

論文 端部増貼り補強による炭素繊維シートの定着耐力向上に関する研究

原田哲夫*¹・永藤政敏*²・久保田慶太*³・岳尾弘洋*⁴

要旨：炭素繊維シート接着工法によって鉄筋コンクリートはりの曲げ補強を行う場合、その定着方法が重要である。ここではまず、炭素繊維シートとコンクリートとの付着特性および剥離機構について、鉄筋コンクリートはり試験体の曲げ載荷試験を行って検討した。次いで、機械的な定着を行わない炭素繊維シートの増貼り補強とU字巻きつけ補強を組み合わせた新たな定着方法を提案し、その定着効果について実験的に検討した。新たに提案した定着方法の場合、上縁コンクリートが圧壊するまで炭素繊維シート定着部の剥離はなく、曲げ耐力の向上はもちろん、粘りのある破壊を示し、定着法の有効性が確認できた。

キーワード：炭素繊維シート、曲げ補強、定着、剥離、付着

1. まえがき

連続繊維シート接着工法による鉄筋コンクリート部材の補強では、連続繊維シートの剥離が最大の問題点である。一軸引張試験に基づくこれまでの付着試験結果によれば、いくら接着長を長くとっても、進行性の剥離を生じてしまうことがわかっている。このため、より確実な定着を図るために端部では機械的な定着を施した研究や実施工が多く見受けられる。しかしながら、一方で連続繊維シートのようなやわらかい材料には、鋼板やアンカーボルトのような硬い材料で定着するのではなく、連続繊維シートと同等の性質を有する材料を用いた定着がベターであるという認識が重要と思われる。すなわち、「やわらかいものにはやわらかいもので定着する」という考え方であり、防食特性に優れた材料に、それとは逆に防食上問題のある材料を用いて定着することの矛盾も解消したいのである。

筆者らは上記のような考え方にに基づき、曲げ補強の場合で、機械的な定着法を用いない新たな定着法を考案し、その性能についての検討を行うこ

とを目的としている。新たな定着法とは、支点より内側の鉄筋コンクリートはり（以下、RCはりと呼ぶ）両端部の一定区間において、連続繊維シートを曲げ補強区間よりも多めに重ねて接着する、いわゆる「端部増貼り補強方法」である。この定着法での実験結果の一部は、筆者の一人により既に報告しているものの¹⁾、その効果が必ずしも十分に明らかになっているわけではない。ここではさらに、曲げ補強用の連続繊維シートとは直角方向にU字巻きつけ補強した方法と端部増貼り補強とを組み合わせ、定着効果の改善を図った。「端部増貼り補強」と「U字巻きつけ補強」はともに、連続繊維シートの接着によるコンクリートとの付着定着であり、基本的には剥離メカニズムの検討が重要である。

そこで、連続繊維シートには炭素繊維シート(以下CFSと略記)を用いて、RCはりを曲げ補強した場合について、その剥離メカニズムを明らかにしながら、上記定着方法における定着効果を定量的に把握するために実験的な検討を行った。

-
- | | | |
|-----|--------------------------|-------|
| * 1 | 長崎大学教授 工学部構造工学科 工博 | (正会員) |
| * 2 | 長崎大学技官 工学部構造工学科 | (正会員) |
| * 3 | 長崎大学大学院工学研究科構造工学専攻 | (正会員) |
| * 4 | ショーボンド建設(株) 技術部課長 博士(工学) | (正会員) |

2. 端部増貼り補強のコンセプト

コンクリートとCFSとの一軸引張型の付着試験結果から、CFSの層数（剛性）を増せば、有効付着長が増加するとともに、剥離荷重も増加することがわかっている¹⁾。このことより、定着部にCFSの層数を曲げ補強の層数以上に増やして接着すれば、剥離荷重の増加が期待でき、定着効果の向上が期待できるという考え方である。

3. 実験概要

3.1 試験体

実験は、AシリーズとBシリーズに分けて行った。Aシリーズでは、端部増貼り補強効果を調べることを目的とした。Aシリーズ試験体は図-1に示す無補強基準RCはり試験体の下面に曲げ補強用のCFS（目付量300g/m²、弾性係数 230kN/m²、引張強度3480N/mm²）を1層、2層、3層、4層の場合に分けて接着した。端部増貼り補強は、1層曲げ補強の場合には0, 1, 2, 3層、2層曲げ補強の場合には0, 1, 2層、3層曲げ補強の場合には0, 1層、4層曲げ補強の場合には0層とし、曲げ補強と端部増貼り補強の総数が最大4層となるようにした。試験体総数は11体である。

Bシリーズでは、曲げ補強用CFSの層数は2層とし、端部増貼り補強とU字巻きつけ補強による定着効果について調べることを目的とした。試験体は、図-1に示すようなCFSの補強を行った計6体である。U字巻きつけ補強のCFSは1層とした。AシリーズとBシリーズともに、すべての試験体で断面寸法、鉄筋量は同じである。また、端部増貼り区間は一律に300mmとした。試験時のコンクリートの特性は表-1の通りである。CFSは、試験体の接着面をディスクサンダーで表面処理した後、エポキシ樹脂プライマーを塗布し、エポキシ樹脂含浸接着剤により貼り付けた。

3.2 試験方法

スパン200cmの単純支持とし、等曲げ区間40cmの2点荷重で、CFS剥離後も曲げ圧縮破壊が生じ

表-1 コンクリートの特性

供試体名	圧縮強度	ヤング係数
	(N/mm ²)	(N/mm ²)
Aシリーズ	30.9	2.84×10 ⁴
Bシリーズ	35.1	2.84×10 ⁴

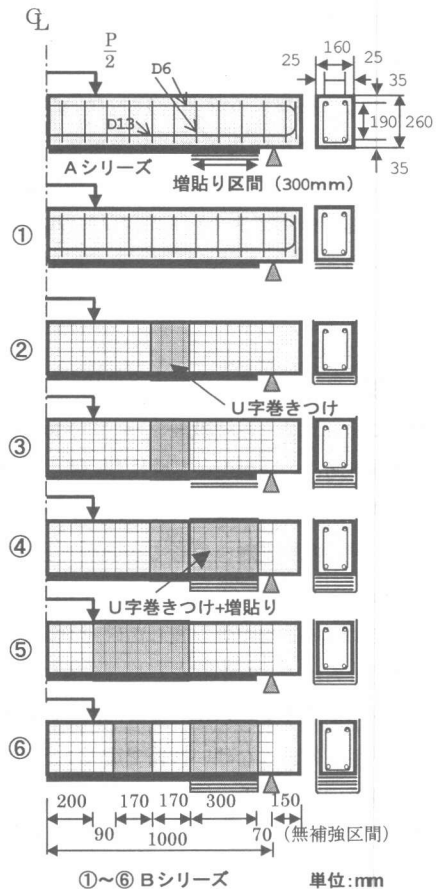


図-1 試験体

るまで漸増荷重した。各荷重段階で、スパン中央のたわみ、鉄筋ひずみを計測するとともに、CFS表面に30mmのひずみゲージを両端部まで貼付することによってCFSのひずみ分布を調べた。また、試験体下縁部に、ゲージ長100mmのπ型ゲージをCFSの接着長全長にわたって連続的にとりつけ、100mm区間各点におけるひび割れ幅を含む伸び量を計測した。また、荷重の増加ともなうひび割れの発生とその進展を観察した。

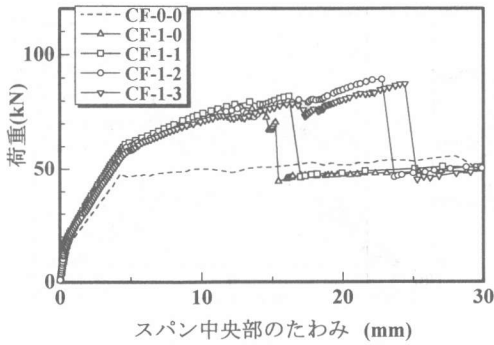


図-2 Aシリーズ, CFS 1層荷重-たわみ曲線

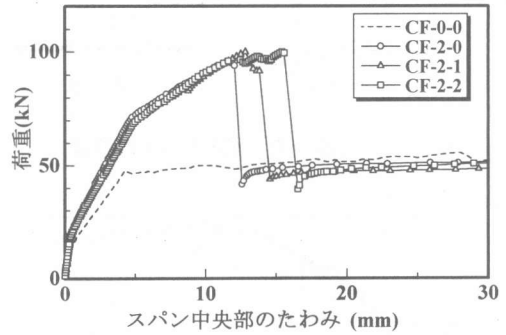


図-3 Aシリーズ, CFS 2層荷重-たわみ曲線

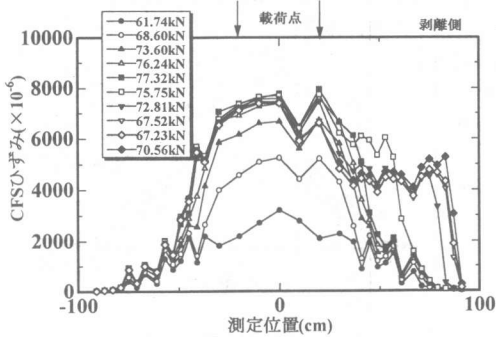


図-4 Aシリーズ, CF-1-0のCFSひずみ分布

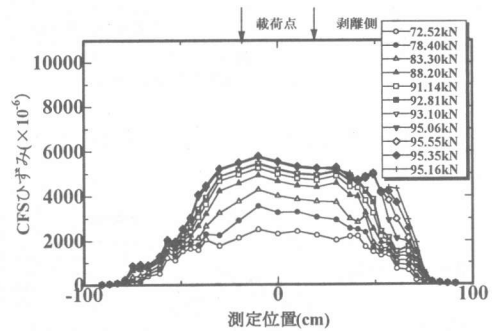


図-5 Aシリーズ, CF-2-0のCFSひずみ分布

4. Aシリーズ実験結果

図-2は、CFS曲げ補強1層の場合の荷重-たわみ曲線である。たわみはスパン中央部のたわみを示す。CFSで曲げ補強した分、鉄筋降伏時の荷重は増加していることがわかる。その後荷重は増加していくが、急激な荷重低下がみられ、この時点でCFSの剥離が生じた。剥離はコンクリート表層部で起こり、剥離したCFSの表面には細骨材が付着していた。このCFS剥離時の荷重とその時点のたわみ量は、端部増貼り補強の層数の増加とともに増加しており、端部増貼り補強効果があったといえる。しかしながら、上縁コンクリートの圧壊に至るまでの定着効果は見られなかった。

図-3は、CFS曲げ補強2層の場合の荷重-たわみ曲線である。CFS曲げ補強1層の場合よりも剥離時の荷重は、わずかに増加しているものの端部増貼り補強の効果はほとんどみられない。

図-4はCFS曲げ補強1層の場合のひずみ分布

であるが、載荷点近傍で剥離が開始しはじめた時点から、ひずみ値一定の領域が、わずかな荷重増加をともないながら、支点方向へ移行しているのが観察される。しかしながら、図-5に示すCFS曲げ補強2層の結果では、上記のような挙動は観察されていない。これは、両者の間で剥離モードの違いがあるからと考えられる。すなわち、図-4に示すような剥離挙動が観察されるのは図-6に示す面内せん断によるモードIIの剥離であり、図-5の場合には、せん断力などにより面に直角方向のずれが生じることに起因するモードIの剥離であるため、急激な剥離に至ったものと考えられる²⁾。剥離モードの違いは、上記のひずみ分布による判定と、モードIの場合には、剥離後のCFSに剥離開始点近傍のひび割れ開口部のコンクリートがクサビ状に付着していること、モードIIでは剥離後のCFSへのコンクリート表層部の細骨材が一様に付着していることから両者を区別した。

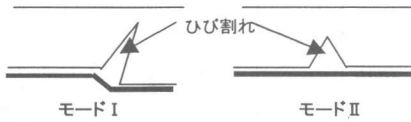


図-6 剥離モードの種類

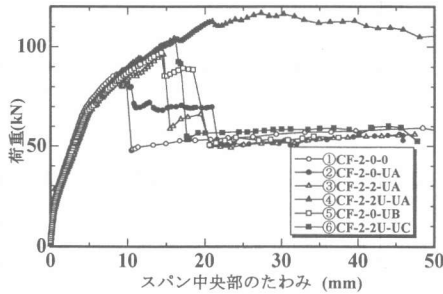


図-7 Bシリーズ、荷重-たわみ曲線

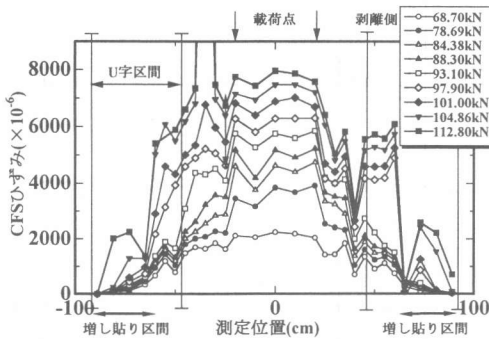


図-8 ④試験体のCFSひずみ分布

以上より、端部増貼り補強効果をも高めるためには、まず、モードIの剥離を防止し、モードIIの剥離へと変化させることが必要と考えられる。

5. Bシリーズ実験結果

本実験の主目的は、U字巻きつけ補強によってモードIの剥離を防止し、モードIIの剥離へ変化させることができるか、同時に端部増貼り補強効果への影響についても検討することにある。

図-7に荷重-たわみ曲線を示す。④試験体では上縁コンクリートが圧壊後、50mm以上のたわみが生じる時点までCFSの剥離はなく、ねばりの

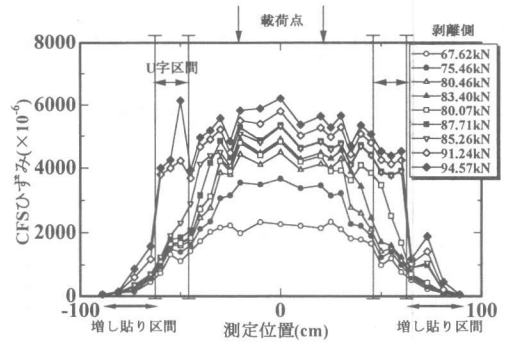


図-9 ③試験体のCFSひずみ分布

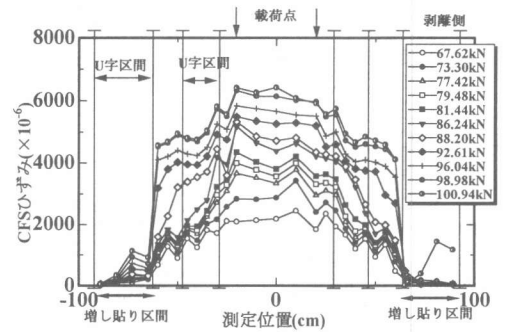


図-10 ⑥試験体のCFSひずみ分布

ある挙動を示し、十分な定着効果が確認できた。この結果は、機械的な定着を用いなくても、CFSのみで十分な定着が可能であることを示している。

図-8は④試験体のCFSのひずみ分布である。図-4と同様に、CFSの剥離にともなうひずみ一定の領域が、支点に向かって進行している様子が観察される。このことは、他のU字巻きつけ補強した③、⑥試験体のひずみ分布(図-8、図-10)も同様であり、U字巻きつけ補強は、モードIIの剥離形態へ変化させる効果があるものと思われる。図-8、図-9および図-10のひずみ分布において、増貼り区間手前まで剥離が進行した後は増貼り区間で急激にひずみ値が低下している。これは増貼り区間の付着で、曲げ引張荷重の増加に抵抗していることを示している。その後の荷重の増加にともなって、増貼り区間が付着限界に達した段階で、剥離が生じると考えられる。U字巻きつけ補強によって、モードII剥離となった増貼り補

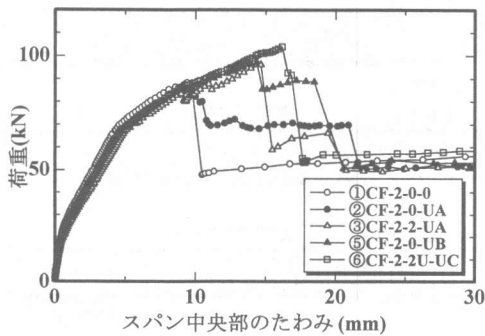


図-11 U字巻きつけ補強 荷重-たわみ曲線

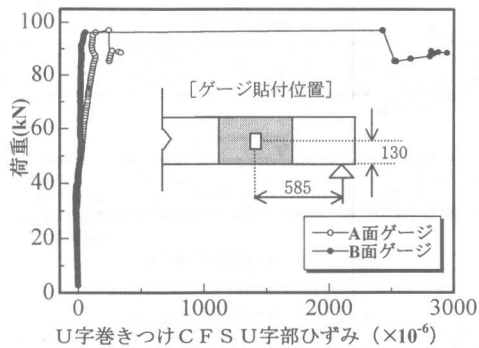


図-12 ⑤試験体U字巻きつけ部側面縦ひずみ

強試験体では、剥離時の荷重が増加していることが図-7で確認できる。

図-11には、特にU字巻きつけ補強効果に着目した試験体の荷重-たわみ曲線を示した。②、③、⑤試験体では、曲げ補強用CFSの剥離後急激な荷重低下は起こらず、低下したほぼ一定の荷重レベルでたわみが増加している。これは図-12に示すU字巻きつけ部側面の縦ひずみの挙動からわかるように、曲げ補強用CFSの剥離後より、試験体側面のU字巻きつけ部の付着で抵抗しているからだと考えられる。なお、この付着抵抗力は、U字巻きの幅が大きいほど大きくなる。曲げ補強用CFSの剥離荷重が、U字巻きで抵抗できる荷重より大きければ、⑥試験体のように、端部増貼り部のU字巻きつけ部では付着抵抗できず、最大荷重後ただちに荷重が低下することになる。

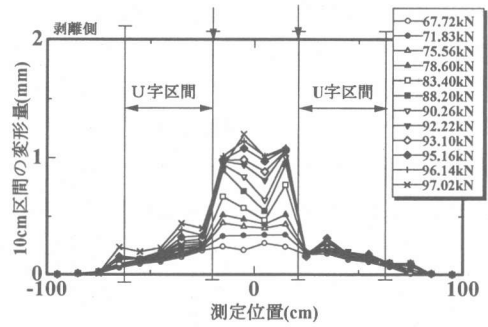


図-13 変位分布図 (⑤試験体変形)

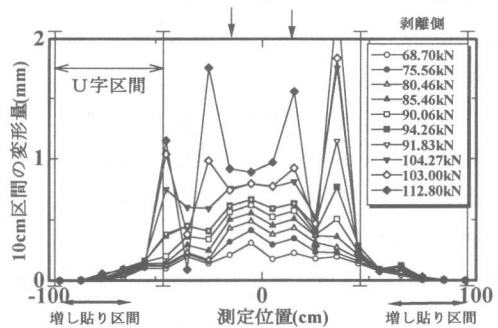


図-14 変位分布図 (④試験体変形)

6. 端部増貼り補強とU字巻きつけ補強の補強効果に関する考察

U字巻きつけ補強により、曲げ補強用CFSの剥離状態をモードIIにでき、定着部の剥離後には、試験体側面のU字巻きつけ部の付着で抵抗できることが上記の実験結果から明らかになった。

図-11から、⑤試験体の剥離荷重は③試験体とほぼ同じであり、U字巻きつけ補強が端部増貼り補強と同様の補強効果を発揮していると考えられる。④試験体では、端部増貼り区間のU字巻きつけ補強と通常のU字巻きつけ補強が、見かけ上連続的に配置され、幅が広がったことで、上記のような補強効果が発揮されたこと、さらに、5.で述べたように、仮に端部増貼り区間で剥離が生じても、U字巻きつけ幅が大きければ、側面のU字巻きつけ部分で抵抗できることから、結果的に

ねばりのある挙動を示し、十分な定着効果が発揮できたものと考えられる。

図-13は、 π 型ゲージで計測した⑤試験体の変形量の分布図である。試験体下縁における100mm区間のひび割れ幅を含む伸び量の分布図で、定性的には曲率分布とみることでもできる。同図より、U字巻きつけ部での変位量は極端に小さくなっていることがわかる。このことは、図-14に示す④試験体の変位分布図においても、また他の試験体のU字巻きつけ部においても同様のことが言え、図-15に示すひび割れ図のU字巻きつけ部での曲げひび割れは観察されなかったこととも対応している。このようなU字巻きつけ補強の特徴について、以下のような考察を行った。

表-2はRC断面とCFSの積層合成断面³⁾における曲げ剛性の比率である。試験体中央部では引張側コンクリートを無視したRC断面と仮定し、その曲げ剛性を基準の1とした。全断面有効とした場合には、ひび割れ断面の約6.8倍もの曲げ剛性となっている。U字巻きつけ補強した場合には初期の曲げひび割れ発生から、曲げ剛性の小さな試験体中央付近に曲げ変形が集中しやすくなったことが考えられる。一方、局所的に曲げ補強用CFSの剥離が発生した場合、CFSの積層板としての曲げ剛性(D_{11})³⁾は、U字巻きつけ補強部では試験体中央部の1.86倍であり、端部増貼り補強とU字巻きつけ部では9.81倍となって、中央部の方が変形しやすいと言える。さらに、U字巻きつけ補強はせん断補強としても機能し、曲げせん断ひび割れの発生を抑制していると考えられる。

7. 結論

増貼り補強効果は、剥離モードIIの場合で発揮され、U字巻きつけ補強は剥離モードを変化させる効果がある。また、端部増貼り補強とU字巻きつけ補強を適切に組み合わせることによって、機械的定着を用いなくとも、CFS本来の特性をより効果的に発揮できる確実な定着法が可能であることがわかった。

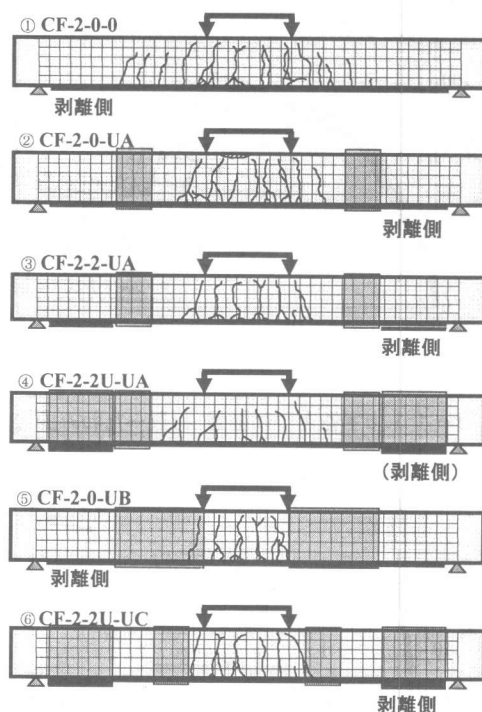


図-15 ひび割れ性状

表-2 曲げ剛性の比率

RC断面の状態とCFS積層状態	曲げ剛性の比率
RCひび割れ断面, CFS2枚 ($0^\circ / 0^\circ$)	1.00
RC全断面有効, CFS3枚 ($0^\circ / 0^\circ / 90^\circ$)	6.77
RC全断面有効, CFS5枚 ($0^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ$)	6.80

謝辞：本研究の一部は、平成11年度科学研究費補助金（基盤研究（A）（I））、研究代表者：埼玉大学 町田篤彦教授）によって実施したものである。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岳尾弘洋ほか：せん断スパン比を変化させたC FRP補強梁の曲げ載荷試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp.205-210, 1999.6
- 2) 堀井 秀之ほか：高性能材料の開発と破壊の力学，コンクリート工学，Vol.37, No.9, pp.67-73, 1999.9
- 3) 福田 博，邊 吾一：複合材料の力学序説，古今書院，1989