

# コンクリートの微細ひび割れの 簡易補修の適用に向けた実験的検討 —施工環境に適した材料選定の検討—

寒地土木研究所 耐寒材料チーム

○佐藤 義臣  
内藤 勲  
三原 慎弘

厳しい環境にあるコンクリートは、ひび割れから劣化が進行しやすいため、微細ひび割れであっても早期の対策が本来望ましい。本研究では、種々の塗布系補修材を用いて微細ひび割れを補修する実験において、劣化因子の侵入抑制効果や環境条件による劣化進行状態の検証を行った。暴露実験および現地実験の結果から、早期の補修は劣化抑制に有効かつ経済的であるが、施工環境に適した材料を選定することが効果的であることを確認した。

キーワード：微細ひび割れ、予防的修繕、長寿命化、表面被覆

## 1.はじめに

厳しい環境にあるコンクリートのひび割れは劣化因子の導入源となり、構造物の耐久性を低下させる原因となる。ひび割れの補修は一般的に 0.2mm 以上を対象としており、0.2mm 未満のひび割れ（以下、微細ひび割れ）は経過観察とされる場合が多い。しかし、海岸線や凍結防止剤が多く散布される厳しい環境では、スケーリングや鋼材腐食が発生しやすく<sup>1)</sup>、例えば、図-1 に示す地覆では、コンクリート打設後 3 年目（供用開始後 1 年目）の初回点検で幅 0.1mm のひび割れがあり、そのひび割れからスケーリングが発生している事例である。このように劣化の進行が速い厳しい環境では、微細ひび割れであっても早期に補修等の対策をすることが望ましい。また、微細ひび割れの補修工法として、ひび割れ被覆工法<sup>2)</sup>があるが、補修効果や耐久性、費用対効果については不明瞭である。

こうした背景から、筆者らは微細ひび割れへの早期対策による補修効果について研究<sup>3)</sup>しており、種々の塗布系の補修材で微細ひび割れを補修した供試体による室内実験<sup>4)</sup>、暴露実験、および現地実験を実施している。



図-1 0.1mm のひび割れからのスケーリング発生例

本報では、暴露実験による補修後の遮塩効果と耐久性の評価、および現地実験による補修材の施工性等の評価を行い、微細ひび割れの早期補修対策による劣化抑制効果の検証、および各種補修材の適用性等について検討した結果を報告する。

## 2.実験概要

### (1) 暴露実験供試体の作成と補修ケース

暴露実験に使用する各供試体の概要を図-2、表-1 示す。作製した供試体は封緘養生 28 日後、山本らの方法による割裂載荷で縦にひび割れを導入<sup>5)</sup>し、これらを暴露実

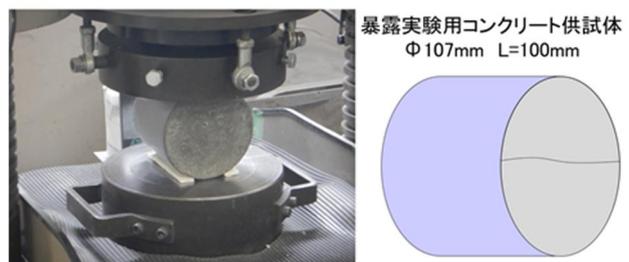
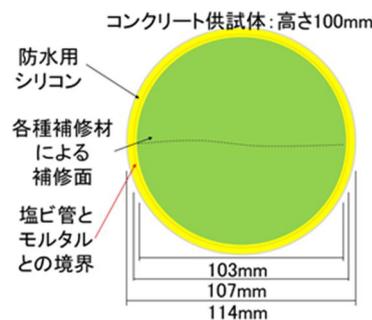


図-2 暴露実験供試体の概要図

験用のコンクリート供試体（以下、供試体）とした。

試験ケースと使用した補修材の主な諸元を表-2に示す。実験に使用した補修材は、主成分と被覆性状の異なる計15種類とした。供試体は打設面と型枠面の両面に各補修材の標準塗布量を塗布した。なお、エポキシ系以外の粘度は未公表のため記載していない。

(2) 暴露実験

既報の室内実験<sup>4)</sup>において、今回使用した各種補修材の一部は、補修後の遮水性の有無や水との接触条件によって補修材の劣化進行が異なることを確認している。さらに今回、実際の環境における性状を評価するため、厳しい環境に短期間暴露する暴露実験を行い、補修後の補修材と供試体の短期的な変化、耐久性、および補修効果を検証した。

暴露実験は、厳しい環境である北海道増毛町と沖縄県大宜味村にある海沿いの暴露実験場にて行った。両暴露場は飛来塩分による塩害の影響を強く受ける場所であり、低温で凍結融解作用を受ける環境（増毛）と高温で強い紫外線を受ける環境（沖縄）の両極端の複合作用環境において比較を行った。

暴露実験の状況を図-3および図-4に示す。各供試体は補修面の一面を海側に向けて据え付けた。測定計画の暴露年数を1年、3年、5年の3水準とし、各試験ケースで供試体を計画年数分の3個設置した。なお、本報では、回収した暴露1年目の供試体において、補修材の外観観察および塩化物イオン量の測定を行った結果を報告する。

a) 外観観察

外観観察は、暴露供試体の海側に向けた補修面の補修材の劣化の有無を確認した。評価方法は、確認された剥離の範囲によって劣化の程度を分類した。剥離無しもしくは剥離範囲が極一部の場合は「劣化無」、剥離範囲が全体の1/3程度の場合は「劣化小」、2/3程度では「劣化中」、2/3以上は「劣化大」として評価した。

b) 塩化物イオン量の測定

塩化物イオン量の測定は、供試体の海側に向けた補修面から深さ10mmまでのコンクリートに含まれる塩化物イオン量を電位差滴定法により測定し、補修材の遮塩性および効果持続性を確認した。なお、ひび割れを導入していない供試体（ケース17）、およびひび割れを補修して

表-1 モルタルとコンクリートの配合

| モルタルの配合  |         |                          |     |      |           |         |
|----------|---------|--------------------------|-----|------|-----------|---------|
| セメントの種類  | W/C (%) | 単位置量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      | flow (mm) | Air (%) |
|          |         | W                        | C   | S    |           |         |
| 普通ポルトランド | 55      | 291                      | 529 | 1587 | 220       | 10      |

| コンクリートの配合 |         |       |                          |     |     |      |            |         |
|-----------|---------|-------|--------------------------|-----|-----|------|------------|---------|
| セメントの種類   | W/C (%) | AEの有無 | 単位置量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | Slump (mm) | Air (%) |
|           |         |       | W                        | C   | S   | G    |            |         |
| 普通ポルトランド  | 55      | 有     | 155                      | 282 | 845 | 1040 | 120        | 6       |

表-2 補修材の種類と主な諸元

| ケース | 名称 | 主成分                | 用途        | 被覆性状    | 材種    | ひび有無 |   |
|-----|----|--------------------|-----------|---------|-------|------|---|
| 01  | YK | エポキシ系 (粘度7mPa/s)   | 浸透防水材     | 浸透系(油性) | 超低粘度  | 有    |   |
| 02  | Y1 | エポキシ系 (粘度150mPa/s) | 浸透防水材     | 浸透系(油性) | 低粘度   |      |   |
| 03  | YP | エポキシ系 (粘度125Pa/s)  | 接着系プライマー  | 塗膜系(油性) | 高粘度   |      |   |
| 04  | AM |                    | 塗膜防水材     | 塗膜系(水性) | 低粘度   |      |   |
| 05  | KS | アクリル系              | 浸透防水材     | 浸透系(水性) | 超低粘度  |      |   |
| 06  | BS |                    | 浸透防水材     | 浸透系(油性) | 低粘度   |      |   |
| 07  | GH |                    | シーリング材    | 塗膜系(油性) | 高粘度   |      |   |
| 08  | KB | シリコン系              | 塗膜防水材(上塗) | 塗膜系(油性) | 低粘度   |      |   |
| 09  | KY |                    | 塗膜防水材(下塗) | 塗膜系(油性) | 低粘度   |      |   |
| 10  | KR |                    | 下地処理材     | 浸透系(油性) | 超低粘度  |      |   |
| 11  | KC | セメント系              | 下地処理材     | 塗布系(水性) | セメント系 |      |   |
| 12  | GC | けい酸塩系              | 浸透防水材     | 浸透系(水性) | 超低粘度  |      |   |
| 13  | GA | フッ素系               | 塗膜防水材     | 塗膜系(水性) | 超低粘度  |      |   |
| 14  | PK | アスファルト系            | 接着系プライマー  | 塗膜系(油性) | 低粘度   |      |   |
| 15  | RS | 炭化水素系              | 塗膜防水材     | 塗膜系(油性) | 高粘度   |      |   |
| 16  | NA | 無対策 (ひび割れ有)        | —         | —       | —     |      | 無 |
| 17  | NN | 無対策 (ひび割れ無)        | —         | —       | —     |      | 無 |

いない供試体（ケース16）もそれぞれ設置し、これらを基準に各補修材の補修効果を比較した。

(3) 現地実験

現地実験は、室内実験や暴露実験では確認できない実施工における作業性や経済性、問題点等の留意事項を検討・確認するため、図-5に示した供用している実構造物である江別市のA橋、函館市のB橋、豊頃町のC橋の3橋において、橋梁地覆の横断方向に入ったひび割れ箇所にも各種補修材（表-2）を塗布して補修する試験施工を行った。

試験施工による調査項目は、補修材を塗布する時期と塗布状況、補修後の補修材の劣化状況、被覆補修した地



図-5 現地実験を行う試験施工箇所



図-3 増毛暴露実験場の暴露状況



図-4 沖縄暴露実験場の暴露状況

覆コンクリートの劣化抑制効果についての調査とした。  
 なお、本試験施工の塗布後の経年変化は調査中であるため、本報では、補修材を塗布する時期の調査結果について報告する。補修材の劣化状況および被覆補修した地覆コンクリートの劣化抑制効果の調査については、次年度以降の報告を予定している。

補修材を塗布する時期と塗布状況の調査では、塗布するコンクリート表面の状態の違いによる作業性等の影響を確認するため、以下の3項目について調査した。

- ① 供用後に補修材を塗布するまでの年数
- ② 塗布前のコンクリート表面の状態
- ③ 補修材塗布時の作業性と塗布状態

上記3項目の調査結果を基に適切な塗布時期および作業性と経済性等について検討した。

なお、補修材の劣化状況の調査は外観観察、被覆補修した地覆コンクリートの劣化抑制効果の調査は超音波伝

播速度測定を行うため、それぞれ初期値の測定を実施した。

#### 4. 暴露実験結果

##### (1) 暴露供試体の外観調査結果

暴露1年目の供試体における海側に向けた補修面の外観状態を図-7（増毛）、図-8（沖縄）、および表-5に外観状態の評価結果を示す。

増毛、沖縄の両暴露実験場において、補修材に変状がほとんど見られない「劣化無」となった試験ケースは、エポキシ系のケース03、シリコン系のケース07~10、セメント系のケース11、およびアスファルト系のケース14であった。これらの補修材は厳しい暴露環境であっても、1年程度ではほぼ劣化しない耐久性を有していることを確認した。

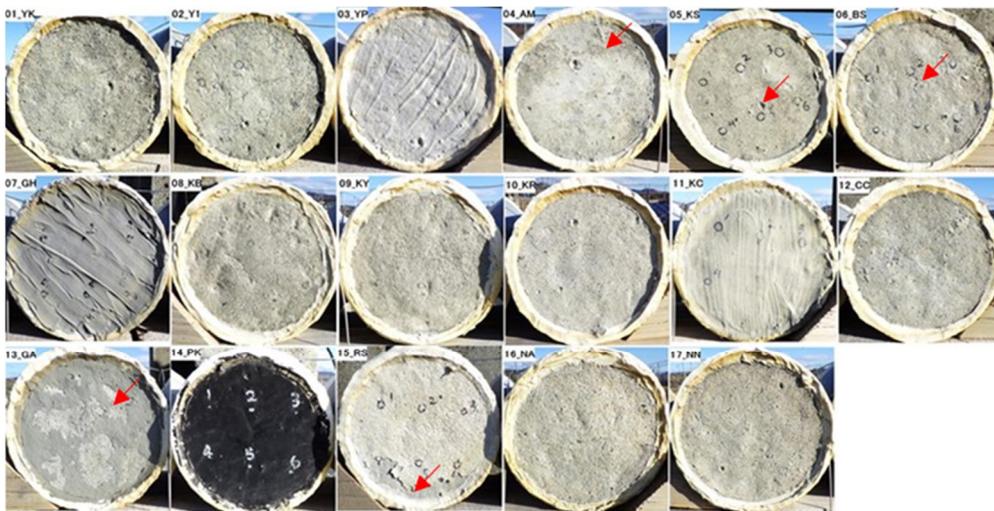


図-7 暴露1年目の補修面の外観状態（増毛）

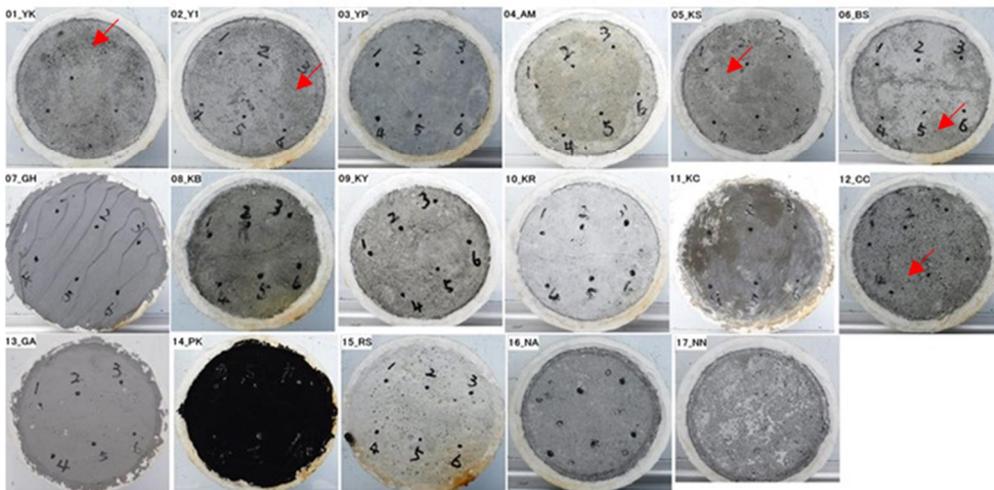


図-8 暴露1年目の補修面の外観状態（沖縄）

表-5 外観状態の評価結果

| ケース   | 01_YK | 02_YI | 03_YP | 04_AM | 05_KS | 06_BS | 07_GH | 08_KB | 09_KY | 10_KR | 11_BC | 12_CC | 13_GA | 14_PK   | 15_RS | 16_NA | 17_NN |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 材種    | エポキシ系 |       |       | アクリル系 |       |       | シリコン系 |       |       |       | セメント系 | けい酸塩系 | フッ素系  | アスファルト系 | 炭化水素系 | 無対策   |       |
| 増毛の剥離 | 無     | 無     | 無     | 小     | 小     | 小     | 無     | 無     | 無     | 無     | 無     | 無     | 中     | 無       | 小     | -     |       |
| 沖縄の剥離 | 小     | 小     | 無     | 無     | 小     | 小     | 無     | 無     | 無     | 無     | 無     | 大     | 無     | 無       | 無     | -     |       |

一方、増毛暴露実験場で「劣化小」以上の剥離が生じていた試験ケースは、アクリル系のケース 04、フッ素系のケース 13、炭化水素系のケース 15 であった。また、沖縄暴露実験場で「劣化小」以上の剥離が生じていた試験ケースは、エポキシ系のケース 01、02、けい酸塩系のケース 12 であった。これらの補修材は環境条件によって暴露 1 年程度で劣化することを確認した。特に、フッ素系のケース 13 は「劣化中」、けい酸塩系のケース 12 は「劣化大」となり、環境によって補修効果が期待できない結果となった。さらに、両暴露実験場で剥離が生じていた試験ケースは、アクリル系のケース 05、06 であった。劣化の程度は「劣化小」であることから多少の補修効果は見られたが、どちらの環境でも耐久性は低い結果となった。これらの結果から、低温で凍結融解作用がある増毛で剥離したケース 04、05、06、13、15 は耐凍害性が低く、高温で紫外線が強い沖縄で剥離したケース 01、02、05、06、12 は耐候性が低いと考察できる。このことから、今回使用した補修材の耐久性は環境によって異なると言える。

## (2) 塩化物イオン量の測定結果

図-9 に増毛と沖縄の暴露 1 年目の供試体の海側に向けた補修面から深さ 10mm までのコンクリートに含まれる塩化物イオン量を示す。ひび割れを補修していないケース 16 はひび割れを導入していない健全なケース 17 よりも塩化物イオン量が多くなっていることから、塩化物イオンがひび割れからコンクリート内部に侵入してより多く浸透・蓄積したと言える。これは既報の室内実験<sup>4)</sup>でも同様の結果であった。

外観調査の結果において、増毛、沖縄の両暴露試験場で剥離が生じなかったエポキシ系のケース 03、シリコン系のケース 07~10、セメント系のケース 11、およびアスファルト系のケース 14 では、ケース 11 を除いて健全なケース 17 よりも塩化物イオン量が少なくなった。これは、供試体の試験面全面を被覆補修したことで、塩化物イオンの侵入を抑制したと言える。特に、ケース 07~09 は塩化物イオン量が非常に少なく、外観調査でも剥離がほぼ生じていないことから、遮塩性、耐久性共に高い結果であった。この結果は既報の室内実験<sup>4)</sup>とほぼ同じ結果であり、これらの補修材は軽微なひび割れへの補修に有効であると考えられる。なお、セメント系のケース 11 は、剥離は生じていないため耐久性は良好であるが、補修していないケース 16 よりも塩化物イオン量が多くなった。これは、セメント系補修材はさほど緻密ではなく、水分が多く浸透する性状であったことから多くの塩化物イオン量が補修材部分に蓄積したためと推測する。

一方、外観調査で剥離が生じていた試験ケースにおいて、増毛暴露試験場で剥離が生じていたアクリル系のケース 04~06、フッ素系のケース 13、および炭化水素系のケース 15 は、ひび割れの無いケース 17 よりも塩化物イオン量が多くなったが、ひび割れを補修していないケ

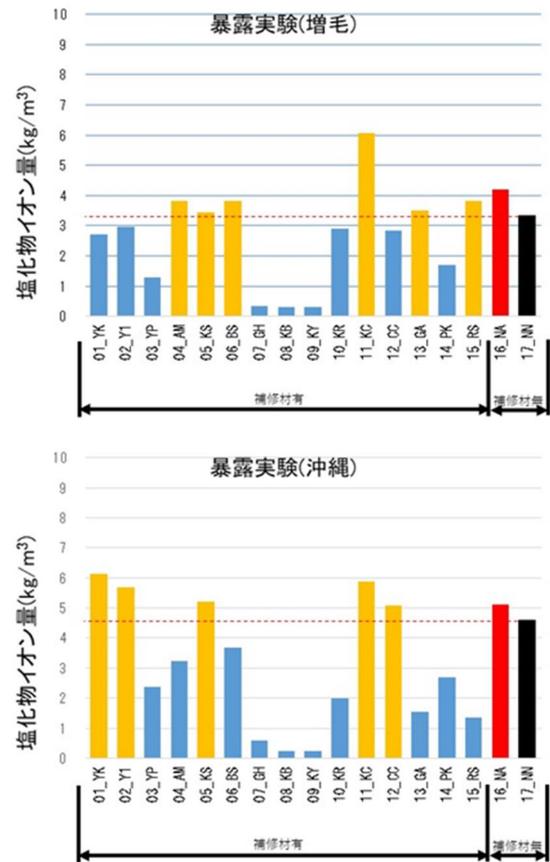


図-9 補修面から 10mm の範囲の塩化物イオン量

ース 16 を下回っている。これは、低温や凍結融解作用で補修材が劣化して剥離等が生じるまでは遮塩効果が効いていたためと考えられる。また、沖縄暴露試験場で剥離が生じていたエポキシ系のケース 01、02、アクリル系のケース 05、06、およびけい酸塩系のケース 12 は、ケース 06 を除いてケース 16、17 よりも塩化物イオン量が多くなった。ケース 01、02、05 は紫外線による材料劣化の影響が大きいこと、ケース 01 と 02 がケース 16 よりも多くなったのはエポキシ樹脂に含まれる塩化物イオン量も含めて測定計上したためと推測する。けい酸塩系のケース 12 は、けい酸塩系補修材がコンクリートに浸透して緻密化したが、ひび割れ部の閉塞には至らず、ケース 16 と同様にひび割れ部からコンクリート内部に塩化物イオンが多く侵入したためと思われる。

以上の暴露実験結果から、各環境条件において補修材が劣化して剥離が生じ、遮塩性と耐久性が低下する試験ケースがあることを確認した。そのため、微細ひび割れを塗布系補修材で補修する際には、環境条件に適合し、補修効果が持続する補修材を選定することが重要である。

## 5. 現地実験結果

### (1) 補修材を塗布する時期と塗布状況の調査結果

補修材を塗布する時期と塗布状況の調査では、上述した①、②、③の3項目について以下の結果を得た。



図-10 地覆状況の一例

①の供用後に補修材を塗布するまでの年数では、定期点検記録から、A橋は2年、B橋は1年、C橋は31年の年数が経過していることを確認した。

②の塗布前のコンクリート表面の状態では、図-10に示した地覆の状況の一例に示すように、A橋とB橋には乾燥収縮による微細なひび割れを確認したが、コンクリートの表面は剥離もなく劣化が見られない比較的施工直後に近いきれいな表面状態であった。一方、C橋は、コンクリートの表面は比較的きれいであるが、乾燥収縮によるひび割れのほか、供用31年の経年劣化から表面のモルタル分の剥離が見られる状態であり、一部分では骨材が露出している箇所もあった。

③の補修材塗布時の作業性と塗布状態では、A橋とB橋はコンクリートの表面が平滑であり、塗布時の補修材の伸びが良く塗り易く、容易に標準塗布量を塗布することができた。一方、C橋ではコンクリート表面が経年劣化によって粗く凹凸があることから、塗布時の補修材の伸びが悪くて塗り難く、凹凸によって比表面積が増加したことで補修材の塗布量も増加し、標準塗布量の2倍～3倍の塗布量となった。

以上の現地実験の結果から、微細ひび割れを塗布系補修材を用いて補修を行う場合、コンクリート表面の劣化が進行してしまうと作業性が低下し、さらに使用量も増加することから、コンクリート表面が劣化する前の早期に微細ひび割れの補修を実施するほうが、作業性が良く、補修材の使用量も低減できるため、経済的にも有利になると考える。

## 6.まとめ

暴露実験および現地実験の結果から、今回使用した補修材の微細ひび割れへの補修効果と適用性等について以下のように整理した。

- (1) シリコン系とアスファルト系の補修材は、高い遮塩性と耐久性を有しており、軽微なひび割れの補修に有効である。
- (2) エポキシ系とけい酸塩系の補修材は、耐凍害性があるため低温環境において補修効果を期待できるが、耐

候性は低いいため紫外線が多い環境での補修には適さない。

- (3) アクリル系、フッ素系、および炭化水素系の補修材は耐候性があり、紫外線環境において補修効果が期待できるが、耐凍害性は低いため低温環境での補修には適さない。
- (4) セメント系は、耐久性はあるが塩化物イオンの侵入抑制効果が低いため、塩害環境での補修には適さないと思われる。
- (5) 使用した環境条件によって耐久性が低下して遮塩性が損なわれる補修材が存在するため、環境条件に適合して補修効果が持続する補修材を選定することが重要である。
- (5) 微細ひび割れを塗布系補修材によって補修する際には、コンクリートの表面劣化が進行する前の早期に補修を実施すると、作業性が良く、補修材の使用量を低減できることから経済的に有利になると考える。

謝辞：本研究を進めるにあたり、試験施工フィールドを提供していただきました、北海道開発局札幌開発建設部、函館開発建設部、帯広開発建設部に対し謝意を表します。  
参考文献

- 1) コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験：土木研究所試料第 4130 号, pp. 32-34, 2009. 1
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書，設計編, p. 149, 2017 年制定版
- 3) 内藤勲, 安中新太郎, 磯萌々子, 横田弘：ひび割れの早期補修による塩分浸透抑制効果と耐凍害性への影響に関する基礎的実験，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 20 巻, pp. 297-302, 2020. 10
- 4) 佐藤義臣, 内藤勲, 三原慎弘：コンクリートの軽微なひび割れへの簡易補修方法による劣化抑制効果の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 24 巻, pp. 119-124, 2024. 10
- 5) 山本昌宏, 谷村成, 藤井隆史, 安藤尚, 綾野克紀：微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法とそれを用いたひび割れ補修材の性能確認試験方法に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 12 巻, pp. 467-472, 2012. 10