

論文 せん断スパン比を変化させた CFRP 補強梁の曲げ載荷実験

岳尾 弘洋*1・松下 博通*2・佐川 康貴*3・牛込 敏幸*4

要旨: CFRP 接着工法により曲げ補強した曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート梁供試体を用い、載荷時のせん断スパン比と炭素繊維シート補強量を変化させ曲げ載荷実験を行った。これらの実験パラメーターと各供試体の破壊性状、ひび割れ状況を考察することにより各種破壊パターン分類と補強効果について検討を行った。また、炭素繊維シート端部を増し貼り補強した供試体の耐荷性状についても報告する。

キーワード: CFRP 接着工法, せん断スパン比, CFS 補強量, せん断剥離, ピーリング

1. はじめに

炭素繊維シート（以下 CFS とする。）を接着剤によりコンクリート表面に接着する CFRP 接着工法の補強効果に関する研究が現在盛んに行われている。現在までの研究によれば、両引き試験においては CFS のせん断剥離が代表的な破壊形態として報告されており、曲げ載荷試験においては各種の破壊形態が複合して報告されている¹⁾。また、一方で、CFS のせん断剥離を防止し CFS の強度を十分に発揮させようとした各種定着方法に関する研究も多数見受けられる。

本研究は、曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート梁供試体に CFS を接着し、曲げ載荷時のせん断スパン比（以下 a/d とする）と CFS 補強量を変化させ各種破壊パターンのうち CFS 剥離性状の分類と補強効果を調べることを目的に実験的検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は無補強, CFS 1 層, 2 層, 3 層と補強量を変化させたもの 4 体と, CFS 1 層で a/d

表-1 使用材料の物性

コンクリート			
供試体	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
No.1~No.4	31.3	2.35×10^4	2.65
No.5~No.8	39.0	2.88×10^4	2.85
鉄筋			
	材質	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
主鉄筋(D13)	SD295A	356	2.00×10^5
スターラップ(D6)		340	-
CFS			
目付量 (g/m^2)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
300	0.167	3480	2.30×10^5

を変化させたもの 3 体, およびせん断剥離進行抑制効果を確認するために CFS 貼り付け端部を 2 層に増し貼りしたものの 1 体の合計 8 体である。図-1 に供試体の形状寸法と載荷位置を示す。主鉄筋には D13 (SD295A) を使用し, スターラップは D6 (SD295A) を 10cm 間隔に配置した。表-1 に使用材料の力学的特性を示す。コンクリート打設後 3 週間で CFS を引張側底面にエポキシ樹脂で接着し, 1 週間樹脂の養生を行ったのちに実験を行った。引張側主鉄

*1 ショーボンド建設 (株)

九州支店工事課 (正会員)

*2 九州大学大学院教授

工学研究科建設システム工学専攻 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院

工学研究科建設システム工学専攻

*4 鹿児島県庁土木部

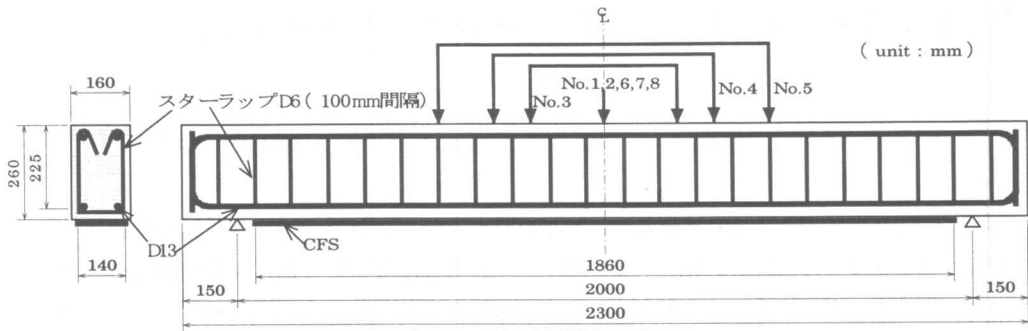


図-1 供試体形状寸法

表-2 供試体種類および実験結果

供試体	補強量	せん断スパン a (mm)	a/d	荷重P(kN)			モーメントM(kN・m)			変位u(mm)		
				ひび割れ発生	鉄筋降伏	最大	ひび割れ発生	鉄筋降伏	最大	ひび割れ発生	鉄筋降伏	最大荷重時
				Pcr	Py	Pmax	Mcr	My	Mmax	ucr	uy	umax
No.1	無補強	1000	4.44	15.8	40.8	45.3	7.9	20.4	22.7	0.87	4.78	37.00*
No.2	1層	800	3.56	15.3	52.0	67.7	7.7	26.0	33.9	0.56	4.84	16.37
No.3				18.7	57.5	76.7	7.5	23.0	30.7	0.90	6.20	19.02
No.4				19.2	65.1	87.0	6.7	22.8	30.5	0.80	6.11	20.64
No.5				23.5	86.5	132.0	6.5	23.8	36.3	0.74	6.37	26.26
No.6	2層	1000	4.44	18.7	52.9	78.6	9.4	26.5	39.3	0.86	4.93	14.32
No.7	3層			19.7	59.1	85.6	9.9	29.6	42.8	0.75	4.74	12.87
No.8	1層+端部増し貼り			16.8	49.2	74.9	8.4	24.6	37.0	0.64	4.50	28.27

*終局時の値

筋と CFS のひずみ分布を測定するために、それぞれ 10cm 間隔で検長 2mm, 30mm のひずみゲージを貼り付けた。

供試体の引張鉄筋比は 0.704% とし、無補強供試体を載荷した場合の曲げ耐力とせん断耐力の比は 0.54 である。曲げ耐力は等価応力ブロックを用いた終局耐力算定法により、せん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書の累加式により求めた。

2.2 実験方法

載荷は油圧式ジャッキにより行った。測定項目はロードセルにより求めた荷重、鉄筋と CFS 表面のひずみ、スパン中央の変位である。変位は梁高中央に設置した変位計により測定した。さらに各荷重段階におけるひび割れ発生状況、CFS の剥離進行状況、および供試体の破壊形態を観察した。

3. 実験結果及び考察

無補強供試体は、鉄筋降伏後コンクリートが

圧壊する一般的な曲げ破壊性状を示した。各 CFS 補強供試体は鉄筋降伏後も CFS が引張力を負担し、荷重が増加した。

各供試体のひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、最大荷重と各荷重時の断面抵抗モーメント、スパン中央位置の変位を表-2 に、各供試体のひび割れ発生状況を図-2 に示す。なお、CFS 補強供試体は CFS 片側が全面剥離した時点で載荷を終えている。剥離面は全てコンクリート表層部の凝集破壊であった。

3.1 a/d の違いによる剥離形態の違い

a/d=4.44, 3.56, 3.11 の供試体は載荷点よりの CFS せん断剥離が CFS 端部まで連続的に広がることにより、また、a/d=2.44 の供試体は曲げせん断ひび割れ段差部よりのピーリング作用²⁾(図-3)による CFS 剥離発生後、全て剥離した。いずれの供試体も全面剥離時には鋭い衝撃音を伴って CFS が脆性的に剥離した。

a/d の違いによる荷重と変位の関係を図-4 に、断面抵抗モーメントと a/d の関係を図-5

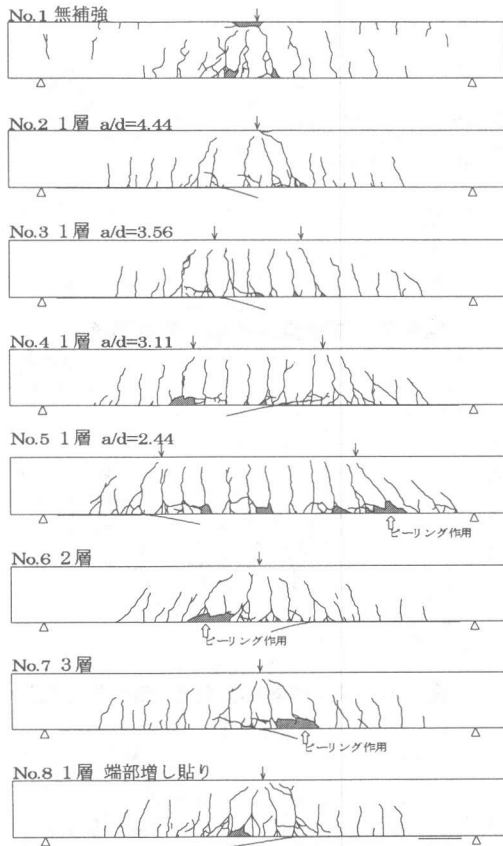


図-2 ひび割れ発生状況図

に示す。図-5より a/d が小さくなるほど CFS 剥離時の変位、最大荷重が大きくなっていることが分かる。また、図-5より $a/d=3.11$ の供試体と $a/d=3.56$ の供試体の CFS 剥離時断面抵抗モーメントはほぼ変わらないが、 $a/d=2.44$ の供試体の値は大幅に大きくなっていることが分かる。これらは、 a/d を小さくすることにより CFS の剥離前に供試体内部のビーム作用が消失しアーチ作用により荷重荷重に抵抗するようになったことによると考えられる。

図-2より、 a/d を小さくすることによりひび割れ性状は曲げひび割れから曲げせん断ひび割れへと移行していることが分かる。また、 $a/d=2.44$ の供試体においてかぶりコンクリートが多く欠落していることよりビーム作用の消失がうかがえる。

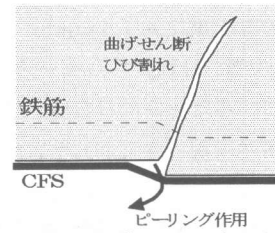


図-3 ピーリング作用

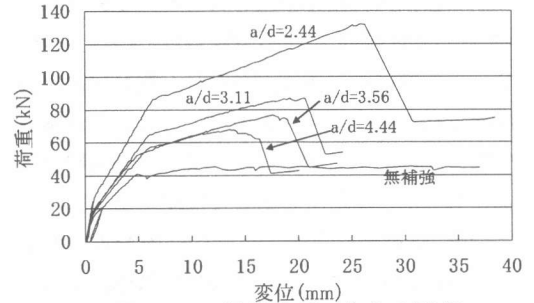


図-4 a/d 別荷重-たわみ関係

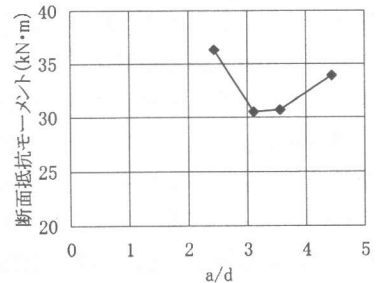


図-5 a/d と断面抵抗モーメントの関係

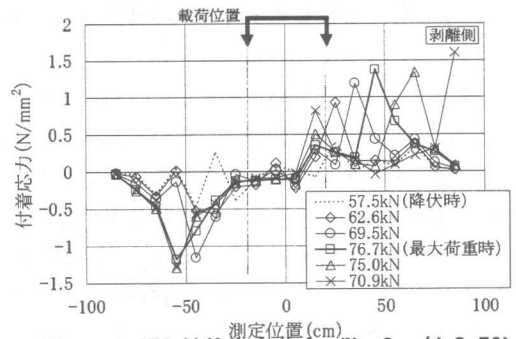


図-6 CFS 付着応力分布 (No. 3 $a/d=3.56$)

図-6に $a/d=3.56$ 供試体の CFS 付着応力分布推移図を示す。CFS の付着応力は、CFS 表面のひずみゲージにより得られたひずみ値より引張力の変化割合を算出して求めた。図-6より、荷重点位置より CFS のせん断剥離が発生し支点部に順次進行していることが分かる。また、付着応力は剥離の進行に伴って大きくなり

最大耐力時の最大値は約 1.5N/mm^2 である。ちなみに、本実験ではひずみゲージの間隔を 10cm としているため曲げひび割れ間の詳細な付着応力分布は表現できておらず、包絡的な付着応力分布を表現しているものと考えられる。

3.2 補強量の違いによる破壊形態の違い

1層補強供試体は中央部よりの CFS せん断剥離が CFS 端部まで広がることにより、また、2, 3層補強供試体は、曲げせん断ひび割れ段差部よりのピーリング作用による CFS 剥離発生後、片側が全て剥離した。また、補強層数が多くなるほど剥離時の衝撃音は高くなった。

CFS 補強量を変化させた場合の荷重と変位の関係を図-7に示す。無補強供試体に比べて CFS を 1層補強することにより最大耐力は50%増加するが、2, 3層においてはそれぞれ74%, 89%しか最大耐力が増加しておらず、補強層数と最大荷重は正比例しないことが分かる。また、補強量を増すことにより最大荷重時の変形性能が小さくなることも分かる。さらに、図-7において CFS 剥離によって決定される最大耐力までに荷重-変位曲線が囲む面積が1, 2, 3層ともほぼ等しいことが分かり、各層補強により付与されるエネルギーは補強層数に関わらず一定であるといえる。

図-2より、CFS 補強量を多くすることにより曲げせん断ひび割れが多くなっており、CFS の補強効果により供試体は曲げ剛性が上がり、せん断破壊モードに変化していることが分かる。また、CFS を1層補強することによりひび割れ分散性は良くなっているが、補強量を多くしてもひび割れ数は変化していない。これは以下により説明できる。Saliger らはひび割れ間隔 l の理論式を次式により与えている³⁾。

$$l = k \cdot \frac{Ac}{u} \quad (1)$$

ここで、 k はコンクリート強度による係数、 Ac は鉄筋により引張力を受けるコンクリートの断面積、 u は鉄筋周長である。

(1)式の鉄筋周長をコンクリートに引張力を

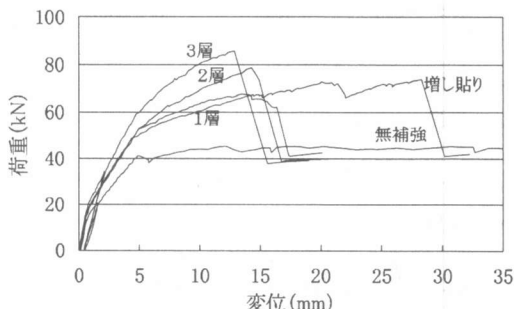


図-7 補強量別荷重-変位関係

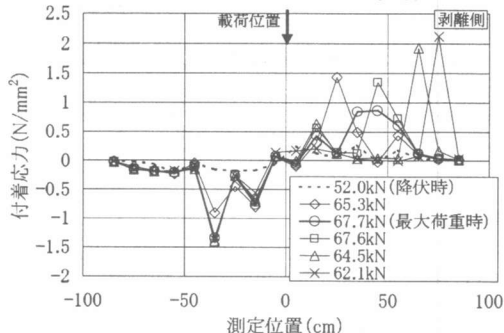


図-8 CFS 付着応力分布 (No.2 1層)

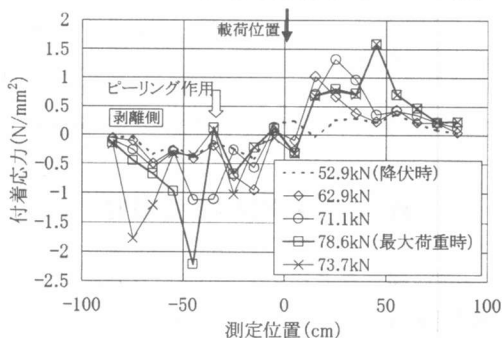


図-9 CFS 付着応力分布 (No.6 2層)

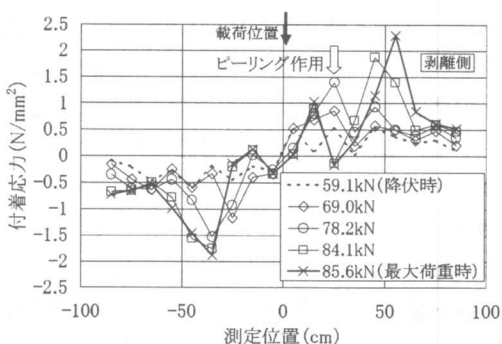


図-10 CFS 付着応力分布 (No.7 3層)

与える補強部材 (鉄筋と CFS) と捕らえることにより説明できる。即ち、補強部材の定着面積が大きくなればひび割れ間隔は小さくなり、定

着面積が変わらなければひび割れ間隔は変化しない。よって、ひび割れ拘束効果を期待して CFRP 補強を行なう場合、CFS 層数を増やしても補強効果は変わらないといえる。

図-8, 9, 10 に 1, 2, 3 層補強供試体の CFS 付着応力分布推移図を示す。図中、CFS せん断剥離、ピーリング作用による剥離は目視観察により確認しており、ピーリングの位置は荷重後の供試体ひび割れ状況により確定している。1 層補強供試体の付着応力分布より、中央部からの CFS せん断剥離状況は明らかであり、2 層補強供試体の曲げせん断ひび割れ段差部よりのピーリング作用による剥離は明らかである。以上より、曲げ破壊先行型の部材であっても CFS 補強総数を増すことにより CFS 剥離に至るまで曲げ耐力が大きくなり曲げせん断ひび割れが発生することによりピーリング作用による剥離に至るといえる。

3.3 増し貼り補強供試体のせん断破壊性状

以上の実験結果より、CFS の剥離形態として荷重位置の曲げひび割れ部よりのせん断剥離と曲げせん断ひび割れ段差部よりのピーリング作用による剥離の 2 形態が認められた。これらの剥離を何らかの方法で抑制することができれば、補強部材の曲げ耐力はさらに向上することは明らかである。よって、既往の研究⁴⁾から CFS の付着応力集中を緩和することにより CFS せん断剥離時の耐力を向上させることが可能な、増し貼り補強定着による梁供試体を作製し同様の実験を行った。本定着方法は、増し貼り部分の CFS 繊維方向を 1 層目の CFS と同じく梁軸方向とすることにより CFS の引張剛性を大きくし、付着応力が作用する有効付着長を大きくすることを目的としたものである。各材料の物性、形状は前記と同様とし、中央 1 点荷重により実験を行った。増し貼り補強の状況を図-11 に、各荷重時の CFS ひずみの分布を図-12 に、荷重-変位関係を図-7 に示す。

図-7, 表-2 より CFS 剥離時の最大荷重は 1 層補強供試体に比べて 11% 向上し、剥離時

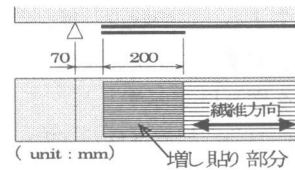


図-11 端部増し貼り状況図

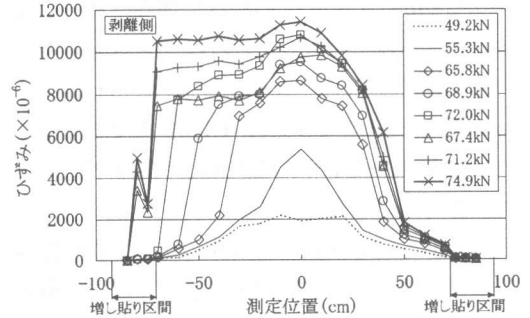


図-12 CFS ひずみ分布 (No.8 増し貼り)

変位は 73% 向上している。また図-12 より、荷重位置からの CFS せん断剥離が増し貼り区間に到達すると剥離の進行が止まり CFS の負担する引張力が増加していることがわかる。また、荷重が増加している間は CFS がアンボンド状態になり引張力を負担するので変位が大きく増大したといえる。

4. 剥離性状の分類

RC 梁供試体を CFRP 接着工法により補強した場合の CFS 破壊性状として既往の研究では、曲げひび割れよりのせん断剥離、曲げせん断ひび割れ段差部よりのピーリング作用による剥離、CFS の引張破断によるものが報告されており、鋼板接着工法、CFRP 板接着工法では補強材端部よりの剥離が報告されている⁵⁾。

曲げモーメントが作用する部材の引張側に接着された補強材 (CFS, 鋼板, CFRP 板) には、曲げモーメントによる引張力が作用し、引張力による水平せん断力が補強材とコンクリートの界面に作用する。この水平せん断力は補強材の引張剛性に左右され、引張剛性が大きいものほど端部の応力集中は大きくなる。また、コンクリートにひび割れが発生した後は、各部位での引張力に対して CFS の付着応力がひび割れ位

置より発生する。この状況は従来から行われている両引き試験によりモデル化されている。以上の概念を図-13に示す。

本実験において観察された CFS の剥離性状のうち曲げひび割れ部よりのせん断剥離は図-13の $\tau_{0max} > \tau_{max}$ の場合であり、さらに補強材の引張剛性が大きくなれば補強材端部の水平せん断力が大きくなることより $\tau_{0max} < \tau_{max}$ となり鋼板接着工法、CFRP 板接着補強工法の剥離形態のように端部からの剥離形態に移行するものと考えられる。

また、曲げひび割れが曲げせん断ひび割れに移行した荷重状態や載荷状態では、CFS に作用する外力の方向が異なり本実験でみられたピーリング作用による剥離性状を示すものと考えられる。ピーリング作用による剥離はせん断剥離に比べて、剥離時作用荷重が小さいことが知られており、各剥離形態にふさわしい剥離抑制方法の採用が望ましい。

端部補強を行っていない各供試体中央部の CFS ひずみは最大耐力時で 7000~9000 μ の範囲にあり CFS の公称破断ひずみ (15000 μ) 以下である。よって、接着面に凹凸等の不備が無ければ CFS の剥離前に CFS の引張破断は起こり得ないと考えられる。

5. まとめ

曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート梁供試体に CFS を接着し、載荷時の a/d と CFS 補強層数を変化させた実験を行い、各種剥離性状の確認と補強効果の検討を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) CFRP 補強梁の CFS が曲げひび割れ発生段階で剥離する場合は載荷点よりのせん断剥離がおきる。
- (2) 補強対象部材の破壊モードが曲げからせん断に移行するほど CFS の剥離耐力は小さくなる。
- (3) 曲げ破壊先行型の部材であっても CFS 補強量が大きくなるとせん断破壊性状になり、ピー

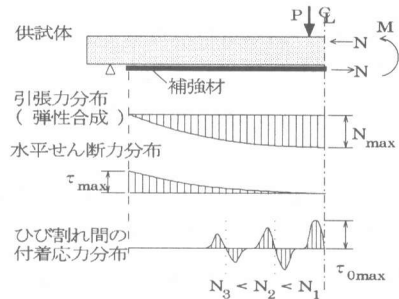


図-13 供試体-補強材応力状態概念図

リング作用による剥離がおきる。

(4) CFS の剥離によって決定される最大耐力と変形性能は反比例する。よって、各層補強により補強部材に付与されるエネルギーは補強層数に関わらず一定である。

(5) CFS 補強層数を大きくしてもひび割れ拘束効果は変わらない。

謝辞: 本研究で使用した CFS, 接着剤は日鉄コンポジット (株) に提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 市川聖芳ほか: 炭素繊維による RC 部材の曲げ・せん断補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.449-454, 1998
- 2) Triantafillou, T. C et al. : Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fiber-composite materials, Materials and Structures, 25, pp.201-211, 1992
- 3) 角田与史雄: 曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状, 土木学会論文集, 第 384 号, V-7, pp.21-32, 1987.8
- 4) 岳尾弘洋ほか: CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.431-436, 1998
- 5) 佐野正: 鋼板接着によるコンクリート構造物の補強設計法に関する研究, 東北大学学位請求論文, 1996.3