

報告 リチウムイオン内部圧入工を施工した構造物の長期耐久性について

江良 和徳^{*1}， 徳納 武使^{*2}， 峯松 昇司^{*3}， 宮川 豊章^{*4}

Study on the Long-term Durability of Lithium Ion Pressurized Injection

Kazunori ERA^{*1}, Takeshi TOKUNO^{*2}, Shoji MINEMATSU^{*3} and Toyoaki MIYAGAWA^{*4}

要旨：既往の研究により，ASR劣化したコンクリートにリチウムイオンを内部圧入することによって以後のASR膨張が抑制されることが示されている．しかし，得られたASR抑制効果が長期間持続していることを実構造物にて検証した事例は少ない．そこで本報告では，リチウムイオン内部圧入工を施工して4～5年経過したコンクリート構造物の外観変状調査を実施し，ASR再劣化が生じていないことを確認した．また，施工対象構造物からコアを採取して残存膨張量試験を行い，施工前，施工直後および施工後4年経過時における試験結果を比較することによって，ASR抑制効果が持続していることを定量的に確認した．

キーワード：ASR，リチウムイオン，内部圧入，追跡調査，残存膨張量

1. はじめに

リチウムイオン内部圧入工は，亜硝酸リチウムによるゲルの非膨張化を目的とした ASR 補修工法であり，その ASR 抑制メカニズムはゲル中の化学反応によるものと考えられる¹⁾．反応性骨材を用いた ASR コンクリートまたは ASR モルタルにリチウム化合物を事前混入することにより ASR 膨張が抑制されることは，既往の研究²⁾によって数多く確認されている．また，ASR により劣化したコンクリート供試体にリチウムイオンを内部圧入した場合でも，圧入後のコンクリートは ASR 膨張が抑制されることが実験的研究にて確認されている³⁾．

このリチウムイオン内部圧入工を ASR により劣化したコンクリート構造物の補修対策として適用するにあたり，本工法の適用による ASR 抑制効果を施工後の実構造物にて確認するとと

もに，その ASR 抑制効果が長期間持続していることを検証することが重要である．しかし，リチウムイオン内部圧入工を施工した構造物において，ASR 抑制効果が長期間持続していることを検証した事例は少ない．そこで本報告では，リチウムイオン内部圧入工を施工した供用中の橋台，橋脚および擁壁において，まず施工前と施工後の残存膨張量を比較して，本工法による ASR 抑制効果を確認した．またその際に，残存膨張量の試験方法 (JCI-DD2 法およびカナダ法) の相違がリチウムイオンによる ASR 抑制効果の評価精度に与える影響について検討した．次いでリチウムイオン内部圧入工を施工して 4～5 年経過したコンクリート構造物の外観変状調査および残存膨張量試験 (JCI-DD2 法) を行い，本工法による ASR 抑制効果の長期耐久性について検討した．

*1 極東興和株式会社 事業本部事業推進部補修課 主任

*2 福德技研株式会社 代表取締役 社長

*3 井上建設株式会社 営業本部企画課 課長

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授

2. 検討概要

2.1 検討対象構造物

検討の対象とした構造物は、いずれも竣工後30年程度経過し、現在も供用中の橋台、橋脚および擁壁である。これらの構造物の詳細調査が行われた結果、ASRによる劣化と判定され、2004年から2005年にかけてリチウムイオン内部圧入工が施工された。いずれの構造物もコンクリート中のアルカリ総量試験結果を基に、 $[\text{Li}^+]/[\text{等価 Na}^+]$ モル比 1.0 となる量の亜硝酸リチウムを 0.5~1.2MPa の圧力で内部圧入した。表-1 に対象構造物の概要と検討項目を示す。

2.2 検討方法

(1) 残存膨張量試験

残存膨張量試験は将来的な ASR 膨張の可能性を示す試験であるため、リチウムイオン内部圧入工を適用し、ASR 膨張が抑制されたコンクリートでは残存膨張量も低減されているはずである。そこで、リチウムイオン内部圧入工による ASR 抑制効果を定量的に確認するために、表-1 の A 施設内擁壁において、施工前、施工後に残存膨張量試験を実施した。

残存膨張量試験方法は促進環境を 40℃、95%RH とする JCI-DD2 法および促進環境を

80℃、1N NaOH 溶液浸せきとするカナダ法の2種類とし、JCI-DD2 法に用いるコアはφ100×L250mm、カナダ法に用いるコアはφ50×L150mm のサイズで対象構造物からダイヤモンドコアドリルにて採取した。施工前のコア採取時期は内部圧入工を行う2週間~4週間前、施工後のコア採取時期は内部圧入作業完了の1週間~2週間後とした。

JCI-DD2 法による 40℃、RH95%条件下での測定は、コアの基長測定後、まず温度 20℃、相対湿度 95%の条件下で約2週間の標準養生を行い、その間の膨張ひずみを測定して開放膨張量とした。その後、温度 40℃、相対湿度 95%の条件下で13週間の促進養生を行い、その間の膨張ひずみを測定して残存膨張量とした。

カナダ法による 80℃、1N NaOH 溶液浸せき条件下での測定は、80℃の温水中に24時間保ち、80℃における基長を測定した後、80℃、1N の NaOH 溶液中に浸せきして28日間の促進養生を行い、その間の膨張ひずみを測定した。

(2) 外観変状追跡調査

表-1 中の K 高架橋橋脚および S 橋橋台に対して外観変状追跡調査を行い、リチウムイオンを内部圧入して4~5年経過した段階での外観

表-1 対象構造物の概要と検討項目

名称	K 高架橋橋脚	S 橋橋台	A 施設内擁壁
施工状況			
概要	広島県（2004年施工） ・亜硝酸リチウム圧入量 24.8kg/m ³ ・反応性骨材 砂岩(詳細不明) ・圧入後の経過年数 5年	香川県（2005年施工） ・亜硝酸リチウム圧入量 19.7kg/m ³ ・反応性骨材 安山岩(詳細不明) ・圧入後の経過年数 4年	岡山県（2005年施工） ・亜硝酸リチウム圧入量 23.5kg/m ³ ・反応性骨材 古銅輝石安山岩 ・圧入後の経過年数 4年
検討項目	【ASR抑制効果の長期耐久性】 外観変状追跡調査	【ASR抑制効果の長期耐久性】 外観変状追跡調査	【ASR抑制効果】 残存膨張量の比較 (JCI-DD2法, カナダ法) 【ASR抑制効果の長期耐久性】 残存膨張量(JCI-DD2法)

変状の有無，ASR 再劣化の兆候の有無などについて確認を行った．K 高架橋は表面に柔軟型ポリウレタン樹脂による表面保護工が施工されているため，表面保護材表面における変状の有無を確認した．一方，S 橋では，コンクリート表面に表面保護工を施していないため，コンクリート表面の状況を直接確認した．

3. リチウムイオン内部圧入による ASR 抑制効果

A 施設内擁壁の施工前後で採取したコア試料を用いて，JCI-DD2 法とカナダ法の両方の残存膨張量試験を実施し，リチウムイオン内部圧入による ASR 抑制効果を確認するとともに，両試験方法における施工前後の膨張傾向の表れ方について比較検討を行った．

まず，JCI-DD2 法（40℃，95%RH）での試験結果を図-1 に示す．全膨張量を見ると，施工前は 0.081% を示したのに対し，施工後は 0.018% となり，施工前に比べて 22.2% にまで低下していた．残存膨張量で比較すると，施工前は 0.052%，施工後は 0.014% であり，施工前に比べて 26.9% にまで低下していた．将来的な膨張の可能性を表す残存膨張量が施工後に 26.9% にまで低減されており，その値も JCI-DD2 法の判定基準のひとつである 0.05% を下回っているため，リチウムイオン内部圧入工による ASR 抑制効果が得られていると判断できる．

次に，同じ施設内擁壁におけるカナダ法（80℃，1N NaOH 溶液浸せき）での試験結果を図-2 に示す．施工前コアの膨張率は，14 日で 0.161%，21 日で 0.215%，28 日で 0.256% を示した．それに対し，施工後のコアは 14 日で 0.073%，21 日で 0.091%，28 日で 0.110% の膨張率を示した．施工前後で比較すると，施工後のコア試料の膨張率は，14 日で施工前の値の 45.3%，21 日で 42.3% にまで低下しており，リチウムイオン内部圧入工により以後の ASR 膨張の可能性が低減していることが示されている．

図-1 に示した JCI-DD2 法の結果と図-2 に示したカナダ法の結果を比べてみると，どちらの

試験方法においても施工前の膨張率に比べて施工後の膨張率は低下している．ここで，図-1 をみると施工後の全膨張量は 13 週で 0.05% という基準値を大きく下回っている．一方，図-2 をみると，カナダ法の判定基準のひとつである 21 日で 0.1% という基準値⁴⁾に対し，施工後の 21 日目の膨張ひずみが 0.091% と基準値より若干小さいのみである．さらに，28 日目の膨張ひずみは 0.1% を超え，0.110% を示している．このカナダ法による残存膨張量試験結果だけをみると，リチウムイオン内部圧入工による ASR 膨張抑制効果が十分に得られていないと判断してしまうことも考えられる．

JCI-DD2 法とカナダ法による残存膨張量試験結果で，このような膨張傾向の表れ方の相違が見られたのは，主にカナダ法の促進環境に起因するものと考えられる．カナダ法の促進環境は外部から強制的に強アルカリである NaOH を供給するものである．NaOH 溶液中にコアを浸せきすることによって，コンクリート内部の $[Na^+]$ 含有率が増大する．ここで，リチウムイオン内部圧入工による ASR 抑制効果は，コンクリート

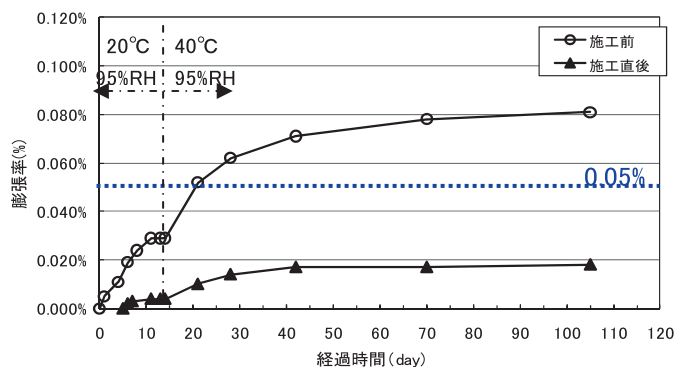


図-1 JCI-DD2 法による残存膨張量

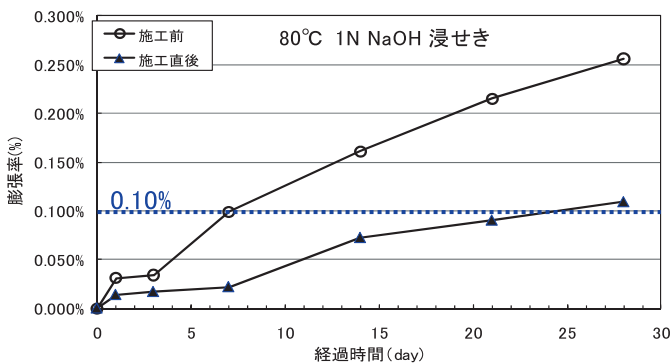


図-2 カナダ法による残存膨張量

中の[等価 Na^+]と圧入した[Li^+]とのイオンバランスに影響を受ける。図-1 の JCI-DD2 法の結果は、内部圧入が完了し、ゲル中での[Na^+]と[Li^+]のイオン交換によりゲルが非膨張化され、以後の ASR 膨張が抑制された状態を表していると考えられる。それに対し、図-2 のカナダ法の結果は、一旦は膨張性を失ったコンクリートに NaOH が供給されたことにより、[等価 Na^+]と[Li^+]のイオンバランスが崩れて再び膨張傾向を示し出した状態を表していると推察される。

反応性骨材の種類によっては、ASR で劣化したコンクリート構造物の残存膨張性を評価する際のカナダ法の適用性は高いと考えられるが、リチウムイオン内部圧入工による ASR 膨張抑制効果を評価する場合にはカナダ法よりも JCI-DD2 法のほうが適していると考えられる。

4. ASR 抑制効果の長期耐久性

4.1 外観目視調査結果

(1) K 高架橋橋脚の調査結果

K 高架橋橋脚の施工前（2004 年 5 月）と施工後 5 年経過時（2009 年 5 月）の状況を図-3 に示

す。施工前の変状としては、橋脚はり部に幅 0.5 ～5.0mm のひび割れが多数見られ、はり上縁部および下縁部の鉄筋曲げ加工部には鉄筋破断も認められた。施工後 5 年の外観状況をみると、コンクリート表面に施してある柔軟型ポリウレタン樹脂系表面保護材の表面の膨れや割れなど、ASR の再劣化またはその前兆とみなせるような外観変状は認められなかった。

本橋脚はリチウムイオン内部圧入工の施工よりも以前に表面保護工による ASR 補修がなされており、そのわずか数年後に ASR 再劣化が生じた履歴をもつ。このように本橋脚は ASR 膨張の進行が速いコンクリートであったが、リチウムイオンを内部圧入して 5 年経過した時点でも ASR 抑制効果は持続していると考えられる。

(2) S 橋橋台の調査結果

S 橋橋台の施工前（2005 年 9 月）と施工後 4 年経過時（2009 年 8 月）の状況を図-4 に示す。施工前の変状としては、亀甲状のひび割れが多数発生しており、ひび割れの一部からは漏水が見られていた。また、橋台支承面や背面からの水分がコンクリート内部およびひび割れを通じ

【施工前(2004 年 5 月撮影)】



【施工後 5 年経過(2009 年 5 月撮影)】



図-3 K 高架橋橋脚 施工前状況と施工後 5 年経過時の状況

【施工前(2005 年 9 月撮影)】



【施工後 4 年経過(2009 年 8 月撮影)】



図-4 S 橋橋台 施工前状況と施工後 4 年経過時の状況



図-5 ひび割れ注入跡の状況

て橋台前面側へと浸透している状況が見られていた。

本橋台の補修工事では、亜硝酸リチウムを内部圧入した後のコンクリート表面に表面保護工を施していないため、4 年経過した時点でのコンクリート表面の状況を直接確認することができる。本橋台のコンクリート表面を入念に近接目視調査した結果、ASR 再劣化またはその前兆とみなせるような外観変状は認められなかった。

橋台前面に見られるひび割れ注入跡を図-5 に示す。これは亜硝酸リチウムを内部圧入する前処理として幅 0.2mm 以上のひび割れに超微

粒子セメント系ひび割れ注入材を注入した痕跡である。この注入材はひび割れ追従性を持たない材料であるが、このひび割れ注入跡付近は健全な状態が保たれていた。

橋台側面の施工範囲と未施工範囲の境界付近の状況を図-6 に示す。未施工部分には幅 2.0mm 程度のひび割れが見られたが、施工範囲には新たなひび割れなどの変状は見られない。これらの結果から、リチウムイオン内部圧入工を施工してから現在までの4年間でASRの進行を伺わせるような変状やその兆候は認められず、リチウムイオン内部圧入工による ASR 抑制効果は持続しているものと判断することができる。



図-6 施工境界付近の状況

4. 2 施工 4 年後の残存膨張量試験結果

A 施設内擁壁における施工前、施工直後および施工後 4 年経過時の残存膨張量試験結果 (JCI-DD2 法) を図-7 に示す。図-1 でも示したとおり、施工前と施工直後を比較すると、施工直後においてリチウムイオン内部圧入による ASR 抑制膨張効果が得られていたと判断することができる。

次に、施工直後と施工後 4 年経過時に着目して両者の膨張傾向を比較する。全膨張量を見ると、施工直後で 0.018% を示していたのに対し、施工後 4 年経過時では 0.026% と若干高い数値を示した。ただし、13 週で 0.05% という JCI-DD2 法の基準値を大きく下回っているとともに、施工前の値 0.081% と比べると、施工後 4 年経過しても 32.1% にまで低減された状態を維持しており、依然として高い ASR 膨張低減効果が持続していると判断することができる。

リチウムイオン内部圧入施工後の残存膨張量が低減されている状態とは、コンクリート内部のアルカリシリカゲルがリチウムイオンによって非膨張化され、以後の ASR 膨張進行の可能性が低減された状態を指すものと考えられる。リチウムイオンによって一旦非膨張化されたゲルは、 $[Na^+]$ と $[Li^+]$ とのイオンバランスが急激に変化しない限り、再び膨張性を獲得することはないと推察される。このことからリチウムイオン内部圧入工を施工した構造物は、基本的に

ASR による再劣化を引き起こす可能性は低いと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で、以下の知見が得られた。

- (1) リチウムイオン内部圧入工を適用した構造物にて JCI-DD2 法とカナダ法により残存膨張量を測定した結果、カナダ法ではリチウムによる ASR 抑制効果を十分に評価できない可能性が示された。
- (2) 施工後 4~5 年経過した橋台、橋脚の外観目視調査を行った結果、ASR の再劣化を伺わせるような変状やその兆候は認められなかった。
- (3) 施工前、施工直後および施工後 4 年経過した擁壁において JCI-DD2 法による残存膨張量試験を実施した結果、施工 4 年後の残存膨張量は施工直後の残存膨張量 (施工前よりも低減されている値) と同程度で維持されていた。

参考文献

- 1) 江良和徳, 三原孝文, 山本貴士, 宮川豊章 : リチウムイオンによる ASR 膨張抑制効果に関する一考察, 材料, Vol.58, No.8, pp.697~702, 2009
- 2) 例えば, 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
- 3) 江良和徳, 三原孝文, 岡田繁之, 宮川豊章 : リチウムイオン内部圧入によるアルカリシリカ反応対策について, 材料, Vol.57, No.10, pp.993~998, 2008
- 4) Katayama, T, Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S., and Hira, T. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japa, Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122, 2004

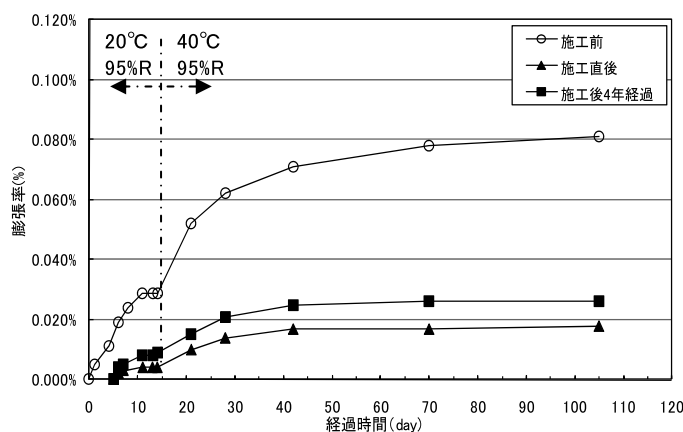


図-7 A 施設内擁壁の残存膨張量試験 (JCI-DD2 法)