

早期ひび割れ補修における各種補修材の 施工環境による効果に関する基礎的検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○小中 隆範
内藤 勲
吉田 行

近年、予防保全効果を期待して早期の軽微なひび割れに対する補修も行われているが、軽微なひび割れの発生要因に基づく補修工法や補修材料の選定方法は明確になっていない。本報告では、施工条件・施工環境による補修材の予防保全効果を把握するため、軽微なひび割れを模擬した供試体を用いた暴露実験による基礎的な検討を行った。

キーワード：早期ひび割れ補修、予防保全、塗布系補修材、浸透系補修材

1. はじめに

ひび割れ補修は一般的にひび割れ幅0.2mm以上を対象としており、0.2mm未満の軽微なひび割れは劣化因子の侵入による影響が小さいとの判断で補修を行わない場合が多い。しかし、近年、予防保全効果を期待して軽微なひび割れへの早期対策も行われているが、軽微なひび割れの発生要因に基づく補修工法や補修材料の選定方法は明確になっていない。特に海水飛沫部や凍結防止剤が多く散布されるような厳しい環境にあるコンクリートのひび割れは、軽微であっても劣化の発生源となって、スケーリングや鋼材腐食が発生しやすくなる¹⁾。このような劣化の進行が早い厳しい環境では、構造物の耐久性の低下を防ぐために0.2mm未満の軽微なひび割れでも早期に補修することが本来望ましい。また、このような軽微なひび割れへの対処方法としてひび割れ被覆工法²⁾があるが、その補修効果や耐久性、費用対効果についても明らかにしていない。

このような背景から、本報では、軽微なひび割れへの早期対策による予防保全効果について、軽微なひび割れを模擬した供試体（以下、ひび割れ供試体）を作製し、塗布系および浸透系の補修材を塗布した供試体（以下、補修供試体）を、温度環境が大きく異なり構造物に厳しい環境である暴露実験場で暴露し、予防保全効果の有効性や適用性等を評価したので、ここに報告するものである。

2. 実験概要

実験に使用した補修材の主な諸元および試験ケースを表-1に示す。補修材には、エポキシ系、アクリル系、セ

メント系、けい酸塩系、フッ素系、シリコーン系、変性シリコーン系を各1ケース使用し、それらをひび割れ供試体に塗布した補修供試体7ケースと、補修材を使用しない無対策（ひび割れの有無のみ）のベースの供試体2ケースを加えた計9ケースを試験ケースとした。これらの試験ケースにおける耐久性を評価するため、環境が大きく異なる2箇所の暴露実験場において暴露実験を行い、耐久性を評価する方法として、補修供試体の外観調査および、超音波伝播速度と塩化物イオン量の測定を行った。

(1) 補修供試体の作製

ひび割れ供試体は、山本らの研究⁴⁾を参考に、内径107mm×長さ100mmの塩化ビニル管を型枠として、表面がウレタン塗装のコンクリートパネルを型枠の底面として塩化ビニル管を固定した。その後、表-2に示す配合のコンクリートを打設し、翌日に型枠底版のみ脱型した。塩化ビニル管の型枠は脱型せずに28日間水中養生した後、割裂引張試験によって0.2mm未満の軽微なひび割れを導入して作製した（図-1）。なお、ひびわれ供試体は、試

表-1 補修材の主な諸元および試験ケース

ケース	名称	主成分	用途	被覆性状	ひび有無
01	Y1	エポキシ系（粘度150mPa/s）	浸透防水材	浸透系（油性）	有
02	AM	アクリル系	塗膜防水材	塗布系（水性）	
03	GH	変成シリコーン系	シーリング材	塗布系（油性）	
04	KB	シリコーン系	塗膜防水材（上塗）	塗布系（油性）	
05	KC	セメント系	下地処理材	塗布系（水性）	
06	CC	けい酸塩系	浸透防水材	浸透系（水性）	
07	GA	フッ素系	塗膜防水材	塗布系（水性）	
08	NA	無対策（ひび割れ有）	—	—	無
09	NN	無対策（ひび割れ無）	—	—	

表-2 コンクリートの配合

セメントの種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						Slump (cm)	Air (%)
		W	C	S	G	AE減水剤	AE剤		
普通ポルトランド	55.0	155	282	845	1,040	0.10625	0.01976	12.0	6.0

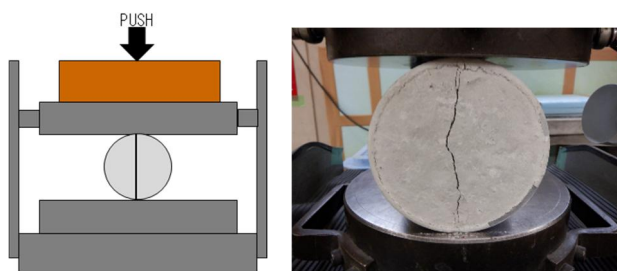


図-1 割裂引張試験の概要図

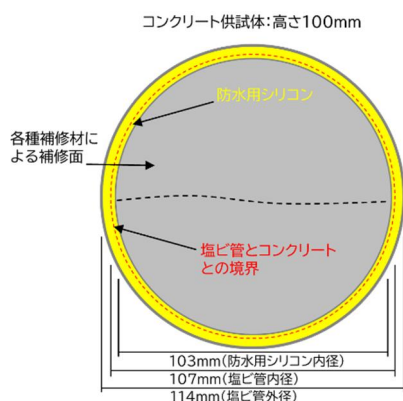


図-2 補修供試体の概要図



図-3 暴露実験場の位置図

験誤差を極力減らすため、ほぼ鉛直に1本のひび割れを割裂できた供試体を選定して使用した。その後、ひび割れ供試体の打設面と型枠底面に補修材を標準使用量塗布して、これを補修面とした(図-2)。補修材塗布後、室温20℃、湿度60%の恒温恒湿室で7日間静置した。

(2) 暴露実験

各補修材の耐久性と予防保全効果を検証するため、温度環境が大きく異なり構造物に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おいて暴露実験を行った(図-3)。温度環境が対極である両暴露実験場において、1時間毎に実測した2年間の気温

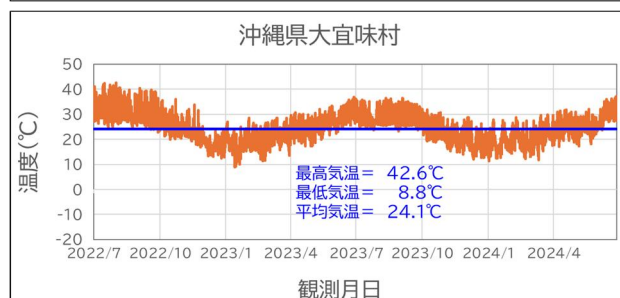
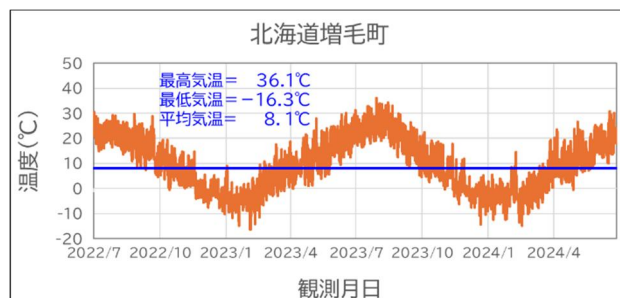


図-4 暴露実験場の気温

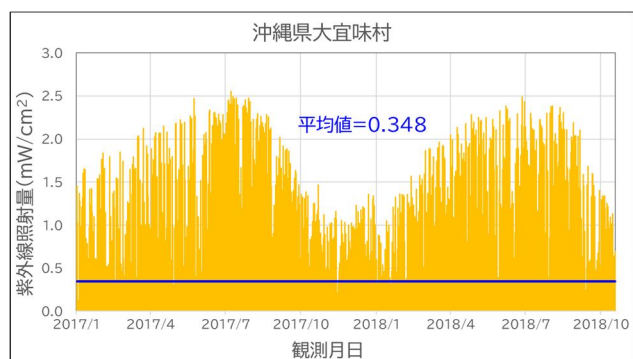
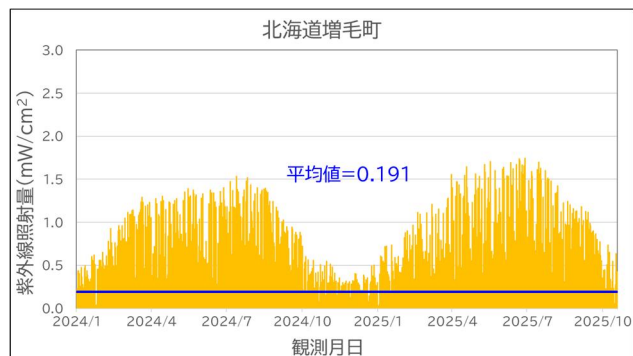


図-5 暴露実験場の紫外線照射量



図-6 各暴露実験場の現況写真
(上) 増毛暴露実験場
(下) 大宜味村暴露実験場

(図-4)を比較すると、増毛暴露実験場は寒暖差が大きく、平均気温は8.1℃、大宜味村暴露実験場は寒暖差が小さく平均気温は24.1℃である。同様に両暴露実験場の紫外線照射量(図-5)を比較すると、増毛暴露実験場は平均値が0.191mW/cm²、大宜味村暴露実験場は平均値が0.348mW/cm²である。増毛暴露実験場は低温で凍結融解作用を受ける環境、大宜味村暴露実験場は高温で強い紫外線を受ける環境である。また、両実験場ともに海水飛沫部にあり、飛来塩分による塩害の影響を強く受ける場所(図-6)である。

暴露実験に使用した補修供試体は、打設面の補修面を海側に向けて設置し、暴露1年、3年、5年分の1ケース3個を配置した。本報では、暴露2年目までの補修供試体の外観調査結果、超音波伝播速度の測定結果、および暴露1年目に回収した補修供試体の塩化物イオン量の測定結果を報告する。

(3) 外観調査

外観調査は、補修供試体の海側の面(打設面の補修面)の損傷の有無を目視により確認した。評価方法は補修面の剥離範囲により劣化を分類した。剥離が極一部の場合

は「劣化無」、全体の1/3程度の場合は「劣化小」、2/3程度を「劣化中」、2/3以上を「劣化大」として評価した。

(4) 超音波伝播速度測定

各暴露実験場において、設置から1年後と2年後の冬季に、超音波伝播速度の測定を透過法により行った。

測定方法は各補修供試体の打設面の補修面から型枠底面の補修面へのストレート方向(①-①'、②-②'等)とクロス方向(①-④'、②-⑤'等)で計測を行った(図-7)。ストレート方向の計測はコンクリートの劣化状態、クロス方向の計測はひび割れの状態を評価するために行った。

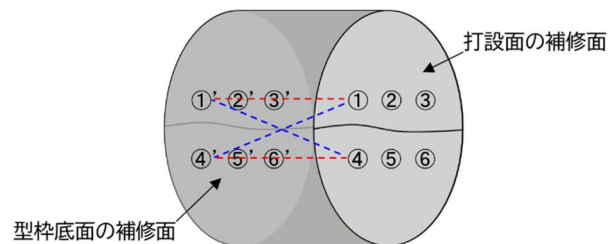


図-7 超音波伝播速度測定位置

(5) 塩化物イオン量測定

回収した暴露1年目の各補修供試体の海側の補修面(打設面の補修面)に浸透した塩化物イオン量を確認するため、塗布した補修材の混入を防ぐ事を目的として補修供試体の打設面の補修面から5mmを切削し、深さ5mm～15mmまでの10mm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(JIS A1154)により測定した。

なお、ケース8はひび割れ未補修のコンクリート、ケース9はひび割れを導入していない健全なコンクリートであり、これらを基準に各補修材の予防保全効果を比較した。

3. 実験結果・考察

(1) 外観調査結果

暴露実験1年目および2年目の外観状態の評価を表-3に示す。また、暴露実験2年目の補修供試体の海側の面の外観状態を図-8、図-9に示す。

変性シリコン系の03_GHとシリコン系の04_KBはどちらの暴露実験場においても、ほぼ剥離が見られなかった。

エポキシ系の01_Y1とけい酸塩系の06_CCは増毛暴露実験場では、ほぼ剥離が見られなかったが、大宜味村暴露実験場では大きく剥離していたことから、高温環境で乾燥収縮により劣化が進行したものと考えられる。

アクリル系の02_AM、セメント系の05_KC、フッ素系の07_GAは増毛暴露実験場では大部分が剥離していたが、大宜味村暴露実験場では剥離範囲が小さく、低温環境で

表-3 補修供試体の外観状態評価

ケース	名称	主成分	被覆性状	剥離状態			
				増毛暴露実験場		大宜味村暴露実験場	
				1年目	2年目	1年目	2年目
01	01_Y1	エポキシ系	浸透系(油性)	無	無	小	大
02	02_AM	アクリル系	塗布系(水性)	小	大	無	小
03	03_GH	変成シリコン系	塗布系(油性)	無	無	無	無
04	04_KB	シリコン系	塗布系(油性)	無	無	無	無
05	05_KC	セメント系	塗布系(水性)	無	大	無	小
06	06_CC	けい酸塩系	浸透系(水性)	無	無	大	大
07	07_GA	フッ素系	塗布系(水性)	中	大	無	無
08	08_NA	無対策(ひび割れ有)	—	—	—	—	—
09	09_NN	無対策(ひび割れ無)	—	—	—	—	—

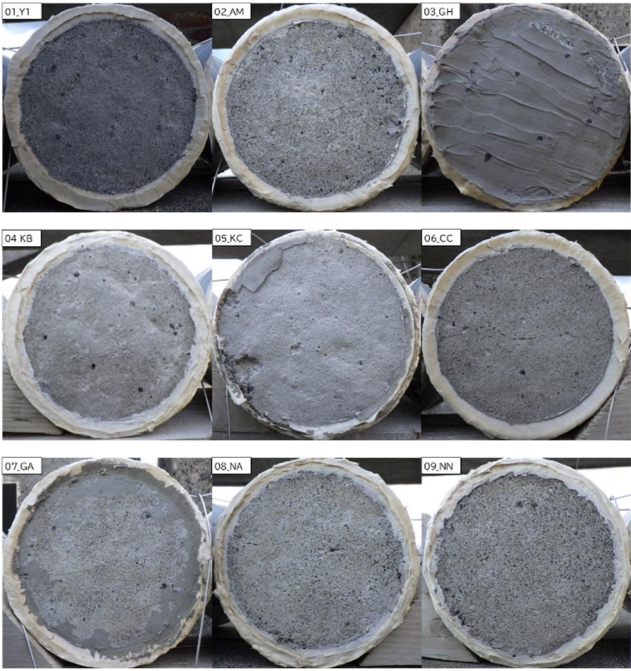


図-8 補修供試体の外観状態 (増毛町)

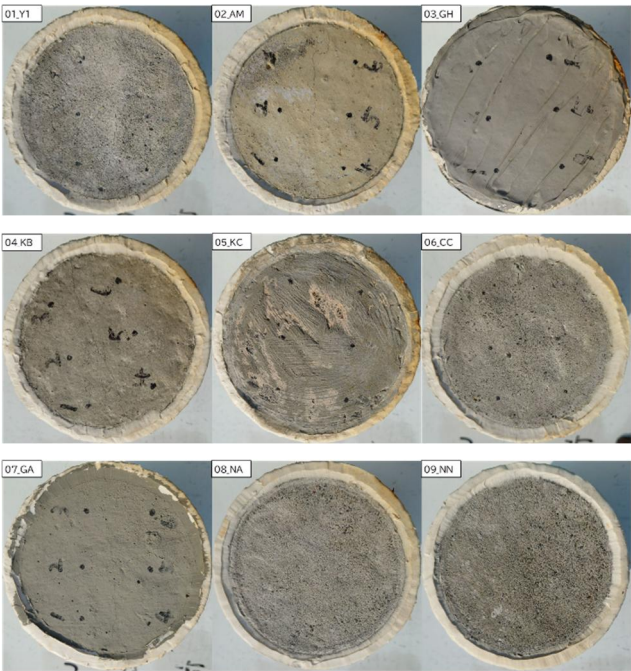


図-9 補修供試体の外観状態 (大宜味村)

の劣化が進行する補修材であると考えられる。

(2) 超音波伝播速度測定結果

各暴露実験場において、設置から2年間の冬季に補修供試体を測定した各測点（12測点／個）を平均し、各ケースで暴露実験場毎にとりまとめた（図-10）。

増毛暴露実験場のストレート方向のケースでは、全ケースにおいて1冬季目で超音波伝播速度が下がり、2冬季目までは超音波伝播速度の低下が緩やかになっている。クロス方向の測定でも概ね同様の傾向が見られた。

一方、大宜味村暴露実験場のストレート方向の測定では、増毛暴露実験場とは異なり、1冬季目までは超音波伝播速度の変化が少なく、2冬季目で超音波伝播速度が低下する傾向が見られた。クロス方向の測定でも概ね同様の傾向が見られた。

外観調査における、各補修材の剥離状態は一様でないが、健全な供試体である09_NNを含めて超音波伝播速度は同様の傾向であるため、供試体自体には大きな劣化は生じておらず、超音波伝播速度の変化は含水率の変化による影響が考えられる。増毛暴露実験場と大宜味村暴露実験場の超音波伝播速度の違いは、温度、湿度等、環境条件の違いにより含水率の差が生じた可能性がある。

補修材の剥離があった場合でも超音波伝播速度の差がないケースが多いことから、超音波伝播速度によるひび割れ部における補修材の劣化判定は難しいと思われる。

なお、変性シリコン系補修材の03_GHとシリコン系補修材の04_KBは、外観では補修材の剥離が見られないが超音波伝播速度が低下傾向にあるため、補修材自体の影響なのかもしれない。もしくは不可視部分で補修材が剥離しているのかを今後の計測で確認したい。

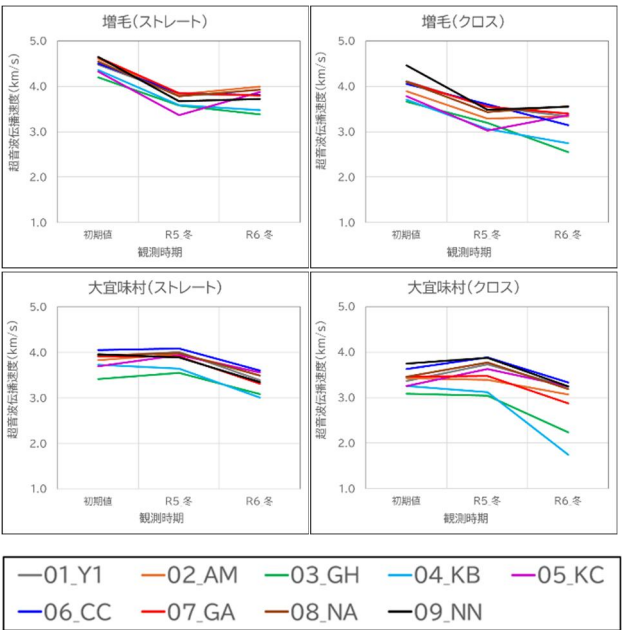


図-10 各試験ケースの超音波伝播速度

(3) 塩化物イオン量測定結果

増毛暴露実験場と大宜味村暴露実験場の暴露1年目のひび割れ供試体の補修面から深さ5mm～15mmまでの10mmのコンクリートに含まれる塩化物イオン量を図-11に示す。補修材を使用していない08_NA（ひび割れ有）と09_NN（ひび割れ無）では、08_NA（ひび割れ有）の方が、塩化物イオン量が多いことが確認できる。これは飛来塩分がひび割れから浸透したためと考えられる。

塗布系補修材の変性シリコン系の03_GHとシリコン系04_KBは両暴露実験場での塩化物イオン量が最も少なく、どちらの環境でも効果的であることが確認できた。

一方、塗布系補修材の05_KC（セメント系）は、両暴露実験場で塩化物イオン量が多く、予防保全効果はみられなかった。これは、05_KCは材料と水の配合比が33%でコンクリート供試体より緻密で水分の浸透抑制効果があるが、塗布厚が1mmと薄いため、補修材の剥離が生じて塩化物イオン量が多くなったと思われる。

浸透系補修材の01_Y1（エポキシ系）と06_CC（けい酸塩系）は、増毛暴露実験場では塩化物イオン量が08_NA（ひび割れ有）より少なく、寒冷環境での予防保全効果は期待できるが、大宜味村暴露実験場では塩化物イオン量が08_NA（ひび割れ有）より多いことから、紫外線に弱い環境では予防保全効果が小さくなっている。塗布系補修材の2_AM（アクリル系）と07_GA（フッ素系）は、浸透系補修材の前者とは逆に、増毛暴露実験場では塩化物イオン量が08_NA（ひび割れ有）より多く、寒冷環境では予防保全効果は大きくないが、大宜味村暴露実験場では塩化物イオン量が08_NA（ひび割れ有）より少なく、紫外線環境では予防保全効果が大きいことが確認できた。

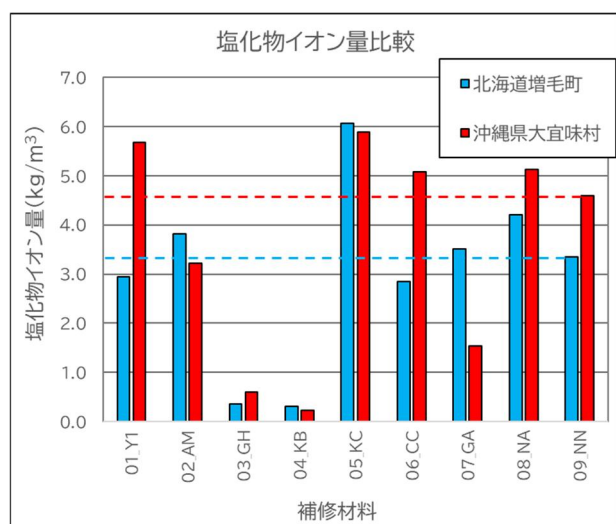


図-11 各試験ケースの塩化物イオン量

4. まとめ

本研究では、各補修材でひび割れ供試体に補修を行った補修供試体による暴露実験において、耐久性の評価を

行い軽微な損傷の早期補修対策による予防保全効果の有効性や適用性等について検討を行った。

以下に本研究で得られた知見を記す。

- 1) 浸透系補修材のエポキシ系補修材01_Y1とけい酸塩系補修材06_CCは、気温が高く紫外線が強い環境では補修材の剥離が多く、耐久性や遮水性が低下する傾向が見られ、低温で凍結融解作用を受ける環境では補修材の剥離が少なく、耐久性や遮水性が持続する傾向が確認でき、低温環境下での使用が有効であると考えられる。
- 2) 塗布系補修材のアクリル系補修材2_AMとフッ素系補修材07_GAは、低温で凍結融解作用を受ける環境では補修材の剥離が多く、耐久性や遮水性が低下する傾向が見られ、気温が高く紫外線が強い環境では補修材の剥離が少なく、耐久性や遮水性が持続する傾向が確認でき、耐候性の高い補修材であると考えられる。
- 3) セメント系補修材05_KCは、どちらの暴露環境でも塩化物イオン量が多かった。これは、コンクリート供試体より緻密で水分の浸透抑制効果がある補修材であるが、塗布厚が1mmと薄く、補修材の剥離が生じたためと考えられる。
- 4) 塗布系補修材の変性シリコン系補修材03_GHとシリコン系補修材04_KBは、補修材の剥離が少なく、両暴露実験場での塩化物イオン量が最も少ないことから、環境条件の影響を受けづらく、耐久性や遮水性が優れていることを確認できた。
- 5) 補修材の超音波伝播速度について、補修材の剥離があった場合でも超音波伝播速度の差がないケースが多いことから、超音波伝播速度によるひび割れ部の補修材の劣化判定は難しいと思われるが、コンクリートの劣化状態等から補修材の劣化状態を評価可能か、今後も計測を継続して確認したい。

今回の実験においては、環境条件が補修材の耐久性、遮水性に影響を与えること、補修材ごとの適正な使用条件の傾向が確認できた。

今後は、暴露期間3年、および5年の補修供試体の状態を確認し、各補修材の耐久性、遮水性等の評価を行い、補修効果が持続する補修材料や適用方法、適用条件を検討し、軽微なひび割れに対する適切な補修方法の確立を目指して検証を進めていきたい。

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，維持管理編，p. 72，2022 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) 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. 11