論文　ひび割れ補修材の注入性状に及ぼす施工要因の検討

毛利　聡[*1]・大久保　孝昭[*2]

要旨：本報では，筆者らが提案したひび割れ再現試験体を用いた注入性状評価試験により，ひび割れ注入工法における施工条件や仕様などがエポキシ樹脂系補修材の注入性状（補修材の広がり，垂れ）へ及ぼす影響の評価を行った。ひび割れ再現試験体は 3D スキャナ，3D プリンタを用いて同一のひび割れ形状を透明なアクリル樹脂板へ切削したものであり，注入性状を可視化して観察できる。評価試験の結果，補修材の広がり方や垂れは，注入圧力やひび割れの向き，施工時の気温の影響を受けることが明らかになり，視覚的なデータとして収集することができた。

キーワード：ひび割れ補修，樹脂，補修材，注入性状，垂れ，施工条件

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に生じたひび割れの補修工法のひとつである樹脂注入工法は，水分や塩化物などの劣化因子の侵入防止に加えて躯体の一体化による構造性能の回復も期待でき広く採用されている工法である。しかし，樹脂注入工法は，ひび割れ性状（幅，向き），補修材の物性，注入圧及び施工時の気温など多くの要因が補修材の注入性状に影響を及ぼす。この工法は補修材がひび割れに全面的に注入されることを前提としているが，補修材が十分に充填されていることを施工後に確認することは難しい。加えて，注入された補修材は垂れが生じないと仮定して注入量等の施工計画を行うが，補修材粘度やひび割れ幅によっては鉛直方向のひび割れへの注入後に垂れが生じ，ひび割れ内部に空隙ができ欠陥となる恐れがある。そのため，補修材の注入性状に係る様々な要因を考慮し，施工状況に応じた適切な補修仕様を選定することが施工計画段階において重要である。

注入工法おける補修材の注入性状の評価を目的とした研究はいくつか行われてきているが，これまでの研究では，ひび割れを模擬する方法として，平板を重ね合わせる方法[1)-4), 8)]やコンクリート供試体の割裂面を用いる方法[5)-8)]が採用されている。しかし，平板を重ね合わせた方法ではひび割れ面の凹凸を考慮できない。また，コンクリート供試体の割裂面を用いる手法では，割裂時の偶然性により各試験体のひび割れ形状が異なるため，注入性状を異なる凹凸面のひび割れ供試体で相対比較せざるを得なかった。

筆者らは，補修材の注入性状の評価を統一した凹凸形状のひび割れ面で行うことおよび，注入性状の可視化を目的として，3D スキャナ，3D プリンタを用いて同一のひび割れ形状を透明なアクリル樹脂板へ切削した試験体を用いた注入性状評価技術を提案した[9)]。ひとつの種類の凹凸形状を複製したひび割れの試験体について，ひび割れ幅とエポキシ樹脂系補修材の粘度を変化させて注入性状の評価を行った結果，注入した補修材の広がりや垂れを簡便に評価することができた。

本報では，提案した注入性状評価試験を用いて，施工条件や仕様などが注入性状へ及ぼす影響を評価することを目的に実験を行った。その結果，補修材の広がり方や垂れは，注入圧力やひび割れの向き，施工時の温度の影響を受けることを明らかにしたのでここで報告する。

2. 注入性状評価試験の概要

筆者らが文献 9)で提案した注入性状評価試験の概要を説明する。**図－1** に示すひび割れ再現試験体のうちアクリル板部分は，コンクリート円柱供試体（φ100×200mm）の引張割裂面を 3D スキャナ（ピエゾ式接触センサ），3D プリンタ（切削精度 0.025mm）を用いてアクリル樹脂板に切削，複製したものである。モルタルは切削したアクリル板を型枠として打設した。打設したモルタルとアクリル板は両端に所定厚のスペーサを挟んだ上で噛み合わせてクランプで締め上げ，ひび割れ幅をマイクロスコープで観察しながら調節してひび割れ再現試験体とする。コンクリート，モルタルはそれぞれ**表－1**，**2** に示す調合で作製した。

樹脂注入方法は自動低圧樹脂注入工法[10)]のうち，輪ゴムの復元力を利用する注入器具を用いた工法を用いている。注入開始と同時にアクリル板側から写真撮影を開始する。撮影した画像から注入範囲（面積）や垂れ量を算定する。

注入開始から注入範囲の拡大が停止するまでの補修材の充填形状については，ひび割れに平行な方向（横方向）

*1 広島大学大学院　工学研究科　大学院生・修士　(工学)　(学生会員)
*2 広島大学大学院　工学研究院　教授・工博　(正会員)

とひび割れ深さ方向の比を「変形率」と定義して定量的な評価を行う。変形率は**図－1** に示す注入性状の模式図において横方向到達半径r_wと深さ方向到達半径r_dの比を取り(1)式で求める。

$$変形率＝\frac{r_w(横方向到達半径)}{r_d(深さ方向到達半径)} \quad (1)$$

変形率の値が 1 を上回る場合には補修材は注入口から見てひび割れに平行な方向に沿って横方向に広がりやすく，また逆に 1 より小さな値をとる場合には，ひび割れの深さ方向に広がりやすいといえる。

注入完了後，ひび割れ内部で補修材の垂れが生じる場合は，注入範囲の拡大が止まった時の形状を基準として，補修材が下部で鉛直方向に垂れる距離を「垂れ進行距離」として経時変化を測定する。

3. 施工条件，仕様が注入性状に及ぼす影響の検討

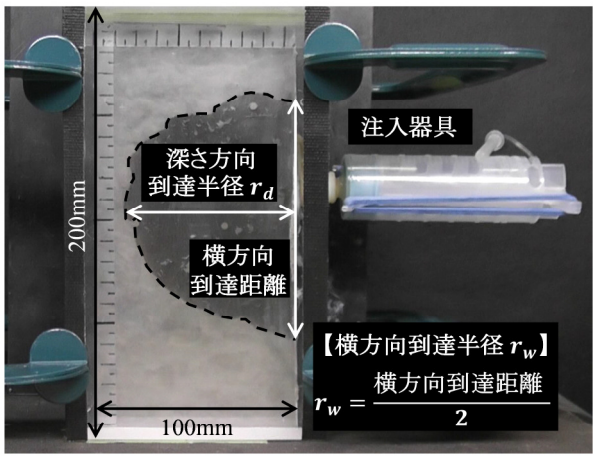
本報では，前章で示した注入性状評価試験法を用いて，**表－3** に示す施工条件や補修仕様を試験要因として注入性状の評価を行った。

補修材は「JIS A 6024 : 2008 建築補修用注入エポキシ樹脂」に規定されている硬質形の低粘度（粘度 580mPa・s（23±0.5℃））を用いた。なお，補修材の種類（粘度）の影響については，文献 9)で既に検討を行っており，本報では他の施工要因の影響を検討した。

注入器具は容量 50mL のものを使用した。注入する補修材の量は，ひび割れ再現試験体全体に生じている空隙の約 30%とした。ひび割れ幅 0.2mm に対しては試験体の空隙を，試験体寸法とひび割れ幅より，100×200×0.2=4000mm^3（4mL）としてその 30%の 1.2mL 程度，同様に，ひび割れ幅 0.5mm に対しては試験体の空隙を，100×200×0.5=10000mm^3（10mL）としてその 30%の 3mL 程度がひび割れ部に注入されるように計画した。すなわち，注入量はひび割れ幅に比例させて増やした。注入量が異なることで注入器具の輪ゴムの伸び量，すなわち注入圧力に違いが生じるが，伸び量の差は約 2.7mm と微小でありその影響は考慮しないこととした。

注入器具の取り付け位置は，ひび割れ向きが水平の場合，試験体の中央（端部より 100mm）とした。一方ひび割れ向き鉛直と斜めの場合，当初は補修材の垂れを長時間観察するために試験体下端より 145mm の位置に設置して実験を実施したが，かえって注入された補修材が試験体上端に達し，適切な充填形状が得ることができなくなる恐れから，途中から試験体下端より 125mm に変更した。従って，ひび割れ向き鉛直と斜めにおいて，注入器具の取り付け位置が 2 種類混同しているが，補修材の垂れ進行距離は試験体個別で評価するので問題無いと判断した。

ひび割れ再現試験体
（左:モルタル，右:アクリル板）



ひび割れ再現試験体への樹脂注入状況

図－1　注入性状評価試験の概要

表－1　コンクリート調合

W/C (%)	S/C (%)	調合質量 (kg/m^3)				
		水	セメント*	細骨材**	粗骨材***	AE減水剤
46	47	175	383	791	912	3.06

*　セメント：普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm3)
**　細骨材：東広島市黒瀬産砕砂 (密度2.58g/cm3，吸水率0.96%)
*** 粗骨材：東広島市黒瀬産砕石 (密度2.64g/cm^3，実積率59.2%)

表－2　モルタル調合（質量比）

セメント	細骨材	水
1	2	0.34

(**表-1**と同じ材料を使用)

表－3　試験因子と水準

因子	水準
ひび割れ内部形状	パターン1 パターン2 平滑板
ひび割れ幅	0.2mm 0.5mm
ひび割れの向き	水平（0度） 斜め（45度） 鉛直（90度）
施工時外気温	6.5℃（冬季） 20℃（中間期） 29℃（夏季）
注入圧	注入用ゴム2本 注入用ゴム4本

3.1 ひび割れ内部形状の影響

提案したひび割れ再現試験体は同一のひび割れ形状について注入性状を評価することができるが，ひび割れ内部形状の違いの影響を評価することを目的に**表－4** に示す要因について試験を行った。ひび割れ再現試験体は，**表－1** に示す調合の 2 体のコンクリート円柱供試体をそれぞれ割裂二分した割裂面から 2 種類作製した（以下，パターン 1，2）。加えてアクリル板の切削をせず平滑のまま型枠としてモルタルを打設した試験体（以下，平滑板）を作製した。モルタルの調合は**表－2** に示すとおりである。

表－4　試験要因と試験体記号（ひび割れ内部形状）

試験体記号	ひび割れ			外気温	注入圧
	内部形状	幅	向き		
a - 1	パターン1	0.2mm	鉛直	20℃	ゴム2本
a - 2	パターン2				
a - 3	平滑板				

3.2 ひび割れ幅と向きの影響

自動低圧樹脂注入工法により低粘度エポキシ樹脂を効果的に注入することができるひび割れ幅は一般に 0.5mm 未満とされている [10]。また，構造物に生じるひび割れは様々な方向に生じる。そこで，ひび割れ幅と向きの影響を評価することを目的に**表－5** に示す要因について試験を行った。ひび割れ幅は 0.2mm と 0.5mm の 2 種類とした。ひび割れの向きは水平（地面に対して 0 度）斜め（45 度）と鉛直（90 度）の 3 種類とした。

表－5　試験要因と試験体記号（ひび割れ幅・向き）

試験体記号	ひび割れ			外気温	注入圧
	内部形状	幅	向き		
b - 1	パターン1	0.2mm	水平	20℃	ゴム2本
b - 2			斜め		
b - 3			鉛直		
b - 4		0.5mm	水平		
b - 5			斜め		
b - 6			鉛直		

3.3 施工時外気温の影響

エポキシ樹脂の粘度や硬化時間は温度の影響を受ける。そこで，施工時の外気温の影響を評価することを目的に**表－6** に示す要因について試験を行った。試験時の温度は，冬季（6.5℃），中間期（20℃），夏季（29℃）を想定した。試験体，補修材を各温度（誤差±1℃）に制御した試験室（湿度は 65±5%で一定）に十分な時間静置した後に注入を行った。

表－6　試験要因と試験体記号（施工時外気温）

試験体記号	ひび割れ			外気温	注入圧
	内部形状	幅	向き		
c - 1	パターン1	0.2mm	鉛直	6.5℃	ゴム2本
c - 2				20℃	
c - 3				29℃	

3.4 注入圧力の影響

注入圧力の影響を評価することを目的に**表－7** に示す要因について試験を行った。本試験で用いる注入器具は使用する輪ゴム（加圧ゴム）の本数により注入圧力を調整することができる。加圧ゴムによる注入圧は，メーカーの指定仕様であるゴム本数 2 本と，その約 2 倍の注入圧になるゴム本数 4 本とした。

表－7　試験要因と試験体記号（注入圧力）

試験体記号	ひび割れ			外気温	注入圧
	内部形状	幅	向き		
d - 1	パターン1	0.2mm	鉛直	20℃	ゴム2本
d - 2					ゴム4本

4. 試験結果と考察

いずれの試験体においても目標の注入量の補修材が注入された。注入性状の試験結果として，本章では**表－8** に示す内容の図表をそれぞれ示す。図(a)，(b)には各試験体における注入器具の取付け位置を「◎」印で示す。本試験においては試験体寸法を超える範囲の補修材の垂れは評価できない。したがって，垂れの先端が試験体下端に達した時点までの評価とした。なお試験体下端に達するまでの時間は注入初期の注入範囲の大きさに依存することは明らかである。各試験体の垂れ進行距離の経時変化は，試験体で注入開始から注入範囲の拡大が停止するまでの時間が異なるので，グラフの横軸を「拡大停止からの経過時間」として表した。

表－8　図表種類と内容

図表種類	内容
(a) 注入範囲拡大停止時の注入性状	注入開始から注入範囲の拡大が停止するまでの時間，その時の充填形状，面積，変形率。
(b) 垂れ経時変化	注入開始30秒経過時と補修材が試験体下端に到達した時の形状の比較，試験体下端到達時の注入開始からの経過時間，垂れ進行距離。
(c) 垂れ進行距離	拡大停止からの経過時間を横軸，垂れ進行距離を縦軸に取り表したグラフ。各曲線の先端の点は試験体下端到達時の垂れ進行距離を表す。

4.1 ひび割れ内部形状の影響

図－2 にひび割れ内部形状を変化させた試験体の注入性状を示す。

注入直後の性状について，試験体 a - 1（パターン 1）と試験体 a - 3（平滑板）は変形率が 1 より大きくひび割れに沿った方向に広がりやすい傾向である一方，試験体 a - 2（パターン 2）の変形率は 1 を下回り，ひび割れに沿った方向よりも深さ方向に広がりやすい傾向を示した。

補修材の垂れの進行もひび割れ内部形状によって大きく異なる。パターン 1，2 とも形状はランダムなものであるが，この結果からひび割れの内部形状が異なる試験体を使用する場合，ひび割れの内部形状の影響を受けるこ

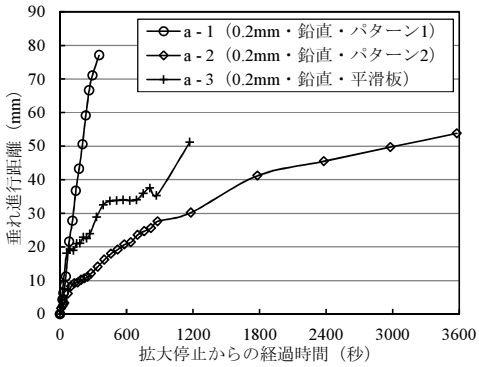
とが明らかであり，一律な評価を行うことが難しいと考えられる。したがって，注入性状を検討する場合には同一のひび割れ形状で比較することが必要であることが分かる。

注入範囲(拡大停止時)			
記号	a - 1	a - 2	a - 3
水準	パターン1	パターン2	平滑板
拡大停止時	8秒	20秒	30秒
面積	3751mm^2	4517mm^2	4255mm^2
変形率	1.073	0.893	1.186

(a)　注入範囲拡大停止時の注入性状

注入範囲(垂れ進行距離)			
記号	a - 1	a - 2	a - 3
水準	パターン1	パターン2	平滑板
注入開始30秒	4.3mm	1.7mm	0.0mm
下端到達時	360秒 77.1mm	3600秒 53.8mm	1200秒 51.2mm

(b)　垂れ経時変化

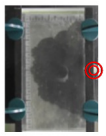


(c)　垂れ進行距離

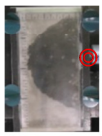
図－2　注入性状（ひび割れ内部形状）

4.2 ひび割れ幅と向きの影響

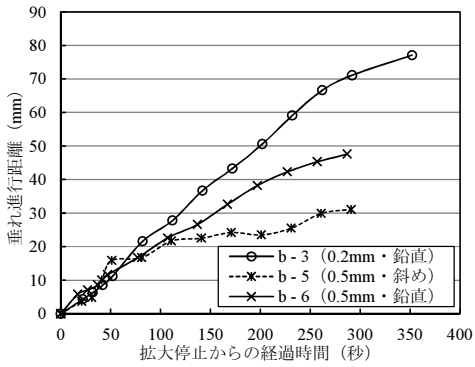
図－3 にひび割れ幅と向きを変化させた試験体の注入性状を示す。ひび割れ幅 0.2mm でひび割れ向きが斜めの試験体 b - 2 の拡大停止時の充填形状は他と比べて変形率が極端に小さく同心円状には広がっていない。試験体の噛み合わせなど試験時の不具合も考えられるので以降

注入範囲(拡大停止時)			
記号	b - 1	b - 2	b - 3
水準	0.2mm		
	水平	斜め	鉛直
拡大停止時	50秒	9秒	8秒
面積	6052mm^2	4933mm^2	3751mm^2
変形率	1.093	0.682	1.073
記号	b - 4	b - 5	b - 6
水準	0.5mm		
	水平	斜め	鉛直
拡大停止時	13秒 	9秒	13秒
面積	10516mm^2	9407mm^2	9207mm^2
変形率	0.904	0.990	0.925

(a)　注入範囲拡大停止時の注入性状

注入範囲(垂れ進行距離)			
記号	b - 3	b - 5	b - 6
水準	0.2mm	0.5mm	
	鉛直	斜め	鉛直
注入開始30秒	4.3mm	 3.7mm	5.8mm
下端到達時	360秒 77.1mm	300秒 31.1mm	300秒 47.6mm

(b)　垂れ経時変化



(c)　垂れ進行距離

図－3　注入性状（ひび割れ幅・向き）

の考察においては除外した。注入直後の性状について，ひび割れ幅の違いで比較すると，ひび割れ幅 0.2mm の試験体は，変形率は 1 よりも若干大きな値を示しており，ひび割れに沿った方向に広がる傾向がある。一方，ひび割れ幅が 0.5mm の試験体の変形率は 1 よりも小さく，ひび割れ深さ方向に補修材が広がりやすいことが分かる。ひび割れの向きで比較すると，変形率の大きな違いはなく，補修材の広がり方はひび割れ向きよりひび割れ幅の影響の方が支配的であることが分かる。

補修材の垂れについて，ひび割れ幅の違いで比較すると，垂れの進行は大きな違いはない。ひび割れの向きで比較すると，ひび割れの向きが鉛直の試験体では，垂れの進行距離が時間にほぼ比例して直線的に増加していることが分かる。一方ひび割れの向きが斜めの試験体は，徐々に垂れの進行が緩やかになっている。このことより，ひび割れの向きと補修材の垂れには相関があることが分かる。なお，ひび割れの向きが水平の試験体については，垂れは全く生じなかった。

4.3 施工時外気温の影響

図－4 に施工時外気温を変化させた試験体の注入性状を示す。

注入直後の性状について，変形率は試験体 c - 1（6.5℃）を最小に気温が高くなるにしたがい大きくなる傾向を示した。この原因として，気温の上昇に伴いエポキシ樹脂の粘度が低下し，ひび割れに沿った方向へ広がりやすくなったことが考えられる。

また，注入範囲の拡大が停止するまでの時間は，気温が低くなるにしたがい長く，補修材がゆっくり広がっていく傾向を示し，この原因も気温の変化に伴う樹脂粘度の変化が考えられる。

補修材の垂れについて，試験体 c - 2（20℃）に比べて試験体 c - 1（6.5℃），c - 3（29℃）の垂れの進行が緩やかである。垂れの進行が緩やかになった原因として試験体 c - 1 については，低温のため補修材の粘度が増大したことが考えられる。また，試験体 c - 3 については，グラフより拡大停止からの経過時間約 2400 秒以降から垂れ進行距離の勾配が緩やかになっていることから，高温のため補修材の硬化反応は早まったことが考えられる。

4.4 注入圧力の影響

図－5 に注入圧力を変化させた試験体の注入性状を示す。注入圧力については，補修材の垂れとは関係がないと判断し注入直後の性状のみの評価とした。

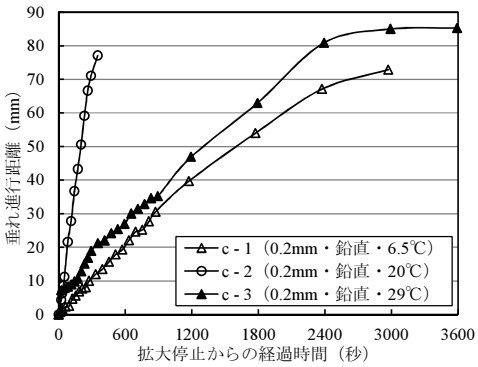
注入直後の性状について，試験体 d- 1（ゴム 2 本）と試験体 d- 2（ゴム 4 本）では，注入圧を高くした試験体 d- 2 の方が変形率の値が小さく，注入圧が高い方がひび割れの深さ方向に補修材が広がりやすいことが分かる。

注入範囲（拡大停止時）			
記号	c - 1	c - 2	c - 3
水準	6.5℃	20℃	29℃
拡大停止時	26秒	8秒	6秒
面積	5113mm^2	3751mm^2	2353mm^2
変形率	0.960	1.073	1.212

(a)　注入範囲拡大停止時の注入性状

注入範囲（垂れ進行距離）			
記号	c - 1	c - 2	c - 3
水準	6.5℃	20℃	29℃
注入開始30秒	0.8mm	4.3mm	7.2mm
下端到達時	3000秒 72.9mm	360秒 77.1mm	3000秒 85.0mm

(b)　垂れ経時変化



(c)　垂れ進行距離

図－4　注入性状（施工時外気温）

注入範囲（拡大停止時）		
記号	d - 1	d - 2
水準	ゴム2本	ゴム4本
拡大停止時	8秒	7秒
面積	3751mm^2	3763mm^2
変形率	1.073	0.912

(a)　注入範囲拡大停止時の注入性状

図－5　注入性状（注入圧力）

5. まとめ

本報では，筆者らが提案したひび割れ再現試験体を用いてひび割れ注入工法において施工条件や補修仕様などがエポキシ樹脂系補修材の注入性状へ及ぼす影響の評価を行った。補修材の広がり方や垂れは平滑板とひび割れを再現したものでは異なり，ひび割れ内部形状の影響を受けることを確認した。また，ひび割れの凹凸形状を統一して実験を行った結果，補修材の広がり方や垂れは，注入圧力やひび割れの向き，施工時の気温の影響を受けることが明らかになり，視覚的なデータとして収集することができた。得られた傾向は実際のひび割れ補修工事を行う際に補修材種類，注入器具の設置間隔や注入圧力を計画する際に有益な知見であると考えられる。例えば，ひび割れに沿った方向よりもひび割れ深さ方向へ補修材が広がりやすい傾向がある場合は，注入器具の間隔を狭くすることや，補修材の垂れが生じる可能性がある場合は，補修材の粘度や注入量を計画する際にそのことを考慮することができる。

しかしながら，本報で示す実験は 1 種類のひび割れ内部形状のみに対して検討したものである。本手法を用いて様々な仕様の注入性状を相対評価するためには，複数種類のひび割れ内部形状でパターン化した実験を行うか，ひび割れの内部形状が補修材の注入性状に及ぼす影響を詳細に検討した上でひび割れ形状を標準化する必要があると考えられ，今後の課題とする。

施工条件，仕様に関して本報の範囲で得られた主要な知見を以下に示す。

(1) 注入時の補修材の挙動

1) ひび割れ幅 0.2mm と 0.5mm で比較すると，補修材は 0.2mm の方が，深さ方向よりもひび割れに沿った方向に広がりやすい。
2) 施工時の気温の違いで比較すると，エポキシ樹脂補修材は温度の上昇に伴いにより粘度が低下するのでひび割れに沿った方向に広がりやすい。また，温度の低下に伴い粘度が増大するので補修材の注入範囲の拡大が停止するまでの時間が長くなる。
3) 注入器具の注入圧力の違いで比較すると，注入圧が高い方がひび割れの深さ方向に補修材が広がりやすい。

(2) 注入完了後の補修材の垂れ

1) 本実験で用いた低粘度エポキシ樹脂をひび割れ補修に用いる場合，鉛直方向に生じたひび割れ幅 0.2mm から 0.5mm においては補修材の垂れが生じる。
2) ひび割れの向きの違いで比較すると，ひび割れの向きが鉛直の場合，補修材の垂れは経過時間に比例して直線的に進行する一方，向きが斜めの場合，初期の垂れは経過時間に比例して進行するが次第に緩やかになる。
3) エポキシ樹脂補修材は温度により粘度や硬化速度が変化するため，垂れの進行に影響を及ぼす。

謝辞

本試験には，広島大学，元大学院生高瀬勇紀君，米井亨君の協力を得た。また藤本郷史宇都宮大学講師（当時，広島大学助教）には試験体作製の助言を得た。末尾ながら記して謝意を表す。

参考文献

1) 上村克郎，小西敏正，橘高義典，高塩美佐子：鉄筋コンクリート造のひびわれ補修における樹脂注入工法　その 1)　充てん材料に関する基礎的実験，日本建築学会大会学術梗概集（北海道）A, pp.701-702, 1986.8
2) 飯坂武男，菊川浩治，鷲見高典：ひび割れ補修材の注入性状について，セメント・コンクリート論文集 No.46，pp.988-993，1992
3) 飯坂武男，鷲見高典，梅原秀哲：無機系補修材料の注入性に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.599/V-40，pp.49-57，1998.8
4) 三好学，飯坂武男，福島浩一，梅原秀哲：コンクリート補修材料としてのアクリル樹脂の特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.1，pp.401-406，1998
5) 上村克郎，小西敏正，橘高義典，小林敏泰：鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究　（その 1　樹脂の注入過程の数式化），日本建築学会大会梗概集（近畿）A，pp.395-396，1987.10
6) 上村克郎，小西敏正，橘高義典，三浦信一：鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究　（その 2　各種注入工法の性能比較），日本建築学会大会梗概集（近畿）A，pp.397-398，1987.10
7) 菊地憲司，梅原秀哲，野沢文明，吉田彌智：コンクリートのひびわれ注入材料の基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.981-986, 1992
8) 瀬野康弘，魚本健人：ひび割れ注入補修における注入性状に影響を及ぼす要因に関する実験的検討，コンクリート工学論文集，第 19 巻，第 1 号，pp.11-20, 2008.1
9) 毛利聡，大久保孝昭：可視化試験体を用いたひび割れ補修材の注入性状の評価技術，日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 47 号，pp.29-34，2015.2
10) 低圧樹脂注入工法協議会：自動低圧樹脂注入工法ガイドブック（2013 年度版），低圧樹脂注入工法協議会，2013.12