

アクリル樹脂を用いたコンクリートの補修に関する研究

STUDY ON REPAIR OF CONCRETE USING ACRYLIC RESIN

三好 学*・福島浩一**・森 泰彦***・梅原秀哲****

by Manabu MIYOSHI, Koichi FUKUSHIMA, Yasuhiko MORI and Hidetaka UMEHARA

1. はじめに

コンクリート構造物の欠陥・劣化を調べる際に、最も広く見られるものの一つにひび割れがある。ひび割れは、その幅が0.1mm以下ならば通気・通水の心配はほとんどないが、0.2mm以上になると通気・通水し始めると言われている。また、そのひび割れが原因となって、鉄筋腐食などの二次的欠陥を招く。そのため、ひび割れによるコンクリート構造物の耐久性が問題となり、補修等により機能回復を図る必要がある。

コンクリート構造物のひび割れ補修の多くの場合において、注入工法が関連している¹⁾。そのため、補修材料のひび割れ注入やひび割れ充填が主要かつ重要な行為となってくる。一般的に使用されている補修材料として、無機系補修材料のセメント系材料およびポリマーセメント系材料や、有機系補修材料のエポキシ樹脂などがあるが、既往の研究より、無機系補修材料と比較して有機系補修材料の方が、補修効果が期待できると言われている。しかし、有機系補修材料のエポキシ樹脂においても、耐水接着性、耐光性等の諸性能についてまだ問題が残されている。そこで、最近エポキシ樹脂に代わる有機系補修材料として、アクリル樹脂が着目されている。しかし、アクリル樹脂は、ひび割れ注入性能およびひび割れ注入後の接着性能、強度等についての研究実績が少なく、十分解明されていない。

そこで本研究では、アクリル樹脂に着目し、注入試験用ひび割れモデルを用いて注入試験を行うとともに、コンクリートのひび割れモデルを用いて曲げ引張破壊試験を行い、アクリル樹脂の注入性および補修効果を従来の補修材料と比較検討することにより、アクリル樹脂の補修材料としての特徴や問題点を明らかにすることを目的とした。

2. 使用材料

*名古屋工業大学大学院 社会開発工学専攻前期博士課程 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)、**東亜合成株式会社 製品研究所 主任研究員主査(〒455 名古屋市港区船見町1-1)、***同 研究員、****名古屋工業大学教授 社会開発工学科 Ph.D.

本研究で使用した補修材料は、無機系補修材料を1種類、有機系補修材料を4種類とした。無機系補修材料は、ポリマーセメント系補修材料(A材料)を用いた。有機系補修材料は、エポキシ樹脂(B材料)を1種類、アクリル樹脂(C材料)を3種類使用した。無機系補修材料は、ベースとフィラーを一定の割合で混合させ、モルタルミキサーで低速練混ぜを行った。有機系補修材料は、すべて主材と

表1 A材料(ポリマーセメント系)諸性能

	A材料	
	ベース	フィラー
主成分	アクリル エマルジョン	水硬性 無機粉体
混合割合	8.8	20
流下時間(秒)	30	
粘度(cps)	400以下	
可使時間(分)	60	
硬化時間(時間)	24	
圧縮強度 (N/mm ²)	60	

表2 B材料(エポキシ樹脂)諸性能

	B材料	
	主材	硬化材
主成分	エポキシ 樹脂	変性ポリ アミン
混合割合	3	1
流下時間(秒)	210	
粘度(cps)	2000以下	
可使時間(分)	60	
硬化時間(時間)	8	
圧縮強度 (N/mm ²)	60以上	
引張せん断強度 (N/mm ²)	10以上	

表 3 C材料(アクリル樹脂)諸性能

	C1材料		C2材料		C3材料	
	主材	硬化材	主材	硬化材	主材	硬化材
主成分	変性 アクリル	変性 イソシアネート	変性 アクリル	変性 イソシアネート	変性 アクリル	変性 イソシアネート
混合割合	10	11	11	8	5	6
流下時間 (秒)	260		230		120	
粘度 (cps)	2500以下		2000以下		1600以下	
可使時間 (分)	30		20		30	
硬化時間 (時間)	12		12		12	
圧縮強度 (N/mm ²)	50以上		50以上		60以上	
引張せん断強度 (N/mm ²)	10以上		10以上		10以上	

硬化材を混合する 2 液型のものであり、主材と硬化材を各々の混合割合で容器に流し込み、攪拌棒でかき混ぜるのみであった。

表 1~3 に使用補修材料の諸性能について示す。流下時間の測定には図 1 に示す JA ロートをを用い、粘度の測定には B 型粘度計を用いた。図 2 に流下時間の測定結果を示す。これより、有機系補修材料は無機系補修材料に比べて、かなり粘性が高いことがわかる。A 材料と比べると、B 材料は 7 倍、C 材料は約 4~9 倍となっている。これは、有機系補修材料は、分子間の相互作用により擬似凝集して網目構造を作り、粘度が高くなるためである。表 4、図 3 に A 材料、B 材料、およびアクリル樹脂の中で最も粘性の低い C3 材料における、B 型粘度計のローター回転速度を変えた粘度測定結果を示す。表 4 に示す TI 値とは、粘度がせん断速度によって変化する指標であり、

$$TI \text{ 値} = \frac{6rpm \text{ における } B \text{ 型粘度}}{60rpm \text{ における } B \text{ 型粘度}}$$

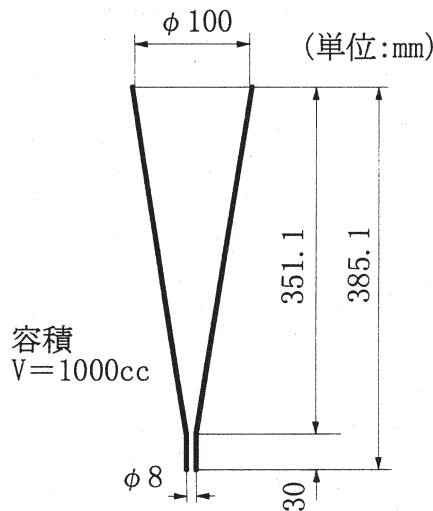


図 1 JA ロート

で表わされ、例えば、水の TI 値は 1 となる。C3 材料は、B 材料に比べて、B 型粘度計のローター回転速度に関わらず、粘度に大きな差はなく、TI 値は 1.06 と 1 に近い値となっている。これは、先に述べた分子間における相互作用 (水素結合や分子間力等) が、C 材料の方が B 材料に比べ小さいためと考えられる。C3 材料は、ひび割れに注入する際、従来の有機系補修材料のように、注入圧、注入速度を大きくしなくても、容易に注入できると考えられる。さらに、注入圧の衝撃によって母材自体が損傷される恐れが少なくなると思われる。

次に各材料の可使時間を比較する。無機系補修材料と比べると有機系補修材料は短く、また、有機系補修材料の中でも、エポキシ樹脂とアクリル樹脂ではアクリル樹脂はエポキシ樹脂の半分程度である。しかし、アクリル樹脂は注入時に水が介在することにより、可使時間が 10 分程度と極端に短くなる。通常、アクリル樹脂は主材と硬化材が反応して硬化する。しかし、水が介在する場合、硬化材が水と反応して、硬化が早くなり、二酸化炭素を発生し発泡する。また、硬化したアクリル樹脂は、柔軟性が若干失われもろくなってしまう。したがって、アク

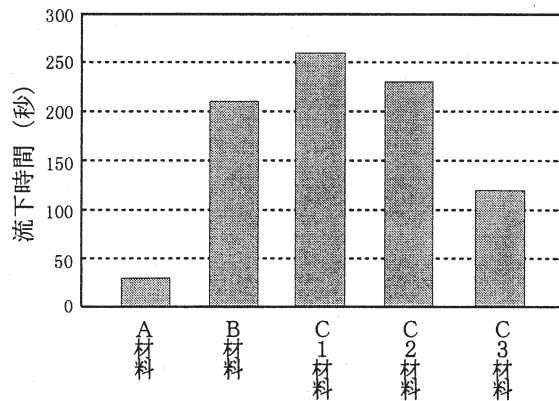


図 2 流下時間の測定結果

表4 各材料のTI値の比較

	ローター回転速度		TI値 (6rpm/60rpm)
	6rpm	60rpm	
A材料	310	300	1.01
B材料	1640	1360	1.21
C3材料	1360	1280	1.06

(B型粘度計、20°Cでの測定)

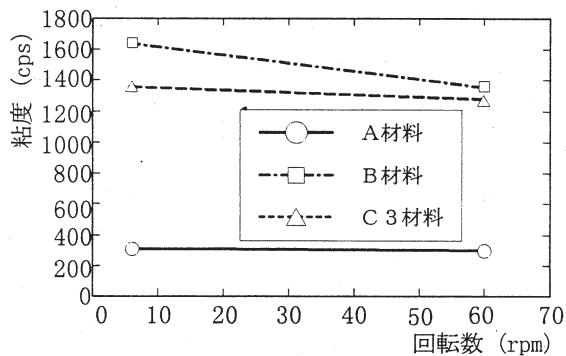


図3 各材料の粘性特性

リル樹脂は、他の補修材料と比較して、注入時に水分に対して注意しなければ、注入性能が劣化するばかりでなく、硬化後の強度等にも影響がでる可能性がある。

以上より、アクリル樹脂の特徴を以下に示す。

- ① 混合方法は、主材と硬化材を各割合でかき混ぜるのみである。
- ② 流動性は、無機系補修材料には及ばないが、従来の有機系補修材料であるエポキシ樹脂よりは優れている。
- ③ TI値が1に近く、せん断速度の変化による粘度の変化に大きな差はない。
- ④ 可使時間は、エポキシ樹脂と比較すると半分程度

であるが、水が介在すると極端に短くなるため、注入時に水に対して十分注意する必要がある。

- ⑤ 圧縮強度、引張せん断強度に関しては従来の補修材料と同等である。

3. 注入試験

3.1 目的および方法

ひび割れへの十分な注入・充填を行うためには、補修材料のひび割れ内での挙動を把握する必要がある。有機系補修材料のエポキシ樹脂や、無機系補修材料は、ある程度ひび割れ内部での挙動が把握されている。しかし、有機系補修材料のアクリル樹脂については、ひび割れに注入した場合の挙動がほとんど把握されておらず、そのような研究もほとんどなされていない。そこでここでは、実際のひび割れを想定したひび割れモデルを用いて注入試験を行い、その試験結果からアクリル樹脂の注入性能を、エポキシ樹脂、無機系補修材料のそれと比較検討することを試みた。

本研究では、各材料において可能な限り同じ条件で注入試験を行えるようにするために、ガラス板のみのひび割れモデルを用いることとした。このひび割れモデルは、図4に示すように、500mm×1000mmの2枚のガラス板の間に金属製のスペーサーを挟み、その間隔が所定の幅になるように設定したものである。ガラス板の周囲には注入した補修材料がもれないようにシール材を施した。また、注入口の反対側には空気口を設け、空気圧による注入障害を生じないようにした。本試験では注入圧を変化させて注入を行い、注入圧による注入性能の差についても検討を行ったので、注入口に圧力計を取り付けた手動式注入ポンプを用いて注入を行った。注入試験のパラメータを表5に示す。注入幅として0.3mm、0.5mm、1.0mmの3パターン、注入圧として0.10N/mm²、0.15N/mm²の2パターンの、1材料につき6パターンを選んだ。また、試験に使用した補修材料はA材料、B材料、C3材料の3種類とした。C3材料を選んだ理由は、

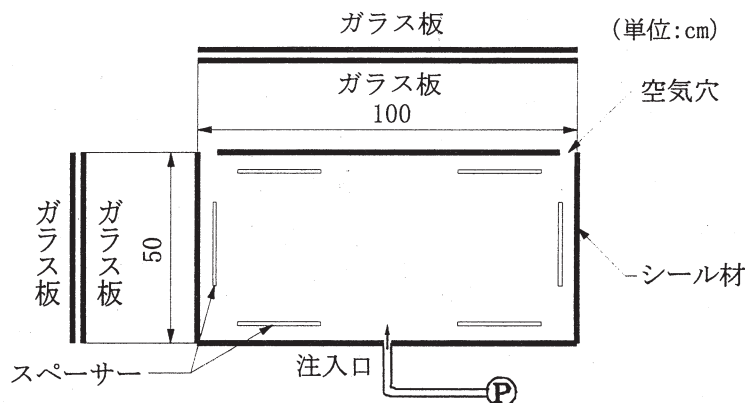


図4 ひび割れモデル

アクリル樹脂の中で最も粘度が低いためである。注入面積を測定するために、注入開始から注入完了または注入開始より 20 分までビデオカメラによって撮影を行った。そして、ビデオプリンターによって有機系補修材料については 2 分毎、無機系補修材料については 5 秒毎の画像をプリントアウトして、その注入面積をプランメーターによって測定し、注入面積と経過時間の関係について検討を行った。

3.2 試験結果および考察

注入状況を図 5 に示す。いずれの補修材料も注入口を

表 5 注入試験パラメータ

使用材料	ポリアセメント系	エポキシ樹脂	アクリル樹脂
	A材料	B材料	C3材料
設定条件			
注入幅 (mm)	0.3	0.5	1.0
注入圧 (N/mm ²)	1.0	1.5	

中心とした半円状であり、良好な注入状況を示した。各補修材料の経過時間と注入面積の関係を図 6~11 に示す。注入面積と時間の関係は、注入が完了近くになると若干注入面積の増加が鈍る傾向にあるが、その他はほぼ直線的であった。各材料とも、注入圧力を大きくするにしたがって、注入幅によらずその注入速度は次第に大きくなった。

無機系補修材料である A 材料は、各補修材料の中で最も注入が容易であった。粘性がかなり低いためにいずれ

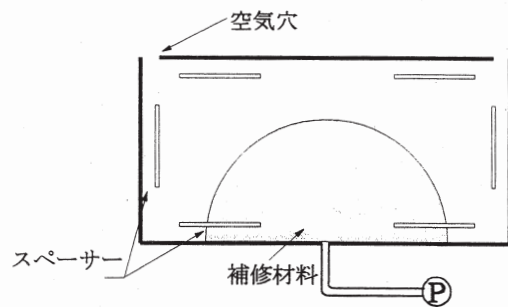


図 5 注入状況

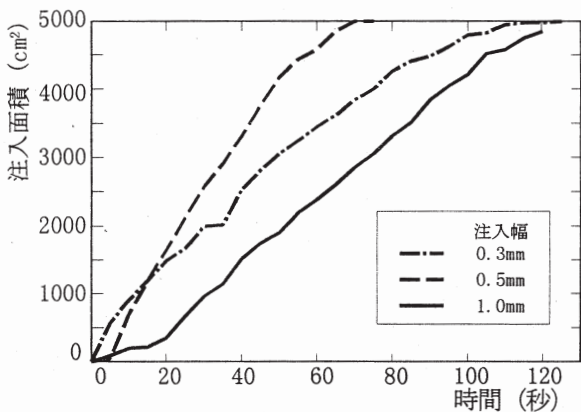


図 6 注入面積-時間関係
(A 材料 ; 注入圧 0.10N/mm²)

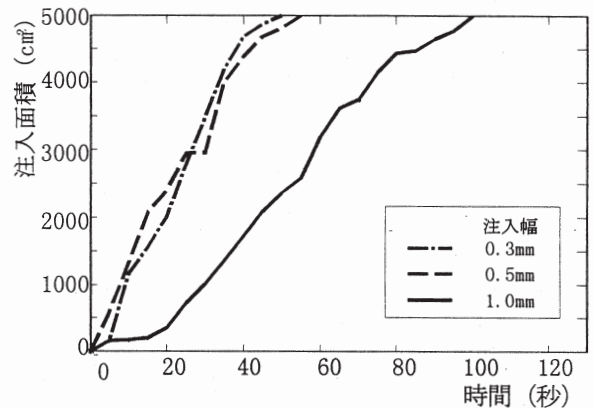


図 7 注入面積-時間関係
(A 材料 ; 注入圧 0.15N/mm²)

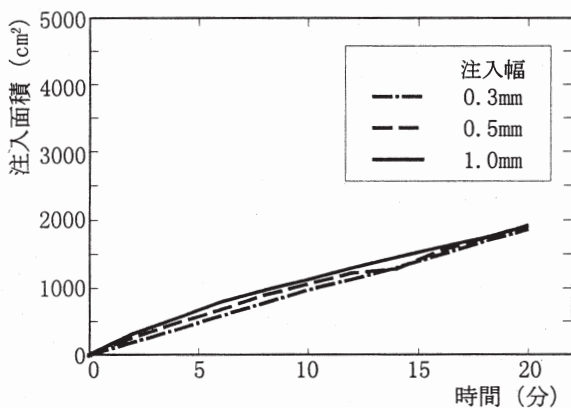


図 8 注入面積-時間関係
(B 材料 ; 注入圧 0.10N/mm²)

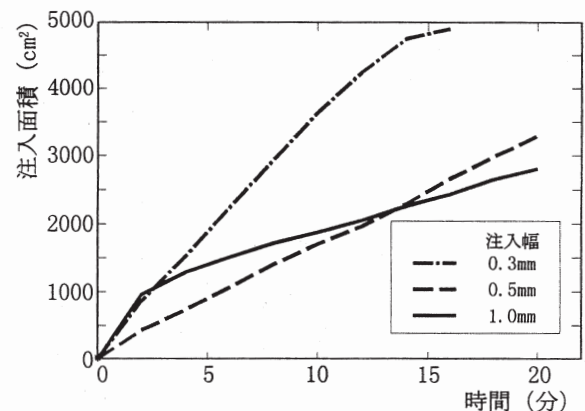


図 9 注入面積-時間関係
(B 材料 ; 注入圧 0.15N/mm²)

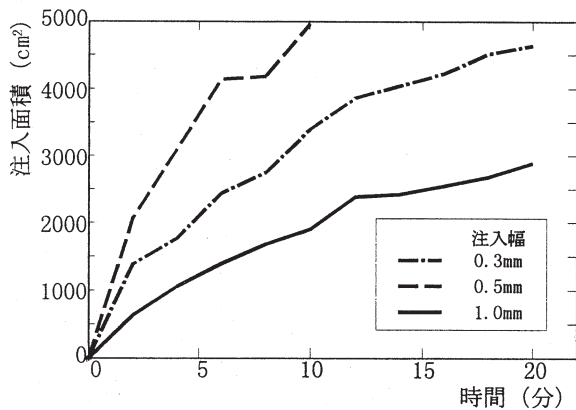


図10 注入面積-時間関係
(C3材料；注入圧 0.10N/mm²)

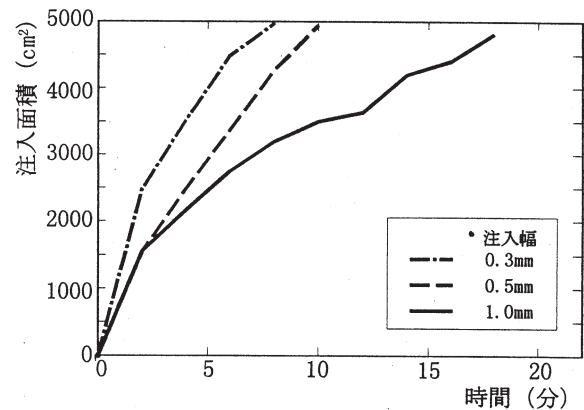


図11 注入面積-時間関係
(C3材料；注入圧 0.15N/mm²)

の注入圧、いずれの注入幅においても、120秒ほどで注入が完了した。さらにひび割れへの注入を容易にするためには、ポリマーセメントを練った後、脱泡し、十分に混ざっていないセメント分を除去する必要があると思われる。

エポキシ樹脂であるB材料は、各補修材料の中で最も注入が困難であった。注入圧 0.10N/mm² においては、いずれの注入幅においても、20分以内に注入完了することはできず、差も見られなかった。これは、粘性が非常に高いこと、粘性が高い補修材料の割に、注入圧が低いことが影響していると思われる。注入圧 0.15N/mm² においては、0.10N/mm² と比べ全体的に注入は容易であった。エポキシ樹脂はせん断速度が大きくなると、粘性が低くなるという性質が、他の補修材料に比べて顕著である。したがって、注入圧をさらに大きくするとせん断速度が大きくなり、注入が容易になるものと思われる。

アクリル樹脂である C3 材料は、注入圧 0.10N/mm² においては、注入幅 0.5mm の注入が容易で以下 0.3mm、1.0mm の順であった。これは、0.3mm の場合、ガラス板の摩擦の影響により注入速度が鈍り、1.0mm の場合、0.5mm と比較して同じ面積を広げるのに2倍の量の補修

材料が必要となるため、補修材料の流入量が追いついていないのが原因であると思われる。注入圧 0.15N/mm² において、注入幅 0.3mm の注入が最も容易で、以下 0.5mm、1.0mm の順であった。ガラス板の摩擦の影響が、注入圧や流入量の増加によって、あまり目立たなくなるために、必要流入量の少ない順に注入面積の増加率が良くなったものと思われる。

有機系補修材料が、無機系補修材料に比べて注入性能が良くない原因は、前述したように分子間での相互作用により、粘性が高くなるからである。しかし、アクリル樹脂は、ポリマーセメントには遠く及ばないものの、エポキシ樹脂より極めて注入性能は良好であった。比較的いずれのひび割れ幅に対しても、また、注入圧の低い時でも注入は容易であった。実際の施工現場においては、補修材料の注入性能は、いかなる注入幅でも容易に注入でき、かつ注入圧はなるべく低い方が望まれる。そういう点で、アクリル樹脂は好ましい結果を示しており、今後あらゆる面での使用が期待できると思われる。

4. 曲げ引張破壊試験

4.1 目的および方法

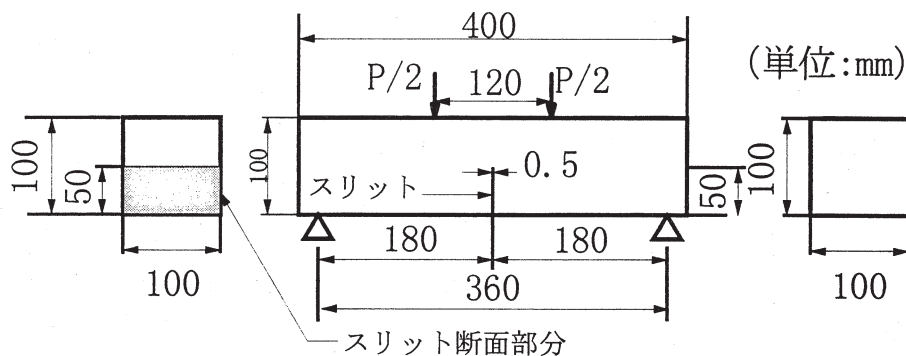


図12 供試体寸法・形状および載荷方法

ひび割れの状況は、施工場所、施工環境によって様々であり、状況に適した補修材料の使用が必要となってくる。代表的な補修材料であるエポキシ樹脂やポリマーセメント系補修材料のひび割れ注入後の接着性能や強度は、過去の研究や施工実績などから明らかとなっているが、アクリル樹脂のそれに関してはほとんど解明されていない。そこでここでは、コンクリートひび割れモデルを用いて曲げ引張破壊試験を行い、アクリル樹脂の接着性能や強度を調べるとともに、エポキシ樹脂やポリマーセメント系補修材料と比較検討することを試みた。

表6 コンクリート示方配合表

G_{MAX} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)
20	10±2.5	2.0±1.0	43	46
単位量 (kg/m ³)				
W	C	S	G	
200	462	739	904	

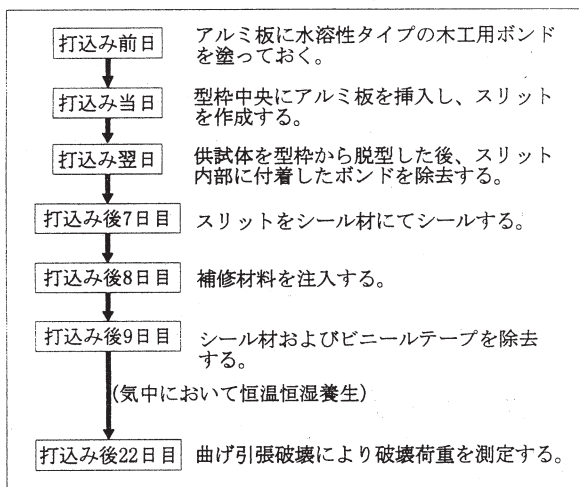


図13 供試体作成手順

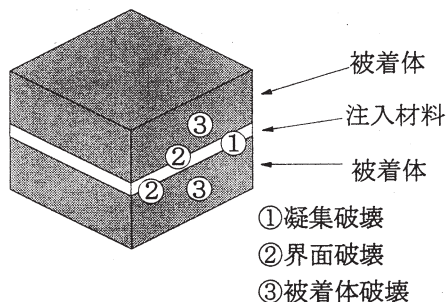


図14 破壊パターン

実験に用いた供試体の寸法・形状は、図12に示すとおりである。コンクリートの設計基準強度は、 $f_{ck}=35\text{N/mm}^2$ である。表6にコンクリートの示方配合表を示す。なお、使用セメントは早強セメントである。

供試体は、金属製コンクリート型枠を用いて作製し、コンクリート供試体の中央下半面に、図12に示すように0.5mm幅のスリットを設けて、ひび割れモデルとした。図13にひび割れモデルの作成手順を示す。

供試体のスリット部分に補修材料を注入した後、補修材齢14日に達した時点で金属製アタッチメントを取り付けたモルタル用耐圧試験機に、図12に示すように、JIS A 1106に準じて二点等分荷重を、鉛直かつ偏心が生じないように載荷し、曲げ引張破壊をさせた。また、載荷速度の違いによる試験状況の差を無くすために、載荷速度は50N/sとした。この試験による測定項目は、曲げ引張破壊荷重、およびスリット部分下面でのひずみである。曲げ引張破壊試験により補修効果の比較を行った理由は、この試験が補修による部材強度の回復だけでなく、補修材料の接着性能を評価する一つの方法と考えたからである。ひずみゲージによるひずみの測定によって、注入した補修材料の強度、およびひび割れ追従性についての検討も行った。

4.2 試験結果および考察

今回の試験では、補修効果の評価を曲げ破壊荷重により行った。これは、供試体が母材であるコンクリートと注入材料との複合体であること、また破壊パターンが一律でないことから、弾性理論の適用が困難であるためである。

供試体の破壊パターンには図14に示すように、破壊箇所の違いにより次の3パターンがあるといわれている。

- ① 凝集破壊：図14の①において破壊の起こる場合で、補修材料自体が破壊する。
- ② 界面破壊：図14の②において破壊の起こる場合で、補修材料とコンクリートの接着界面が剥がれて破壊する
- ③ 被着体破壊：図14の③において破壊の起こる場合で、注入材料の凝集力および接着力がコンクリートの曲げ破壊強度を上回り母材が破壊する。

各補修材料の破壊荷重は、試験によって求められた最大荷重をその供試体の破壊荷重とした。補修効果については、注入を行った供試体の破壊荷重を、スリットの無い健全な供試体(以下スリット無と略記)の破壊荷重と比較することにより評価した。また、ひび割れ追従性に関しては、試験を行った供試体の荷重-ひずみ曲線の傾きが、補修材料を未注入のスリットの有る供試体(以下スリット有と略記)の荷重-ひずみ曲線の傾きに近いほどひび割れ追従性が大きく、スリット無の供試体の荷重-ひずみ曲線の傾

きに近いほどひび割れ追従性が小さいと考えた。なお、補修効果を高めるには、ひび割れ補修後にひび割れ部で変動が生じた際に、ひび割れ追従性を大きくする必要がある。

図 15 にスリット無供試体、スリット有供試体、および各補修材料を注入した供試体の破壊荷重を示す。これらの供試体の材齢は 22 日である。また、図 16~18 に各供試体の荷重-ひずみ曲線を示す。

無機系補修材料である A 材料の破壊パターンは、ほとんど界面破壊で若干凝集破壊がみられた。これは母材との接着が良くないためと考えられる。しかし、この場合は、ポリマーセメントそのものの強度にも問題があったものと思われる。図 16 より、A 材料は比較的ひび割れ追従性はあるといえる。しかしセメント系であるため、材齢がたつにしたがって剛性が増し、その傾きが大きくなり、それに伴ってひび割れ追従性は失われていくと思われる。図 15 より、破壊荷重はスリット無の 4 割程度であった。

エポキシ樹脂である B 材料の破壊パターンは、全て界面破壊であった。これはエポキシ樹脂自体の強度は高い

が、コンクリートとの接着性に問題があったためと思われる。エポキシ樹脂は、耐水接着性が劣っていることが知られており、コンクリート中の水分や空気中の水分の作用が接着不良の原因であると思われる。図 17 より、荷重-ひずみ曲線の傾きはスリット無の傾きに近いことから、ひび割れ追従性はあまりないと言える。したがって、実際のひび割れ補修に用いた場合、補修後の変動に対応しきれないと考えられる。図 15 より、破壊荷重はスリット無の 5 割程度で、全補修材料の中で最も高い値を示した。

アクリル樹脂である C 材料の破壊パターンはほとんど界面破壊であった。なお、C1 材料においてはアクリル樹脂自体の強度に問題があったために、一部凝集破壊が見られた。図 18 より C1 材料はほぼスリット無と同じ傾きであるので、ひび割れ追従性はほとんどないと思われる。C2、C3 材料はスリット有とほぼ同じ傾きを持っていることから、実際のひび割れ補修に用いた場合、ひび割れ追従性は十分に期待できると思われる。アクリル樹脂系補修材料の中で最も高い破壊荷重を示したのは C3 材料で、ほぼ B 材料と同じ値であった。以下 C2、C1 材料の順で、C1 材料の破壊荷重はスリット無の 4 割程度で、

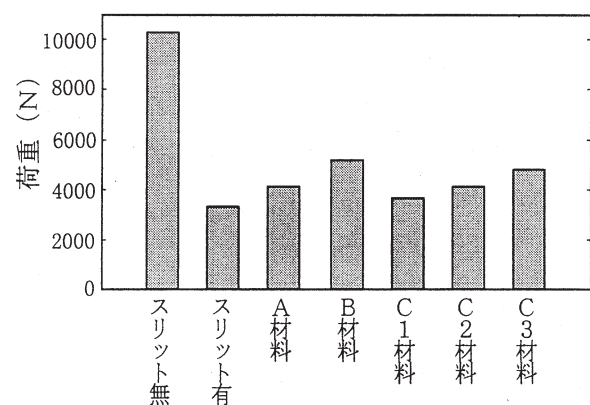


図 15 各供試体の破壊荷重の比較

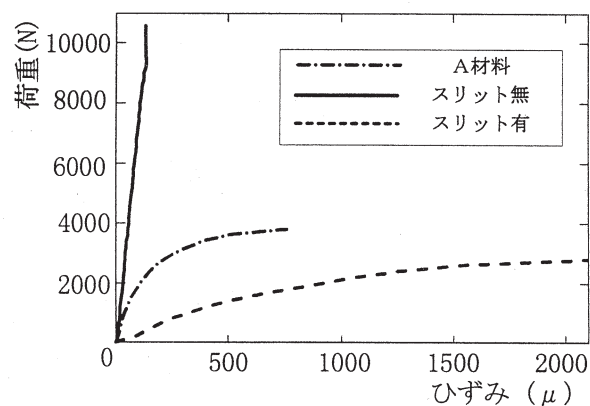


図 16 荷重-ひずみ曲線(A材料)

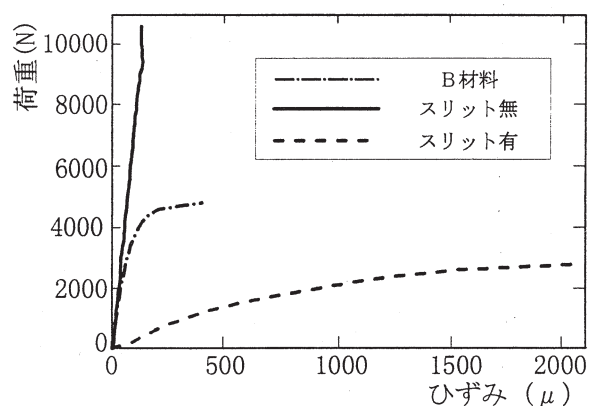


図 17 荷重-ひずみ曲線(B材料)

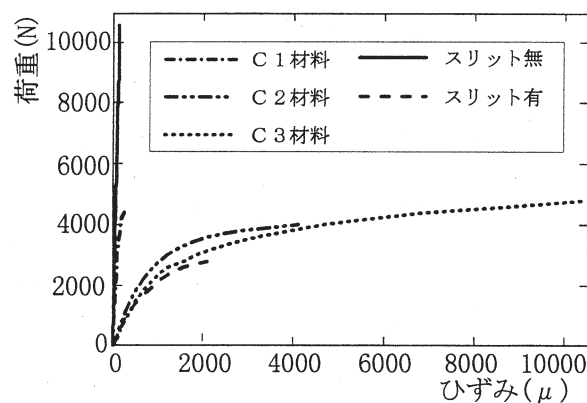


図 18 荷重-ひずみ曲線(C材料)

全補修材料の中で最も低い値であった。しかし、A、B、Cのいずれの材料も破壊荷重はスリット無の4~5割程度で、破壊荷重から補修効果の優劣をつけにくい結果となった。

アクリル樹脂は前述したように、一部の硬化材が水と反応して二酸化炭素を発生し発泡、膨張する性質がある。C3材料においてはその現象が顕著に現れて、注入している最中に発泡が見うけられた。C3材料の可使時間は通常30分程度であるが、水の作用によって10分程度と極端に短くなった。また水の作用により、硬化後に柔軟性が若干失われるため硬くもろくなり、強度や破壊パターンに影響を及ぼしたと思われる。

以上のことから、アクリル樹脂、特にC2、C3材料は、破壊荷重ではエポキシ樹脂にわずかに劣るものの、ひび割れ追随性においては他の補修材料に比べて非常に優れており、実際の施工現場でのひび割れ部の変動に追随することが期待できる。しかし、少量の水によって、可使時間が短くなったり、発泡、膨張作用によりひび割れ部に余計な力が加わったりすることも考えられる。したがって、実際の補修工事に用いる場合、水の介入を防ぐための細心の注意が必要であると思われる。

5. 結論

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 無機系補修材料であるA材料およびアクリル樹脂であるC3材料はTI値が1に近く、せん断速度による粘度の変化に大きな差がないことが明らかとなった。
- 2) 無機系補修材料は有機系補修材料と比較すると、注入性能がはるかに優れていることが明らかとなった。
- 3) アクリル樹脂、特にC3材料は、エポキシ樹脂に比べて注入性能がはるかに優れており、比較的大きなひび割れへの注入も容易であることが明らかとなった。
- 4) C3材料は、注入圧が 0.10N/mm^2 程度と低くても、エポキシ樹脂と比較して、注入は容易であることが明らかとなった。
- 5) アクリル樹脂、特にC2、C3材料は、ひび割れ追随性は従来の補修材料に比べて非常に優れていることが明らかとなり、ひび割れ部の変動にも十分追随できると考えられる。
- 6) 無機系補修材料および有機系補修材料で補修した梁の曲げ引張破壊荷重は、スリット無の梁の4~5割程度で、破壊荷重から補修効果の優劣が判定できなかった。

〈参考文献〉

- 1) 江口博昭：ひび割れの検査と補修—補修工法—、コンクリート工学 Vol.20, No11, 1982, 11

(1997年2月12日受付 4月28日受理)