

論文 緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の補強効果

前田敏也^{*1}・小牧秀之^{*2}・坪内賢太郎^{*3}・村上かおり^{*4}

要旨：コンクリート構造物の補強工法として、優れた耐久性や施工の簡便性などの特徴を持つ炭素繊維シート（以下、CFS と称する）接着工法が用いられている。しかし、曲げ補強を目的として梁の下面に CFS を接着した場合、CFS がはく離して十分な引張強度が発揮されず、期待した曲げ耐力が得られない可能性がある。本研究では、このような現象を改善するため、CFS とコンクリートとの間に変形能力に優れた緩衝材と称する材料を層状に設置して載荷試験を行った。その結果、緩衝材によって CFS の応力集中が緩和されるとともに付着性状が改善され、はく離耐力が高まることを確認した。

キーワード：炭素繊維シート、補強、緩衝材、応力分散、付着

1. はじめに

炭素繊維シート（以下、CFS と称する）は、軽量、高強度、高耐久等の優れた特性を持っていることから、耐震補強をはじめとする各種構造物の補修・補強に広く用いられている。CFS による補強は、エポキシ樹脂等の接着剤を用いてコンクリート面に接着された CFS に荷重を伝達することによって効果を発揮するため、CFS とコンクリートとの付着性状が補強効果に大きく影響する。しかし、曲げ補強を目的として行われた梁を対象とした実験結果では、CFS のはく離や応力集中による CFS の破断によって部材が破壊し、期待した曲げ耐力が十分得られない場合が見受けられる。

著者らは、このような現象を改善するために、コンクリートと CFS との境界に緩衝材と称する変形能力に優れた材料を層状に設置した RC 梁試験体の曲げ載荷試験を行った。本研究は、曲げ載荷試験によって得られた CFS の応力分散効果および付着性状に着目し、曲げ補強および緩衝材のはく離抑制効果について検討を行ったものである。

2. 載荷試験

曲げ載荷試験に用いた試験体および補強方法の概要を図-1、図-2 および表-1 に示す。試験体は 200mm×200mm×2,200mm の RC 梁であり、製作には木製型枠を使用し、コンクリート打設後 7 日目に脱型した後、屋内で養生を行った。補強は試験体の引張面の曲げ支間内 1,740mm にプライマーを塗布後、目付け量 300g/m² の CFS を繊維方向が主鉄筋方向と一致するように樹脂を含浸させて行った。また、緩衝材は、プライマー塗布後重量管理によって所定の厚みとなるように塗布し、その後 CFS を接着した。CFS の定着方法は、CFS を梁の引張面に接着しただけのもの、引張面に接着した後に端部を別途 CFS で U 字型に巻上げ定着したもの、および引張面に接着した後に全支間を CFS で U 字型に巻上げ定着したものの 3 種類とした。試験に使用した材料の力学特性を表-2 にまとめて示す。なお、含浸接着樹脂は、一般に使用されている CFS 用の汎用エポキシ樹脂を用いた。

載荷試験は CFS 接着後、室温で 7 日間以上

*1 清水建設(株)土木本部 工博 (正会員)

*2 日石三菱(株)中央研究所 工修 (正会員)

*3 日石三菱(株)技術開発部

*4 清水建設(株)土木本部

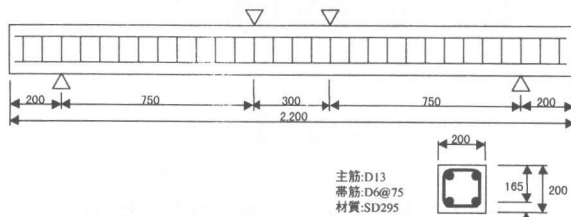


図-1 試験体の概要

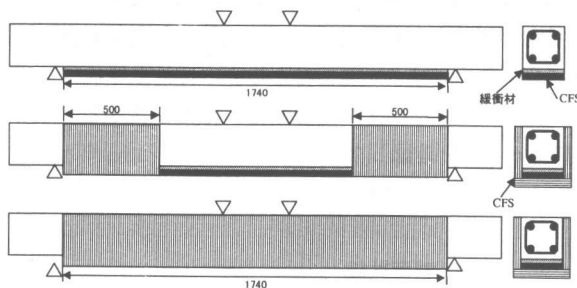


図-2 試験体の補強方法

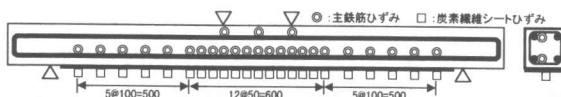


図-3 ひずみ測定位置

養生した後に実施した。載荷方法は、載荷点間距離 300mm、支点間距離 1,800mm の静的単調載荷とし、荷重制御により 1kN 間隔で荷重、変位およびコンクリート、鉄筋、CFS のひずみを測定するとともにひび割れ発生状況の観察を行った。ひずみ測定位置を図-3 に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 最大荷重

表-3 に試験結果の一覧を示す。CFS を 1 層接着した SP-C は、無補強の SP-0 に対して最大荷重が約 1.8 倍であったが、CFS のはく離で破壊した。はく離は CFS の付着試験でよく見られるように、CFS がコンクリート表面のモルタル層を薄く引き剥がすような状態であった¹⁾。これに対し、U 字型に巻上げ定着した SP-C-A および SP-C-U は、SP-0 に対して最大荷重が 2.1

表-1 試験体の種類

試験体	CFS 積層数	緩衝材の厚さ(μm)	巻上げ定着
SP-0	—	—	—
SP-C	1 層	—	—
SP-C-A	1 層	—	両端部
SP-C-U	1 層	—	全支間
SP-C-E500	1 層	500	—
SP-C-E500-A	1 層	500	両端部
SP-C-E500-U	1 層	500	全支間
SP-C-E1000-A	1 層	1,000	両端部
SP-C2	2 層	—	—
SP-C2-E500	2 層	500	—
SP-C2-E1000	2 層	1,000	—

表-2 使用材料の力学特性

項目	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)	破断ひずみ (×10 ⁻⁶)
材料	4,120	2.36×10 ⁵	15,500
項目	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)	伸び率 (%)
材料	1.7	1.0	123
項目	せん断弾性率 (N/mm ²)	付着強度 (N/mm ²)	
材料	1.0	2.9	
項目	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
材料	370	526	25.5
項目	圧縮強度(N/mm ²)		
材料	28 日(標準養生)	試験時(気中養生)	
コンクリート	33.3	31.6	

～2.2 倍で CFS の破断で破壊し、巻上げ定着によるはく離抑制効果が認められた。また、CFS を 2 層とした SP-C2 は、SP-C に比べて最大荷重が約 40% 増加したが、破壊形式は SP-C と同様に CFS のはく離であった。

一方、緩衝材を用いた SP-C-E500 は、巻上げ定着を行った場合と同様に SP-0 に対して最大荷重が約 2.3 倍で CFS の破断で破壊し、緩衝材によって巻上げ定着と同等のはく離抑制効果が認められた。また、端部のみ巻上げ定着を行った SP-C-E500-A の最大荷重は SP-C-E500 に比べて約 10kN 高くなったが、全支間巻上げ定着を行った SP-C-E500-U の最大荷重は SP-C-E500 と同程度であった。さらに、緩衝材の厚みを 500 μm として CFS を 2 層接着した SP-C2-E500 は CFS のはく離で破壊したが、SP-C2 に対して最大荷重が約 35% 増加し、緩衝材によるはく離抑

表一 3 試験結果一覧

試験体	降伏荷重*1 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重比*2	最大変位 (mm)	CFS の最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)	破壊形態
SP-0	40.2	44.1	1.00	22.7	—	主鉄筋降伏
SP-C	44.4	78.3	1.78	21.7	7,790	CFSはく離
SP-C-A	51.5	92.6	2.10	23.3	10,985	CFS破断
SP-C-U	52.0	95.1	2.16	21.2	10,502	CFS破断
SP-C-E500	45.4	101.0	2.28	33.4	15,750	CFS破断
SP-C-E500-A	44.9	108.9	2.47	32.5	15,296	CFS破断
SP-C-E500-U	39.6	96.4	2.19	22.9	11,763	CFS破断
SP-C-E1000-A	45.4	97.4	2.21	29.9	13,848	CFS破断
SP-C2	61.6	109.0	2.47	16.4	7,170	CFSはく離
SP-C2-E500	61.2	148.0	3.36	40.7	13,084	CFSはく離*3
SP-C2-E1000	50.7	132.0	2.99	45.5	14,500	CFSはく離*3

備考) *1: 主鉄筋が降伏ひずみ ($1,800 \times 10^{-6}$) に達した時の荷重

*2: SP-0 に対する最大荷重の比

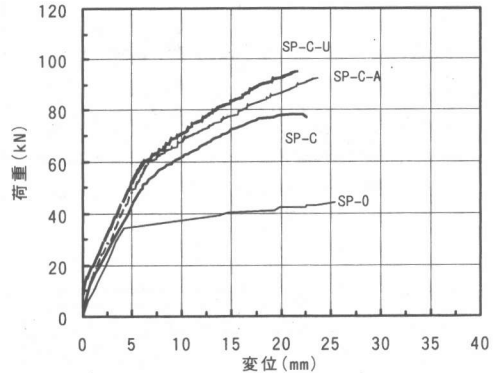
*3: 鉄筋のかぶりを引き剥がすような形態ではなく離

制効果が認められた。ただし、緩衝材を用いた場合ははく離はモルタル層を薄く引き剥がすようなものではなく、鉄筋のかぶりコンクリートを広い範囲で引き剥がすような状況であった。

また、緩衝材の厚さを $1,000 \mu\text{m}$ とした SP-C-E1000-A および SP-C2-E1000 は、同じ定着条件で緩衝材の厚さが $500 \mu\text{m}$ である SP-C-E500-A および SP-C2-E500 に比べて最大荷重が 10% 程度低くなった。これらの結果から、試験で用いた緩衝材の厚みは $500 \mu\text{m}$ 程度が適していたものと考えられる。

3.2 CFS の最大ひずみ

CFS のはく離で破壊した SP-C および SP-C2 の CFS の最大ひずみはそれぞれ $7,790 \times 10^{-6}$ および $7,170 \times 10^{-6}$ であった。一方、巻上げ定着を行った SP-C-A, SP-C-U は CFS のはく離が抑制されて破断したため、最大ひずみは約 $10,000 \times 10^{-6}$ に達した。これに対し、緩衝材を用いた SP-C-E500 の最大ひずみは CFS の一軸引張試験における破断ひずみに相当する $15,750 \times 10^{-6}$ であり、SP-C-A, SP-C-U 以上のはく離抑制効果が認められた。また、端部を巻上げ定着した SP-C-E500-A の最大ひずみも $15,000 \times 10^{-6}$ に達した。これは、緩衝材によって CFS の引張応力が分散されてひび割れ部における応力集中が緩和されたためと考えられる。しかし、全支間



図一 4 (a) 荷重一変位関係

巻上げ定着した SP-C-E500-U の最大ひずみは $11,763 \times 10^{-6}$ であり、全支間巻上げ定着したために緩衝材の変形が拘束され、緩衝材としての効果が十分発揮できなかったものと考えられる。また、緩衝材の厚さを $1,000 \mu\text{m}$ とした SP-C-E1000-A の最大ひずみは $13,848 \times 10^{-6}$ であり、SP-C-E500-A に比べて低下した。

一方、SP-C2-E500 および SP-C2-E1000 は CFS の破断には至らなかったものの、最大ひずみはそれぞれ $13,084 \times 10^{-6}$ および $14,500 \times 10^{-6}$ であり、緩衝材によるはく離抑制効果が認められた。

3.3 荷重一変位関係

図一 4 に各試験体の荷重一変位関係をまとめて示す。これらの結果から、緩衝材を用いた試

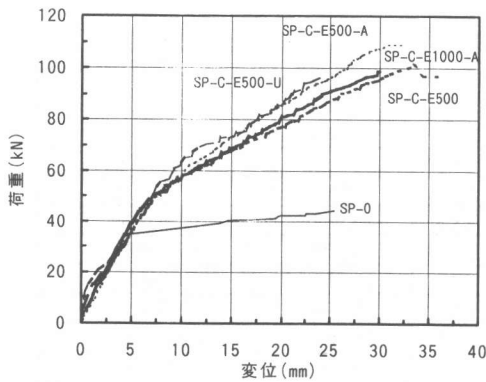


図-4 (b) 荷重-変位関係

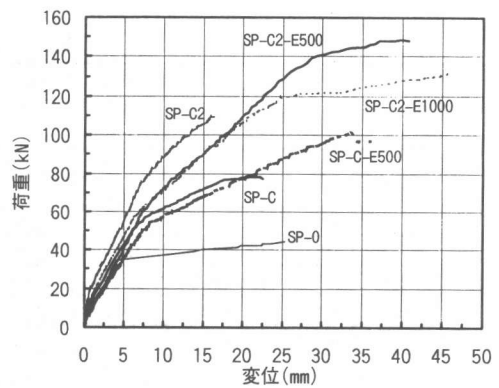


図-4 (c) 荷重-変位関係

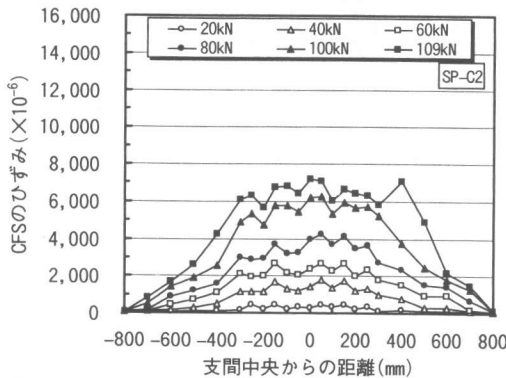


図-5 (a) ひずみ分布 (緩衝材無しの場合)

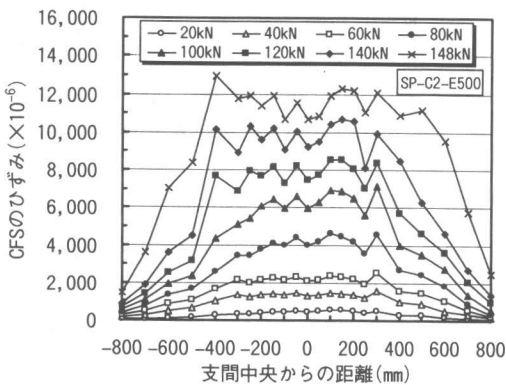
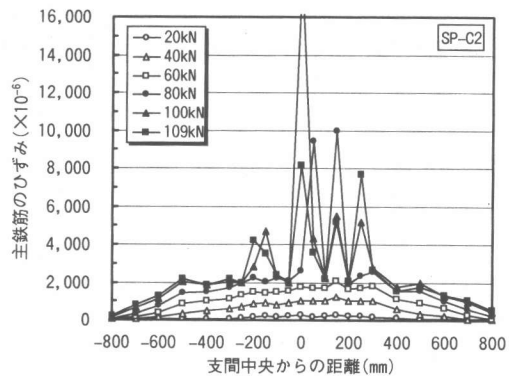
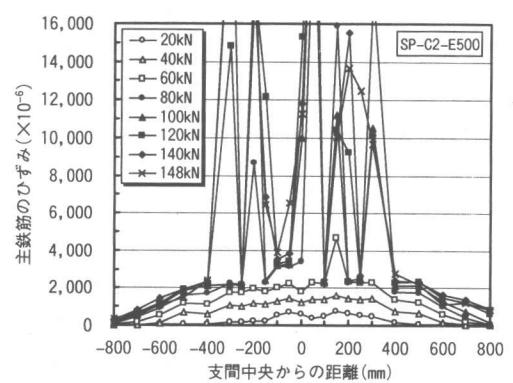


図-5 (b) ひずみ分布 (緩衝材有りの場合)



験体では用いないものに比べてひび割れ発生までの初期剛性が低く、降伏荷重が約 10kN 低下しているものもあるが、主鉄筋の降伏前後では CFS の定着方法、緩衝材の厚さに関わらず勾配がほぼ同じであることから、曲げ剛性に大きな差はみられない。また、CFS のはく離で破壊した試験体では最大荷重近傍で CFS の部分的な

はく離が進行しているために曲げ剛性が低くなり、勾配が緩やかになっている。

一方、変形性能については、SP-C-E500-U を除いて緩衝材を用いたほうが用いないものに比べて最大変位が大きくなっている。SP-C-E500-U は緩衝材を用いているにもかかわらず、全支間巻上げ定着を行ったために緩衝材の変形が

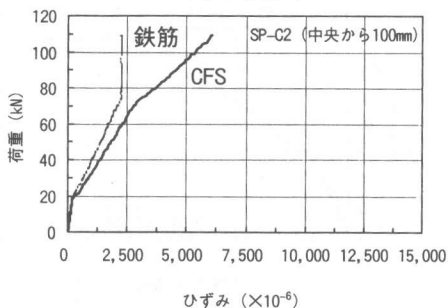
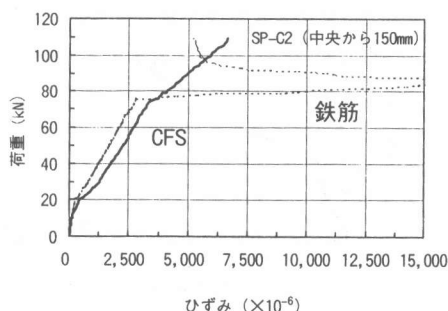


図-6 (a) 荷重-ひずみ関係
(緩衝材無しの場合)

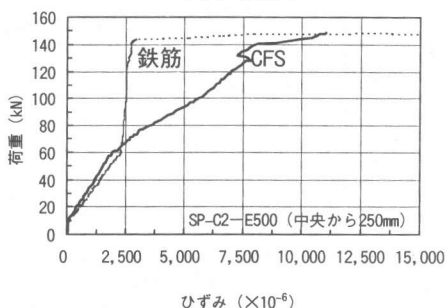
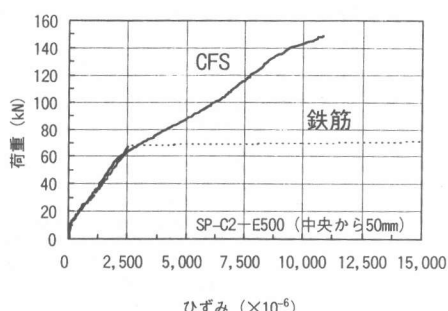


図-6 (b) 荷重-ひずみ関係
(緩衝材有りの場合)

拘束され、緩衝材としての効果を十分発揮できなかったものと考えられる。

3.4 応力分散

CFS および鉄筋のひずみ分布の一例を図-5に示す。緩衝材を用いた試験体の CFS のひずみ分布は、用いていないものに比べて載荷初期のひずみが均等に分布しており、緩衝材によって CFS の引張応力が分散されていることがわかる。また、同一荷重でのひずみ分布を比較すると、緩衝材を用いた場合のほうが梁の端部における CFS のひずみが大きくなっており、応力を広い範囲に分散して荷重に抵抗していることがわかる。

一方、主鉄筋のひずみ分布についても、CFS のひずみ分布と同様、緩衝材を用いた場合には広い範囲で荷重に抵抗していることがわかる。

これらのことから、緩衝材によって CFS のみならず主鉄筋の応力分散効果も期待でき、局部的な応力集中が緩和されるものと考えられる。

次に、梁の同一断面における CFS および鉄筋の荷重-ひずみ関係の一例を図-6に示す。これらの結果から、いずれの場合にも主鉄筋降

伏後に CFS のひずみが大きくなる傾向にあるが、断面によっては主鉄筋のひずみが降伏後急激に大きくなる箇所とひずみがほぼ一定となる箇所とが見られる。ただし、緩衝材を用いた場合には、降伏直後ではなく主鉄筋のひずみが一定となった後、ひずみが急激に増加している箇所もある。このような傾向が見られるのは、緩衝材を用いた場合、荷重の増加とともに応力が分散されて荷重の分担領域が徐々に広がっていくためであると考えられる。これに対し、緩衝材を用いない場合には荷重の分担領域は限られており、その領域のひずみが大きくなって局部的な応力集中が生じ、CFS がはく離するものと考えられる。

3.5 付着性状

測定された CFS のひずみから式(1)により CFS の付着応力を算定した²⁾。

$$\tau_i = \frac{E_{CFS}(\epsilon_i - \epsilon_j) \cdot t}{\ell} \quad (1)$$

ここに、 τ_i : i 点と j 点間における平均付着応力(N/mm²)、 E_{CFS} : 炭素繊維シートの弾

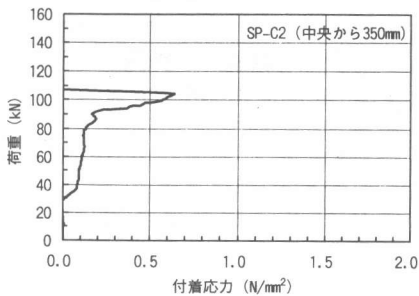
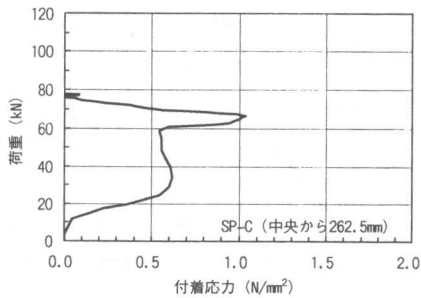


図-7 (a) 荷重-付着応力関係
(緩衝材無しの場合)

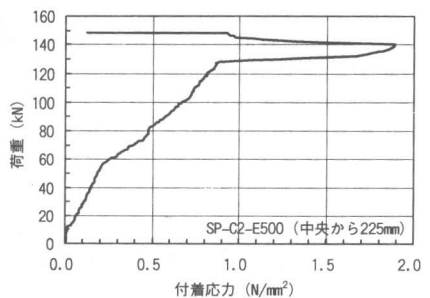
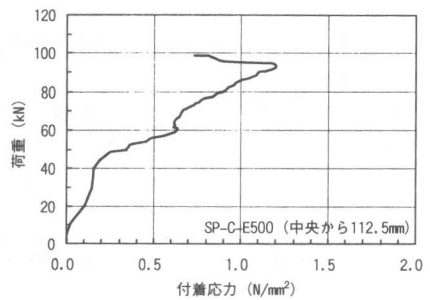


図-7 (b) 荷重-付着応力関係
(緩衝材有りの場合)

性係数(N/mm^2), ϵ_i, ϵ_j : i 点と j 点における炭素繊維シートのひずみ, t : 炭素繊維シートの厚さ(mm), ℓ : i 点と j 点の距離(mm)

荷重-付着応力関係の一例を図-7に示す。これらの結果から、緩衝材を用いない場合には付着応力が載荷初期に荷重の増加とともに大きくなるが、その後付着応力が減少あるいは増加が緩やかになる。そして鉄筋の降伏(1層の場合: 約 45kN, 2層の場合: 約 60kN)後に付着応力が再び増加して極大値を示し、その後急激に低下している傾向が見られる。付着応力が低下した部分では CFS がはく離を生じていると考えられる。

これに対し、緩衝材を用いた場合には付着応力が鉄筋の降伏後も急激な変化なく増加し続け、緩衝材を用いない場合に付着応力が急激に低下した荷重以降も荷重、付着応力が増加する傾向が見られる。したがって、緩衝材を用いることにより付着応力の急激な低下による CFS のはく離が抑制され、鉄筋降伏後も高い荷重レベルまで CFS の付着が確保されてはく離耐力が向

上するものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見をまとめると以下のようなものである。

- ①緩衝材により CFS のはく離が抑制され、部材のはく離耐力、変形性能が向上する。
- ②緩衝材を用いた部材の鉄筋降伏前後の曲げ剛性は、緩衝材を用いない場合と同等である。
- ③緩衝材により CFS および鉄筋の応力が分散され、局所的な応力集中が緩和される。
- ④緩衝材により鉄筋降伏後も CFS の付着応力が急激に低下しないため、付着が確保されてはく離耐力が向上する。

参考文献

- 1) 佐藤, 浅野, 上田: 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 No.648/V-47, pp.71-87, 2000.5
- 2) 上原子, 下村, 丸山, 西田: 連続繊維シートとコンクリートの付着・はく離挙動の解析, 土木学会論文集 No.634/V-45, pp.197-208, 1999.11