

論文 連続繊維棒材の付着性状に関する実験的研究

波田匡司*¹・児島孝之*²・高木宣章*³・岩本 勲*⁴

要旨：連続繊維棒材の付着性状を把握するため、ACIおよびRILEMのはり型付着試験を実施し、検討を行った。試験材の種類として、組紐状アラミド繊維棒材とより線状炭素繊維棒材を使用した。RILEMのはり型付着試験では、実際のプレテンションPCはりを想定し、プレストレスを導入した状態において検討を行った。2種類の連続繊維棒材に付着応力の伝達機構の相違が確認され、棒材の表面と表面処理が棒材の付着性状に大きく影響しているものと考えられる。また連続繊維棒材の付着性状は、棒材の種類による付着応力の伝達機構ばかりでなく、付着長およびプレストレスの影響を大きく受ける。

キーワード：組紐状アラミド繊維棒材、より線状炭素繊維棒材、付着性状、すべり

1. はじめに

連続繊維棒材をコンクリート部材の補強材として、特にPC緊張材として実構造物に適用する例が増加している。しかし、プレテンションPCはりにおいては、コンクリートの補強材もしくは緊張材として使用するためには、コンクリートとの付着性状が重要な問題となる。連続繊維棒材の付着性状に関する研究は、ほとんどが引抜き試験[1]によるものであり、部材に近い応力状態で行われている例が極めて少ない。特に、プレストレスを導入した状態での付着試験は行われていないのが現状である。

本研究は、ACIおよびRILEMの2種類のはり型付着試験を実施し、試験材の種類、付着長を要因に連続繊維棒材の付着性状について検討を行った。また、RILEMのはり型付着試験の供試体では、プレテンション方式でプレストレスを導入して、プレストレスが付着性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

連続繊維棒材の付着性状に関する実験は2シリーズからなる。実験IではACIのはり型付着試験[2]を実施し、連続繊維棒材の付着性状を従来のPC鋼より線、異形鉄筋と比較検討を行った。実験IIでは、RILEMのはり型付着試験[3]により、実際のプレテンションPCはりを想定し、プレストレスを導入した供試体で連続繊維棒材の付着性状について検討を行った。

2.1 実験I

試験材の種類を表-1に示す。試験材として、 $\phi 11\text{mm}$ の組紐状アラミド繊維棒材、 $\phi 12.5\text{mm}$ のより線状炭素繊維棒材（7本より）、および比較用として、 $\phi 12.4\text{mm}$ のPC鋼より線とD13の異形鉄筋を使用した。試験材の機械的性質を表-2に示す。供試体寸法および載荷方法を図-1に示す。供

*1 (株)熊谷組、工修(正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 立命館大学助教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*4 立命館大学大学院

表-1 試験材の種類 (実験 I)

試験材の種類	供試体の略称	表面形状
組紐状 アラミド 繊維棒材	AF	
より線状 炭素繊維棒材	CF	
PC鋼より線	SW	
異形鉄筋D13	SD	

表-2 試験材の機械的性質 (実験 I)

	アラミド	炭素繊維	PC鋼より線	異形鉄筋
呼び径(mm)	11.0	12.5	12.4	13.0
引張耐力(tf)*	13.1	16.6	17.6	4.4
引張強度(kgf/cm ²)*	14600	21800	15900	3500
弾性係数(kgf/cm ²)	692000	1420000	1980000	2100000

*:PC鋼より線と異形鉄筋は降伏荷重 (強度)

試体寸法は15×25×200cmであり、各供試体の引張棒材位置に切欠部 (長さ15cm) を設けた。試験材の位置は有効高さ20cmとし、切欠部上の荷点から対称2点曲げ荷重試験を実施した。せん断スパンは異形鉄筋についてはD6を5cm間隔で、その他の試験材についてはD10を5cm間隔で補強した。支点外を非付着区間とするため、長さ10cmの塩化ビニール管を使用した。ひずみゲージは、はり片側の付着試験区間 (付着長A) の棒材に10cm間隔で貼付した。自由端側と切欠部側のすべり量は、ダイヤルゲージにより測定した。荷重試験時のコンクリートの圧縮強度は約650kgf/cm²であった。

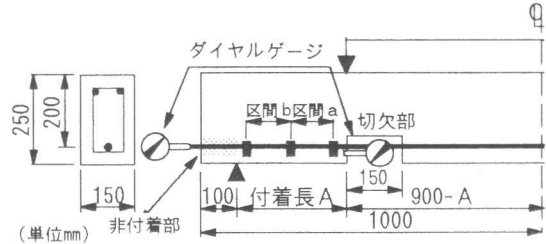


図-1 供試体寸法および荷重方法 (実験 I)

2.2 実験 II

供試体の一覧を表-3に示す。試験材として、φ8mmの組紐状アラミド繊維棒材、φ7.5mmのより線状炭素繊維棒材(7本より)の2種類を使用した。試験材の機械的性質を表-4に示す。付着長は10cm, 20cm, 40cmの3水準とした。付着長10cmの供試体では、初期緊張力を0%、付着長20cm, 40cmの供試体では、初期緊張力を棒材引張強度の50%とした。アラミド繊維棒材については、初期緊張力50%の比較用として、付着長20cm, 40cmについて初期緊張力0%の供試体も作製した。供試体寸法および荷重方法を図-2に示す。試験供試体は、左右の15×24×60cmのはり、中央圧縮部の鋼製ピンと引張部の金具、引張側の試験材から構成されている。プレストレスを導入するため、供試体中央の棒材位置に金具を配置した。荷重は支持スパン111cm、曲げスパン20cmの対称2点曲げ荷重とした。試験材は、供試体下端から8cm (棒材中心までの距離) の位置に配置した。せん断補強としてD10を7.5cm間隔で全長に配置した。また、供試体の非付着区間は、φ23mmのシースで付着をなくした。

表-3 供試体の一覧 (実験 II)

供試体名	試験材	付着長	緊張力
AF10-0	組紐状 アラミド 繊維棒材	10cm	0
AF20-0		20cm	
AF40-0		40cm	
AF20-5		20cm	
AF40-5		40cm	
CF10-0	より線状 炭素 繊維棒材	10cm	0
CF20-5		20cm	
CF40-5		40cm	

Pu: 棒材引張荷重

表-4 試験材の機械的性質

	アラミド	炭素繊維
呼び径(mm)	8.0	7.5
引張耐力(tf)	7.06	7.13
引張強度(kgf/cm ²)	17300	23500
弾性係数(kgf/cm ²)	740000	1420000
断面積(cm ²)	0.409	0.304
周長(cm)	2.26	1.95

(実験 II)

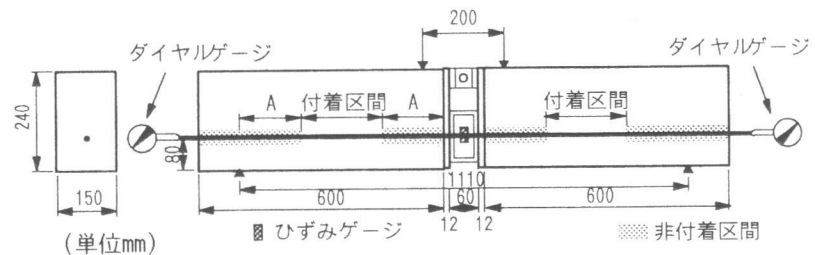


図-2 供試体寸法および荷重方法 (実験 II)

棒材両端部の自由端すべり量を測定するため、供試体両端部にダイヤルゲージを取り付けた。また、棒材の中央のひずみを測定するため、棒材中央にひずみゲージを2枚貼付した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験 I (本節では、付着長29cmの供試体について考察する)

代表的なひびわれ状況の例を図-3に示す。本実験で用いたはりは、載荷点直下の曲げスパンに切欠部を設けてあるため、最初に切欠部の入隅に曲げひびわれが発生し、その後曲げスパン中央付近にひびわれが発生し、最終的にコンクリートの圧壊によりはりが破壊した。組紐状アラミド繊維棒材とP C鋼より線を用いたはりでは、曲げスパン中央付近にひびわれが1本発生したのに対し、より線状炭素繊維棒材および異形鉄筋を用いたはりでは、曲げスパンに3本程度のひびわれが発生し、ひびわれの分散性が良好であった。

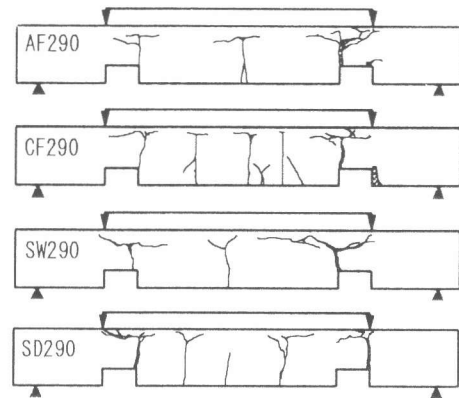


図-3 ひびわれ状況図

組紐状アラミド繊維棒材は異形鉄筋と同様、表面に凹凸があるものの、ひびわれ分散性に大きな相違が観察された。これは、アラミド繊維棒材表面の凹凸が、異形鉄筋のふしに比べて、軸方向に対する角度がかなりゆるやかであるため、異形鉄筋の方がアラミド繊維棒材に比べて、ひびわれ分散性が良好になったものと考えられる。

同じより線である炭素繊維棒材とP C鋼より線においても、ひびわれ分散性に大きな相違が観察された。連続繊維棒材表面に砂などを接着させると、最小ひびわれ間隔が小さくなり、砂の接着による良好なひびわれ分散性が、両引き試験結果により報告されている[4]。炭素繊維棒材各素線の表面の繊維の巻き付けが、砂同様の働きをし、ひびわれ分散性が良好になったものと考えられる。

付着試験区間の棒材の引張ひずみ分布の代表例を図-4に、区間a, b(切欠部に近い方から順にa, bとする)の付着応力度と自由端すべり量の関係の例を図-5に示す。付着応力度は、棒材に貼付したひずみゲージ間の棒材ひずみの

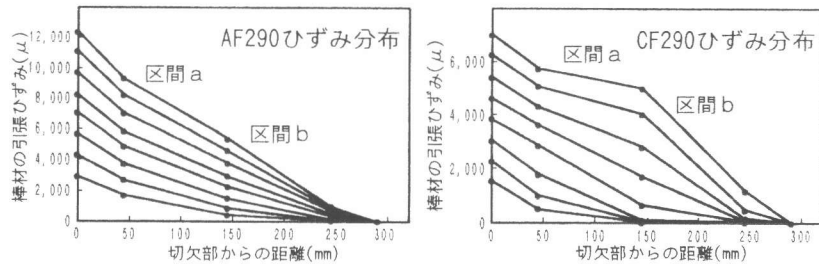


図-4 棒材の引張ひずみ分布

差から計算した。それぞれの付着区間の両端の棒材引張ひずみの差は、その区間の平均付着応力度に対応している。この勾配が大きいと、その区間の平均付着応力度が大きいことを意味する。棒材の種類により、付着性状に大きな差が観察された。

炭素繊維棒材は、切欠部に近い区間aの付着応力度が最大に達すると、次の区間bの付着応力度が急激に増加しはじめる。つまり区間aの棒材がすべり、付着応力を伝達できなくなると、区間bの棒材が付着応力を伝達するようになる。付着長にかかわらず、炭素繊維棒材を用いたいずれの供試体においても、最大付着応力時のすべり量は非常に小さかった。

比較用として用いたP C鋼より線は、切欠部に近い区間aの棒材が最大付着応力度に達してすべりはじめると、隣の区間の棒材も直ちにすべりはじめる。P C鋼より線は、表面がなめらかであるため、すべりに対する抵抗性が非常に小さい。同じより線状である炭素繊維棒材との付着性状の差は、炭素繊維棒材の各素線の表面に繊維の巻き付けが施してあるためと考えられる。

アラミド繊維棒材は、切欠部に近い区間 a の棒材から付着応力が増加しはじめ、すべり量の増加にともない、試験付着区間のすべての棒材の付着応力が等しくなる。つまり、アラミド繊維棒材はすべり量が大きくなると、試験付着区間全体に渡って、付着応力が等しくなる傾向にある。これは、棒材表面の凹凸がすべりに対して有効に抵抗しているものの、ひびわれ分散性を改善するほどの効果はないものと考えられる。

異形鉄筋については、自由端すべり量が非常に小さい段階で、切欠部において鉄筋が降伏したため、今回の実験では、付着応力の伝達機構については把握できなかった。しかし、異形鉄筋のひずみ分布が、アラミド繊維棒材のものと同様の傾向を示していることから、付着応力の伝達機構についても同様の傾向を示すものと考えられる。

モーメントとすべり量の関係の代表例を図-6に示す。図-6に示した自由端と切欠部のすべり量は、棒材にひずみゲージを貼付していない付着試験区間の値を用いた。図-5に示した自由端すべり量は、棒材にひずみゲージを貼付した付着試験区間の値であり、ゲージの貼付がすべり量に大きな影響を及ぼしているため、図-6の自由端すべり量よりかなり大きな値を示している。すべての供試体とも、切欠部にひびわれが発生すると、切欠部のすべり量が急激に増加した。これはヤング係数の小さい棒材を用いた供試体ほど顕著であった。特にアラミド繊維棒材を用いた供試体では、切欠部にひびわれが発生すると、切欠部のすべり量が約0.38mmと他の棒材に比べて、著しく増加している。

ひびわれ発生後は、モーメントの増加にともない一定の割合で、切欠部のすべり量が増加している。またアラミド繊維棒材を用いた供試体では、自由端すべりが発生しているのに対し、炭素繊維棒材を用いた供試体では、自由端すべり量は非常に小さい。これは、付着長が異なる供試体についても同じ傾向であり、付着応力の伝達機構の違いが、大きく影響しているものと考えられる。

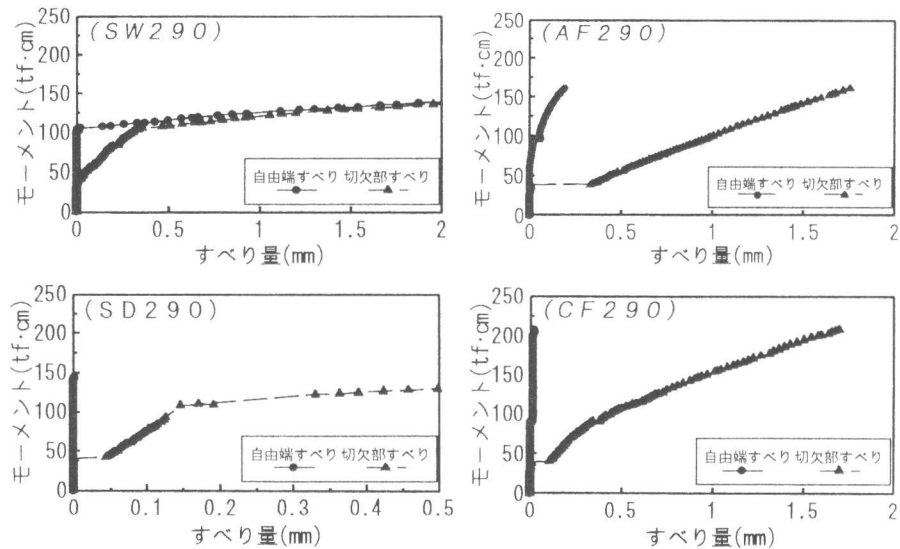


図-6 モーメントとすべりの関係

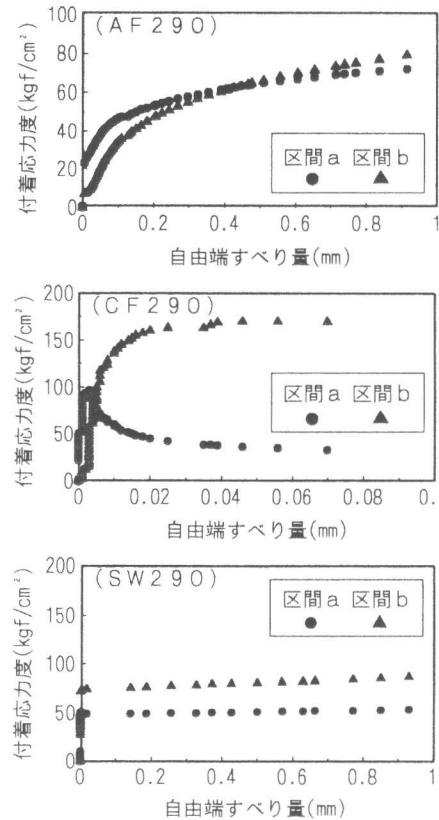


図-5 付着応力と自由端すべり量の関係

3.2 実験II

実験IIの付着試験結果を表-5に示す。最大付着応力度は、供試体中央の棒材に貼付したひずみゲージの引張りひずみから、付着試験区間全体にわたる平均値として計算した。

付着長10cmのプレストレスを導入していない供試体の荷重とすべりの関係を図-7に示す。付着長10

cmの供試体では、アラミド繊維棒材、炭素繊維棒材とも、棒材の抜け出しにより最大耐力に達した。アラミド繊維棒材は、小さい荷重段階から自由端すべりが発生し、荷重の増加にともないすべりが順次増加している。炭素繊維棒材は、荷重が増加しても自由端すべりはほとんど発生せず、ある荷重に達すると急激にすべりが増加する。この傾向は、引抜き試験結果[1]およびACIのはり型付着試験結果の図-6とほぼ同じ結果となった。

アラミド繊維棒材供試体の荷重とすべりの関係への付着長とプレストレス導入の影響を図-8に示す。プレストレスの導入の有無にかかわらず、付着長の増加にともない自由端のすべり出し荷重は増加し、すべり出し後も付着応力を伝達し荷重は増加する。プレストレスを導入していない供試体では、すべり出し後の荷重とすべりの関係はほぼ同様の傾向を示している。プレストレスを導入すると、例えばAF20-5供試体のように、付着長が20cmと同じでプレストレスを導入していないAF20-0供試体と比較すると、プレストレス導入の影響ですべり出し荷重はさらに増加し、またすべり出し後から最大荷重までのすべりも大きく減少し、棒材破断で供試体は破壊した。付着長が40cmと大きく、さらにプレストレスを導入したAF40-5供試体は、自由端すべりが発生せず、棒材破断で破壊した。

炭素繊維棒材の荷重とすべりの関係への付着長とプレストレス導入の影響を図-9に示す。プレストレスの導入により、アラミド繊維棒材と同様に棒材のすべり出し荷重は大きく増加する。しかし、付着長が20cmと比較的小さいCF20-5供試体では、一旦すべり始めると付着応力を伝達することが困難となり、棒材すべり出し荷重から最大荷重までの増加が非常に少なく、棒材抜け出し

表-5 付着試験結果 (実験II)

供試体名	すべり出し荷重(tf)	最大荷重(tf)	最大荷重時の		最大付着応力度(kgf/cm ²)	破壊形式
			すべり量(mm)	すべり量(mm)		
AF10-0	0.06	1.44	3.01	1.77	56.1	棒材抜け出し
AF20-0	0.24	1.69	3.59	1.79	51.6	棒材抜け出し
AF40-0	1.47	2.52	0.76	2.58	45.1	棒材抜け出し
AF20-5	1.78	3.59	1.46	1.10	56.9	棒材破断
AF40-5	—	3.76	—	—	67.5	棒材破断
CF10-0	0.88	1.35	0.04	0.06	82.7	棒材抜け出し
CF20-5	2.34	2.47	0.13	0.06	77.9	棒材抜け出し
CF40-5	—	4.14	—	—	65.4	棒材破断

付着が完全とした場合の終局曲げ耐力：アラミド繊維棒材を用いた場合、4.29tf
炭素繊維棒材を用いた場合、4.39tf

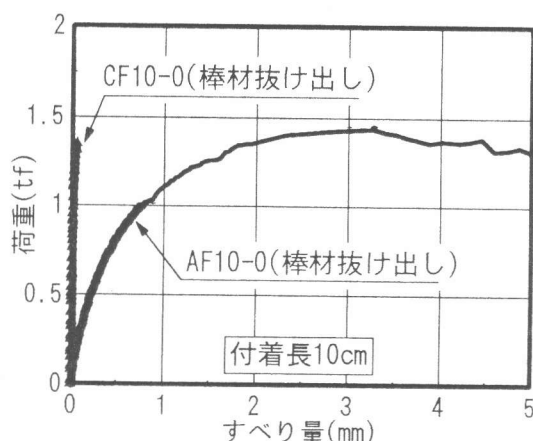


図-7 荷重とすべりの関係

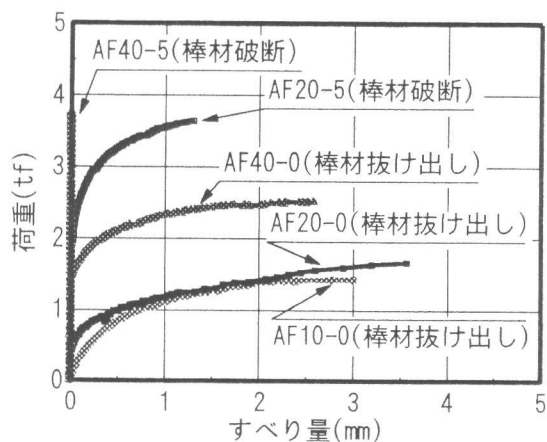


図-8 荷重とすべりの関係

により最大荷重に達し、アラミド繊維棒材とは異なる挙動を示した。これは、実験 I で述べたように、アラミド繊維棒材と炭素繊維棒材の付着応力の伝達機構が異なるためと考えられる。つまり、アラミド繊維棒材は棒材表面の凹凸が棒材のすべりに対して有効に抵抗して、棒材のかなり広範囲な部分で付着応力を伝達するのに対して、炭素繊維棒材は付着応力が最大に達する部分がすべり、順次付着応力を伝達する部分が少なくなるためと考えられる。CF40-5 供試体のように付着長が 40cm と長い場合、プレストレスを導入すると自由端すべりが発生せず、棒材破断で破壊した。連続繊維棒材の付着性状は、棒材の種類による付着応力の伝達機構ばかりでなく、付着長およびプレストレスの影響を大きく受けるものと考えられる。

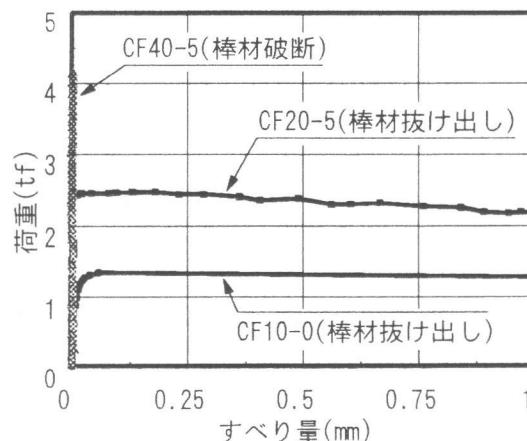


図-9 荷重とすべりの関係

4. 結論

本実験により得られたことは以下のとおりである。

- (1) 組紐状アラミド繊維棒材とより線状炭素繊維棒材では付着応力の伝達機構が異なる。
- (2) より線状炭素繊維棒材は、P C 鋼より線と同等以上の付着性状を有する。
- (3) 連続繊維棒材の付着性状は、棒材の種類による付着機構ばかりでなく、付着長およびプレストレスの影響を大きく受けるものと考えられる。
- (4) RILEM のはり型付着試験法は、プレストレスを導入した状態においても、連続繊維棒材の付着性状を検討することができる有効な手段である。

【謝辞】

本実験の供試体作製にあたり、ピーシー橋梁(株)の竹内正喜氏に多大な御協力を頂きました。また、実験に際しては、立命館大学大学院の井上真也氏、(株)森本組の島田英山氏の御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 児島・高木・崎山・加藤：連続繊維棒材の付着性状について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，V-3-1～2，1994
- [2] ACI Committee 208: Proposed Test Procedure to Determine Relative Bond Value of Reinforcing Bars, J.ACI, pp.89, Aug. 1957
- [3] RILEM-CEB-FIP Committee: Tentative Recommendation, 7-11-28 D, RILEM Journal, Vol.6, No.32, pp.169～pp.174, 1973
- [4] 岡本・遠藤・松原・谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の研究(その3. 付着性状 I 引抜き試験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，1988.10