

リチウムによるアルカリ骨材反応の膨張抑制に関する研究

文献調査委員会

担当：上 田 隆 雄*

1. はじめに

1940年にStantonがその存在を指摘¹⁾して以来、アルカリ骨材反応は、コンクリート構造物の深刻な劣化現象の一つとして認識され、これに対して世界中で様々な検討が行われてきた。しかし、他の劣化現象と比較して、アルカリ骨材反応は劣化メカニズムが複雑であり、その対策も容易なものではなかった。そのような状況で、1951年に発表されたMacCoyらの論文²⁾では、アルカリ骨材反応による膨張を抑制できる化学混和剤の開発を目的として実施された、多岐にわたる物質を添加したモルタルバーの膨張試験結果が示された。この結果、いくつかのリチウム塩に膨張抑制効果があることがわかった。この論文が発表された後、30年以上の間、リチウムの利用に関する研究結果が積極的に報告されることはなかったようだが、1990年代に入って、にわかにリチウムに関する研究論文が目につくようになってきた。

一方、国内においてもアルカリ骨材反応は、現在、最も注目を集めている劣化現象であろう。この原因として、コンクリート中の鉄筋が、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張に伴って破断するという非常に深刻な状況が明らかになってきたことが挙げられる³⁾。アルカリ骨材反応で最も深刻な問題は、現時点でその効果に確信の持てる補修工法や補強工法が存在しないという点にある。このような状況の中で、リチウムによる膨張抑制効果を期待した補修工法の開発も進んでいる。しかし、リチウムによる膨張抑制メカニズムや抑制効果に関する体系的な情報は不足しているのが現状である。そこで本稿では、最近、海外で発表された論文を中心に、リチウムがアルカリ骨材反応、および、それに伴う膨張に与える影響に関する知見をまとめて報告することとする。なお、本稿ではアルカリ骨材反応の内、主としてアルカリシリカ反応を対象とし、これをASRと略記するとともに、ASRに伴う反応生成物をASRゲル、コンクリートまたはモルタルの膨張をASR膨張と記述する。なお、本

稿における溶液濃度の単位は引用文献のとおりとし、mol/lあるいはN（規定度）を用いている。

2. リチウムによるASR膨張の抑制効果

2.1 コンクリートまたはモルタルの膨張抑制

リチウム塩の添加によるASR膨張抑制効果に関する実験的検討結果は比較的多く報告されている。前述したように、古くはMacCoyらの報告²⁾がこれに該当する。パイレックスガラスを反応性骨材として、モルタルバーの膨張試験を行った結果の一部を表-1に示す。なお、セメントは高アルカリセメント ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.15\%$) を用いている。これより、添加物質の種類や、添加率の違いによる差は見られるものの、すべての場合で、無添加の場合よりも膨張率が減少していることがわかる。

MacCoyらの実験以降に報告された実験結果の例を表-2にまとめる。なお、ここでは主として供試体に用いられた反応性骨材の種類、含有アルカリ ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) 量、添加されたリチウム塩の種類、得られた膨張抑制効果を示している。しかし、ASRはこれらの条件以外にも、コンクリートやモルタルの配合条件、供試体形状、寸法、促進環境条件などの影響を強く受ける。さらに、ここで膨張抑制効果の有無を判定する際の判定条件は文献によ

表-1 各種リチウム塩を添加したモルタルバーの膨張率経時変化²⁾

添加物質	添加率 (%)	膨張率 (%)				無添加に対する膨張減少率* (%)			
		2週	4週	6週	8週	2週	4週	6週	8週
LiCl	0.5	.074	.258	.328	.355	75	43	34	34
	1.0	.031	.042	.049	.063	90	91	90	88
Li ₂ CO ₃	0.5	.032	.144	.166	.202	89	68	67	62
	1.0	.018	.026	.034	.049	94	94	93	91
LiF	0.5	.024	.036	.056	.094	92	92	89	82
	1.0	.008	.006	.009	.009	97	99	98	98
Li ₂ SiO ₃	1.0	.036	.094	.160	.177	88	80	68	67
LiNO ₃	1.0	.056	.130	.344	.428	81	72	31	20

*) (Li塩無添加試験体の膨張率-Li塩添加試験体の膨張率)/Li塩無添加試験体の膨張率×100

* うえだ・たかお/徳島大学助教授 工学部 建設工学科 (正会員)

表-2 リチウムを添加したときのASR膨張検討例

文献	種類*	反応性骨材	Na ₂ O _{eq} %	リチウム塩	膨張抑制効果の概要 (効果ありは○, なしや逆効果は×)
4)	M	輝石安山岩	1.2	LiOH, LiNO ₃	Li/Na モル比が 0.9~1.2 で○, LiNO ₃ に浸せきした場合, 浸透深さに比例して○
5)	M	オパール, 焼成フリント	1.0	LiOH	Li/(Na+K) モル比が 1.2 で○, これより小さいと×
6)	M	焼成フリント	1.12	LiOH, Li ₂ CO ₃	初期の Li ⁺ 濃度が 0.75 M 以上で○, これより小さい濃度で×
7)	M	破砕ガラス	0.72	Li ガラス	セメントに対して 5% の Li ガラス粉末を添加すれば, Li ⁺ の細孔溶液への溶出により○
8)	C	フリント砂, グレイワック, シルト岩	1.15	LiOH, LiNO ₃	Li/(Na+K) モル比が 0.51 以上になるように添加すると○, ただし, シルト岩を用いた場合は 0.85 以上必要
9)	M	オパール	1.2	LiOH	1% の LiOH を添加することで○, 0.5% では×
10)	C	焼成フリント	0.86, 1.13	LiOH, Li ₂ CO ₃ , LiF	リチウム塩種類によらず Li/Na 質量比が 0.33 以上で○
11)	C	粘土質ドロマイト石灰岩	1.5	LiOH	10% LiOH 溶液中でオートクレープ保存した結果○, ただし ACR (アルカリ炭酸塩岩反応) 膨張が発生
12)	M	微晶質石英含有骨材	1.5-3.0	LiOH	Na ₂ O _{eq} =2.5% 以下では, Li/Na モル比が 0.3 以上で○, ただし, Na ₂ O _{eq} =3.0% では, Li/Na モル比が 0.6 以上必要
13)	M	石英含有砂	1.09	LiF, Li ₂ CO ₃	セメント質量に対して 2.0% の Li ₂ CO ₃ を添加で○, 0.75% の LiF を添加した場合は×
14)	M	ホウ珪酸ガラス	1.0	LiOH, LiNO ₃ , LiCl	ASR 膨張を抑制できる最小 Li/Na _{eq} モル比は, 0.5~1.0 の間でリチウム塩種類によって変動
15)	M	安山岩	0.5-3.5	LiNO ₃	Na ₂ O _{eq} が 2.0% 以上の場合, 最適 Li/Na モル比は 0.8。Na ₂ O が 2.0% より小さい場合は, 最適 Li/Na モル比も 0.5 以下
16)	M	微晶質珪岩	0.68	LiOH	練混ぜ水として 1 M の LiOH を添加した結果○
17)	M	天然骨材	0.92	LiF, Li ₂ CO ₃	セメント質量に対して 0.5% の LiF, 1.0% の Li ₂ CO ₃ を添加で○

*) M: モルタル, C: コンクリート

て異なっている。本来はこれらすべての条件に言及すべきであるが、紙面の都合で、詳細については引用した文献を参照されたい。

表-2によると、リチウム塩による ASR 膨張抑制効果は、様々な要因単独の影響、および、複数の要因の組み合わせの影響を受けそうであるが、おおむね Li/Na モル比が 1.0 前後であれば、膨張抑制効果が期待できる可能性が高いと言える。

2.2 膨張抑制効果を得るための条件

プレミックスでリチウム塩を添加した場合に、Li⁺ がセメントの水和生成物に取り込まれるために、特に材齢初期においては細孔溶液中の Li⁺ 濃度が大幅に減少することが報告されている^{5), 18), 19)}。また、Na⁺ よりも Li⁺ の方が減少する割合が大きいことから、Li/Na モル比も添加初期の値が大幅に減少することが確認されている¹⁹⁾。これにより、実際に細孔溶液中に存在できる Li⁺ 量が減少することを勘案して添加する Li⁺ 濃度を決定する必要

があることが指摘されている¹⁸⁾。

Diamond らは LiOH を添加した場合には、膨張抑制に必要な限界値が存在し、これよりも添加量が小さいと、細孔溶液中の OH⁻ 濃度上昇効果が卓越して、ASR 膨張を促進する恐れがあると指摘している⁹⁾。LiOH や Li₂CO₃ を添加した時の添加量不足による ASR 膨張促進の危険性については、他の文献^{9), 10)}においても指摘されている。図-1 に示す例では、特に Li₂CO₃ を添加した時の膨張促進効果が大きく、0.15 M や 0.25 M の添加では無添加の場合よりも最終膨張率が大きいことがわかる。一方、図-2 に示すように添加量に比例した膨張抑制効果が確認された例^{12), 14)}もあり、実験条件に依存する現象のようである。これに対して、LiNO₃ を添加した場合には、図-3 に示すように、Li⁺ は細孔溶液中において NO₃⁻ とバランスするため、pH が上昇する心配が無いことも報告されている¹⁸⁾。

Suppression of AAR Expansion by Means of Lithium Salts

By T. Ueda

Concrete Journal, Vol. 43, No. 6, pp. 51~56, Jun. 2005

Synopsis The steel fracture in concrete deteriorated by alkali aggregate reaction was very shocking topic, and it is important to develop effective countermeasures for such structures. This report summarizes the researches of lithium salts as the chemical admixtures for suppression of AAR expansion including the application as the repair technique for deteriorated structures.

Keywords : alkali silica reaction, suppression of expansion, lithium salt, repair technique

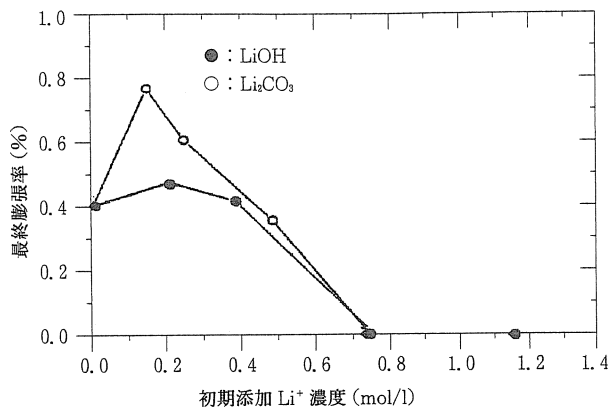


図-1 初期添加 Li^+ 濃度とモルタルの最終膨張率との関係^{6)*}

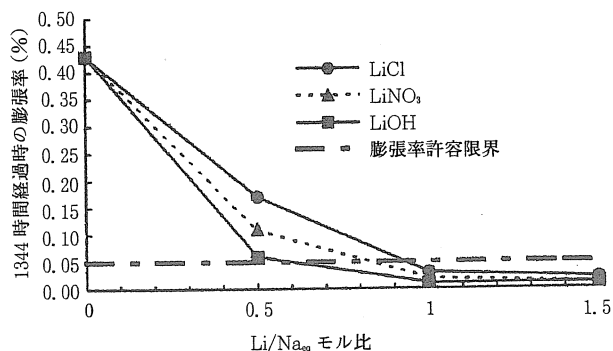


図-2 $\text{Li}/\text{Na}_{\text{eq}}$ モル比とモルタルの膨張率との関係^{14)*}

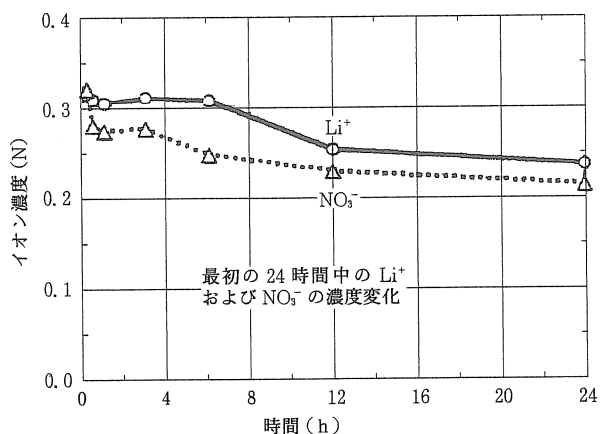


図-3 0.3 N の LiNO_3 を添加したペーストの細孔溶液中における Li^+ および NO_3^- 濃度^{18)*}

3. リチウムによる ASR 膨張抑制メカニズム

2. で述べたように、リチウム塩に ASR 膨張抑制効果があることは、数多くの実証的論文により確認されているが、そのメカニズムに関しては不明な点が残されている。現時点で、膨張抑制メカニズムとして提案されている説は、大きく分けて以下に示す 2 つに分類される。

- Li^+ の影響で ASR の反応進行が抑制され、ASR ゲルの生成量が減少することで、ASR 膨張が小さくなる。
- Li^+ が取り込まれることで、生成した ASR ゲルが非膨張性の物質となるために、ASR 膨張が小さくなる。

ここでは、前者を反応進行抑制説、後者を非膨張性ゲ

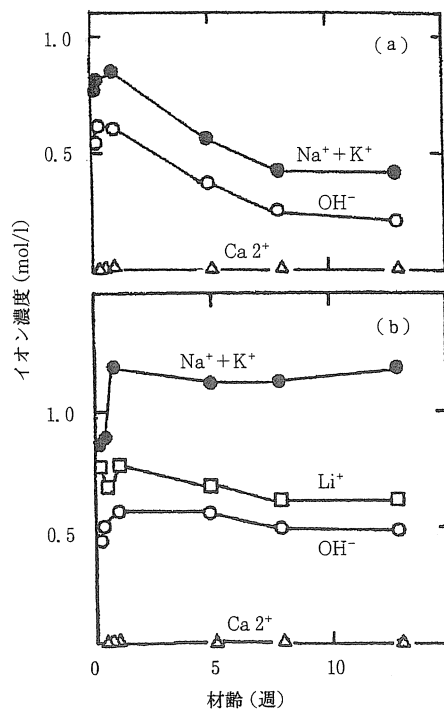


図-4 モルタルの細孔溶液中イオン濃度の経時変化 ((a) LiNO_3 無添加, (b) LiNO_3 添加)⁹⁾

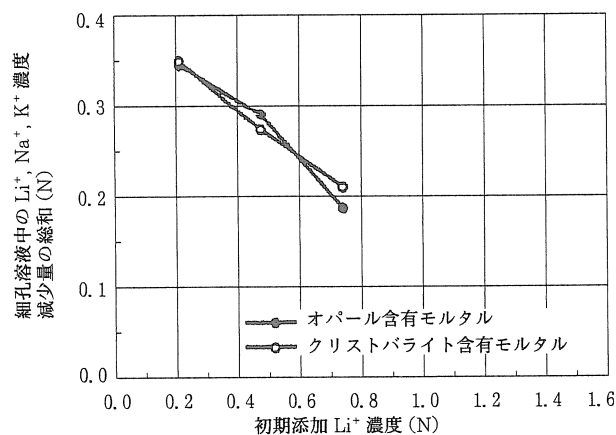


図-5 初期添加 Li^+ 濃度とモルタル細孔溶液中の Li^+ , Na^+ , K^+ 濃度減少量の総和⁵⁾

ル生成説と定義して、既往の検討結果を紹介する。

3.1 反応進行抑制説

Sakaguchi らは、 LiNO_3 を添加したパイレックスガラスモルタルの骨材界面においては、無添加の場合に見られた反応生成物が見られないことと、図-4 に示すように、 Li^+ の添加によって、モルタル細孔溶液中の Na^+ や K^+ の濃度の経時的減少が見られなくなることから、 Li^+ が ASR ゲルの生成そのものを抑制していると考察している⁹⁾。

Diamond は、図-5 に示すように添加する Li^+ の濃度が増大するほど、モルタルの細孔溶液から除去されたアルカリ量 (Li^+ , Na^+ , K^+) の総和が減少することから、 Li^+ の存在により ASR ゲルの生成量が減少すると述べている⁵⁾。

Mitchell らは、粉碎したオパール粒子を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、

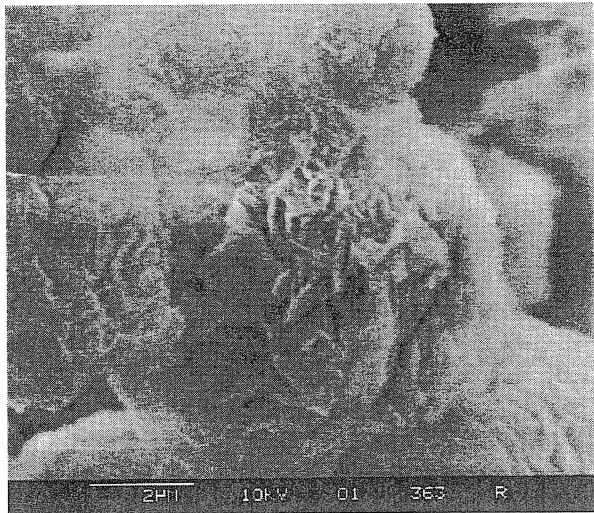


図-6 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と LiOH 混合溶液中で 28 日経過したオパール表面の生成物質 ($\times 10,000$)²⁰⁾

KOH , LiOH と混合静置した時の反応生成物を分析している²⁰⁾。この結果, LiOH を混合した場合には, 混合しない場合に比べてオパール中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量および SiO_2 量の経時的減少速度が低下していた。さらに, SEM 観察結果と併せて, LiOH を添加した場合には, オパールの表面に図-6 に示すような薄い層状の保護膜が形成され, 反応の進行を抑制していると考察している。

Kurtis らは, 実構造物から採取した ASR ゲルを 0.7 M NaOH +0.1 M LiCl に浸せきした結果, Li^+ には, 溶解シリカが再重合化して膨張性ゲルとなる反応を制限するとともに, 溶解シリカを比較的大きなケイ酸塩粒子として凝集させる効果があったとしている²¹⁾。

3.2 非膨張性ゲル生成説

Kawamura らは ASR ゲルの化学組成分析の結果,

リチウム塩の添加濃度が高いほど, CaO/SiO_2 比が減少するとともに, ASR ゲル中の CaO 濃度分布が均等化したことを報告している⁹⁾。ただし, これらの現象が ASR 膨張挙動の変化に関係するかどうかについては明確にされていない。

これに対して, Ramyar らは結晶化した反応生成物の組成分析の結果, ASR 膨張抑制効果が認められたリチウム塩を添加した場合に, 無添加の場合よりも CaO/SiO_2 比が増加していたとしている¹³⁾。

Thomas らは, LiOH ($\text{Li}/(\text{Na}+\text{K})=0.74$) 添加の有無および反応性骨材の有無を要因にして作製したモルタルから抽出した細孔溶液の分析を行っている⁸⁾。この結果, 図-7 に示すように, LiOH 添加の有無によらず反応性骨材を用いた場合には, 細孔溶液中の OH^- , Na^+ , K^+ 濃度が経時的に減少していることから, LiOH を添加した場合でも ASR ゲルは生成するが, これに Li^+ が作用することで非膨張性のものに変質する可能性が高いとしている。

Mo らは LiOH を添加したモルタル中の反応性骨材周辺の SEM 観察結果として, 図-8 に示すような結晶質の生成物質を示している¹²⁾。 Li^+ の添加によりこのような非膨張性の物質が生成したものと推定している。

Collins らはシリカゲルに Li/Na モル比を変化させたアルカリを添加して作製したスラリーを分析した結果, LiCl および LiNO_3 を添加した場合には, シリカの溶解を抑制する傾向を示したが, LiOH を添加した場合には, シリカの溶解を促進したことを報告している¹⁴⁾。これより, Li^+ は ASR ゲルの生成量を抑制しているのではなく, 非膨張性の ASR ゲルを生成しているものと推定している。

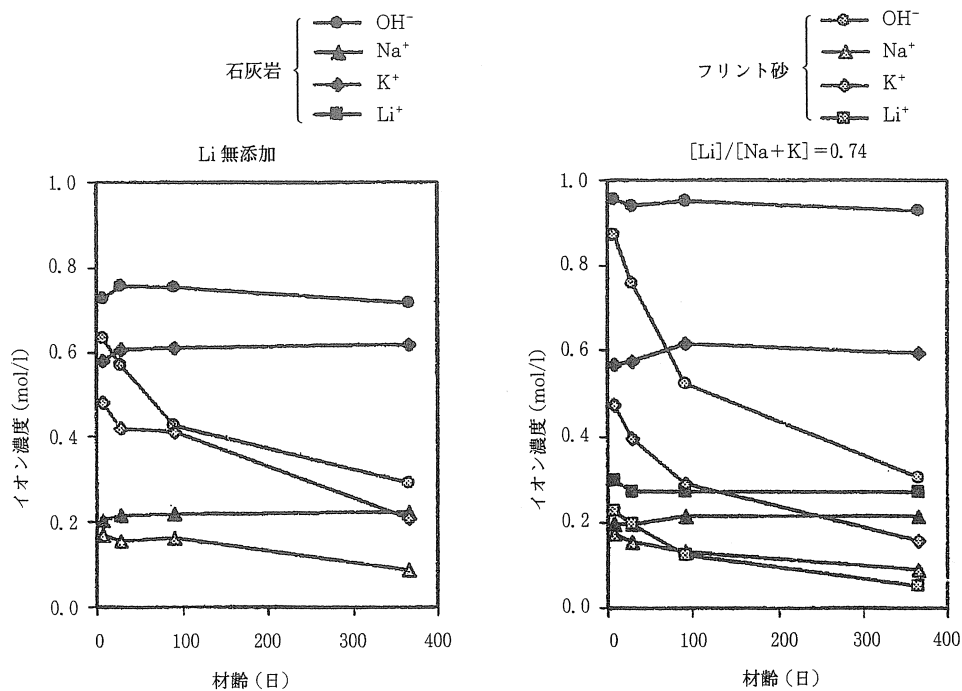


図-7 LiOH および反応性骨材の添加がモルタルの細孔溶液組成に与える影響⁸⁾

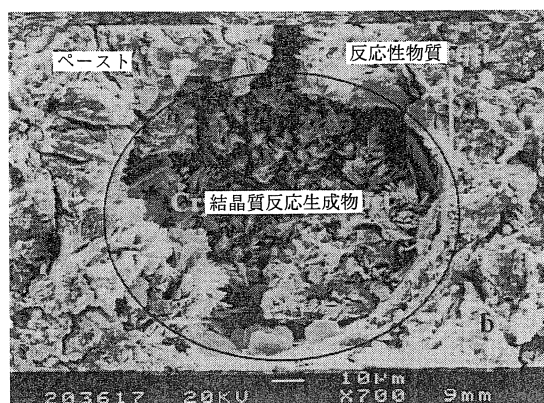


図-8 LiOH を添加したモルタル中の結晶質反応生成物¹²⁾*

4. 補修工法としての適用

ASR に対する補修工法としては、これまで表面処理を中心とした工法が適用されてきたが、効果が得られず再劣化するケースも指摘されており、より効果的かつ根本的な工法の開発が求められている。このような状況において、3. で示したように、膨張抑制メカニズムについては未解明な部分も残されているが、2. に示したように何らかの膨張抑制効果は期待できることから、ASR により劣化したコンクリート構造物の補修工法としてリチウム塩を利用する手法が検討されている。この場合に、最大の問題点は、いかにして硬化コンクリート中に、必要十分な濃度のリチウムを供給するかという点である。

Whitmore らは電気化学的な手法によって、 Li^+ をコンクリート中に浸透させる試みを報告している²²⁾。この方法は、脱塩工法や再アルカリ化工法と同様に、仮設陽極をコンクリート表面に設置し、コンクリート中の鉄筋を陰極として直流電流を供給することで、陽極周りの電解液から Li^+ をコンクリート中に電気泳動させる手法である(図-9)。電解液としては、 LiNO_3 溶液や Li_2BO_3 溶液が用いられているが、電解液濃度や通電処理条件等、詳細は示されていない。無通電でリチウム溶液に浸せきした場合に比べて、浸透速度は4~10倍になると述べられているが、実際の処理後の ASR 膨張状況などは報告されていないため、今後のさらなる検討が必要であろう。

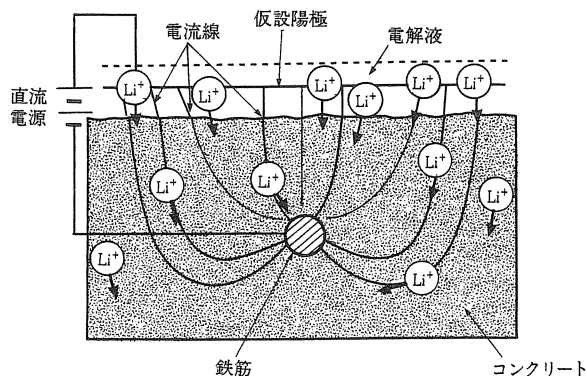


図-9 通電処理による Li^+ の移動の概念図²²⁾

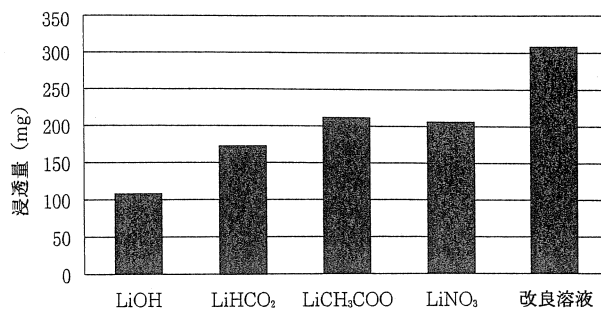


図-10 各種リチウム塩溶液の浸透性能の比較²³⁾

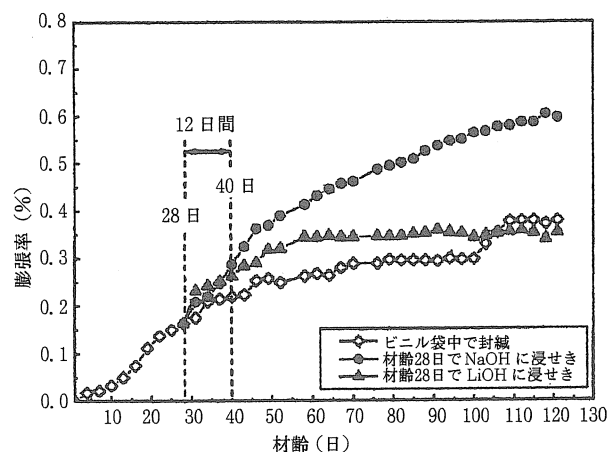


図-11 材齢28日で浸せきを開始したモルタルの膨張曲線²⁵⁾*

Stokes らはコンクリートへの浸透性に優れたリチウム溶液の開発を報告している²³⁾。このリチウム溶液は、 LiNO_3 溶液をベースとして、浸透性を向上させるために、表面活性剤を添加したものと説明されている。モルタルへの浸透試験結果は、図-10 に示すとおりであり、開発されたリチウム溶液の浸透能力は、 LiNO_3 溶液の1.5倍、 LiOH 溶液の3倍であったとしている。さらに、反応性骨材を用いたモルタルバーや角柱コンクリートの ASR 膨張試験結果でも、良好な膨張抑制効果が確認されている。ただし、得られる効果は溶液を含浸させる劣化時期や、含浸方法によって大きく変化するようである。

金好は構造物の内部まで削孔した圧入孔から LiNO_3 を主成分とするリチウム溶液を加圧注入する工法を紹介している²⁴⁾。内径 37 mm の圧入孔を直径 1 m の範囲に1本設け、窒素ガスによる加圧力を 0.5 MPa、圧入期間は1~2カ月としている。膨張抑制効果を得るための必要圧入量は Li/Na モル比で 1.0 としている。実構造物に適用された例では、圧入孔から 0.5 m の位置でリチウム含有量が必要圧入量に達しており、圧入前後に採取したコンクリートコアの促進膨張試験の結果、圧入後の残存膨張量が圧入前のコアの 10% 程度となったとしている。小径であるとはいえ、多数の削孔が必要になる点を勘案した評価が必要であろう。

補修工法としての検討ではないが、Kawamura らは ASR が進行しているモルタルバーを 0.5 N の LiOH 溶液に浸せきした時の膨張抑制効果の確認と ASR ゲルの

組成分析を行っている²⁵⁾。図-11は、材齢28日までASR膨張を進行させた後にNaOHおよびLiOH溶液に浸せきしたモルタルの膨張曲線を示しているが、LiOH溶液への浸せきを開始後、比較的短期間でASR膨張の進行が停止している。さらに、骨材とペーストの界面付近のASRゲル中では $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ の割合が低下していたことから、 Na^+ や K^+ が外部から浸透してきた Li^+ と置換したものと考察している。

5. おわりに

アルカリ骨材反応は、コンクリート構造物の劣化形態の一つとして比較的早くからその存在が知られているが、鉄筋破断現象が報告されたのはごく最近のことであるし、現状では、定量的な劣化進行モデルが確立されているとは言いがたい状況である。これは、反応性骨材の種類、アルカリの種類、濃度、コンクリートの配合、環境条件などの諸要因が劣化の進行に大きな影響を与えるという、複雑な劣化メカニズムに起因している。このこともあって、前述したように、アルカリ骨材反応への有効な対策は極めて難しく、特に既存の構造物で劣化が顕在化した場合の補修に関しては、「アル骨は難しいから」と半ば諦められてきた感がある。それでも、近年までは、アルカリ骨材反応で構造物の安全性まで低下するケースはまれであると考えられてきた。これに対して、鉄筋破断現象が確認されてからは、根本的な対策に対する要求が一気に高まったと言える。

このような状況において、リチウムを用いた手法は、現時点で最も期待できる手法の一つであろう。本稿で示したように、現状では不明な点や課題点も存在するが、今後のさらなる検討によって、より信頼性の高い手法として確立されることが望まれる。

参考文献

- 1) T.E. Stanton : Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate, Proc. of ASCE, Vol.66, pp.1781-1811, 1940
- 2) W.J. MacCoy and A.G. Caldwell : New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion, Journal of ACI, Vol.22, pp.693-706, 1951
- 3) 久保善司・鳥居和之 : アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol.40, No. 6, pp.3~8, 2002
- 4) T. Sakaguchi, M. Tanaka, A. Kitagawa, T. Hori, F. Tomozawa and M. Abe : The Inhibiting Effect of Lithium Compounds on Alkali Silica Reaction, Proc. of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.229-234, 1989
- 5) S. Diamond and S. Ong : The Mechanism of Lithium Effects on ASR, Proc. of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.269-278, 1992
- 6) M. Kawamura and D. Fuwa : Effects of Lithium Salts on ASR Gel Composition and Expansion of Mortars, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.913-919, 2003
- 7) M. Kawamura, M. Juni and Y. Sugimasa : Suppression of ASR in the Reuse of Various Waste Glasses as A Concrete Aggregate by the Addition of Mineral Admixtures, Proc. of the

- International Symposium on Non-Traditional Cement & Concrete, pp.274-291, 2002
- 8) M.D.A. Thomas, R. Hooper and D.B. Stokes : Use of Lithium-Containing Compounds to Control Expansion in Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, Proc. of 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.783-792, 2000
- 9) V.S. Ramachandran : Alkali-Aggregate Expansion Inhibiting Admixtures, Cement and Concrete Composite, Vol.20, pp.149-161, 1998
- 10) J.S. Lumley : ASR Suppression by Lithium Compounds, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.2, pp.235-244, 1997
- 11) Guangren Qian, Min Deng and Minshu Tang : Expansion of Siliceous and Dolomitic Aggregates in Lithium Hydroxide Solution, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.763-768, 2002
- 12) Xiangyin Mo, Chenjie Yu and Zhongzi Xu : Long-Term Effectiveness and Mechanism of LiOH in Inhibiting Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.115-119, 2003
- 13) K. Ramyar, O. Copuroglu, O. Andic, A.L.A. Fraaij : Comparison of Alkali-Silica Reaction Products of Fly-Ash-or Lithium-Salt-Bearing Mortar under Long-Term Accelerated Curing, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1179-1183, 2004
- 14) C.L. Collins, J.H. Ideker, G.S. Willis and K.E. Kurtis : Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO_3 on Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1403-1415, 2004
- 15) Bian Quinghan, S. Nishibayashi, Wu Xuequan, A. Yoshino, Zhu Hong, Wang Tiecheng and Tang Mingshu : Preliminary Study of Effect of LiNO_3 on Expansion of Mortars Subjected to Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.1647-1654, 1995
- 16) M. Prezzi, P.J.M. Monteiro, and G. Sposito : Alkali-Silica Reaction ; Part 2 : The Effect of Chemical Additives, ACI Materials Journal, Vol.95, pp.3-10, 1998
- 17) D.C. Stark : Lithium Salt Admixtures-An Alternative Method to Prevent Expansive Alkali-Silica Reactivity, Proc. of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1017-1025, 1992
- 18) S. Diamond : Unique Response of LiNO_3 as an Alkali Silica Reaction-Preventive Admixture, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1271-1275, 1999
- 19) M.A. Berube, C. Tremblay, B. Fournier, M.D. Thomas and D.B. Stokes : Influence of Lithium-Based Products Proposed for Counteracting ASR on the Chemistry of Pore Solution and Cement Hydrates, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.1645-1660, 2004
- 20) Lyndon D. Mitchell, James J. Beaudoin and Patrick Grattan-Bellow : The Effects of Lithium Hydroxide Solution on Alkali Silica Reaction Gels Created with Opal, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.641-649, 2004
- 21) K.E. Kurtis, P.J.M. Monteiro and W. Meyer-Ilse : Examination of the Effect of LiCl on ASR Gel Expansion, Proc. of 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.51-60, 2000
- 22) D. Whitemore and S. Abbott : Use of an Applied Electric Field to Drive Lithium Ions into Alkali-Silica Reactive Structures, Proc. of 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1089-1098, 2000
- 23) D.B. Stokes, M.D.A. Thomas and S.G. Shashiprakash : Development of a Lithium-Based Material for Decreasing ASR-Induced Expansion in Hardened Concrete, Proc. of 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.1079-1087, 2000
- 24) 金好昭彦 : アルカリ骨材反応を抑制する新しい工法 AAR/Li 工法の概要と適用事例, セメント・コンクリート, No. 673, pp.26~33, 2003
- 25) M. Kawamura and T. Kodera : Effects of Externally Supplied Lithium on the Suppression of ASR Expansion in Mortars, Cement and Concrete Research, in press, available online, 2004

※ Reprinted with Permission from Elsevier