

論文 炭素繊維シートの付着疲労性状

森脇 渉^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・上田 多門^{*3}・角田 與史雄^{*4}

要旨: コンクリートにエポキシ樹脂を用いて接着した炭素繊維シートの疲労荷重下における付着挙動に及ぼす炭素繊維シートの積層数と作用最大引張力の影響を実験的に明らかにした。また実験結果より、炭素繊維シートの付着応力-すべり関係の特徴を定性的に明らかにした。

キーワード: 炭素繊維シート, 疲労性状, 付着応力-すべり関係

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、様々な優位特性を持つ炭素繊維シート(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ている。

貼り付けられたCFS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、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とともに、疲労荷重を受ける炭素繊維シートの付着応力-すべり関係の特徴を定性的に明らかにした。

2. 実験概要

2.1 CFSの貼り付け方法及び使用材料

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用した。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。

使用したCFSは高強度カーボン(FORCA トウシート FTS-C1-20)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、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

*1 戸田建設

修士(工学)(正会員)

*2 北海道大学大学院助手

工学研究科

社会基盤工学専攻

博士(工学)(正会員)

*3 北海道大学大学院助教授

工学研究科

社会基盤工学専攻

工博(正会員)

*4 北海道大学大学院教授

工学研究科

社会基盤工学専攻

工博(正会員)

2.2 実験供試体

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。供試体には幅 100mm の CFS が、横 350mm、奥行き 200mm、高さ 250mm (Type A)、もしくは、350mm (Type B) のコンクリートブロックの一面に貼り付けられている。荷重端側の CFS が鋼板で挟まれており、この鋼板を引張ることによって CFS に付着力を作用させる (Photo 1 参照)。

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。

2.3 試験方法

実験供試体は、供試体に貼り付けられた CFS がアクチュエータ直下にくるように設置され、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 鋼に固定される。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。なお、本実験の測定項目は、CFS のひずみ、作用引張荷重、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、及びカウンターで測定している。また、疲労試験において載荷速度は 5Hz、作用引張力

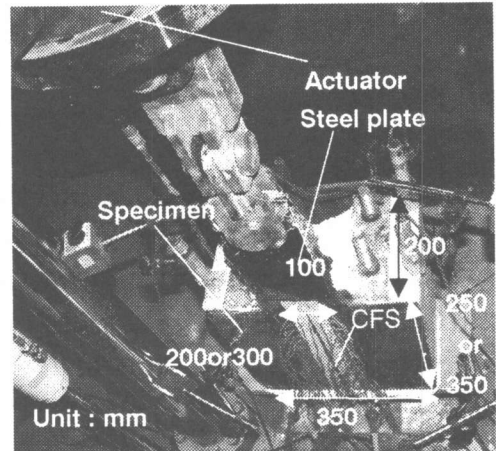


Photo 1 Test setup and specimen

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. 静的引張試験結果及び考察

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 の剥離破壊がコンクリート表層破壊によるもの、モード B は破壊が樹脂とコンクリートとの界面で発生したもの、モード C は CFS の破断を表す。Photo 2 にモード A 及び B の破壊状況を示す。Fig.1 に CFS の剛性と終局荷重との関係を破壊モードとともに示す。3 層及び 5 層においては、観察された破壊モードは全てコンクリートの表層破壊 (Photo 2(a)) であり、CFS の剛性が小さい場合にのみコンクリートと樹脂層の界面破壊が観察された (Photo 2(b))。しかし、破壊モードの相違に起因する終局荷重の変化は見られなかった。

Table 2 Experimental result (static test)

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

*1 A: Concrete failure, B: Interface, C: Breakage of CFS

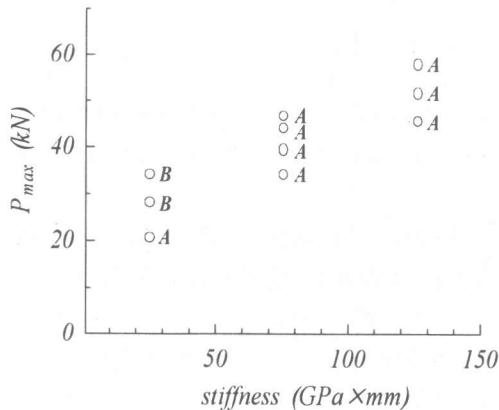
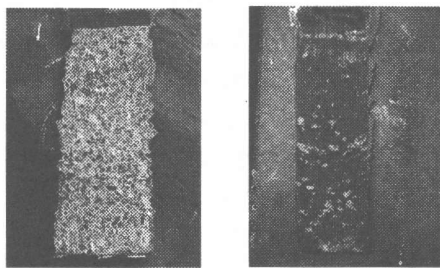


Fig.1 Ultimate loadstiffness relation



(a) Mode A

(b) Mode B

Photo.2 Difference of failure modes

4. 疲労試験結果及び考察

4.1 破壊形式及び疲労寿命

Table 3 に本実験で行われた疲労試験の結果を示す。表中、*は繰り返し载荷回数 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、**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。

Fig.2 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、疲労寿命も単純に 1.5 倍になると考え補正した。CFS の積層数によらず、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、疲労寿命も増大する傾向が伺える。一般に、付着応力の最大値、すなわち、付着強度は、CFS 剛性が大きくなるほど大きくなる¹⁾。しかし、疲労試験においては、剛性が大きい場合と小さい場合とでは、同じ上限荷重比において付着応力と付着強度との比（応力比）は剛性が大きい方が小さくなるものであり、その結果、剛性が大きい方が疲労寿命が長くなったものと考えられる。なお、応力比が小さくなる理由は、CFS 剛性の増加に伴い有効付着長が長くなることによる¹⁾。

また、先に示した静的引張試験でも現れた現象であるが（Photo 2 参照）、疲労試験においても CFS 剥離後の破壊面において、コンクリート表層における破壊だけでなく、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。また、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。ただし、この破壊モー

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 mode
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*	A
F-31	43.3	3	75.6	300	60	10	80	B
F-32	21.8	3	75.6	300	50	10	2000*	B
FF-33 **	21.8	3	75.6	300	65	10	158	B
F-50	31.1	5	126.5	200	62	10	2000*	A

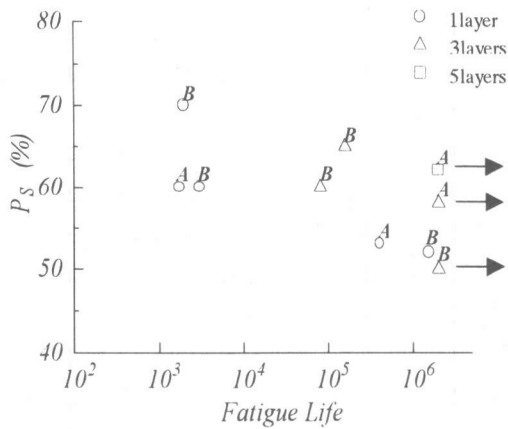


Fig.2 Ps-N relation

ドは、CFSが1層貼り付けられたものとともに3層貼り付けられた場合にも観察された。疲労試験と静的試験との大きな差は、荷重が繰返し作用すること、及び、付着応力の最大値が静的試験よりも小さいことである。本研究では、なぜ破壊形式の影響が疲労寿命に現れないのか、また、なぜ、静的試験では3層貼り付けた供試体に見られなかった破壊モードが、疲労試験においては現れたのかを明らかにすることはできず、更なる検討を要する。

4.2 付着応力分布

Fig.3は、供試体 F-13 における上限荷重 P_{upper} 作用時の付着応力分布を繰返し載荷回数ごとに辿ったものである。図中横軸は、コンクリートとCFSが付着を開始する地点を原点とし、CFS付着領域におけるそこから距離である。なお付着応力は次式により求めた。

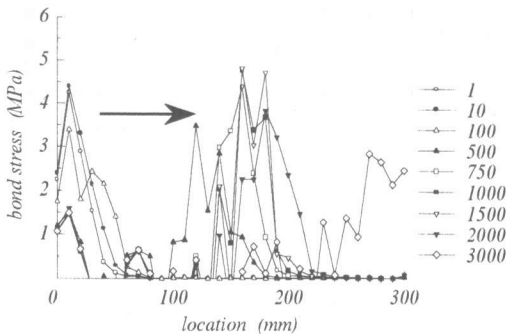


Fig.3 Bond stress distribution (F13)

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

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。

載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（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。

4.3 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 の付着応力 (τ) とすべり (s) の関係を、Fig.5は CFS 1層供試体 F-13 の荷重端より 10mm の地点での τ -s 曲線をそれぞれ静的試験の結果とともに示したものである。

ここで、コンクリートのひずみは CFS のひずみに比べ極めて小さいため、すべりは各点の CFS のひずみを積分することによって求めたものである²⁾。

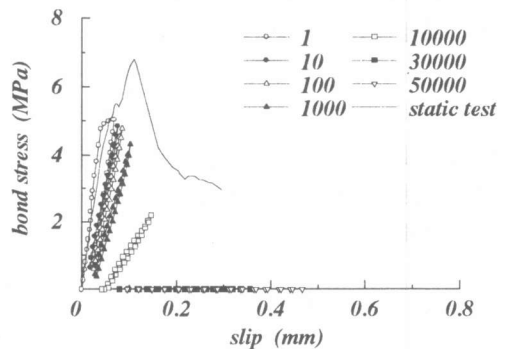


Fig.4 Bond stress-slip curves (F31)

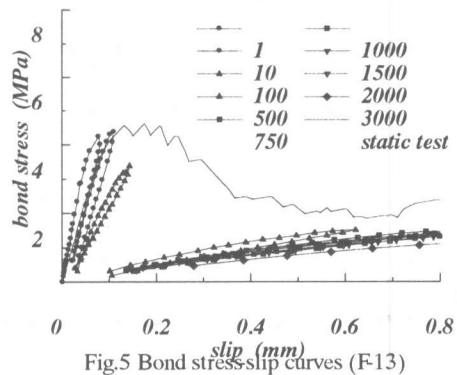


Fig.5 Bond stress-slip curves (F13)

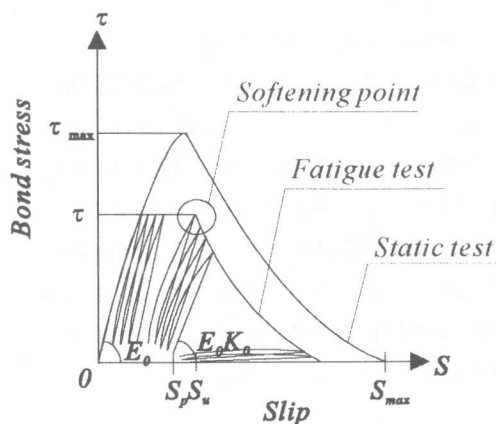


Fig.6 Schematic relationships between bond stress and slip

付着応力-すべり関係の内部曲線の傾き(剛性)の低下及び最小応力時のすべり量が繰返し回数の増加とともに大きくなる。また、繰返し回数が少ない段階では概ね一定と考えられる付着応力が、繰返しを重ねるごとに徐々に小さくなる、すなわち、軟化していくことが明らかである。また、Fig.4及び5によって1層と3層との τ - s 関係を比較すると、付着応力の最大値に大きな差はないが、両者の軟化性状が大きく異なる。

4.4 付着応力-すべり関係

前項に示したような、疲労試験の τ - s 関係では、載荷→除荷→再載荷→…と繰り返す、ループを描く。ここで、CFSが損傷を受け剥離に至る過程を、各ループによって囲まれる面積すなわち損傷エネルギーが蓄積され、保有し得る限界エネルギーに達した時に剥離すると考え、これを用いてCFSの付着疲労を表現することを考える。 τ - s 関係を模式的に表現すればFig.6の様になるであろう。この τ - s 関係に基づいたモデルを作るに当たって、必要とされる情報とは、初期の剛性に対する除荷剛性の低下割合(損傷パラメータ(K_0))、残留すべり(S_p)、および、軟化開始時のすべり(S_u)と蓄積され得る限界の損傷エネルギー(E_{total})である。

Fig.7に、付着応力(τ)と静的荷重下におけ

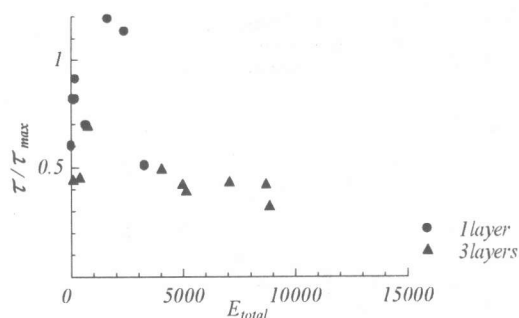


Fig.7 τ/τ_{max} - E_{total} relation

る付着応力の最大値(τ_{max})との比(応力比)と破壊に至るまでの τ - s 曲線を積分した E_{total} との関係を示した。なお、付着応力の最大値は、既往の研究¹⁾における実験的検討に基づき誘導された次式により算定した。

$$\tau_{max} = 9.1 \cdot f_c'^{0.2} \cdot t E_{CFS} \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

$$(\tau_{max} \leq 3.49 f_c'^{0.2} \text{ MPa})$$

$$\tau_{max-i} = \tau_{max} \left(1 - \frac{x}{60}\right) \quad (3)$$

$$(\tau_{max-i} \geq 0.5 \tau_{max})$$

ここに、 f_c' はコンクリートの圧縮強度、 t はCFSの厚さ、 E_{CFS} はCFSのヤング係数を表す。また、式(2)は破壊の基点となる位置での付着応力の最大値を、式(3)はその他の位置における付着応力の最大値を表している。

Fig.7より応力比が小さいほど、蓄積されるエネルギー量が大きくなることが明らかである。また、応力比とエネルギー量との関係は、CFSの剛性に依らず概ね等しいと言えそうである。

残留すべりとエネルギーとの関係をFig.8に示す。残留すべりは軟化が開始されると思われる点でのすべり(S_u)、損傷エネルギーは限界エネルギーによりそれぞれ正規化している。

図中の丸印及び三角印は、供試体F-14の異なる位置における残留すべりと損傷エネルギーとの関係を示す。位置による違いは見られない。この傾向は、他の供試体においても確認できた。また、図には、CFS剛性や作用引張力(付着応

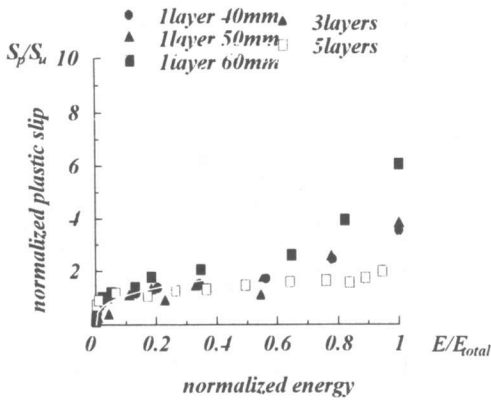


Fig.8 S_p/S_u - E/E_{total} relation

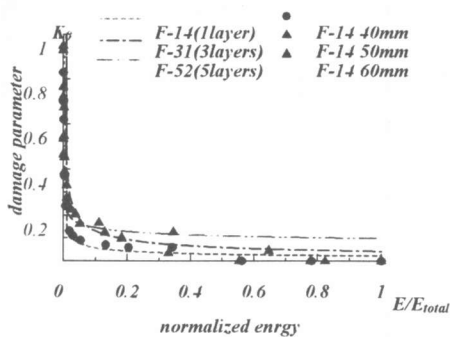


Fig.9 K_0 - E/E_{total} relation

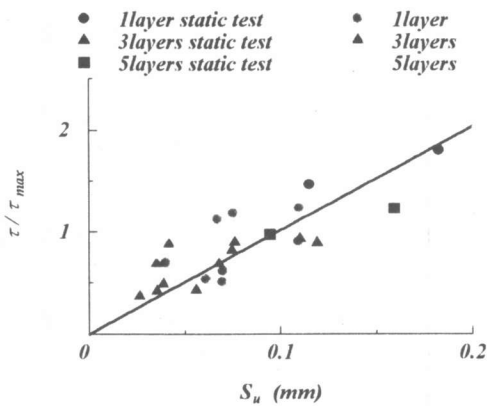


Fig.10 τ/τ_{max} - S_u relation

力)の影響を確認するため、各供試体で得られた結果の平均値もし召している(実線)。残留すべり (S_p) は、CFS 剛性及び作用引張力のことなく、ほぼ一義的な関係にあると考えられそうである。

Fig.9 は、損傷パラメータ (K_0) と正規化さ

れた損傷エネルギーとの関係を示す。先に示した残留すべりと損傷エネルギーとの関係同様、位置による相違 (図中の丸印及び三角印)、CFS の剛性の影響及び作用引張力 (付着応力) の相違 (図中の線) は見られず一義的な関係にある。

なお、軟化開始時のすべり (S_u) は Fig.10 に示されるように、多少のばらつきは見られるものの CFS 剛性の影響を持たず、付着応力比と比例する関係にあるようである。

5. 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) 静的引張試験、疲労試験において 2 種類の破壊モードすなわち、コンクリート表層破壊及びコンクリートと樹脂層間の界面破壊が観察された。しかし、CFS の付着強度に及ぼす影響は見受けられなかった。
- (2) CFS の付着疲労寿命は、上限荷重比が小さいほど、また、CFS の積層数が多いほど長くなる。
- (3) 付着応力比 (付着応力と静的荷重下での付着応力の最大値との比) が小さくなると蓄積される損傷エネルギーは大きくなる。
- (4) 付着応力-すべり関係における剛性低下及び残留すべり量の増加は、損傷エネルギーに関連付けて考えることができる。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費 (奨励研究(A) : 課題番号 10750350) を受けて行ったものであります。

【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, 2000.5.
- 2) 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.