酸処理型を使用した場合、混入率、高性能 AE 減水剤の添加有無に関わらず、流下時間は N と同じ 4 秒と良好な結果となった。

ここで、流動性の保持とリチウム型の混入率向上の

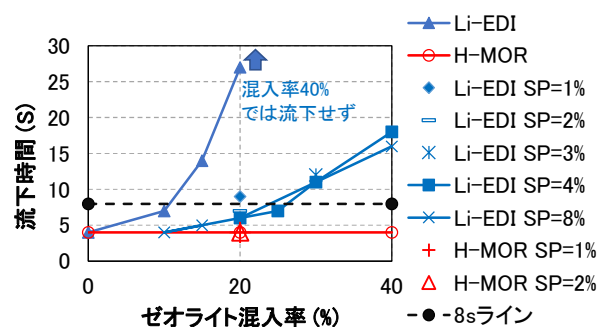


図-2 小型 P 漏斗試験による流下時間の測定結果（凡例はゼオライトの種類と高性能 AE 減水剤の添加量で表記）

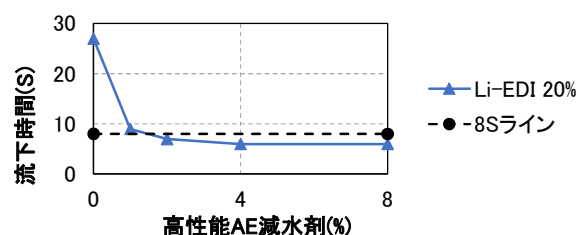


図-3 流下時間に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響
（リチウム型の内割置換率を 20%に固定）

両立を目指し、流下時間に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響を調べるため、リチウム型の混入率を 20%に固定した条件下で高性能 AE 減水剤の添加量を変化させ、小型 P 漏斗試験を実施した。その結果を図-3 に示す。高性能 AE 減水剤を 1%混入させた L20-S1 は、無混入に対して、大幅な流下時間の減少が見られた。しかし、混入率 2%以上では、高性能 AE 減水剤の添加量に対する流動時間の減少割合は極小となり、添加量 4%で流下時間は下げ止った。このことから、添加量を多くするほど流下時間が大きく減少するとは限らないことが明らかとなり、高性能 AE 減水剤に依存してリチウム型の混入率を大きく増加させる対応には限界があるとの結論に至った。

b) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-4 に示す。高性能 AE 減水剤未添加の場合、リチウム型、酸処理型を使用した双方とも、ゼオライトの混入率に比例して圧縮強度は低下する傾向にあった。高性能 AE 減水剤未添加の場合、酸処理型を使用した方が圧縮強度は大きい傾向にあった。一方、高性能 AE 減水剤を添加した場合、ゼオライトを 40%まで内割置換した L40-S4、L40-S8 をみると、無添加（L40）に対して圧縮強度は増加しており、高性能 AE 減水剤添加に起因する粉体の分散効果による圧縮強度の改善傾向は示されたものの、他の混入率ではデータにばらつきがみられることから、一概に圧縮強度の改善が図られるとは言い難く、今後もさらに検証を続ける必要がある。しかしながら内割置換率 40%までの範囲

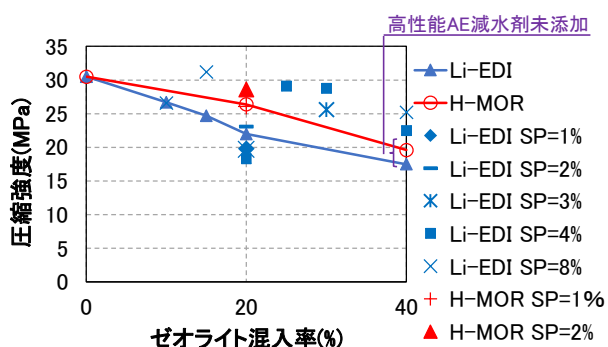


図4 圧縮強度試験 (凡例はゼオライトの種類と高性能 AE 減水剤の添加量で表記)



写真3 凍結融解試験 16 日目の供試体の外観 (ゼオライト内割置換率 40%、高性能 AE 減水剤未添加)



写真4 凍結融解試験 16 日目の供試体の外観 (ゼオライト内割置換率 20%、高性能 AE 減水剤 1%添加)

でゼオライトを置換し、バインダー機能を果たすセメント系注入材の量を減らしたとしても、20～30MPa の圧縮強度は確保できることがわかった。

c) 凍結融解試験

凍結融解試験 16 日目におけるゼオライトの内割置換率 40%、高性能 AE 減水剤未添加の供試体の外観を写真-3 に示す。リチウム型のゼオライトを混入した供試体は凍害による微細ひび割れが多く生じ、崩壊に至ったのに対し、酸処理型のゼオライトを混入した供試体は形状が概ね保持され、大きな変状は見受けられなかった。

写真-4 はゼオライトの内割置換率が 20%で、高性能 AE 減水剤を 1%添加した供試体の凍結融解試験 16 日目の外観である。内割置換率は異なるものの、高性能 AE 減水剤を添加しなかった写真-3 と同様、リチウム型を混入した供試体には凍害による微細なひび割れが多く発生しているのに対して、酸処理型のゼオライトを混入した供試体には凍害による微細なひび割れが多く発



写真-5 ゼオライト粉体の吸水率測定の様子

表-3 ゼオライト粉体の吸水率測定結果

ゼオライト	吸水率 (%)
Li-EDI	94.5
H-MOR	58.6

生している兆候はみられなかった。

d) 凍結融解試験においてリチウム型のゼオライトを使用した供試体に微細ひび割れが多く発生した理由

凍結融解試験では、リチウム型のゼオライトを混入した供試体に微細ひび割れが多く発生した一方、酸処理型のゼオライトを混入した供試体に微細なひび割れが発生しなかった。この要因として、凍害は水の凍結膨張による劣化現象であるため、ゼオライトの吸水特性の違いが疑われた。

そこで、ゼオライト粉体の吸水特性を調べるため、既往の研究⁴⁾を参考にしながら、リチウム型と酸処理型それぞれのゼオライト粉体の吸水率の測定を実施した。ここでは、ゼオライト粉体を約 10g および水を約 90cc 計量してシリンダーへ投入し、24 時間静置させた。その後、写真-5 に示すように濾過し、飽水状態のゼオライトが付着した濾紙を 105℃の乾燥機に入れて 24 時間乾燥させ、ゼオライトが付着した状態の濾紙の乾燥前後の質量変化を調べた。これと並行し、濾紙単独の吸水率を把握するため、濾紙に 1 時間給水を与え、その後 24 時間濾紙を乾燥させ、濾紙の吸水率を調べた。この値を補正に用いて、ゼオライトが付着した状態の濾紙の吸水率から濾紙の吸水率を控除し、ゼオライト粉体の吸水率を調べた。

表-3 に測定結果を示す。リチウム型のゼオライト粉体 (Li-EDI) の方が、酸処理型のゼオライト粉体 (H-MOR) に比べて吸水率が大きい結果が得られた。このことから、リチウム型のゼオライト粉体を混入した供試体は、凍結融解試験の過程で大きく吸水したために、凍害による微細なひび割れに至ったと考えられる。今後、吸水抑制材料との併用を検討していきたい。

なお、リチウム型のゼオライト粉体については、図-2 で示したように、小型 P 漏斗試験において、内割置換率が多くなるほど流下時間が長くなる傾向が示された。流下時間の増加は、配合 (表-2) で計上した水が練混ぜ時にゼオライトへ吸水されたことによる粘性増加が原因と考えられ、リチウム型のゼオライトの吸水率が大きかった表-3 の結果とも対応している。

(3) ひび割れ注入材の配合条件に関する考察

本章(2)で述べた流動性等の各種実験の結果を総合し、ひび割れ注入材として使用するリチウム型のゼオライトの内割置換率は、高性能 AE 減水剤未添加では 10%、

表4 配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	NaCl
55	155	282	854	1052	15

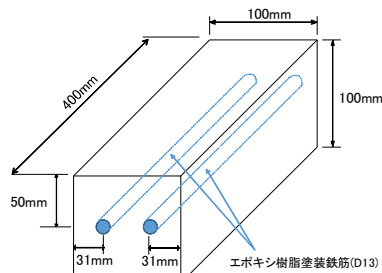


図-5 供試体

表-5 実験水準

No	記号	方式	備考 (方法など)
1	無処理	—	No. 2~11 の補修実施期間中は乾湿中断
2	N	ひび割れ 注入	記号の意味は 2. の(1)の b)に同じ
3	L10		配合は表-2に同じ
4	L10-S4		
5	L25-S4		配合は表-6
6	H25		
7	亜硝酸 Li・スプリング圧	孔充填	圧力 0.1MPa 以下でスクイズ式の注入
8	亜硝酸 Li・低圧		圧力 0.5MPa 程度での注入
9	亜硝酸 Li・高圧		圧力 0.5~1.0MPa での注入
10	L40-S4		記号の意味は 2. の(1)の b)に同じ
11	H40		配合は表-2に同じ

表-6 H25 のひび割れ注入材の配合

記号	単位量 (kg/m ³)				高性能 AE 減水剤 (P×%)
	水	セメント系注入材	粉体 P リチウム型 酸処理型		
H25	661	708	—	236	—

高性能 AE 減水剤を添加する場合は今回の検証で最適配合であった内割置換率 25%とした。酸処理型については、今回の検証では高性能 AE 減水剤未添加でも良好な結果であったことから未添加とし、ゼオライトの内割置換率はリチウム型と比較検討を行うため、リチウム型と同じ 25%に設定した。なお、ゼオライトの内割置換率は ASR 抑制の観点から多い方が望ましいため、孔を設けて充填する方法も検討することとした。充填剤として使用する場合の内割置換率は、リチウム型と酸処置型とも実験で設定した最大値の 40%とした。なお、リチウム型での高性能 AE 減水剤添加量は粉体量の 4%に固定し、ASR 抑制効果への影響を確認することとした。



写真-6 注入前処理



写真-7 ゼオライトの注入（左）および充填（右）

3. ASR 抑制効果の検討

次に 2 章(3)で述べた考察をもとに決定した条件下での ASR 抑制効果について検討する。なお、比較のため、現状使用されている亜硝酸リチウム（実験記号は「亜硝酸 Li」と表記）による効果もあわせて調べた。

(1) ASR 劣化した供試体の作製

表4に配合を示す。水セメント比は 55%とし、普通ポルトランドセメントを用いた。粗骨材は最大径 20mm の北海道産の反応性骨材を使用した。ASR 促進のため、NaCl を 15kg/m³混入した⁵⁾。供試体の寸法は図-5に示すように 100mm×100mm×400mm とし、拘束を与えるため、腐食に配慮してエポキシ樹脂塗装鉄筋(D13)を配した。作製後、ひび割れ幅 0.2mm に到達するまで 40℃水中で 3 日間、ビニール密封で 4 日間のサイクルで乾湿を与えた。概ね 100~200 日程度でひび割れ幅 0.2mm に達した。

(2) ゼオライトおよび亜硝酸リチウムの注入・充填

ASR ひび割れが生じた供試体に対し、スクイズ工法による注入もしくは事前に設けた孔（φ5mm×80~100mm）への充填を実施した。表-5に実験水準、表-6に 2 章(3)

で述べた酸処理型 H25 の配合を示す。注入前処理として、材料が漏れないよう、ひび割れ部を研磨して平滑にした後、エポキシを塗布し、ひび割れ全体をシールした（写真-6）。ひび割れ注入のシリーズでは 200~300mm 間隔でスクイズ式の注入器具を取り付けた。そして、注入・充填を実施した（写真-7）。

(3) 注入・充填後の促進試験による長さ変化の測定

ここでは、注入・充填を行った時点で長さ変化率を 0.000%にリセットし、ASR がより促進しやすいよう、40℃の水中に常時浸漬させ、注入・充填後の長さ変化を調べている。図-6に途中経過を示す。無処理も比較のため、他ケース（表-5 の No. 2~11）で行われた注入・充填実施日からの長さ変化で表示している。

無処理は水の遮断がなく、ASR が進行している。それ以外のケースは亜硝酸リチウムとゼオライトの差は明確ではないものの、長さ変化が無処理より小さく、ASR 進行の遅延がみられる。現時点では、リチウム型、酸処理型ともにゼオライトの内割混入率が多いほど ASR 抑制効果は大きい傾向にある。注入と充填で見比べる

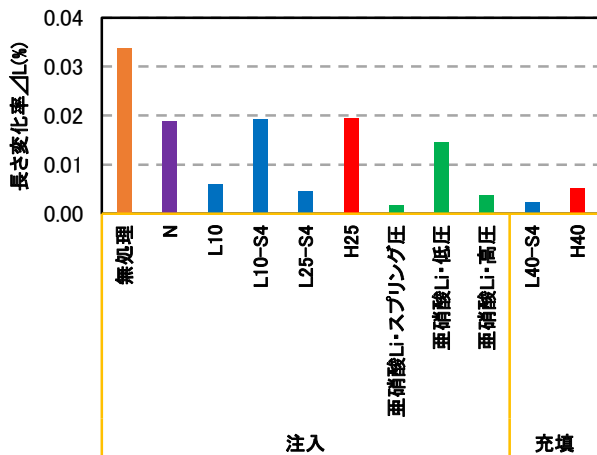


図-6 補修後の ASR 促進試験 28 日目までの長さ変化
(長さ変化は注入・充填実施時点の長さを基準)

と、充填の方が長さ変化は小さい傾向となっている。なお、ゼオライトが練り込まれていない N を注入したケースも長さ変化が小さいことから、ひび割れへの水の遮断が結果に影響を及ぼしていることも考えられる。亜硝酸リチウムは液体のみの注入であり、長さ変化の減少は ASR 抑制を示唆すると思われるが、ゼオライトによる ASR 抑制効果に関しては実験期間が短いため、引き続き、長さ変化の推移を観察していく必要がある。

4. まとめ

本論文ではゼオライトの特性に着目し、既設構造物を対象としたリチウム型ならびに酸処理型のゼオライトの注入による ASR の進行抑制効果の評価に向け、その一環として、注入方法の検討ならびに注入後の長さ変化の途中経過について述べた。結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) ひび割れ注入材にリチウム型のゼオライトを内割混入で混入した場合、混入率が大きくなると練混ぜた際に流動性が低下する傾向にある。注入材として使用するときの内割置換率の限界は、高性能 AE 減水剤を使用しない場合は 10%、高性能 AE 減水剤を使用する場合は 25%となる。
- (2) 酸処理型ゼオライトでは、混入率、高性能 AE 減水剤の使用有無によらず、良好な流動性を示す。
- (3) 圧縮強度は、高性能 AE 減水剤を使用しない場合、内割置換率に比例して減少する傾向を示したものの、20~30MPa となり、著しい低下は見られなかった。高性能 AE 減水剤を使用しない場合、酸処理型のゼオライトを使用した方が圧縮強度はやや高かった。

- (4) ゼオライトを混入したひび割れ注入材に凍結融解作用を与えたところ、リチウム型のゼオライトを混入した場合は微細なひび割れが多く発生したのに対し、酸処理型のゼオライトを使用した場合は顕著なひび割れは発生しなかった。今後、吸水抑制材料との併用を検討していきたい。
- (5) リチウム型のゼオライトは、酸処理型に比べると吸水率が高かった。リチウム型のゼオライトでみられた小型 P 漏斗試験での流下時間の増加や、凍結融解試験における多数の微細ひび割れ発生は、ゼオライトの吸水特性に起因すると考察された。
- (6) 促進試験の途中経過ではあるが、ゼオライトの内割混入率が多いほど、高い ASR 抑制効果が示された。また、ひび割れ注入に比べて、孔充填の方が ASR 抑制効果が高い傾向がみられた。ただし、まだ実験サイクルが短いことから、今後も推移を観察していく必要がある。

謝辞：本実験で使用したリチウム型のゼオライトと酸処理型のゼオライトは、株式会社ジェイアール総研エンジニアリングより提供していただきました。また、亜硝酸リチウムの注入は一般社団法人コンクリートメンテナンス協会および株式会社シオンの協力を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 遠藤裕丈，島多昭典：ASR と凍害の複合劣化に及ぼす環境の影響に関する基礎的研究，第 65 回年度北海道開発技術研究発表会論文，pp. 860-865，2021
- 2) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物の維持管理 ～塩害・中性化・ASR 補修の考え方～，技術資料 Ver. 4. 2，pp. 45-46
<https://www.j-cma.jp/jcma-pics/gi/jutsushiryoku42.pdf>
- 3) 上原元樹，水野清，佐藤隆恒：リチウム含有ゼオライトでアルカリシリカ反応を抑制する，特集 施設の補修・補強技術，RRR，Vol. 69，No. 6，pp. 8-11，2012. 6
- 4) 樋口かよ，木村英生，尾形美貴，佐藤憲亮，上野直也，加藤知美，石井利幸，向山雄大，橋本卓也：製パン用小麦粉の吸水率評価法に関する検討，日本食品保蔵科学会誌，Vol. 45，No. 4，pp. 181-185，2019
- 5) 遠藤裕丈，長谷川諒，島多昭典：周辺環境が ASR によるコンクリートの劣化に及ぼす影響および ASR 対策，寒地土木研究所月報「寒地土木技術研究」，No. 839，pp. 28-33，2023. 1