

論文 曲げ補強用炭素繊維シートの剥離機構と定着法に関する研究

久保田慶太*¹・原田哲夫*²・永藤政敏*³・岳尾弘洋*⁴

要旨：曲げ補強用炭素繊維シートの端部定着法として、U字巻き付け補強と端部増貼り補強の組み合わせによって、その効果が発揮できることを確認している。しかし、剥離進展メカニズムおよび剥離防止に対する補強効果については、必ずしも明確にできていない。本研究は上記のことを明らかにするために、RCはりの曲げ載荷試験により実験的な検討を行った。その結果、曲げ補強用CFSの剥離の発生起点は、鉄筋降伏後、曲げひび割れに付随した付着斜めひび割れであることを確認した。また、剥離の進展をU字巻き付けと増貼りによってどのように緩和、あるいは防止できるかを明らかにした。

キーワード：炭素繊維シート、曲げ補強、定着、剥離、付着、RCはり

1. 序論

炭素繊維シート（以下 CFS と呼ぶ）を RC はり部材の曲げ補強に使用する場合、接着長さをいくら長くしても、剥離発生荷重及び終局荷重は増大しないことが分かっている¹⁾。そのため、端部をアンカーボルトなどで定着し、剥離の進展を防止する機械的定着法も存在する。しかし、筆者らは、「柔らかいものには、柔らかいもので定着する」という考えに基づき、CFS のような柔らかい材料には、それと同一の性質を有する材料を用いて定着する端部定着法の検討を行ってきている。

これまでの研究で、「端部増貼り補強」と「U字巻き付け補強」の組み合わせによって、端部定着法が有効であることを確認している²⁾。しかし、RCはりの曲げ補強におけるCFSの剥離とその剥離進展メカニズムについては、明らかにされていない。また、増貼り補強とU字巻き付け補強を組み合わせた端部定着法が剥離に対しどのように機能するのかを、必ずしも明確にはできていない。本研究ではこれらのことを解明するために実験的な検討を行った。

2. 試験体と試験方法

実験は昨年度のA, Bシリーズに続き, C, D, Eシリーズに分けて行った。全試験体とも断面寸法は同一であり、引張鉄筋比を0.704% (2-D13 降伏強度 390 N/mm², 引張強度 529 N/mm²) とし、スターラップを100mm間隔で配置したスパン2000mmの単純支持RC試験体である。使用したコンクリートの特性は、圧縮強度 37.0N/mm², ヤング係数 29.7kN/mm²であった。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¹⁾。また、曲げ補強用CFSの層数を2層とした。増貼り区間は、一様に300mmである。試験体図を図-1に示す。U字巻き付け位置は、図-2以降にひび割れ図と併せて記す。試験方法は、等曲げ区間400mmの2点載荷で、曲げ圧壊または、CFSの剥離で終局に至るまで漸増載荷した。曲げ補強用CFSの剥離挙動を追跡する目的で、検長30mmのひずみゲージを両端部まで貼付してCFSのひずみ分布を測定した。また、スパン中央部のたわみを変位計で計測した。

*1 長崎大学大学院 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (正会員)
 *2 長崎大学教授 工学部構造工学科 工博 (正会員)
 *3 長崎大学技官 工学部構造工学科 (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)

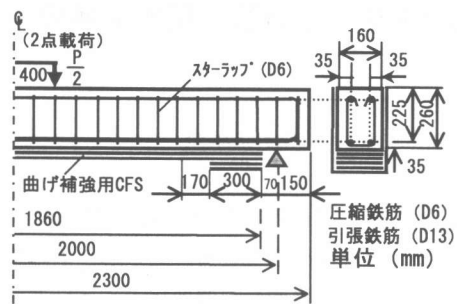


図-1 試験体

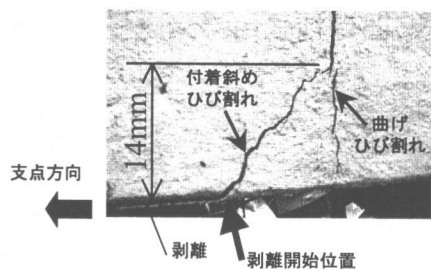
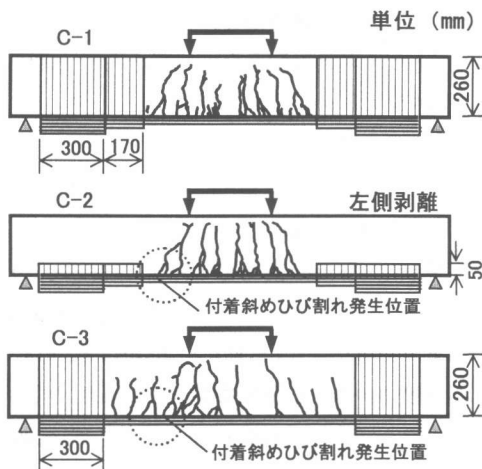


図-3 付着斜めひび割れ



※Cシリーズ：増貼り2層+U字巻き付け1層
図-2 CシリーズU字巻き付け位置とひび割れ図

3. 実験結果と考察

3.1 Cシリーズについて

図-2に、Cシリーズ試験体を示す。Cシリーズでは、U字巻き付け部の高さをパラメータとすることで、曲げ補強用CFSの定着効果がどのように発揮できるかを明らかにするためのものである。A、Bシリーズで荷重点近傍(170mm区間)のU字巻き付け部は急激な剥離を抑制する効果があることが分かっている²⁾。しかし、U字巻き付けの高さが剥離抑制にどのように影響するのかについては、せん断補強効果が加わる可能性もあり明らかでない。今回、U字巻き付け部の高さを変化させることでどのような影響があるのかを検討した。

Bシリーズでは確認できなかったが、今回新たに、荷重点と荷重点から45度区間内に発生

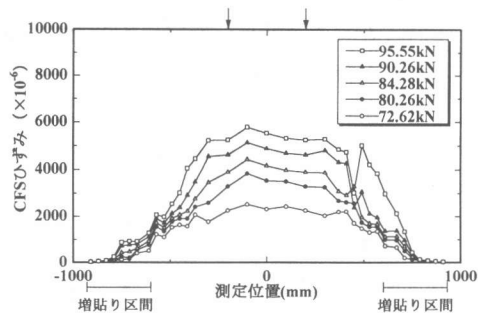


図-4 モードI剥離の下面CFSひずみ分布
Aシリーズ(CF-2-0-0)

する曲げひび割れに付随して、図-3に示すようなひび割れ(以下 付着斜めひび割れと呼ぶ)が剥離の発生起点となることが分かった。このひび割れは主筋の降伏後に発生する。付着斜めひび割れを起点とする剥離は、支点方向に瞬時に進行する。A、Bシリーズでは、この急激な剥離をモードIと定義した²⁾。図-4に上記のように剥離が進行したAシリーズ試験体(CF-2-0-0)の下面CFSひずみ分布を示す。同図では、剥離部のアンボンド状態が支点部へ進行していく様子はひずみ分布に現れていない。増貼り補強のみでこの急激な剥離を防止することができず、付着斜めひび割れの発生とほぼ同時に急激な荷重低下を引き起こしたのである²⁾。

図-5の下面CFSひずみ分布では、荷重の増加とともに剥離にともなうアンボンド区間が支点部へ進行していく様子が見られる。このことより、付着斜めひび割れ近傍のU字巻き付け補強(170mm区間U字補強)を行うことで、急激な剥離が緩和されることが分かる。また、このこ

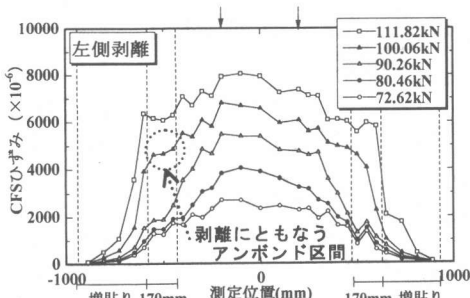


図-5 C-2 下面 CFS ひずみ分布

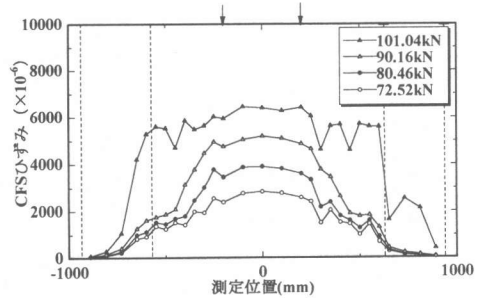


図-6 C-3 下面 CFS ひずみ分布

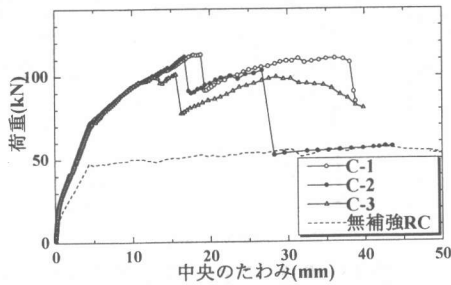


図-7 Cシリーズ 荷重～たわみ曲線

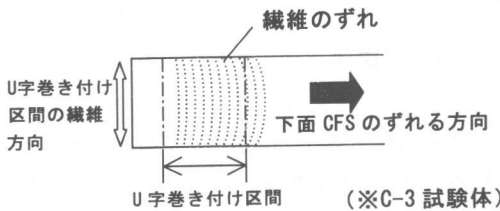
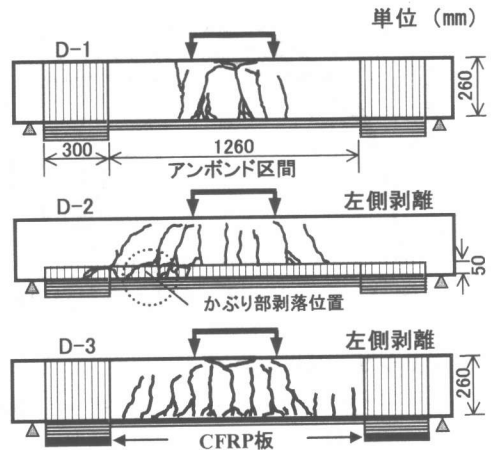


図-8 U字巻き付け部下面の CFS 繊維状態

とはU字巻き付け高さには関係しないことが、C-1、C-2の実験結果を比較することにより分かった。170mm区間U字補強がない場合(C-3)も、付着斜めひび割れ発生にともなう急激な剥離は、端部の300mm位置のU字巻き付けと増貼りにより緩和される。このことは、図-6において両端増貼り部でひずみ値が極めて小さな値を示していることより分かる。しかしながら、上記のようにU字巻き付けと増貼りにより端部補強した場合でも、荷重の増加とともに最終的には、曲げ補強用CFSの剥離は端部にまで進行する。この時点で、図-7のように一旦、荷重の低下が見られる。しかし、下面CFS全体が剥離してアン



※Dシリーズ：増貼り2層+U字巻き付け1層

図-9 DシリーズU字巻き付け位置とひび割れ図

ボンド状態になった後、U字巻き付け部下面と曲げ補強用CFSとは十分接着しており、かつ、U字巻き付け部側面とコンクリートとの付着も十分なために、曲げモーメントに抵抗でき、一旦荷重が低下した後も図-7のように荷重の増加が見られる。この場合、上縁コンクリートの曲げ圧壊で終局に至るが、C-2のようにU字巻き付け高さが低く、U字部の付着が十分でない場合は、U字部の剥離で終局に至る。以上述べたことは、図-8のようにU字部下面CFSの繊維がずれていることで確認できる。C-3では、下面CFS全体の剥離後もU字巻き付け部側面の付着によって曲げモーメントに抵抗できるために、U字部下面CFSが中央部に引張られることによって、CFS繊維のずれが生じたのである。

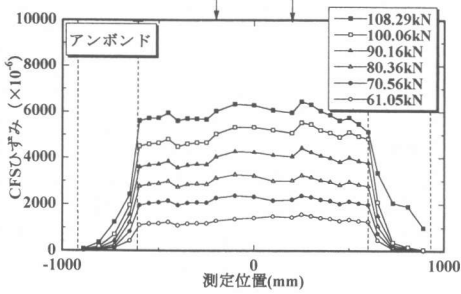


図-10 D-1 下面 CFS ひずみ分布

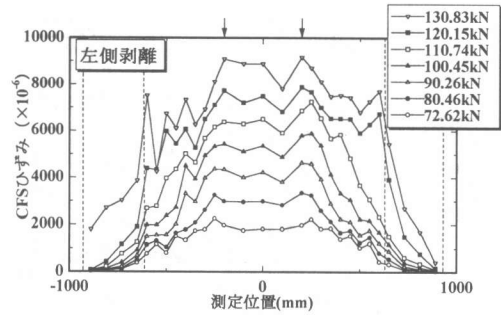


図-11 D-2 下面 CFS ひずみ分布

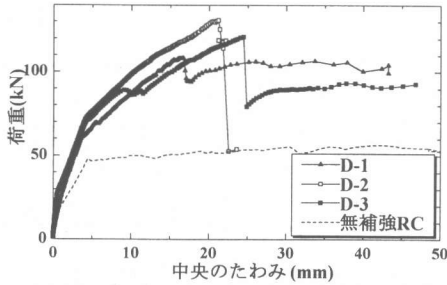


図-12 D シリーズ 荷重～たわみ曲線

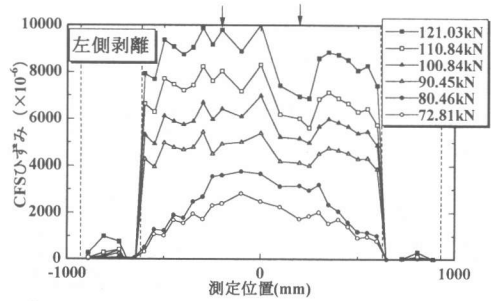


図-13 D-3 下面 CFS ひずみ分布

3.2 D シリーズについて

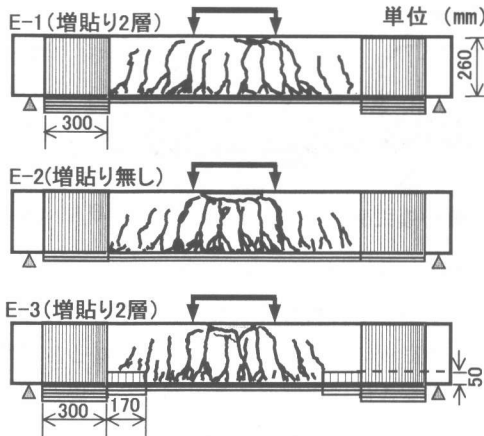
C シリーズの実験結果より、曲げ補強用 CFS の剥離は付着斜めひび割れが原因であることが分かった。D シリーズでは、主としてこの付着斜めひび割れを発生させなければ、剥離状態がどのように変化するかを検討する。図-9 に D シリーズ試験体を示す。CFS とコンクリートの付着は曲げひび割れ発生後も十分であり、付着斜めひび割れは、この付着に基づくひび割れと考えられる。そこで、D-1 では端部増貼り区間 300mm 以外をアンボンドにし、付着斜めひび割れを全く発生させない試験体とした。

D-2 は、スパン全体にわたって U 字巻き付けを高さ 50mm で巻き上げ補強することにより、付着斜めひび割れの発生を当初から防止することを目的とした試験体である。一方、U 字巻き付けと増貼りが併用されている場合には、付着斜めひび割れの急激な剥離進行が、端部で緩和されることが前述の C シリーズで分かった。D-3 試験体では、端部に CFRP 板 (厚さ 2.0mm) を設置し、増貼りの剛性を高めることで急激な剥離

を緩和させるだけでなく、むしろ剥離進行の防止を目的とした試験体である。

D-1 では図-9 に示すように、中央部をアンボンドにすることにより、付着斜めひび割れの発生は見られなかった。しかし、荷重の小さい段階からひび割れが等曲げモーメント区間に集中し、これまでの試験体とは異なるひび割れ性状を示した。図-10 に示すように全面アンボンド状態が、載荷荷重の初期から現れている。D-1 でも、実験後図-8 に示す U 字部下面での CFS 繊維のずれを確認した。

D-2 では、側面部 50mm の U 字巻き付けにより、曲げひび割れの数が他の試験体よりも少なくなっていることが、図-9 のひび割れ図から分かる。図-11 のひずみ分布からは、110kN を超すかなり高い荷重段階まで曲げ補強用 CFS の剥離にともなう支分部へのアンボンド区間の進行は認められない。しかし、最終的には U 字巻き付け部を引き裂き、コンクリートかぶり部の剥落をともなう衝撃的な破壊を呈した。この場合、図-12 の荷重～たわみ曲線では鉄筋降伏後、荷重の増



※Eシリーズ：U字巻き付け2層
 図-14 EシリーズU字巻き付け位置とひび割れ

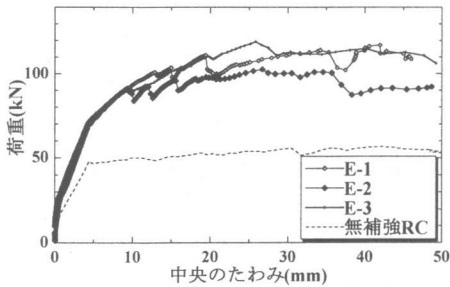


図-15 Eシリーズ 荷重～たわみ曲線

加とともに、たわみはほぼ直線的に増加している。これは、曲げ補強用CFSとコンクリートとの付着が健全であり、CFSが曲げにより生じる引張力を十分に負担しているためと考えられる。しかしながら、かぶりコンクリートの剥落ともなつて衝撃的な破壊をおこし、図-12のように急激な耐力低下を引き起こした。

D-3試験体の場合には、端部増貼り部の剛性が大きいために、その部分ではひずみ値が極端に低下することが図-13より分かる。また、付着斜めひび割れ発生以降、剥離によるアンボンド区間が現れ、端部増貼り部以外全面的にアンボンド状態となっている。さらに、D-1試験体のように荷重の増加とともにひずみ値も一様に増加している。これは、端部増貼り部での定着によって増加荷重による引張力を支えているからであるが、Cシリーズで観察されたような端

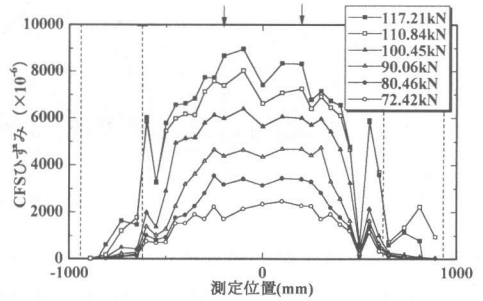


図-16 E-1 下面CFSひずみ分布

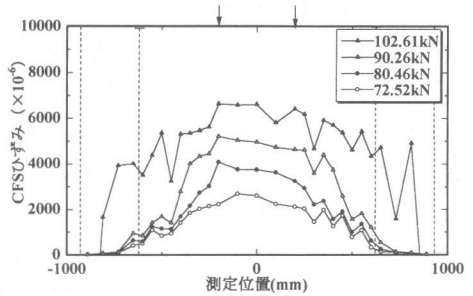


図-17 E-2 下面CFSひずみ分布

部増貼り部での剥離進展はひずみ値の挙動からは判読できない。この場合は、U字部側面の剥離により衝撃的な破壊をした。Dシリーズでは、曲げ補強用CFSの剥離を拘束する補強を施した場合、耐力は増加するが、最終的には急激な荷重低下を引き起こすことが分かった。

3.3 Eシリーズについて

Eシリーズでは、C、Dシリーズの結果に基づき、増貼り補強とU字巻き付け補強による端部定着効果と剥離進展メカニズムをより明確にし、CFSによる曲げ補強のあり方を考察することを目的とした試験体である。図-14にCFSの補強方法とひび割れ図を示す。A、B、C、Dシリーズの実験結果から端部増貼りは、U字巻き付け補強によって効果を発揮することが分かったので、EシリーズではU字巻き付け補強の効果に重点をおき2層巻きとした。その結果、図-15に示すようにわずかな荷重低下を繰り返しながらも、粘りのある荷重～たわみ性状が得られた。この

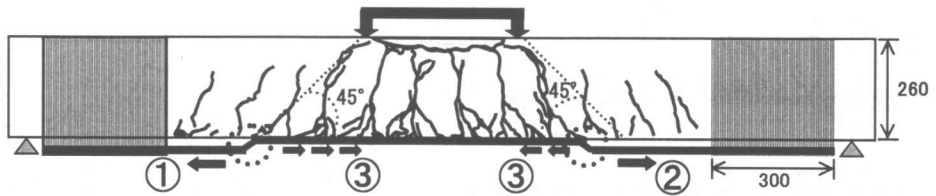


図-18 剥離進展の模式図

単位 (mm)

わずかな荷重低下は剥離進展によるものである。

E-1 試験体では、C-3 試験体のように付着斜めひび割れ発生後の剥離を増貼り部で緩和していることが図-16 より確認できる。ただし、U字巻き付け補強2層と1層ではこの緩和の程度に差は見られない。U字巻き付け補強2層では、1層に比べ荷重低下が少ないことが分かった。

増貼り補強を施していないE-2試験体では、CFSの剥離が端部に進行していることが図-17より分かる。しかしながら、U字部側面の付着で抵抗できるため、わずかの荷重低下を起こすだけで、再び荷重が増加できるのである。

CFSを曲げ補強に適用する場合、付着斜めひび割れの発生自体は避けられないものとしてとらえ、それによって引き起こされる急激な剥離をU字巻き付け補強と増貼り補強とによって緩和し、端部への剥離進行を緩やかにさせることが重要であると考えられる。以上のことから、曲げ補強用CFSの剥離進展を許容する端部定着が重要であることが分かった。

4. 剥離進展メカニズム

今回の実験で明らかとなった剥離進展メカニズムは以下の通りである。図-18 にその模式図を示す。①鉄筋降伏後に図-3のような曲げひび割れに付随し発生する付着斜めひび割れが起点となり、支点部に向かってCFSの剥離が進行する。②その後、もう一方の側面にも付着斜めひび割れが発生し、同様に剥離が進行する。③この時点で荷重低下がおこる場合はスパン中央部でのCFSの剥離が進行する。④端部定着部以外の曲げ補強用CFS全面で剥離が生じてアンボンド状態となった後は、端部定着部下面のCFSの

剥離が進行する。⑤その時、曲げモーメントによるCFSの引張力は、端部のU字巻き付け部側面の定着により、抵抗することになる。⑥端部U字巻き付け部側面の定着が十分な場合は、上縁コンクリートの圧壊で終局に至る。

5. 結論

- (1) 曲げ補強用CFSの進行性の剥離は、曲げひび割れに付随した付着斜めひび割れを起点とすることが分かった。また、U字巻き付け補強と増貼り補強を行った場合の剥離進展メカニズムも明らかにすることができた。
- (2) 付着斜めひび割れを拘束するためにスパン全長にわたってU字巻き付け補強を行った場合は、耐力は増加するものの、最終的にはかぶりコンクリートの剥落を伴う衝撃的な破壊性状を示した。
- (3) 端部増貼り補強とU字巻き付け補強を適切に組み合わせることにより、下面CFSの剥離進展を遅らせ、CFS全面剥離後は、U字巻き付け部側面の付着で抵抗させることにより、粘りのある荷重～たわみ性状が得られることが分かった。

参考文献

- 1) 岳尾弘洋ほか：CFRP接着工法における炭素繊維シートへの付着特性、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 19, No. 2, pp1599-1604, 1997. 6
- 2) 原田、永藤、久保田、岳尾：端部増貼り補強による炭素繊維シートへの定着耐力向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp469-474, 2000. 6