

# 論文 接着樹脂の材質に着目した連続繊維補強 RC はりの付着および耐荷性能の評価

杉山 裕樹<sup>\*1</sup>・森川 英典<sup>\*2</sup>・小林 秀恵<sup>\*3</sup>・中島 潤一郎<sup>\*4</sup>

**要旨:** RC はり部材を連続繊維シートで曲げ補強する際に用いる含浸・接着剤の材質に着目し, その相異が RC はりの耐荷性状および付着性能に与える影響について実験的に検証を行った。その結果, 樹脂の弾性率が小さいものほどはりの曲げ耐力は増加し, 補強性能および付着性能の向上が見られた。そこで, 付着破壊性状に着目して, 付着バネ要素を導入した RC はりの有限要素解析を行い, 耐荷性能評価実験結果との比較により本解析手法の精度の検証を行った。

**キーワード:** エポキシ樹脂, 付着性能, 耐荷性能, 連続繊維シート, RC 部材

## 1. はじめに

近年, 連続繊維シートをコンクリート構造物に接着して補強する工法が注目されている。本研究では, この補強法における含浸・接着樹脂であるエポキシ樹脂および繊維シートの材質に着目し, 樹脂の付着性能および部材としての補強性能についての評価を行うことを目的としている。そこで, RC はり供試体に繊維シートを接着し, 曲げ載荷実験を行い, 実験的に評価を行った。その結果から, 付着破壊性状に着目して, 付着要素のモデル化を行い, その要素を導入した RC はりの有限要素解析を行い, 耐荷力評価実験結果と比較することにより解析結果の精度の検証を行った。

切欠として高さ 75mm, 幅 150mm のアクリル板をあらかじめ埋め込んだ。供試体の名称および要因を表-1 に示す。樹脂は実施工で用いている材質のものを高弾性率とし, 一般的な樹脂を用いる際の規定値<sup>1)</sup>のものを中弾性率, それ以下のものを低弾性率とした。供試体および載荷方法を図-1 に示す。載荷方法はスパンを 1200mm とし, 中央一点載荷とした。また, 繊維シートの性質お

表-1 実験要因

供試体番号	繊維シートの種類	樹脂の圧縮弾性率
C-H-L	炭素繊維	高弾性率
C-M-L	〃	中弾性率
C-L-L	〃	低弾性率
A-H-L	アラミド繊維	高弾性率
A-M-L	〃	中弾性率
A-L-L	〃	低弾性率

## 2. 実験概要

供試体は断面が 150×150mm, 長さを 1400mm の RC はりとし, コンクリートの設計基準強度は 27.4N/mm<sup>2</sup>とした。繊維シートは, 幅 75mm, 長さ 1100mm とし, 樹脂を用いて供試体下面中央部に接着した。また, 初期のひび割れ発生箇所をある程度制御するため, RC はり中央部には, 人工

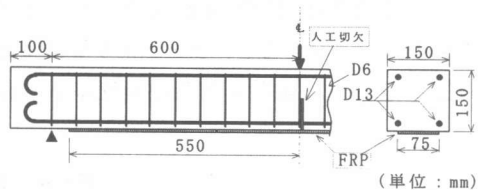


図-1 供試体図および載荷方法

\*1 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻 (正会員)  
 \*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)  
 \*3 神戸大学 工学部建設学科 (正会員)  
 \*4 積水化学工業 (株) 接着剤製造部 接着剤技術課

表-2 連続繊維シートの性質

繊維シートの種類	繊維目付 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
炭素繊維シート	300	0.167	3481	2.30×10 <sup>5</sup>
アラミド繊維シート	415	0.286	2059	1.18×10 <sup>5</sup>

表-3 エポキシ樹脂の物性

樹脂の種類	圧縮弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	引張せん断接着強さ (N/mm <sup>2</sup> )
高弾性率	2.6×10 <sup>3</sup>	44.1	22.8
中弾性率	1.5×10 <sup>3</sup>	31.1	15.1
低弾性率	0.3×10 <sup>3</sup>	8.8	8.8

よび樹脂の物性を表-2, 3 に示す。ここで、表-3 における引張せん断接着強さとは、JISK-6850 に基づいた試験、計算による指標である。測定項目としては、荷重、はり中央のたわみ、鉄筋ひずみ、また付着応力を算出するための繊維シートのひずみである。また、本研究では接着樹脂のはく離性状として繊維シートとコンクリートとの間のせん断によるはく離とピーリング現象<sup>2)</sup>によるはく離とが考えられる。そこで、これらを適切にとらえるため、ひずみゲージの貼り付け位置は、繊維シート端部から1cmのところから16cmのところまでは3cm間隔、40cmのところまでは6cm間隔、58cmのところまでは3cm間隔とした。

### 3. 実験結果および考察

実験結果を表-4 に示す。各供試体のコンクリート圧縮強度は 29.9N/mm<sup>2</sup> であった。補強性能について考察すると、表-4 より炭素繊維およびアラミド繊維とも樹脂の弾性率が小さ

くなるほど、最大荷重が大きく、アラミド繊維を低弾性率の樹脂で含浸・接着させたものは無補強供試体に比べ、28%の耐力増加が見られた。このことから、樹脂の弾性率が小さいものほど耐力面での補強効果が高いといえる。また、荷重が 5~30kN の間の区間剛性比を見ると、各供試体とも無補強供試体に比べ15%程度の増加であり、樹脂の材質の相異による影響は見られない。破壊状況は、炭素繊維に関しては、高弾性率の樹脂を用いたものは炭素繊維がはく離したが、中、低弾性率の樹脂を用いたものは、炭素繊維が破断した。

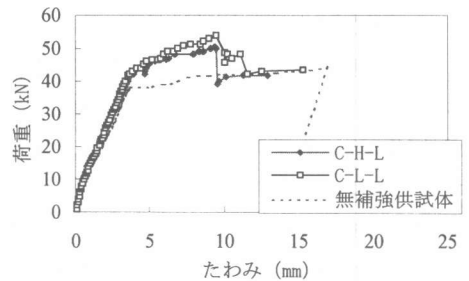


図-2 荷重-たわみ関係 (炭素繊維)

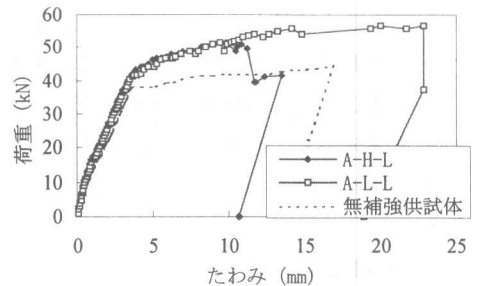


図-3 荷重-たわみ関係 (アラミド繊維)

表-4 実験結果の一覧

供試体番号	補強性能						接着性能		
	引張鉄筋降伏荷重 (kN)	部材降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	無補強供試体に対する耐力比	FRPシートはく離・破断変位 (mm)	区間剛性比 (5~30kN)	最大接着応力 (N/mm <sup>2</sup> )		最大接着力 (kN)
							荷重30kN時	はく離・破断直前	
無補強	27.0	38.3	44.1	1.00	—	1.00	—	—	—
C-H-L	30.4	38.3	50.5	1.14	9.48	1.12	0.98	1.93	16.8
C-M-L	36.3	43.2	51.0	1.16	9.98	1.16	1.99	5.26	26.9
C-L-L	31.9	44.1	53.9	1.22	11.1	1.16	1.22	5.16	28.1
A-H-L	33.3	40.2	51.5	1.17	11.3	1.16	0.90	2.02	20.9
A-M-L	32.4	40.2	52.8	1.20	12.1	1.23	0.84	1.67	21.2
A-L-L	30.4	41.2	56.4	1.28	22.8	1.15	0.96	1.40	32.2

また、アラミド繊維に関しては、どの供試体もアラミド繊維がはく離したが、特に低弾性率の樹脂を用いたものはコンクリートをえぐり取るように破壊した。このことから、樹脂の弾性率が小さいものほど付着性能が向上すると言える。

図-2, 3 に炭素繊維, アラミド繊維の荷重-たわみ関係を示す。補強を施した供試体は、引張鉄筋が降伏した後も繊維シートが引張力を負担し、荷重が増加しており、無補強供試体に比べ、かなりの耐力増加が認められる。しかし、繊維シートがはく離もしくは破断した後は無補強供試体とほぼ同様の値を示している。はく離時および破断時のはり中央部のたわみについては炭素繊維ではそれほど大きな差異は見られないが、アラミド繊維においては、低弾性率の樹脂を用いたものはかなり大きなたわみまで繊維のはく離は生じなかった。このことから、低弾性率の樹脂の方がねばり強くはく離しにくいことがうかがえる。

図-4 に繊維シートのひずみ分布の一例を示す。このひずみ分布におけるひずみ差により各点における付着応力を算出した。付着性能について考察すると、表-4 より荷重が 30kN 時では、供試体 C-M-L, C-L-L における最大付着応力が大きい値となっている。一方、はく離直前での荷重では供試体 C-M-L, C-L-L, A-L-L の最大付着応力が大きくなっている。ここで、最大付着応力とは付着応力分布における最大値のものと定義した。また、図-5~8 に供試体 C-H-L, C-L-L, A-H-L, A-L-L の全

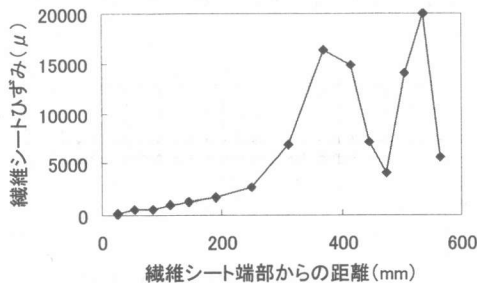


図-4 繊維シートひずみ分布 (A-L-L)

面的なシートはく離または破断直前での付着応力分布を示す。ここで、図中の矢印は卓越したひび割れの位置を示す。これらの図において、卓越した正負の付着応力が発生してい

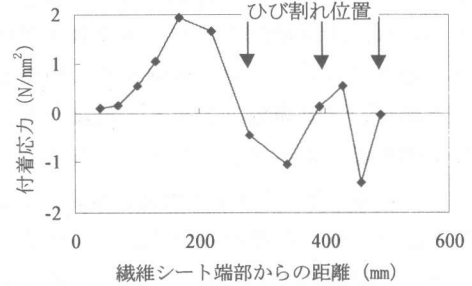


図-5 付着応力分布 (C-H-L)

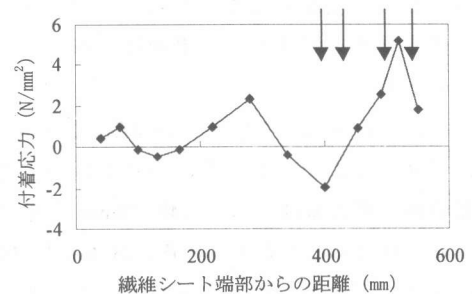


図-6 付着応力分布 (C-L-L)

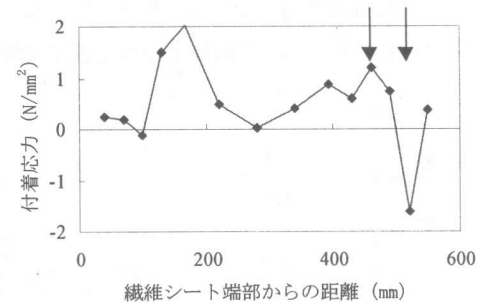


図-7 付着応力分布 (A-H-L)

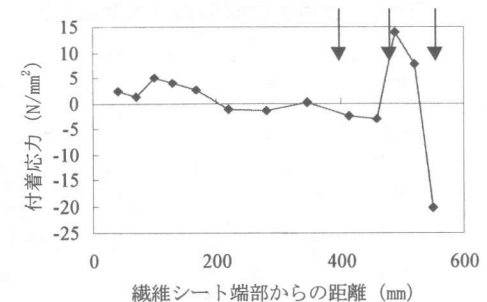


図-8 付着応力分布 (A-L-L)

るのはひび割れの段差による局所的なせん断はく離（ピーリング現象）によるものと考えられる。この影響により前述の最大付着応力が大きな値となったと考えられる。各供試体について比較を行うと高弾性率の樹脂を用いた場合は、炭素繊維とアラミド繊維とでは大きな差異はみられない。低弾性率の樹脂を用いた場合、炭素繊維、アラミド繊維とも高弾性率の樹脂に比べて、より大きな付着応力が生じている。特にアラミド繊維に着目すると、せん断はく離の影響を受けているものかなり大きな付着応力を発生している。前述したように、繊維シートがコンクリートをえぐり取る形ではく離したことから、コンクリートの引張強度を超えるはく離強度を有しているものと考えられる。

次に、各供試体の付着力の挙動を図-9、10に示す。ここで、各荷重における付着応力分布の積分値に繊維シートの幅75mmを乗じたものを付着力と定義する。各供試体とも40kN付近から傾きが急激に大きくなっている。これは、はり部材が降伏することによって繊維シートの負担する引張力が増加したためである。各供試体について比較を行うと炭素繊維、

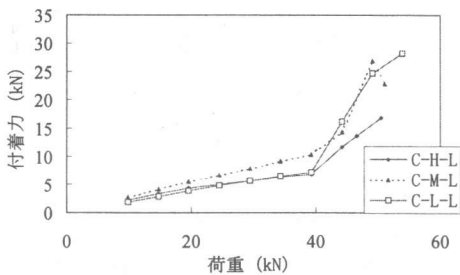


図-9 付着力の挙動図（炭素繊維）

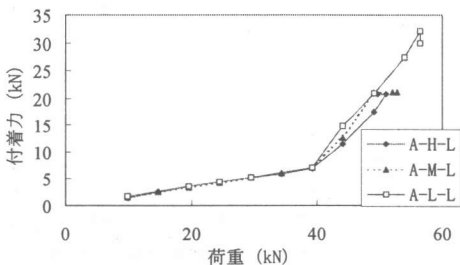


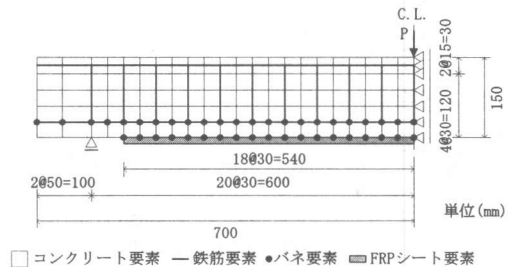
図-10 付着力の挙動図（アラミド繊維）

アラミド繊維とも樹脂の弾性率が小さいほど最大付着力が大きい。また、傾きについてははり部材降伏まではほぼ同様の値を示しているが、はり部材降伏後は炭素繊維、アラミド繊維とも樹脂の弾性率が小さいほど大きくなっていることがわかる。このことから、炭素繊維、アラミド繊維とも低弾性率の樹脂ほど付着性能は高いといえる。

#### 4. 解析の概要

解析は二次元有限要素解析法を用いた。解析対象モデルは前述の実験供試体であり、その解析モデル図を図-11に示す。解析モデルは、対称供試体であったため片側のみをモデル化して、スパン中央断面を軸方向に拘束した。また、解析モデルにおいてはコンクリート要素を平面応力要素、鉄筋要素を線要素とし、コンクリート要素と引張鉄筋要素の接触節点において、付着を考慮したバネ要素を導入している。さらに、はり下面に貼り付けた繊維シート要素を線要素でモデル化しコンクリート要素と繊維シート要素との間の付着を考慮するためバネ要素を導入している。コンクリート要素の引張側については、引張限界ひずみまでは弾性範囲として、引張限界ひずみに達すると、応力-ひずみ関係が直線関係になるように引張軟化モデルを導入した。繊維シート要素については、弾性-破断型でモデル化した。

接着樹脂要素の特性について高弾性率および低弾性率を図-12に示す。接着樹脂要素の特性は、マクロ的にとらえるため著者らが行った



□コンクリート要素 — 鉄筋要素 ●バネ要素 ◻FRPシート要素

図-11 解析モデル図

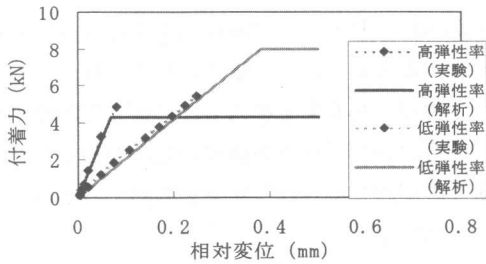


図-12 付着バネ要素の特性

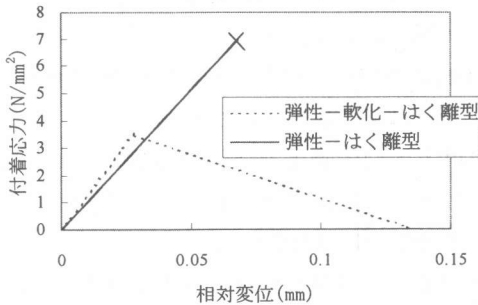


図-13 付着応力-相対変位関係 (高弾性率)

引張付着試験<sup>3)</sup>により算出した付着力と相対変位との関係を基にして、バネ剛性を算出し、付着方向のみ弾塑性型でモデル化した。本解析では要素のはく離が開始すると要素の付着力はそれ以上増加しないと仮定している。したがって、はく離現象については塑性域を設けることで考慮した。塑性域に達する判定については相対変位により行った。塑性域に達する相対変位については、要素のはく離開始点であるため、さらにミクロ的にとらえる必要がある。図-13に示す下村らによるモデル化の手法<sup>4)</sup>を用い引張付着試験結果から算出した付着応力-相対変位関係において、弾性-軟化-はく離型モデルが占める面積と同等の面積になるような弾性-はく離型モデルを考え、そのモデルにおけるはく離相対変位を本解析手法における要素のはく離開始相対変位と仮定した。しかし、低弾性率の樹脂においては、引張付着試験においてははく離にいたらず、繊維シートの破断により破壊したため、さらに大きな付着力、相対変位においてははく離するものと考えられる。したがって、本研究では塑性域に達する相対変位については、

高弾性率樹脂を参考とし少なくとも最大付着応力発生時における相対変位の2倍以上の相対変位においてははく離が生じているため、はく離開始時相対変位を最大付着応力発生時の相対変位の2倍と仮定した。計算は全面塑性域に達した時点もしくは繊維シートのひずみが破断ひずみに達した時点で終了した。

### 5. 解析結果および考察

前述の実験供試体における材料試験データを用い、炭素繊維シートを高弾性率および低弾性率の樹脂で含浸・接着させた場合の解析を行った。荷重-たわみ関係について図-14、15に示す。両者とも樹脂のはく離現象を塑性現象としてモデル化したことにより、ある程度実験結果を追従していることがわかる。しかし、両者とも最大荷重においては実験値より解析値の方が大きい結果となった。これは、はく離時における付着応力の解放を行っていないためであり、また、鉛直方向のはく離現象を考慮していないためであると考えられる。各供試体について考察を行うと、供試体 C-H-

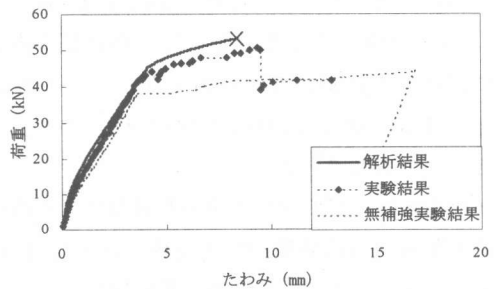


図-14 荷重-たわみ関係 (高弾性率)

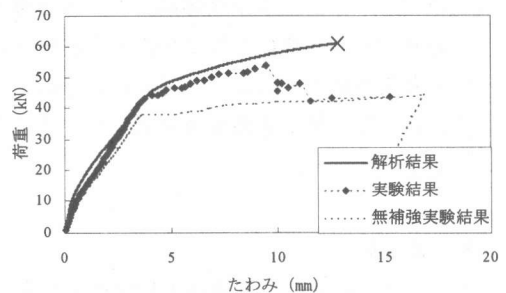


図-15 荷重-たわみ関係 (低弾性率)

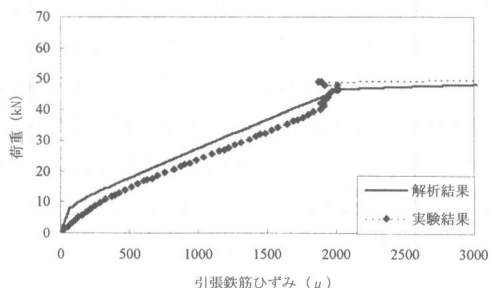


図-16 荷重-引張鉄筋ひずみ関係

L での最終的な破壊形態は、実験結果ではシートはく離により破壊し、解析結果では、全面塑性域に達し計算が終了したため、本解析手法においては、ほぼ同様の破壊形式であったと考えられる。また、供試体 C-L-L での破壊形態は、実験結果、解析結果ともシート破断であった。しかし、解析結果の方が破断時のより中央部のたわみが大きい値となった。これは、実験においては水平方向のいわゆる単純引張力のみならず、ひび割れ部における面外せん断の影響により、単純引張による引張強度より小さい引張力で破断することが考えられるためである。また、供試体 C-H-L と C-L-L を比較すると実験結果と同様に解析結果においても樹脂の弾性率が小さいものの方が最大荷重、最大たわみにおいて大きい値となることが表現できた。

次に高弾性率の樹脂を用いた場合のより中央部の荷重-引張鉄筋ひずみ関係を図-16 に示す。これによると、初期の荷重段階において実験値と解析値とでは差が生じているが、これは実験においては、より中央部に人口切欠を導入しており、その影響によりこのような結果になったと考えられる。しかし、その後の挙動についてはほぼ解析値が実験値を追随していることがわかる。

## 6. まとめ

RC 部材に繊維シート補強を施す際用いる含浸・接着剤である樹脂の材質に着目し、その相

異が RC はりの曲げ耐荷性状および付着性能に与える影響について実験的に検討を行った。また、付着バネ要素を導入した二次元有限要素解析法を用いて、解析の精度の検証を行った。本研究の範囲で得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- (1)耐力は、炭素繊維とアラミド繊維とではほぼ同程度であるが、両者とも樹脂の弾性率が低いほど大きい。
- (2)樹脂の材質の相異による区間曲げ剛性への影響はほとんど見られない。
- (3)すべてはく離したアラミド繊維では、FRP シートはく離時のたわみは、樹脂の弾性率が小さいほど大きい。
- (4)付着力は部材降伏後に大きく増加し、樹脂の弾性率が低いほどその増加量は大きい。また、最大付着力も樹脂の弾性率が小さいほど大きい。
- (5)荷重-たわみ関係においてはある程度解析結果が実験結果を追随することができた。
- (6)解析結果においても樹脂の弾性率が小さい方が最大荷重、最大たわみは大きい値となることが表現できた。

## 参考文献

- 1)阪神高速道路公団：土木補修工事共通仕様書
- 2)岳尾弘洋，松下博通，佐川康貴，牛込敏幸：せん断スパン比を変化させた CFRP 補強梁の曲げ載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.205-210，1999.6.
- 3)森川英典，小林秀恵，杉山裕樹，中島潤一郎：コンクリート部材の FRP シート接着補強におけるエポキシ樹脂接着性能の実験的評価，建設工学研究所論文報告集，第 41-A 号，pp.121-140，1999.11.
- 4)上原子昌久，下村匠，丸山久一，西田浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集 No.634/V-45，pp.197-208，1999.11.