

鋼構造の補修・補強に用いる積層 CFRP 板の端部処理による接着強度の向上

首都大学東京大学院 学生員 ○手塚渉太・林帆・孫継光
首都大学東京大学院 正会員 中村一史, フェロー 前田研一
JX 日鉱日石エネルギー 福田欣弘

1. はじめに

近年、我が国における鋼構造物の老朽化に伴い、それらの効率的な補修・補強対策が求められている中で、軽量かつ高剛性の炭素繊維強化樹脂板(以下、CFRP 板)を用いた接着工法が検討されている。施工は、対象部位に CFRP 板を接着するだけであるため、非常に簡便である。また、CFRP 板の積層数に応じて、対象部位の応力を低減させることが可能である。しかし、CFRP 板を積層した場合、母材の弾性範囲内ではく離する場合がある¹⁾。そこで本研究では、積層 CFRP 板の端部処理によるはく離に対する抵抗強度の向上を検討するために、複数の端部の処理条件を設定して引張実験を行った。

2. 積層 CFRP 板端部の処理方法と実験条件

本研究で検討した、積層 CFRP 板の端部処理の種類を図-1 に、また、端部の処理条件を表-1 に示す。鋼板に CFRP 板を 1 層接着した鋼板(CL1N)は、塑性域ではく離するが、単純に 5 層積層した場合(CL5N)では弾性域ではく離する。そこで、1 層接着した場合と同程度まではく離に対する抵抗強度を向上させるため、段差を設ける試験片を作製した。段差長は、積層 CFRP 板の 1 層目の端部と鋼板との間の接着剤に作用するせん断応力を、1 層の場合におけるそれと同等まで下げられるように FEM 解析により決定した(CL5MS)。加えて、段差積層 CFRP 板を反転させて接着した場合、効果が得られるかを検討する(CL5MS-R)。次に、積層 CFRP 板の端部をテーパ加工した試験片を作製した(CL5TP)。テーパ角度は、段差積層と同等の 7.5° とした。さらに、CL1N、CL5N、CL5TP の端部を炭素繊維シート(以下、CF シート)で覆うシリーズを 3 種類(CL1N-O、CL5N-O、CL5TP-O)を作製した。以上、6 種類の積層 CFRP 板のシリーズと、2 種類の 1 層 CFRP 板のシリーズの計 8 種類で比較検討を行う。使用した材料物性値を表-2 に示す。実験は載荷速度 1mm/min として、万能試験機による引張実験を行った。図-2 に、ひずみゲージの設置位置を示す。CFRP 板接着による応力の低減率は、鋼板中央部のひずみより確認する。はく離の評価は、弾性域の場合、荷重の低下によって、また、塑性域の場合、無補強位置の鋼板のひずみの値(ϵ_{s0})と CFRP 板端部から 5mm の位置の鋼板のひずみの値(ϵ_{s1})と 17.5mm の位置の鋼板のひずみの値(ϵ_{s2})の変化により評価した。なお、CFRP 板端部の鋼板のひずみの変化率 γ_1 を $[(\epsilon_{s1}-\epsilon_{s2})/(x_{s1}-x_{s2})]$ と定義した。これは、接着層のせん断ひずみに相当するものであり、 γ_1 が小さいと接着層に作用するせん断応力が小さいことを意味する。

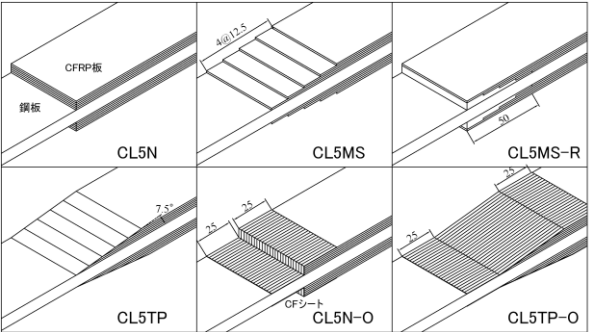


図-1 積層 CFRP 板の端部処理の種類

表-1 端部処理の条件

シリーズ名	端部処理の方法
CL1N	1層300mm, 加工なし
CL5N	5層積層300mm, 加工なし
CL5MS	1層目を300mm, 以降端部を12.5mmずつずらした段差加工
CL5MS-R	CL5MSを反転させたもの
CL5TP	積層端部を7.5° にテーパ加工したもの
CL1N-O	CL1Nの端部25mmをCFシートで覆う
CL5N-O	CL5Nの積層端部25mmをCFシートで覆う
CL5TP-O	CL5TP-Oのテーパ部をCFシートで覆う

表-2 材料物性値

	鋼板 (SM490, t=8.6)	CFRP板 (t=1.16) 一方向材	CFシート (t=0.11) 一方向材	エポキシ樹脂 接着剤 (プレート用)	エポキシ樹脂 接着剤 (シート用)
弾性係数(GPa)	200	150	245	1.5	-
降伏点(MPa)	414	-	-	-	-
引張強度(MPa)	558	2680	3400	30	30

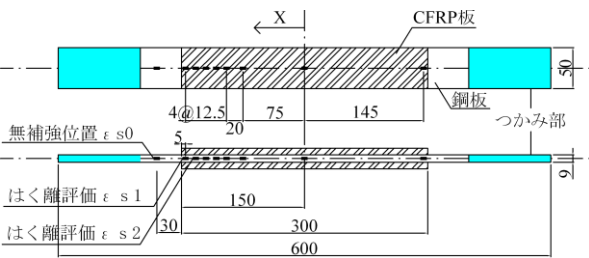


図-2 ひずみゲージの設置位置

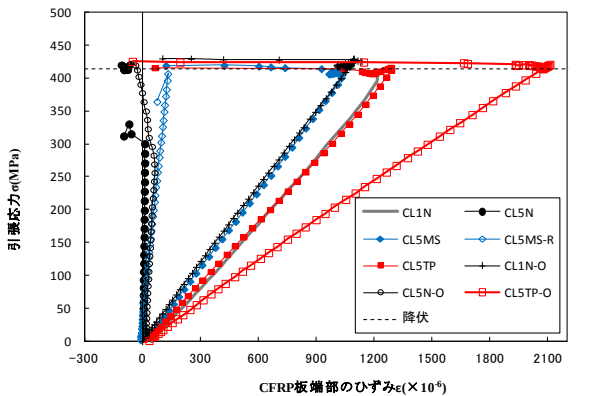


図-3 引張応力と CFRP 板端部のひずみの関係

Key Words : CFRP 板, CF シート, 積層, テーパー, オーバーレイ, はく離
連絡先: 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)

3. はく離強度の評価と補強効果の検討

3.1 CFRP 板のはく離の評価

引張応力とCFRP板端部のひずみとの関係を図-3に示す。CFシートで覆ったシリーズはCFRP板の端部の値を用いた。CL5N, CL5MS-Rは、応力が低下した点ではく離した。なお、CL5N-OはCFシートが弾性域ではく離の兆しが見られたが、積層CFRP板がはく離したのは塑性域であった。

図-4に、無補強位置の鋼板のひずみの値(ϵ_{s0})が 20000×10^{-6} 以上ではく離したシリーズにおけるCFRP板端部に対応する鋼板のひずみを示す。降伏後、CFRP板が接着されている部分の鋼板のひずみが増加しないのは、CFRP板がはく離せず接着され続けているためである。弾性域ではく離しなかったシリーズは、いずれも無補強位置の鋼板ひずみが約 20000×10^{-6} を超えてからはく離し始めることが解る。

表-3に、はく離時における引張応力と、各着目点の鋼板ひずみを降伏ひずみ($\epsilon_y = 2070 \times 10^{-6}$)で除した値を示す。CL5Nと比べ、それ以外のシリーズは全てはく離時の引張応力あるいは各鋼板のひずみが増加していることが解る。積層CFRP板シリーズの中で最も無補強位置の鋼板ひずみが大きいのはCL5TP-Oであった。

図-5に、引張応力と、CFRP板端部の鋼板ひずみの変化率 γ_i の関係を示す。CFRP板端部の剛性変化が大きいシリーズ(CL5N, CL5N-O)では鋼板ひずみの変化率は大きくなる。剛性変化の小さい1層試験片シリーズ(CL1N, CL1N-O)は、いずれも変化率は低くなる。段差・テーパ処理においては、CL5MS-RとCL5TP-Oが解析値とほぼ一致しているが、CL5MS, CL5TPの変化率は、解析値よりも大きくなり、処理なしのCL5Nの解析値と同等であった。これは実験のばらつき等も考えられるが、実験値同士を比較すると、それらは、CL5Nより変化率が小さくなっていることが確かめられた。

以上より、CFRP板の端部に適切な処理を施すことや、CFシートで覆うことによりはく離に対する抵抗強度が向上することが解った。

3.2 応力の低減効果の検討

図-6に、引張応力と試験片中央部の鋼板ひずみの関係を、実験値と接着なしの公称値、およびCFRP板接着時の理論値とともに示す。CFRP板接着により、全シリーズにおいて鋼板のひずみが低減されるものの、理論値をやや下回る結果となった。これは、CFRP板単体の引張試験においても同様の結果が見られることから、材料特性に依存するものと考えられる。なお、引張応力の増分変化量で、鋼板の応力の低減効果を評価した場合、理論値に対する誤差は1%以下であった。

4. まとめ

以上のことから、積層CFRP板の端部を処理することで、はく離に対する抵抗強度が大幅に向上することが確かめられた。本研究の結果を踏まえると、接着工程と材料費の観点から、テーパ処理のCL5TP、あるいはCL5TP-Oが実構造物への適用に望ましいといえた。

参考文献 1) 石川敏之, 大倉一郎: 複数の段差を有するCFRP板接着鋼板の各CFRP板の必要接着長さと最適剛性, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp-368-377, 2010.6

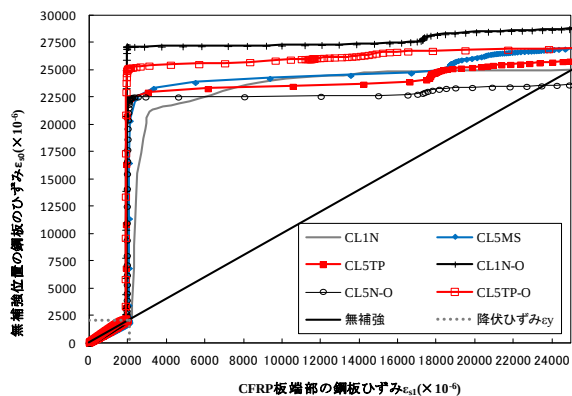


図-4 無補強位置の鋼板ひずみと、CFRP板端部の鋼板ひずみの関係

表-3 はく離時における引張応力と各着目点の鋼板ひずみの比較

シリーズ名	引張応力 (MPa)	無補強鋼板ひずみ/降伏ひずみ ϵ_{s0}/ϵ_y	CFRP板端部の鋼板ひずみ/降伏ひずみ ϵ_{s1}/ϵ_y
CL1N	409(塑性域)	9.75	1.61
CL5N	315	0.78	0.78
CL5MS	407(塑性域)	10.87	1.03
CL5MS-R	406	1.00	0.27
CL5TP	407(塑性域)	10.83	1.03
CL1N-O	412(塑性域)	12.33	1.01
CL5N-O	419(塑性域)	10.80	1.10
CL5TP-O	420(塑性域)	12.19	0.98

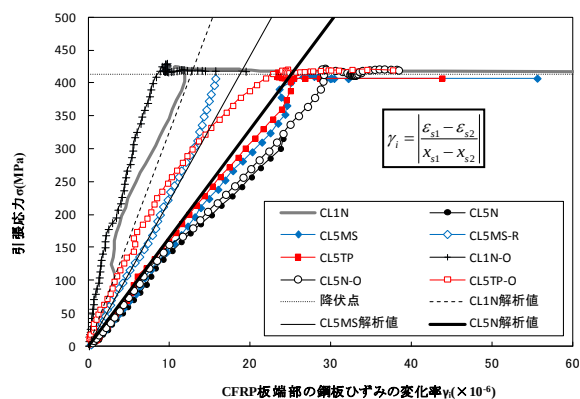


図-5 引張応力とひずみの変化率 γ_i の関係

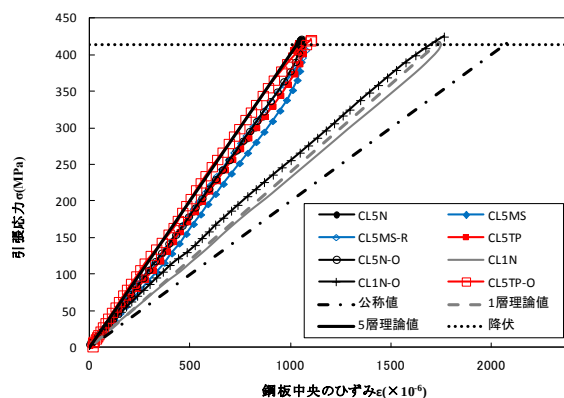


図-6 引張応力と試験片中央部の鋼板のひずみの関係