

# 論文 連続繊維棒材の付着疲労に及ぼすプレストレスの影響

井上真也\*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疲労に及ぼすプレストレスの影響を把握するため、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、実際のプレテンションPCはり进行想定し、プレストレスを導入した状態において検討を行った。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、プレストレスおよび載荷方法（静的、疲労）の影響を大きく受ける。組紐状アラミド繊維棒材は、プレテンション方式でのプレストレスの導入により、付着強度は増加し、付着長によっては破壊形式が変化する。  
**キーワード:** 連続繊維棒材、付着、疲労、RILEMはり型付着試験法、すべり量

## 1. はじめに

連続繊維棒材をコンクリート部材の補強材、特にPC緊張材として実構造物に適用する例が近年増加している。プレテンションPCはりにおいては、連続繊維棒材を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は極めて少ない。特に、プレストレスを導入した状態での付着疲労試験は行われていないのが現状である。プレストレスを導入した状態においても、RILEMのはり型付着試験法は、連続繊維棒材の付着性状を検討できる有効な手段であることを報告した[1]。

本研究では、RILEMのはり型付着試験法を静的載荷試験と疲労試験に適用して、試験材の種類、付着長、プレストレスの導入の有無、載荷方法（静的、疲労）を要因とし連続繊維棒材の付着性状について検討を行った。

## 2. 実験概要

供試体の一覧を表-1に、供試体の表示法を図-1に示す。試験材として、φ7.2mm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本より線）の2種類を使用した。試験材の機

表-1 供試体の一覧

供試体名	試験材	付着長	緊張力
AF10-0B	組紐状 アラミド 繊維棒材	10cm	0
AF15-0A		15cm	
AF20-0B		20cm	
AF40-0B		40cm	
AF15-5A	より線状 炭素 繊維棒材	15cm	0.5Pu
AF20-5(A,B)		20cm	
AF40-5(A,B)		40cm	
CF10-0B	より線状 炭素 繊維棒材	10cm	0
CF15-0A		15cm	
CF20-0A		20cm	
CF40-0A		40cm	
CF15-5A	より線状 炭素 繊維棒材	15cm	0.5Pu
CF20-5(A,B)		20cm	
CF40-5(A,B)		40cm	

Pu: 棒材引張耐力

A,B: 打設日および疲労試験方法が異なる

- \*1 京都府庁、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 近畿コンクリート工業(株)開発部、工博(正会員)



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。

付着疲労試験に先立ち静的付着試験を実施し、すべり出し荷重（自由端すべり量が0.01mm時の荷重）と最大荷重を確認した。載荷は、静的付着試験では変位制御、付着疲労試験では荷重制御で行った。付着疲労試験における上限荷重は、静的付着試験におけるすべり出し荷重に対する比から設定した。付着疲労試験は、2種類の方法で行った。タイプA供試体では、上限荷重を一定とし、200万回繰り返し載荷しても破壊しなかったのは、静的載荷により破壊させた。タイプB供試体では、上限荷重をすべり出し荷重の70%または60%から始め、20万回ごとに10%上げた。下限荷重はいずれも980Nとし、載荷速度は0.5~1.0Hzとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 静的試験結果

静的試験結果を表-5に示す。供試体作製の時期が異なるため、付着長15cmのAF15-0供試体とAF15-5供試体のコンクリート圧縮強度は、他の供試体の約1.5倍であった。そのためこれらの供試体の最大荷重はかなり大きくなった。これらの供試体を除くと、アラミド繊維棒材、炭素繊維棒材とも、初期緊張力0%供試体は、付着長の増加に伴いすべり出し荷重、最大荷重ともに増加した。このことは、初期緊張力50%の供試体についても観察された。

アラミド繊維棒材の代表的な荷重とすべり量の関係への付着長とプレストレス導入の影響を図-3に示す。プレストレスの導入の有無に関わらず、付着長の増加に伴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量の関係は、付着長に関わらずほぼ同様の傾向を示している。付着長20cm供試体にプレストレスを導入すると、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量が大きく減少し、棒材破断で供試体は破壊した。付着長40cmでプレストレスを導入したAF40-5B供試体は、自由端すべりは発生せず棒材破断で破壊した[1]。また、コンクリートの圧縮強度が他の供試体の約1.5倍である付着長15cmの供試体では、プレストレスの導入に関わらず棒材抜け出しにより破壊した。付着長15cm供試体は、プレストレスの導入によりすべり出し荷重は約1.3倍に増加した。しかし、プレストレスを導入しても棒材抜けだして破壊し、すべり出し荷重から最大荷重までの増加は、棒材破断で破壊した付着長20cmの供試体に比較すると小さかった。

炭素繊維棒材の荷重とすべり量の関係への付着長とプレストレスの影響を図-4に示す。プレス

表-5 静的試験結果

供試体名	すべり出し荷重(kN)	最大荷重(kN)	最大荷重時のすべり量	破壊形式
AF15-5A①	21.2	35.1	1.03, —	N
A②	20.4	31.9	1.08, 1.45	N
AF20-5A	23.1	35.6	0.38, 2.97	H
AF20-5B	18.2	36.6	1.46, 1.10	H
AF40-5A	35.8	41.7	0.04, 0.02	H
AF40-5B	—	38.4	—, —	H
AF10-0B	0.61	14.7	3.01, 1.77	N
AF15-0A①	14.2	30.9	0.76, 1.16	N
A②	15.8	29.7	2.41, 1.34	N
AF20-0B	2.45	17.2	3.59, 1.79	N
AF40-0B	15.0	25.7	0.76, 2.58	N
CF20-5A①	14.5	16.6	0.01, 3.81	N
A②	20.4	20.5	0.01, 0.16	N
CF20-5B	23.9	25.2	0.13, 0.06	N
CF40-5A	—	43.8	—, —	H
CF40-5B	—	42.2	—, —	H
CF10-0B	8.98	13.8	0.04, 0.06	N
CF15-0A①	19.1	20.2	0.09, —	N
A②	19.8	21.2	0.01, 0.14	N
CF20-0A①	25.0	27.0	0.08, —	N
A②	30.9	32.1	0.03, 0.19	N
CF40-0A	—	40.6	—, —	H

AF15供試体:コンクリート圧縮強度が他の約1.5倍  
すべり出し荷重:自由端すべり量が0.01mm時の荷重  
最大荷重時のすべり量:自由端すべり量を示す  
H:棒材破断 N:棒材抜け出し

トレスを導入していない炭素繊維棒材では、アラミド繊維棒材同様に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た。しかし、付着長20cm以下の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、棒材抜けだし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、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しているのに対して、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 [1]。アラミド繊維棒材では、プレストレス導入による破壊形式の変化、およびそれによる最大荷重の増加が観察された。しかし、炭素繊維棒材では、プレストレスの導入によるそのような効果は観察されず、荷重とすべり量の関係は、プレストレスの導入に関わらず同じ傾向を示した。

静的付着試験時の最大荷重と付着長の関係を図-5に示す。アラミド繊維棒材では、付着長がある程度長くなると、プレストレスの導入により供試体の破壊形式は棒材抜け出しから棒材破断に変化し、それに伴い最大荷重は増加した。例えば、プレストレスを導入していないAF10-0, AF15-0, AF20-0,

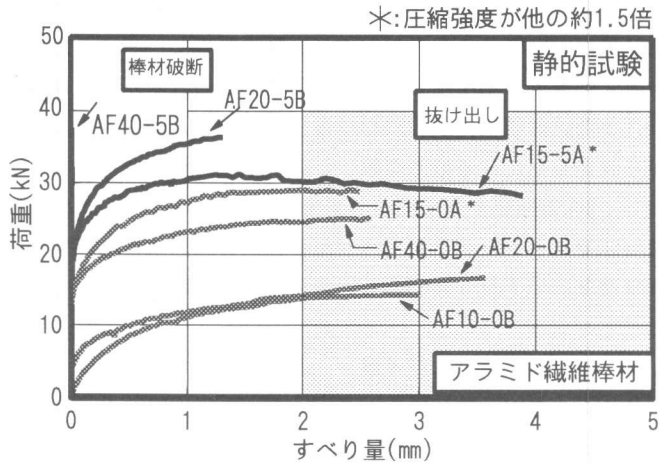


図-3 荷重とすべり量の関係(アラミド繊維棒材)

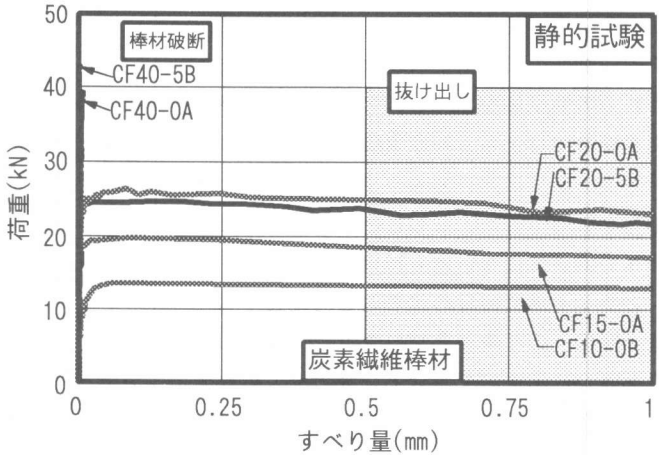


図-4 荷重とすべり量の関係(炭素繊維棒材)

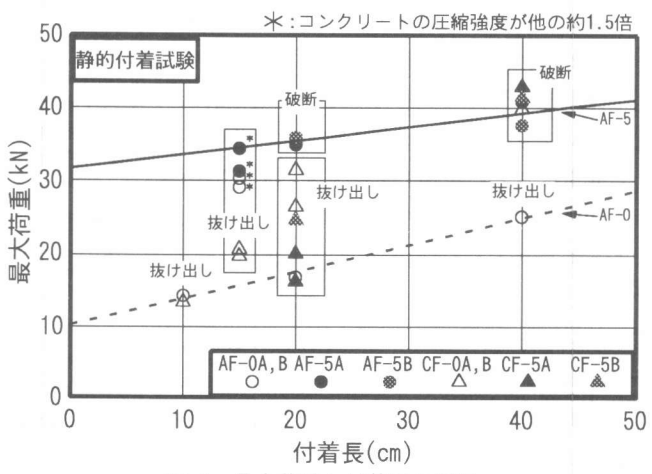


図-5 最大荷重と付着長の関係

AF40-0供試体の破壊形式は棒材抜け出しであり、付着長20cmおよび40cmでプレストレスを導入したAF20-5, AF40-5供試体の破壊形式は棒材破断で、最大荷重は増加している。しかし、炭素繊維棒材では、プレストレスの導入によるこのような効果は観察されなかった。例えば、プレストレスの導入に関わらず、付着長10, 15, 20cm供試体の破壊形式は棒材抜け出しであり、付着長40cm供試体の破壊形式は棒材破断で、幾分の変動はあるものの付着長が同じであれば最大荷重はほぼ同じであった。これは、プレストレス導入時に棒材の表面形状と弾性係数が影響を及ぼしているものと考えられる。つまり、使用した棒材の表面形状はアラミド繊維棒材が組紐状であるのに対して炭素繊維棒材はより線状であること、およびアラミド繊維棒材の弾性係数が炭素繊維棒材より小さいために、プレテンション方式でプレストレスを導入するとき、アラミド繊維棒材が炭素繊維棒材より変形しやすくなる。その結果、棒材の機械的抵抗が大きくなるためと考えられる。

### 3.2 付着疲労試験

付着疲労試験結果を表-6に、静的付着試験結果および付着疲労試験結果の $P/P_u$ を図-6に、上限荷重比と破壊までの繰り返し回数との関係を図-7に示す。 $P_u$ は、付着が十分であると考えられる付着長40cm供試体の静的最大耐力の実験値である。 $P$ は、静的付着試験時には供試体の最大荷重、付着疲労試験時には上限荷重を示す。アラミド繊維棒材および炭素繊維棒材ともに付着長20cm供試体は、静的付着試験、付着疲労試験ともに付着長40cm供試体に比較して、 $P/P_u$ は小さくなった。これは、連続繊維棒材の付着性状に付着長が大きく影響しているためである。アラミド繊維棒材では、付着長40cm供試体の200万回付着疲労強度は65%であり、プレテンションPCはりの200万回曲げ疲労強度(70%) [2] を少し下回る程度で、破壊形式は共に棒材破断であった。一方、炭素繊維棒材では、200万回付着疲労強度は、プレテンションPCはりの200万回曲げ疲労強度(85%) [2] より低下し、70%であった。しかも付着長40cm供試体の静的試験、あるいはプレテンションPCはりの曲げ疲労試験時の破壊形式が棒材破断であるのに対して、付着疲労試験時には棒材の抜け出しであった。プレストレスを導入し、静的付着試験で棒材の破断により破壊するような付着長を有する供試体であっても、200万回付着疲労強度および破壊形式は、棒材の表面形状および付着長の大きな影響を受ける。

本試験で使用した棒材の呼び径は、アラミド繊維棒材が7.2mm、炭素繊維棒材が7.5mmである。棒材径の約55倍の付着長(40cm)は、静的付着試験、付着疲労試験およびPCはりの曲げ疲労試験の破壊形式あるいは200万回疲労強度から判断して、アラミド繊維棒材ではほぼ十分な付着を確保

表-6 付着疲労試験結果

供試体名	$P_u$ (kN)	$P$ (kN)	上限荷重比 $P/P_u$ (%)	繰り返し 回数(回)	破壊 形式
AF40-5A	41.7	25.0	60	200万回	S(H)
		27.1	65	200万回	S(H)
		28.7	70	100万回	F(H)
AF40-5B	38.4	23.1	60	0~20万回	F(H)
		26.8	70	~40万回	
		30.7	80	~45万回	
AF20-5A	41.7	18.5	44.3	100万回	F(N)
		19.6	47.1	5万回	F(N)
AF20-5B	38.4	13.1	34	0~20万回	F(N)
		14.5	38	~40万回	
		16.5	43	~52万回	
AF20-5B	38.4	13.1	34	0~20万回	F(N)
		14.6	38	~40万回	
		16.5	43	~60万回	
CF40-5A	43.8	35.0	80	5万回	F(N)
		32.9	75	1.8万回	F(N)
		30.6	70	200万回	S(H)
CF40-5B	42.2	29.6	70	0~20万回	F(N)
		33.8	80	~40万回	
		38.1	90	~49万回	
CF20-5B	42.2	16.9	40	0~20万回	F(N)
		19.4	46	~20万回	F(N)
CF20-5B	42.2	16.9	40	0~18万回	F(N)

F: 疲労破壊

H: 棒材破断

S: 200万回後の静的破壊

N: 棒材抜け出し

できる長さと考えられるが、炭素繊維棒材では不十分である。付着長が短い20cm供試体では、付着長が付着疲労強度に及ぼす影響が大きく、200万回付着疲労強度は非常に小さくなり、棒材の種類に関わりなく、棒材の抜け出しで破壊した。

#### 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)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、プレストレス、載荷方法(静的、疲労)の影響を大きく受ける。

(2)プレテンション方式によるプレストレスの導入は、棒材の表面形状により付着性状に大きな影響を及ぼす。組紐状アラミド繊維棒材はプレストレスの導入により、すべり出し荷重、最大荷重は増加し、付着長によっては破壊形式が変化する。

(3)連続繊維棒材の200万回付着疲労強度およびその時の破壊形式は、棒材の種類および付着長の影響を大きく受ける。付着性状に及ぼす疲労の影響は大きいものと考えられ、今後、付着長および上限荷重比を要因に検討が必要である。

#### 【参考文献】

[1] 波田・児島・高木・岩本：連続繊維棒材の付着性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18 No.2，pp.515～520，1996

[2] 水田・児島・高木・松尾：連続繊維棒材を緊張材としたPCはりの水中疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17 No.2，pp.983～988，1995

【謝辞】本実験の供試体を作製するにあたり、ピーシー橋梁（株）の竹内正喜氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

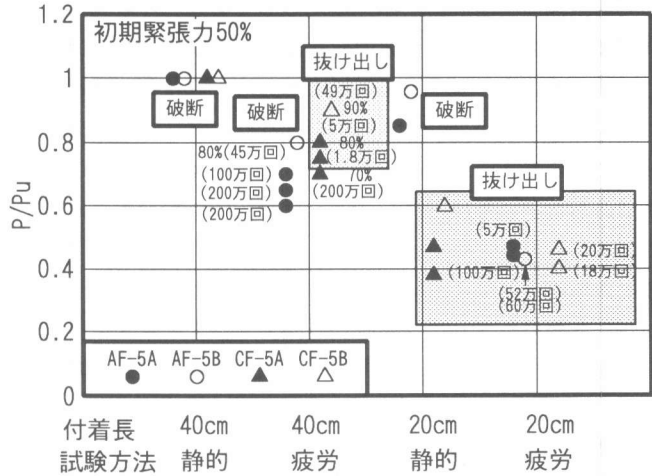


図-6 静的試験および疲労試験のP/Pu

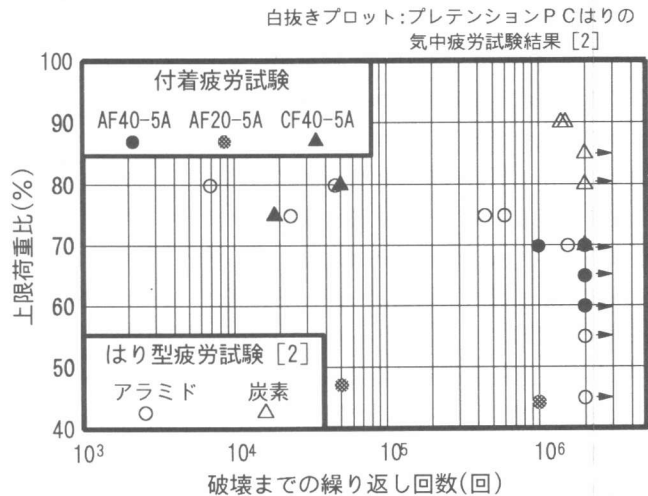


図-7 上限荷重比と破壊までの繰返し回数の関係(気中)