

凍害・塩害の複合環境における初期ひび割れの早期補修効果

内藤 勲・島多昭典

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れ補修は、ひび割れからの劣化因子の浸入による構造物の耐久性低下を抑制するためにひび割れを閉塞する補修が古くから行われている。予防保全型の維持管理に転換された現在、ひび割れ補修は重要な対策となっているが、補修対象となるひび割れは従前からの目安であるひび割れ幅0.2mm以上が多く、それ未満は対象から外されることが多い。この理由として、鉄筋コンクリートの鋼材腐食に影響を及ぼすひび割れ幅の限界値は0.005c (c：かぶり厚)¹⁾であり、標準的なかぶり厚ではひび割れ幅0.2mm未満は影響が小さいこと、また、ひび割れ幅0.2mm未満を補修した際の有効性は明確ではなく、対策による費用対効果が見えにくいことにある。しかし、厳しい塩害環境においては、ひび割れ幅に関係なく鋼材腐食が発生しやすいこと²⁾、海岸線や凍結防止剤が多く散布される等の凍害・塩害等の厳しい環境ではコンクリートの凍害劣化の進行が速いことから、出来るだけ早期に対策を講じることが重要であり、微細なひび割れのうちから処置することが結果的に延命化とLCCの縮減に繋がると考える。

このような背景から本報告では、凍害・塩害の複合環境におけるコンクリート構造物のさらなる延命化を図ることを目標に、初期の微細なひび割れから早期に劣化進行を抑制する、且つ、簡易で安価な補修方法を検討した室内実験を行い、ひび割れの早期対策の有効性等について検討した結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 ひび割れ供試体

実験に使用した供試体は、表-1に示す配合のモルタルを用いて、内径83mm高さ100mmの塩化ビニル管（以下「塩ビ管」という。）を型枠として円柱供試体を作製（28日間水中養生）し、養生後に割裂載荷して幅約0.1mm程度のひび割れを導入したひび

割れ供試体³⁾とひび割れ無しの供試体を作製した。さらに、これらの供試体を図-1に示すように、厚さ10、30、40mmに切断して各試験用に加工した。各試験用の供試体の片面（試験面）に種々の補修材を施工して図-2に示すような補修供試体を作製した。比較として無対策の供試体も作製した。表-2に使用した補修材の種類と主な諸元を示す。これらの補修材の内、補修材1～4はひび割れ修復工法のひび割れ被覆工法や表面含浸工法に該当する材料であり、補修材1は樹脂系浸透材、補修材2と3は表面含浸材、補修材4はセメント系補修材である。補修材5、6、7は今回の実験においてひび割れ補修を試みた材料であり、補修材5はコンクリート用の落書き防止材、補修材6はひび割れ注入工法の仮止めシール材、補修材7は防水用の補修テープである。各種補修材の施工方法は補修材1、2、3の液体タイプは刷毛で塗布、補修材4と5のスプレー式は300mm程度の距離から吹付け、補修材6はヘラで塗り付け、補修材7は手貼りで施工した。施工量はそれぞれの製品の標準量に準拠し、室温20℃の恒温室内で施工して、施工後7日間静置して養生した。なお、モルタルと塩ビ管との境界からの浸入水の影響をなくすため、厚さ30mmと40mmは試験面、厚さ10mmは両面に防水用シリコンで境界を塞ぐ防水加工を施した。また、補修材7の防水用テープは重ね貼りせずにテープ幅50mmで貼った箇所以外を防水用シリコンで防水加工する仕様とした。

表-1 モルタルの配合

セメントの種類	W/C (%)	単用量(kg/m ³)			Slump flow (mm)	Air (%)
		W	C	S		
普通ポルトランド	55	291	529	1587	227.55	6.0

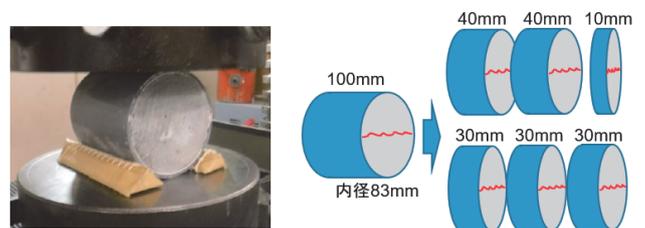


図-1 ひび割れの導入状況と供試体の切断加工のイメージ

表-2 補修材の種類と主な諸元

補修材	主成分	施工方法	主な特徴や用途
1	エポキシ樹脂	刷毛塗布	浸透系塗布材・粘度80mPa・s
2	シラン・シロキサン		表面含浸材・浸透深さ4~7mm
3	けい酸リチウム		表面含浸材・浸透深さ3mm
4	超早強セメント	スプレー吹付	ひび割れ補修用吹付け材
5	シリコン樹脂	吹付	コンクリート用落書き防止材
6	変成シリコーン	ヘラ塗り	ひび割れ注入用仮止めシール材
7	ブチルゴム+アルミ	手貼付	防水用補修テープ(幅50×厚0.6mm)
N			無対策(補修無し)

※数値はカタログ値より

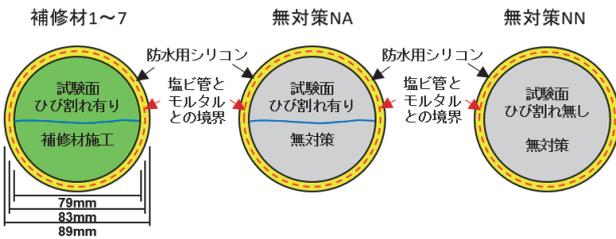


図-2 補修供試体と無対策供試体

2.2 試験ケースと試験方法

試験ケースを表-3に示す。それぞれの厚さの供試体において遮蔽性試験、浸漬試験、凍結融解試験を行った。以下に各試験の詳細を記す。

表-3 試験ケース

補修材	遮蔽性試験	浸漬試験	凍結融解試験
1	Su-1	Pe-1	CDF-1
2	Su-2	Pe-2	CDF-2
3	Su-3	Pe-3	CDF-3
4	Su-4	Pe-4	CDF-4
5	Su-5	Pe-5	CDF-5
6	Su-6	Pe-6	CDF-6
7	Su-7	Pe-7	CDF-7
N	Su-NA	Pe-NA	CDF-NA
ひび割れ無し	Su-NN	Pe-NN	CDF-NN

2.2.1 遮蔽性試験

遮蔽性試験は図-3に示すように、厚さ10mmの補修供試体を挟んで試験面側に塩化物イオン濃度3%の塩水、背面側に蒸留水を入れた試験装置⁴⁾で行った。この試験は塩水が補修材を施した試験面側から

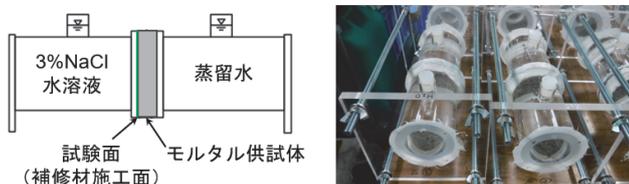


図-3 遮蔽性試験方法⁴⁾と試験状況

浸透、通過して対面側の蒸留水に到達した塩化物イオンの濃度によって遮蔽効果を評価する方法である。試験は、20℃の恒温室で90日間静置した後に蒸留水の塩化物イオン濃度を電位差滴定法で測定した。

2.2.2 浸漬試験

浸漬試験は厚さ40mmの補修供試体を図-4のように、塩化物イオン濃度3%の塩水に試験面を下向きにして5mmの深さで浸漬し、20℃の恒温室で90日間静置した。浸漬90日後にモルタルの試験面から深さ10mmまでに含まれる塩化物イオン濃度を電位差滴定法で測定し、遮蔽性試験の結果と合わせて各種補修材の遮蔽性について評価を行った。

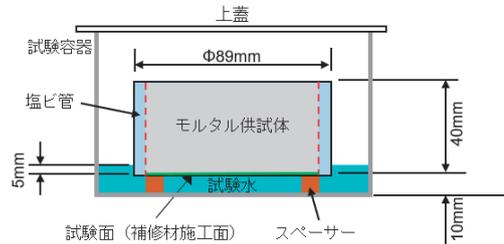


図-4 浸漬試験方法のイメージ

2.2.3 凍結融解試験

凍結融解試験は図-5に示すように、厚さ30mmの補修供試体を用いて塩化物イオン濃度3%の塩水に試験面を下向きに5mmの深さまで7日間浸漬し、その状態においてRILEMに準じたCDF試験⁵⁾を56サイクルまで実施した。約7サイクル毎にスケーリング量を測定し、各種補修材で補修した供試体の耐凍害性について評価した。

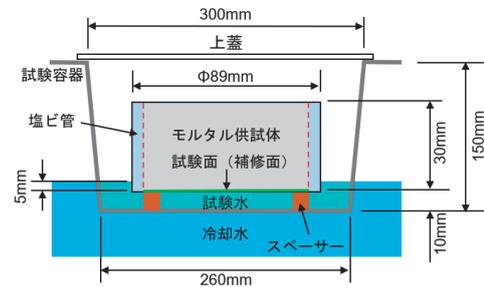


図-5 CDF試験方法⁵⁾のイメージ

3. 試験結果

3.1 各種補修材の遮蔽性

浸漬試験において、各供試体の試験面から浸透した塩水が上面まで到達する浸透状態を観察した結果を図-6に示す。塩水がひび割れから伝って上面まで浸透したケースは4ケースあり、ひび割れを補修

していないPe-NAは浸漬開始1時間でひび割れから塩水が伝って上面まで達した。その後徐々に広がり、3日目には上面全体に塩水が浸透していた。補修したPe-3、Pe-4、Pe-5の3ケースも同様の浸透傾向となったことから、これらはひび割れを補修しても遮水効果を得られないことがわかる。一方、それ以外の補修4ケースとPe-NNのケースでは浸漬期間終了の90日目でも上面に塩水は全く浸みていなかったことから、補修材によってひび割れからの塩水の浸入を防止できている。

試料名	1時間後	1日目	3日目	浸透状態
Pe-NA				3日目に上面全体に浸透
Pe-4				浸透傾向がほぼ同じ試験ケース Pe-5
Pe-3				
Pe-NN				浸漬試験終了時の90日目まで上面に浸透なし
Pe-1				浸透傾向がほぼ同じ試験ケース Pe-2, Pe-6, Pe-7

図-6 浸漬試験における塩水の浸透状態の観察結果

次に、遮蔽性試験における蒸留水の塩化物イオン濃度を図-7、浸漬試験における試験面から深さ10mmまでのモルタルに含まれる塩化物イオン濃度を図-8に示す。無対策のNNとNAを比較すると、遮蔽性試験ではNNとNAの塩化物イオン濃度の差はほとんどないが、浸漬試験ではひび割れの有無で大きく差が出ている。遮蔽性試験では供試体の厚さが10mmと薄く、両面からの水分供給で飽和状態のモルタル内の塩化物イオンの移動はひび割れの影響を受けにくかったと考えられる。一方、浸漬試験では、微細なひび割れであっても塩水が供試体厚さ40mmを吸い上がったことで試験面付近に多くの塩化物イオンが浸透・蓄積されたと推測する。補修したケースでは、補修材1は遮蔽性試験、浸漬試験ともに塩化物イオン濃度が非常に低いことから、高い遮蔽効果が得られていると言える。補修材2も多少

の塩化物イオンの浸透はあるが、遮蔽効果は比較的高い結果となった。補修材3は遮蔽性試験では遮蔽効果はみられるが、浸漬試験では塩化物イオン濃度が多くなっている。補修材3は緻密化によって遮水効果は得られるが水分浸透を完全には抑制できないため、浸漬試験では徐々に塩水が浸透して蓄積したが、遮蔽性試験では両面側からの水分浸透に対して遮水効果で供試体内の水分移動が少なくなったと推測する。逆に補修材6と7は浸漬試験では遮蔽効果があるが、遮蔽性試験では多くの塩化物イオンが通過している。これは、背面側から浸透して補修材の接着界面に達した蒸留水が補修材の接着力を弱めて隙間が生じ、そこから塩水が蒸留水側に浸入したためと思われる。一方、補修材4と5は両試験共に塩化物イオン濃度が全体的に高くなった。無対策のNAよりは低い遮蔽効果は期待できない結果となった。

以上の結果から、微細なひび割れでも塩化物イオンはひび割れから浸入して内部に蓄積していくこと、微細なひび割れに対する補修材1、2、6および7を用いた簡易的な補修によって塩化物イオンの浸入抑制効果を得られることが確認できた。このことから、厳しい環境における微細なひび割れへの早期対策に関する基礎データが得られたと考える。

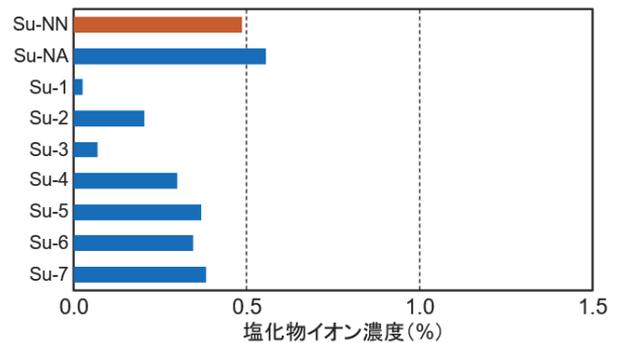


図-7 遮蔽性試験90日後の蒸留水の塩化物イオン濃度

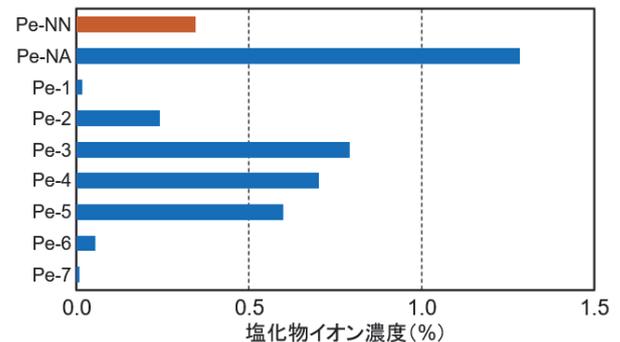


図-8 浸漬90日後の試験面から10mmの塩化物イオン濃度

3.2 耐凍害性

図-9にCDF試験における凍結融解サイクルと累計スケーリング量の関係を示す。ひび割れを無対策のCDF-NAは、凍結融解サイクルの増加に伴い、スケーリング量が徐々に増加し、累計スケーリング量が一番多くなった。図-10に凍結融解試験後の試験面の凍害劣化状態を示すが、ひび割れ付近からスケーリングが発生して広がったと推測され、ひび割れの影響で凍害劣化が進行・拡大したと言える。前述した遮蔽性試験等で遮蔽効果が低かった補修材4と5もCDF-NAとほぼ同様にスケーリング量が増加していることから、補修材4および5による補修効果は期待できない。また、補修材3はひび割れ無しの無対策CDF-NNとほぼ同じスケーリング量となったことから、補修材3による耐凍害性の向上は僅かである。一方、それ以外の補修材は一様にスケーリング量がほぼない結果となり、補修材によって耐凍害性が向上したと言える。これらは浸漬試験で遮蔽効果が得られた補修材であり、これらの補修材を用いて微細なひび割れのうちに早期に簡易的に補修することで、劣化進行をより未然に抑制し、塩化物イオンの浸入も抑制できることを確認できた。

以上から、凍害・塩害等が複合する厳しい環境では、さらなる延命化対策として微細なひび割れの早期補修が劣化予防に有効であり、その必要性が示唆されたと考える。

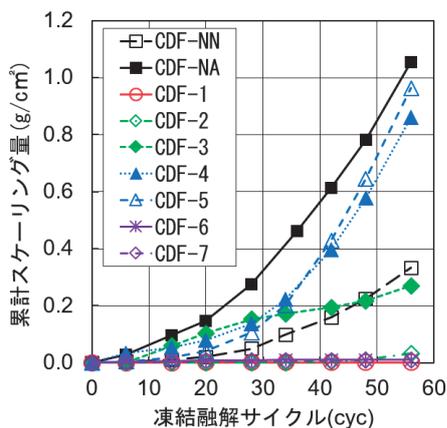


図-9 凍結融解サイクルとスケーリング量

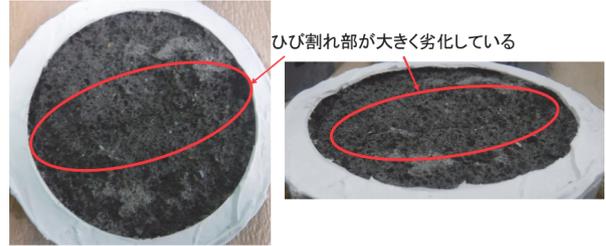


図-10 試験面の凍害劣化状態の一例

られる補修効果とその有効性について室内実験による検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1)微細なひび割れであっても塩水等の浸透によってひび割れから凍害劣化が進行し、塩化物イオンも内部に浸透、蓄積される。
- (2)現場条件に応じて遮蔽性のある補修材によって微細なひび割れのうちに早期に簡易的に補修することで、凍害・塩害等が複合する厳しい環境下におけるコンクリート構造物の耐凍害性や塩分浸透抵抗性が向上し、さらなる延命化が期待できる。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書：設計編、p.149、2017年制定版
- 2) 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：土木研究所資料第4130号、pp.32～34、2009.1
- 3) 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
- 4) コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）：土木研究所資料第4343号、II表面被覆工法編、附属資料E、表面被覆材の塩化物イオン遮蔽性試験方法（案）、pp.II-59～II-61、2016.8
- 5) Jochen Stark, Bernd Wichit（訳：太田利隆、下林清一、佐伯昇）：コンクリートの耐久性第2版、社団法人セメント協会、pp.200～202、2003.8

内藤 勲



土木研究所寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ
耐寒材料チーム 主任研究員、博士（工学）
Dr. NAITO Isao

島多昭典



土木研究所寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ
耐寒材料チーム 上席研究員、先端材料資源研究センター（併任）
SHIMATA Akinori

4. まとめ

本研究では、凍害・塩害の複合等の厳しい環境における初期の軽微なひび割れの劣化進行に対して、早期に簡易的なひび割れ補修を行うことによって得