

論文 CFRPシートで曲げ補強されたRCはりの耐力及び変形に関する実験的研究

高橋 義裕^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート梁下面に曲げ補強として貼付するCFRPシート幅の変化とシート層数との関係に着目し静的二点対称荷重を作用させた載荷試験を行った。本研究では、CFRPのシート幅（85mmと170mm）及び層数（1層～4層）と変化させ、さらにシートの剥離制御を目的とし下面からウェブに渡るU字状の巻上げ補強（以下U字補強と呼ぶ）を行った。はりの最大荷重は、シート幅85mmで4層貼付した場合とシート幅170mmで2層の場合とでは、ほぼ同じ値を示した。しかし、U字補強したシート幅85mm4層と幅170mm2層とではシート幅170mm2層の方が最大荷重は約17%の増加であった。

キーワード：炭素繊維シート、曲げ補強、曲げ耐力、シート幅、U字補強

1. はじめに

既存構造物の補強を行う上で重要なことは、曲げ及びせん断に対して十分な補強効果を有しているとともに、その施工性に優れていることであり、連続繊維シートはこの様な要求を十分に満たす新しい補強材料である。現在、連続繊維シート、特に炭素繊維（以下「CFRP」）シートは、高い引張強度を持ち軽量で耐食性に優れ、施工性に優れたシート状であるため実験的研究^{1), 2), 3)}、既存構造物の補強材に用いた事例が増えつつある。しかしながら、合理的な補強設計方法が確立されていない現時点では、適切な補強が行われているとは言えないものも多い。ここで、著者らは梁下面に貼付するCFRPシート幅に着目し、静的曲げ載荷試験を行い、はりの曲げ性状及びシートのひずみ性状について実験的に検討した。含浸接着樹脂は、シート用の汎用エポキシ樹脂を使用した。

2. 実験概要

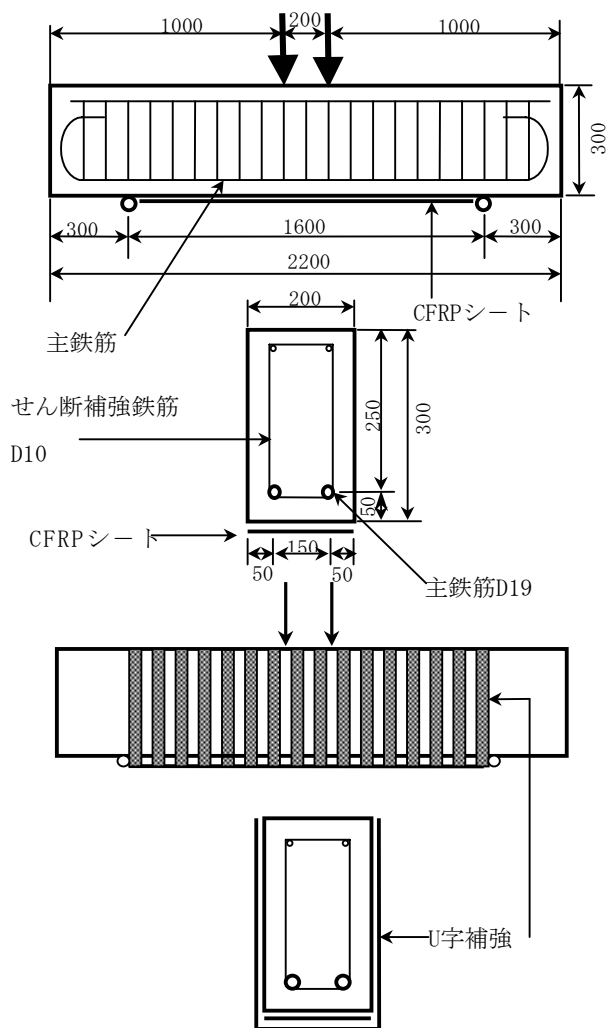
実験供試体は合計13体である。実験供試体の形状・寸法・鉄筋配置、U字補強等については図-1に示す。主鉄筋としてD19を2本、せん断

補強鉄筋として、D10（SD295A）を10cmピッチで配置した。実験供試体は5つのグループに分けられ、グループAのA0供試体はシートを全く貼り付けていないRCはりで「基準供試体」である。グループBは、下面に貼付したシート幅をほぼ梁幅に近い170mmで、1層と2層とした供試体である。グループCは、グループBの供試体にU字補強を施した供試体である。グループDは下面に貼付したシート幅をグループB、Cの半分の85mmとし1層、2層、3層、4層とした場合である。グループEは、グループDの供試体にU字補強を施した供試体である。CFRPシートは支点区間に渡り（但し、支点部手前3cmで貼り止め、支点ではコンクリート表面を直接支持している）貼付した。一方、U字補強は、下面シート貼付後、支点区間に渡り、CFRPシート幅50mmで50mm間隔で腹部全高に貼り付けた。実験結果の一覧を表-1に、各実験供試体に用いた材料の力学特性値を表-2に示す。

測定は、荷重載荷点での変位、主鉄筋およびシートのひずみを測定した。下面のシートには、スパン中央より10cmピッチで両支点までゲージ長5mmの一軸ひずみゲージを貼り付けた。

*1 北海学園大学 工学部社会環境工学科教授 工博（正会員）

*2 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助手 工博（正会員）



図ー1 実験供試体

コンクリートは、水セメント比45%，細骨材率38%，早強ポルトランドセメント，川砂及び川砂利を使用した。

以上の事により，ここでは下面曲げ補強されたRC梁に対するCFRPシート幅の曲げ挙動に対する影響について実験的に検討した。

3. 実験結果

3. 1 破壊荷重及び破壊性状

表ー1 より，CFRPシートで補強することにより曲げ耐力は，シート補強無しに比べれば増加することが確認できる。シート幅85mmで2層，3層，4層のU字補強有りの場合は，シート層数の増加による効果は殆ど見られない。このことは，この供試体のコンクリートとシートとの接着面積の大きさで最大荷重が決まっているものと思われる。さらに，このことは写真ー1で示されるようにコンクリートとシート間でのずれ剥離で終局状態に達していたことから推測される。写真ー1は，実験終了後の供試体E3の下面を示したもので，U字補強材に沿って書かれたラインが全体的に中心側に曲がっているのが確認できる。これは，軸方向に貼付したシート

表-1 実験結果一覧

グループ	供試体No	シート幅(mm)	シート層数	U字補強	f'_c (MPa)	P_c (kN)	P_y (kN)	P_{max} (kN)	δ_p (mm)	備考
A	A0 00	-----	無し	無し	44.7	24.8	174.9	180.0	6.36	曲げ破壊，基準梁
B	B1 01	170	1	無し	35.8	31.4	200.7	232.4	8.81	シート剥離
	B2 02	170	2	無し	40.2	37.5	203.8	244.0	6.93	シート剥離
C	C1 03	170	1	有り	42.6	55.1	192.0	247.0	11.1	シートずれ剥離
	C2 04	170	2	有り	46.3	51.1	226.0	278.5	9.22	シートずれ剥離
D	D1 05	85	1	無し	44.6	34.3	191.4	205.0	10.4	シート剥離
	D2 06	85	2	無し	43.7	50.2	211.5	222.6	7.0	シート剥離
	D3 07	85	3	無し	40.2	54.1	191.3	211.8	6.2	シート剥離
	D4 08	85	4	無し	47.2	50.3	198.9	245.3	8.4	シート剥離
E	E1 09	85	1	有り	41.3	39.4	224.0	229.5	10.2	シートずれ剥離
	E2 10	85	2	有り	41.3	34.5	191.7	240.3	9.8	シートずれ剥離
	E3 11	85	3	有り	47.3	49.3	200.8	241.2	7.1	シートずれ剥離
	E4 12	85	4	有り	48.4	54.6	197.1	236.3	6.1	シートずれ剥離

f'_c : コンクリート圧縮強度， P_c : ひび割れ発生荷重， P_y : 鉄筋降伏荷重， δ_p : 最大荷重時変位

表-2 使用材料の特性値

CFRPシート		繊維目付量	300g/m ²
		設計厚さ	0.167mm
		引張弾性率	261GPa
		引張強度	4340MPa
		破断ひずみ	16600μ
鉄筋	D19 (SD345)	降伏強度	371MPa
		引張強度	570MPa
	D10 (SD295A)	降伏強度	377MPa
		引張強度	537MPa



写真-1 シートずれ剥離（下面）



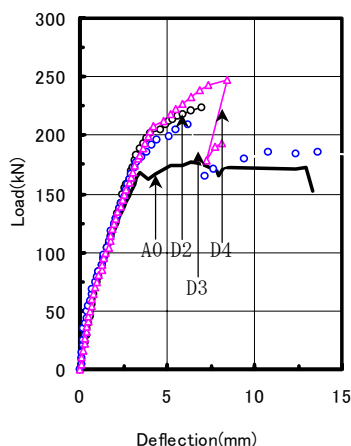
写真-2 シート剥離（側面）

が剥離し、その後シートが中心に向かってU字補強材と共に引張られたものと思われる。また、

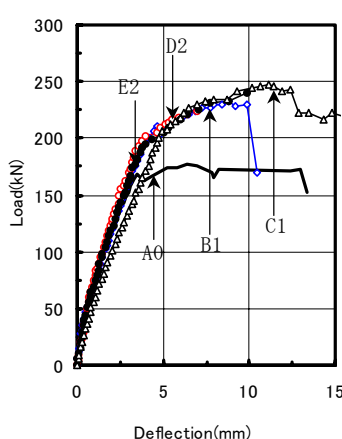
U字補強材の曲げ上げコーナ部でのシート破断等は確認されていない。U字補強の無い場合は、写真-2で示されるようにどちらか一方の支点側からの急激なシートの剥離で終局状態に達していた。写真-2は供試体D2の側面からのもので、片側シートが剥離し垂れ下がっているのが確認できる。また、ある程度シート層数の増加により耐力は増加しているが、シート層数の増加割合ほどその耐力は、増加していない。

3.2 変形状

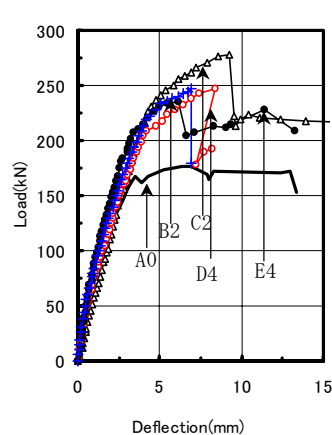
図-2は、荷重と載荷点直下のたわみ関係を示したものである。同図中には、CFRPシート貼付のない供試体A0のたわみ曲線も示されている。図-2(a)は、シート幅85mmで、シート層数の影響を調べたものである。U字補強はない。同図より鉄筋降伏近傍の荷重までは、シート層数によるたわみ挙動の違いは見られない。しかし、鉄筋降伏後の挙動においては、シート層増加による若干の剛性増加が見られる。また、シート剥離後はシート補強無しの供試体A0の挙動に近づくものと思われる。図-2(b)はシート幅170mm 1層に相当する供試体でシート幅85mm 2層とシート幅170mm 1層とU字補強の有無により比較したものである。確かにU字補強を行うことによりその耐力は増加するがそのたわみ挙動は殆ど変わらない。図-2(c)は、シート幅170mm 2層に相当する供試体でシート幅85mm



(a) シート幅85mm

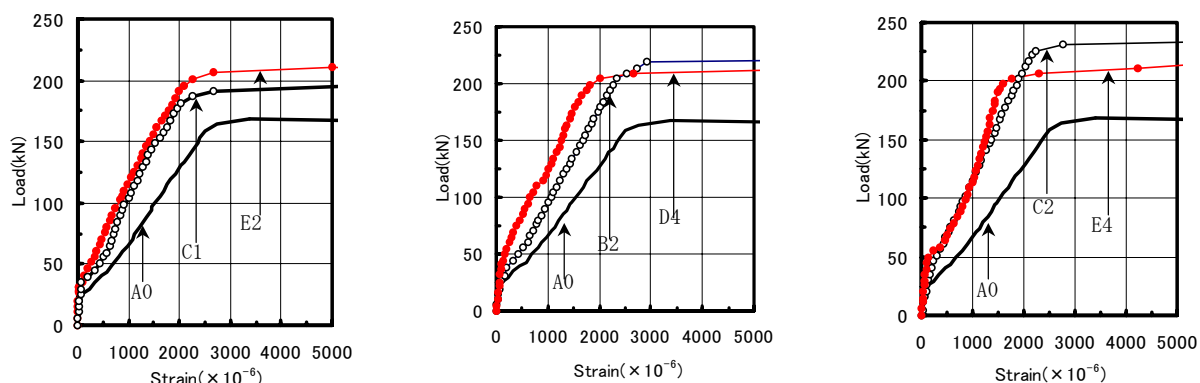


(b) シート幅170mm1層相当



(c) シート幅170mm2層相当

図-2 荷重-変位関係



(a) シート幅170mm 1層相当
U字補強有り

(b) シート幅170mm 2層相当
U字補強無し

(c) シート幅170mm 2層相当
U字補強有り

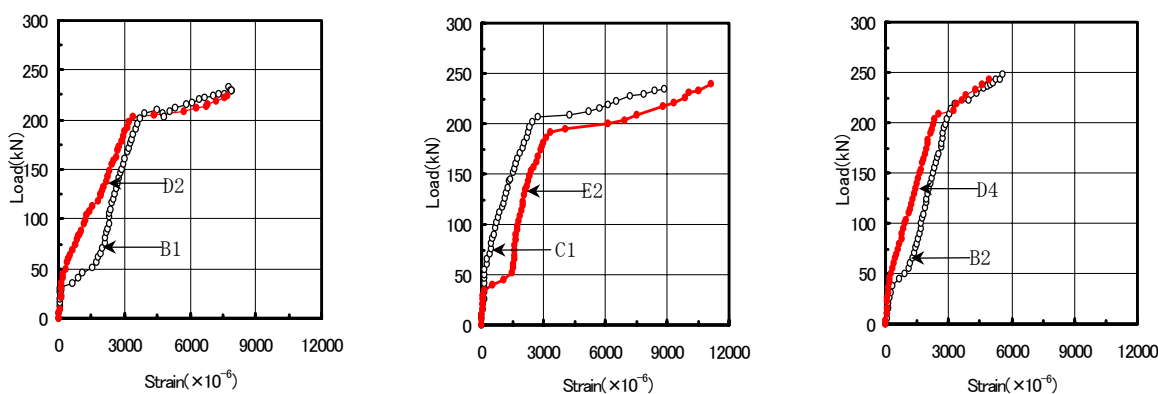
図－3 荷重－鉄筋ひずみ関係

4層とシート幅170mmで2層とU字補強の有無について比較検討したものである。同図よりU字補強が無い場合はシートの剥離後補強無し供試体A0の挙動に近づくことが分かる。また、U字補強有りの場合、シート剥離後もU字補強無しの場合に比べ若干高めの荷重を保持していることが分る。これは、U字補強により急激な剥離が制御されている為と思われる。

3.3 鉄筋及びCFRPシートのひずみ性状

図－3は、スパン中央での鉄筋ひずみと荷重との関係を示したものである。同図には、補強無しの供試体A0の値も示されている。全ての図においてシート補強することにより鉄筋の降伏荷重が増加している。ただし、ここで言う鉄筋降伏荷重は鉄筋ひずみが平坦に成り始める荷重

とする。図－3 (a) は、シート幅85mm 2層とシート幅170mm 1層で、U字補強の有る場合（供試体C1とE2）の荷重－鉄筋ひずみの関係を示したものである。シート幅170mm 1層でU字補強の無い供試体の鉄筋ひずみは、ひずみゲージリード線の途中破断により測定できなかった。最大ひずみは5000 μ で打ち切っている。ひび割れ発生荷重は、30～55 kNの範囲である。測定ひずみの値は、ひび割れ位置との関係に影響されると思われるが、目視による確認では明確な測定位置を直接横切るようなひび割れは確認できなかった。シート層数だけを考えた場合は、シート2層の方が若干見掛けの鉄筋剛性が大きいことが確認できる。図－3 (b) は、シート幅170mm 2層（供試体B2）とシート幅85mm 4層（供試体

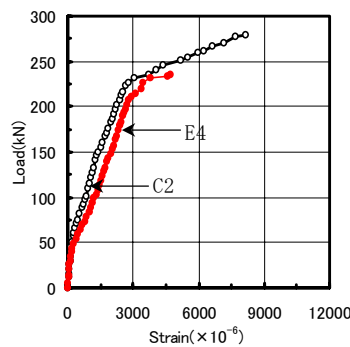


(a) シート幅170mm 1層相当
U字補強無し

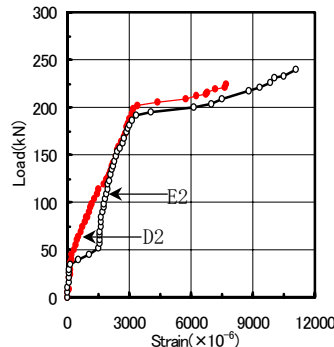
(b) シート幅170mm 1層相当
U字補強有り

(c) シート幅170mm 2層相当
U字補強無し

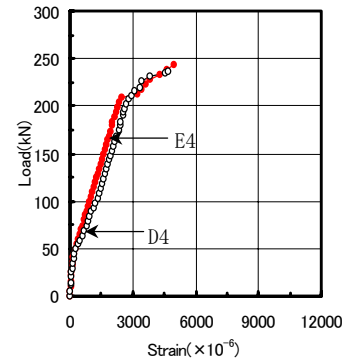
図－4 荷重－シートひずみ関係



(d) シート幅170mm2層相当
U字補強有り



(e) シート幅85mm2層



(f) シート幅85mm4層

図-4 荷重-シートひずみ関係 (続き)

D4) のU字補強無しに関しての荷重-鉄筋ひずみの関係を示したものである。シート層数のみに着目すると4層の方が見掛けの鉄筋剛性が大きくなっているが、その鉄筋降伏荷重は2層に比べ若干低めである。図-3 (c) は、図-3 (b) で示された供試体に対しU字補強を行った供試体E4とC2についての荷重-鉄筋ひずみの関係を示したものである。鉄筋降伏荷重附近までは、両者の値はほぼ同じである。また、鉄筋降伏荷重の値は、4層の方が、2層に比べて若干低めである。図-3 (b), (c) より、シート幅170mm2層相当の場合、その鉄筋降伏荷重の値はシート幅85mm4層より170mm2層の方が高くなっている。

図-4 は荷重-スパン中央でのCFRPシートひずみの関係を示したものである。図-4 (a) は、U字補強のないシート幅170mm1層の供試体B1とシート幅85mm2層の供試体D2を比較したものである。両者は、ほぼ同様の挙動を示している。また、最大荷重時におけるシートひずみは8000 μ 程度である。2層の場合が、若干ひび割れ発生荷重が高い。一方、鉄筋降伏荷重は、ほぼ200kN程度である。図-4 (b) は、U字補強を有するシート幅170mm1層供試体C1とシート幅85mm2層供試体E2を比較したものである。シート1層の供試体C1の最大荷重時シートひずみは9000 μ 程度、シート2層の供試体E2は、11000 μ 程度に達している。このことよりU字補強を施すこと

によりによりシート能力を有効に引出す可能性を示している。また、幅の狭いシートにU字補強を施すことにより幅の狭いシートの方により作用力の集中が生じていた可能性がある。図-4 (c) は、U字補強の無い、シート幅85mm4層供試体D4とシート幅170mm2層供試体B2とを比較したものである。同図より見掛けのシート剛性は、4層供試体D4の方が若干大きくでているが、最大荷重近傍では両者はほぼ一致している。最大荷重時のシートひずみは5000~5500 μ 前後値を示している。シート層数が増えると最大荷重は増加するがかなり脆性的な挙動となっている。図-4 (d) は、図-4 (c) の供試体でU字補強を施した場合の荷重-シートひずみ関係を示したものである。今回の実験では、シート層数4層でU字補強有り供試体E4でもそれほど耐力増加及びシートひずみ増加は示されなかった。一方、シート幅170mm2層のU字補強有り供試体C2ではシートひずみの増加と耐力増加が示された。これは幅の狭いシートを多層に貼ることの限界を示しているのかも知れない。図-4 (e) は、シート幅85mm2層でU字補強の有無に関して、図-4 (f) は、シート幅85mm4層でU字補強の有無に関して、それぞれ荷重-スパン中央でのシートひずみ関係を示したものである。図-4 (e) より、U字補強を有する供試体E2はシートひずみが11000 μ 近くまで達している。鉄筋降伏荷重及びその時のシートひずみは、供試体D2, E

2の両者は、ほぼ等しい。一方、図-4 (f) のU字補強の有無による荷重-シートひずみ関係では、両者の違いは殆ど見られない。荷重最大時のひずみは5000 μ 程度にしか達せず、シート剥離している。U字補強有り供試体E4の場合は、シートとコンクリートとの間のずれ剥離により終局状態に至っていた。シート層数が増加してもU字補強による効果があまり期待できないことを示している。以上よりシート層数を増加するよりシートの接着面積を広くとり、U字補強を行った方がシートの能力を十分引き出せる可能性を示している。

4. まとめ

本研究は、CFRPシート幅を変化させてRCはり下面にCFRPシートを貼付し、静的2点対称荷重を終局状態まで作用させた場合の破壊性状、最大荷重、載荷点のたわみ、鉄筋及びシートのひずみ分布について実験的に検討したものである。今後さらに検討すべき点もあるが本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 終局状態はCFRPシートの剥離、およびコンクリートとシート間のシートずれ剥離により決定していた。シート幅が狭く、U字補強を有する場合、シート層数を増加させても耐力増加は殆ど見られなかった。

(2) 荷重-変位関係より鉄筋降伏荷重近傍までは、補強方法の違いによる曲げ剛性の違いは殆ど見られず、補強のない基準供試体の挙動にほぼ一致する。

(3) 荷重-鉄筋ひずみの関係より、はりのひび割れ発生荷重は、シート層数増加により若干増加する。また、鉄筋降伏荷重はシート幅が狭い場合の方がシート幅の広い場合に比べ若干低下している。

(4) 荷重-シートひずみ関係より使用シート量が同じ場合、シート幅を狭くし多層にした方がそのシートひずみは小さくなっている。一方、シート層数を増加するよりシートの接着面積を広くとり、U字補強を行った方がシートの能力を

十分引き出せる可能性も示された。

謝 辞

本研究の遂行においてCFRPシート及び接着剤の提供を頂いた日鐵コンポジット（株）の関係各位に深く感謝の意を表します。また、実験を進めるに当たっては、北海学園大学工学部土木工学科の卒業研究の学生諸氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 高橋義裕ほか：炭素繊維シートで曲げ補強したはりの曲げ性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.1, pp.509-514, 1998
- 2) 高橋義裕ほか：炭素繊維シートで曲げ補強したRCはりの耐力及び変形に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2, pp.1393-1398, 2002
- 3) 高橋義裕ほか：初期荷重を受けCFRPシート補強されたRC梁の曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.1699-1704, 2004