

# 樹脂系浸透性補修材の低温時の粘性に関する 基礎的研究

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム

○内藤 勲

小中 隆範

北海道開発局網走開発建設部道路設計管理官

内田 侑甫

コンクリートの補修に用いられるひび割れ注入材等の樹脂系の浸透性補修材は、使用時の温度によって粘性が変化する。特に、低温時に使用すると高粘度になって施工しにくくなり、補修後に不具合が生じやすい。本報では、種々の樹脂系浸透性補修材の温度環境による粘度や硬化時間の変化を測定し、低温の粘性の特徴を把握すると共に、低温施工での留意点、および低温に対応した浸透性補修材の特性について報告する。

キーワード：コンクリート、樹脂系浸透性補修材、低温、粘性

## 1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れを補修する方法として、ひび割れ注入材等の樹脂系の浸透性補修材が古くから用いられているが、低温環境において補修施工時にコンクリートや補修材の温度が低くなると補修後に不具合が生じやすい<sup>1)</sup>。積雪寒冷地の補修工事では環境温度が5℃前後でも施工が実施されていることから、低温環境で補修作業を行った場合、樹脂系の補修材は粘度が高くなって流動性が悪くなり、コンクリート内部のひび割れや空隙等に浸透・充填できずに不具合が生じている<sup>2)</sup>。しかし、ひび割れ注入材の品質規格では、主に20℃の環境における品質規格等は示されているが、5℃の環境ではエポキシ樹脂系注入材の粘度が「4000 cps (4000 mPa·s) 以下であることが望ましい」と記述されているのみで、規格値や留意点等は明記されていない<sup>3)</sup>。

このような背景から本研究では、低温環境における補修後の効果持続性の向上を目的として、主に低温用として用いられている樹脂系浸透性補修材について、回転粘度計によって常温時や低温時の粘度変化を測定し、既往研究の注入面積速度式<sup>4)</sup>、および過去の実験で得た低温における上式の補正係数<sup>5)</sup>を用いて低温時の粘性の把握を行った。本報は、これらの実験結果から樹脂系浸透性補修材（以下、補修材）の低温時の粘性と施工性に関する検討結果を報告するものである。

## 2. 実験概要

### (1) 低温時の粘性に関する検討

一般にエポキシ樹脂系の接着材料の硬化前の性状は、温

度が10℃上昇すると硬化速度が2倍になり、硬化時間は1/2倍となる<sup>6)</sup>ことが知られている。また、例えば、ひび割れ注入において注入するひび割れ幅が狭いほど注入性は悪くなるが、このような注入性は、注入材をニュートン流体とした場合に、ナビエ・ストークスの運動方程式から注入圧とひび割れ幅の二乗に比例し、以下の(1)式<sup>7)</sup>によって説明できることが既往研究で明らか<sup>8)</sup>にされている。

$$S_i = \alpha w^2 p / \mu \quad (1)$$

ここに、 $S_i$ ：注入面積速度 (cm<sup>2</sup>/sec)， $\alpha$ ：補正係数， $w$ ：ひび割れ幅 (cm)， $p$ ：注入圧力 (Pa)， $\mu$ ：注入材の粘度 (Pa·sec) である。

逆に低温になると硬化時間や可使時間は長くなるが、5℃近頃の低温における性状変化はあまり検討されておらず、過去に筆者らはこの式を用いて、低粘度形のエポキシ樹脂系注入材の低温時の補正係数を室内実験において導き出している<sup>9)</sup>。しかし、低温施工に適用されることが多いアクリル樹脂系注入材や超低粘度形エポキシ樹脂系注入材の低温時の粘度変化や施工性については未だ不明なことが多い。また、厳しい低温環境でも硬化が可能なビニルエステル系の補修材は、低温施工での品質向上に有効であると考えられるが認知度が低く、低温での性状や施工性等が不明確で寒冷地における土木工事では使用実績が少ない。

そこで本実験では、低温施工に用いられている各補修材の粘度測定を行い、各環境温度における硬化までの粘度の経時変化を計測した。さらに、これらの計測データを用いて、各補修材にてひび割れ注入したと仮定して上記の式から注入面積速度を算出し、ひび割れ幅が0.1mm～0.3mmにおける各補修材の浸透距離をそれぞれ求めることで、低温施工における粘性の特徴把握と施工性の評価を行った。

## (2) 樹脂系浸透性補修材の粘度測定

実験に用いた樹脂系浸透性補修材（以下、補修材）は、ひび割れ注入材とひび割れ等に浸透する塗布材とした。表-1に各補修材の主な諸元を示す。補修材A～Cはエポキシ樹脂系であり、補修材Aは適用温度が5°C以上の一般的な冬季用の低粘度形の注入材である。補修材Bも5°C以上に適用する冬季用の注入材であるが、主に狭いひび割れ幅に使用する超低粘度形<sup>7)</sup>である。補修材Cは注入と塗布を併用できる超低粘度形の補修材で-4°Cまで適用可能である。補修材Dはアクリル樹脂系であり、-10°Cまで適用可能な低粘度形注入材である。補修材Eはビニルエステル系で注入と塗布を併用できる超低粘度形の補修材であり、-30°Cでも適用可能である。なお、これらの補修材はすべて硬質系で2液混合の反応硬化型である。

各補修材の粘度測定は、デジタル回転粘度計（図-1）を用いて、環境温度が20°C、5°C、0°C、-5°Cの4水準で実施した。試験ケースを表-2に示す。なお、補修材Dの0°Cは実施していない。

測定は、2液混合後から硬化までの経時粘度を1秒間隔で記録し、硬化もしくは高粘度で計測不能になるまで実施した。測定は1ケースで3回以上行い、粘度変化の過程が類似した複数データから1データを選定してこれを測定値とした。なお、各補修材の測定時の試料量は100～300gとし、各環境温度において2液混合している。

表-1 使用した各補修材の主な諸元

記号	主成分	硬質系	粘度 (mPa·s)	可使用時間 (min)
A	エポキシ樹脂系	低粘度形	594 (20°C)	50 (20°C)
B		超低粘度形	270 (5°C) 110 (20°C)	40 ± 10 (20°C)
C			150~500 (20°C)	40 (10°C) 14 (20°C)
D	アクリル樹脂系	低粘度形	300 (5°C)	35 (5°C) 20 (20°C)
E	ビニルエステル系	超低粘度形	270 (5°C) 180 (10°C)	85 (5°C) 25 (10°C)

※Aは材料メーカーの試験成績値，B，C，D，Eはカタログ値



図-1 デジタル回転粘度計

## (3) ひび割れ注入時の浸透距離の算出

各補修材の施工性を評価するため、図-2に示すようにひび割れ注入を想定した注入性の検討を行った。粘度測定で得られた各補修材の粘度の経時変化を用いて、上述した(1)式から各環境温度の注入面積速度を求め、ひび割れ幅0.1mm、0.2mm、0.3mmにおける各補修材の浸透距離を算出した。これらの算出データから各補修材の環境温度における性状の違いを比較し、低温施工時における施工性評価を行った。

## 3. 実験結果

### (1) 各補修材の粘度の経時変化

図-3と図-4に環境温度20°Cと5°Cにおける各補修材の粘度の経時変化を示す。環境温度20°Cの硬化までの性状では、すべての補修材がある時間になると急激に硬化することがわかる。これは20°C前後の常温における2液混合型の特徴であり、可使時間までは大きな粘度変化は見られないが、硬化反応の発熱によって一気に硬化に至る現象である。

一方、環境温度5°Cでは、補修材Aは徐々に粘度が増加する性状に変化している。これは、低温によって硬化反応の発熱が大きく抑えられて硬化がゆっくりになった

表-2 試験ケース

補修材	試験記号			
	20°C	5°C	0°C	-5°C
A	A20	A5	A0	—
B	B20	B5	B0	—
C	C20	C5	C0	—
D	D20	D5	—	D-5
E	E20	E5	E0	E-5

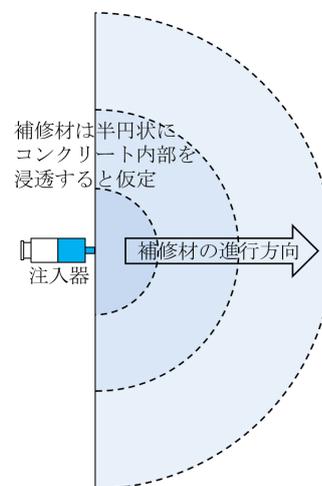


図-2 ひび割れ注入による補修材の浸透イメージ

ためである。その他の補修材は時間が来ると急激に硬化しているが、これも硬化反応の発熱がある程度抑えられて急激な硬化になるまでの時間は延びている。

図-5に環境温度0°Cと-5°Cにおける各補修材の粘度の経時変化を示す。環境温度0°Cでは、補修材Aに続いて補修材Bも徐々に粘度が増加する性状に変化している。補修材AとBの適用温度は5°C以上であるため、0°Cでも硬化反応はするが硬化までの時間と粘度は大きく上昇している。一方で氷点下でも適用可能な補修材C、D、Eは、環境温度0°C、-5°Cでも初期の粘度増加と硬化までの時間は延びているが急激な硬化になるまでの時間は初期粘度に近い低い粘度を保っている。

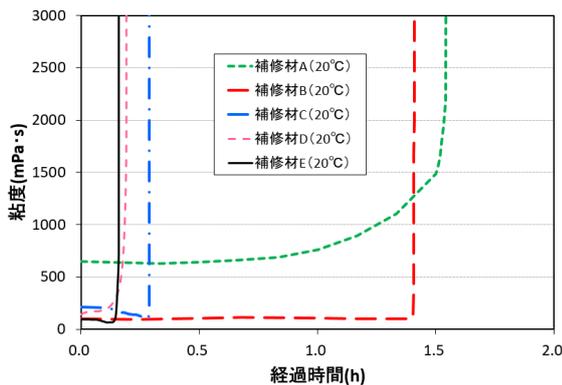


図-3 各補修材の粘度の経時変化 (20°C)

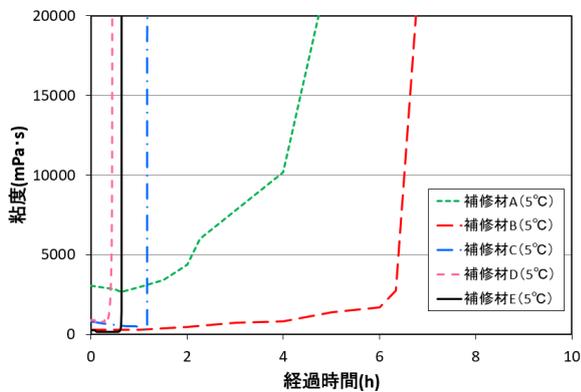


図-4 各補修材の粘度の経時変化 (5°C)

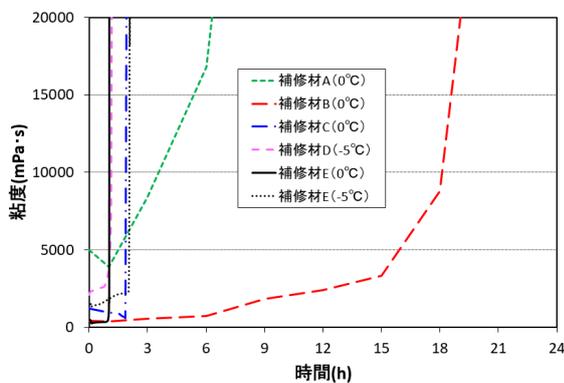


図-5 各補修材の粘度の経時変化 (0°C、-5°C)

このことから、低温環境では補修材の硬化反応の発熱が抑えられて初期粘度の増加が抑えられ、可使時間・硬化時間が延びることから、5°C未満の低温環境では、補修するコンクリートのひび割れ状態によって、施工性が大きく変化することが推測される。

## (2) 硬化までの浸透距離の算出

各補修材の施工性を評価するため、水平ひび割れへの注入を想定して各環境温度における各補修材が硬化するまでにひび割れに浸透する推定距離 (以下、浸透距離) を求めた。測定を行った各補修材の粘度 (mPa·s) の経時変化から、ひび割れ幅  $w=0.1\text{mm}$ 、 $0.2\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$  における硬化までの注入面積速度を (1) 式から求め、浸透距離はひび割れ内部を半円状に拡散していくと仮定して注入面積を円周率  $\pi$  ( $\pi=3.142$  で計算) で除した数値を1/2乗した値 (mm) とした。なお、(1) 式に代入した注入圧力  $p$  は、過去の実験で用いた実験値  $0.07\text{MPa}$  ( $70000\text{Pa}$ )、補正係数  $\alpha$  は、同じく過去の実験で得られた値 ( $20^\circ\text{C} : \alpha=40.47 \times 10^4$ 、 $5^\circ\text{C}$  以下 :  $\alpha=5.60 \times 10^4$ )<sup>5)</sup> を用いた。

表-3に各補修材の実測値の初期粘度と各ひび割れ幅に対する計算で得られた浸透距離を示す。また、経過時間と浸透距離の関係を図-6に示す。

表-3から、環境温度が低くなると初期粘度は高くなることを確認できる。適用温度5°C以上の補修材Aは、0°Cの初期粘度が4000mPa·sを超えており、適用が難しいことがわかる。超低粘度形の補修材Bは、0°Cの初期粘度が低く、5°Cよりも0°Cのほうが浸透距離が長くなっている。低温施工に使用されている補修材Cと補修材Dは、低温でも硬化速度は速いため、浸透距離はさほど伸びていない結果となった。補修材Eは、0°Cまでの初期粘度が非常に低く、特に0°Cにおける浸透距離が一番長くな

表-3 各補修材の初期粘度と浸透距離

補修材	ひび割れ幅(mm)		0.1	0.2	0.3
	環境温度(°C)	初期粘度(mPa·s)			
A	20	650	33.1	66.2	99.2
	5	3060	11.5	23.0	34.6
	0	5010	9.6	19.1	28.7
B	20	100	94.2	188.3	282.5
	5	300	66.7	133.3	63.4
	0	443	40.1	80.2	120.2
C	20	210	33.8	67.7	101.5
	5	850	27.9	55.9	83.8
	0	1200	13.6	27.3	40.9
D	20	145	24.2	48.4	72.6
	5	900	17.5	35.0	52.4
	-5	2100	6.2	12.3	18.5
E	20	95	34.4	68.9	103.3
	5	295	14.0	28.0	42.0
	0	460	44.7	89.4	134.1
	-5	1700	10.3	20.6	31.0

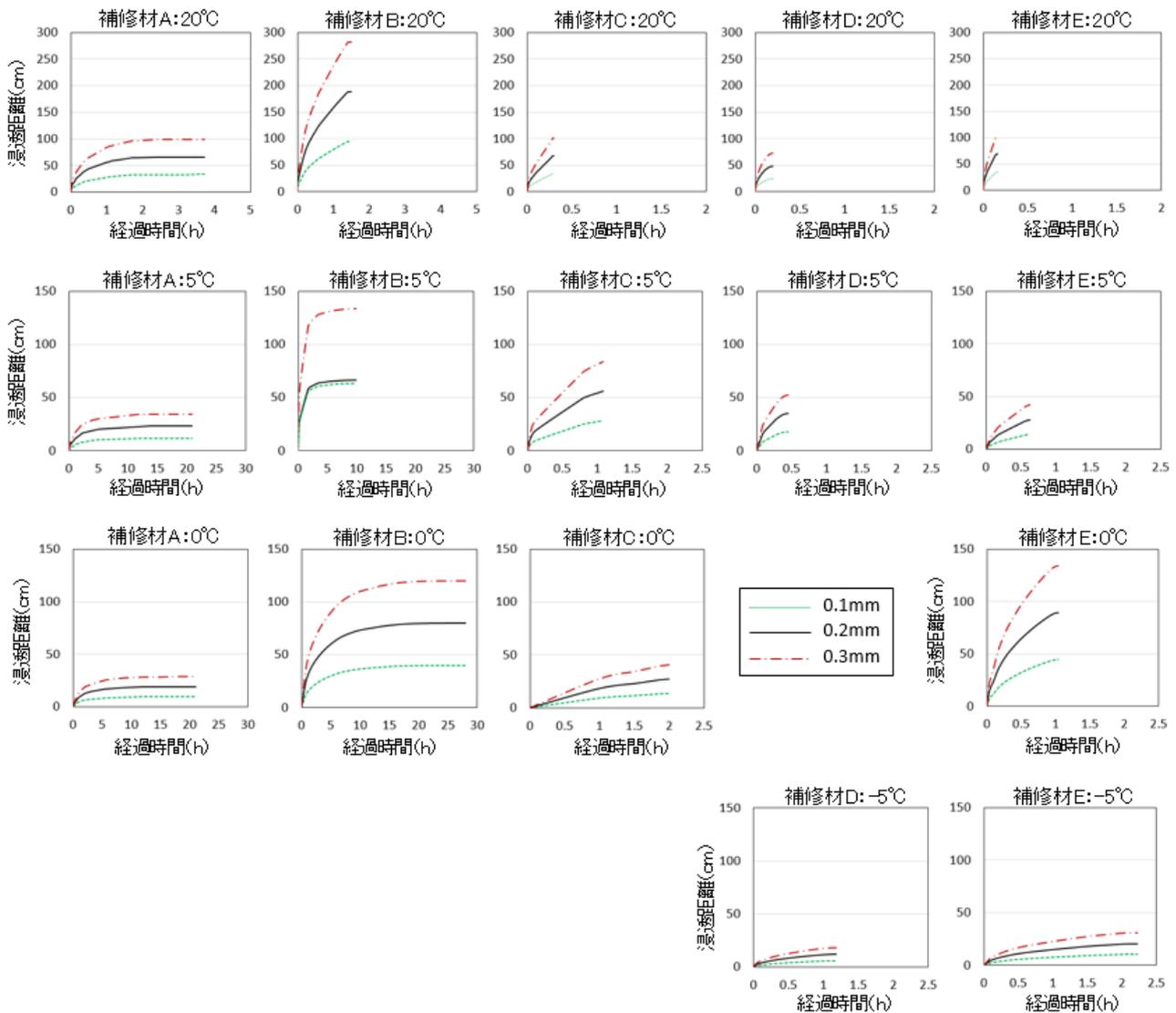


図-6 経過時間と浸透距離

った。しかし、 $-5^{\circ}\text{C}$ では粘度が大きくなって浸透距離は非常に短くなっている。

図-6から、各補修材の粘性の特徴について考察する。

補修材Aと補修材Bは、硬化速度が比較的ゆっくりであり、低温になるにしたがって初期粘度は大きくなるが、硬化速度も遅くなるため、時間をかけてゆっくりとひび割れ内部に浸透する。超低粘度の補修材Bは低温用ではないが、 $5^{\circ}\text{C}$ 以下の環境でもある程度浸透することから低温での施工に有効であると考えられる。なお、補修材Aと補修材Bの $0^{\circ}\text{C}$ 以下は、2液混合の時点で粘度が高くて練り混ぜが困難であり、 $-5^{\circ}\text{C}$ では混合できない。

補修材Cと補修材Dは、実際の低温施工に多く使用されているが、速硬化のため、 $5^{\circ}\text{C}$ 付近の低温であっても混合後に時間が経つと硬化反応が進み、途中で粘度が増加して硬化してしまうことから、計算上はあまり浸透距離が長くなっていない。今回の実験結果では、低温での施工性はあまり評価できない結果となっているが、2液

混合作業は $5^{\circ}\text{C}$ 以上が推奨されていることから、初期粘度が低くなると浸透距離も長くなるため、現場での浸透距離は実験値よりも長くなると推測する。この検証については今後の課題としたい。

補修材Eは、補修材C、Dと同じような粘性であるが、 $0^{\circ}\text{C}$ において浸透距離が長くなる良い結果となった。補修材Eは、他の樹脂系とは異なり、主剤と硬化剤との混合比率の増減によって硬化時間が増減する性状のため、今回の混合比率は低温用の標準比率であり、 $0^{\circ}\text{C}$ において良好であったと思われる。エポキシ樹脂等は2液の混合量を間違えると硬化不良を起こすが、ビニルエステル系は混合比率を増減しても硬化不良にはならないため、設定したい温度において良好な施工性が得られる比率があると思われる。また、補修材Eも材料温度が高いと初期粘度は低くなるため、他の補修材と同様に、実際の施工環境に応じた施工性向上の検証については今後の課題としたい。

#### 4. まとめ

本研究では、樹脂系の浸透性補修材の温度環境による粘度や硬化時間の変化を測定し、環境温度による粘性変化の把握と既往の注入面積速度式による施工性の評価を行い、浸透性補修材の低温時の粘性の特徴について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 使用した補修材はすべて、低温では初期粘度が大きくなり、硬化反応の発熱が抑えられて硬化時間は長くなる。
- (2) 低温になると硬化速度が遅くなって徐々に粘度が増加する性状に変化する補修材では、初期粘度が低ければ0°Cでもゆっくりと浸透するため、低温施工に有効である。
- (3) 0°C以下の低温でも硬化する補修材は硬化時間が早いため、低温では浸透距離が短くなる傾向があり、-5°Cの環境では浸透距離が伸びず、施工は難しいと言える。
- (4) ビニルエステル系は、0°Cでの低温施工では有効であり、2液の混合比率を検討することでさらに施工性が向上する可能性がある。

低温施工では、施工時に材料温度を上げると初期粘度は低くなるが、硬化速度も速くなるため施工管理は難しくなる。低温施工時の品質および施工性の向上を考える上で、環境温度と劣化状況等に応じた材料選定や施工時の留意点は今後さらに検討すべき内容であり、今後も低温における各種補修材の特性把握と、低温での適用性を含めた補修材

の選定や適用方法について研究していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 内藤勲, 島多昭典, 三原慎弘: 施工時の低温環境がひび割れ注入工法の注入充填性に及ぼす影響, 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14巻, pp. 303-308, 2014.
- 2) 内藤勲, 田口史雄, 島多昭典: ひび割れ注入工法の現状調査と凍結融解作用が注入後の耐久性に及ぼす影響, 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13巻, pp. 517-522, 2013.
- 3) 建設省: 建設省総合技術開発プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発, 報告書, 第二編, pp. 221-222, 1988.
- 4) 上村克郎, 小西敏正, 橋高義典: 鉄筋コンクリート造のひび割れ補修における樹脂の充填程度の数式化, セメント技術年報 42, pp. 491-494, 1988.
- 5) 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, 76巻, 4号, pp. 293-305, 2020.
- 6) 友井正男: 熱硬化性樹脂の基礎, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 4, No. 6, pp. 537-542, 2001.
- 7) 国立研究開発法人土木研究所: コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022年版, 土木研究所資料, 第4433号, pp. IV-7-IV-8, 2022.