

残存膨張性を有する構造物の補修事例 に基づく補修工法の効果検証

上野 和広¹・岡本 貞二²・岡本 貞人³・加川 順一⁴

¹正会員 島根大学准教授 学術研究院環境システム科学系 (〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060)
E-mail: uenok@life.shimane-u.ac.jp (Corresponding Author)

²非会員 株式会社岡貞組 取締役部長 (〒697-0425 島根県浜田市旭町今市 412-2)
E-mail: okamoto-teiji@okasada.com

³非会員 株式会社岡貞組 代表取締役 (〒697-0425 島根県浜田市旭町今市 412-2)
E-mail: okamoto-sadato@okasada.com

⁴非会員 SG エンジニアリング株式会社 代表取締役 (〒733-0861 広島県広島市西区草津東 1 丁目 11-51)
E-mail: info@sge-k.com

アルカリ骨材反応 (ASR) を発症した橋台へ適用された内圧充填工と表面含浸工法 (シラン系撥水材) を対象に, 補修効果やその継続期間について検討を行った. 補修前後でコンクリートの膨張挙動を比較した結果, 補修前に顕著な増加を示していた膨張量は, 補修後温度変化に応じた僅かな変動に留まった. この膨張抑制効果は, ひび割れ内部に残存する水を樹脂との置換によって排除したこと, ひび割れへの樹脂充填によって外部からの水の侵入を低減したことが大きな要因であると推察された. ただし, 橋台背面からの水分供給や躯体深部に残存する水分によって長期的には膨張量が累積する傾向にあり, 補修から約 4 年で軽微なひび割れが発生した. これらの結果から, 今回対象とした橋台で適用した補修工法は, 恒久的な対策とはならないものの, ASR の進行速度を抑制して残存耐用期間を延長する効果を発揮したと言える.

Key Words: *inside pressure hardening, silane-based surface penetrant, alkali-silica reaction, residual expansion, verification of repair effectiveness*

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化を図るには, 定期的な調査・診断によって変状を早い段階で検出するとともに, 補修・補強などの対策を実施することが有効である. コンクリート構造物における劣化現象が顕在化した以降, 劣化メカニズムの解明や構造物の点検, モニタリング, 診断および補修・補強手法に関する研究・技術開発が行われるとともに, 限られた予算内で効率的に社会基盤の健全性を確保していくためのアセットマネジメントの導入が進められてきた¹⁾. また, 社会基盤が担う役割を永続的に発揮させるためには, 補修・補強後における構造物をも対象とし, 再劣化の防止やライフサイクルコストの低減を図り, 適切な維持管理計画を策定することが重要である.

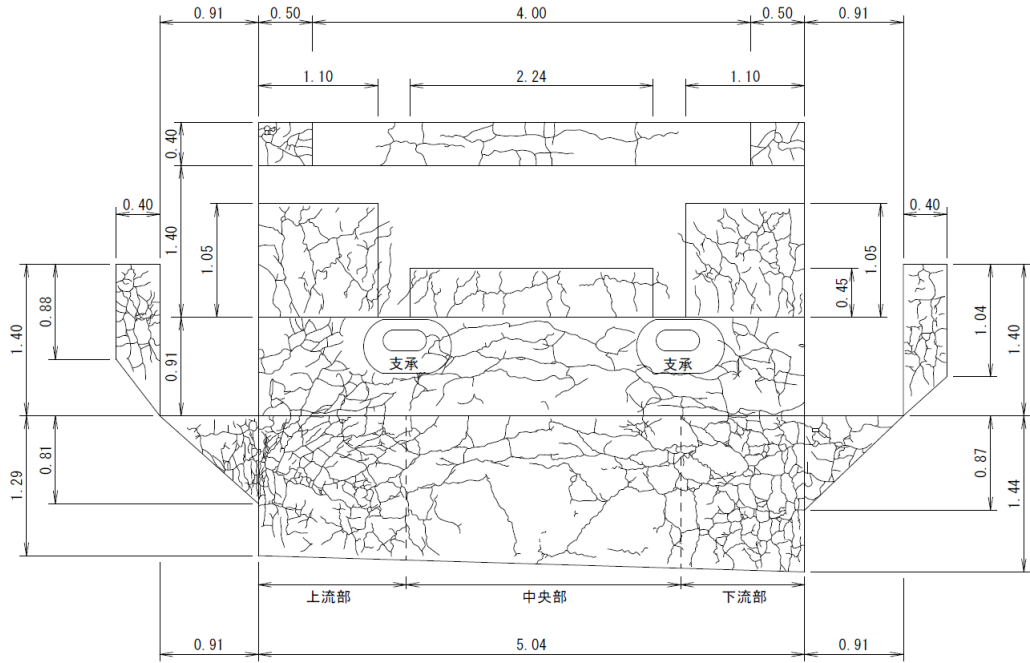
上記の取り組みを実現するにあたり, 補修時に適用さ

れる工法には, 期待される効果を確実に発揮する信頼性が求められる. さもなければ, 補修後の構造物に予想外の再劣化が生じ²⁾, 劣化予測に基づいた計画的な維持管理が困難になる. 補修工法が目標とする性能を満たすために考慮すべき要因は, 劣化機構別に整理され³⁾, 各要因に関する具体的な品質規格値は各種指針やマニュアル類で規定されている. 現在, 各方面で使用されている工法は, 上記の品質規格値を満足することによってその性能を担保している.

一方, 長寿命化対策の対象となる多くの施設では, 環境条件や施工条件が, 品質規格試験を実施する試験室と大きく異なることが通常である. コンクリート構造物の代表的な変状であるひび割れの補修を例に挙げると, 躯体表面に析出物や目詰まりが存在する場合, その除去の程度によっては注入工法による補修材の充填が阻害される可能性がある. 各種劣化の進行や補修工法の性能発現



図-1 変状確認時のA1橋台



(m)

図-2 A1橋台のひび割れ発生状況

には、環境条件^{4) 5)}や施工条件^{6) 7)}が大きく影響することから、補修工法の有効性の評価には、実構造物を対象とした補修前後でのモニタリングなども併せて実施し、実証的な検証を行うことが不可欠である^{8) 9)}。

本研究では、残存膨張性を有する構造物に対して実施された補修工法を対象に、補修前後での膨張挙動の観測結果から、その有効性を評価した。また、補修後のモニタリングを継続的に実施することで、維持管理計画を策定する上で不可欠となる補修効果の継続期間に関する考察を行った。

2. 調査対象構造物の劣化状況

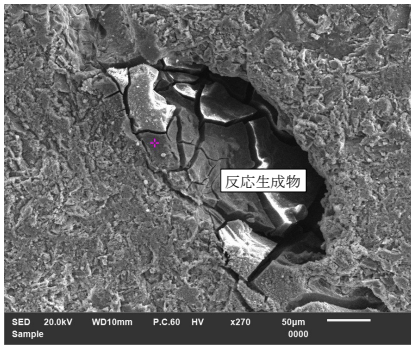
調査対象構造物は、島根県の山間部に存在する河川で供用される、単純鉸桁橋（1980年竣工）の鉄筋コンクリート製橋台である。この橋台では、2018年に多数のひび割れの発生が確認された後、対策工の検討がなされ、

2019年に次項で示す補修が実施された。図-1に、変状確認時におけるA1橋台（左岸側）の写真を示す。また、図-2にA1橋台のひび割れ発生状況を示す。橋台に発生したひび割れは亀甲状を示しており、一部のひび割れからは白色の析出物が確認された。また、上部工の下部に位置する範囲と比較し、水掛かりのある上流部（左側）と下流部（右側）では、ひび割れの発生が特に顕著であった。A1橋台を支承部で分割し、上流部、中央部、下流部の範囲でひび割れ密度を求めると、それぞれ17.2 m/m²、6.7 m/m²、16.0 m/m²である。ひび割れが多く発生していた上流部では、図-1(c)に示すように、橋台のコンクリートが前面に向かって膨張するような変形（拡大図中の点線）と、ひび割れ部の段差（拡大図中の矢印部）が生じていた。

上記の変状は、アルカリ骨材反応（ASR）が発症した際の変状の特徴¹⁰⁾と一致する。また、当該橋梁が存在する地域には安山岩などの火山岩類が分布し、急速膨張性のASRの事例が多い¹¹⁾ことから、劣化の原因として

表-1 採取コアの圧縮強度と静弾性係数

橋台	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	静弾性係数 E_c (kN/mm ²)	E_c/f_c
A1	36.1	9.6	267
A2	31.8	10.6	334



SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃
78.1%	9.2%	5.9%	4.1%	1.9%

図-3 採取コアのSEM画像と反応生成物の化学組成

ASR が考えられた。表-1 は、橋台 (A1, A2) から採取したコアの圧縮強度 f_c と静弾性係数 E_c の値である。健全なコンクリートにおける E_c/f_c の値 ($f_c = 30 \text{ N/mm}^2$ で約1,000¹²⁾)と比較して、対象橋台の E_c/f_c は非常に小さい。また、図-3に示す採取コアの走査電子顕微鏡 (SEM) 画像では、骨材周辺部に亀裂や最外面の剥離を伴う形態の物質が確認された。これは、ゼリー状の反応生成物 (アルカリ-シリカ型, アルカリ-カルシウム-シリカ型) が乾燥した際に生じるものである¹³⁾。この物質の化学組成は、アルカリ-シリカ型の反応生成物 (SiO₂: 60-90%, Na₂O: 5-30%, K₂O: 5-30%, CaO: 5 以下) と類似することから、SEM で観察された物質はアルカリ-シリカ型の反応生成物と考えられた。これらの調査結果より、対象とする橋台の劣化は ASR によるものと推察された。図-4 は、JCI-S-011-2017「コンクリート構造物のコア試料

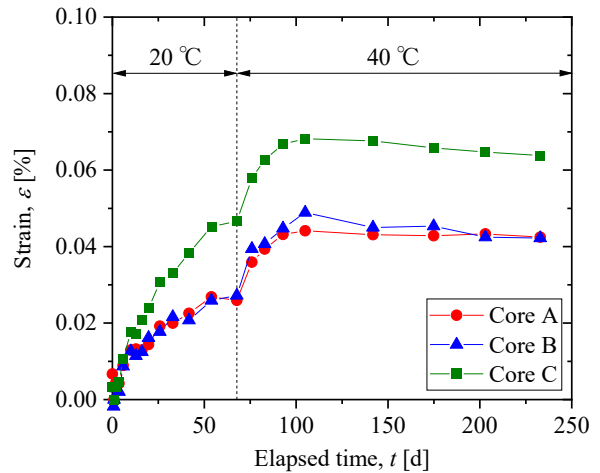


図-4 採取コアの膨張率の経時変化

による膨張率の測定方法」に準じて実施したコアの膨張率の経時変化である。図-5 にコアの採取位置を示す (図中の A, B, C)。コアの採取は、ひび割れと鉄筋を避ける位置で実施したため、いずれのコアもひび割れ密度の小さい中央部から採取したのとなっている。各コアの膨張率の値には多少の相違があるものの、全てのコアで解放膨張と促進膨張の双方を生じることが確認された。この試験結果から、対象としたコンクリート橋台の残存膨張性を直接評価することはできないが、何も対策を施さなければ、今後も ASR による膨張が進行すると判断された。

3. 補修工法の概要と補修効果の評価方法

(1) 補修工法の概要

調査対象構造物の補修には、ひび割れへの内圧充填工とシラン系撥水剤による表面含浸工法が適用された。本

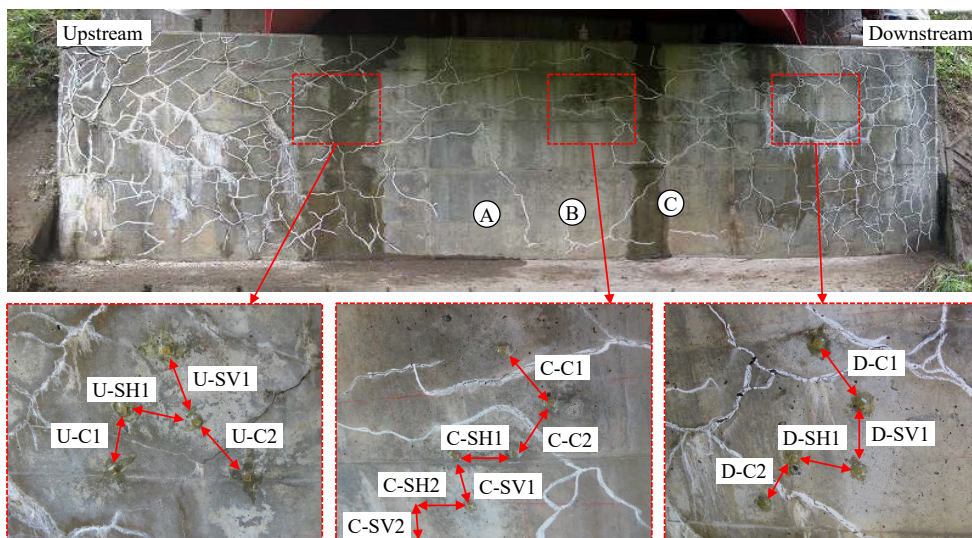


図-5 膨張量計測箇所

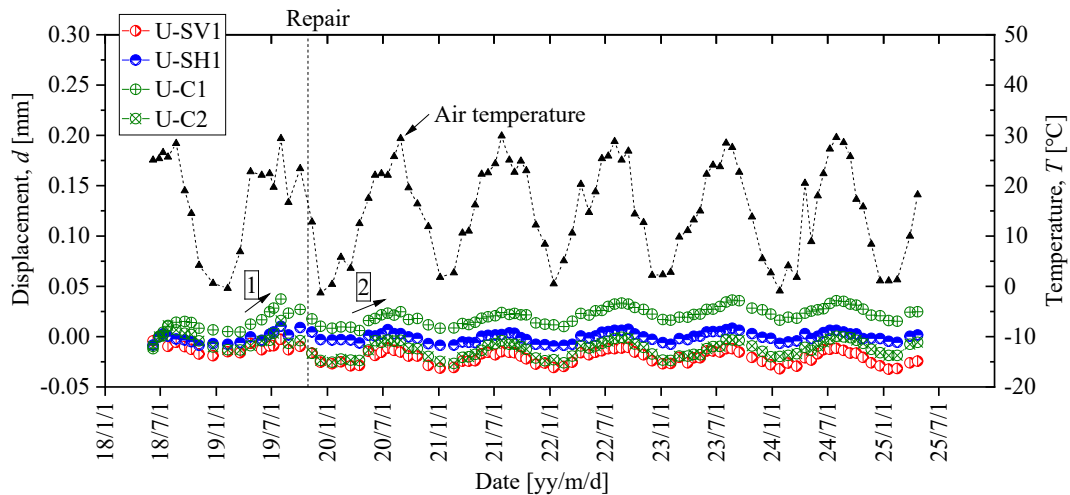


図6 膨張量の経時変化（上流部）

補修で適用された内圧充填工は、ひび割れへ樹脂を注入する補修工法であることから、ひび割れ注入工法へ分類される。ただし、注入器具取付け位置を予め穿孔（直径7mm、深さ70mm）し、コンクリート内部から流動性の高い樹脂を低圧で注入するといった特徴を有する¹⁴⁾。注入孔の穿孔には、循環型の給排水システムを備えたドリルが用いられる。このドリルは、ビット先端からの水の給水と削粉の回収を行うことで、注入孔の穿孔と洗浄を同時に実施することが可能である。清浄な注入孔を介し、コンクリート内部から低圧で樹脂注入を行うことにより、躯体表面の析出物や目詰まりの影響を受けることなく、幅0.01mmの微細なひび割れへの樹脂充填や、ジャンカや浮きといった構造物内部の初期欠陥や変状に対する補修が可能とされている。

通常、ASRなどによってひび割れ部の挙動が大きいと考えられる場合、注入工法で用いる樹脂には軟質系のものが用いられる¹⁵⁾が、本補修で用いた注入材は土木補修用エポキシ樹脂注入材1種に分類される硬質なものである。今回適用された内圧充填工のASRに対する効果は実証されていないものの、ひび割れ内部に残存する水を樹脂と置換すること、ひび割れへの樹脂の充填によって外部からの水の侵入を防止すること、によってASRの発生要因の1つである水の供給を低減し、劣化の進行を抑制することが期待された。シラン系撥水剤は、ASR対策として広く用いられる工法¹⁶⁾であり、コンクリート内部からの水蒸気透過性を保持しながらコンクリート表層部へ吸水防止層を形成することを目的に実施された。本補修は、2019年の10月に施工された。

(2) 補修効果の評価方法

上記の補修工法の評価は、図-5に示すようにA1橋台の上流部、中央部、下流部のコンクリート表面へ標点を設置し、その変動量をコンタクトゲージ（基長：100

mm）で計測することによって実施した。なお、計測箇所は、ひび割れを跨ぐ箇所（ひび割れ部）と跨がない箇所（健全部）を選定した。この標点の変動量を、補修工法の適用前から1か月に1回程度の頻度で計測した（2018年6月に計測開始）。また、上記の計測時に外気温とコンクリートの表面含水率を併せて計測した（表面含水率は2021年3月に計測開始）。図-5中の計測箇所の名称は、「-」よりも左のU、C、Dがそれぞれ上流部、中央部、下流部を表し、「-」よりも右のC、SV、SHがそれぞれひび割れ部、健全部（鉛直方向）、健全部（水平方向）を表す。

4. 膨張量の計測結果

(1) 橋台上流部

橋台上流部の膨張量と外気温の計測結果を図-6に示す。各計測箇所での膨張量の経時変化を見ると、外気温の上昇・下降に伴って膨張量も増加・減少する傾向を確認できる。ここで、U-C1（ひび割れ部）において膨張量が増加・減少する際の変化傾向を補修前後で比較すると、膨張量の減少傾向は補修前後で大きな相違がない一方、膨張量の増加は補修後（図中②）の方が補修前（図中①）よりもやや小さい。この要因には、適用した補修工法がその効果を発揮したことや、内圧充填工適用時の穿孔に伴って応力解放が生じたことなどが挙げられる。しかしながら、U-C1を含む橋台上流部での各計測箇所の膨張傾向には補修前後で大きな相違がないことから、補修工法の効果あるいは応力解放による影響は明瞭でない。

(2) 橋台中央部

橋台中央部の膨張量と外気温の計測結果を図-7に示す。補修前の各計測箇所の膨張量を見ると、ひび割れ部（C-

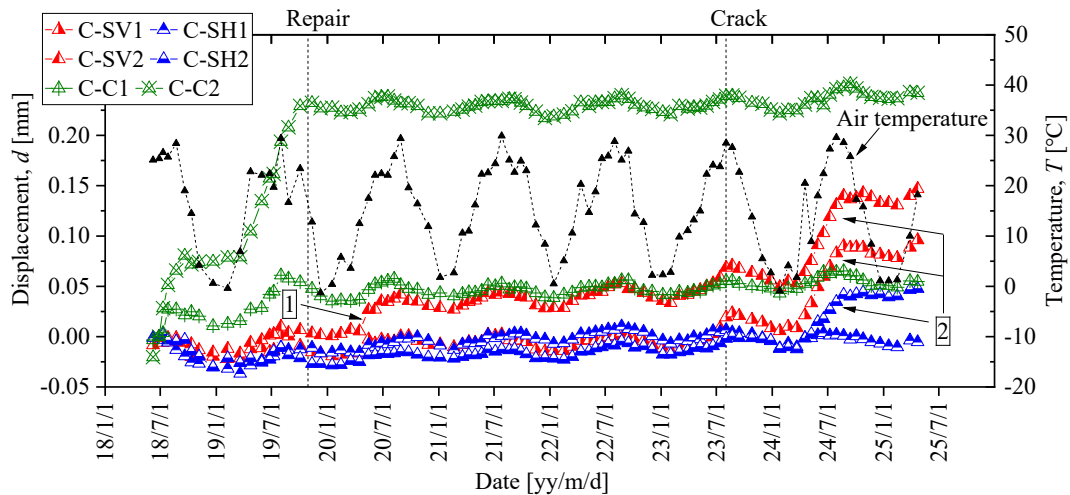


図-7 膨張量の経時変化（中央部）

C1, C-C2) の膨張量が他の箇所よりも大きく、特に C-C2 で膨張が顕著である。ひび割れ部の膨張挙動は外気温の影響を強く受けており、外気温が概ね 20℃以上となる 4~9 月で大きく膨張し、外気温が低下する 10~3 月にはほとんど膨張していない。このことは、既往の研究で示された ASR の温度依存性⁹⁾や ASR を発症した構造物でのモニタリング結果⁸⁾と整合する結果である。補修前後で各計測箇所の膨張挙動を比較すると、C-C1 と C-C2 は補修前に大きな膨張を示していたにもかかわらず、補修後は温度変化に応じた僅かな変動に留まっており、外気温が高い 4~9 月でも目立った膨張は見られない。一方、C-SV2 (健全部) では、補修後における最初の温度上昇時に膨張量が大きくなる挙動 (図中¹⁾) が確認された。ただし、それ以降の膨張量の変化は、当分の間、他の計測箇所と同程度になっていることから、この挙動は一時的なものである。既往の研究では、損傷を与えた試験体へ内圧充填工による補修を適用した後に力学試験を実施した結果、注入した樹脂がひび割れ両側のコンクリートを強固に接合することで、その後の載荷試験の際に母材破壊となること¹⁷⁾、注入した樹脂が鉄筋とコンクリートの境界面を充填し、両者の付着強度が回復・向上すること¹⁸⁾、補修後の試験体が健全な試験体と同等以上の耐力、靱性能、エネルギー吸収能力へ回復すること¹⁹⁾、²⁰⁾、など内圧充填工による力学的性能の回復・向上が確認されている。C-SV2 で確認された一時的な膨張挙動の原因は、ひび割れ部に充填された樹脂がひび割れ両側のコンクリートを強固に接合したことで、コンクリート内部での膨張量の配分に変化が生じたことなどが一因として考えられる。

補修前後で C-C1 と C-C2 の膨張挙動に相違が生じた要因には、前述した応力解放や補修工法の効果の影響が考えられる。応力解放については、その影響を定量的に評価することは難しいが、図-7 の各計測箇所です穿孔直前・

直後の膨張量に不連続な挙動を確認できないことから、その影響は限定的と考えられる。補修工法の効果については、その 1 つとして、ひび割れを充填した樹脂がひび割れ両側のコンクリートを強固に接合し、拡大するひび割れを拘束したことが挙げられる。この場合、補修前に観測されたような膨張速度で拡大するひび割れを拘束するほどの力学的性能を、ひび割れ内の樹脂が有する必要がある。しかしながら、一般的にエポキシ樹脂のヤング率がコンクリートのものより小さいこと、補修前の年間膨張量 (C-C1 で約 0.02 mm/年、C-C2 で約 0.14 mm/年、) と補修時のひび割れ幅 (C-C1 で約 0.50 mm、C-C2 で約 0.15 mm) から算出されるひび割れ幅の拡大率が今回使用した樹脂の引張破壊伸び 5% を大きく上回ることで、PC 巻立て補強を行った橋脚においても ASR による膨張を完全に抑制することは困難であること²¹⁾を踏まえると、膨張に伴うひび割れ幅の拡大を樹脂による接合のみで拘束したとは考えにくい。そのため、今回確認された補修後における膨張速度の低下は、補修工法の適用によって ASR による膨張自体が抑制されたためと考えられる。ASR が発生する条件 (アルカリ分、反応性骨材、水の存在) を考慮すると、今回適用された補修工法ではコンクリート中のアルカリ分や反応性骨材の除去は行われていないことから、アルカリシリカゲルの吸水膨張の抑制によるものと言える。内圧充填工は、予め穿孔した注入孔を起点とし、躯体内部から高流動性の樹脂を低圧注入する工法であることから、躯体表面のひび割れが析出物などによって目詰まりした状態であってもひび割れ内部へ着実に樹脂を充填し、ひび割れ内部に残存していた水を樹脂と置換して排除することが期待できる。また、ひび割れへの樹脂充填によって外部からの水の侵入が減少することから、シラン系撥水材による面的な撥水効果との相乗効果により、躯体表面からの水の供給量が低減したと考えられる。ただし、今回対象とした橋台

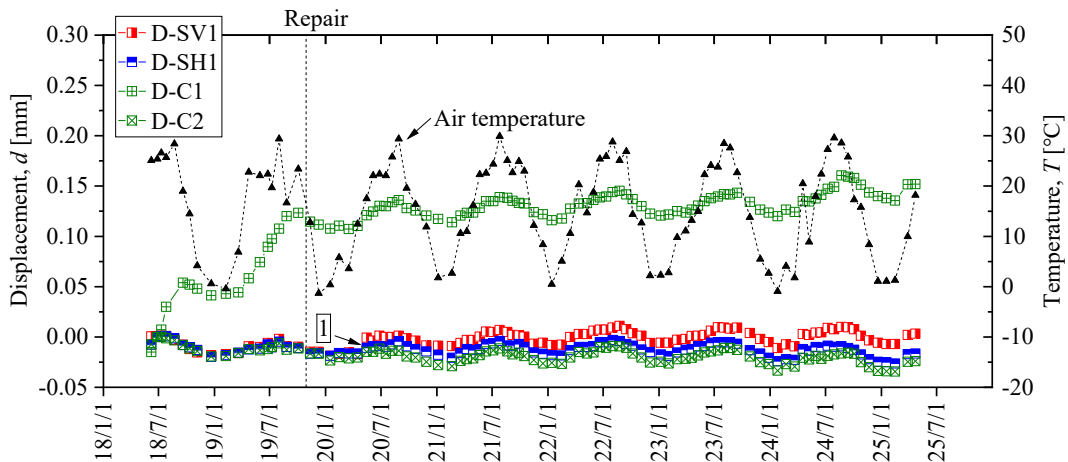


図-8 膨張量の経時変化（下流部）

では、背面側に残存する未補修部からの水の供給を低減することはできない。また、躯体断面が大きいことから躯体深部における水分量が補修直後に大きく低減したことは考えにくい。そのため、躯体全体に対して ASR の進行を完全に抑制することは困難であり、C-SV1、C-SV2 および C-SH2 では補修後においても温度変化に応じた膨張量の増減を繰り返しながら膨張量が累積する傾向を示した。この膨張量の累積に起因し、補修から約4年が経過した時点（図中の Crack）で幅 0.05～0.08mm のひび割れの発生が確認された。なお、このひび割れの発生位置は、補修前にひび割れが存在していなかった箇所であり、その後 C-SV1、C-SV2 および C-SH2 を通る位置に進展した。これらの計測位置では、ひび割れからの水の侵入が生じたことから、ひび割れ発生後に膨張量の顕著な増加（図中[2]）を示している。

今回適用したシラン系撥水材は、それによる水分量低下の効果が躯体表面に留まり、躯体断面の大きい構造物内部での水分量低下は限定的であることが知られている。また、補修後におけるひび割れ発生の前後で当該箇所の膨張速度が大きく変化したことを踏まえると、今回適用した補修工法の効果は、ひび割れ内部に残存していた水を樹脂と置換して排除したこと、ひび割れへの樹脂充填によって外部からの水の侵入を防止したことが主な要因となって発現されたと推察される。

(3) 橋台下流部

橋台下流部の膨張量と外気温の計測結果を図-8 に示す。各計測箇所の膨張量を見ると、ひび割れ部（D-C1）における補修前の膨張量が他の箇所よりも大きくなっている。しかしながら、D-C1 の補修後における膨張量の挙動は、僅かな膨張量の累積を伴うものの、大部分が温度変化に応じた周期的な変動に留まっており、膨張速度が大きく抑制されている。また、D-SV1

（健全部）では、補修後における最初の温度上昇時に膨張量がやや大きくなる挙動（図中[1]）を示しており、図-7 と同様な傾向を確認できる。

上記の膨張量の計測結果より、補修前の橋台では中央部（C-C1、C-C2）と下流部（D-C1）において顕著な膨張を示す箇所があり、ASR が未だ収束していないことが確認された。一方、上流部（U-C1）の膨張量は他の箇所と比較して小さく、ASR が収束に近づいていたと推察される。一般的に、ASR は水掛かりのある箇所ですく進行することが知られている。橋台中央部は上部工直下に位置することから水の供給量が少なく、ASR の進行が遅かったことから大きな残存膨張性を有し、補修前に顕著な膨張を示したと考えられる。一方、橋台の上流部と下流部はともに水掛かりがある箇所であるにもかかわらず、ASR の進行に相違が生じていた。図-9 は、橋台の上流部、中央部、下流部で計測したコンクリートの表面含水率の経時変化である。下流部は水掛かりがある箇所であるものの、表面含水率は中央部と類似した 4.4～4.8% 程度であった。一方、上流部の表面含水率は 5.2～5.8% 程度で

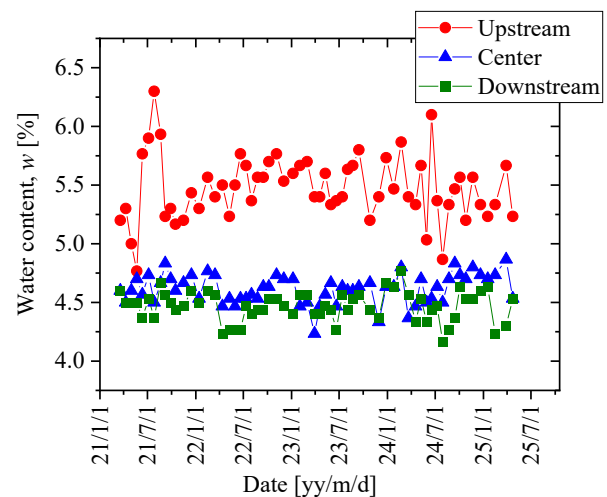


図-9 コンクリートの表面含水率の経時変化

あり、中央部や下流部と比較して高い。この表面含水率の相違には日射などの影響が考えられるが、その原因は明確でない。表面含水率から躯体内部を含めた全体の水分量を論じることはできないが、表面含水率が高い箇所では、躯体表面からの水の供給量が他の箇所と比較して多くなると考えられる。この水の供給量の相違に起因し、上流部、中央部、下流部で ASR の進行に相違が生じたと推察される。

5. 補修工法の有効性評価

「4. 膨張量の計測結果」に示した補修前後における膨張挙動の変化から、内圧充填工とシラン系撥水材が ASR の膨張を抑制する効果を発揮したことが示された。しかしながら、補修後における各計測箇所の挙動を詳細に見ると、外気温の上昇・下降に伴う膨張量の増加・減少を示しながら、僅かに膨張量が累積する箇所（U-C1, C-SV1, C-SV2, C-SH2, D-C1）も存在した。これは、今回対象とした橋台では背面側に残存する未補修部からの水の供給が低減されていないこと、躯体断面が大きいことため躯体深部における水分量の低下が緩慢であることから、補修後においてもコンクリート内部の水を完全に除去することや、外部からの水の供給を完全に遮断することは困難であり、ASR が徐々に進行することを示している。これらの結果から、橋台に対して内圧充填工とシラン系撥水材を適用した今回の補修は、ASR の進行を完全に止める恒久的なものとはならないものの、劣化因子となる水の排除と侵入抑制によって劣化の進行速度を低減し、残存耐用期間を延長する効果を発揮したと言える。そのため、補修後の定期点検などによって変状発生の有無を把握するとともに、再補修の可能性を踏まえた維持管理計画を策定することが必要となる。一方、今回対象とした構造物である橋台とは異なり、背面土など施工の障壁となるものが存在せず、全面的な補修が可能な構造物については、外部からの水の供給を大幅に低減できると考えられる。躯体断面が大きい場合には躯体深部の水分量の低下に長期間を要するため、補修後にも一定の膨張は継続すると思われるが、恒久的に近い対策工となりうる可能性がある。今後、他の構造物に対する補修事例のモニタリングを実施し、構造物の種別に応じた補修効果を明らかにする必要がある。

膨張量の計測結果から、調査対象構造物で生じた ASR による劣化の進行過程を概略図で表すと図-10 のようになり、新設時からの過程を以下のように整理することができる。なお、図-10 において、補修前の点線部は ASR による一般的な劣化過程から推察した膨張量の推移、補修前後の実線部は観測結果に基づく膨張量の推移、補修

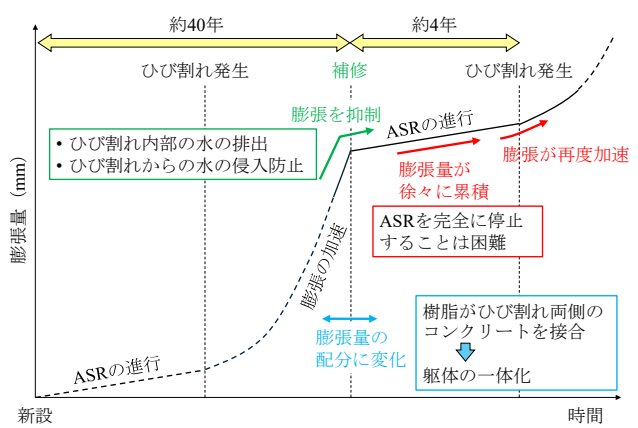


図-10 調査対象構造物における劣化の進行過程

後の点線部は観測結果から推察される今後の膨張量の推移となっている。

a) 新設～ひび割れの発生

反応性骨材を含むコンクリートで新設された後、ASR が徐々に進行し、膨張量が限界に達した時点でひび割れが発生。

b) ひび割れの発生～補修

ひび割れの発生により、外部からコンクリート内部への水の供給量が増加。これにより、ASR の進行が加速し、図-2 に示すように多数のひび割れが発生。

c) 補修

内圧充填工によってひび割れ内部に樹脂を充填させながら劣化因子となる水を排除するとともに、樹脂の硬化後は外部からの水の侵入を抑制。また、ひび割れ内の樹脂がひび割れ両側のコンクリートを強固に接合。さらに、シラン系撥水材の撥水効果によってコンクリート表面からの水の侵入を抑制。

d) 補修～ひび割れの発生

ひび割れやコンクリート表面からの水の供給を抑制したことによって ASR の進行速度は大きく低減。しかしながら、橋台背面に未補修部が残存すること、躯体断面が大きいことため躯体深部における水分量の低下が緩慢であることから、完全な水の除去と遮断は困難であり、徐々に膨張量が累積。膨張量が限界に達した時点（補修から約4年後）で新たにひび割れが発生。

e) ひび割れの発生～今後

補修後に発生したひび割れから水が浸入することにより、膨張速度が増加。ASR の進行が加速する可能性があるため、定期点検などによる変状の把握と、再補修の検討を実施。

上記のような ASR による劣化の進行過程を踏まえた上で、今回実施された補修工法の効果の継続期間について考察を行う。まず、補修後の構造物に要求する状態として、補修後における一切の変状の発生を許容しないとする。この場合、本研究で調査対象とした構造物が要求

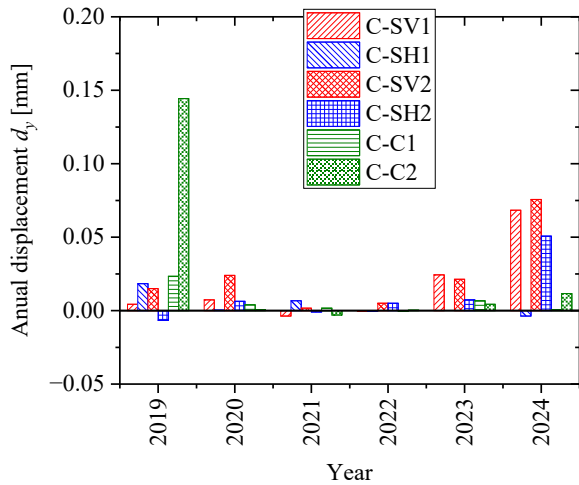


図-11 年間膨張量（中央部）

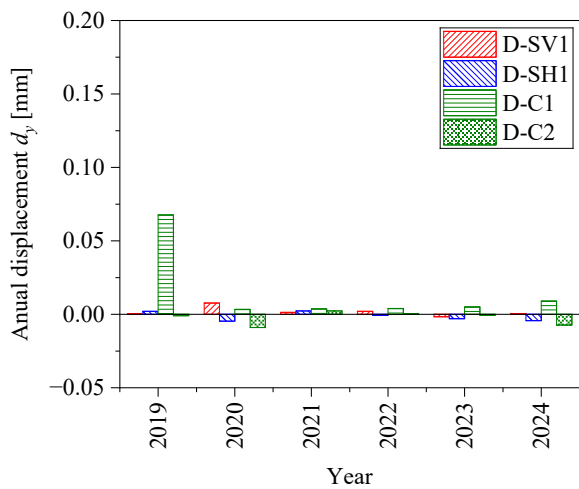


図-12 年間膨張量（下流部）

される状態を満足するのは、補修後に新たなひび割れが発生するまでの約4年間となり、これを補修効果の継続期間とみなすことができる。

次に、補修工法に期待する効果として、図-10に示すような補修後における膨張量の増加速度の抑制、すなわち劣化進行の抑制を考える。この場合、補修後に抑制された膨張量の増加速度が、再劣化によって補修前と同等の増加速度に戻るまでの期間を補修効果の継続期間とみなすことができる。図-11と図-12は、各年で生じた膨張量（年間膨張量）を各計測箇所において求めた結果であり、補修前に膨張が顕著な箇所があった中央部と下流部について示している。なお、2018年は6月から計測を開始したため、対象としていない。補修前（2019年）の年間膨張量は、ひび割れ部において、図-7と図-8で見たような顕著な膨張に起因し、大きな値を示している。特に、中央部のC-C2ではその値が大きい。また、健全部についても、中央部のC-SH1とC-SV2でやや大きな年間膨張量を示している。補修後、ほとんどの計測箇所でも年間膨張量がほぼゼロになっており、補修効果の発揮が確認で

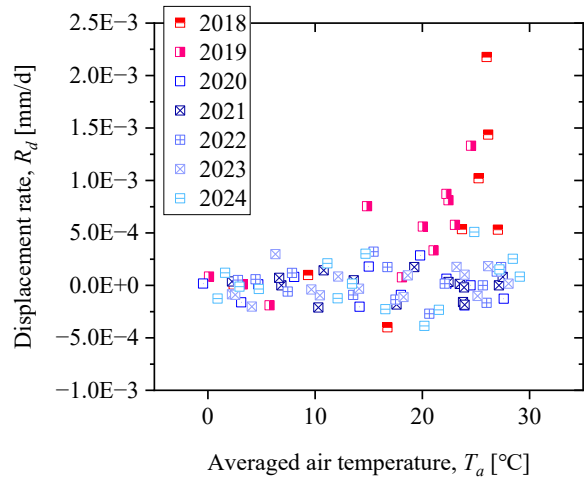


図-13 膨張速度と外気温の関係（C-C2）

きる。ただし、中央部のC-SV2では、補修後における最初の温度上昇時に膨張量が大きくなる挙動（図-7中①）を示したことから、2020年においても比較的大きな年間膨張量を示した。その後、年間膨張量は小さな値で推移するものの、新たなひび割れの発生が確認された2023年頃から、新規ひび割れ付近の計測箇所でも上昇傾向を示している。しかしながら、その値は補修前のものと比較して小さな値に留まっていることから、補修の効果は完全には消失していない。現状は、補修効果が低減しながらも、引き続きASRの進行を抑制している状態にあると言える。今後、年間膨張量が補修前と同等な値にまで戻った場合、それまでの期間を「劣化進行の抑制」の観点からの補修効果の継続期間とみなすことができる。

一方、ASRによる膨張挙動が外気温の影響を大きく受ける^{9) 10) 11)}ことを踏まえると、より定量的な評価のためには、図-13に示すような「膨張速度」と「温度」の関係を用いることが有効と考えられる。図-13は、式(1)から求めた「連続する膨張量の計測データ2点間の傾き（膨張速度） R_d 」を、式(2)から求めた「連続する外気温の計測データ2点の平均 T_a 」に対してプロットしたものであり、代表的なものとして補修前の膨張が顕著であったC-C2の結果を示している。

$$R_d = \frac{d_{i+1} - d_i}{\Delta t} \quad (1)$$

$$T_a = \frac{T_i + T_{i+1}}{2} \quad (2)$$

ここに、 d_i : i 番目の変位量 (mm) , Δt : i 番目と $i+1$ 番目の変位量の計測間隔 (d) , T_i : i 番目の外気温 (°C) である。

図-13で補修前（2018, 2019年）のデータを見ると、膨張速度は外気温に大きく依存しており、外気温が概ね20°C以下の領域ではほぼゼロ、外気温が概ね20°C以上

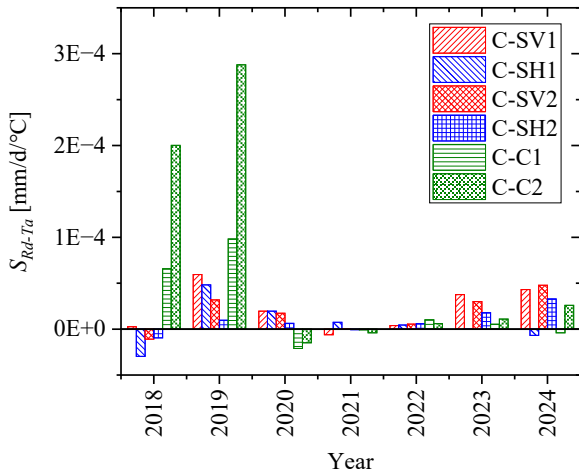


図-14 膨張速度－外気温関係の傾き（中央部）

の領域では外気温の上昇に伴って増加する傾向を示している。一方、補修後のデータでは、外気温が概ね 20°C 以上の領域においても膨張速度はほぼゼロの値を示しており、補修前とは全く異なる挙動を示す。この補修前後での膨張速度の相違は、補修による ASR の抑制効果を表すことから、今後補修後の膨張速度が徐々に増加し、補修前の膨張速度と同程度になった場合、それまでの期間を補修効果の継続期間とみなすことができる。現状では、補修前後での膨張速度は全く異なる値を示していることから、C-C2 における補修工法の効果は現時点でも継続していると言える。図-14 は、図-13 のような膨張速度－外気温関係において、外気温 20°C 以上の領域を対象に線形近似した際の傾き S_{Rd-Ta} を、中央部の各計測箇所において算出した結果である。本調査期間においては、各年における外気温に大きな相違がなかったことから、図-14 は図-11 と類似した傾向を示した。補修前に大きな値を示したひび割れ部の S_{Rd-Ta} は、補修後に大きく低減し、その後小さな値で推移した。新たなひび割れの発生が確認された 2023 年頃から、新規ひび割れ付近の計測箇所でも上昇傾向を示しているものの、その値は補修前のものと比較して小さな値に留まっている。

6. まとめ

本研究では、ASR に起因した残存膨張性を有する実構造物へ適用された補修工法を対象に、その有効性や補修効果の継続期間について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 補修前の構造物で計測した膨張量は、健全部よりもひび割れ部で大きかった。ひび割れ部の膨張挙動は外気温の影響を強く受け、外気温が概ね 20°C 以上となる時期に大きく膨張し、外気温が低下するとほとんど膨張しなかった。

- 2) 内圧充填工と表面含浸工法（シラン系撥水材）による補修を行った後、ひび割れ部で計測した膨張量は温度変化に応じた僅かな変動に留まった。これは、ひび割れ内部に残存する水を樹脂との置換によって排除したこと、ひび割れへの樹脂充填によって外部からの水の侵入を低減したことにより、ASR の進行を大きく抑制したためと考えられる。
- 3) 補修後の最初の温度上昇時、補修前の膨張量が小さかった計測箇所において、膨張量が一時的に大きくなる挙動が確認された。これは、ひび割れ部に充填された樹脂がひび割れ両側のコンクリートを強固に接合したことで、コンクリート内部での膨張量の配分に変化が生じたためと考えられる。
- 4) 補修によって ASR による膨張速度は大きく抑制されたものの、今回対象とした橋台では、背面からの水分供給や躯体深部に残存する水分によって長期的には膨張量が累積する傾向にあり、補修から約 4 年で幅 $0.05\sim 0.08\text{mm}$ のひび割れの発生が確認された。そのため、今回対象とした橋台で適用した補修工法は、ASR の進行を完全に止める恒久的なものとはならないものの、劣化因子となる水の排除と侵入抑制によって劣化の進行速度を抑制し、残存耐用期間を延長する効果を発揮したと言える。
- 5) 補修によって大きく抑制された膨張速度は、新たなひび割れが発生した後、新規ひび割れ付近の計測箇所でも上昇傾向を示した。しかしながら、補修から 5 年が経過した時点において、その値は補修前のものと比較して小さな値に留まった。そのため、今回適用した補修工法は、この時点において、膨張速度の抑制効果が低減しつつあるものの、引き続き ASR の進行を抑制していると考えられた。

謝辞：本研究は、公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金（令和 5 年度 研究助成）ならびに JSPS 科研費（24K01873）の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

REFERENCES

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，pp. 1-8，東京大学出版会，2004。
- 2) 国立研究開発法人土木研究所：土木研究所資料 第 4433 号「コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022 年版」，pp. V-1-V-44，2022。
- 3) 公益社団法人土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp. 64-80，丸善出版，2022。
- 4) 鄭 載東，平井和喜，三橋博三：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，第 1 巻第 1 号，pp. 85-94，

- 1990.
- 5) 黒田 保, 小谷憲司, 高見新一, 西林新蔵: 各種試験環境下におけるモルタルの ASR 膨張特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 95-100, 2003.
 - 6) 黒島美男, 大沼博志, 寺村直子: 寒冷地環境におけるエポキシ樹脂ひび割れ注入材の接着強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 619-624, 2008.
 - 7) 内藤 勲, 横田 弘: エポキシ樹脂系ひび割れ注入材の低温環境における注入性能の評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 76, No. 4, pp. 293-305, 2020.
 - 8) 奥山和俊, 石井浩司, 笹谷輝彦, 鳥居和之: 亀裂変位計を用いたモニタリングによる ASR 劣化橋梁の維持管理, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 1053-1058, 2008.
 - 9) 津田 誠, 浦 修造, 湊 俊彦, 鳥居和之: ASR が発生したコンクリート橋の調査診断と補修・打替技術の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 1555-1560, 2016.
 - 10) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術 '11 [基礎編], pp.200-205, 日本コンクリート工学会, 2011.
 - 11) 廣野真一: わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究, 金沢大学博士論文, pp.30-62, 2015.
 - 12) 小林一輔: コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法, 森北出版, p.38-39, 1998.
 - 13) 小林一輔, 丸 章夫, 立松英信: コンクリートの耐久性診断シリーズ 2 アルカリ骨材反応の診断, p.44-49, 森北出版, 1991.
 - 14) 公益社団法人土木学会: 技術推進ライブラリー No.20 「コンクリート構造物における IPH 工法 (内圧充填接合補強工法) の設計施工法」に関する技術評価 報告書 「コンクリート構造物における IPH 工法 (内圧充填接合補強工法) の設計施工指針 (案)・同解説」, pp. 3-6, 公益社団法人土木学会, 2022.
 - 15) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2022-, pp. 108-121, 2022.
 - 16) 松本 茂, 新名 勉, 江良和徳, 村橋大介, 宮川豊章: シラン系表面含浸材および亜硝酸リチウムの ASR 膨張抑制効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 3, pp. 288-300, 2010.
 - 17) 西尾亮人, 柿澤雅樹, 六郷恵哲, 小林孝一: コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 441-446, 2016.
 - 18) 荒木秀夫, 吉田 俊太郎, 洪 成, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 883-888, 2010.
 - 19) 伊東康貴, 八十島 章, 加川順一, 荒木秀夫: エポキシ樹脂で補修した RC 部材の曲げせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 1579-1584, 2007.
 - 20) 永山正幸, 八十島 章, 加川順一, 荒木秀夫: エポキシ樹脂注入による既存 RC 梁の補修効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 1615-1620, 2008.
 - 21) 笹谷輝彦, 浦 修造, 津田 誠, 鳥居和之: ASR により劣化した RC 橋脚の補強とモニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1019-1024, 2011.

(Received September 30, 2025)

(Accepted November 30, 2025)

ASSESSMENT OF EFFICACY OF REPAIR METHODS THROUGH A CASE STUDY OF A STRUCTURE EXHIBITING RESIDUAL EXPANSION

Kazuhiro UENO, Teiji OKAMOTO, Sadato OKAMOTO and Junichi KAGAWA

The efficacy and longevity of the inside pressure hardening and silane-based surface penetrant were evaluated in a bridge abutment affected by alkali-silica reaction (ASR). Measurements of concrete expansion conducted before and after the repair indicated that, while the expansion had significantly increased prior to repair, it exhibited only minor fluctuations post-repair in response to temperature variations. This suppression of expansion is largely attributed to the removal of water from within the cracks, achieved by replacing it with resin, and the prevention of external water ingress through resin filling. Nonetheless, over the long term, expansion tended to accumulate due to moisture supply from the rear of the abutment and residual moisture deep within the structure, with minor cracks emerging approximately four years post-repair. These findings suggest that while the repair methods applied in this study do not offer a permanent solution, they are effective in mitigating the progression rate of ASR and extending the remaining service life of the bridge abutment.