

－ 実例で見る思想と実践 －

# コンクリート構造物の 補修・補強

## 5-5 亜硝酸リチウム内部圧入によるASR膨張抑制

### 1. 概 要

本節はアルカリシリカ反応（以下、ASRと称す）にて劣化した道路橋橋台の補修に関する報告である。亀甲状ひび割れの一部には漏水跡も認められ、残存膨張量も有害な値であったため、劣化因子の遮断を目的とする表面保護工法では早期に再劣化することが予測された。そこで、リチウムイオンによりアルカリシリカゲルを非膨張化させてASR膨張性を根本的に抑制する亜硝酸リチウム内部圧入工法を適用し、その後の経過観察と効果確認試験により本工法の有効性を検証した。

### 2. 概 況

位置環境：市街地平野部

利用種別：道路橋

経 年：建設後30年程度経過

構造種別：

上部工 単純PCホロー桁

下部工 逆T式橋台

対象部位：A1橋台、A2橋台の躯体

図1に対象橋梁全景を示す。

### 3. 使用状況

対象構造物は市街地平野部に位置する交通量の多い一般国道の道路橋である。桁下は主に地域住

民の生活道路、通学路として利用されている。

### 4. 変状状況

A1、A2橋台の躯体前面および側面（ウイング部含む）に亀甲状のひび割れが多数発生しており、最大ひび割れ幅は6.0mm、平均ひび割れ密度は $5.5\text{m}/\text{m}^2$ 程度であった。ひび割れの一部からは白色のゲルの析出および漏水跡も認められた。橋台の上には上部工が架かっており、橋台躯体に雨水が直接かかることは少ない。したがって、ひび割れからの漏水は橋台背面側から浸入した水分がコンクリート内のASRひび割れを通じて前面側へと到達したものと考えられる。ひび割れの発生状況を図2に示す。

採取したコアによるコンクリートの圧縮強度は $35.4\text{N}/\text{mm}^2$ 、静弾性係数は $12.7\text{kN}/\text{mm}^2$ であり、静弾性係数が低下していることが分かる。ASRで劣化したコンクリートは特に静弾性係数が鋭敏に低下することが知られている。

### 5. 変状原因

変状の原因を推定するために橋台躯体前面よりコアを採取し、各種観察、試験を実施した。コア破断面には粗骨材周囲に反応リムおよび白色生成物が生じており、骨材の一部には割れも認められ



図1 対象橋梁全景



図2 ひび割れ発生状況

た。白色生成物を対象に走査電子顕微鏡(SEM)による形態観察およびエネルギー分散型分光器(EDS)による元素組成分析を行った結果、析出物の元素組成はケイ素(Si)、ナトリウム(Na)およびカリウム(K)を多く含んでおり、アルカリシリカゲルであることが示された。図3に白色生成物のSEM観察写真を示す。骨材界面付近の非晶質ゲルで表面が粒状に変化している様子が分かる。

アルカリ総量試験の結果、コンクリート中に含まれる水溶性アルカリ金属元素量( $\text{Na}_2\text{O}$ 換算)は $4.6\text{kg}/\text{m}^3$ であった。アルカリ総量規制( $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ )前に建設された橋台であり、高いアルカリ含有量が示された。

残存膨張量試験は温度 $40^\circ\text{C}$ 、相対湿度100%の湿気槽にて実施するJCI-DD2法と、温度 $80^\circ\text{C}$ 、1NのNaOH溶液中で実施するNaOH浸漬法(ASTM C 1260準拠)の2種類で実施している。JCI-DD2法では13週間の全膨張が0.081%、NaOH浸漬法では14日間で0.13%という値が示された。残存膨張量試験結果の評価の目安のひとつとして、JCI-DD2法では3ヶ月で0.05%、NaOH浸漬法では14日間で0.1%未満であれば将来的に有害な膨張を生じる可能性が低いとされることが多い。これらの評価の目安に準じると、本橋台のASR膨張性は依然として収束しておらず、ASR膨張およびそれに伴うひび割れは今後も進展、増大することが推察される結果となった。

以上より、本橋台の劣化機構はASRであり、反応性骨材とセメントペースト由来のアルカリ金属イオンが反応してアルカリシリカゲルを生成し、主として橋台背面側からの水分供給によりゲルが吸水膨張した結果、コンクリート表面に著しいひび割れを発生させたものと推察される。そのASR

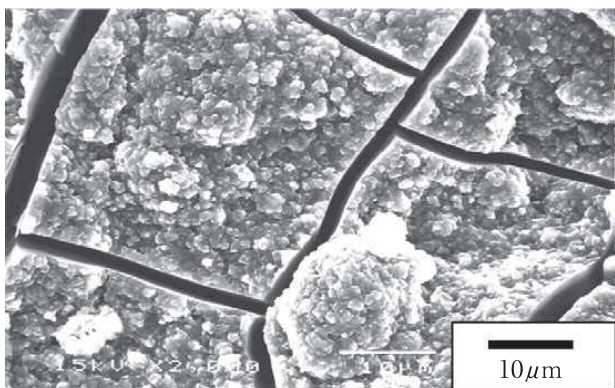


図3 白色生成物のSEM観察写真

膨張性は依然として高く、将来的にも有害な膨張がさらに進展すると判断される。2013年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕による外観上のグレードとしては、グレードⅢの加速期(ASRによる膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度が増大する)に相当すると判断される。

## 6. 対策の方針

### 6.1 一般的なASR補修工法の考え方

ASRの劣化過程(潜伏期・進展期・加速期・劣化期)に応じた補修工法は次のように考えることができる。潜伏期ではゲルが生成している(もしくは生成途中)ものの、まだコンクリートにひび割れ等の変状が発生していない時期であるため、対策工への要求性能は「外部からの水分浸入の抑制」となる。その要求性能に適する工法は表面含浸工法または表面被覆工法となり、主に予防保全的な適用となる。

進展期になるとゲルの膨張によりひび割れが発生し始める。この段階でのひび割れ状況はまだ比較的軽微であるため、ひび割れ注入工法と表面保護工法(被覆または含浸)などを組み合わせることによって「外部からの水分浸入の抑制」を図り、以後のASR膨張の進行速度を低減するという方針を採ることができる。ただし、この段階の構造物は残存膨張性が高い状況であると考えられるため、以後の劣化進行状況をモニタリングしておくことが重要となる。

加速期に入るとASR膨張の進行速度が最大となり、ひび割れの幅、延長が増大し、構造物の耐久性が急速に低下する。また、圧縮強度や弾性係数などの力学的性能も低下し始めるため、外観上のグレードが加速期にある構造物はこれ以上劣化を進行させないことが重要となる。このとき、ひび割れ注入工法と表面保護工法の組み合わせによって対象構造物への水分浸入を確実に遮断できる条件下では、「外部からの水分浸入の抑制」を要求性能として掲げることができる。ただし、水分浸入を完全に遮断することが容易ではない構造条件となる構造物は少なくない。例えば橋台や擁壁のように背面側が土砂と接している場合、背面側を掘削、露出させてそこに表面保護工を施すこ

とは現実的でない。橋脚でも上部工が掛け違いとなっている場合、伸縮装置からの漏水が橋脚天端面へと供給される。天端面は主桁、支承、アンカーバー、落橋防止システム等が密集しており十分な被覆作業が行えない場合が多い。

ASRの膨張性は非常に長期間にわたることが知られており、加速期では依然として残存膨張性が高い状況であることが多い。したがって上述したような条件により「外部からの水分浸入の抑制」が十分に期待できない場合には早期の再劣化を生じ、短いサイクルでの再補修を繰り返すことが必要となることも十分想定される。そのような構造物に対する対策工の要求性能として、「アルカリシリカゲルの非膨張化」を採ることができる。この要求性能に合致する補修工法として、亜硝酸リチウム内部圧入工法が実用化されている。

ASRによる変状を生じている構造物は劣化期になるまで放置すべきではないが、もし劣化期に至った場合ではコンクリートの劣化部・不良部の範囲も大きいため、補修規模も大規模となる。ただし、劣化期までくると構造物の残存膨張性は既に収束していることが多いため、この段階では亜硝酸リチウム内部圧入工法のようなゲルの膨張抑



図4 亜硝酸リチウム水溶液の荷姿の例



図5 亜硝酸リチウム水溶液の外観の例

制を対策方針として掲げる必要はなくなる。

## 6.2 亜硝酸リチウムを用いたASR補修工法

亜硝酸リチウム(Lithium Nitrite;  $\text{LiNO}_2$ )とはコンクリート補修材として開発された工業用化学製品であり、その原料は「ナフサ」と「リシア輝石」である。亜硝酸リチウム( $\text{LiNO}_2$ )は、正の電荷を帯びたリチウムイオン( $\text{Li}^+$ )と、負の電荷を帯びた亜硝酸イオン( $\text{NO}_2^-$ )とがイオン結合した物質で、水に溶けやすい性質を持っており、亜硝酸リチウム水溶液として製品化されている。色は薄い黄色または青色の透明な水溶液である。図4、図5に亜硝酸リチウムの荷姿と外観の例を示す。

亜硝酸リチウムの成分のうち、亜硝酸イオンは鉄筋表面の不動態被膜を再生する効果があるため、塩害や中性化など鉄筋腐食に起因する劣化の補修材料として活用される。一方、リチウムイオンはアルカリシリカゲルを非膨張化する効果があるため、ASR劣化の補修材料として適している(図6参照)。

亜硝酸リチウムによるASR膨張抑制メカニズムとして、反応性骨材周囲に生成したアルカリシリカゲル( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ )にリチウムイオン( $\text{Li}^+$ )が作用し、ゲル中の $\text{Na}^+$ と $\text{Li}^+$ とがイオン交換することにより、水に対して膨張性を示さないリチウムシ

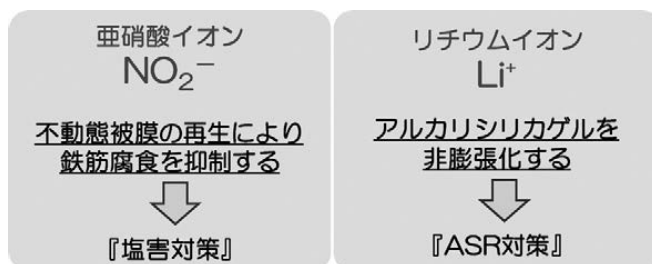


図6 亜硝酸イオンおよびリチウムイオンの効果

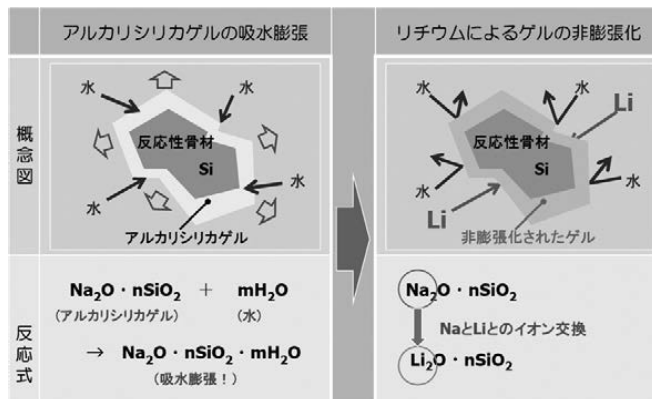


図7 リチウムイオンによるアルカリシリカゲルの非膨張化の概念図

リケート( $\text{Li}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2$ )に変化するとされている。リチウムイオンによるアルカリシリカゲルの非膨張化の概念を図7に示す。

亜硝酸リチウムを用いたASR補修工法には、表面保護工法（含浸、被覆）、ひび割れ注入工法および内部圧入工法の3種類がある。表面保護工法は亜硝酸リチウムをコンクリート表面に塗布、含浸させることによってリチウムイオンを骨材の周囲に供給し、ASR膨張の抑制を図る工法である。ひび割れ注入工法は、低圧注入器を使用してひび割れを通じて亜硝酸リチウムを注入する工法で、表面保護工法と併用されることが多い。ただしこれらの工法ではリチウムイオンの供給範囲がコンクリート表層部およびひび割れ周辺部に限定されることが指摘されており、それらに代わる内部圧入工法が開発されるに至った。内部圧入工法は、ASR劣化した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ため、ASR膨張を根本的に抑制できる。亜硝酸リチウムを用いたASR補修工法の概要を図8に示す。

### 6.3 補修工法の決定

本橋の橋台の劣化機構はASRであり、亀甲状のひび割れが多数発生しており、外観上のグレードから判断される劣化過程は加速期に相当する。コンクリート物性値のうち静弾性係数の低下が先行して表れており、将来的には圧縮強度の低下に至ることも想定される。橋台背面側からの著しい水分供給が認められるものの、その水分供給を遮断することは困難な構造条件である。残存膨張量試

験の結果、ASR膨張性は依然として高く、将来的にも有害な膨張がさらに進展すると判断される。

本橋のASR補修工法として、「外部からの水分浸入の抑制」を目的とした表面保護工法とひび割れ注入工法を適用した場合、水分浸入抑制効果が十分に発揮されず、早期に再劣化を生じるリスクが高いと判断される。これは再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオを選択することとなるが、残存膨張性が大きいいため短いサイクルで再補修を繰り返すこととなる。そこで、本橋台の補修工法の要求性能は「アルカリシリカゲルの非膨張化」とし、将来的なASR膨張を根本的に抑制して再劣化リスクを低減することとした。この要求性能に合致する補修工法として、亜硝酸リチウム内部圧入工法を採用した。

### 7. 亜硝酸リチウム内部圧入工法<sup>1,2)</sup>

亜硝酸リチウム内部圧入工法は、コンクリートに小径の圧入孔を削孔し、そこから浸透拡散型亜硝酸リチウム40%水溶液を0.5~1.5MPaの圧力で内部圧入する工法である。本工法によって、コンクリート全体の反応性骨材周囲にリチウムイオンが供給され、生成しているアルカリシリカゲルが非膨張化されるため、以後のASR膨張を収束させることができる。亜硝酸リチウム内部圧入工法には、部材寸法が厚い構造物（概ね500mm以上）に適用される油圧式圧入装置と、部材寸法が薄い構造物（概ね500mm未満）に適用されるカプセル式圧入装置の2種類がある。本橋の橋台躯体には油圧式圧入装置を用いた内部圧入工を適用した。亜

| 補修工法            |               | 工法の特徴                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 亜硝酸リチウムを用いた補修工法 | ひび割れ注入工法      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・無機系注入材と亜硝酸リチウムを併用してひび割れを閉塞する。</li> <li>・先行注入した亜硝酸リチウムがひび割れ周辺のASR膨張を低減するとともに、本注入した無機系ひび割れ注入材がひび割れを閉塞し、水分侵入を遮断する。</li> <li>・ただしASR膨張抑制効果は限定的であり、再補修を前提とした維持管理シナリオの下で適用する必要がある。</li> </ul>                             |
|                 | 表面保護工法（含浸・被覆） | <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート表面に亜硝酸リチウムを塗布した後、ケイ酸塩系含浸材またはポリマーセメント系被覆材を塗布する。</li> <li>・塗布した亜硝酸リチウムがコンクリート内部へ浸透し、コンクリート表層部のASR膨張を低減する。また、表面含浸材または被覆材が外部からの水分侵入を遮断する。</li> <li>・ただしASR膨張抑制効果は限定的であり、再補修を前提とした維持管理シナリオの下で適用する必要がある。</li> </ul> |
|                 | 内部圧入工法        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリートに削孔し、亜硝酸リチウムを内部圧入することでコンクリート全体にリチウムを供給する。コンクリート全体のASRゲルが非膨張化されるため、以後のASR膨張は根本的に抑制することができる。</li> <li>・対策後はたとえ水分の供給があってもASR膨張が進行しないので、再劣化を許容しない構造物の根本的なASR補修工法として適用性が高い。</li> </ul>                             |

図8 亜硝酸リチウムを用いたASR補修工法の概要

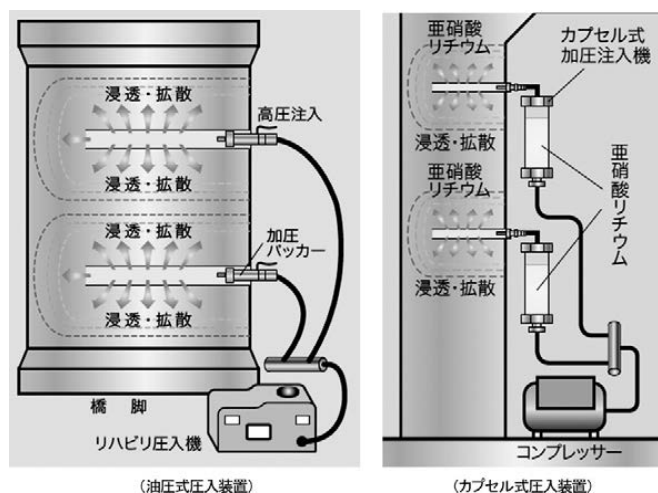


図9 亜硝酸リチウム内部圧入工法の概念図

硝酸リチウム内部圧入工法の概念図を図9に示す。

ASR膨張を抑制するために必要とな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総量に応じて構造物毎に設定する。コンクリートのアルカリ総量（ $\text{Na}_2\text{O}$ 換算）に対して抑制剤の $\text{Li}^+$ がモル比で0.8となる量（ $\text{Li}/\text{Na}$ モル比=0.8）の亜硝酸リチウム40%水溶液を設計圧入量として構造物に圧入する。本橋台のアルカリ総量 $4.6 \text{ kg/m}^3$ に対する単位体積あたりの亜硝酸リチウム設計圧入量は $15.7 \text{ kg/m}^3$ となる。

設計注入圧力は、亜硝酸リチウムをコンクリート内部に効果的に浸透させることができ、かつASR構造物内部のひび割れを助長することのない範囲に設定する必要がある。供試体実験および試験施工の結果、設計注入圧力を $0.5 \text{ MPa}$ ～ $1.5 \text{ MPa}$ の範囲に設定すると、抑制剤の過度な漏出・漏洩もなく抑制剤を所定の範囲内に浸透させることができる。ただし、ASRにより強度が低下している構造物も多数存在することから、コンクリートコアの圧縮強度結果から推定される引張強度に対し、安全率を考慮して3で除したものを上限注入圧力として注入圧を制限する。以上より、設計注入圧力は“ $0.5 \text{ MPa}$ ～上限注入圧力”の範囲となる。本橋台の圧縮強度 $35.4 \text{ N/mm}^2$ に対する上限注入圧力は $1.18 \text{ MPa}$ となる。

圧入孔の設定は既往の施工実績に基づき、削孔径 $\phi 20 \text{ mm}$ 、削孔間隔は $750 \text{ mm}$ ピッチとした。また、圧入孔の配置は亜硝酸リチウムの浸透性を考慮して千鳥配置とした。

## 8. 施 工

亜硝酸リチウム内部圧入工の施工フローを図10に示す。また、図10中の各工種の概要を以下に示す。

### (1) 準備工

足場を設置し、周辺環境調査および構造物の変状確認を行った。

### (2) 事前処理工（亜硝酸リチウムの表面漏出防止）

コンクリート表面を高圧洗浄した後、幅 $0.2 \text{ mm}$ 以上のひび割れには超微粒子セメント系注入材の注入（図11参照）を、幅 $0.2 \text{ mm}$ 未満のひび割れはポリマーセメントモルタルにて表面シールを行った。

### (3) 鉄筋探索工

圧入孔の削孔に先立ち、コンクリート表面の鉄

|           |                 |
|-----------|-----------------|
| (1) 準備工   | 現地調査、足場設置       |
| (2) 事前処理工 | 高圧洗浄、表面漏出防止     |
| (3) 鉄筋探索工 | 既設鉄筋位置の確認       |
| (4) 圧入孔削孔 | ダイヤモンドコアドリル削孔   |
| (5) 試験注入工 | 各圧入孔の妥当性確認      |
| (6) 本注入工  | 亜硝酸リチウム設計圧入量を圧入 |
| (7) 充填工   | 無収縮グラウト材にて充填    |
| (8) 後片付け  | 足場撤去、現場清掃       |

図10 亜硝酸リチウム内部圧入工の施工フロー



図11 表面漏出防止（ひび割れ注入工）



図12 鉄筋探査工

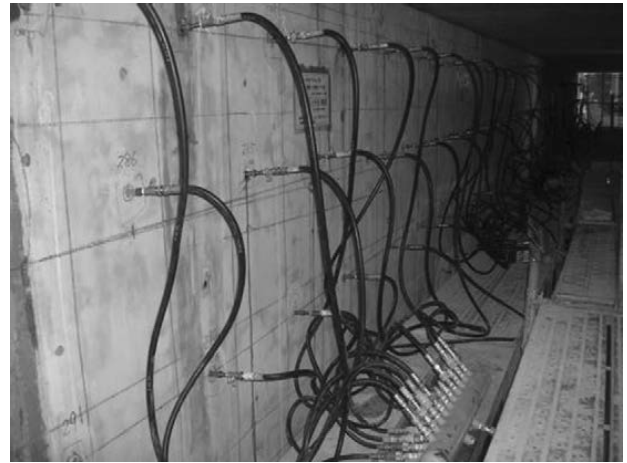


図14 試験注入工 (各孔に30分ずつ注入)



図13 削孔工 (ダイヤモンドコアドリル φ20mm)



図15 本注入工 (油圧式圧入装置)

筋探査を行って既設鉄筋位置をマーキングし、既存鉄筋へ干渉しないように圧入孔の位置を設定した(図12参照)。

#### (4) 圧入孔削孔工

橋台躯体前面より、ダイヤモンドコアドリルを用いて削孔径φ20mm、削孔間隔750mmにて削孔した(図13参照)。

#### (5) 試験注入工

全圧入孔の妥当性を評価するために、全圧入孔1箇所ずつ30分間の圧入を行い、適切な圧力が保持されていることを確認した(図14参照)。これにより亜硝酸リチウムが背面側へ過度に漏出するような不適格な圧入孔の有無を確実に把握することができる。また、圧入孔毎に試験注入工における注入時間と注入量の関係から注入速度を算出し、最終的な本注入計画を策定した。

#### (6) 本注入工

橋台躯体に対して、油圧式圧入装置の注入圧力の初期値を0.5MPaと設定して本注入工を開始し

た。途中、圧入速度が想定よりも遅く対処が必要と判断された場合には上限注入圧力の1.18MPaまでの範囲内で圧力を上げる処置を行った。全圧入孔に亜硝酸リチウム設計圧入量を全て圧入し終えるまで本注入工を継続した(図15参照)。

#### (7) 充填工

本注入完了後、圧入孔から圧入システムを撤去し、無収縮グラウト材にて入念に充填、復旧した。

### 9. 補修効果の検証

橋台の内部圧入工完了後に再度コア試料を採取し、JCI-DD2法による残存膨張量試験を実施した。JCI-DD2法では、採取したコアの基長測定後、まず温度20℃、相対湿度100%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解放膨張量とした。その後、温度40℃、相対湿度100%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。さらに、解放膨張量と残存膨張量を足した値を全

膨張量とした。この施工後の残存膨張量試験結果と、補修設計段階で実施されていた施工前の試験結果とを比較することにより、亜硝酸リチウム内部圧入によるASR抑制効果を確認することができる。これら施工前後の残存膨張量試験結果を図16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、亜硝酸リチウム内部

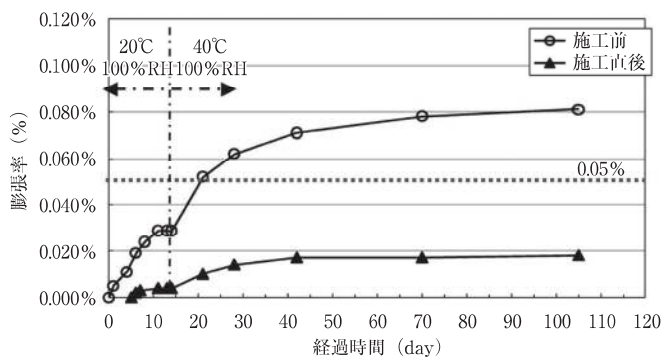


図16 施工前後の残存膨張量試験結果の比較 (JCI-DD2法)

圧入工によるASR膨張抑制効果が得られていると判断できる。

## 10. 現在の状況

本橋台の施工後、定期的に経過観察を行っている。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被覆工を施していないため、コンクリート表面の経時変化を直接確認することができる。図17に施工前と施工後6年経過時の外観状況を示す。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を示すような外観変状は現時点で認められていない。

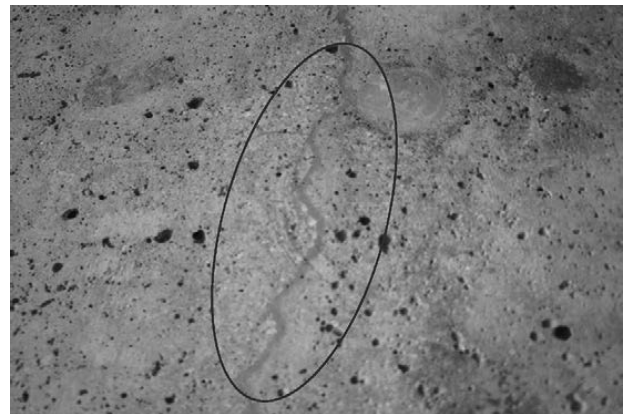


図18 ひび割れ注入跡の状況

### 【施工前】



### 【施工後6年経過】



図17 施工前状況と施工後6年経過時の外観状況

橋台躯体前面に見られるひび割れ注入跡を図18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ため、もしASR再劣化が進行すれば、まずこのひび割れ注入跡付近から変状が見られるものと考えられるが、現時点では健全な状態が保たれている。

これらの結果から、亜硝酸リチウム内部圧入工を施工したことによって確実にASR膨張性が低減しており、その膨張抑制効果がこの6年間持続しているものと判断することができる。今後も定期的な経過観察を継続していく予定である。

#### 〔参考文献〕

- 1) 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、日本材料学会、「材料」、  
Vol.57, No.10, pp.993-998, 2008
- 2) 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、日本材料学会、「材料」、Vol.58,  
No.8, pp.697-702, 2009