

リチウムイオン内部圧入工によるアルカリシリカ反応対策について[†]

江 良 和 徳* 三 原 孝 文**
岡 田 繁 之** 宮 川 豊 章***

Controll of Alkali-Silica Expantion by Lithium Ion Pressurized Injection Method

by

Kazunori ERA*, Takafumi MIHARA**, Shigeyuki OKADA** and Toyoaki MIYAGAWA***

Recently, lithium ion pressurized injection method has been spotlighted as the repair method of concrete structure which deteriorated by ASR. In applying this method to established structures, it is important to set up suitable pressure and suitable period according to the degradation grade of concrete. Then, it considered that the fall of compressive strength or modulus of elasticity was the degradation grade of concrete, and authors proposed the calculation formula which presumes a injection period from compressive strength or modulus of elasticity. This method was applied to the retaining wall. After applying this method to the retaining wall, the concrete core was extracted and the promotion expansion examination was carried out. Consequently, it was shown by injecting in lithium ion in suitable pressure and a suitable period that the effect which controls expansion is expectable.

Key words : ASR, Lithium nitrite, Pressurized injection, Injection period, Residual expansion

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亜硝酸リチウムを使用する手法が注目されている。¹⁾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。^{2), 3)}リチウムイオン内部圧入工は、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。

本稿では、先ずこれまでのリチウムイオン内部圧入工の施工実績により得られたデータに基づき、構造物の劣化程度と注入時間との関係を整理する。次いでリチウムイオン内部圧入工によるASR補修設計を行う際の設計注入時間の算定方法を提案する。さらに本工法を適用した実構造物におけるASR抑制効果の検証を行った結果について報告する。

2 リチウムイオン内部圧入工の設計注入時間

2・1 注入に要する時間の傾向

反応性骨材を使用して作製したモルタルバー供試体に亜硝酸リチウムを添加する場合、ASR膨張抑制効果を得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以上となる量であったと報告されている。⁴⁾これをリチウムイオン内部圧入工に適用する場合には、現場で

の施工誤差や不確実性、表面への漏出によるロスなどを考慮し、亜硝酸リチウムの設計注入量をLi/Naモル比1.0となる量として算出されている。³⁾対象構造物へ亜硝酸リチウム設計注入量を注入完了するまでに要する時間（以下、設計注入時間と呼ぶ）を推定することは、工期設定や工事費積算、工程管理などにおいて重要であるが、注入に要する時間はASRの劣化程度によって影響を受けると考えられるため、これまで精度よく推定することが容易ではなかった。そこで、本工法を適用した実構造物10件の施工データより、注入に要する時間の傾向を分析した。検討の対象とした構造物は、道路構造物として供用中の擁壁、橋脚、橋台で、いずれも昭和50年代に竣工した構造物である。全ての構造物において亀甲状または水平方向のひび割れが見られ、また一部には白色ゲルの滲出が見られるなど、ASRに特有の外観変状を呈していた。亜硝酸リチウムの注入圧力は全て0.5MPaとした。これらの構造物における施工データとして、コンクリート物性（圧縮強度、静弾性係数）および亜硝酸リチウムの注入に要した時間をまとめたものをTable 1に示す。

圧縮強度および弾性係数の低下をASRによるコンクリートの劣化程度の指標と考え、Table 1の結果をもとにASRによるコンクリートの劣化程度と亜硝酸リチウムの注入に要した時間との関係をFig. 1およびFig. 2に示した。ここで、これまでの実施工における注入に要した時間は、同一構造物でも圧入孔毎に大きくばらつくことがあり、全体の1~2%にあたる圧入孔のみ突出して長時間を要する状況が見られた。そこで、注入に要する時間

† 原稿受理 平成20年2月19日 Received Feb. 19, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 橋東興和㈱大阪支店 〒532-0004 大阪市淀川区西宮原, Kyokuto kowa Co., Ltd., Yodogawa-ku, Osaka, 532-0004

** 橋東興和㈱技術本部 〒532-0052 広島市東区光町, Kyokuto kowa Co., Ltd., Higashi-ku, Hiroshima, 732-0052

*** 正 会 員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Dept. of Civil and Earth Resources Eng., Kyoto Univ., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

Table 1 Injection period by lithium ion pressurized injection method.

| | Compressive strength (N/mm ²) | Modulus of elasticity (N/mm ²) | Average injecting period (hour) | Standard deviation Sd (hour) | Average + 1.645Sd (hour) | Quantity of LiNO ₂ per hole (m ³) | Actual injection period (hour/m/Liter) |
|-----------|--|---|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---|---|
| Wall No.1 | 25.6 | 9 176 | 338 | 211 | 685 | 1.06×10 ² | 92.0 |
| Wall No.2 | 16.2 | 6 400 | 31 | 25 | 72 | 1.06×10 ² | 9.63 |
| Wall No.3 | 16.6 | 7 081 | 93 | 60 | 192 | 1.13×10 ² | 24.4 |
| Wall No.4 | 18.4 | 5 799 | 38 | 29 | 85 | 1.13×10 ² | 10.8 |
| Wall No.5 | 23.4 | 11 231 | 320 | 139 | 549 | 1.13×10 ² | 69.7 |
| Wall No.6 | 32.2 | 17 563 | 420 | 154 | 673 | 1.13×10 ² | 85.5 |
| Wall No.7 | 34.6 | 18 695 | 317 | 158 | 578 | 1.13×10 ² | 73.4 |
| Wall No.8 | 28.7 | 19 294 | 279 | 137 | 505 | 1.13×10 ² | 64.1 |
| Pier | 24.4 | 10 816 | 85 | 55 | 176 | 1.94×10 ² | 5.04 |
| Abutment | 17.7 | 9 818 | 93 | 94 | 248 | 4.93×10 ³ | 39.9 |

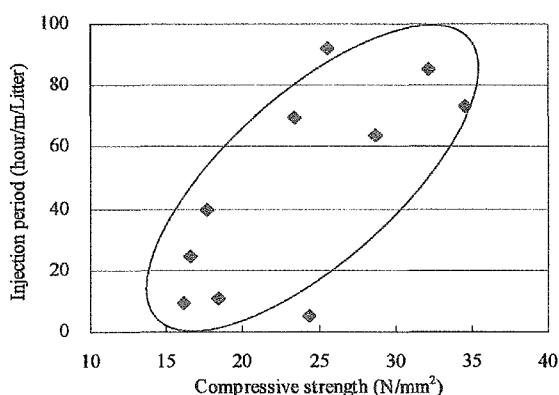


Fig. 1 Relation between compressive strength and injection period.

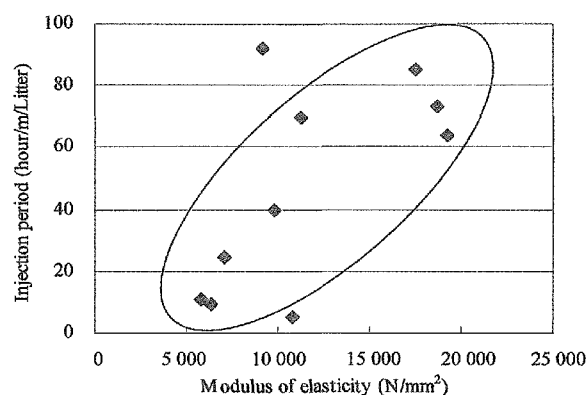


Fig. 2 Relation between modulus of elasticity and injection period.

の傾向を整理する上でこれらの突出点を除外するために、注入が95%の確率で完了する時間（平均注入時間+1.645 Sd）を注入に要する時間として採用した。また、部材厚やアルカリ量による圧入孔1孔あたりの亜硝酸リチウム注入量の相違を補正するために、平均部材厚 (m) と亜硝酸リチウム量 (Liter) で除した値で整理した。Fig. 1 および Fig. 2 より、亜硝酸リチウムの注入に要する時間は、ASRにより劣化したコンクリートの圧縮強度あるいは静弾性係数が大きいほど長くなっており、概ね線形性が見られる。これは、亜硝酸リチウムの主たる浸透経路がコンクリート中の微細なひび割れや連続空隙であることに起因すると推察される。

2・2 設計注入時間の定式化

コンクリート中へ亜硝酸リチウムを注入する場合、単位量あたりの注入に要する時間（注入のしやすさ）はコンクリートの劣化程度によって影響を受ける。そこで、亜硝酸リチウムの注入のしやすさに関するパラメータを k_α とし、設計注入時間 t を式 (1)～式 (3) のように表した。

$$t = Q/q \quad (1)$$

$$q = F(k_\alpha) \quad (2)$$

$$k_\alpha = h(f'_c) \text{ または } h(E_c) \quad (3)$$

ここに、 t : 設計注入時間、 Q : 圧入孔1孔あたりに圧入する亜硝酸リチウム量、 q : 時間あたりの注入量、 $F(k_\alpha)$:

時間あたりの注入量を求める関数、 k_α : 亜硝酸リチウムの注入のしやすさに関するパラメータ、 $h(f'_c)$, $h(E_c)$: k_α を求める関数、 f'_c , E_c : ASRにより劣化したコンクリートの劣化程度の指標（圧縮強度、静弾性係数）である。

これまでの本工法の施工における注入管理の経験から、亜硝酸リチウムを注入開始して15分～30分経過した後は、時間あたりの注入量はほぼ一定となる傾向を確認している。すなわち、亜硝酸リチウムの注入においては概ね定圧、定流量の浸透となっていると推測することができる。そこで、亜硝酸リチウムの時間あたりの注入量 q は井戸の揚水や地下水流動問題などによく用いられている定常放射状流れの式を用いて表現することを試みた。式 (4) は定常放射状流れの式を、部材厚 L 、径 D の圧入孔において $P/\rho g$ なるポテンシャルを与えたときの、亜硝酸リチウムの時間あたりの注入量 q を算定する式に修正したものである。

$$q = 2\pi k_\alpha L \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad (4)$$

ここに、 q : 時間あたりの注入量 (m³/hour)、 k_α : 亜硝酸リチウムの注入のしやすさに関するパラメータ (m/hour)、 P : 設計注入圧力 (MPa、ただし上式では10⁶倍することにより N/m² に単位を換算している)、 ρ : 亜硝酸リチウムの密度 (=1 250) (kg/m³)、 g : 重力加速度 (=9.8)

(m/sec²), L : 部材厚 (m), D : 圧入孔径 (m) である (Fig. 3 参照).

ASR で劣化したコンクリート中の亜硝酸リチウムの浸透メカニズムは、経験的にひび割れ内の浸透、コンクリートマトリックス中への圧力や濃度による拡散、骨材周辺への吸着などが複合的に関係していると推察され、式 (4) で想定しているモデルとは異なる部分もあると思われるが、現状ではそれを詳細にモデル化し、考慮することは容易ではない。しかし、施工実績においては概ね定圧力、定流量の浸透となっていることや、注入のしやすさに関するパラメータ k_{α} を施工データに基づく経験式とすることで、 k_{α} は ASR で劣化したコンクリート中の浸透性状の不確定性を含んだ値を与え、式 (4) により現時点で得られている施工データレベルで概ね実施工に即した時間あたりの圧入量 q を推定できると考えられる。式 (4) を k_{α} について書き直すと式 (5) となる。

$$k_{\alpha} = \frac{q \cdot \rho g}{2\pi PL} \ln \left[\frac{4L}{D} \right] \quad (5)$$

この式 (5) を用いて Table 1 の施工データから k_{α} を算定した結果を Table 2 に示す。それら k_{α} の算定結果を

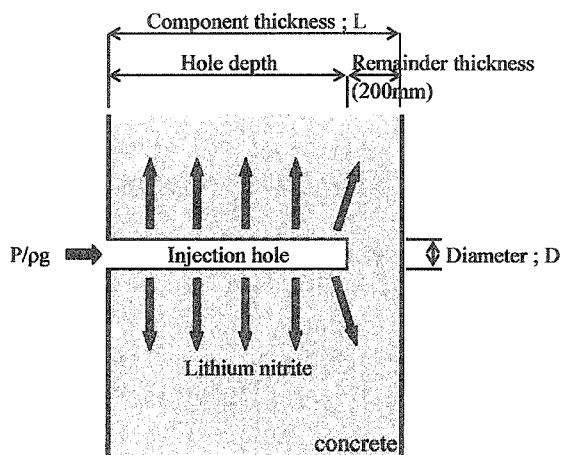


Fig. 3 Pressurized injection outline figure. (Concrete sectional view)

Fig. 4, Fig. 5 に示す。圧縮強度および静弾性係数の小さい範囲では k_{α} のばらつきの幅が大きく、ASR の劣化が著しい場合には注入に要する時間の変動が大きくなる傾向があることを示している。しかし、圧縮強度が 20N/mm² 以上、静弾性係数が 9 000N/mm² 以上の範囲においては、 k_{α} と圧縮強度または静弾性係数との間には良好な負の相

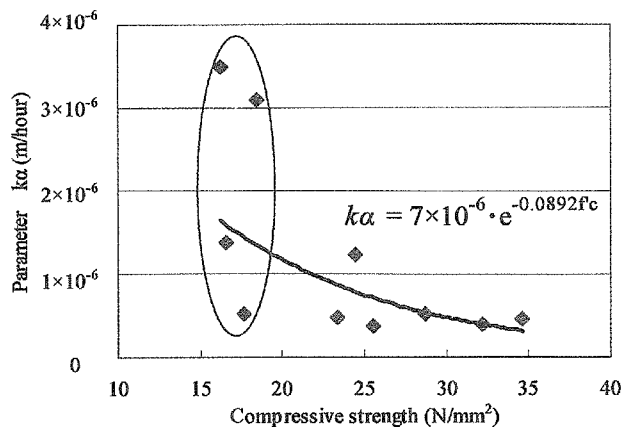


Fig. 4 Relationship between parameter k_{α} and compressive strength.

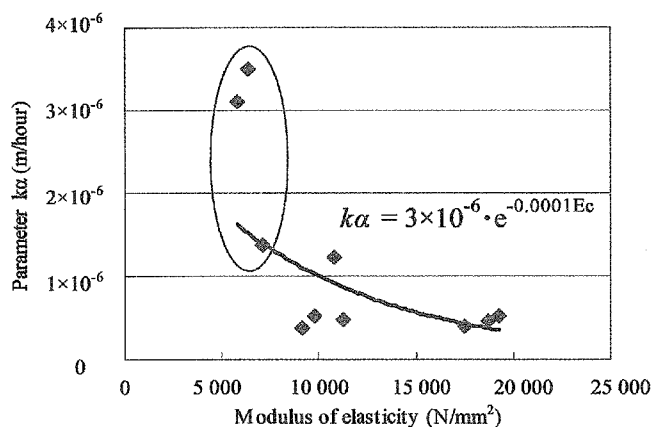


Fig. 5 Relationship between parameter k_{α} and modulus of elasticity.

Table 2 Calculation result of parameter k_{α} .

| | Compressive strength (N/mm ²) | Modulus of elasticity (N/mm ²) | Quantity of LiNO ₂ per injection (m ³) | Quantity of LiNO ₂ per hour (m ³ /hour) | Average concrete thickness L(m) | Diameter of a hole D(m) | Injection pressure P(MPa) | Parameter k_{α} (m/hour) |
|-----------|---|--|---|---|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Wall No.1 | 25.6 | 9 176 | 1.06×10^2 | 1.55×10^{-5} | 0.7 | 0.34 | 0.5 | 3.66×10^{-7} |
| Wall No.2 | 16.2 | 6 400 | 1.06×10^2 | 1.48×10^{-4} | | | | 3.50×10^{-6} |
| Wall No.3 | 16.6 | 7 081 | 1.13×10^2 | 5.87×10^{-5} | | | | 1.38×10^{-6} |
| Wall No.4 | 18.4 | 5 799 | 1.13×10^2 | 1.32×10^{-4} | | | | 3.11×10^{-6} |
| Wall No.5 | 23.4 | 11 231 | 1.13×10^2 | 2.05×10^{-5} | | | | 4.83×10^{-7} |
| Wall No.6 | 32.2 | 17 563 | 1.13×10^2 | 1.67×10^{-5} | | | | 3.94×10^{-7} |
| Wall No.7 | 34.6 | 18 695 | 1.13×10^2 | 1.95×10^{-5} | | | | 4.59×10^{-7} |
| Wall No.8 | 28.7 | 19 294 | 1.13×10^2 | 2.23×10^{-5} | | | | 5.26×10^{-7} |
| Pier | 24.4 | 10 816 | 1.94×10^2 | 1.10×10^{-4} | 1.8 | | 1.23×10^{-6} | |
| Abutment | 17.7 | 9 818 | 4.93×10^3 | 1.98×10^{-5} | 0.6 | | 5.27×10^{-7} | |

関が見られる。圧縮強度および静弾性係数に関する亜硝酸リチウムの注入のしやすさに関するパラメータ k_{α} の回帰分析を行って得られた回帰式を、注入のしやすさに関するパラメータ k_{α} の経験式 h (式 (6)、式 (7)) とした。

k_{α} (圧縮強度より)

$$k_{\alpha} = h(f_c) = 7 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0892f_c} \quad (6)$$

k_{α} (静弾性係数より)

$$k_{\alpha} = h(E_c) = 3 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0001E_c} \quad (7)$$

リチウムイオン内部圧入工における亜硝酸リチウムの設計注入時間は、式 (1)、(4)、(6) および (7) を用いて算定することができる。Table 3 は、検討に用いた施工データについてこれらの式を適用し、設計注入時間を求めたものである。

Table 3 より、圧縮強度 f_c から算定した設計圧入時間 t の値 10 ケースおよび静弾性係数 E_c から算定した設計圧入時間 t の値 10 ケースと、実際の施工データから得られた注入完了時間の平均値 + 1.645Sd (95% の確率で注入が完了する時間) の値とを比較してみると、全体の 40% に相当する 8 ケースにおいて設計注入時間以内で実際の注入作業が完了している。それ以外の 12 ケースは実際の注入完了作業が設計注入時間を超えているものの、その中の 4 ケースにおいては設計注入時間と実際の注入完了時間との差が 10% 未満に収まっている。残りの 8 ケースは設計注入時間と実際の注入完了時間との差が比較的大きく、対象構造物の状態や施工仕様によっては注入に要する時間が大きくなりつく可能性を示している。このときの設計注入時間と実際の注入完了時間との差は最大で 3 倍程度となっている。

設計注入時間 t を 1 日あたりに注入を行う時間 (例えば昼間 8 時間施工を仮定) で除したものを、すなわち設計注入時間 (hour)/8 (hour/day) を設計注入日数とする。昼間 8 時間注入するとして施工計画を立案したものの、ばらつきにより注入速度が遅い圧入孔が存在したような場合でも、注入時間を最大 24 時間/day に拡大することにより、概ね設計注入日数内で注入作業を完了できることが見込まれる。

2・3 設計注入時間の算定

実構造物に対してリチウムイオン内部圧入工を適用する場合の亜硝酸リチウムの設計注入時間は以下のような手順で算定することができる。まず対象構造物からコアを採取し、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数を測定する。またコンクリート中のアルカリ総量を測定し、Li/Na モル比が 1.0 となる量の亜硝酸リチウム量を設計注入量とする。次に対象構造物の形状に応じて圧入孔の配孔計画を行う。圧入孔間隔は、リチウムイオン内部圧入工による亜硝酸リチウムの浸透距離に関する実験結果⁵⁾ より、確実に浸透が期待できる 500mm ~ 750mm 間隔と設定される。圧入工 1 孔あたりに注入する亜硝酸リチウム量 Q は、設計注入量/圧入孔本数により決定される。設計注入圧力の上限值は対象コンクリートの引張強度の 1/3 よりも低い範囲とし、概ね 0.5MPa ~ 1.2MPa の範囲内で設定する。

注入のしやすさに関するパラメータ k_{α} は、測定した圧縮強度、静弾性係数から式 (6)、式 (7) にて算定し、いずれか小さい方の値を採用する。そのパラメータ k_{α} 、部材厚 L 、圧入孔径 D および設計注入圧力 P から式 (4) にて時間あたりの注入量 q を求め、式 (1) より設計注入時間 t を算出する。設計注入時間 t を 1 日あたりに注入を行う時間で除したものが設計注入日数となる。

3 リチウムイオン内部圧入工の実構造物への適用

3・1 施工概要

建設後約 30 年が経過した RC 擁壁には、亀甲状のひび割れや白色ゲル析出など ASR による劣化が顕著に見られていた。採取したコンクリートコアによる室内試験の結果、圧縮強度 20.9N/mm²、静弾性係数 8.77 × 10³N/mm²、アルカリ総量 5.5kg/m³ であった。当該コンクリートの設計基準強度は 21N/mm² であり、設計基準強度からの圧縮強度の低下はみられないものの、静弾性係数は圧縮強度 21N/mm² に対応する静弾性係数の標準値が 2.35 × 10⁴N/mm² に対し 37% にまで低下していた。静弾性係数のコア外周の展開写真および薄片試料による偏光顕微鏡観察の結果から岩種構成を定量した結果、本擁壁のコンクリートに使用されている粗骨材は古銅輝石安山

Table 3 Calculation result of design injection period.

| | Compressive strength (N/mm ²) | Modulus of elasticity (N/mm ²) | Quantity of LiNO ₂ per injection (m ³) | Average injecting period (hour) | Average + 1.645Sd (hour) | Parameter k_{α} from f_c (m/hour) | design injection period (f_c) t (hour) | Parameter k_{α} from E_c (m/hour) | design injection period (E_c) t (hour) |
|-----------|--|---|--|------------------------------------|-----------------------------|---|---|---|---|
| Wall No.1 | 25.6 | 9 176 | 1.06 × 10 ² | 338 | 685 | 7.13 × 10 ⁻⁷ | 351 | 1.20 × 10 ⁻⁶ | 209 |
| Wall No.2 | 16.2 | 6 400 | 1.06 × 10 ² | 31 | 72 | 1.65 × 10 ⁻⁶ | 152 | 1.58 × 10 ⁻⁶ | 158 |
| Wall No.3 | 16.6 | 7 081 | 1.13 × 10 ² | 93 | 192 | 1.59 × 10 ⁻⁶ | 167 | 1.48 × 10 ⁻⁶ | 180 |
| Wall No.4 | 18.4 | 5 799 | 1.13 × 10 ² | 38 | 85 | 1.36 × 10 ⁻⁶ | 196 | 1.68 × 10 ⁻⁶ | 158 |
| Wall No.5 | 23.4 | 11 231 | 1.13 × 10 ² | 320 | 549 | 8.68 × 10 ⁻⁷ | 306 | 9.76 × 10 ⁻⁷ | 272 |
| Wall No.6 | 32.2 | 17 563 | 1.13 × 10 ² | 420 | 673 | 3.96 × 10 ⁻⁷ | 670 | 5.18 × 10 ⁻⁷ | 512 |
| Wall No.7 | 34.6 | 18 695 | 1.13 × 10 ² | 317 | 578 | 3.20 × 10 ⁻⁷ | 830 | 4.63 × 10 ⁻⁷ | 574 |
| Wall No.8 | 28.7 | 19 294 | 1.13 × 10 ² | 279 | 505 | 5.41 × 10 ⁻⁷ | 490 | 4.36 × 10 ⁻⁷ | 609 |
| Pier | 24.4 | 10 816 | 1.94 × 10 ² | 85 | 176 | 7.94 × 10 ⁻⁷ | 273 | 1.02 × 10 ⁻⁶ | 213 |
| Abutment | 17.7 | 9 818 | 4.93 × 10 ³ | 93 | 248 | 1.44 × 10 ⁻⁶ | 91 | 1.12 × 10 ⁻⁶ | 116 |

岩であり、骨材に生じた微細なひび割れや気泡をゲルが満たしている状況も確認された。この RC 擁壁に対し、リチウムイオン内部圧入工による補修工事を実施した。

3・2 設計注入時間と実注入時間

注入する亜硝酸リチウム量は、アルカリ総量試験結果をもとに Li/Na モル比が 1.0 となる量とし、 $23.5\text{kg}/\text{m}^3$ と定めた。設計注入圧力は圧縮強度試験結果から推定されるコンクリートの引張強度の 1/3 よりも低い範囲とし、 $0.5 \sim 0.7\text{MPa}$ と設定した。圧入孔径は 20mm、圧入孔間隔は亜硝酸リチウムの浸透が期待できる 500mm とし、千鳥状に配置した。RC 擁壁の 1 パネル (7.0m^2) における圧入孔数は 31 孔となった。擁壁の平均部材厚は 330mm であった。これらの注入量、注入圧力の設定値と圧縮強度、静弾性係数の試験値より、式 (1)、(4)、(6) および (7) を用いて設計注入時間を算出すると、圧縮強度から推定される設計注入時間は 71 時間、静弾性係数から推定される設計注入時間は 60 時間となった。それに対し、実際の施工で注入に要した実注入時間は 55 時間であった。当該擁壁のコンクリートは圧縮強度の低下よりも静弾性係数の低下が鋭敏に現れていたため、設計注入時間の算定においても、静弾性係数から算出した値のほうが実注入時間をより精度よく推定できていたものと考えられる。

3・3 ASR 膨張抑制効果

リチウムイオン内部圧入工の主たる目的は、アルカリシリカゲルを非膨張化することにより ASR 膨張を抑制することである。そこで、本工法による ASR 膨張抑制効果を定量的に検証するために、亜硝酸リチウムの注入前後で採取したコンクリートコア ($\phi 100\text{mm}$, $L = 250\text{mm}$) に対し促進膨張試験を実施した。注入前のコアは注入開始の 14 日前に、注入後のコアは注入完了の 7 日後に採取した。コアの採取位置は隣り合う圧入孔の中央とし、圧入孔から 250mm 離れた位置とした。促進膨張試験は JCI-DD2 「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法 (案)」 に準拠し、 40°C 、RH95% の環境下にて行った。コアの基長測定後、温度 20°C 、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率とした。その後、温度 40°C 、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率とした。

促進膨張試験結果を、Fig. 6 に示す。亜硝酸リチウム注入前に採取したコアの促進養生 13 週間後における全膨張率は 0.081% を示した。それに対し、注入後に採取したコアの全膨張率は 0.018% であり、注入前の値に比べて 22.2% にまで低減されていたことが分かる。残存膨張率で比較すると、注入前は 0.052%、注入後は 0.014% であり、注入前に比べて 26.9% にまで低減されていた。また、開放膨張率で比較すると、注入前は 0.029%、注入後は 0.004% であり、注入前に比べて 13.8% にまで低減されていた。「コンクリートの耐久性向上技術の開発」報告書では、 40°C 、RH95% の環境下で 13 週間養生したときの全膨張量が 0.05% 以上を示すものを有害または潜在的有害

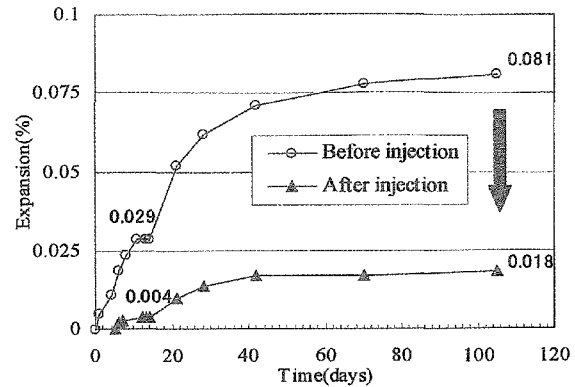


Fig. 6 Results of the accelerated curing test at 40 degrees Celsius, RH 95%.

と判定するとしている。注入前のコアの全膨張率は 13 週後で 0.081% と、このしきい値を大幅に超えており、今後も ASR による膨張が進行する可能性が高かったと判断できる。それに対し、注入後のコアの全膨張率は 13 週後で 0.018% と、このしきい値を下回っており、亜硝酸リチウムを注入したことにより、今後の ASR 膨張進行の可能性が大きく低下したと判断することができる。ここで示された注入前後の膨張率の低減幅を、リチウムイオン内部圧入工による ASR 膨張抑制効果ととらえることができる。

3・4 アルカリシリカゲルの電子顕微鏡観察

アルカリシリカゲルにリチウムイオンを供給することでゲルが非膨張化されるとすれば、リチウムイオンを供給する前後でアルカリシリカゲルに何らかの変化が生じるものと推察される。そこで、本擁壁に亜硝酸リチウムを注入する前後で採取したコア試料より破断面試料を作製し、金蒸着を施して走査電子顕微鏡観察 ($\times 50 \sim \times 5000$) を行った。注入前のコアは注入開始の 14 日前に採取したものであり、アルカリシリカゲルそのものの試料とした。注入後のコアは注入完了の 7 日後に採取したものであり、アルカリシリカゲルに Li/Na モル比 1.0 となる亜硝酸リチウムを内部圧入工により供給した後のゲルの試料とした。コアの採取位置は隣り合う圧入孔の中央とし、圧入孔から 250mm 離れた位置とした。アルカリシリカゲルの電子顕微鏡観察結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。亜硝酸リチウムを注入する前 (Fig. 7) と、注入した後 (Fig. 8) の電子顕微鏡写真には共通して非晶質のゲルや結晶化したゲル (放射状のもの、ロゼット状のもの) が認められた。これらはいずれも典型的な ASR の生成物として知られているものである。これらを比較した限りでは、反応生成物にリチウムを供給したことによる形態上の変化は認められない。それにもかかわらず、同じ擁壁から採取したコアの促進膨張試験の結果からは膨張抑制効果が認められていることから、リチウムはアルカリシリカゲル内 (または固化する前のゾル) に浸入し、その中のアルカリと置換してゲルの組成を変化させ、ゲルを非膨張性のものに変化させていると推察される。この非膨張性の生成物はリチウムモノシリケート ($\text{Li}_2 \cdot \text{SiO}_2$) またはリチウムジシリケート ($\text{Li}_2 \cdot 2\text{SiO}_2$) であると考えられる。今回の観察

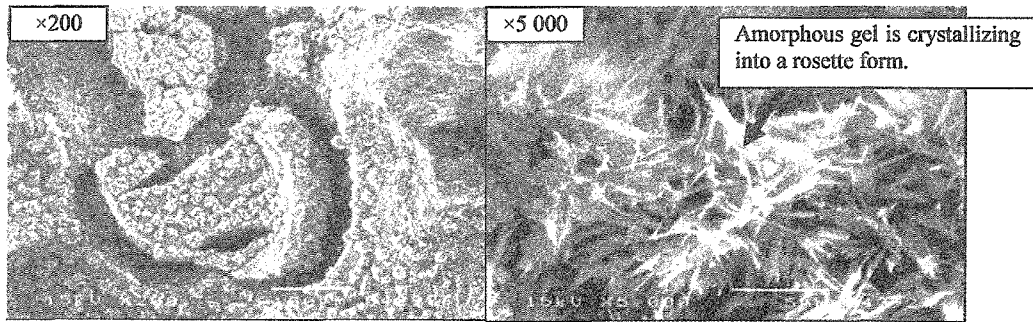


Fig. 7 Sediment observed in air bubbles before lithium injection. The left photograph is magnified 200x and the right is magnified 5 000x

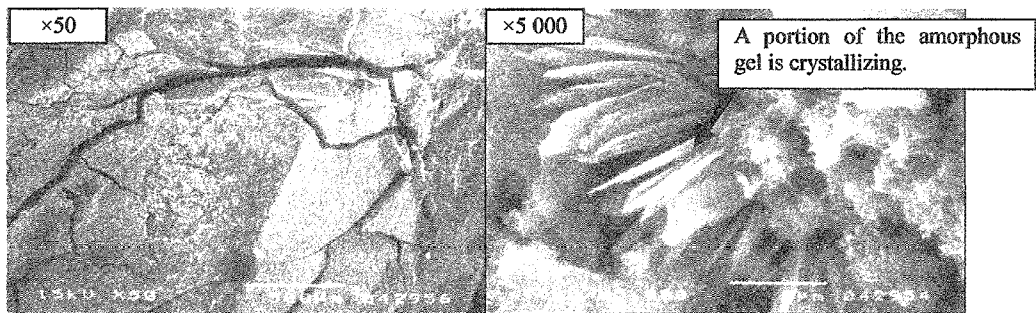


Fig. 8 Sediment observed in air bubbles after lithium injection. The left photograph is magnified 50x and the right is magnified 5 000x.

結果だけでは検討数量が少ないため、今後はさらに多くの試料を用いて、ゲルの形状観察とゲルの組成分析の両面から検討を加えていく必要があるものと考えている。

4 ま と め

(1) ASR によるコンクリートの劣化程度の指標を圧縮強度または静弾性係数としたとき、劣化程度と亜硝酸リチウムの注入に要する時間との間には相関関係が見られる。

(2) 亜硝酸リチウムの注入のしやすさに関するパラメータ k_a を施工データに基づく経験式として回帰分析することにより、コンクリートの劣化程度に応じた亜硝酸リチウムの設計注入時間算定式を提案した。

(3) リチウムイオン内部圧入工を実構造物に適用したときの実際に注入に要した時間は、設計注入時間の算定式で精度よく予測できていた。

(4) Li/Na モル比を 1.0 とする量の亜硝酸リチウムを注入した後、当該コンクリートから採取したコアにおいて実施した 40°C, RH95% 環境下での促進膨張試験の結果、注入後の全膨張率は注入前の 22.2% にまで低減されていることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "Concrete Library 124, State-of-the-Art Report on the Countermeasures for the Damage Due to Alkali-Silica Reaction" (2005).
- 2) A. Kaneyoshi, H. Uchida and H. Kano, "Experimental Study on Effects of Lithium against ASR for Mass Concrete Member", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.23, No.1, pp.403-408 (2001).
- 3) K. Era, S. Okada, T. Mihara and K. Kawahara, "Verification of controlling effect of the alkali-aggregate reaction by nitrous acid lithium power injection", Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS, Vol.5, pp.189-194 (2005).
- 4) M. Saito, A. Kitagawa and S. Hasaba, "Effectiveness of Lithium Nitrite in Suppressing Alkali-Aggregate Expansion", Journal of the Society of Materials Science, Japan Vol.41, No.468, pp.1375-1381 (1992).
- 5) K. Era, S. Okada, T. Mihara and K. Kawahara, "Control of the Alkali-Aggregate Reaction by Nitrous Acid Lithium Power Injection", Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS, Vol.4, pp.117-122 (2004).