

V-34

炭素繊維シートの付着に関する疲労性状について

北海道大学大学院 ○学生員 森脇 渉
 北海道大学大学院 正 員 佐藤 靖彦
 北海道大学大学院 正 員 上田 多門
 北海道大学大学院 フェロー 角田 與史雄

1.はじめに

現在、既設鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が問題とされ、様々な側面から補修及び補強の必要性が高まっている。このような状況において、軽量、高強度、耐食性に優れ、非磁性といった特性を有する炭素繊維シート（以下「CFS」）は、コンクリート構造物の補強材料として期待される材料である。CFSは樹脂を塗布、含浸させコンクリート表面に貼り付けられる。これが構造物に加わる外力を分担することにより、補強効果を発揮する。このように補強された構造物はCFSの剥離によって破壊に至ることが多く、それ故、その付着に関して様々な研究がなされてきた。しかし、付着疲労に対する検討は極めて不足している。

そこで本研究は、コンクリートにCFSを貼り付けた供試体を用意し、疲労荷重下においてCFSがどのように剥離するのか、その付着性状を明らかにすることを目的とし、実験的検討を行った。

2.実験概要

2.1 CFSの貼り付け方法

本研究におけるCFSの接着は、コンクリート表面をディスクサンダーで処理する方法を採った。なお接着面は、骨材が現れるまで研磨した。

コンクリート打設後1週間湿布養生を施し、約3日間気中で乾燥させた後、表面を研磨し、プライマーを塗布、硬化後、接着樹脂によりCFSを貼り付けている。CFS接着後は1週間の気中における養生期間を与え、実験を行っている。

2.2 使用材料

使用したCFSは高強度カーボン（FORCA トウシート FTS-CI-20）である。その力学的特性をTable 1に示す。実験に使用したコンクリートは設計基準強度40MPa、単位水量160kg/m³、粗骨材最大寸法25mm、水セメント比を40.6%とし、セメントには早強ポルトランドセメントを用いている。

Table 1 Mechanical Properties of CFS

Thickness of CFS (mm)	0.11
Tensile strength (MPa)	3479
Young's modulus (GPa)	230
Fiber density (g/m ²)	200
Ultimate strain (%)	1.5

A study on bond fatigue behavior of Carbon Fiber Sheet

By Wataru MORIWAKI, Yasuhiko SATO, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

2.3 実験供試体

Fig.1 に用いた実験供試体を示す。本実験では CFS の付着長が 200mm のものを Type A、300mm のものを Type B とし 2 種類の供試体を用いた。両者は CFS 付着長のみが異なり、本質的な相違は無い。Type A では、横 350mm×奥行き 200mm×高さ 250mm (Type B は高さのみ 350mm) のコンクリートブロックの一面に幅 100mm の CFS を貼り付け、CFS 荷重端側を鋼板で挟み、それを引張ることによって CFS に付着力を作用させるものである。

また、脱型後、コンクリート端部が欠けていたり、CFS と必ずしも直角でなかったりするため、CFS の付着領域上縁にテープを貼り、その部分においては CFS とコンクリートとの間の付着を断っている。

ひずみの測定には、検長 5mm のワイヤーストレインゲージを CFS 繊維方向に 10mm 間隔で貼付しており、各地点のひずみは、隣接する 2 点を加えた、合計 3 点の平均値により表すことにした。すなわち、ある地点のひずみとは、ゲージ貼付位置近傍の 30mm の区間での平均ひずみによって表現していることを意味している。

なお、本実験は、静的引張試験では CFS の積層数を実験変数とし、疲労試験では CFS の積層数及び上限荷重比; P_s (作用最大引張力と終局荷重との比)、を実験変数として、それぞれ 10 体ずつ実験を行っている。

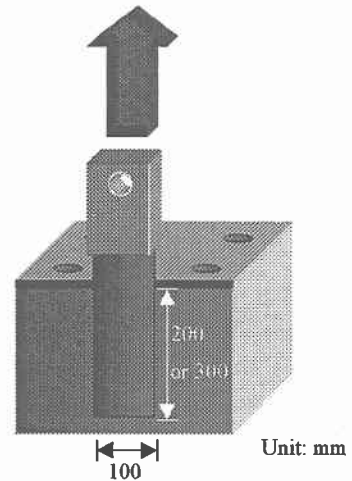


Fig.1 Specimen

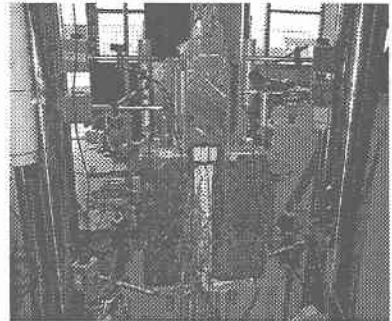


Photo.1 Test setup

2.4 試験方法

本実験では供試体 CFS 部分をアクチュエータ直下にくるように設置し、コンクリートブロックの四隅に設けた穴によりねじ付き鋼棒を用いて、土台となる H 鋼と固定する。ヒンジを介してアクチュエータヘッド部分と鋼板により定着部分を設けた上部 CFS を取り付け直接 CFS に引張力を加え、コンクリートと CFS との間で剥離を発生させることをねらいとしている。実験概要を Photo.1 に示す。なお、本実験の測定項目は、1) CFS のひずみ 2) 作用引張荷重 3) 疲労寿命 である。CFS のひずみについては、その表面に貼付したひずみゲージにより、作用引張荷重及び疲労寿命については、アクチュエータ内臓のロードセル、及びカウンターにより測定している。また、疲労試験において載荷速度は 5Hz、作用引張力の上限荷重比は 50%~70%の範囲で与え、下限荷重比は 10%で一定とした。

3.実験結果及び考察

3.1 静的引張試験

疲労試験に先行して行われた、静的引張試験の結果を Table 2 に示す。表中の破壊モード A は、CFS の剥離破壊が付着面表層で発生したもの、B は破壊が CFS とコンクリート面上の樹脂層の間で発生したものであり、C は CFS の破断で終了したものである。Photo.2 にそれらの破壊状況を示す。

なお、後述される疲労試験における上限荷重比 (P_s) あるいは下限荷重比とは、これらの終局荷重の平均と疲労試験で実際に作用させた荷重との比である。

Table 2 Experimental results (Static test)

Specimen	Bond length (mm)	f_c (MPa)	Number of CFS layers	Ultimate load (kN)	Failure mode*1
1	200	40.9	1	20.66	A
2	300	36.5	1	34.14	B,C
3	300	40.0	1	28.12	B
4	200	45.9	3	39.38	A
5	200	45.9	3	34.14	A
6	200	39.6	3	46.73	A
7	300	33.2	3	44.13	A
8	200	45.2	5	45.68	A
9	200	31.1	5	51.80	A
10	300	36.5	5	58.10	A

*1 A : Concrete failure

B : Resin failure

C : Breakage of CFS

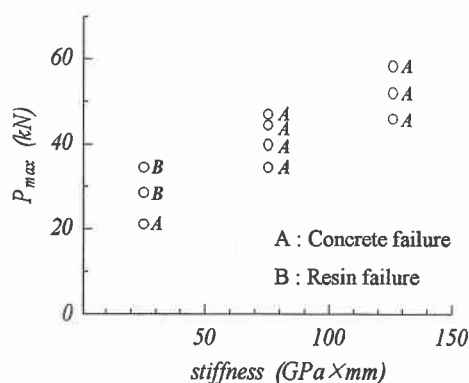
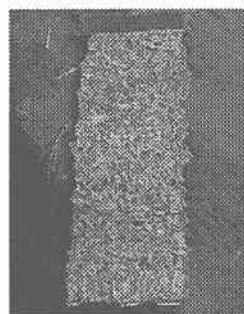
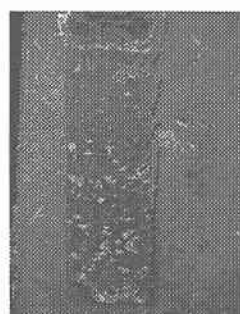


Fig.2 Ultimate load-stiffness relation



(a) concrete failure



(b) Resin failure

Photo.2 Difference of failure mode

3.2 疲労試験

Table 3 に本実験で行われた疲労試験の結果を示す。表中、*2 は繰り返し載荷回数 200 万回を越えてなお CFS が剥離しなかったため実験を中止したものであり、*3 は F-32 が終了したあとで、上限荷重比をあげて実験を行ったものである。これらの結果より、CFS が剥離するまでの疲労寿命は上限荷重比に大きく依存し、CFS の積層数が増えると同レベルの上限荷重比を与えたとしてもその疲労強度は増大する傾向にあると言える。

また、先行して行われた静的引張試験でも現れた現象であるが(Fig.2 参照)、CFS 剥離後の破壊面において、従来のコンクリート表層における破壊だけでなく、CFS とコンクリート間に存在する樹脂層とコンクリート表面との間での破壊が発生していた。この原因としては、供試体作成時において樹脂の塗布厚さや、コンクリート表面の研磨方法など、何らかの決定的違いが存在していたものと思われる。しかし、この破壊形態で CFS が剥離したとしても、その付着強度や疲労強度は、コンクリート表層における剥離破壊を起こしたものと何ら遜色の無い結果を示している。現時点では、その解明には至っておらず、この破壊形態の違いに起因する付着性状に関する影響も踏まえて、今後明らかにする必要がある。

Table 3 Experimental results (Fatigue test)

Specimen	f'_c (MPa)	Number of CFS layers	Stiffness (GPa · mm)	Bond length (mm)	Maximum force (%)	Minimum force (%)	Fatigue life($\times 10^3$)	Failure made
F-10	36.1	1	25.3	200	52	10	1014	B
F-11	38.8	1	25.3	200	60	10	1.8	A
F-12	41.7	1	25.3	300	70	10	2	B
F-13	45.5	1	25.3	300	60	10	3	B
F-14	23.6	1	25.3	300	53	10	408	A
F-30	36.9	3	75.6	200	58	10	2000* ²	A
F-31	43.3	3	75.6	300	60	10	80	B
F-32	21.8	3	75.6	300	50	10	2000* ²	B
FF-33 * ³	21.8	3	75.6	300	65	10	158	B
F-50	31.1	5	126.5	200	62	10	2000* ²	A

3.2(a) 付着応力

Fig.3 は上限荷重 P_{upper} 作用時の付着応力分布を繰り返し载荷回数ごとに辿ったものである。Fig.3(a)はCFS1層供試体 F-13を、(b)は3層供試体 F-31の結果を示している。両実験において、与えた上限荷重比は60%のものである。

付着応力は次式により求めた。

$$\tau = tE_{CFS} \frac{d\varepsilon_{CFS}}{dx} \quad (1)$$

ここで t は CFS の厚さ、 E_{CFS} は CFS のヤング係数、 $d\varepsilon_{CFS}/dx$ は、ひずみ分布曲線の傾きを表す。

载荷回数の増加に伴い剥離が進展するため、付着応力が存在する領域(以下 有効付着長)が図中右側へと移動して行く様子が分かる。そして、剥離が進展していく上で、観測された付着応力の最大値は、概ね等しいものとなっている。また、両者の CFS 剛性の違いにより、3層供試体 F-31 の有効付着長が、1層供試体のそれよりも長くなっている。

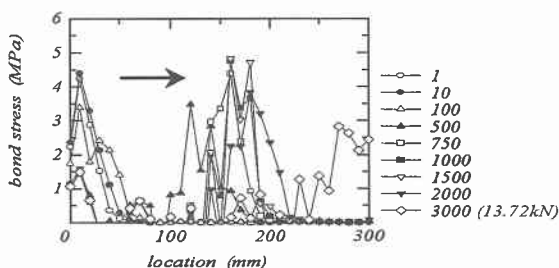


Fig.3(a) Bond stress distribution (F-13)

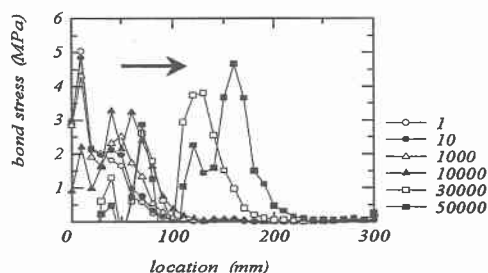


Fig.3(b) Bond stress distribution (F-31)

3.2(b) 付着応力-すべり関係

Fig.4 は、上限荷重比 $P_s=60\%$ とした F-31 における荷重端側より、10mm 20mm 40mm の付着応力(τ)とすべり(s)の関係を表したものである。

ここで、すべりとは各点の CFS のひずみを積分することによって求めた。また、同じ CFS 積層数、3層における静的引張試験より得られた、付着応力-すべり関係を図中の実線によって同時に示す。

この付着応力-すべり関係において、各点の初期勾配は位置に依らず概ね等しいと言える。また、位置により付着応力の最大値が大きく異なる。これは、剥離発生位置での CFS とコンクリート表面との間の損傷が、そこに隣接する領域にも伝播することである程度の損傷を与え、これにより、その領域の最大付着応力はより低下するものと考えられる。さらに、繰り返し载荷によって、CFS 付着域が損傷を受けるため、ひずみは増大する傾向に向かうためすべりもまた大きくなり、与えられた損傷の影響によって付着応力は小さくならざるを得ず、 τ - s 曲線は次第に傾きが小さくなる。

次に、図中の静的引張試験の結果と疲労試験の結果を比較する。最大付着応力は、作用引張力が小さいため当然、疲労試験結果の方が小さいものとなる。しかし、ここで、付着の限界に達していないと思われる付着応力レベルで軟化が始まる。これは、疲労試験における動的な载荷が、静的なそれに比べ CFS とコンクリートとの間の付着性状に著しいダメージを与えるものであると思われる。今後、载荷速度の影響も見据えた、検討を重ねる必要がある。

次に、CFS の積層数の影響を考える。Fig.5 に CFS 1 層の供試体、F-13 の荷重端より 10mm の地点での τ - s 曲線を静的試験の結果と共に示す。Fig.4(a)と比較して、ピークを与える付着応力の値に大きな差はない。しかし、すべりにおいては 1 層のものでは、およそ 0.1mm であるのに対し、3 層になるとその値は、およそ 0.05mm 程度となる。CFS の剛性が大きくなると、 τ - s 関係における傾きは大きくなると言える。また、

Fig.6 は、 $P_s=53\%$ とした供試体 F-14 の 30mm での τ - s 関係を表したものである。Fig.5 との比較において、CFS の剛性が変わっていないため初期勾配は変わっていない上、作用引張応力が低減されたため付着応力のピークが大きく減じられている。最大付着応力をむかえた後の軟化の過程において、曲線の勾配が小さくなっていく様子が著しく遅いことが分かる。

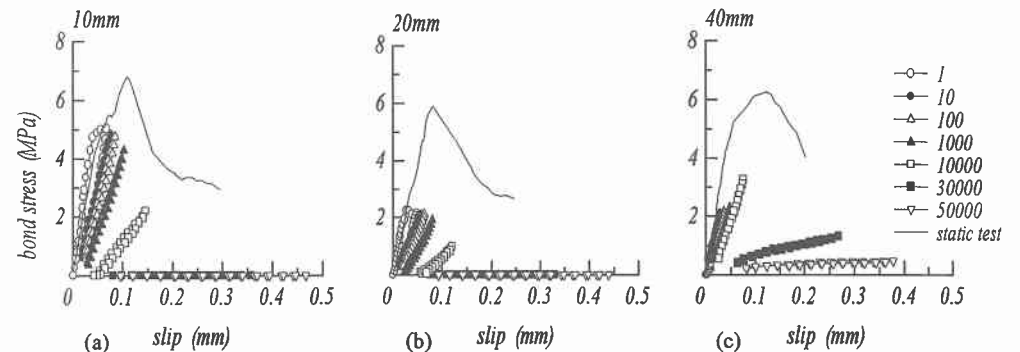


Fig.4 Bond stress-slip curves (F-31)

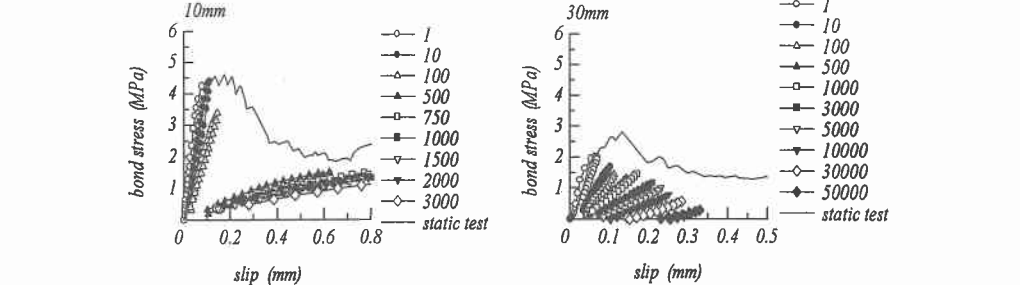


Fig.5 Bond stress-slip curves (F-13)

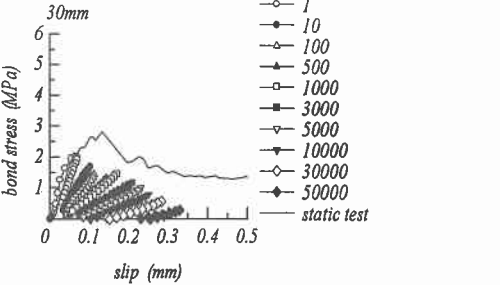


Fig.6 Bond stress-slip curves (F-14)

3.2(c) 疲労寿命

Fig.7 に上限荷重比と疲労寿命の関係を示す。ここでは、付着長が 200mm と 300mm の 2 種類の供試体を同様に評価させる必要があるため、付着長が短い供試体 Type A に関しては、単純に付着長を 1.5 倍したとき、疲労寿命も正比例するものとして換算する方法を採った。

CFS の積層数に依らず、上限荷重比が大きいほど疲労寿命が短くなる。また、同一の上限荷重比で評価する場合、CFS の積層数すなわち剛性が大きいほどに、疲労寿命も増大する傾向が伺える。この現象を説明するために、最大付着応力比と上限荷重比の関係を Fig.8 に示す。ここでは疲労試験において得られた最大付着応力を $\tau_{f,max}$ とし、静的引張試験で得られたそれを τ_{max} とした。同等の上限荷重比では、CFS の剛性が大きくなるにつれて、付着応力比が小さくなっている。すなわち、CFS 剛性が大きくなることで、最大付着応力が増大するが、このとき同じ荷重比で引張力を導入しても付着応力自体は最大付着応力の増加に、見合った分が増加するわけではない。この理由として、CFS 剛性の増加に伴い、有効付着長が長くなることが挙げられる¹⁾。付着応力を負担することの出来る領域の増加が、作用荷重増加に対する付着応力の増加を低減させているのである。

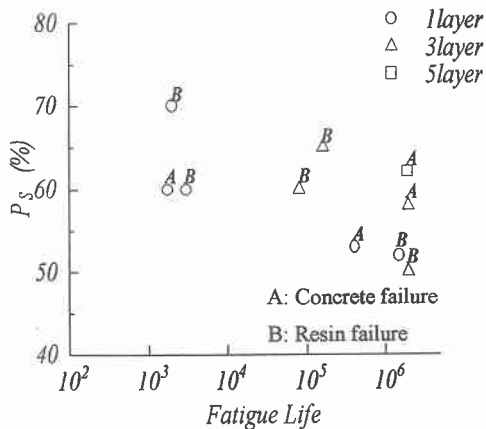


Fig.7 P_s -N relation

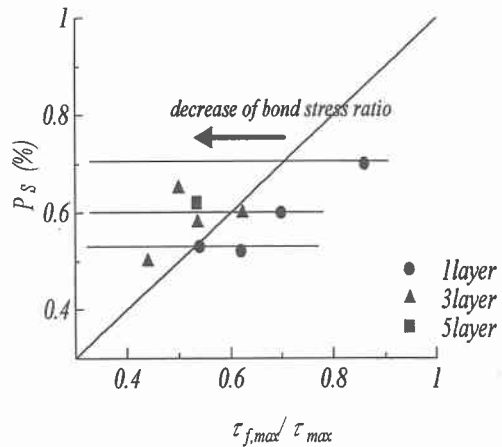


Fig.8 P_s - $\tau_{f,max} / \tau_{max}$ relation

4.まとめ

本研究の範疇において得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ① 付着応力とすべりの関係より、静的引張試験と同様に疲労試験においても最大付着応力を越えた後に軟化域が存在する。
- ② 上限荷重比は、CFS の付着疲労寿命に大きく影響を与える。
- ③ CFS の積層数を増やすことによって、その疲労寿命は大きくなる。これは、CFS 剛性の増加に伴い有効付着長が長くなることにより、付着応力を負担することのできる領域が増加し、このため作用荷重増加に対する付着応力の増加を低減させるためである。

【参考文献】

- 1) 佐藤靖彦，浅野靖幸，上田多門：炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究，土木学会論文集，(投稿中)