

論文 高弾性 CFRP プレートの継ぎ手性能と RC はりにおける曲げ補強効果及び疲労耐久性

久部 修弘^{*1}・諸橋 克敏^{*2}・大塚 浩司^{*3}

要旨：本研究は高弾性 CFRP プレートをコンクリート構造物補強に適用する場合に生じる CFRP プレート継ぎ手部の性能を把握することを目的としている。CFRP プレート継ぎ手のせん断試験とコンクリートはりを用いた曲げ試験によって、継ぎ手部の性能を検証した。実験の結果、曲げモーメント作用下では継ぎ手プレートの面外方向の変形を拘束する CF シートの貼付が継ぎ手強度の向上に大きく寄与することが確認された。

キーワード：CFRP プレート，継ぎ手，コンクリートはり，炭素繊維

1 はじめに

近年，炭素繊維シート接着工法よりさらに施工が簡便で，施工環境に品質が左右されにくい CFRP プレート接着工法の適用事例が増加しつつある(図-1)。これは工場であらかじめ CFRP 硬化板として製品化されたものを施工時にパテ状の接着剤でコンクリート表面に貼付するだけの工法であり，施工の簡便性に加え，工期短縮や添架物による影響を受けにくく，含浸作業のあるシート工法より品質が安定するといった特長を有している。建築分野では既に高強度 CFRP プレートによる多くの施工実績があるが，最近では補強効率に優れた高弾性 CFRP プレート ($E_f=450\text{N/mm}^2$) が開発され，土木分野でも特に桁の曲げ補強に適用する事例が増加しつつある。この高弾性 CFRP プレートは高剛性であるが故にリング状に巻くことが困難であり，長尺ものによる運搬となる。その結果，CFRP プレート長さより長い構造物を補強する際に CFRP プレートの継ぎ手を設ける必要が生じる。

これまでの研究では高強度 CFRP プレートの RC 構造物補強効果について論じたもの¹⁾があるものの，高弾性プレートについての報告はほとんどなされていない。高弾性 CFRP プレートの



図-1 CFRP プレート接着工法適用例

適用を検討する上で，鉄筋等の応力低減効果，疲労耐久性，プレートの剥離耐力と継ぎ手強度等を把握する必要がある。本研究は，この中で特に継ぎ手性能と疲労耐久性に着目した実験的研究である。

2 CFRP プレート二面せん断試験

2.1 試験方法

樹脂のせん断試験方法として JIS K6850 による一面せん断試験方法があるが，引張載荷時の偏心モーメントによる影響を最小とするために，既往の試験方法²⁾を参考として図-2に示す供試

*1 三菱化学産資株式会社 カーボン・アルミナ繊維事業部 (正会員)

*2 株式会社ピーエス三菱 東北支店 (正会員)

*3 東北学院大学 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

体を用いた。供試体は全て CFRP から構成され、一面せん断試験の供試体を重ね合せた左右対称の形状をしており、2mm のプレートが 2 枚重なる部分は 4mm プレートを使用している。

試験に用いた材料の一覧を表-1 に、供試体のリストを表-2 に示す。CFRP プレートは高弾性タイプのもを使用し、接着剤にはパテ状のエポキシ樹脂を用いた。CFRP プレートの付着長さは 100mm、200mm、300mm の 3 種類とし、図-2 に示すように CFRP の端部処理しないものと端部(開先)処理したものを準備した。この開先処理とは、CFRP プレート端部の応力集中を緩和する目的で、CFRP プレートの端部をディスクサンダー等で研削し、約 1:3 勾配のテーパを設けたものである。供試体数は各条件 n=3 とした。

載荷は容量 500kN の万能試験機を使用し、載荷スピードは CFRP の応力増加量 100N/mm²/min 程度として供試体破壊まで連続して載荷した。

2.2 試験結果

試験結果を図-3、表-2 に示す。表-2 中の最大荷重は 3 体の平均値である。全ての供試体において CFRP プレートと接着剤層の界面の剥離破壊で最大耐力が決定した。図-3 中、Y 軸の CFRP プレート発生応力とは、最大荷重を CFRP プレート断面積で除した値である。端部処理を行わない CFRP プレート発生応力は付着長さ 200mm 以降ほぼ同程度であり、本研究で使用した CFRP プレートを継ぎ手として用いる場合の有効付着長さは概ね 200mm 程度と推定される。

CFRP プレート端部のテーパ処理を行った供試体も同様の傾向を示したが、端部処理を行わないものに比べて平均で 7~9%の応力低下がみられた。これは面せん断力のみが作用するケースでは端部の応力集中よりも、テーパによる有効付着面積の減少の影響が大きかったためと推察される。

3 RC はりによる静的曲げ試験

3.1 試験方法

表-1 二面せん断試験使用材料

CFRP プレート	寸法	50mm × 2.0mmt , 4.0mmt
	ヤング係数	450kN/mm ²
	引張強度	1,200N/mm ²
接着剤	エポキシ樹脂(パテ状)	

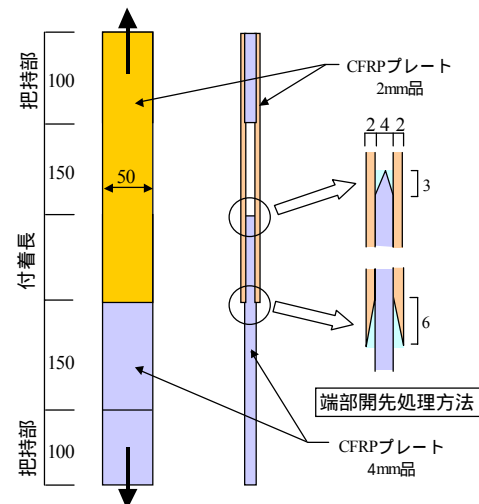


図-2 二面せん断試験供試体

表-2 二面せん断試験供試体リスト

供試体	付着長 (mm)	最大荷重 (kN)	端部 処理	n 数
WS-100-E	100	86.9	無	n=3
WS-200-E	200	114.0		
WS-300-E	300	116.2		
WS-100-T	100	79.5	テーパ - 処理	
WS-200-T	200	106.0		
WS-300-T	300	105.4		

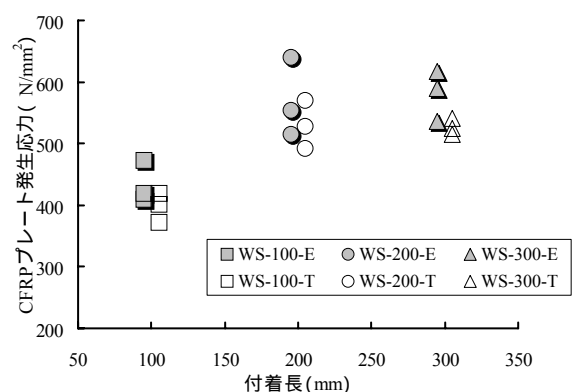


図-3 CFRP プレート発生応力

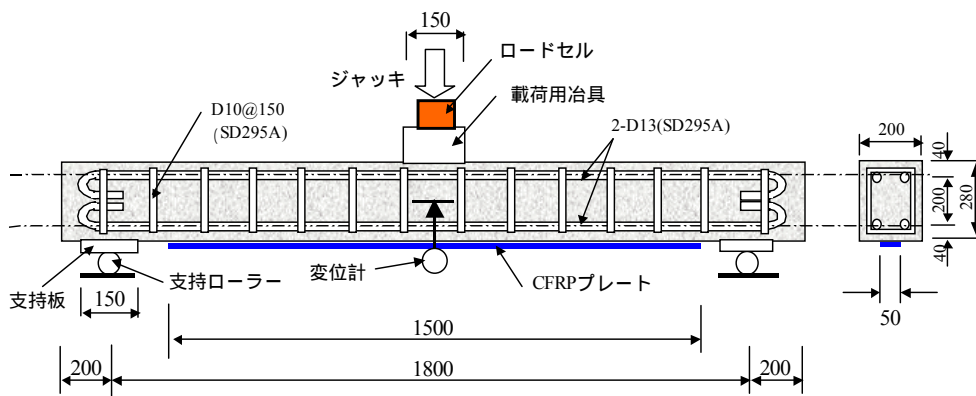


図-4 供試体形状及び载荷方法

曲げ部材の中央に CFRP プレート継ぎ手を設け、静的曲げ試験に供することによって曲げモーメント作用下における継ぎ手性能の確認を行った。供試体は、幅 200mm、高さ 280mm、長さ 2200mm の RC はりを使用し、図-4 に示すように支持スパン 1800mm の中央 1 点集中载荷とした。使用材料を表-3 に示す。

CFRP プレートは、供試体中央が継ぎ手位置となるよう貼付し、2 章の二面せん断試験結果を参考として、長さ 400mm (継ぎ手長さ 200mm) の継ぎ手用 CFRP プレートを貼付した(表-4 S-S 供試体)。また、2 章と同様の方法で CFRP 端部にテーパ処理を施した供試体(同 S-S-T)、さらに継ぎ手用 CFRP プレートを包みこむように CF シートを直角方向貼付した供試体(同 S-S-CFS)も作製した。尚、CF シート貼付範囲の CFRP プレートによる段差はエポキシ樹脂にてあらかじめ不陸修正を行った後に CF シートを貼付した。

3.2 試験結果

試験時のコンクリート圧縮強度は 53.0N/mm^2 であった。静的曲げ試験時の供試体中央変位と最大荷重の一覧を図-5 中に示す。S-S 及び S-S-T 供試体は継ぎ手用 CFRP プレートの剥離によって最大耐力が決定し、CFRP 端部のテーパ処理を施すことによって約 14% 程度の耐力増が見られた。2 章の二面せん断試験の結果とは逆の結果となったが、曲げモーメント作用下では、継ぎ手用 CFRP プレートの端部から面外方向に引き剥がそうとする力が作用するため、テーパ処

表-3 使用材料

コンクリート	普通コンクリート
鉄筋	SD295A (主筋 D13、スタップ D10)
CFRP プレート	表-1 参照 (2.0mm 品)
CF シート	高強度タイプ (目付量 200g/m^2)

表-4 静的载荷試験供試体リスト

供試体 No.	継手長	端部処理	シート定着
S-S	200mm	-	-
S-S-T	200mm	テーパ処理	-
S-S-CFS	200mm	-	CF シート

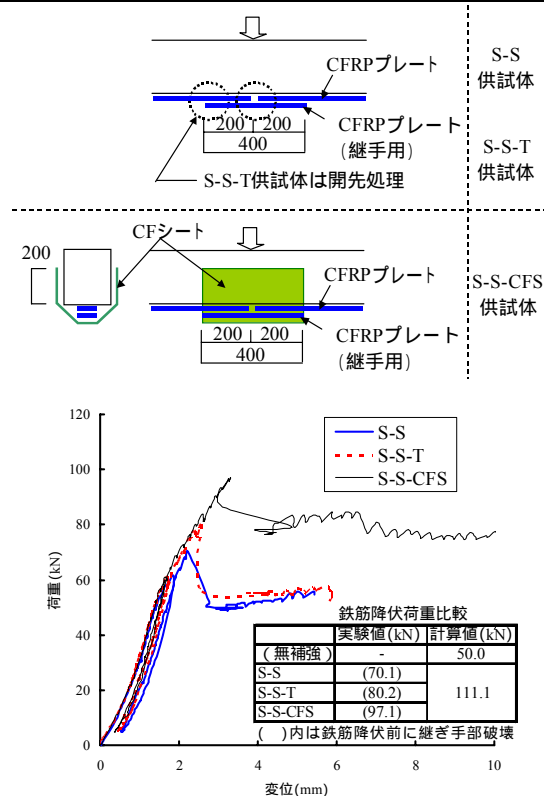


図-5 荷重 - 中央変位

理による応力緩和が有効に作用したためと考えられる。

S-S-CFS 供試体は S-S 供試体に比べ約 39%の耐力増となった。CFRP プレートや CF シートの剥離は観察されなかったが、最大耐力後、荷重が漸減しながら変位が増加する現象が見られた。これは CF シートによって CFRP 継ぎ手部での急激な剥離破壊が抑制されたためと推定される。

4 RC はりによる疲労試験

4.1 供試体

静的載荷試験の結果、曲げ耐力が最も大きかった CF シートを併用した継ぎ手部の疲労試験を実施した。供試体は 3 章と同様の RC はりを使用し、供試体パラメータは表-5 に示す 4 種類とした。無補強の供試体(S-0)は静的載荷のみで、CFRP プレート補強した供試体は全て疲労試験に供した。本研究では、継ぎ手部のない供試体の耐力レベルが目標であり、それに対して、継ぎ手部を設けた供試体がどの程度のレベルかを確認するために、継ぎ手部のない供試体(D-NS)を作製した。継ぎ手部を有し、CF シートで補強する供試体は 3 章と同様にはり側面までシートを貼り上げるもの(D-S-CFS1)と、はり底面のみ貼付するもの(D-S-CFS2)の 2 種類とした。

4.2 載荷方法

載荷は、油圧式アクチュエーターを用いた定荷重疲労試験とし、載荷点はくり返し載荷中の安定性を確保するために二点載荷(純曲げ区間 300mm)としている。疲労試験概要を図-6 に、荷重条件を表-6 に示す。まず、死荷重相当の荷重³⁾を載荷した状態で CFRP プレートをエポキシ樹脂接着剤を用いて供試体底面に貼付し、そのままの状態です約 1 週間の養生を行った。接着剤硬化後、載荷している荷重を下限荷重としてくり返し載荷を開始した。載荷速度は 3Hz とした。上限荷重は、鉄筋の計算上の発生応力が、道路橋示方書⁴⁾に定められている供用時における許容応力度の上限値となる荷重とした。載荷回数は 150 万回までとし、それまでに破壊しな

表-5 疲労試験供試体リスト

供試体 No.	試験種類	継手長	シート定着
S-0	静的	- (補強無)	-
D-NS	動的	連続	-
D-S-CFS1	動的	200mm	側面+底面
D-S-CFS2	動的	200mm	底面

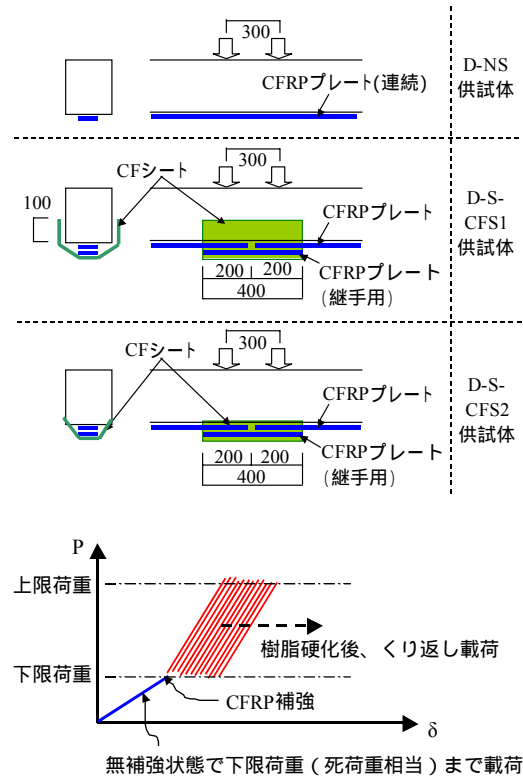


図-6 疲労試験概要

表-6 荷重条件³⁾

荷重条件	上限荷重	下限荷重
荷重	44kN	13kN
鉄筋応力	179.3N/mm ²	89.2N/mm ²
コンクリート応力	10.0N/mm ²	4.0N/mm ²

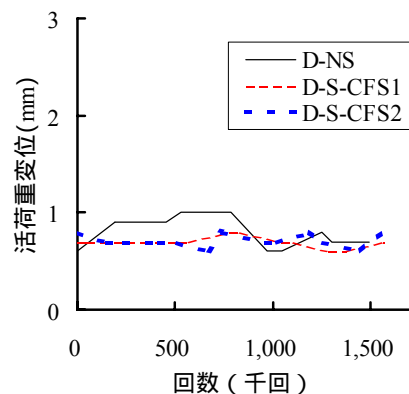


図-7 疲労試験中の活荷重変位

い場合は疲労試験後に静的載荷試験を実施し、破壊までの曲げ耐力を計測した。

4.3 疲労試験結果

疲労試験開始時のコンクリート圧縮強度は 57.1N/mm^2 であった。図-7に疲労試験中の活荷重変位の推移を示す。各供試体とも載荷回数が増加するに従ってひび割れの進展・増加が観察されたが、くり返し載荷中の活荷重変位は安定した挙動を示し、CFRP プレートや CF シートの剥離等は見られなかった。

4.4 静的載荷試験結果

補強した供試体はいずれも疲労試験中に破壊しなかったため、疲労試験後に静的曲げ試験を実施した。荷重 - 変位関係を図-8に示す。尚、疲労試験を行っていない無補強の供試体(S-0)も併記している。

継ぎ手部のない供試体(D-NS)は最大荷重時(146kN)に CFRP プレートが剥離し、それと同時に圧縮側コンクリートが圧壊して破壊に至った。図-9にこの供試体の 25kN 毎に計測した CFRP プレートひずみ分布を示す。X 軸は供試体中央を 0mm としたときのひずみゲージ位置を示している。供試体中央から約 250mm までのひずみ量がほぼ等しく、CFRP プレートは、載荷上の純曲げ区間より広い範囲で引張力を負担していることが窺える。

CF シートをはり側面まで貼付した供試体(D-S-CFS1)は、図-10に示すように載荷点を起点とした斜めひび割れが進展し、ひび割れから支持点側の CFRP プレートが剥離して破壊に至った。継ぎ手部分 CF シートの剥離等は見られなかった。CF シートをはり底面のみ貼付した供試体(D-S-CFS2)は、114kN 付近で CF シートの一部が剥離し、継ぎ手用 CFRP プレートがずれることによって破壊に至った。

表-7に静的載荷試験における引張鉄筋降伏荷重の実験値と計算値の比較を示す。

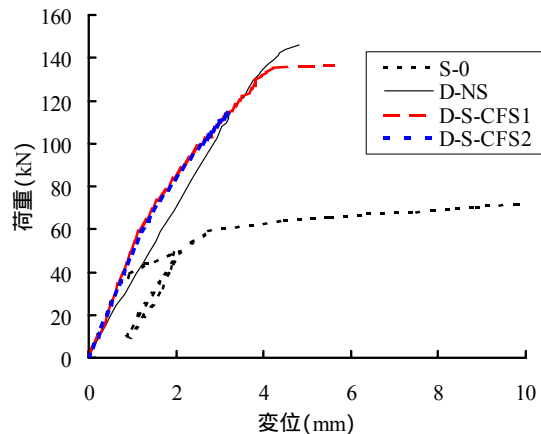


図-8 荷重-中央変位(静的載荷試験)

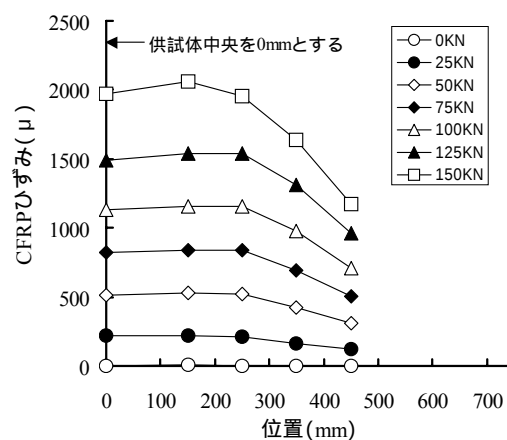


図-9 CFRP プレートひずみ分布(D-NS)



図-10 D-S-CFS1 供試体破壊状況

表-7 静的載荷試験における鉄筋降伏荷重比較

供試体 No.	実験値(kN)	計算値(kN)
S-0	58.8	60.0
D-NS	130.0	133.3
D-S-CFS1	(136.6)	
D-S-CFS2	(113.7)	

()内は鉄筋降伏前に CFRP プレート剥離破壊

計算値は，コンクリートの引張強度は無視し，ひずみは中立軸からの距離に比例すると仮定したものである。CFRP プレートで補強された供試体は概ね鉄筋降伏レベルまでの曲げ耐力を有しており，純曲げ区間に継ぎ手を設けた本研究の範囲内では，供用荷重レベルでの適用は可能と思われる。

図-1 1 及び図-1 2 に約 25kN 毎に計測した CF シートのひずみ分布を示す。X 軸の位置(mm) は，供試体中心から供試体軸直角方向への距離を表している。CF シートのひずみ量より，D-S-CFS1 供試体の CF シートが CFRP プレートの剥離防止に対してより寄与していることが窺える。以上の結果より，はり側面まで CF シートを貼付することは CFRP プレートの継ぎ手強度向上に有効であると考えられる。

5 まとめ

本研究のまとめを以下に列挙する。

- (1) CFRP プレート間の二面せん断試験において，端部開先処理を行わない供試体が CFRP 発生応力が高い結果となった。
- (2) RC はりによる曲げ試験では，継ぎ手部 CFRP プレート端部の開先処理を行った供試体が高い継ぎ手強度を示した。また，CF シートによる補強を行うと，継ぎ手耐力が大きく向上した。
- (3) 活荷重作用レベルでの疲労試験において，CF シートで補強した継ぎ手部を有する供試体は，継ぎ手を有しない供試体と同様に安定した挙動を示し，150 万回の疲労試験でも破壊に至らなかった。
- (4) 疲労試験後の静的曲げ試験において，CFRP プレートで補強された供試体は概ね引張鉄筋降伏レベルまでの曲げ耐力を有していることが確認された。
- (5) CF シート補強は CFRP プレート継手部強度向上に有効であり，RC はり側面まで貼付するとよりその効果が大きい。

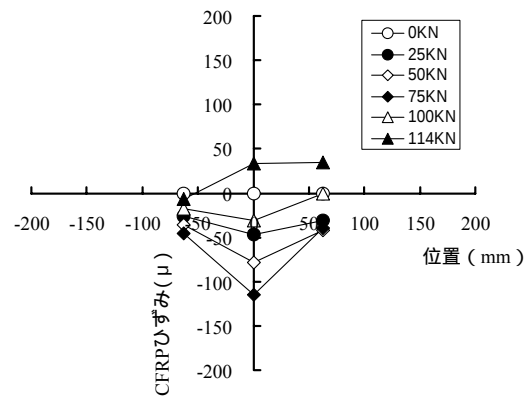


図-1 1 CF シートひずみ分布(D-S-CFS2)

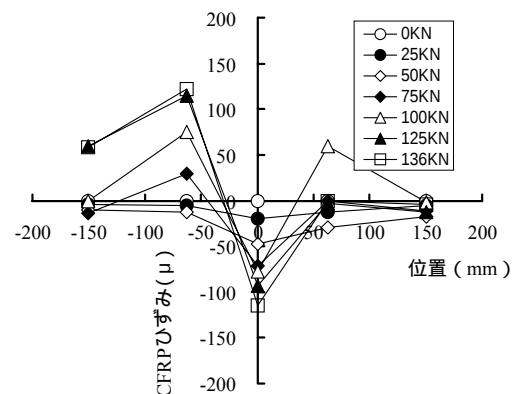


図-1 2 CF シートひずみ分布(D-S-CFS1)

参考文献

- 1) 例えば，木村耕三，小嶋克朗，平田 亮，土屋好男：CFRP 板による補強部材の曲げ挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，pp.267-272，1997.7.
- 2) 有留義朗，金久保利之，松井雅明，藤田直人：繊維シートによる RC 構造物の耐震補強におけるシート端部定着に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.10，No.2，pp.119-130，1999.5.
- 3) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，炭素繊維補修・補強工法技術研究会：コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(III)-炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)-，pp.132-139，1999.12
- 4) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，III コンクリート橋編，pp.126-128，2002.3.