

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

国枝 稔¹・川瀬貴行²・鎌田敏郎³・六郷恵哲⁴

¹正会員 工博 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
²学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
³正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)
⁴正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

ひび割れ注入材の付着特性を評価するには、実構造物にできるだけ近い条件下で性能評価を行なうことが望ましい。本研究では、注入面の表面性状や付着試験に用いる供試体寸法の違いが、曲げ付着特性に与える影響について、破壊力学パラメータを用いて実験的に検討した。注入面の性状の違いは、曲げ付着強度のみならず破壊エネルギーにも影響を及ぼすことが明らかとなった。また、補修供試体の曲げ付着強度の寸法効果は、比較供試体（コンクリート）の曲げ強度のそれに比べて大きいことが明らかとなった。注入面に存在する脆弱層が、ひび割れ発生以降の挙動に影響を及ぼすことが、引張軟化曲線および破壊エネルギーを用いた検討により明らかとなった。

Key Words : crack injection repair, fracture mechanics, flexural bond strength, size effect, weak boundary layer

1. はじめに

コンクリート構造物には、様々な要因（例えば荷重の作用、ASR、凍害など）によりひび割れが生じる。特に鉄筋付近に生じたひび割れは、水密性を極端に低下させ、鉄筋を腐食させる原因の1つとなる¹⁾。したがって、ひび割れの発生位置や量、さらにはコストなどの観点からひび割れ注入、断面修復、表面被覆などの補修工法を適切に選定し、補修が行なわれる必要がある。効率よく補修を行なうためには、選定した工法の補修効果を事前に把握しておく必要がある。例えばひび割れ注入工法に用いられる注入材に要求される性能の1つに注入材と母材コンクリートとの付着性能を挙げることができる。

注入材の付着性能を評価する試験法としては、例えば JIS A 6024（建築補修用注入エポキシ樹脂）が用いられている。この試験方法（図-1 参照）では、①注入面（注入材と母材の界面）には、ほぼ平滑な面を使用していること、②母材にモルタル（標準砂）を使用していること、③供試体の寸法が比較的小さいこと、などの特徴があり、容易にかつ再現性のある試験を行なうことが可能である。一方、実構造物に注入された注入材が所定の付着性能を有しているかを確認するためには、例えば注入面にひび割れ面を用いるなど、実構造物にできるだけ近い条件下で性能評価を行なうことが望ましい。特に、

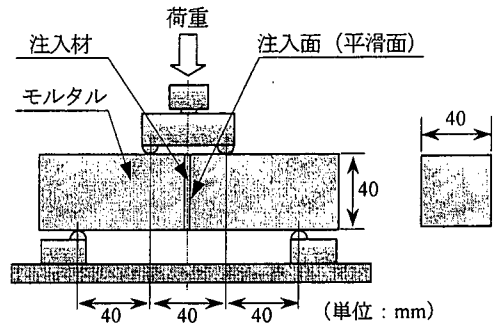


図-1 JIS A 6024 の載荷試験方法

実際のひび割れは、長期間暴露されている場合もあり、塵埃等が付着している可能性も考えられる。またコールドジョイントやコンクリートの剝離部などを対象とした注入補修においても、レタンス等の脆弱層が存在する可能性がある。効果的な注入補修を行なうためにも、これらの脆弱層が付着特性に及ぼす影響を明確にしておくことは重要である。

付着性能を評価する指標として、曲げ試験による付着強度や1軸引張試験による付着強度があげられるが、ひび割れの発生や進展に対する抵抗性が評価可能である破壊力学パラメータが有効と考える。Kleinschrodt²⁾は、

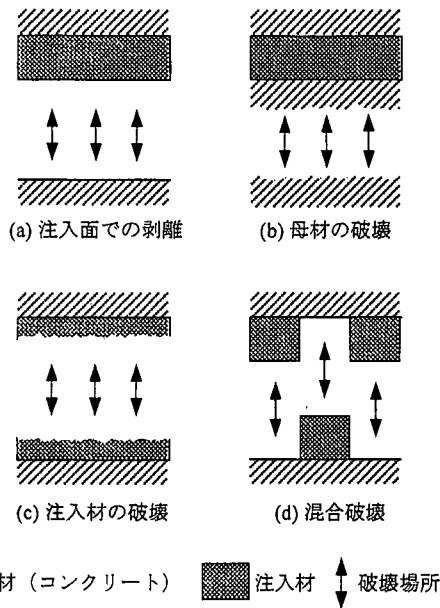


図-2 破壊性状のイメージ⁶⁾

一度破断させたコンクリートをエポキシ樹脂で補修し再び曲げ荷重を行なった結果、一度目の荷重時と比較して曲げ強度および破壊エネルギーが増大することを実験的に明らかにしている。橋高ら⁹⁾は、コンクリート強度やエポキシ樹脂の引張弾性係数ならびにひび割れ幅を変化させた補修部材の性能評価に破壊エネルギーを適用している。筆者らもコンクリートの打継ぎ部における付着特性の評価⁴⁾や、断面修復材と母材コンクリートとの付着特性の評価⁹⁾に引張軟化曲線などの破壊力学パラメータを適用し、付着面の表面性状や使用材料の違いが評価可能であることを明らかにしている。

本研究では、ひび割れ注入材の付着性状に影響を及ぼすと考えられる要因のうち、①注入面の性状（ひび割れ面、平滑面）の違い（第3章）、②付着試験に用いる供試体寸法の違い（第4章）、③注入面に付着した脆弱層の有無（第5章）、の3つに着目し、それぞれの曲げ付着性状について実験・解析により検討した。評価に用いる指標は、従来からの曲げ付着強度に加え、引張軟化曲線や破壊エネルギーとした。

2. 引張軟化曲線の推定方法

ひび割れ注入した供試体を、曲げ荷重試験により破壊させると、以下の破壊性状を示す。

- ① 注入面での剥離（図-2(a)参照）
- ② 母材あるいは注入材の破壊（図-2(b)(c)参照）

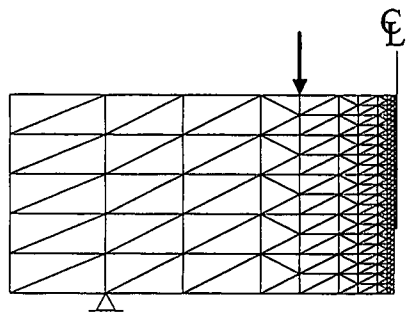


図-3 要素分割図

③ ①と②の複合（図-2(d)参照）

これらの破壊性状はすべて一本の巨視的なひび割れに支配されており、消散エネルギーのほとんどがひび割れ形成に用いられたものと考えられることから、解析では供試体中央に一本の仮想ひび割れを配置したモデルの適用が可能であると考えられる。ただし、一般的に用いられるひび割れ注入材の材料特性はコンクリートのそれと著しく異なる場合が多く、特に注入材の弾性係数の値は、ひび割れ追従性の向上などを目的として小さい（2.5～10.0 GPa 程度）場合が多い。付着特性の評価を行なう際には、注入材の材料特性を厳密にモデル化して解析を行なうことが望ましいが、その場合の問題点として例えば次のことが挙げられる。

- ① ひび割れ注入した部材の破壊性状には前述のような3種類が考えられ、それぞれの破壊性状にあわせたモデル（例えば、ひび割れの配置など）を使い分ける必要があり、非常に煩雑である。
- ② 注入面において剥離したように見えても、厳密には注入面で剥離せず、例えば母材コンクリートを引き離すような破壊をする場合が多く、界面の定義が難しい。最近では、含浸材料も開発され、ミクロ的な観察が必要となる可能性がある。また実際には、剥離と母材コンクリートの破壊の複合のような破壊性状を示すものも多い。

したがって本研究では、母材、注入材、ならびに界面を含めた注入部分に生じるひび割れを、一本の仮想ひび割れとしてモデル化し、ひび割れ以外の部分は均質材料（コンクリート）としてモデル化を行なった。実験により得られた曲げ試験結果を用いて、供試体中央部に仮想ひび割れモデルを組込んだ有限要素法により逆解析⁷⁾を行ない、引張軟化曲線を推定した。図-3に示すような要素分割を用いて、はり供試体の左半分を対象とした解析を行なった。コンクリートは線形弾性体と仮定し、ポアソン比は0.2とした。

表-1 コンクリートの配合 (第3章)

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G ^{*1}	Ad. ^{*2}
50	165	330	765	1000	0.99

*1:粗骨材の最大寸法 15mm

*2:AE 減水剤

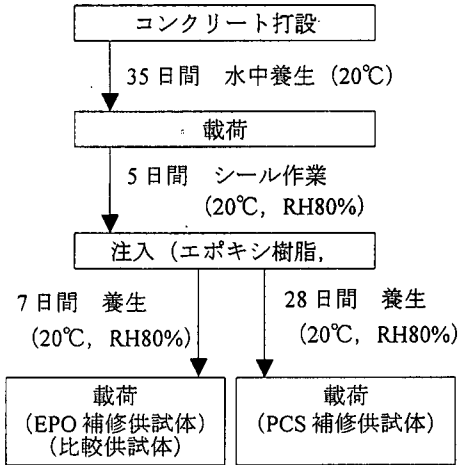


図-4 実験の流れ (第3章)

3. 注入面の性状の違いに関する検討

(1) 実験概要

図-4に本実験の流れを示す。

a) 注入面の作製

母材となる供試体の寸法は10×10×40cmとし、表-1に示す配合のコンクリートを用いて供試体を作製後、35日間水中養生(20°C)を行なった。本実験では、①JIS A 6024に準拠し作製した平滑面(以後、平滑面と呼ぶ)と②曲げ試験により得られたひび割れ面(以後、ひび割れ面と呼ぶ)の2種類の注入面を用いた。平滑面については、10×10×40cmの供試体の両端面を#80のサンドペーパーを用いて磨いた後、コンクリートカッターを用いて供試体中央部を切断し、10×10×20cmの供試体を作製した。その後、前述の研磨した面が注入面となるよう再びつき合わせてシールを行なった。ひび割れ面については、10×10×40cmの供試体を用いて3点曲げ載荷を行ない、供試体中央部付近にて破断させた後、再びつき合わせてシールを行なった。

b) 注入

注入材には、2液性のエポキシ樹脂とSBR系のポリマーセメントスラリー(以後、PCSと呼ぶ)の2種類を使用した。表-2に、使用した注入材の物性を示す。注入幅はいずれの供試体も1mmとなるように調節し、注入材は供試体上面から自然流下させた(図-5参照)

表-2 ひび割れ注入材の物性

特性	エポキシ樹脂	ポリマーセメントスラリー (SBR系)
可使用時間(分)	50-60	60
硬化時間(時間)	15	14
収縮率(%)	0.0	0.2
弾性係数(GPa)	2.5	9.7
付着強度(MPa) (JIS A 6024)	7.52	3.94

*カタログから抜粋

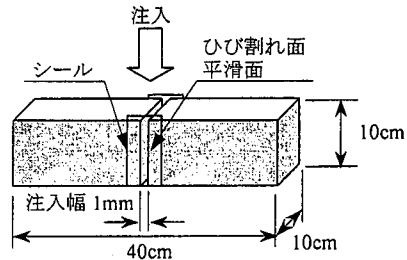


図-5 注入方法 (第3章)

c) 補修供試体の載荷

エポキシ樹脂を注入した供試体(以後、EPO補修供試体と呼ぶ)は7日間、PCSを注入した供試体(以後、PCS補修供試体と呼ぶ)は28日間、恒温室内(20°C, RH80%)にて養生を行なった。載荷前日にコンクリートカッターを用いてはり高さの1/3の切欠き(幅約3mm)を設けた。各シリーズ4本ずつの供試体を用いて3等分点曲げ載荷試験(スパン30cm)を行ない、荷重-CMOD曲線を計測した。また、比較のためにEPO補修供試体と同じ材齢時に、10×10×40cmの曲げ供試体(母材コンクリートと同一材齢。以後、比較供試体と呼ぶ)の載荷試験も行なった。

計測したEPO補修供試体、PCS補修供試体、比較供試体の荷重-CMOD曲線を用いて引張軟化曲線を推定した。

(2) 結果と考察

a) 圧縮強度ならびに弾性係数

比較供試体の載荷時(材齢47日)にφ10×20cmの供試体(3本)を用いて圧縮強度ならびに弾性係数の測定を行なった結果、それぞれ52.3MPa、31.3GPaであった。

表-3 曲げ試験結果 (第3章)

供試体	注入面	曲げ付着強度* (MPa)	破壊エネルギー $G_{f,0.1}$ (N/m)	供試体本数
EPO 補修供試体	ひび割れ面	4.41 (0.51)	27.6	4
	平滑面	3.25 (0.46)	15.1	4
PCS 補修供試体	ひび割れ面	2.43 (0.23)	12.8	4
	平滑面	2.01 (0.16)	6.5	4
比較供試体	—	3.89 (0.18)	22.8	2

* 比較供試体の曲げ付着強度は、曲げ強度に相当
() 内の数値は標準偏差

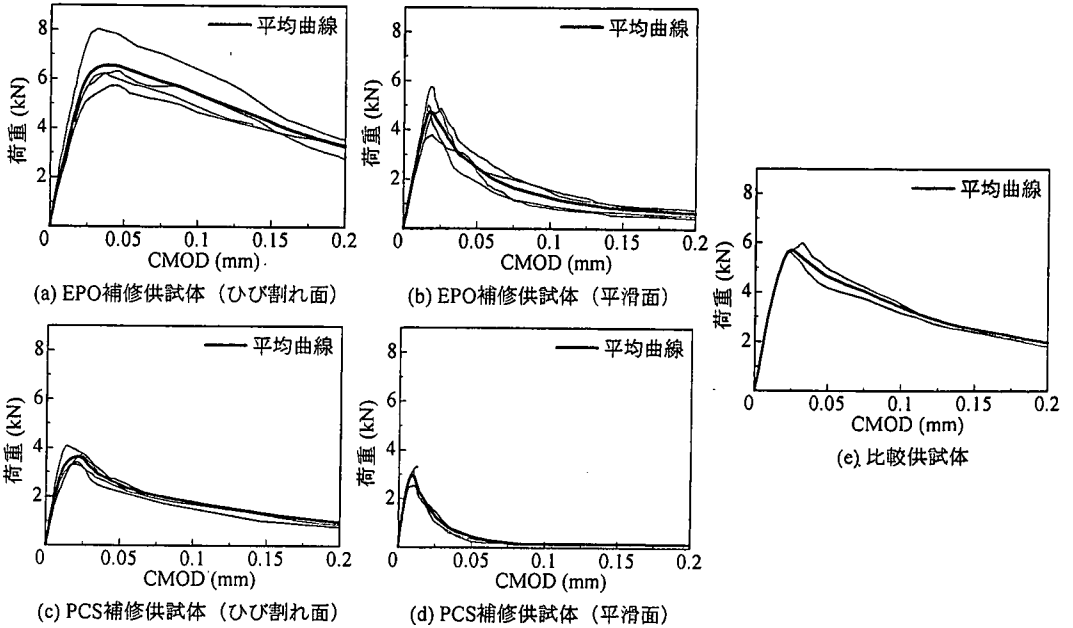


図-6 荷重-CMOD 曲線 (第3章)

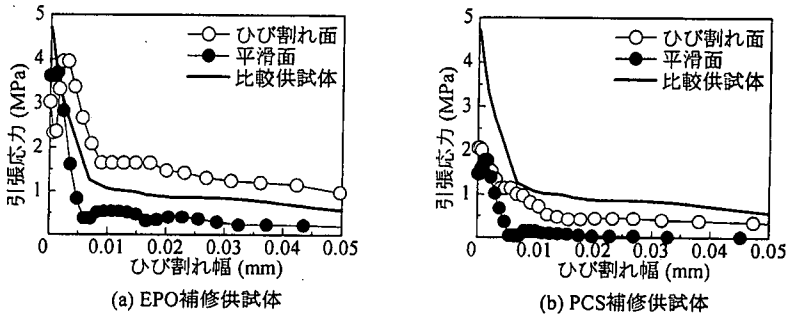


図-7 引張軟化曲線 (第3章)

b) 曲げ破壊性状ならびに曲げ付着強度

EPO 補修供試体において、平滑面に注入した供試体は界面および注入材での破壊となり、ひび割れ面に注入した供試体はコンクリートでの破壊となった。一方、PCS 補修供試体においては、注入面の性状の違いによらず注入面および注入材での破壊となった。

表-3 に曲げ試験結果を示す。なお、注入材ではなく

母材コンクリートで破壊した供試体から得られた強度に関しても、曲げ付着強度と呼ぶ。EPO 補修供試体および PCS 補修供試体のいずれの曲げ付着強度についても、ひび割れ面に注入したものの方が平滑面に注入したものに比べて 1.2~1.4 倍程度大きくなった。今回用いた配合のコンクリートと同程度のコンクリートにおけるひび割れ面の表面積 (計測間隔 0.4mm, 材齢 4~68 日) は、

表-4 コンクリートの配合 (第4章)

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G ^{*1}	Ad. ^{*2}
55.6	161	290	836	1001	0.725

*1:粗骨材の最大寸法 15mm

*2:AE減水剤

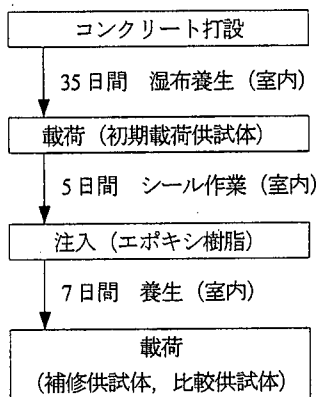
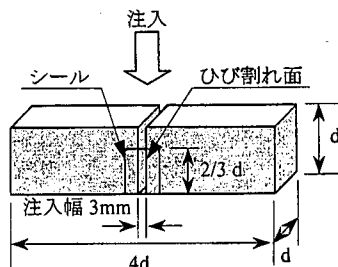


図-8 実験の流れ (第4章)



Size1: $d = 10\text{cm}$ (モーメントスパン 10cm)
 Size2: $d = 20\text{cm}$ (モーメントスパン 20cm)
 Size3: $d = 30\text{cm}$ (モーメントスパン 30cm)

図-9 注入方法 (第4章)

投影面積の 1.2~1.3 倍程度⁹⁾であり、ひび割れ面を用いたことによる付着面積の増大が、付着強度の増加の原因の1つと考えられる。

c) 引張軟化曲線、破壊エネルギー

図-6に、計測した荷重-CMOD 曲線を示す。EPO 補修供試体では、最大荷重以降の荷重の低下が他のシリーズに比べて緩やかであり、消散エネルギーが非常に大きい。図-7に、推定した引張軟化曲線を示す。注入材の種類の違いに関しては、PCS 補修供試体の引張軟化曲線の形状は、EPO 補修供試体のそれと比較して明らかに異なっており、特に表-3に示される破壊エネルギー $G_{f0.01}$ (求められた引張軟化曲線下のひび割れ幅 0.01mm までの面積) においては、注入面の違いによらず、PCS 補修供試体の破壊エネルギーが EPO 補修供試体のそれに比べて小さく、PCS 補修供試体が脆性的に破壊していることを示している。

注入面の違いによる影響に関しては、平滑面に注入した場合、同一のひび割れ幅に対応する引張応力は比較供試体のそれに比べて小さくなった。ひび割れ面に注入した場合、同一のひび割れ幅に対応する引張応力は平滑面に注入した場合のそれに比べて大きくなっており、EPO 補修供試体においては比較供試体を上回った。表-3に示される破壊エネルギー $G_{f0.01}$ に関しても、ひび割れ面に注入した場合の破壊エネルギーは、平滑面に注入した場合のそれに比べて 1.8~2.0 倍大きくなった。このことは、付着面積の増大に伴い界面部分の付着特性が改善されたことによると考えられる。特に、EPO 補修

供試体においては、付着面を迂回するような (図-10参照) ひび割れが母材コンクリート中に発生し、破壊エネルギーの増加に寄与したものと考えられる。また、ひび割れ面を作製する際、主ひび割れ近傍には破壊進行領域が存在し、微細ひび割れによる初期損傷の影響が予想されたが、今回の実験においては、補修された部材の挙動の差として明確には表れなかった。以上より、注入材の種類の違いや、注入面の表面性状の違い (特に付着面積の違い) による付着性状の違いは、曲げ付着強度だけでなく破壊エネルギーに大きく影響を及ぼしていることが明らかとなった。

4. 曲げ付着強度の寸法効果に関する検討

(1) 実験概要

図-8に実験の流れを示す。

a) 注入面の作製

表-4の配合のコンクリートを用いて、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、 $20 \times 20 \times 80\text{cm}$ 、 $30 \times 30 \times 120\text{cm}$ の3種類の寸法の供試体 (それぞれ Size1, Size2, Size3 と呼ぶ) を4本ずつ作製した。なお、Size2 および Size3 については、あらかじめ高さの $1/3$ の切欠きを設けるため、アクリル板 (厚さ約 1mm) を型枠に配置しコンクリートを打設した。Size1のみ、載荷直前にコンクリートカッターを用いて高さの $1/3$ の切欠き (幅約 3mm) を設けた。35日間の湿布養生後、3等分点曲げ載荷を行

表-5 曲げ試験結果 (第4章)

	初期载荷供試体		補修供試体		比較供試体	強度比	破壊エネルギー比	供試体本数
	曲げ強度 (MPa)	破壊エネルギー $Gf_{0.01}$ (N/m)	曲げ付着強度 (MPa)	破壊エネルギー $Gf_{0.01}$ (N/m)	曲げ強度 (MPa)			
Size1	3.03 (0.17)	18.6	3.84 (0.30)	26.2	3.15 (0.13)	1.27	1.41	4
Size2	2.60 (0.23)	16.0	3.14 (0.12)	21.7	—	1.21	1.35	4
Size3	2.13 (0.05)	14.6	2.39 (0.10)	16.7	—	1.12	1.14	4

() 内の数値は標準偏差

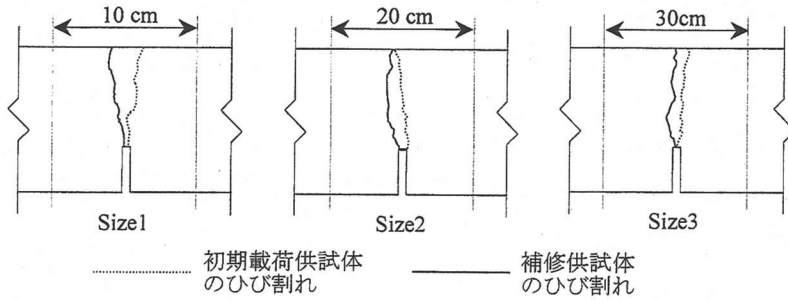


図-10 ひび割れ状況の例

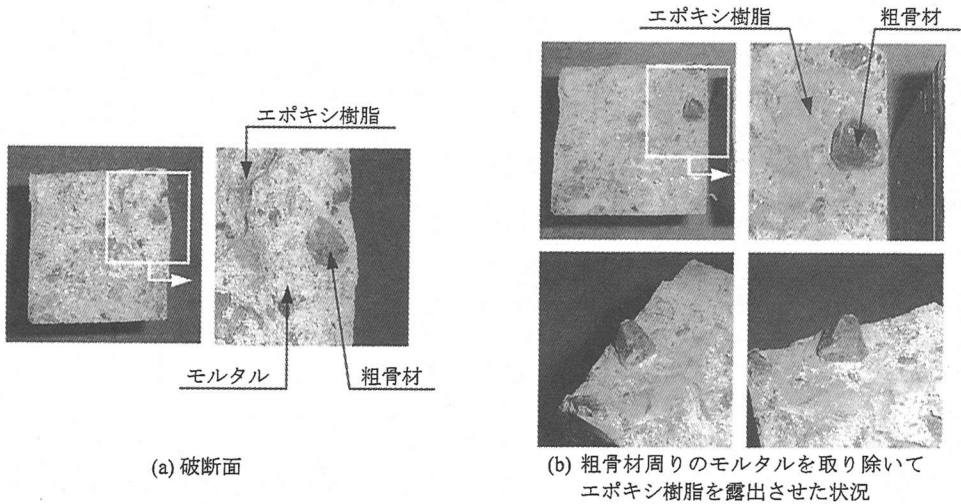


写真-1 補修供試体の破断面

ない (以後、初期载荷と呼ぶ), コンクリートを破断させてひび割れ面を作製した。また同時に荷重-CMOD 曲線も計測した。

b) 注入

载荷試験後の供試体は、その後5日間気中にて乾燥後、ひび割れ面を再び突き合わせて、注入幅が3mmとなるように調節した。3mmの注入幅を確保した理由は、ひび割れ部にエポキシが確実に充填されていることや、注入後に切欠き長さが確保されていることが容易に確認できるようにするためである。切欠きを設けるために、底

面ならびに側面の下から2/3の高さまでシールし、はり高さの2/3の高さまでエポキシ樹脂(表-2参照)を注入した(図-9参照)。なお、エポキシ樹脂の注入方向と载荷方向や切欠き位置との関係は重要であると考えられるが、この実験では検討しておらず今後の課題である。

c) 補修供試体の载荷

エポキシ樹脂を注入した供試体(以後、補修供試体と呼ぶ)は7日間の養生後、再び3等分点曲げ载荷試験を行ない、荷重-CMOD曲線を計測した。また比較のためSize1についてのみ補修供試体と同じ材齢時に、コ

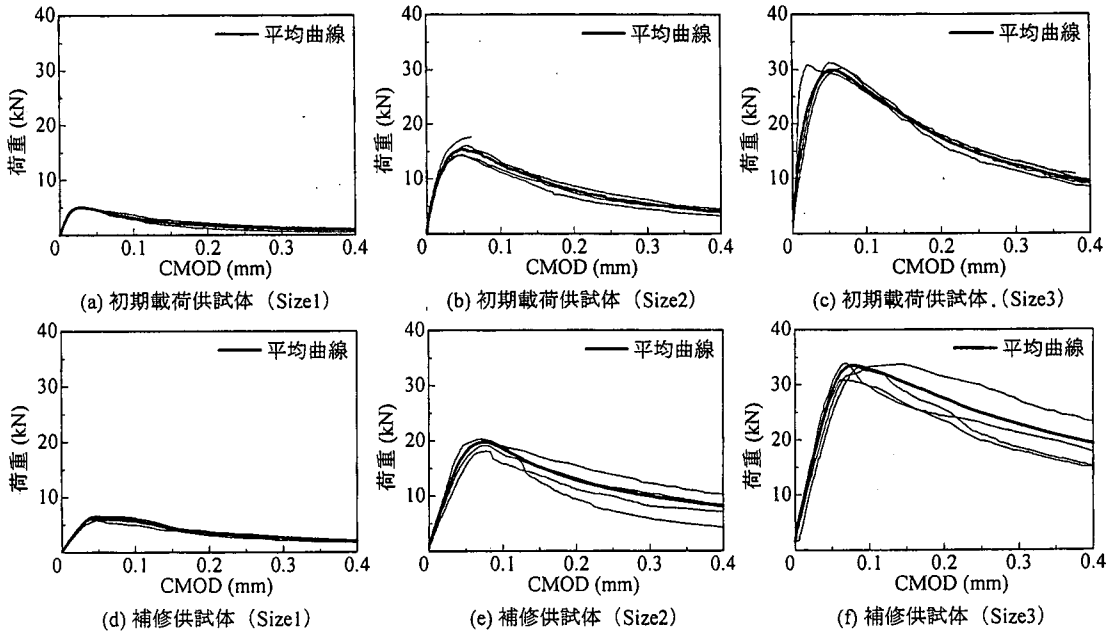


図-11 荷重-CMOD 曲線 (第4章)

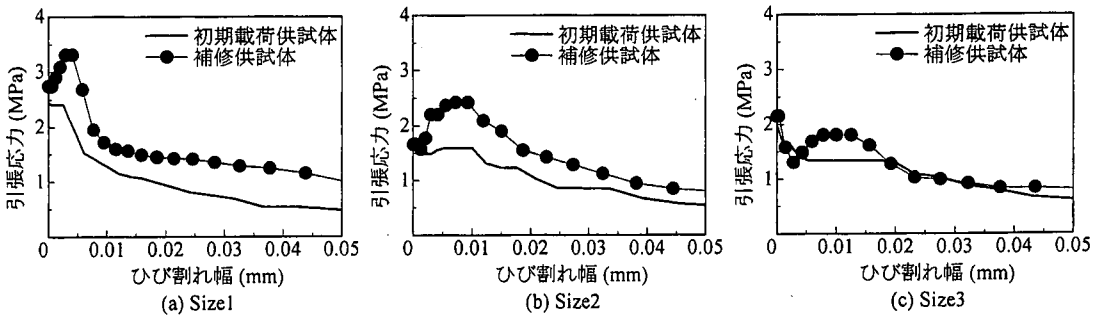


図-12 引張軟化曲線 (第4章)

ンクリートのみの供試体 (母材コンクリートと同一材齢。以後、比較供試体と呼ぶ) の載荷試験を行なった。また、計測した荷重-CMOD 曲線を用いて引張軟化曲線を推定した。

(2) 結果と考察

a) 圧縮強度ならびに弾性係数

比較供試体の載荷時 (材齢 47 日) に $\phi 10 \times 20$ cm の供試体 (3 本) を用いて圧縮強度ならびに弾性係数の測定を行なった結果、それぞれ 30.9 MPa, 25.8 GPa であった。

b) 曲げ破壊性状ならびに曲げ付着強度

すべての供試体寸法において、補修供試体はコンクリートでの破断となった。

表-5 に曲げ試験結果、ならびに初期載荷供試体の曲げ強度に対する補修供試体の曲げ付着強度の比 (以後、

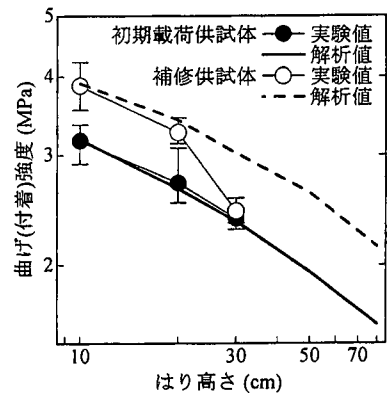


図-13 曲げ付着強度の寸法効果

強度比と呼ぶ) を示す。なお、曲げ強度、曲げ付着強度の算出には、自重の影響を考慮している。初期載荷供試体および比較供試体のコンクリートの曲げ強度は、ほぼ

表-6 コンクリートの配合 (第5章)

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G ^{*1}	Ad. ^{*2}
50	165	330	765	1000	0.99

*1:粗骨材の最大寸法 15mm

*2:AE 減水剤

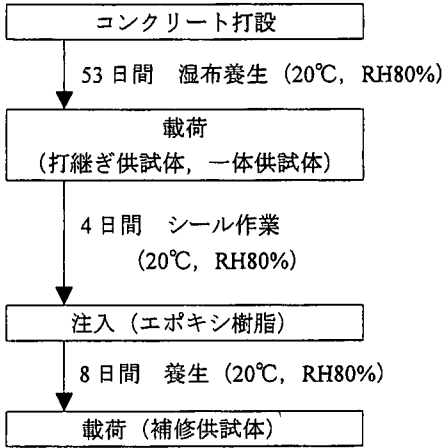


図-14 実験の流れ (第5章)

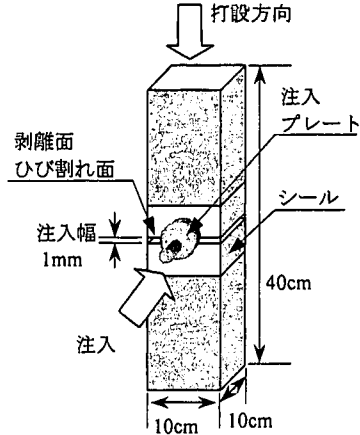


図-15 注入方法 (第5章)

同程度であるにもかかわらず、すべての供試体寸法において補修供試体の曲げ付着強度は、初期載荷供試体の曲げ強度よりも大きくなっている。強度比はいずれも1より大きい、供試体寸法が大きくなるにつれて、この値は小さくなる傾向を示している。図-10に、各供試体寸法におけるひび割れ状況の例を示す。初期載荷供試体のひび割れは、切欠き先端から上方に向かった。一方、補修供試体においては、破断面に現れた粗骨材とエポキシ樹脂が良好に付着するため(写真-1参照)、ひび割れは初期載荷供試体のひび割れを粗骨材の寸法程度迂回して進展している。このため初期載荷供試体よりも補修供試体の方がひび割れ形成に必要なエネルギーが大きくなり、曲げ付着強度も大きくなったと考えられる。また、供試体寸法が大きくなるにつれて、補修供試体のひび割れ性状は初期載荷時のそれに近づく傾向が見られ、これによって強度比が小さくなったものと考えられる。

c) 引張軟化曲線、破壊エネルギー

図-11に計測した荷重-CMOD曲線、図-12に推定した引張軟化曲線を示す。すべての供試体寸法において、エポキシ樹脂を注入した補修供試体の方が、初期載荷供試体よりも最大荷重以降の荷重の低下が緩やかとなり、最大荷重以降の付着特性が改善された。表-5に破壊エネルギー $G_{f,0.01}$ (ひび割れ幅0.01mmまでの引張軟化曲線下の面積)を示す。供試体寸法が大きくなるにつれて $G_{f,0.01}$ は小さくなっている。このことは、供試体寸法が大きくなるにつれて、補修供試体のひび割れ性状が、初

期載荷のそれに近づいたことによるものと考えられる。

d) 寸法効果

図-13に、初期載荷時の曲げ強度と補修供試体の曲げ付着強度の寸法効果の実験値、ならびにSize1の供試体(初期載荷供試体、補修供試体)の引張軟化曲線を使用して有限要素解析により求めた解析値を併せて示す。実験値および解析値から、補修供試体の曲げ付着強度には寸法効果が存在することが確認された。供試体寸法の増加に伴い、補修供試体の曲げ付着強度は初期載荷時の曲げ強度に漸近した。本研究の範囲では、実験により求めた寸法効果は引張軟化特性のみを考慮した解析による寸法効果より大きくなった。供試体寸法が大きくなるにつれて、補修供試体のひび割れ性状が、初期載荷時のそれに近づいたことによるものと考えられる。以上より、ひび割れ性状の違いに依存した補修供試体の挙動の違いが明らかとなり、補修供試体の性能評価を適切に行なうためには、従来から用いられている付着に関する指標のみでは判断できないひび割れ性状の評価が重要であることが確認された。

5. 注入面における脆弱層の有無に関する検討

(1) 実験概要

図-14に実験の流れを示す。

表-7 曲げ試験結果 (第5章)

供試体	注入面	曲げ付着強度* (MPa)	破壊エネルギー $G_{f0.01}$ (N/m)	供試体本数
打継ぎ供試体	—	1.78 (0.26)	6.4	3
一体供試体	—	5.11 (0.42)	27.0	3
補修供試体	剥離面	処理あり	32.1	3
		処理なし	21.8	3
	ひび割れ面	6.38 (0.15)	44.5	3

* 一体供試体の曲げ付着強度は、曲げ強度に相当

() 内の数値は標準偏差

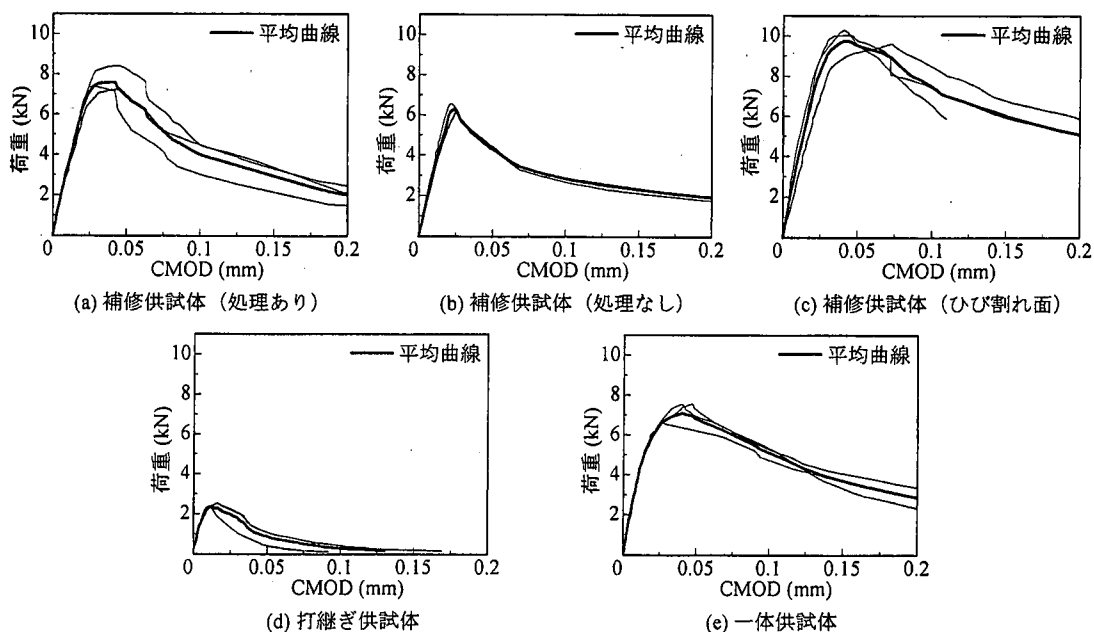


図-16 荷重-CMOD 曲線 (第5章)

a) 注入面の作製

注入面としてコールドジョイントを想定し、レイタンスを有する面に打継いだ部材の打継ぎ部における破断面 (以後、剥離面と呼ぶ) を用いた。比較のため、剥離面のレイタンスを除いた面と、一体ものの供試体の破断後のひび割れ面も用いた。表-6 に示す配合で $10 \times 10 \times 20$ cm のコンクリートを打設し、翌日、打設面に表面処理を行わず 40cm の高さまでコンクリートを打継いだ。また、ひび割れ面に注入した場合との比較を行なうため、 $10 \times 10 \times 40$ cm のコンクリートも作製した。供試体本数は、各シリーズ 3 本とした。脱型後、53 日間恒温室内 (20°C) にて湿布養生を行なった。載荷試験直前に、コンクリートカッターを用いてはり高さの 1/3 の切欠きを設けた。その後 3 等分点曲げ載荷を行ない (以後、初期載荷と呼ぶ) 荷重-CMOD 曲線を計測し、コンクリートを破断させた。破断後に得られた剥離面を、①でできるだけ凹凸がつかないようにワイヤーブラシで表面処理し、レイタンスだけを取り除いたもの、②レイタンスを取り

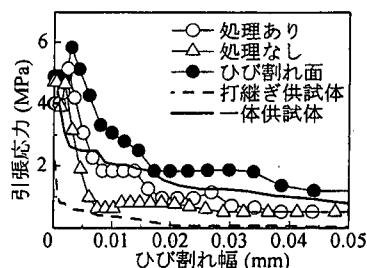


図-17 引張軟化曲線 (第5章)

除かない無処理なもの、③ひび割れ面の 3 種の注入面を用意した。

b) 注入

注入後においても切欠きを設けるため、初期載荷時の切欠き部分にはり高さ 1/3 まで厚さ 4mm のアクリル板 (コンクリートカッターの切りしろ 3mm + 注入幅 1mm) を挿入した。注入幅を 1mm としてシールし、低

圧注入用器具を切欠き部の反対側に取り付けるとともに、空気孔を設けた。供試体を垂直に立てた状態で、注射器を用いてエポキシ樹脂を注入した。図-15 にその概要を示す。注入 2 日後にすべての供試体を脱型し、20℃、湿度 80%の恒温室内にて養生を行なった。

c) 補修供試体の載荷

エポキシ樹脂を注入した供試体（以後、補修供試体と呼ぶ）は 8 日間の養生した後、3 等分点曲げ載荷を行ない荷重-CMOD 曲線を計測した。また、計測した荷重-CMOD 曲線から引張軟化曲線を推定した。

(2) 結果と考察

a) 圧縮強度ならびに弾性係数

比較供試体の載荷時（材齢 65 日）に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体（3 本）を用いて圧縮強度ならびに弾性係数の測定を行なった結果、それぞれ 56.4 MPa, 33.7 GPa であった。

b) 曲げ破壊性状ならびに曲げ付着強度

剥離面に注入したものは注入面の処理の違いによらず注入面および注入材の破壊となり、ひび割れ面に注入したものはコンクリートで破壊した。

表-7 に曲げ試験結果を示す。打継ぎ供試体（初期載荷）の曲げ付着強度が最も小さい結果となった。剥離面を用いた補修供試体の曲げ付着強度に関しては、表面処理を行なわない場合の曲げ付着強度が、表面処理を行なった場合のそれに比べて小さくなり、注入面における脆弱層（レイタンス）が曲げ付着強度を大きく低下させることが明らかとなった。

c) 引張軟化曲線、破壊エネルギー

図-16 に計測した荷重-CMOD 曲線を示す。注入面の脆弱層により、最大荷重以降の荷重低下が急になった。

図-17 に推定した引張軟化曲線を示す。表-7 の破壊エネルギー $G_{f_{0.01}}$ （ひび割れ幅 0.01 mm までの引張軟化曲線下の面積）とこれらの図よりわかるように、脆弱層が有る補修供試体の場合には無い場合に比べ破壊エネルギー $G_{f_{0.01}}$ は 6~7 割程度まで小さくなるものの、打継ぎ供試体の初期載荷時の 3.4 倍の $G_{f_{0.01}}$ を有していた。

本実験で用いた供試体では、母材コンクリート、注入材、脆弱層ならびにそれらの界面が直列に配置されていることから、最大荷重以降の部材全体の挙動から得られる付着特性（引張軟化曲線、破壊エネルギー）は、最も弱い一つの要素（例えば脆弱層）に支配される場合が多い⁹⁾。本実験においても、注入面における脆弱層の有無が、最大荷重以降の挙動に影響を及ぼしているという実験的な結果を得ることができた。ただし、今回の実験では脆弱層が定量的に評価できていないため、今後さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、ひび割れ注入材の付着性状に影響を及ぼすと考えられる要因として、①注入面の性状の違い、②付着試験に用いる供試体寸法の違い、③注入面に付着した脆弱層の有無、の 3 つに着目し、破壊力学パラメータを用いて注入材の曲げ付着特性の評価を行なった。以下に主な結論を示す。

- 1) 引張軟化曲線や破壊エネルギーなどの破壊力学パラメータを用いてひび割れ注入材の曲げ付着特性の評価を行なった結果、注入材の種類の違い、付着面積の相違や脆弱層の有無などに起因した付着特性の違いが、最大荷重以降も含め評価可能であった。
- 2) 平滑面やひび割れ面の違いならびに脆弱層の有無が曲げ付着特性に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。したがって、補修供試体の付着試験においては、対象とする注入面の付着面積や脆弱層の有無を把握して、これらを試験条件に適切に反映させることが望まれる。
- 3) コンクリートのひび割れ面を用いた付着試験において、ひび割れ面作製時に生じる微細ひび割れ（破壊進行領域）が補修供試体の曲げ破壊性状に及ぼす影響については、本実験の範囲内においては認められなかった。
- 4) ひび割れ注入材を用いた補修供試体の曲げ付着強度の寸法効果は、比較供試体（コンクリート）の曲げ強度のそれに比べて大きく、補修供試体内におけるひび割れ性状の違いが影響していることが実験的に明らかとなった。補修供試体の性能を適切に評価するためには、従来から用いられている付着に関する指標のみでは判断できないひび割れ性状の評価が重要であることが確認された。

謝辞：本研究の一部は（財）前田記念工学振興財団の助成を受けており、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) たとえば 岡田清、小柳裕、宮川豊章：コンクリート部材のひび割れと鉄筋腐食に関する研究、土木学会論文報告集、第 281 号、pp.75-87, 1979.
- 2) Kleinschrodt, H. D.: Evaluation of Force-locking Epoxy Resin Injections in Concrete Cracks by Means of Fracture Mechanics Parameters, Fracture of Concrete and Rock Recent Developments, Shah S. P., Swartz S. E. and Barr B., eds., ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp.537-548, 1989.
- 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) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 内田裕市, 六郷恵哲: 引張軟化曲線によるコンクリート打継ぎ部の付着性状の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.461-466, 1996.
- 5) 国枝稔, 栗原哲彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 引張軟化曲線による断面修復材の付着特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.407-412, 1998.
- 6) 日本材料科学会編: 接着と材料, 裳華房, 1996.
- 7) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市, 六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996.
- 8) 国枝稔, 林承燦, 栗原哲彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: コンクリートの破断面の表面積とフラクタル次元, 第53回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.154-155, 1998.
- 9) 岩瀬裕之, 六郷恵哲, 小柳冶: コンクリートの破壊における硬化と軟化, セメント・コンクリート論文集, Vol.47, pp.390-395, 1993.

(2000. 3. 24 受付)

FRACTURE MECHANICS APPROACH TO EVALUATE BOND PROPERTIES OF CRACK INJECTION REPAIR

Minoru KUNIEDA, Takayuki KAWASE, Toshiro KAMADA and Keitetsu ROKUGO

The influence of surface properties and specimen size on the flexural failure of concrete beams repaired by crack injection techniques is evaluated by using tension softening diagrams and fracture energy. Fracture energy is an effective index to evaluate the differences in fracture behavior between rough and smooth repair surfaces. The size effect on the flexural strength of repaired specimens is larger than that of plain concrete. In addition, weak boundary layers adjacent to the repair surface adversely affect the cracking behavior of repaired specimens.