

リチウムイオンの供給方法の相違が ASR 膨張抑制効果に与える影響

江良 和徳^{*1}, 阪口 晃祐^{*2}, 山本 貴士^{*3}, 宮川 豊章^{*4}

The Difference in the ASR Expansion Control Effect by the Kind of the Supply Method of Lithium Ion

Kazunori ERA^{*1}, Kohsuke SAKAGUCHI^{*2}, Takashi YAMAMOTO^{*3} and Toyoaki MIYAGAWA^{*4}

要旨：リチウムイオンには ASR 膨張を抑制する効果が期待できる。既往の研究は、コンクリート練混ぜの段階でリチウム化合物を事前混入した実験的研究であることが多く、硬化したコンクリートにリチウム化合物を内部圧入した場合と比較した研究は少ない。そこでリチウム化合物をコンクリートに事前混入した場合と、硬化したコンクリートに内部圧入した場合とで ASR 膨張抑制効果にどのような違いが生じるのかについて、ASR 供試体による促進膨張試験によって検討した。また、リチウム化合物を内部圧入する際の、コンクリートの劣化状況と圧入のしやすさとの関係について考察した。

キーワード：ASR, リチウムイオン, 内部圧入, 事前混入

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応（以下、ASR と呼ぶ）を要因としたコンクリート中の鉄筋破断現象が報告されたこともあり、現在、アルカリシリカ反応は極めて注目を集めているコンクリート構造物の劣化機構であるといえる。ASR の補修工法のなかで、アルカリシリカゲルの非膨張化を目的としてリチウムイオンを使用する手法が注目されている^{1), 2)}。なかでも亜硝酸リチウムをコンクリート内部にまで急速に供給する補修工法として、亜硝酸リチウムを注入するリチウムイオン内部圧入工の実用化が進んでいる^{3), 4)}。リチウムイオン内部圧入工法は、コンクリート躯体に小径の削孔を行い、そこから亜硝酸リチウムを加圧注入してコンクリート内部に浸透させる工法である。リチウムイオン内部圧入

工における亜硝酸リチウム設計圧入量は、コンクリート中のアルカリ量に応じて Li/Na モル比 1.0 となる量として算定されることが多い⁵⁾。これは、既往の研究成果^{6), 7)}より ASR を抑制するために必要とされるリチウムイオン量を基に設定されたものである。しかし、リチウムイオンによる ASR 膨張抑制効果に関するこれら既往の研究は、コンクリート練混ぜの段階でリチウム化合物を事前混入した実験的研究であることが多く、硬化したコンクリートにリチウム化合物を内部圧入する場合に適用するための検討が十分になされているとはいえない。そこで、リチウム化合物をコンクリート練混ぜ段階で“事前混入”した場合と、硬化したコンクリートに“内部圧入”した場合とで ASR 膨張抑制効果にどのような違いが生じるのかについて、反応性

*1 極東興和株式会社 大阪支店技術部技術課 主任

*2 大成建設株式会社 名古屋支店

*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授

骨材を用いた ASR 供試体による促進膨張試験によって検討した。また、事前混入するリチウム化合物として亜硝酸リチウム、硝酸リチウムおよび水酸化リチウムの3種類とし、リチウム化合物の種類が ASR 膨張抑制効果に与える影響について検討した。さらに供試体にリチウム化合物を内部圧入する際の、コンクリートの劣化状況と圧入のしやすさとの関係について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体の配合と物性を表-1 に示す。使用したセメントは等価 Na_2O 量 0.53% の普通ポルトランドセメントであり、練混ぜ水は水道水を使用した。反応性骨材として、粗骨材、細骨材ともに北海道産の輝石安山岩を使用した。この骨材は、JIS A 5308「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法)」による溶解シリカ量 (Sc) およびアルカリ濃度減少量 (Rc) がそれぞれ 525 および 108mmol/l であり、無害でないと判定されたものである。また、この骨材の粉末 X 回折分析および鏡面研磨薄片による偏光顕微鏡観察の結果、トリディマイトとクリストバライトが検出された。非反応性骨材として、土山産砕石および野洲川産川砂を使用した。反応性粗骨材比率は既往の研究⁸⁾を参考にして 50% とした。反応性細骨材比率はペシマム試験により決定した。ペシマム試験は反応性粗骨材比率を 50% に固定し、反応性細骨材比率を 50%、60%、70% の 3 種類として実施し、最も膨張量の大きかった 70% のケースを採用した。添加アルカリ量は本実験に用いた反応性骨材を使用した供試体にて実績⁹⁾のある 8kg/m^3 (等価 Na_2O

量) とし、 NaCl にて練り混ぜ水に添加した。ASR 抑制剤として添加するリチウム化合物は亜硝酸リチウム (LiNO_2)、硝酸リチウム (LiNO_3) および水酸化リチウム (LiOH) の 3 種類とした。そのうち内部圧入工に使用する亜硝酸リチウムは、浸透性を阻害しない範囲で最も高濃度した 40% 水溶液とした。

実験に用いた供試体は $100\text{mm}\times\text{H}200\text{mm}$ の円柱供試体とし、膨張量測定のためにコンクリート表面にコンタクトチップを上面 2 個、側面 4 個の計 6 個設置した。本実験では表-2 に示すとおり、リチウム化合物を事前混入したケースと内部圧入したケースを設定し、それぞれリチウム化合物の添加量を変化させた。事前混入のケースでは、コンクリート練混ぜ時において Li/Na モル比 0.4、0.8、1.2 の 3 水準に相当するリチウム化合物を外割りで添加した。内部圧入のケースでは、供試体の ASR 膨張量が 1500μ を超えた時点を目安として、Li/Na モル比 0.4、0.6、0.7、0.8 の 4 水準に相当する亜硝酸リチウム 40% 水溶液を内部圧入した。

2.2 実験方法

表-2 に示す全供試体を打設し、28 日間の水中養生を行った後、ASR 膨張促進環境として温度

表-2 供試体種類

反応性骨材種類	リチウム化合物			
	添加方法	リチウム化合物の種類	添加量 (Li/Naモル比)	添加時期
安山岩 (北海道産) Andesite	添加なし			
	内部圧入	亜硝酸リチウム (LiNO_2)	0.4	ASR膨張量 1500μ を目安とする
			0.6	
			0.7	
			0.8	
	事前混入	亜硝酸リチウム (LiNO_2)	0.4	コンクリート練混ぜ時
			0.8	
			1.2	
		硝酸リチウム (LiNO_3)	0.8	
			水酸化リチウム (LiOH)	

表-1 供試体配合

反応性骨材種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						圧縮強度 (材齢28日) (MPa)	
					水 W	セメント C	細骨材		粗骨材			添加アルカリ NaCl
							反応性	非反応性	反応性	非反応性		
							Sr	Sn	Gr	Gn		
安山岩 (北海道産)	15	63	4.5	45.7	183	290	796 (Sr+Sn)		989 (Sr+Sn)		10.55	30.6
							574	239	493	495		

40 ,湿度 95%以上の高温高湿室に供試体を静置した。供試体の膨張促進期間中, 1 週間毎または 2 週間毎に膨張ひずみ, 動弾性係数, 超音波伝播速度および質量変化を計測した。また, 外観変状観察を併せて行った。表-2 中の内部圧入用供試体については, 膨張ひずみが概ね 1500μ を超えた時点で内部圧入を行った。内部圧入は, 供試体上面から, 直径 10mm, 深さ 150mm の圧入孔をダイヤモンドコアドリルにて削孔し, そこから亜硝酸リチウム 40%水溶液を油圧式加圧注入装置を用いて加圧注入した。注入圧力は 0.5MPa, 注入時間は 100 時間とした。内部圧入の実施時点では供試体表面に ASR によるひび割れが多数発生していたため, 亜硝酸リチウムがひび割れから漏出することを防止することを目的として供試体表面をエポキシ樹脂系表面被覆材にてシールした。内部圧入が完了し, 表面被覆材を完全に除去した後, 圧入孔を無収縮グラウト材にて充填し, 再度促進環境下に置いた。図-1 に内部圧入工の状況を示す。



図-1 内部圧入工状況

3. 結果と考察

3.1 内部圧入工による累計圧入量の推移

内部圧入は, 供試体の膨張量が概ね 1500μ を超えた時点を目安に実施した。このとき供試体表面には ASR 膨張によるひび割れが発生しており, 各供試体のひび割れ延長は 600 ~ 900mm, 最大ひび割れ幅は 0.1 ~ 0.3mm であった。内部圧入用の供試体全 7 体に対して亜硝酸リチウム 40%水溶液を内部圧入したときの, 注入時間と累計圧入量との関係を図-2 に示す。全

供試体に対し 0.5MPa の圧力で 100 時間連続で内部圧入工を実施したところ, 累計圧入量が Li/Na モル比 0.4 に相当する量に到達した供試体が 2 体, モル比 0.6 が 2 体, モル比 0.7 が 2 体, モル比 0.8 が 1 体という結果となった。

いずれのケースも圧入開始から 10 時間までの間は累計圧入量が線形的に増加しており, この間だけで最終的な圧入量のおよそ 50%の圧入量に到達していた。その後, 累計圧入量の増加が緩やかになっており, 圧入速度すなわち圧入のしやすさが低下したことを示す。圧入のしやすさが圧入開始から 10 時間経過した時点を超えて傾向を変えていることから, 内部圧入工による亜硝酸リチウム水溶液の主たる浸透経路がこの時点付近を超えて変化した可能性が考えられる。ASR で劣化したコンクリート中の亜硝酸リチウム水溶液の浸透経路としては, コンクリート内部の微細なひび割れ内の浸透, 連続空隙内の浸透, コンクリートマトリックス中への圧力勾配や濃度勾配による拡散, 骨材周辺への吸着などが考えられ, これらが複合的に関係していると推察される。まずコンクリート内部の微細なひび割れ内の浸透およびひび割れ周辺の連続空隙への浸透が支配的であるために圧入量が経過時間とともに急速に増加し, それらが飽和状態に達した後, 連続空隙を通じた浸透の進展およびコンクリートマトリックス中への拡散などに移行するために圧入量の増加が緩やかになった

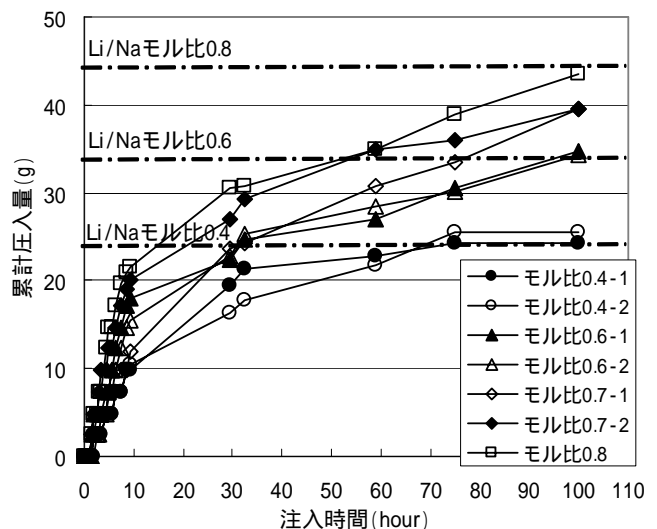


図-2 累計圧入量の推移

と推察される。

3.2 ASR による劣化状況と亜硝酸リチウム圧入量との関係

全供試体に対し圧力および時間を同一の条件で内部圧入したところ、図-2 に示したとおり累計圧入量が Li/Na モル比 0.4 から 0.8 となる量の範囲でばらつく結果となった。これは内部圧入時点における各供試体の ASR 劣化状況に影響を受けていると考えられる。ASR 劣化状況を示す指標として膨張量とひび割れ密度に着目し、圧入時の供試体の膨張量と累計圧入量との関係を図-3 に、圧入時の供試体のひび割れ密度と累計圧入量との関係を図-4 に示す。図-3 では、圧入時点の膨張量が 1500 ~ 2000 μ の供試体だけに着目しても、圧入量がモル比 0.4 から 0.8 まで分布しており、大きなばらつきが見られる結果となった。また図-4 では、ひび割れ密度が 0.9 ~ 1.3mm/cm² の供試体に対する圧入量がモル比 0.4 から 0.8 まで分布しており、図-3 と同様、

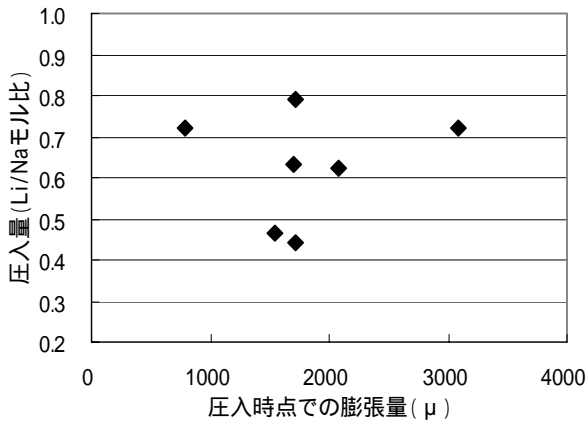


図-3 膨張量と圧入量との関係

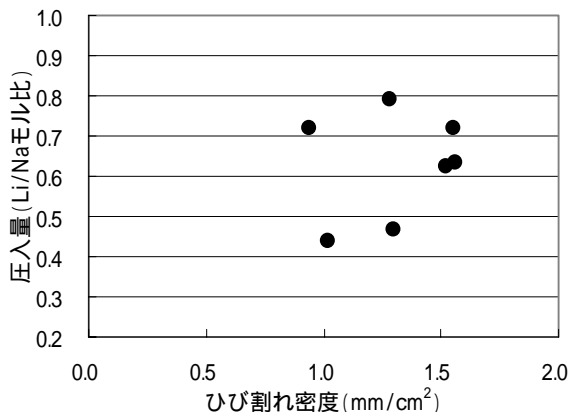


図-4 ひび割れ密度と圧入量との関係

大きなばらつきが見られる結果となった。

内部圧入工において、コンクリートの膨張量やひび割れの程度は、圧入量や圧入に要する時間を決定する大きな要因となると考えられる。しかし、コンクリート中の亜硝酸リチウムの浸透経路を考えると、コンクリート表面に現れているひび割れの密度よりも内部に発生しているひび割れの密度のほうがより大きな影響を与えると推察される。コンクリート表面に多大なひび割れが発生している場合、内部にも同様にひび割れが多く発生している場合も考えられるが、表面のひび割れで ASR 膨張力が開放されやすくなることにより、逆に内部のひび割れ進展は少ないということもあり得る。このように、表面のひび割れの状態と内部のひび割れの状態との関連性が明確でなく、必ずしも一致しないことがこのようなばらつきを生じさせた一因であると考えられる。

3.3 亜硝酸リチウム事前混入による ASR 抑制効果

コンクリート練混ぜ時に亜硝酸リチウムを事前混入した場合の促進期間と膨張量との関係を図-5 に示す。亜硝酸リチウムを添加していない供試体では促進開始から 142 日経過した時点から急激に膨張傾向を示し、217 日の時点でおおよそ 2500 μ の膨張量に達した。亜硝酸リチウムを Li/Na モル比で 0.4, 0.8, 1.2 となる量を事前混入した場合では、促進開始から 217 日経過した時点でいずれのケースも膨張傾向は現れておらず、亜硝酸リチウムの添加量による膨張抑制効果の違いも見られない。

促進期間と動弾性係数との関係を図-6 に示す。亜硝酸リチウムを添加していない供試体では促進開始から 104 日を境に動弾性係数が減少傾向に転じ、164 日経過した時点から急激に低下した。217 日の時点で促進開始時点の 75% にまで低下していた。亜硝酸リチウムを事前混入した場合では、促進開始から 217 日経過した時点でいずれのケースも動弾性係数の低下は見られていない。これは図-5 の膨張量の傾向が示す

ASR 進行状況と一致する結果である。

促進期間と超音波伝播速度との関係を図-7に示す。亜硝酸リチウムを添加していない供試体は促進開始から104日経過した時点から超音波伝播速度が減少傾向に転じたが、亜硝酸リチウムを事前混入した場合には、促進開始から217日経過した時点でいずれのケースも超音波

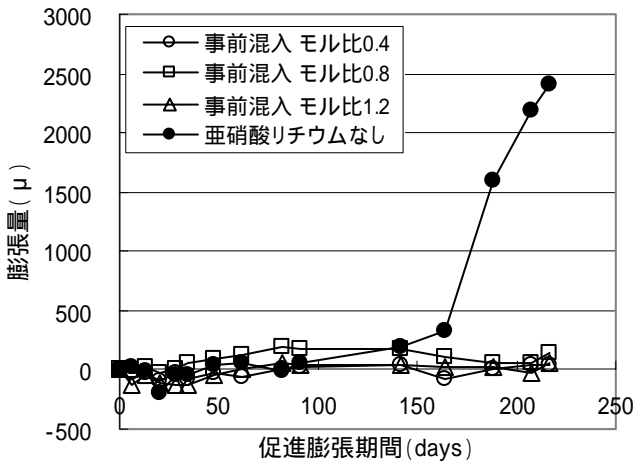


図-5 膨張量の推移（事前混入）

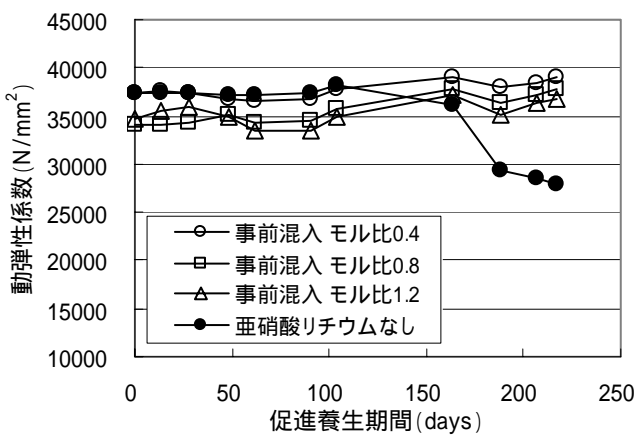


図-6 動弾性係数の推移（事前混入）

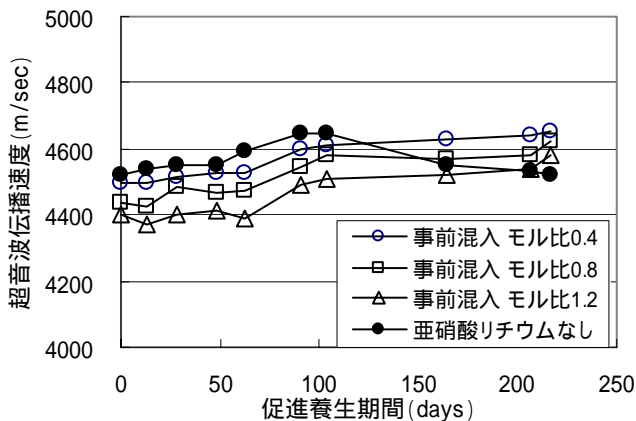


図-7 超音波伝播速度の推移（事前混入）

伝播速度の低下は現れていない。これも図-5が示す ASR 進行状況と一致する結果である。

本実験において、Li/Na モル比で 0.4, 0.8, 1.2 となる量の亜硝酸リチウムを事前混入した場合、いずれのケースでも ASR 膨張を生じておらず、亜硝酸リチウムの添加量による ASR 抑制効果の違いは見られていない。本実験の範囲内では亜硝酸リチウムを Li/Na モル比で 0.4 以上となる量を事前混入することにより、ASR 膨張を十分抑制することが可能であるといえるが、本実験の条件において ASR を抑制するために必要となる亜硝酸リチウム量は Li/Na モル比で 0.4 よりも小さい範囲であることも予測される。

3.4 亜硝酸リチウム内部圧入による ASR 抑制効果

内部圧入工は、供試体の膨張量が概ね 1500 μ に達した促進 188 日目に実施した。圧入した亜硝酸リチウム 40% 水溶液の量は Li/Na モル比で 0.4, 0.6, 0.8 となる量とした。内部圧入完了後、再度膨張促進環境に置いた。内部圧入工を実施した供試体の膨張量と促進期間との関係を図-8に示す。

亜硝酸リチウムを内部圧入した供試体の膨張傾向は、Li/Na モル比 0.4, 0.6, 0.8 のいずれの場合においても圧入時点を境に横ばいとなり、ASR 膨張の抑制効果が現れている。圧入後の膨張の推移を詳細に見ると、モル比 0.4 のケースでは内部圧入時点を境に膨張傾向の傾きは大幅に小さくなっているものの、膨張量は依然として微増傾向にある。それに対し、モル比 0.6 および 0.8 のケースでは、局所的に見れば内部圧入直後に若干の膨張傾向や収縮傾向が現れているものの、内部圧入時の膨張量と圧入完了から 123 日後における膨張量はほぼ同等であり、内部圧入工以後、供試体の膨張は進行していないことがわかる。

動弾性係数と促進期間との関係を図-9に示す。図-8に示すとおり、内部圧入工により ASR 膨張の進行が抑制されているため、それを境に動弾性係数の低下も横ばいになると予測された

が、供試体の ASR 進行と共に低下し続けていた動弾性係数が、亜硝酸リチウムを内部圧入した時点以降にモル比 0.4, 0.6, 0.8 のいずれのケースも増加傾向へ転じる結果となった。内部圧入工において、供試体に直径 10mm の圧入孔を深

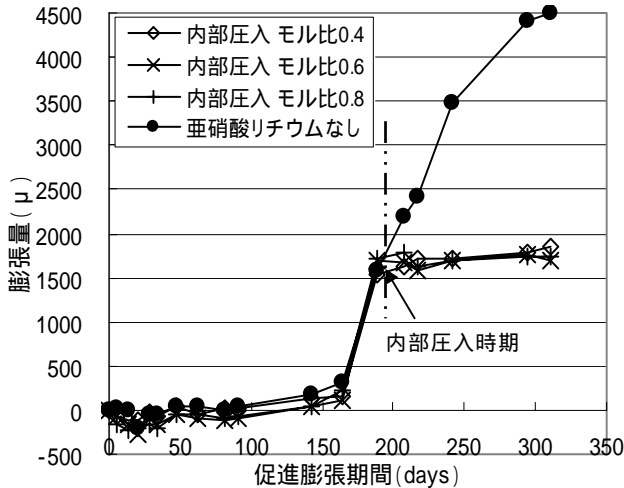


図-8 膨張量の推移 (内部圧入)

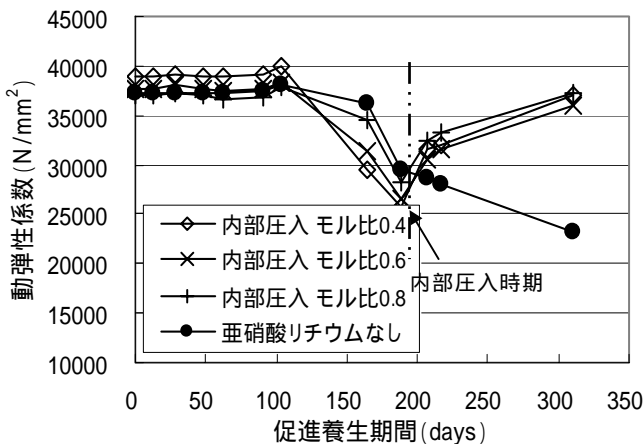


図-9 動弾性係数の推移 (内部圧入)

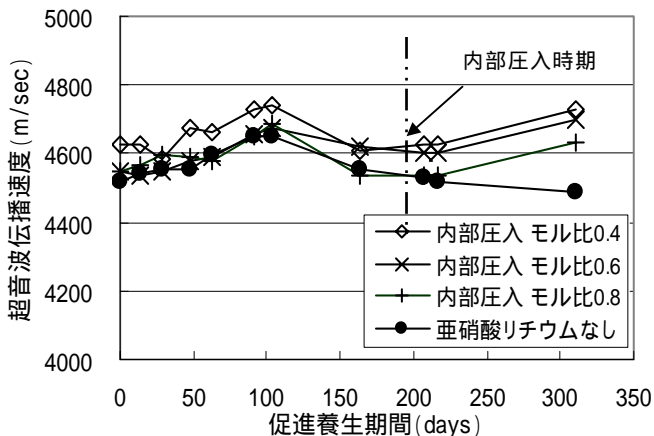


図-10 超音波伝播速度の推移 (内部圧入)

さ 150mm まで削孔し、圧入完了後に無収縮グラウト材にて充填するという工程が含まれる。このグラウト材の圧縮強度は 54.2N/mm^2 であり、供試体コンクリートに比べて高強度で密実な材料である。本実験における動弾性係数は縦振動による共鳴振動数の測定値から算出しており、供試体高さ 200mm のうち、深さ 150mm の範囲に充填されたグラウト材の硬化、強度発現が供試体の動弾性係数に影響を与えたものと考えられる。Li/Na モル比 0.4 から 0.8 の範囲において、亜硝酸リチウムの添加量による動弾性係数の変化の傾向に違いは見られていない。

超音波伝播速度と促進期間との関係を図-10 に示す。亜硝酸リチウムを内部圧入していない供試体は、207 日目の計測値から 311 日目の計測値にかけて低下しているが、亜硝酸リチウムを内部圧入した供試体は、圧入後の計測値に増加傾向へと転じている。これも動弾性係数の結果と同様に、圧入孔充填のグラウト材の影響が考えられる。Li/Na モル比 0.4 から 0.8 の範囲において、亜硝酸リチウムの添加量による超音波伝播速度の変化の傾向に違いは見られていない。

3.5 亜硝酸リチウムの供給方法が ASR 抑制効果に与える影響
 亜硝酸リチウムを事前混入した場合と内部圧入した場合における促進期間と膨張量との関係を図-11 に示す。亜硝酸リチウムを事前混入した場合、Li/Na モル比で 0.4 となる量で ASR 膨張を十分抑制していることがわかる。さらに、本実験の条件において ASR を抑制するためにひとつよとなる亜硝酸リチウム量はモル比 0.4 よりも小さい範囲であることが予測される。それに対し、亜硝酸リチウムを内部圧入した場合、Li/Na モル比 0.4 となる量では圧入後の膨張量は依然として微増傾向を示し、モル比 0.6 以上で ASR 膨張を十分抑制できる結果となった。このことから、反応性骨材、アルカリ量、促進環境が同一条件のコンクリートであっても、亜硝酸リチウムの供給方法を事前混入とするか内部圧入とするかによって、ASR 膨張を抑制するため

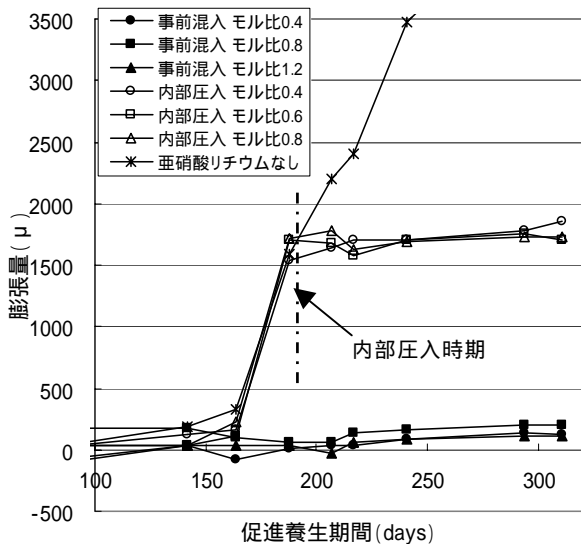


図-11 事前混入および内部圧入における膨張量の推移

の必要量が異なることがわかる。

リチウムイオンのASR抑制メカニズムを Na^+ と Li^+ とのイオン交換によるゲルの化学組成変化によるものと仮定すると、亜硝酸リチウムを事前混入した場合、リチウムイオン存在下のコンクリート中で骨材周囲にアルカリシリカゲルが生成し、それが吸水膨張する前にリチウムと反応して非膨張性ゲルへと変質したと推察される。それに対し亜硝酸リチウムを内部圧入した場合には、コンクリート中で生成したアルカリシリカゲルが十分に吸水膨張し、コンクリートに膨張を生じさせた段階でリチウムイオンを供給することとなる。このためリチウムの作用対象となるアルカリシリカゲルの生成量、比表面積も大きく、事前混入の場合よりも多くのリチウムイオン量が必要となると推察される。また、事前混入ではリチウムイオンを満遍なくコンクリート中に分布させることができるのに対し、内部圧入ではコンクリート全体へのリチウムイオンの均一な浸透が容易でなく、供給効率が劣ることも必要リチウム量を増大させている要因となっていると考えられる。

現段階では内部圧入完了後の促進期間123日分のデータしか採取できていないため、今後さらに測定データを蓄積し、内部圧入後の長期間における膨張挙動について評価する必要がある

と考える。

3.6 リチウム化合物の種類がASR抑制効果に与える影響

コンクリート練混ぜ時に亜硝酸リチウム、硝酸リチウムおよび水酸化リチウムをそれぞれLi/Naモル比0.8となる量を事前混入した場合の促進期間と膨張量との関係を図-12に示す。促進開始から311日経過した時点でいずれのリチウム化合物のケースも膨張傾向は現れておらず、リチウム化合物の種類による膨張抑制効果の違いも見られない。次に、促進期間と動弾性係数との関係を図-13に示す。図-12に示された膨張量の傾向と同様に、促進開始から311日経過した時点でいずれのリチウム化合物のケースも動弾性係数の低下は見られていない。

硝酸リチウムはASR膨張抑制剤としての使用実績が多い⁷⁾が、水酸化リチウムはASRを促進する可能性があることが指摘されている。し

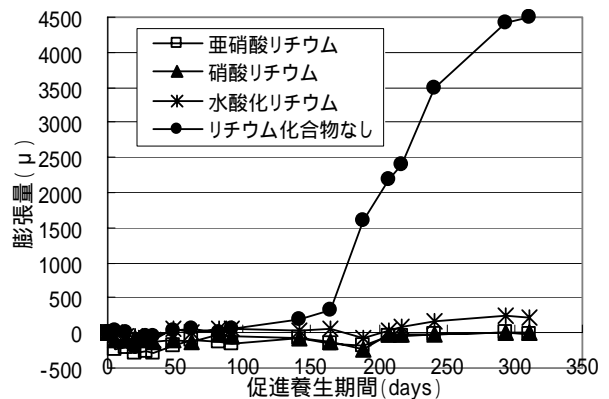


図-12 各リチウム化合物事前混入時の膨張量の推移

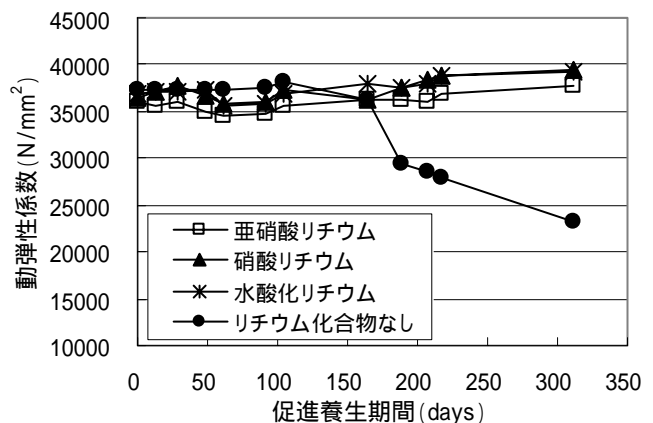


図-13 各リチウム化合物事前混入時の動弾性係数の推移

かし本実験の結果からは水酸化リチウムによる ASR 膨張の促進傾向はみとめられない。図-5より,本実験の条件において ASR 膨張抑制に必要となる亜硝酸リチウム量は Li/Na モル比で 0.4 よりも小さい範囲であることが予測されるため,硝酸リチウムおよび水酸化リチウムのケースでも同様と考えられる。しかし本実験では各リチウム化合物の添加量を Li/Na モル比で 0.8 のみとしており,各リチウム化合物の ASR 抑制に必要となる量よりも高い添加量で比較しているものと考えられ,リチウム化合物の種類による膨張抑制効果の違いが明確に現れていない可能性が考えられる。

4. 結論

本研究での範囲内で以下の知見が得られた。

- (1)ASR で劣化したコンクリートに亜硝酸リチウム水溶液を内部圧入したとき,圧入開始から 10 時間経過した時点まで境に圧入のしやすさが変化した。この時点の前後では亜硝酸リチウムの主たる浸透経路が異なる可能性が考えられる。
- (2)内部圧入のしやすさはコンクリート内部の劣化状況に大きく影響を受けると考えられ,コンクリート表面に現れている劣化状況からの評価ではばらつき幅が大きくなる。
- (3)亜硝酸リチウムを事前混入した場合, Li/Na モル比で 0.4 以上となる量で ASR 膨張を十分抑制できた。それに対し,亜硝酸リチウムを内部圧入した場合,モル比 0.4 となる量では圧入後の膨張量は依然として微増傾向を示し,モル比 0.6 以上で ASR 膨張を十分抑制できる結果となった。同一条件のコンクリートであっても,亜硝酸リチウムの供給方法を事前混入とするか内部圧入とするかによって,ASR 膨張を抑制するための必要量が異なる。
- (4)亜硝酸リチウム,硝酸リチウム,水酸化リチウムの 3 種類のリチウム化合物を Li/Na モル比で 0.8 となる量で事前混入した場合,いずれの場合も ASR 膨張を十分に抑制でき,リチウム化合物の種類による ASR 膨張抑制効果に差異は

見られていない。

参考文献

- 1)土木学会：コンクリートライブラリー124 アルカリ骨材対策小委員会報告書, 2005
- 2)関西道路研究会：道路橋調査研究委員会新材料・新構造に関する研究小委員会コンクリート構造分科会報告書,ASR を起こしたコンクリート構造物への対応, 2007
- 3)金好昭彦, 内田博之, 狩野裕之：大型コンクリート部材におけるリチウムの ASR 抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.403-408, 2001
- 4)江良和徳, 岡田繁之, 三原孝文, 河原健児：亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応抑制効果の検証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.5, pp.189-194, 2005
- 5)江良和徳, 為石昌宏, 三原孝文, 宮川豊章：リチウムイオンを内部圧入する場合の注入圧力と注入時間に関する考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.7, pp.161-166, 2007
- 6)齊藤満, 北川明雄, 榎場重正：亜硝酸リチウムによるアルカリ骨材膨張の抑制効果, 材料, Vol.41, No.468, pp.1375-1381, 1992
- 7)C.Tremblay, M.A.Berube, B.Fournier, M.D.A.Thomas, Effectiveness of Lithium-Based Products in Concrete Made with Canadian Aggregates Susceptible to ASR, Marc-Andre Berube symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete, pp.217-240, 2006
- 8)阪神高速道路公団, 日本材料学会：アルカリ骨材反応橋脚の維持管理に関する調査研究業務報告書, 2004
- 9)大久保孝, 真鍋英規, 井隼俊也, 宮川豊章：ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状評価に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.5, pp.179-184, 2005