

論文 ひび割れ注入材の材齢が付着試験結果に及ぼす影響

国枝 稔^{*1}・若槻 晃右^{*2}・鎌田 敏郎^{*3} 六郷 恵哲^{*4}

要旨：本研究では、初期材齢および長期材齢にて注入補修した供試体の曲げ付着試験を実施し、曲げ付着強度や破壊位置についての検討を行った。材齢の進行に伴い、ポリマーセメントスラリーを注入した供試体では、付着特性が良好となり母材コンクリートでの破壊をもたらすこと、エポキシ樹脂を注入した供試体では最大荷重以降の荷重の低下の割合が大きくなることが明らかとなった。初期材齢においては、エポキシ樹脂の硬化にばらつきが生じており、この時点で荷重を受けた場合には、最大荷重ならびに初期剛性の値にばらつきが生じる場合があることが明らかとなった。

キーワード：ひび割れ注入工法、材齢、付着強度、破壊位置、荷重履歴

1. はじめに

コンクリート構造物に生じたひび割れは、構造物の密実性を低下させ、コンクリートの劣化や鉄筋の腐食につながる要因となる各種有害物質の浸入を助長する。従来から行われているひび割れ補修の工法の1つに、ひび割れ注入工法がある。ひび割れ注入工法で用いられる材料にはエポキシ樹脂などの有機系注入材と、ポリマーセメント系注入材、ならびにセメント系注入材があり、それぞれの特性を良く把握した上で使用することが必要である。ひび割れ注入材に要求される性能の1つに付着性能があり、土木学会において試験方法などが提案されている¹⁾。そこでは、有機系材料は注入後7日、無機系材料は注入後28日における性能を標準として評価されている。しかしながら、補修後の構造物が長期間供用されること、または材齢初期（養生期間が十分に確保できない場合）に荷重が作用する可能性があるため、それぞれの条件下における性能を確認しておくことが重要であると考えられる。

筆者ら²⁾は、付着試験における破壊の位置の把握が重要であり、それを踏まえた注入材料の

選択が重要であることを指摘している。しかし、標準養生における標準材齢時での結果が示されており、経時的に変化していく注入材の付着特性と破壊性状との関係は明確にはされていない。

本研究では、注入材の材齢の違いが付着試験結果（曲げ付着強度、破壊エネルギーおよび破壊位置）に及ぼす影響について検討した。前半では、エポキシ樹脂ならびにポリマーセメントスラリーを注入材として使用し、長期材齢における付着性状について検討した。後半では、エポキシ樹脂を対象とし、初期材齢における付着性状を評価するとともに、初期材齢時の荷重の履歴が、その後の付着性状に及ぼす影響について検討した。

2. 長期材齢における付着特性と破壊位置

2.1 実験概要

表-1に、使用したコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大寸法15mmの玉砕石を使用した。母材となる供試体の寸法は100×100×400mmとし、コンクリートを型枠に詰めた後、棒状バイブレータで締固めた。打設後2日にお

*1 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

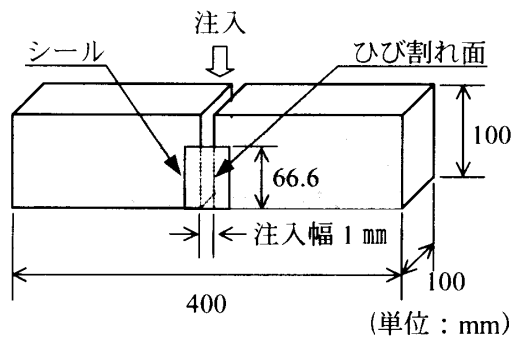


図-1 注入方法

表-2 使用したひび割れ注入材の物性

	物性	エポキシ樹脂	ポリマーセメントスラリー
硬化前	硬化時間(hr)	15	14
	粘度(mPa・s) (JIS K 6833)	600	—
	コンシステンシー J ₁₄ (s) (JSCE-F531)	—	2.4
硬化後	弾性係数(GPa)	2.9	9.7
	接着強さ(MPa) (JIS A 6024)	6.9	4.1
	曲げ強さ(MPa)	74.4	9.4*

*材齢 28 日

いてすべての脱型を行った。その後、35 日間の湿布養生 (20℃) を行い、コンクリートカッターを用いて供試体中央部にはり高さの 1/3 の切欠きを設け、3 等分点曲げ載荷により供試体を破断させた。

その後、供試体の破断面をつき合わせ、注入幅が 1 mm となるように調整してシールを行い、供試体上面から注入材を自然流下させた (図-1 参照)。なお、注入幅の違いは付着特性に影響を及ぼす³⁾が、本実験では、JIS A 6024 (建築補修用注入エポキシ樹脂) 等にて規定されているひび割れ幅 (1mm) を採用した。切欠き部分には注入材が充填されないように、切欠き部分を除いてシールを行った。注入材にはエポキシ樹脂 (2 液性) とポリマーセメントスラリー (SBR 系) の 2 種類を使用した。注入材の代表的な物性を表-2 に示す。

注入した供試体は、恒温室 (20℃, RH60-80%) にて養生を行った。注入材の材齢と付着試験結果との関係を検討するために、養生期間は供試体ごとに 3 ケース設けた。エポキシ樹

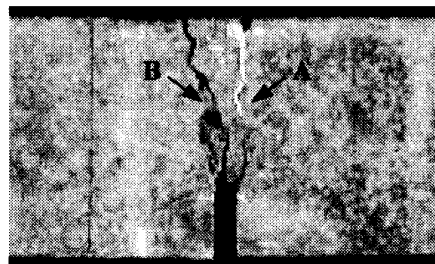
表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	粗骨材寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad*
55.6	15	161	290	836	1001	0.725

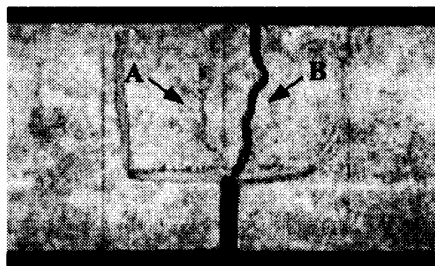
*AE 減水剤

A: 注入部の位置

B: 注入供試体のひび割れ位置



(a) EPO 供試体 24 ヶ月



(b) PCS 供試体 24 ヶ月

写真-1 供試体表面のひび割れ

脂を注入した供試体 (以後、EPO 供試体と呼ぶ) については、7 日、2 ヶ月、24 ヶ月、ポリマーセメントスラリーを注入した供試体 (以後、PCS 供試体と呼ぶ) については、28 日、2 ヶ月、24 ヶ月間とした。所定の養生を行った後、3 等分点曲げ載荷を行い、荷重-CMOD (切欠き肩口開口変位) 曲線を計測した。また比較のため、各供試体の載荷時に、100×100×400mm の母材コンクリートと同一材齢の供試体 (中央部にはり高さの 1/3 の切欠きを有する。以後、比較供試体と呼ぶ) の曲げ試験を行った。

2.2 結果と考察

(1) 曲げ破壊性状および曲げ付着強度

注入供試体の破壊位置を表-3 に示す。EPO 供試体では、注入材の材齢 (以後、材齢と呼ぶ) にかかわらず、注入部近傍のコンクリートが破壊した (写真-1 (a) 参照)。PCS 供試体では、

表-3 曲げ試験結果

供試体種類	材齢	破壊位置	曲げ付着強度* (MPa)	破壊エネルギー (N/m)
比較供試体	1週間	—	3.47 (0.15)	68.4
	1ヶ月	—	3.33 (0.19)	63.5
	2ヶ月	—	3.87 (0.32)	70.6
	24ヶ月	—	4.15 (0.03)	76.5
EPO供試体	1週間	コンクリート部	4.41 (0.35)	119.8
	2ヶ月	コンクリート部	4.19 (0.89)	95.5
	24ヶ月	コンクリート部	4.96 (0.14)	128.2
PCS供試体	1ヶ月	注入部	3.39 (0.21)	43.0
	2ヶ月	注入部	3.48 (0.26)	60.8
	24ヶ月	注入部+コンクリート部	3.24 (0.45)	78.7

*比較供試体の曲げ付着強度は、曲げ強度に相当。カッコ内の値は標準偏差。

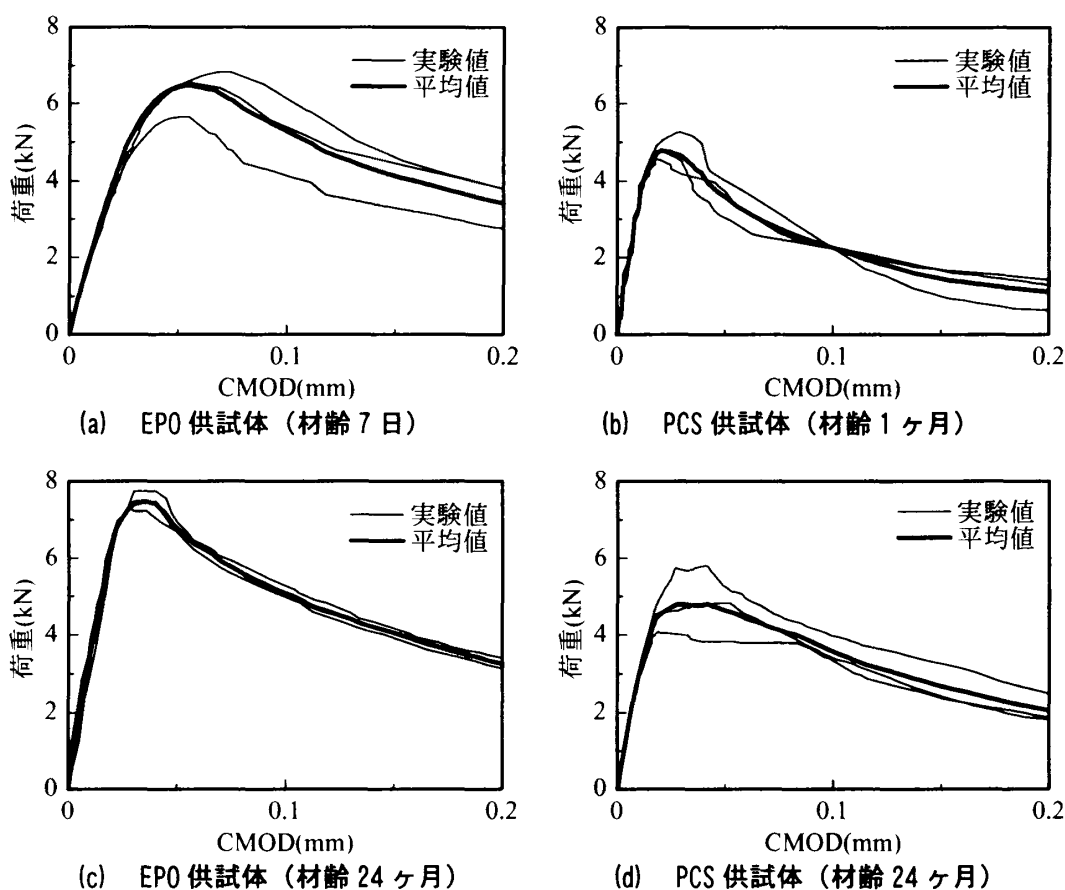


図-2 荷重-CMOD 曲線

材齢 2 ヶ月までは注入部が破壊したが、24 ヶ月においては注入部とコンクリート部の混合破壊が生じた(写真-1 (b) 参照)。ここでいう混合破壊とは、破断面の一部に注入部の破壊がみられたが、そのほとんどがコンクリートの破壊面であることをいう。これは、ポリマーセメントスラリーの付着強度ならびに材料の強度が、材齢

の進行に伴って大きくなったことによるものと考えられる。

注入供試体の荷重-CMOD 曲線を図-2 に、曲げ付着強度を表-3 に示す。

EPO 供試体の曲げ付着強度は、材齢によらず比較供試体のそれを上回った。材齢 24 ヶ月の曲げ付着強度は、1 週間のものに比べ 10%程度の

増加が確認された。また、材齢 2 ヶ月までと材齢 24 ヶ月とを比較すると、曲げ付着強度のばらつきは、材齢の進行に伴い小さくなることが確認された。EPO 供試体はすべて母材コンクリートで破壊しており、図-3 に示される比較供試体の荷重-CMOD 曲線のばらつきが小さいことと対応している。また、材齢の進行に伴い、初期剛性（立上がり部の傾き）が大きくなるとともに、最大荷重以降の荷重の低下の割合が大きい傾向にあった。橘高ら³⁾は、注入材の弾性係数を大きくすると、初期剛性が大きくなり、最大荷重以降の荷重の低下の割合が大きくなることを報告している。本実験で得られた結果から推察すると、材齢の進行に伴い、エポキシ樹脂の硬化がさらに進み、剛性が高くなったものと思われる。このことは、標準材齢（例えば 7 日）にて、伸び能力のある有機系材料について、その後の経時変化を適切に把握しておくことの重要性を示している。

PCS 供試体では、材齢 2 ヶ月までと材齢 24 ヶ月とを比較すると、曲げ付着強度はほぼ同程度であることが確認された。また、曲げ付着強度のばらつきは、材齢が進行するに伴って小さくなることが確認された。この原因として、材齢 24 ヶ月においては、注入部とコンクリート部との混合破壊という、他の材齢と異なるひび割れ性状になったことなどが考えられる。

(2) 破壊エネルギー

各供試体の載荷試験結果より得られた破壊エネルギー（荷重-CMOD 曲線より推定した引張軟化曲線下の面積）を表-3 に示す。材齢によらず、EPO 供試体の破壊エネルギーは比較供試体のそれを上回ったが、PCS 供試体では特に材齢初期でそれを下回った。EPO 供試体においては破壊エネルギーが上昇した理由は、付着面を迂回するようなひび割れが母材コンクリート中に発生したこと⁴⁾、ならびにエポキシ樹脂の弾性係数がコンクリートのそれに比べて小さいことによると考えられる。

PCS 供試体の破壊エネルギーは、材齢初期で

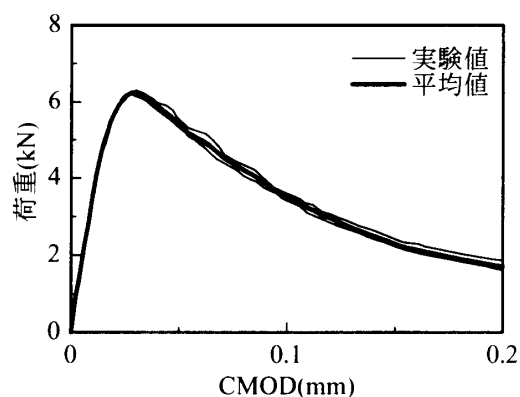


図-3 比較供試体（24 ヶ月）の荷重-CMOD 関係

は比較供試体のそれより小さいが、24 ヶ月では比較供試体のそれと同程度となった。これは破壊位置が注入部からコンクリート部に移行していることと対応しているものと考えられる

3. 初期材齢における付着特性と破壊位置

3.1 実験概要

(1) 注入供試体の作製

母材として使用したコンクリートは前節と同様（表-1 参照）とした。供試体の寸法は 100×100×400 mmとし、コンクリートを型枠に詰め、棒状バイブレータで締固めた。打設後 1 日においてすべての脱型を行い、8 週間の気中養生を行った。供試体の破断方法および注入方法は、2 節と同様とした。前節の結果からも明らかとなっており、ポリマーセメントスラリーを注入した場合、特に初期材齢において破壊位置などが変化するとは考え難い。したがって、本節ではエポキシ樹脂のみを対象として検討を行った。

(2) 注入供試体の載荷試験

注入された供試体は、エポキシ樹脂の硬化を緩やかにするため、平均室温 8℃の実験室内に静置した。初期材齢における補修部材の付着性能について検討するために、注入材の材齢が 1 日、2 日、7 日になった時点で 3 等分点曲げ載荷を行い、荷重-CMOD 曲線を計測した。ただし、材齢 1 日の供試体の載荷においては、荷重履歴の影響について検討するため、最大荷重付近

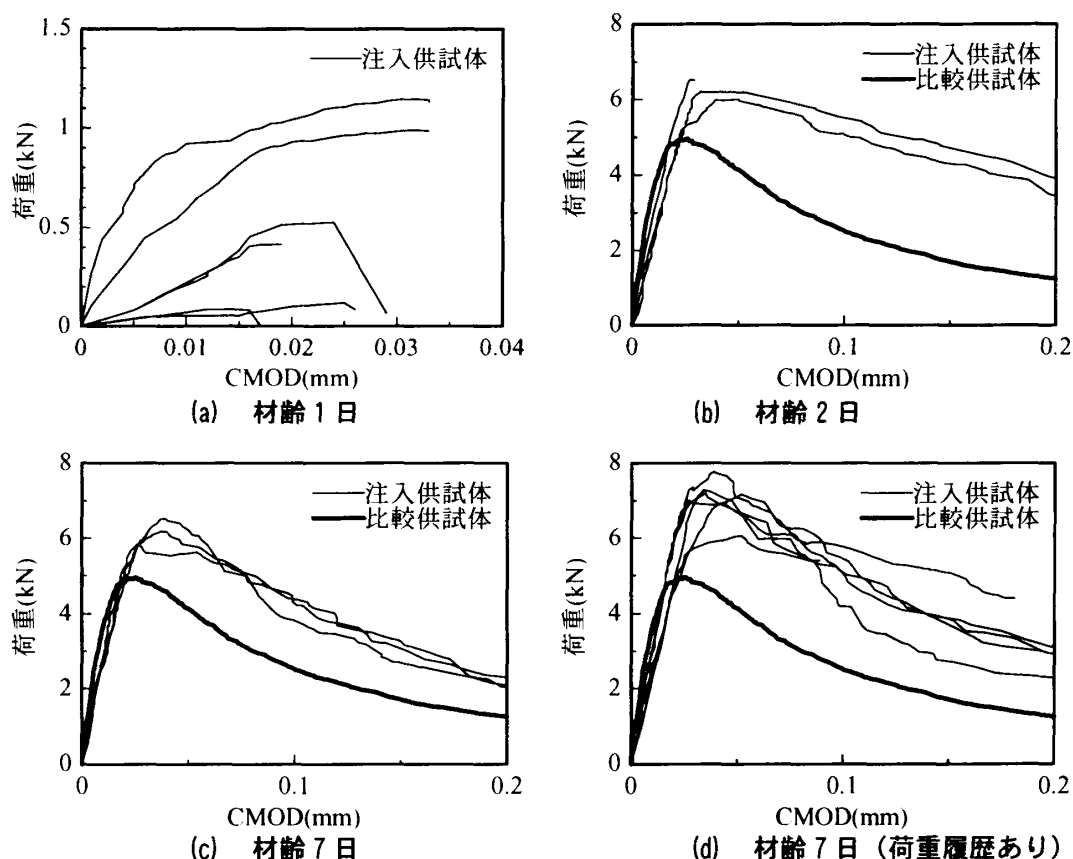


図-4 荷重-CMOD 曲線

(0.02-0.03mm 程度)までの載荷とした。供試体の本数は、材齢1日の供試体は6本とし、材齢2日と7日の供試体は各3本とした。

また、注入材の材齢初期（硬化過程）において、注入部材が外力を受けたという履歴が、その後の付着特性に及ぼす影響についても検討した。材齢1日にて載荷試験を行った供試体を再び養生し、材齢7日の時点で再度載荷した。

3.2 結果と考察

(1) 曲げ付着強度および破壊性状について

材齢1日、2日および7日における載荷試験によって得られた荷重-CMOD 曲線をそれぞれ図-4(a), (b), (c)に、曲げ付着強度を表-4に示す。なお、ひび割れ導入時に得られた荷重-CMOD 曲線を比較供試体として図-4(b), (c)に併記した。

材齢1日では、エポキシ樹脂が硬化過程にあることにより生じたものと考えられる剛性のばらつきが確認された。また、目視による観察では、注入部およびコンクリート部にひび割れが

表-4 曲げ試験結果

供試体	曲げ付着強度 (MPa)	標準偏差
材齢1日	0.41*	0.40
材齢2日	4.27	0.21
材齢7日	4.22	0.28
材齢7日(再載荷)	4.83	0.51

*参考値として記載

確認されなかったことから、注入材の伸びによる変形を計測したものと考えられる。これより、最大荷重付近までの荷重を受けたエポキシ樹脂については、ひび割れ等も確認されず、水密性や遮蔽性が確保されているもの推察される。

材齢2日では、すべての供試体において強度が発現し、曲げ付着強度は4.3MPa程度となった。これはひび割れ導入時の比較供試体の曲げ強度(3.5MPa)を上回っており、注入部を迂回するようにひび割れが発生したためと考えられる。しかしながら、注入部で破壊した供試体もあったことから、材齢2日の時点においても、すべてのエポキシ樹脂が、一様に硬化している

わけではないことが示された。

材齢 7 日での付着強度および剛性は、材齢 2 日のものと同程度であるが、やはり最大荷重以降の荷重の低下の割合がやや大きくなっている。このことは、先述（2 節）のとおり、エポキシ樹脂の硬化により剛性が大きくなったことによると考えられる。

以上より、母材にて破壊する材料の付着性能の経時変化を評価する場合、付着強度だけでなく、変形能（伸び）を含めることにより、より適切に評価可能であることが明らかとなった。そのためにも、荷重－変形関係を用いた評価が必要である。

(2) 荷重履歴の影響について

材齢 1 日にて載荷試験を行い、材齢 7 日にて再度載荷した供試体の荷重－CMOD 曲線を図－4 (d) に、曲げ付着強度を表－4 に示す。なお、比較供試体の荷重－CMOD 曲線を図－4 (d) に併記した。材齢初期に荷重を受けた供試体の最大荷重のばらつきは、荷重履歴のない供試体の結果(図－4 (c))と比較して若干大きくなった。さらに初期剛性のばらつきも大きい傾向が認められた。ただし、本研究の範囲内では、図－4 (a) に示す材齢 1 日でのエポキシ樹脂の硬化の程度と、再載荷時の最大荷重との関係については明確ではなかった。

4. まとめ

実験室内環境下において、ひび割れ注入材の材齢と付着試験結果の関係について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) ポリマーセメントスラリーの付着強度は、材齢の進行に伴って徐々に向上し、付着試験における供試体の破壊位置が変化した。
- (2) エポキシ樹脂は比較的短期間で安定した性能を発揮し、材齢が進行しても付着強度で表される付着特性は大きく変化しないことが明らかとなった。母材にて破壊する材料の付着性能の経時変化を評価する場合、付着強度だけでなく、変形能（伸び）を用い

ることにより、適切に評価可能であることが明らかとなった。そのためにも、荷重－変形関係を用いた評価が必要である。

- (3) 材齢 1 日では、エポキシ樹脂が硬化過程にあることにより生じたものと考えられる剛性のばらつきが確認された。除荷後の供試体にはひび割れ等も確認されなかった。
- (4) 材齢 1 日にて載荷試験を行い、材齢 7 日にて再度載荷した供試体の最大荷重のばらつきは、荷重の履歴を受けていない供試体のそれに比べて若干大きくなった。さらに初期剛性のばらつきも大きい傾向が認められた。ただし、本研究の範囲内では、材齢 1 日でのエポキシ樹脂の硬化の程度と、再載荷時の最大荷重との関係については明確ではなかった。

材齢に依存した注入材の特性を把握する際には、材料の種類や使用される環境条件に応じて確認することが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋の腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その 2），コンクリート技術シリーズ 40，pp.259-274，2000
- 2) 国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲：コンクリート構造物の補修における破壊の制御と部材の性能に関する一考察，日本材料学会 第 1 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，pp.89-96，2001
- 3) 橘高義典，上村克郎，中村成春：コンクリート切り欠き試験体の曲げ試験によるひびわれ補修材料の評価，日本建築学会構造系論文報告集，No.432，pp.1-9，1992
- 4) 国枝稔，川瀬貴行，鎌田敏郎，六郷恵哲：ひび割れ注入材の曲げ付着特性の評価に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，No.669/V50，pp.203-213，2001