

論文 連続繊維による RC 部材の曲げ・せん断補強効果に関する 実験的研究

市川 聖芳*¹ 呉 智深*²

要旨：本研究では、炭素繊維によって補強した鉄筋コンクリート梁部材の曲げ・せん断破壊のメカニズムを究明するために、補強対象部材としてせん断破壊特性やバランス破壊特性(曲げ：せん断破壊比 $\beta=1.0$)を有する供試体を用いて曲げ補強とせん断補強の両方に対する補強を行い、一連の実験を行った。実験結果から分かるように、スターラップの有無に関わらずせん断補強として側面に CFS を貼付することにより大幅な耐力の向上がみられた。しかし、曲げ補強としての底面接着により補強対象部材自身の変形挙動を脆性にシフトする傾向があり特に脆性な梁部材に対して部材の変形能力が大きく低下してしまうことが実験的に明らかになった。

キーワード：炭素繊維シート,せん断補強,RC梁,脆性破壊

1. はじめに

炭素繊維シート(CFS)を用いた鉄筋コンクリート構造物への補強工法は、近年、数多くの研究成果によってその有効性が確認されている^{1), 2)}。CFS は、鉄筋よりも優れた材料特性を数多く有しているほか、良好な施工性、工期短縮、設計自由度の増大および耐久性の向上などの面において大きなメリットが生じてくる。そして、これを用いた既存コンクリート構造物への耐震補強というものが主流になりつつある。現状として、鉄筋コンクリート構造部材の曲げ・せん断・圧縮・劣化防止補強にかなり使われている。しかしながら、その一方で実質的な設計法が確立されていないのも現状である。CFS・鉄筋・コンクリートの3種類の材料からなる構造物の複合化により、その破壊形式は多岐にわたる。代表的なものには、①鉄筋降伏-CFS 破断型、②鉄筋降伏-コンクリート圧縮破壊型、③コンクリートの圧縮破壊、④接着CFSの剥離進展の卓越による最終的な剥離破壊型などが挙げられる。これらの破壊形式を正しく予測できないと、実際に現場で不的確な施工を行ってしまい、場合によっては補強したはずの構造物を脆性破壊させてしまう可能性があることも考えられる。

そこで本研究では、耐震補強材として優れた能力を持つCFSを用いた補強工法の、最適な設計指標の確立を目指す一環として、さまざまな実験を行うことにより、CFS補強コンクリート梁部材の複雑な破壊挙動を検証した。具体的には、供試体はせん断補強筋の配置の有無によって分けられ、CFSを供試体の底面および側面にエポキシ樹脂接着剤によって接着することにより、曲げおよびせん断補強材としての効果を持たせ、その破壊挙動についての考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状・寸法

本研究における実験では、2種類の供試体(スターラップの有るもの8本と無いもの5本)を用い、それぞれにCFSを、曲げ・せん断補強材として、梁底面および側面にエポキシ樹脂接着剤を用いて貼付し、3点曲げ試験によって初期ひび割れ荷重、補強CFSの接着面での剥離又は局部破断の確認、最終的な破壊荷重と破壊形式、およびひび割れの発生と進展過程、並びに剥離の発生と進展過程などについて詳細な測定・観察を行った。図-1に主筋およびスターラップの配置、さらにアンカボルトの打設位置に関する供試体の詳細を示す。

*1 茨城大学 工学部 都市システム工学科

*2 工博 茨城大学助教授 工学部 都市システム工学科

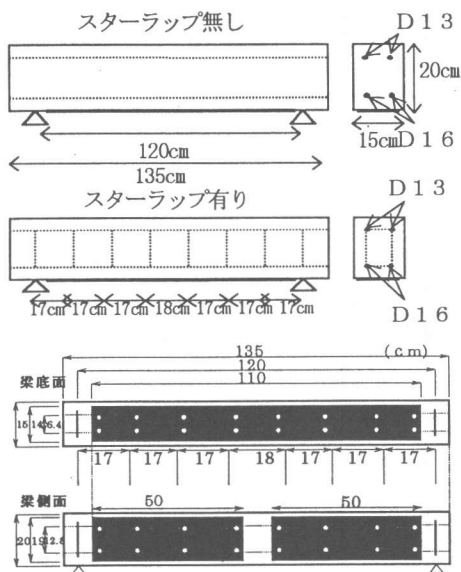


図-1 供試体詳細

2. 2 材料特性

供試体の製作に使用したコンクリートと炭素繊維 (PAN 系高強度) およびエポキシ樹脂, 主鉄筋・スタラップの基本的な材料特性を表-1 に示す。

表-1 材料特性

材料	特性	特性値
コンクリート	圧縮強度 Mpa	31.4
	ヤング係数 Gpa	32.3
炭素繊維	引張強度 Gpa	3.28
	ヤング係数 Gpa	230
	破断伸び (%)	1
	比重 (g/cm ³)	1.82
	繊維目付 (g/m ²)	200
エポキシ樹脂	ヤング係数 (Gpa)	3.43

2. 3 実験供試体の補強計画

本研究では合計 13 本の供試体を用いて実験を行った。CFS による補強内容については、表-2 に示す。底面及び側面にエポキシ樹脂を用いて CFS を貼付 (接着面積は底面 CFS が長さ 110cm, 幅 14cm。側面 CFS は長さ 50cm, 高さ 19cm とする) して、曲げ・せん断補強をする。使用する CFS については、スタラップのない供試体では底面及び側面に 1 枚, スタラップの有る供試体では、側面については 1 枚だが、底面については 1 枚, 2 枚, 3 枚と枚数を変化させて実験を行った。

側面に貼付した CFS については、中央部はせん断補強効果が少ないことや、側面のひび割れの進展や破壊状況を観察するため CFS を貼付しないことにした。さらに、今回の実験計画では特に、底面の CFS のひび割れによる剥離の発生および剥離の進行を抑制するために、剥離の予想される場所にアンカボルト (直径 6mm, 深さ 50mm) を打設し、CFS との間はゴムによって保護し、補強効果を十分発揮できるようにした。打設位置については図-1 に示すとおりだが、No. 11 に関しては底面の両端部のみボルト打設である。

2. 4 荷重方法

実験は 1 点集中荷重 (支点間隔=120cm) として、荷重を破壊まで荷重制御方式によって単調増加させる。荷重速度は 1.962kN/min, 変位およびひずみの測定は 1 分ごとに行い、CFS・主鉄筋・コンクリートのひずみおよび梁中央部の変位を測定する。CFS の剥離に関しては、CFS 内部での剥離進展は目視できないため、圧電セリックスを応用した衝撃センサーを用いて観察することにした³⁾

表-2 供試体補強計画

No	スタラップ	CFS による補強内容	略記号
1	無し	無補強	CN
2	無し	底面 CFS	BC
3	無し	底面 CFS+ボルト	BCB
4	無し	底面 CFS+ボルト&側面 CFS	BCB-SC
5	無し	底面 CFS+ボルト&側面 CFS+ボルト	BCB-SCB
6	有り	無補強	CN/S
6'	有り	無補強	CN/S'
7	有り	底面 CFS&側面 CFS	BC-SC/S
8	有り	底面 CFS2 層	BC2/S
9	有り	底面 CFS2 層+ボルト	BC2B/S
10	有り	底面 CFS2 層+ボルト&側面 CFS+ボルト	BC2B-SCB/S
11	有り	底面 CFS3 層+ボルト(端部のみ)&側面 CFS	BC3B'-SC/S
12	有り	底面 CFS3 層+ボルト&側面 CFS	BC3B-SC/S

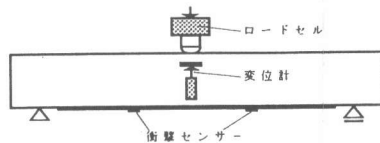


図-2 試験方法

3. 実験結果

3. 1 実験結果一覧

実験結果として、初期ひび割れ発生荷重、破壊荷重、破壊形式を表-3 に示す。供試体は2種類であり、スターラップ無しの補強対象梁部材の破壊形式はせん断破壊となっており、一方スターラップ有りの場合では、曲げひび割れとせん断ひび割れが同時に卓越した進展を有するバランス破壊となっている。また、実験結果で推定できるように、本実験でのCFS側面せん断補強により、底面の曲げ補強を実施するかどうかに関わらず、補強対象梁部材のせん断耐力性状が改善され、鉄筋・スターラップの有無に関わらず全て曲げ破壊形式に変化することが明らかである。破壊時において梁上縁コンクリートの圧縮応力が、圧縮強度に達していることも確認されている。

表-3 実験結果一覧表

(a) スターラップ無し

No	略記号	ひび割れ荷重	破壊荷重	破壊形式
1	NC	27.86 kN	74.56 kN	B
2	BC	22.27 kN	70.34 kN	B
3	BCB	25.11 kN	86.03 kN	B/C1
4	BCB-SC	24.53 kN	112.32 kN	A/D
5	BCB-SCB	26.49 kN	113.80 kN	A/D

(b) スターラップ有り

No	略記号	ひび割れ荷重	破壊荷重	破壊形式
6	NC/S	22.56 kN	92.31 kN	A&B
6'	NC/S'	19.62 kN	98.39 kN	A&B
7	BC-SC/S	26.49 kN	119.39 kN	A/D
8	BC2/S	24.53 kN	114.78 kN	B/C1
9	BC2B/S	19.62 kN	113.50 kN	B/C1
10	BS2B-SCB/S	23.54 kN	134.79 kN	A/D
11	BC3B'-SC/S	27.47 kN	147.74 kN	A/C2
12	BC3B-SC/S	27.47 kN	157.74 kN	A/C2

[破壊形式の略記号説明]

A：曲げ破壊

B：せん断破壊

C1：底面 CFS 剥離による破壊(せん断ひび割れ端部からの剥離進展)

C2：底面 CFS 剥離による破壊(曲げひび割れ端部からの剥離進展)

D：底面 CFS の破断を有するもの

A&B：バランス破壊(曲げとせん断)

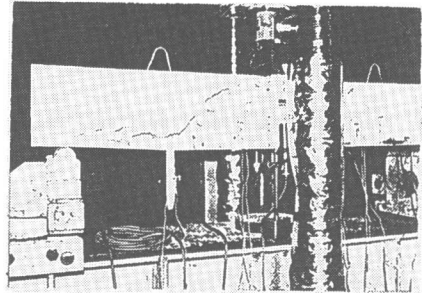


写真-1 破壊状況 No.1(せん断破壊)

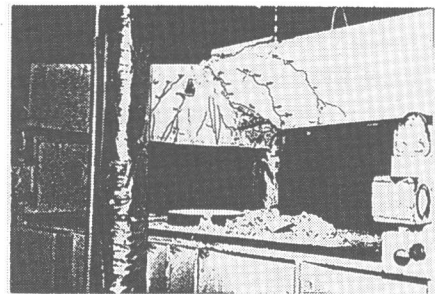


写真-2 破壊状況 No.6(バランス破壊)

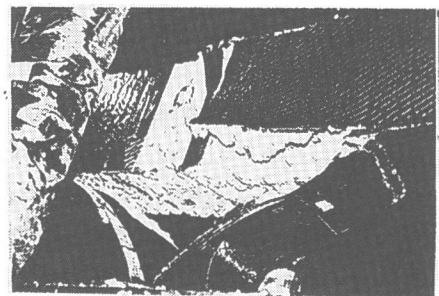


写真-3 破壊状況 No.7(曲げ破壊)

3. 2 総合評価

スターラップの入っていない供試体の荷重-変位曲線を図-3に、後述する No.4, No.5, No.6 についての荷重-変位曲線を図-4に、スターラップの入っている供試体の荷重-変位曲線を図-5に示す。なおここでの変位は、梁中央部の上端より50mmのところ測定している。

1) スターラップのない供試体について

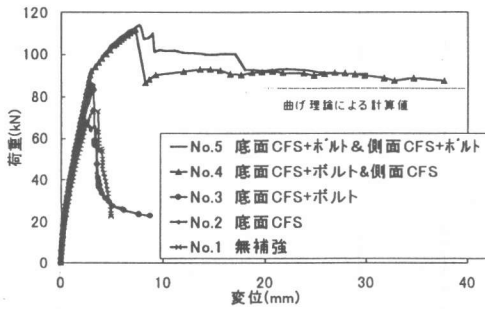


図-3 荷重-変位曲線(スターラップ無し)

図-3のグラフからも分かるように、無補強状態(No. 1)ではせん断力に対する抵抗はコンクリートのみなので非常に小さく、せん断破壊を大きく卓越して最大荷重後に耐力は急激に低下してしまう。CFSを底面に貼付する(No. 2, No. 3)ことによって最大曲げ耐力は少し向上しているが、せん断挙動を改善できないことが容易に理解できる。ここでは、せん断破壊挙動がさらに卓越することになり、最終破壊後の荷重低下がより急激になっている。しかし、底面の曲げ補強を行うと同時に側面にもCFSを貼付(No. 4, No. 5)し、供試体のせん断耐力を強化することによって、最大耐力が向上し、また底面CFSが破断した後も無補強の耐力値レベルを維持できることが明らかである。CFS破断後の梁部材の残留耐力は等価矩形応力ブロックによるコンクリート曲げ理論で計算された無補強供試体の曲げ耐力と比較的等しくなっていることが分かった。つまり、曲げ補強材とせん断補強材の両方より補強された供試体は、側面のCFSせん断補強材により、せん断ひび割れが卓越しているせん断破壊形態から、曲げひび割れの卓越している曲げ破壊機構まで改善され、供試体の曲げ耐力と比べて、より大きなせん断耐力を有している。この状況のもと、曲げ補強材の破断により補強前の供試体に曲げ耐力に戻ることになる。その変形能力はスターラップ有りの無補強供試体(No. 6, No. 6')のものとよく一致しているが、このスターラップ量と比べてもより大きい側面CFSせん断補強量を有しているもので、No. 4と

No. 5供試体のCFSが破断後の終局変形能力は通常の曲げ破壊梁と同様のものになっている。

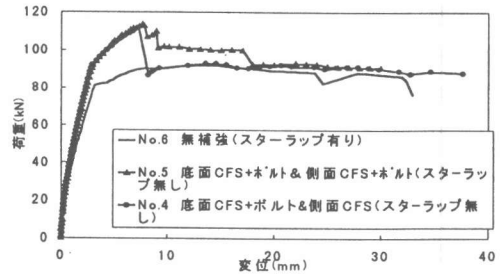


図-4 荷重-変位曲線(No.4, No.5, No.6)

次に、アンカーボルト導入効果に関して、まずNo. 3に関して、コンクリートのせん断ひび割れ端部よりCFSの強いピーリング作用による剥離進展が非常に卓越しており、エポキシ樹脂接着補強およびアンカーボルトの定着補強効果の合計でも防げない剥離破壊形式となっている。一方、No. 4とNo. 5の比較では、側面CFS補強により、底面CFS破断後の急激な耐力低下を緩和していることが確認された。

2) スターラップのある供試体について

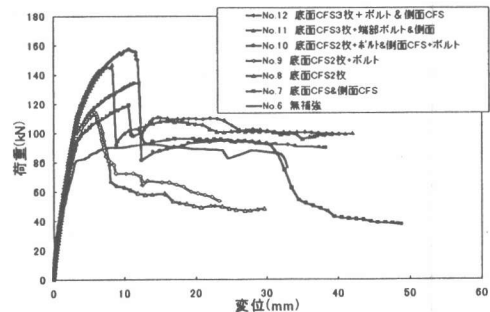
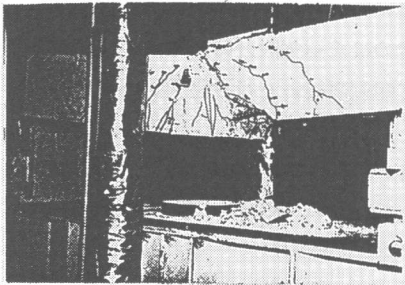


図-5 荷重-変位曲線(スターラップ有り)

スターラップの入っている供試体は、無補強の状態(No. 6)では、せん断ひび割れと曲げひび割れが同時に進行していくバランス破壊を起こす特殊な供試体であった。この供試体に、底面のみCFSで補強した場合(No. 8, No. 9)、破壊荷重は向上するが、破壊形式は無補強の場合のバランス破壊形態と比べてせん断ひび割れの進展がより卓越する事になり、最終的にせん断破壊が生

じると共に、コンクリートせん断ひび割れ端部よりCFSの顕著なピーリングによる剥離破壊をもたらした(写真-4参照)。破壊後は、無補強状態よりも残留耐力が低くなるという結果になった。そこで次に、側面にもCFSを貼付してせん断力を強めた場合の実験を行う。底面へのCFS補強が1枚(No.7)や2枚(No.10)の場合では、せん断補強量に比べて曲げ補強量が少ないため、底面CFSが能力限界に達して破断し、耐力が急激に減少し、そして無補強バランス破壊供試体の変形挙動(バランス破壊)と比べて、より曲げ破壊挙動を示している。これは側面へのCFSせん断補強により、もともとのバランス破壊を起こす供試体のせん断耐力の増加量が底面のCFS曲げ補強による曲げ耐力増加量より大きくなっていることを明らかにしている。



破壊状況の比較 No.6(バランス破壊)

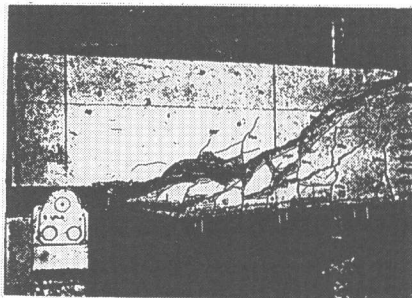


写真-4破壊状況の比較 No.9(せん断破壊)

これらのことから、曲げ破壊形式を有する梁部材に対して、底面CFSによる曲げ補強は、多少部材自身の曲げ挙動を脆性的な挙動に方向をソフトさせる可能性があると思われるが、一定の余裕を持っておけば、最終的にCFSの破断による破壊後、補強供試体の残留耐力や変形能力を

補強前のレベルまで維持することができる。

実験では、CFSを3枚重ね(No.11, No.12)にすることによって、底面CFSの破断を防ぐことができた。しかし、3枚重ねの場合、補強された曲げ・せん断強度に対して、相対的にエポキシ樹脂の接着能力が弱くなり、底面CFSがコンクリート曲げひび割れの端部から発生しているコンクリートとの接着界面の剥離進展が非常に卓越し、最終的に剥離破壊が生じてしまう(写真-5参照)。そして、底面CFSが破断したときと同様に、やはり耐力が急激に低下する。ただ、底面CFSが破断又は剥離した後でも、底面のみ補強した場合とは異なり、曲げに対して無補強程度の耐力と変形能力は維持することができる。また、グラフからはCFSの枚数の増加によって補強供試体の剛性が増加していることが分かる。これは側面へのCFS補強に影響されない。以上のことから、鉄筋コンクリート曲げ補強に対しCFS曲げ補強量の上限が存在していることを指摘しておきたい。次に、アンカーボルト導入効果を考察してみる。まずNo.10に関して、底面の2枚のCFSの剥離進展がアンカーボルトによって完全に拘束されたため、梁中央のコンクリート曲げひび割れ端部のCFS引張応力集中が通常のものより少し大きくなっていることが観察された。しかし、底面に3枚のCFS接着を行ったNo.11(底面端部にボルト打設)、No.12(底面全面にボルト打設)に関しては、コンクリート曲げひび割れ端部からのCFS剥離進展が非常に顕著になり、通常、アンカーボルトの定着効果は非常に優れているにもかかわらず、最終剥離破壊を防ぐことができなかった。また、上記のスターアップのない供試体No.3と同様にスターアップのある供試体No.9に関して、やはりコンクリートせん断ひび割れ端部より発生した顕著なCFSピーリングによる剥離進展が、アンカーボルトだけでは防げなかったのである。これらのことから、剥離破壊は一種の代表的な破壊現象であり、せん断破壊や曲げ破壊に対する設計と同レベルで耐剥離破壊設計も重要視すべきであると思われる。一方、側面アンカーボルトの導入に対して、補強供試体のひび

割れ荷重や破壊荷重に多少効果が生じているが、側面の剥離現象が明確でないので、側面に打設したアンカーボルトが大きな効力を発したとは言いきれない。

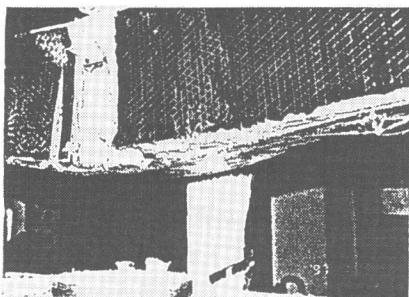


写真-5 破壊状況 No.11(剥離破壊)

4. 結論

本研究は、鉄筋コンクリート構造物の炭素繊維シートによる曲げ・せん断補強効果、そして曲げ・せん断・剥離破壊のメカニズムを究明するためにせん断破壊特性やバランス破壊特性を有する鉄筋コンクリート梁供試体を用いて、一連の実験を行った。以下に、この研究によって得られたことについてまとめる。

- 1)せん断破壊特性を有する鉄筋コンクリート梁へのCFSによる補強に関しては、まず側面貼り付けのようなせん断補強により、少なくとも補強設計耐力レベルまでのせん断耐力を強化しなければならない。底面だけの補強では、破壊荷重の増加はわずかに見られるが、破壊後の挙動はさらに脆性的な方向に悪化されている。
- 2)バランス破壊特性を有する鉄筋コンクリートへのCFSによる補強については、底面だけの曲げ補強では耐力は一時的に増加するが、最大荷重と共にせん断破壊を起こし、せん断後は急激に耐力が低下して、無補強の状態よりもかなり低くなってしまふ。つまり底面だけのCFS補強は上記のせん断破壊特性を有する鉄筋コンクリート梁への曲げ補強と同様、破壊後は変形能力を大きく悪化していることが分かった。
- 3)底面だけでなく側面にもCFSによる補強をした場合、底面のCFS補強枚数に比例して最大耐力は増加する。さらに、底面CFSが破断又は剥

離した後も、急激に荷重が低下するが、その後は無補強の状態の耐力や、変形能力を維持することができている。従って、せん断耐力を十分に有する構造部材に対する曲げ補強を実施した場合、補強前の挙動と比べて、破壊性状は多少脆性的な方向へシフトする傾向があるが、曲げ耐力の向上およびそれに伴うCFSのせん断や剥離まで増加した変形能力を補強効果設計に取り込むことができると思われる。

4)CFSの補強量の増加などによって、曲げひび割れ端部、またはせん断ひび割れ端部から発生したCFS剥離の卓越した進展による最終剥離破壊形式は、CFSによって補強された鉄筋コンクリート構造物において代表的なものになっており、従来の曲げ破壊およびせん断破壊だけでは区別できないものとなっている。またこの種の破壊に対して通常の定着設計では十分に防げないものもある。これらのことを考慮して、通常の接着補強設計時には、補強設計基準において耐剥離設計を行う必要がある。

謝辞:本研究は文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)(代表者・茨城大学 呉智深, No.08555107)の一環として行われたものである。また、載荷実験や本論文の作成では、茨城大学工学部技官 田名部菊次郎様、松崎智優様にご協力を頂いている。ここに記して関係各位に謝辞を表す次第である。

参考文献

- 1) 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書、(社)コンクリート工学協会、1997.7
- 2) Wu, Z.S.: Research Trends on Retrofitting and Strengthening Concrete Structures by FRP Sheets and Plates, Proc. of Int. Conf. On Fiber Reinforced Concrete, pp.9-20, Nov.1997
- 3) Wu, Z.S. and Tanabe, K. et al.: Interface Crack Propagation in FRP-Strengthened Concrete Structures, Proc. of the third Int. Sym. on Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol.1, pp.319-326, Oct.1997