

有機系ひび割れ充填材の耐凍害性に関する 基礎的実験

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○内藤 勲
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 安中 新太郎

コンクリートのひび割れを修復するひび割れ充填工法は、劣化因子のコンクリート表面のひび割れからの浸入を防止する補修方法であり、開閉等の変化があるひび割れには追従性のある有機系のひび割れ充填材が適用される。しかし、積雪寒冷地では、凍害の影響と見られる接着不良等の事例も確認されている。本研究では、有機系ひび割れ充填材の耐凍害性を把握するため、H型供試体と模擬充填供試体を用いた接着引張試験を行い、供試体の破壊形態やひび割れ充填材の伸び率の変化等から品質評価を行った。その結果、基盤コンクリート等の凍害劣化によってひび割れ充填材との接着耐久性が低下すること、また、凍結融解作用によってひび割れ充填材の伸び率が変化するケースもあることが確認できた。

キーワード：有機系ひび割れ充填材、耐凍害性、凍害劣化、接着耐久性、凍結融解作用

1. はじめに

コンクリート構造物に生じるひび割れは、劣化因子がコンクリート内部に浸入する経路となり、コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因となる。特に積雪寒冷地のコンクリート構造物は、凍害劣化が生じやすく、ひび割れからの水分の浸入による劣化拡大やコンクリート表面のスケーリング劣化が単独もしくは複合した形で進行する¹⁾。コンクリートの劣化が進行すると、内部の鋼材の腐食が助長されることなどにより、最終的に構造物としての耐力低下に至る。このような劣化の進行を事前に防止する対策としてひび割れ修復工法があり、比較的幅の広いひび割れには表面からの劣化因子の浸入を防止するひび割れ充填工法が適用される³⁾。また、ひび割れ幅に変化がある場合にはその変化に追従するため、可とう性エポキシ樹脂等の有機系材料が使用されることが多い³⁾。一方で、厳しい寒冷環境では、基盤コンクリートの凍害劣化やひび割れ充填材の性能低下が原因と思われるコンクリートと充填材との界面からの漏水や析出物が再発する事例が見られ、修復による効果が得られていないケースもある。しかしながら、このような条件下におけるひび割れ充填工法の耐寒性能は未だ明らかではなく、低温環境における評価方法は確立されていない。

本研究では、凍害環境におけるコンクリートとひび割れ充填材（以下、充填材）との接着力の持続性に関する性能（以後、「接着耐久性」と呼ぶ）を把握するため、複数種の有機系の充填材に対し、各々を用いて作製した供試体に凍結融解作用を与えた後、接着引張試験を行った。本稿ではこれらの実験を基に、ひび割れ充填工法に凍結融解作用が及ぼす影響について実験的に検証した結果を報告する。

2. 試験概要

(1) 供試体の作製

実験には2種類の供試体を使用した。一つ目の供試体として、図-1に模擬充填供試体を示す。模擬充填供試体は、実際の構造物に対する充填材の施工を模し、ひび割れ表面にUカットを施した溝に充填材を施工した供試体である。表-1に使用したコンクリートの配合（水中養生28日）を示す。模擬充填供試体に施したUカットの溝は幅10mm×長さ100mm×深さ10mmである。この溝に施工された充填材の接着引張試験を行うため、Uカット部に沿うように加工を施した引張用クリップ（ステンレスバネ鋼の平板）をUカットの溝にはめ、次にプライマーを塗布して充填材を施工した（図-1）。この方法は本研究で考案したものである。二つ目の供試体は、日本工業規格 JIS A 1439_2010に記載されている建築用シーリング材の試験方法に準じ作製したH型供試体とした（図-2）。このH型供試体は、市販のモルタル板（セメント：砂＝1：3、水セメント比＝50%）を2枚用いて、モルタル板で充填材を挟んでH型になるように作製したものである。充填材部分の寸法は12mm×12mm×40mmの角形である。

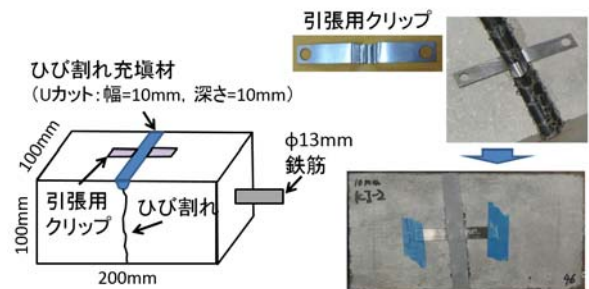


図-1 模擬充填供試体

両供試体ともに使用した充填材は、可とう性エポキシ樹脂系3種類、ポリウレタン樹脂系1種類、変成シリコーン系1種類の計5種類とした(表-2)。また、各充填材毎に推奨されているプライマーを接着面に塗布した。なお、供試体作製時の充填材の施工温度は20℃とし、その後、20℃の恒温室で2週間養生を行った。

(2) 凍結融解試験 (CDF試験)

凍結融解作用の付与は、RILEMに準じたCDF試験で行った。凍結融解サイクルは、+20℃~-20℃の間を10K/時の定速で4時間冷却 → -20℃で3時間保持 → 同じ定速で

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G		
普通ポルトランド	20	55	47	154	280	890	1001	8.0	4.5

表-2 ひび割れ充填材の種類

試料名	EP1	EP2	EP3	PU1	MS1
	可とう性エポキシ樹脂			ポリウレタン樹脂	変成シリコーン
	一成分型	一成分型	二成分型	一成分型	二成分型
硬化時間 (温度)	1h (23℃)	3.5h (20℃)	5h (20℃)	5h (23℃)	4h (23℃)
最大引張応力 (N/mm ²)	1.4	1.2	10 以上	1.03	0.37
破断時の伸び (%)	117	63.1	45 以上	880	543
プライマー	ウレタン系	エポキシ系	エポキシ系	ウレタン系	ウレタン系

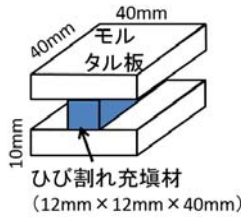


図-2 H型供試体

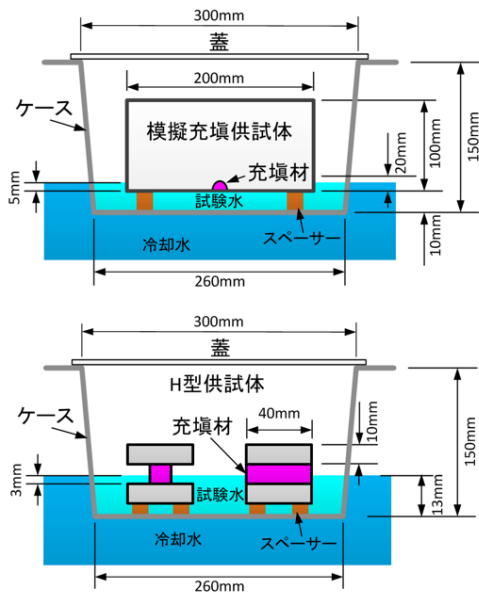


図-3 凍結融解試験 (CDF試験) のイメージ図

+20℃まで4時間加熱 → +20℃で1時間保持の12時間1サイクルとした⁵⁾。図-3に試験のイメージ図を示す。模擬充填供試体は施工面、H型供試体はモルタル板の片方を試験水(3%塩水)に浸漬して一面凍結融解を行った。供試体の劣化程度を示す指標はスケーリング量とし、供試体の質量減少量から求めた。本実験では、この指標を基に次項で示す試験ケースを設定した。

(3) 試験ケース

表-3に、試験ケースを示す。試験ケースは、各供試体毎に、凍結融解試験で作成した異なるスケーリング量の3水準(凍結融解なし、スケーリング量小、スケーリング量大)で構成した。この3水準は、凍結融解の終了サイクル数がそれぞれ0、28、56サイクルにおけるスケーリング量である。接着引張試験は、模擬充填供試体については引張用クリップを垂直に引き上げる方法とし、H型供試体については専用治具で2枚のモルタル板を垂直に引き離す方法とした(図-4)。引張速度は10mm/分とした。模擬充填供試体は1試料の値、H型供試体は2試料の平均値を測定値とした。なお、凍結融解後のH型供試体は、モルタル板の端部が凍害劣化で欠損しており、専用治具で引き上げる際に板を水平に保てずに偏心がかかることから、L型鋼材でモルタル板の端部を補強することにより水平を保つ工夫を施している。L型鋼材の接着にはエポキシ樹脂系の瞬間接着剤を使用した。

表-3 試験ケース

試料名	CDF サイクル数	凍害劣化の程度	スケーリング量 (kg/m ²)		試料名	CDF サイクル数	凍害劣化の程度	スケーリング量 (kg/m ²)	
			模擬充填供試体	H型供試体				模擬充填供試体	H型供試体
EP 1	0	凍結融解なし	0	0	PU 1	0	凍結融解なし	0	0
	28	スケーリング小	0.6	0.5		28	スケーリング小	0.1	0.4
	56	スケーリング大	2.5	8.3		56	スケーリング大	2.4	7.2
EP 2	0	凍結融解なし	0	0	MS 1	0	凍結融解なし	0	0
	28	スケーリング小	0.5	0.9		28	スケーリング小	0.3	0.9
	56	スケーリング大	1.5	2.4		56	スケーリング大	2.5	3.7
EP 3	0	凍結融解なし	0	0					
	28	スケーリング小	0.7	0.7					
	56	スケーリング大	3.2	8.3					

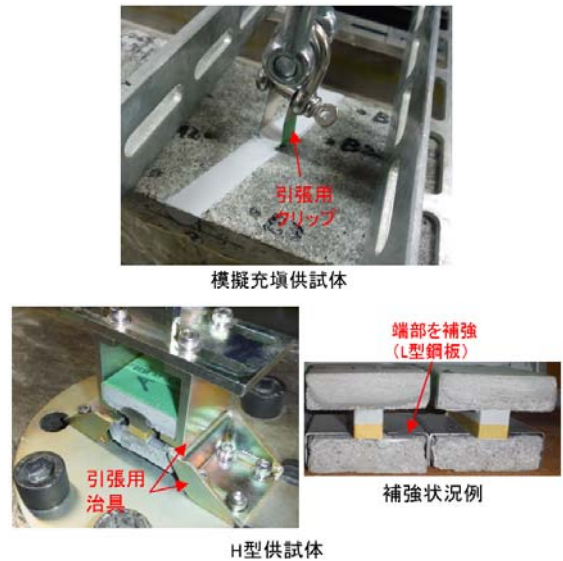


図-4 接着引張試験およびH型供試体の補強状況

3. 試験結果

(1) 破壊形態

表-4 にクリップによる接着引張試験後の破壊形態の結果を示す。また、模擬充填供試体のクリップによる接着引張試験の試験状況を図-5 に示す。これらの結果を解説すると、EP3 以外はすべて図-5 のようにクリップで引っ張られた充填材の U 字断面部分で破断する凝集破壊となり、凍害劣化の程度による破壊形態の変化は特に見られなかった。一方、EP3 はコンクリートの凍害劣化が少ないケースでは充填材とコンクリート間の接着力や充填材自身の引張強度が勝ったことからクリップが破断し、スケーリング大のケースでは図-5 下図のように界面破壊となった。これは、コンクリートの凍害劣化の程度が大きくなったこと、もしくはプライマーの品質が低下したこと、充填材とコンクリートとの接着力が低下したと推測する。

次に表-5 および図-6 に、H 型供試体の接着引張試験の破壊形態の結果と破壊状況例を示す。H 型供試体では充



左：EP3 以外の凝集破壊（クリップでせん断） 右：クリップの破断（EP3）

EP3 の界面破壊（スケーリング大）

図-5 模擬充填供試体のクリップ接着引張試験状況

表-4 模擬充填供試体の破壊形態の結果

充填材の種類		凍害劣化の程度		
		凍結融解なし	スケーリング小	スケーリング大
可とう性 エポキシ樹脂	EP1	凝集破壊	凝集破壊	凝集破壊
	EP2	凝集破壊	凝集破壊	凝集破壊
	EP3	クリップ破断	クリップ破断	界面破壊
ポリウレタン樹脂	PU1	凝集破壊	凝集破壊	凝集破壊
変成シリコーン	MS1	凝集破壊	凝集破壊	凝集破壊

表-5 H 型供試体の破壊形態の結果

充填材の種類		凍害劣化の程度		
		凍結融解なし	スケーリング小	スケーリング大
可とう性 エポキシ樹脂	EP1	凝集破壊	界面破壊	界面破壊
	EP2	凝集破壊	界面破壊	界面破壊
	EP3	界面破壊	基盤破壊	基盤破壊
ポリウレタン樹脂	PU1	凝集破壊	凝集破壊	界面破壊
変成シリコーン	MS1	凝集破壊	凝集破壊	凝集破壊

填材がある程度伸びてから凝集破壊や界面破壊が生じたケースが多く見られた（EP3 を除くすべて）。EP1、EP2 および PU1 は、凍害劣化前は凝集破壊であったが凍害劣化が進行すると界面破壊に変化した。EP3 は凍害劣化前の界面破壊が凍害劣化後には基盤破壊となった。一方、MS1 は凍害劣化の進行にかかわらず凝集破壊であった。このように、凍害劣化後に界面破壊や基盤破壊が見られた H 型供試体の複数のケースでは、基盤材であるモルタルの凍害劣化もしくはプライマーの品質低下により、充填材と基盤モルタルとの接着力が低下する傾向があることが明らかに確認できた。

(2) 最大引張応力および最大伸び率とスケーリング量

図-7 に最大引張応力とスケーリング量との関係を示す。なお、模擬充填供試体の引張応力値は引張面となる U 字断面積とせん断力をミーゼス応力値に換算したものである。模擬充填供試体および H 型供試体共にスケーリング量が増加すると最大引張応力は減少する傾向が見られる。これは、上述した破壊形態の結果から、H 型供試体では基盤モルタルの損傷やプライマーの品質低下が原因で引張応力が低下したと推測できる。一方、模擬充填供試体では EP3 を除いてすべて凝集破壊であったが、凍結融解



図-6 H 型供試体の接着引張試験の破壊状況例

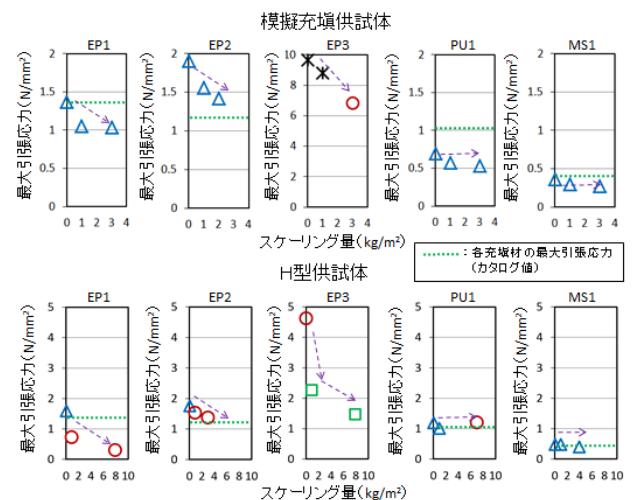


図-7 最大引張応力とスケーリング量の関係

後に最大引張応力は低下する傾向が見られたため、充填材自体の引張強度が低下していると考えられる。ただし、PU1とMS1については最大引張応力の減少が少ないため、凍結融解作用による影響は小さいと言える。

次に図-8に最大伸び率とスケーリング量との関係を示す。H型供試体と模擬供試体のEP3、PU1ではスケーリング量の増加とともに充填材の伸び率は減少する傾向がある。これらの結果は、上述したように基盤材の凍害劣化やプライマーの品質低下により、充填材の引張強度が勝って界面破壊や基盤破壊が生じたことが主な原因であると考えられる。これに対して模擬充填供試体のEP1、EP2およびMS1については、凍結融解後に伸び率が一旦増加してその後減少する傾向が見られた。これは、充填材自体の品質も変化したためと考えられる。この品質が変化した原因として、充填材の組織が凍害劣化によって軟化した、あるいは試験水（塩水）の浸漬によって充填材が軟化したこと等が考えられるが、今回の実験においては、これらの詳細な原因やメカニズムを究明するまでには至らなかった。

以上のとおり、両供試体における接着引張試験において凍結融解後の最大引張応力は低下していることから、凍害劣化の影響により充填後の接着耐久性は低下することが確認できた。また模擬充填供試体については、今後、更なる改良が必要ではあるが、下記点から実際の構造物におけるひび割れ充填工法の接着耐久性を定量的に評価する方法として適用可能性があるものと考えている。

・H型供試体は形状がU字型に充填された実際の状態とは異なり基盤材もモルタルであるため、より施工実態

に即した模擬充填供試体による検討を併せて行う必要がある。

・接着界面付近での破壊はEP3以外は見られなかったことから冒頭述べた現場での不具合事例を再現するためには実験条件の改良が必要である。

・H型供試体では見られなかった充填材自体の品質が凍害劣化の影響により変化する傾向を確認できた。

今後、試験方法の改良や供試体による試験数を増やすことや実際の構造物での試験適用によって精度向上を図り、ひび割れ充填工法の施工後の品質評価方法および維持管理方法を確立していきたいと考えている。

4. まとめ

本研究での試験結果において、以下の知見を得た。

- (1) 基盤モルタルおよび基盤コンクリートの凍害劣化もしくはプライマーの凍害による品質低下によって、ひび割れ充填工法の接着耐久性は低下する。ただし、PU1とMS1は凍結融解作用による影響は小さい。
- (2) H型供試体における凍結融解後の接着引張試験において、凍害環境のひび割れ充填工法の接着耐久性をある程度評価することが可能である。
- (3) 今回提案した模擬充填供試体におけるクリップによる接着引張試験では、凍結融解作用の影響によるひび割れ充填材自体の品質変化を確認できた。

謝辞

本研究において、共同研究者であるひび割れ充填材の材料メーカー各社に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 渡辺博志：コンクリート構造物の信頼性の向上ーひび割れの影響ー，土木技術資料 平成24年1月号，pp.42-45，2012.1
- 2) 遠藤裕丈，田口史雄，名和豊春：スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響，土木学会論文集E，Vol.66，No.3，pp.348-365，2010.9
- 3) 公益社団法人 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 2013，pp.120-121，2013.3
- 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，2016.8
- 5) Jochen Stark ほか（訳：太田利隆ほか）：コンクリートの耐久性第2版，社団法人セメント協会，2003.8

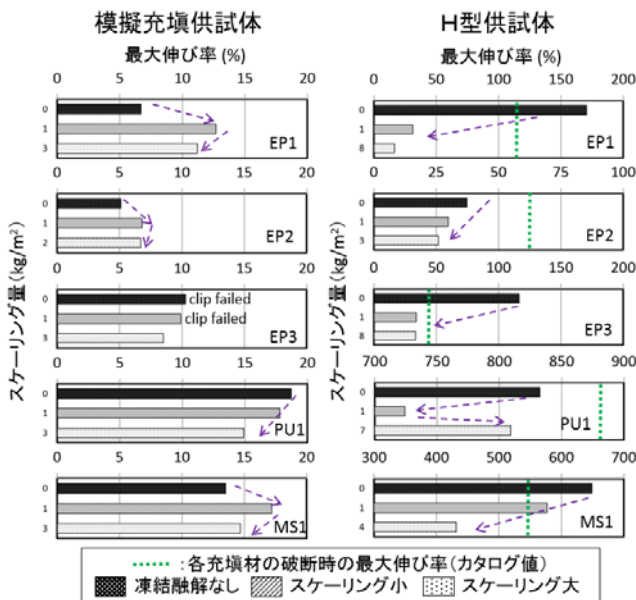


図-8 最大伸び率とスケーリング量の関係