

論文 連続繊維シートで補強した RC 部材の軸引張試験と FEM 解析

中井 裕司*1・大久保 誠*1・長谷川 泰聡*2・田中 良樹*3

要旨: 連続繊維シート接着工法を用いた鉄筋コンクリート床版の限界状態設計法に基づく補強設計法の構築に向けて、繊維、樹脂の物性を考慮した繊維シートとコンクリートの付着特性の評価法を検討している。その検討への FEM 解析の適用の可能性を把握するため、同工法で補強した RC 部材の軸引張試験と繊維、樹脂の物性を考慮した FEM 解析を行った。その結果、試験で得られた、繊維シートの付着低下の傾向、繊維シートのはく離挙動、界面はく離破壊エネルギーなど、繊維シートの付着に関する特徴が同解析でも概ね認められた。このことから、同 FEM 解析で実際に近い、繊維シートの付着挙動、はく離挙動を表現できる可能性があることが分かった。

キーワード: 連続繊維シート, RC 部材, 補強, 軸引張試験, 付着, はく離, FEM, 構成則

1. はじめに

コンクリート構造物の補修・補強において、軽さや施工性で有利な連続繊維シート（以下：繊維シート）は既に多く利用され、主要な補修・補強工法の一つになっている。しかし、鉄筋コンクリート（RC）床版に適用する同工法は、複数の設計方法が用いられているため、概ね同じ条件の床版であっても使用する繊維や樹脂の種類、及び、補強量に大きな相違が生じる場合がある。繊維シートで補強した RC 部材の軸引張試験をはじめ、これまで同補強工法に関する多くの研究が行われ、繊維シートとコンクリートの付着の評価法、設計法も既に提案されている^{例え 1)}。しかし、その付着に関する繊維や樹脂の物性あるいはそれらの組合せの下での物性の評価法はまだ必ずしも明確にされていない。これらの点を踏まえて、著者らは床版補強の限界状態設計法確立に向けて、繊維や樹脂の物性の影響を含めた、コンクリートと繊維シートの付着特性とその評価法について検討している。検討の一手法として、付着特性に繊維や樹脂の物性を考慮した FEM 解析を用いることを思案している。その前段の検討として、既存の解析プログラムで繊維、樹脂の物性を考慮することの妥当性を探るため、検証データを得るための繊維シートで補強した RC 部材の軸引張試験と 2 次元 FEM 解析を行った。繊維シートで補強した RC 部材の軸引張試験は既往の事例を参考にするとともに、FEM 解析では、付着にある程度影響しそうな含浸樹脂のせん断弾性係数を考慮できるモデルと、コンクリートの分布回転ひび割れモデルを用いた。

2. 実験概要

2.1 実験の水準

繊維シートで補強された RC 部材の軸引張試験は、無

補強の RC 供試体を基準として、アラミド、もしくは、高強度炭素繊維シートで補強した RC 部材の 3 水準とした。供試体の略称は、RC, Aramid, Carbon である。

2.2 使用材料

(1) 繊維シートと含浸樹脂

繊維シートは、アラミド 1 繊維シート 120tf/m 級と高強度炭素繊維シート目付 600g/m² を用いた。繊維シートの諸物性を表-1 に示す。繊維シートの含浸接着に用いる樹脂は、それぞれのシートに適したエポキシ樹脂を用いた。樹脂の諸物性を表-2 に示す。

表-1 連続繊維シートの材料試験結果

繊維の種類	アラミド1繊維	高強度炭素繊維
厚さ (mm)	0.572	0.333
幅 (mm)	74.8	75.0
破断強度 (N/mm ²)	2510	4170
破断歪	0.018	0.016
ヤング係数 (kN/mm ²)	109	236

表-2 樹脂の材料試験結果

樹脂の種類	アラミド用	炭素用
せん断強度 (N/mm ²)	15.8	33.0
せん断弾性係数 (N/mm ²)	945	1100
樹脂層の厚さ (mm)	1.77	1.38

(2) 鉄筋

鉄筋は、D19 の鉄筋を半割りにし、半割りに溝を切削して、ひずみゲージを設置した。ひずみゲージ設置後に、付着特性が変わらないように切断面を接着接合し、試験用の鉄筋とした。半割り鉄筋の諸物性を表-3 に示す。半割りにすることにより鉄筋の断面積は減じたが、他の特性には大きな変化はなかった。

(3) コンクリート

コンクリートは、早強コンクリートを用いた。材齢 2

*1 (一社) 繊維補修補強協会 (正会員)

*2 (一社) 繊維補修補強協会

*3 (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (正会員)

週で繊維シートを接着し、材齢6週で載荷試験を行った。試験時のコンクリートの諸物性を表-4に示す。

呼び径	D19
断面積 (mm ²)	271.5
降伏強度 (N/mm ²)	383
降伏歪	0.00199
ヤング係数 (kN/mm ²)	192
引張強度 (N/mm ²)	568

圧縮強度 (N/mm ²)	24.2
ヤング係数 (kN/mm ²)	20.1
引張強度 (N/mm ²)	2.44
引張強度歪	0.00012
粗骨材の最大寸法 (mm)	20

2.3 供試体

供試体は既往の事例²⁾を参考にし、図-1に示すように、RC部分は断面を150×150mmとし、試験区間を900mmと想定して、全長1800mmとした。供試体の中央に完全なスリットとして1mm厚さのプラスチック板を設置した。繊維シートは軸方向に幅75mmで上下面中央に全長に渡って接着した。試験体の両端450mm区間は、繊維シートの定着、及び、鉄筋の接続区間とした。繊維シートの定着には、アラミド1繊維シートを周方向に巻立てた。鉄筋の接続は、D19半割り鉄筋とD25鉄筋をグラウト充填型スリーブで接合した。

計測項目を図-2に示す。鉄筋には中央640mmの区間に20mm間隔で33枚のひずみゲージを配した。繊維シートには、上下各面の中央640mm区間に20mm間隔で33枚のひずみゲージを配した。コンクリート部材表面の

両側面に中央のスリットを挟んで750mm区間にゲージ長150mmのパイゲージを6ヶの固定治具を共用して5台設置した。

計測方法は、100Hzの動歪として全てのデータをサンプリングした。

2.4 載荷方法

供試体は、2000kN万能試験機に垂直方向に設置した。載荷は、降伏確認後まで段階載荷でピッチを約10kNとし、各段階で5kNまで除荷し再載荷した。降伏後は破壊に至るまで連続的に載荷を行った。

3. FEM解析

3.1 供試体のモデル化

解析は、図-3に示すように2次元問題に置き換え、試験区間である900mmを取出してモデル化した。境界条件は、部材中心全接点で部材直角方向へ、部材両端の全接点を軸方向への並進を固定し、部材片端の全接点に等価な軸方向変位を荷重として与えた。

コンクリートは、要素寸法12.5mmとし、回転ひび割れモデルを用いた。コンクリートの引張軟化モデルを図-4に示す³⁾。鉄筋はトラス要素とし、降伏後にEs/100の歪硬化モデルを用いた。繊維シートは梁要素とし、繊維シートの断面積と断面2次モーメントは表-1の繊維シートの厚さと幅を用いて矩形断面として算出した。

3.2 インターフェース要素

鉄筋とコンクリートの付着モデルは、島モデルなどの適用できる構成則を比較し、鉄筋のかぶり厚が65mmであること、ひび割れ間隔が試験結果に近くなることを考慮して図-5に示すようなDorrのモデル³⁾を用いた。

繊維シートとコンクリートのインターフェース要素は、

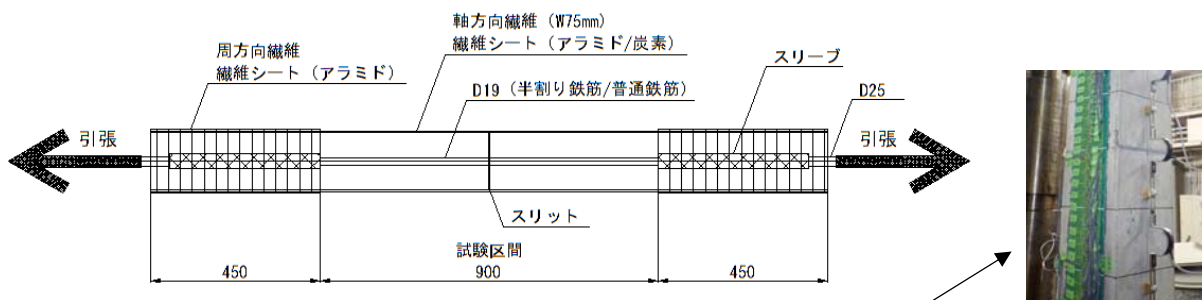


図-1 供試体の形状と寸法 (mm)



パイ型変位計の設置状況

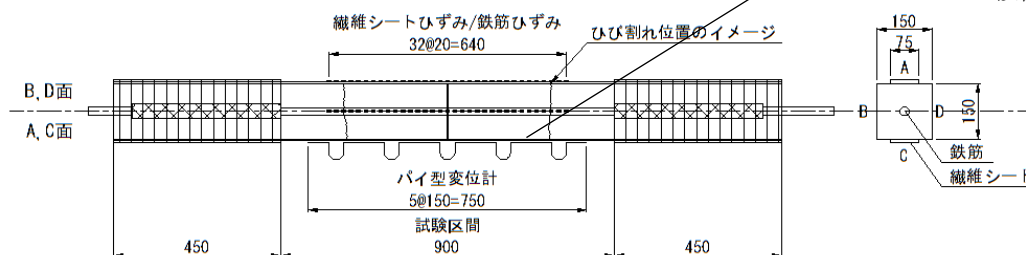


図-2 計測機器の配置図 (mm)

図-6 に示すせん断方向のバネでモデル化した。せん断バネ剛性は表-2 に示した材料試験で得られたせん断弾性係数を樹脂層の厚さで除して求めた。なお、樹脂のせん断強度は、張らの研究成果⁴⁾を用いた。

スリットは、引張およびせん断方向に十分柔らかい剛性を設定した。

4. 実験結果と FEM 解析結果と考察

4.1 軸引張試験の平均応力と平均歪の関係

平均応力と平均歪の関係を図-7 に示す。平均応力は軸力をコンクリート部材の断面積 (150×150mm) で除した値で、平均歪は供試体中央 750mm の区間の平均歪で、全 10 台のパイゲージで得られた歪の平均値である。中央のスリット部の歪も含んでいるので、ひび割れ発生時の平均歪はコンクリートの引張歪より大きくなっている。FEM で求めた応力-歪の関係(FEM)も示す。

ひび割れはほぼ計算された応力でスリットの片側に発生し、その後、スリットの反対側に第 2 ひび割れが生じた (図-2 参照)。アラミド、炭素、RC 供試体それぞれスリットからひび割れまでの平均距離は 270, 285, 310mm であった。ひび割れ間隔は、RC の場合、かぶりの 5.4 倍⁵⁾とされるが、この試験でのシート補強された供試体は 4.1~4.4 倍と小さい傾向であった。

図-7 に示すように平均応力度 3N/mm² 程度でひび割れ発生後、RC よりも繊維シートを接着した供試体にテ

ンションスティフニングが顕著に表れている。繊維シートは、同一の平均応力に対して鉄筋の負担を減ずるので、鉄筋と共同してコンクリート部材の剛性低下を抑制するようである。

繊維シートの付着の劣化は降伏後顕著に進行した。部材は繊維シートのみで引張剛性で線形に歪硬化してゆくが、平均応力度 10N/mm² で繊維シートはコンクリートから剥離し、繊維シートの定着部が劣化し、計算の破断応力の 88~91% で繊維シートは破断した。

破壊後の観察で、付着破壊は、繊維シートとコンクリートの界面では生じず、コンクリートの表層部分でコンクリートの引張破壊が生じていた。

4.2 部材軸方向の歪分布

図-8 に繊維シートで補強した部材の歪分布を示す。横軸の正の部分に試験値を、負の部分に FEM 解析値を示す。繊維シートの歪は両面の平均値、コンクリートと示されている歪は両面の 150mm 支間のパイゲージの平均値である。FEM と添え字されているのは、それぞれの FEM から得られた解析値である。例示されている荷重ステップは、平均応力度 $\sigma_f = 2.5, 3.1, 5.6 \text{ N/mm}^2$ で、それぞれ、初ひび割れ前、第 2 ひび割れ後、鉄筋降伏時に相当している。横軸の位置はスリットからの距離を表す。

実験では、初ひび割れ前はスリットの近傍に歪が集中している。スリットの位置で鉄筋と繊維シートだけで負担していた引張力が、スリットから離れるのに従って、

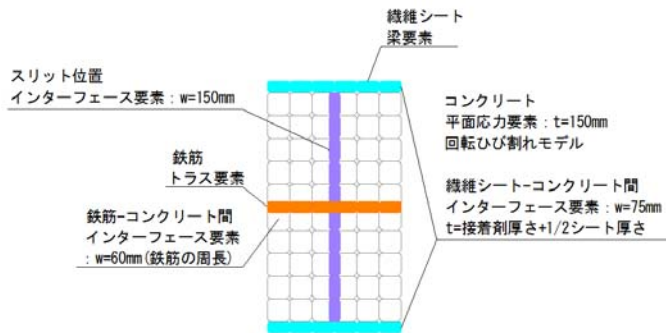


図-3 FEM モデル化の概要図

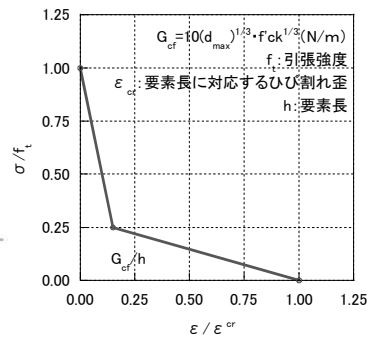


図-4 コンクリートの引張軟化モデル

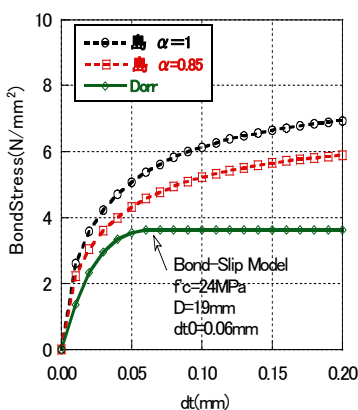


図-5 鉄筋の付着すべりモデル

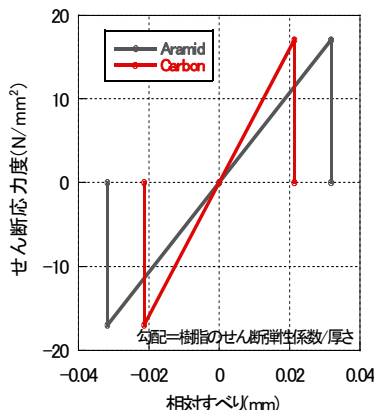


図-6 繊維シートとコンクリート間のせん断バネ

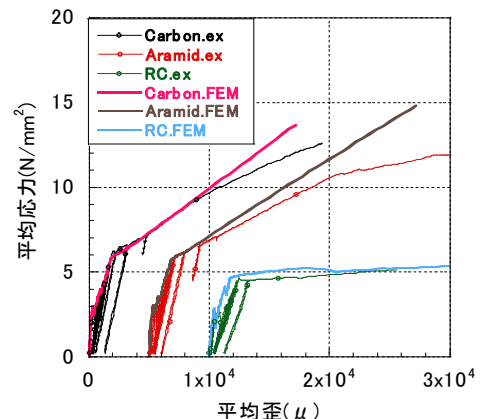


図-7 部材の平均応力平均歪の関係

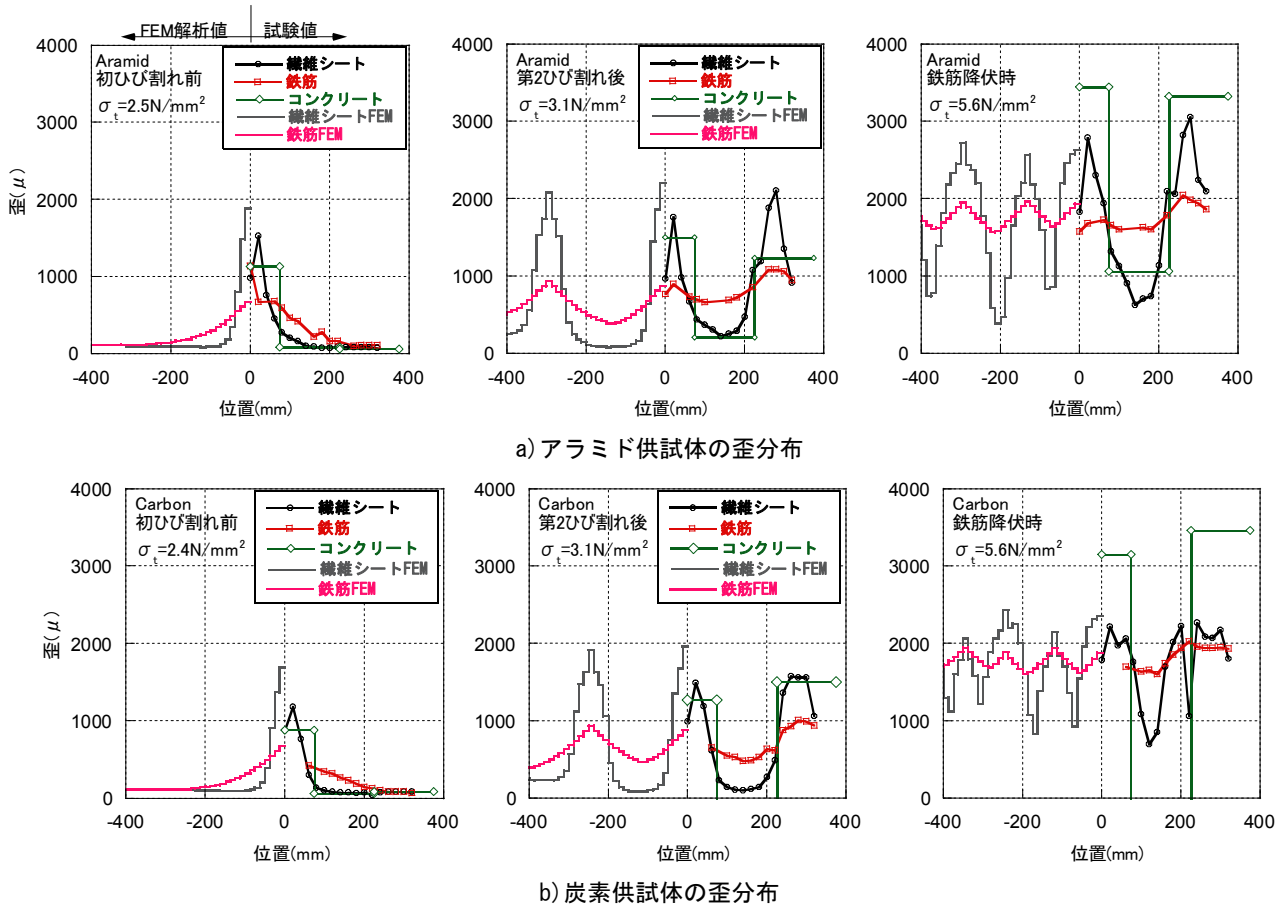


図-8 繊維シート、鉄筋、コンクリート表面の歪分布

それぞれのせん断付着を介してコンクリートにも分担されていったのが分かる。スリットの両側にひび割れが発生すると、繊維シートの歪は、ひび割れ部で鋭いピークを、中間部で鮮明なボトムを有し、付着が健全である。歪のボトムはコンクリートと補強材の相対的なすべりが無い点と考えている。一方、鉄筋は、コンクリート表面の歪がほとんど生じていないのに比較して、大きな歪が生じており、すべりが生じていたことがわかる。鉄筋単体の降伏歪が観測されたすと、さらに鉄筋の付着は劣化する。

試験値と FEM 解析値を比較すると、鉄筋降伏時におけるひび割れ本数は、試験値の方が解析値より少なかった。鉄筋の歪では、試験値は FEM 解析値に比較してボトムで大きめの値を示している。繊維シートの歪勾配では、試験値は解析値よりも緩勾配となっている。これらの理由は、FEM 解析における鉄筋および繊維シートのインターフェースの設定が硬すぎることで、もしくは、解析でひび割れ周辺に生じるコンクリートの損傷を表現しきれていないことが考えられる。

図-9 に、FEM 解析によって得られた Aramid 試験体の繊維シートとコンクリート界面におけるせん断バネに生じている相対すべりを示す。相対すべりの最大値は鉄筋降伏時に生じているが、その最大値は相対すべりの弾

性範囲内である。はく離開始時の相対すべりは小さくなくなっており、付着の劣化はコンクリート表面付近の要素内でひび割れとして進行している。図-10 は、鉄筋降伏時の分布ひび割れ分布図のスリットからの右半分を示している。カラースケールは要素の主歪量を表している。軸引張力によるひび割れと、コンクリートの表層の要素に繊維シートから伝達された引張力によるひび割れが進行

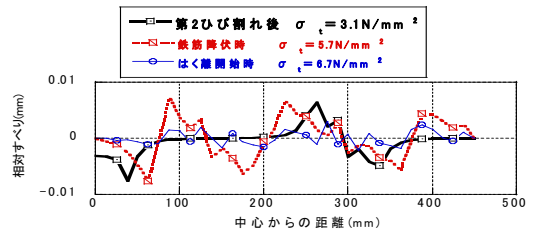


図-9 FEM による繊維シートとコンクリート界面の相対すべり (Aramid の例)

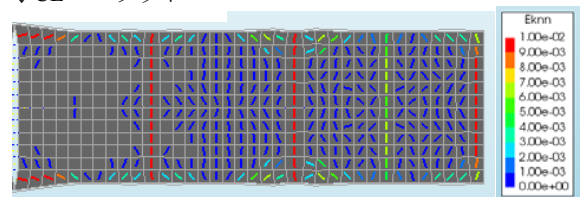


図-10 FEM による鉄筋降伏時のひび割れ分布図 (150×450mm の範囲を示す)

していることが分かる。

4.3 コンクリートの負担する軸応力度

鉄筋および繊維シートの付着の劣化は、コンクリートの負担する引張軸力を算定すれば、その進行度を推測することができる。図-11は、式(1)に示されているコンクリートの引張力の負担率 C_c を縦軸に示している。図より初ひび割れ前は両端の定着部においてコンクリートがほとんどの引張力を負担している。鉄筋が降伏する時点でも最大の $C_c=0.6\sim 0.8$ 前後であり、ひび割れ間のコンクリートは比較的健全であるように思われるが、その後、急速に C_c 最大値は小さくなる。つまり、付着の劣化が著しいと思われる。

$$C_c \cdot A_c \cdot f_c = P - (A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_i^s + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_i^f) \quad (1)$$

ここに

A_c : 断面積 f_c : コンクリートの引張強度 E_s : ヤング率 ε_i^s : 断面での歪
添字: コンクリート(c), 鉄筋(s), 繊維シート(f)

4.4 繊維シートの付着特性

図-12に、スリットの両側にひび割れが生じる前後と鉄筋降伏時における、繊維シートのコンクリートに対する相対すべりとせん断付着応力度の関係を示す。せん断付着応力度 τ_{fc} は式(2)で、相対すべり S_{fc} は式(3)で算定した。測定値は歪変化の大きい面の値を用いた。なお、FEM の場合も実験と同様に各要素のシート歪を用いて

算出した。

$$\tau_{fc} = \frac{(\varepsilon_{i+1}^f - \varepsilon_{i-1}^f) \cdot t_f \cdot E_f}{2 \cdot \Delta L} \quad (2)$$

$$S_{fc} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^f - \varepsilon_0^f) \cdot \Delta L \quad (3)$$

ここに、 t_f : 繊維シートの厚さ、 ΔL : ゲージの設置間隔、 ε_0^f : 不動点と想定する位置の繊維シートの歪

ひび割れ発生前後、ひび割れ点と不動点間の付着が健全で相対すべりとせん断付着応力度の包絡線は三角形のような関係を示している。一方、鉄筋降伏時は付着が劣化し不安定な歪分布になっている。鉄筋が降伏すると繊維シートは付着の劣化を開始するようである。それぞれの応力レベルにおける各相対すべり-せん断付着応力度の関係で、最大の値をそれぞれ最大相対すべり S_{max} 、最大せん断付着応力度 $\tau_{fc,max}$ と定義した。それぞれの引張応力度レベルで、 $\tau_{fc,max}$ は、 3N/mm^2 程度、 S_{max} は、平均

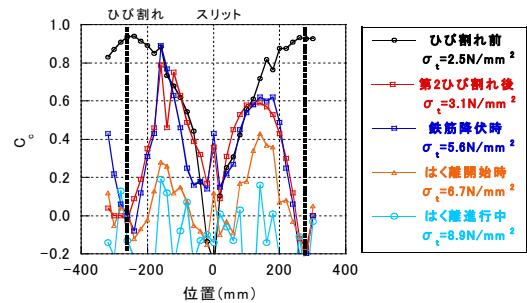


図-11 コンクリートの引張力の負担率 (Aramid の例)

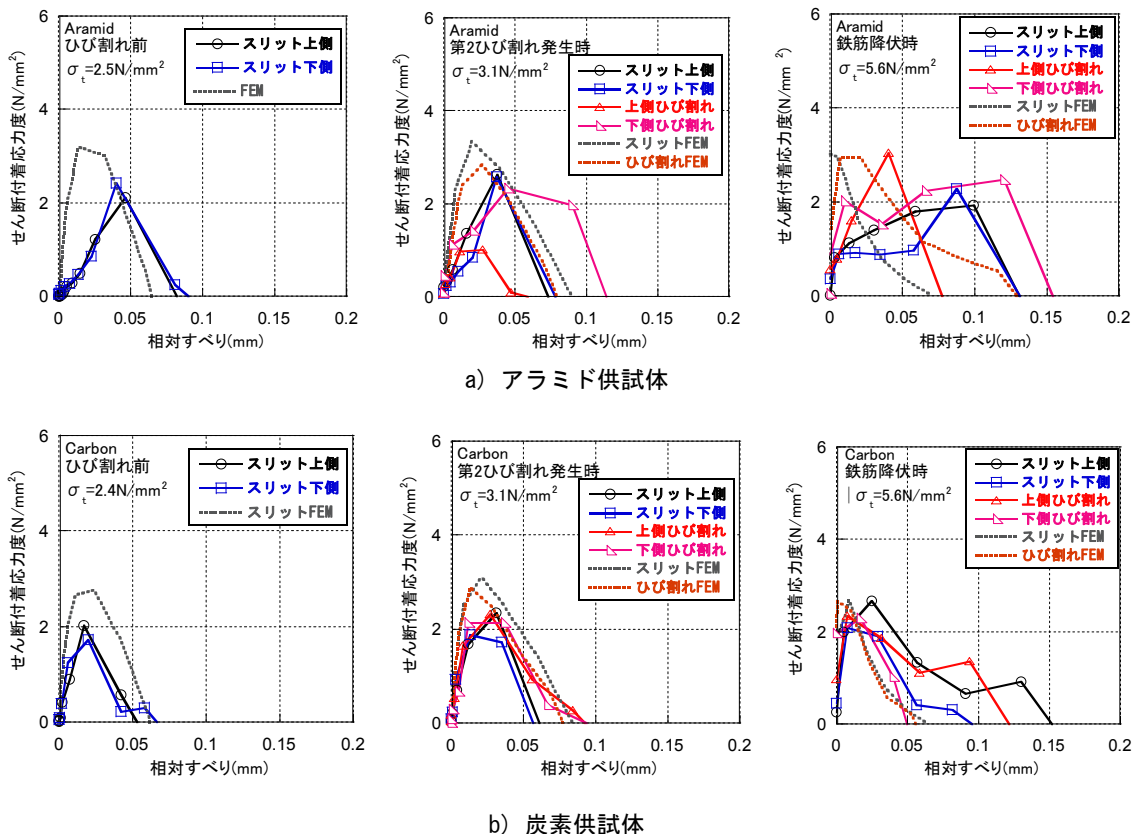


図-12 繊維シートの不動点からの相対すべりとせん断付着応力度の関係

応力度レベルが高くなるにつれて 0.05 から 0.15mm 程度になるようである。

本試験は、JSCE-E 543-2007「連続繊維シートのコンクリートとの付着試験方法(案)」とは、次の3点で異なる。(1)コンクリート部材中の鉄筋が貫通している。(2)試験区間に軸力の増加とともにひび割れが生じる。(3)ひび割れ間隔の約 1/2 が付着長となる。繊維シートの供試体で、付着長は 120~140mm である。本試験で得られた繊維シートのすべり付着関係は、JCI の方法で得られる関係とは異なり、接着領域とはく離領域が限られた一定の範囲となるために、相対すべりの増分に限界が生じる。

4.5 付着エネルギー

付着エネルギー E は、最大相対すべり S_{max} を底辺、最大せん断付着応力度 τ_{fc_max} を高さとした三角形の面積とし、式(4)で評価した。

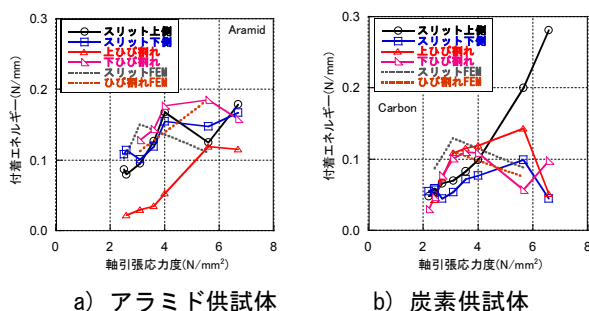
$$E = 0.5 \cdot \tau_{fc_max} \cdot S_{max} \quad (4)$$

図-13 に軸引張応力度と付着エネルギーの関係を示す。軸引張応力度が $\sigma_f = 5.6 \text{ N/mm}^2$ で鉄筋が降伏する。繊維シートのはく離が明確に確認されたのは $\sigma_f = 6.7 \text{ N/mm}^2$ で繊維シートの最大歪は 10,000 μ 前後であった。軸引張応力度の増加に伴い、付着エネルギーは増加する。一方、最大せん断付着応力度は、鉄筋の降伏前後に最大値を計測している。つまり、最大せん断付着応力度が生じると小さな界面はく離など、何らかの微細な変化が界面付近に生じ、相対すべりがさらに増加し、それに伴い、付着エネルギーが大きくなると推測できる。

限られた条件内の軸引張試験から得られた最大の付着エネルギーは 0.1~0.2N/mm 程度であった。一方、終局時の付着エネルギーは界面はく離破壊エネルギー G_f と定義され、複合構造シリーズ 09 の 8.2.5.2 における解説で、「安全側の値として $G_f = 0.5 \text{ N/mm}$ を用いてよい」⁶⁾ としている。これらの値が比較的小さかったのは、有効な付着長がひび割れ間隔の 1/2 程度になったためと考えられる。

5. まとめ

繊維シートで接着補強した RC 部材の軸引張試験を実



a) アラミド供試体 b) 炭素供試体
図-13 軸引張応力度と付着エネルギーの関係

施し、鉄筋、繊維シート、及び、コンクリートが共同して軸力に抵抗する様を観察し、材料試験から得られる特性値を用いた FEM による数値解析で繊維シートの付着特性の再現性を検討した。得られた結論は以下である。

- 1) 試験の結果、RC 部材に接着した繊維シートは、軸引張荷重の下で、鉄筋降伏前まで健全な付着特性を有し、降伏後の鉄筋とコンクリートの相対すべりとともに、繊維シートの付着状態が急速に悪化した。
- 2) 試験において、繊維シートのはく離は、界面の樹脂層で生じるのではなく、接着面近傍のコンクリート内で生じる。この点について、用いた FEM 解析でも同様の挙動が見られた。
- 3) ここでの条件の下で、試験、解析ともに、繊維シートのはく離面に生じる最大のせん断付着応力度は、各軸レベルで 3 N/mm^2 程度であった。また、試験、解析から得られた界面破壊エネルギーに相当する最大の付着エネルギーはいずれも 0.1~0.2N/mm 程度であった。これらの値が比較的小さかったのは、本試験の断面構成では、軸引張下でコンクリートのひび割れが概ね 300mm の間隔で生じ、有効な付着長がひび割れ間隔の 1/2 程度になったためと考えられる。
- 4) 以上の結果より、この FEM 解析で実際に近い、コンクリートと繊維シートの付着挙動、はく離挙動を表現できる可能性があることが分かった。

なお、本研究は、(国研)土木研究所、積水化学工業(株)と(一社)繊維補修補強協会による平成 29~30 年度の「連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究」の一部として実施したものである。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造レポート 12 「FRP によるコンクリート構造の補強設計の現状と課題」、2014.11
- 2) Sato, Y., Shouji, K., Ueda, T. and Kakuta, Y.: Uniaxial tensile behavior of reinforced concrete elements strengthened by carbon fiber sheet, ACI SP-188, pp. 697-710, 1999
- 3) DIANA FEA : DIANA Documentation, Release 10.3, 2019
- 4) 張広銓, 星隈純一, 堺淳一, 運上茂樹: 炭素繊維シートと鋼板を併用した RC 橋脚の耐震補強工法とその効果: 土木学会論文集, Vol.67, No.2, pp.430-445, 2011
- 5) 吉澤弘之, 呉智深: 炭素繊維シート補強による RC 引張部材のひび割れ特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 613, pp.249-262, 1999
- 6) 土木学会：複合構造シリーズ 09 「FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)」, 2018.7