鋼構造板厚変化部のCFRP補強に関する 基礎的実験と解析

下前 照¹・大垣 賀津雄²・Ngoc Vinh PHAM³・酒造 敏廣⁴・秀熊 佑哉⁵

¹学生会員 ものつくり大学 大学院 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333) E-mail: g01921004@iot.ac.jp

²正会員 ものつくり大学 建設学科 教授 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333) E-mail:ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 ものつくり大学 建設学科 特任講師 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333) E-mail:pnvinh@iot.ac.jp

⁴正会員 大同大学 名誉教授 (〒669-2106 兵庫県丹波篠山市牛ヶ瀬 179-1) E-mail:kcct-tmiki@g.kobe-kosen.ac.jp

⁵正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 (〒103-0027 東京都中央区日本橋一丁目 13 番 1 号) hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

鋼構造物では、溶接継手部において板厚変化部があり、この薄板側部は地震時等に早期の塑性変形発生の起点となり、構造物の耐震性を損なう恐れがある.そこで本研究では、近年、新たな鋼構造物の補強材料として注目されている、炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRP)を用いて、板厚変化部の補強を想定した実験を行うこととした. CFRP は軽量かつ高強度で、耐食性や施工性に優れており、実験は、板厚または板幅を変化させた鋼板に対し、シート状の CFRP を樹脂で接着する工法で供試体を作製した.そして CFRP による補強効果を確認するべく、補強の有無や CFRP シートの種類をパラメータとして、引張試験、圧縮試験を行った.また、実験によって得られた結果を参考に、鋼材に対する CFRP シートを用いた補強工法の有限要素解析におけるモデル化を検討した.

Key Words: CFRP, seismic strengthening,, tensile strength, compressive strength, FEA, peeling failure

1. はじめに

鋼製橋脚等の鋼構造物では,溶接継手部などにおいて 板厚変化部があり,地震時の繰り返し力の作用下で,耐 荷力が小さい薄板側部が塑性変形の起点となって,十分 な耐震性を得られなくなることが考えられる¹⁾. たとえ ば,文献1)では,変断面構造の柱の断面変化点での塑 性変形発生が,柱の崩壊メカニズムに重大な影響を及ぼ して,耐震上好ましくない力学的現象を引き起こすケー スが指摘されている.

この問題に対し、鋼構造物の補強材料として新たに注 目されている、炭素繊維強化プラスチック(以下、 CFRPと記す)を用いた補強工法に着目した²³³. CFRPは 軽量かつ高強度、高耐久性といった特徴を有しており、 施工も鋼材表面をケレンして CFRP を接着するだけなの で容易である.また大掛かりな機械を必要としないため、 狭隘な場所での施工にも対応することも可能であるなど、 様々な点で優れている. この CFRP を用いた補強工法を 確立することで、上記で述べたような板厚変化部の耐荷 力不足も解決できると考えられる.

そこで本研究では、鋼部材の断面変化部に CFRP 補強 が有効であるかを確認するため、板厚または板幅を変化 させた鋼板を CFRP シートで補強し、補強の有無をパラ メータとして、引張試験、圧縮試験を行った.

また,実験によって得られた結果を参考に,鋼材に対 する CFRP シートを用いた補強工法の有限要素解析にお けるモデル化の検討を行った.⁹

2. 実験概要

本研究では、板厚または板幅を変化させた供試体を対

象に引張および圧縮試験を行う.引張試験を行う供試体 は、板厚変化を設けた CASE-TA と、板幅変化を設けた CASE-TB の 2 種類で、圧縮試験は板厚変化を設けた CASE-C のみを実施する. それぞれのケースについて補 強の有無とシートの種類をパラメータとし、3 体ずつ供 試体を用意した.供試体パラメータを表-1 に、供試体 形状を図-1 に示す.

CASE-TA は、厚さが 4.5mm の鋼板の両端に,同じ幅で 厚さが 6mm の鋼板を溶接した供試体で、片面の板厚が 変化している. その面に対して CFRP による補強を行う こととした. CASE-TB は JISIB 号引張試験片に則った供 試体となっていて、両面にそれぞれ CFRP による補強を 行った. CASE-Cは同じ幅と長さで、厚さが 6mm と 9mm の鋼板を溶接して板厚を変化させており、CASE-TA と 同様に片面のみに CFRP を貼り付けて補強を行った.

(1) 供試体製作

実験に使用した材料の諸元を表-2 に示す. CFRP には 高弾性炭素繊維を束ねた炭素繊維シートと、炭素繊維を



エポキシ樹脂で固めたストランドをシート状にした,炭 素繊維ストランドシート(以下,ストランドシートと呼 ぶ)を用いている.**写真-1**にそれぞれのシートを示す. また,大きな変形に対して補強効果を発揮させるには、 CFRPの剥離を抑制する必要がある.そこで,鋼板と CFRPの間に弾性係数が小さく,伸び性能が高いポリウ レアパテ材を挿入して,剥離の抑制を図ることとした³.

CFRP シート補強の手順は、まず鋼板に対してケレン によって、表面の錆や汚れを除去した後、表面の清掃, 脱脂を行い、ウレタンプライマーを塗布する.次にポリ ウレアパテ材を塗布する.このときに、重量を計測しな がら塗布をすることで、供試体ごとの塗布量のばらつき を抑えることとした.CFRP の貼付けは、含浸樹脂を塗 布した後、一方向材の炭素繊維シートまたはストランド シートを供試体軸方向に貼り付け、さらに含浸樹脂を上 塗りする.この作業をCFRPの積層数分繰り返す.

表-1 供試体パラメータ

供試体名	項目		補強シートの種類	
TA-N			無補強	
TA-1	引張試験	板厚変化	炭素繊維シート	
TA-2			ストランドシート	
TB-N			無補強	
TB-1		板幅変化	炭素繊維シート	
TB-2			ストランドシート	
C-N			無補強	
C-1	C-1 圧縮試験 C-2	板厚変化	炭素繊維シート	
C-2			ストランドシート	

表2	材料諸元	

項目	設計 厚さ (mm)	降伏点 (MPa)	引張 強度 (MPa)	弹性率 (MPa)
	4.5	287	452	
鋼板(SS400)	6	332	440	2.0×10 ⁵
	9	276	421	
炭素繊維シート	0.143	_	2485	6.4×10 ⁵
ストランドシート	0.429	_	3080	6.4×10 ⁵
ポリウレアパテ (FU-Z)	_	_	8	55~75
エポキシ樹脂 (FR-FOP FB-F9S)	_	_	29	2.5×10 ³





(a)炭素繊維シート

シート (b)ストランドシート 写真-1 CFRP シートの種類

(2) 載荷方法

引張試験は、両端 100mm をチャックで挟み、2,000kN 万能試験機で荷重を単調増加させ、シートのはく離が確 認できるまで載荷を行った. 圧縮試験は 3,000kN 万能試 験機で行い、鋼材の両端を半円状にすることで両端ピン のにした.載荷時の状況を**写真-2**に示す.

(3) 測定位置

載荷中の応力性状等を確認するために、1軸ひずみゲ ージを設置した.計測位置はそれぞれの供試体について 図-2の赤点に示したひずみ計測位置において、鋼板の 厚みの中央とシート表面中央の軸方向ひずみを計測する ようにゲージを貼付けた.

また,供試体全体の伸び等を測定するため,変位計も 設置した.引張試験については,供試体の前後の2点で 鉛直方向に変位計を設置し,供試体軸方向の変位を計測 した.圧縮試験については,引張試験と同様に鉛直変位 を計測し,さらに供試体中央の面外方向にも変位計を設 置した.図-2の青い矢印に変位測定位置を示す.



写真-2 実験状況



図-2 ひずみと変位の測定位置

3. FEM 解析の検討

表-3 に FEM 解析に使用した解析モデルの材料特性を 示し、図-3 に各材料の応カーひずみ、応カー変位関係 をまとめる.解析対象は各ケースの炭素繊維シートで補 強を施したタイプとする.鋼材は Von mises 塑性モデル を適用し、応力-ひずみ曲線の関係は、一次弾性係数が 2.0×10⁵ MPa で、降伏後はマルチリニア型により降伏棚 のあるひずみ硬化を採用した.

表-3 材料特性

材料	項目	値
	弹性係数(MPa)	2.0×10 ⁵
鋼材(SS400)	降伏点(MPa)	310
	ポアソン比	0.3
炭素繊維	弹性係数(MPa)	6.4×10 ⁵
	引張強度(MPa)	2430
	厚さ (mm) (炭素繊維シート)	0.143
	厚さ (mm) (ストランド)	0.429
	ポアソン比	0.3
	弹性係数(MPa)	2500
エボキシ樹脂 (FR-E9P, FB-E9S)	厚さ (mm)	0.8
	ポアソン比	0.38
	厚さ (mm)	0.6
	せん断強度 ty (MPa)	6.13
ポリウレアパテ (FU-Z)	せん断強度における 相対変位 δy (mm)	0.81
	はく離段階における 相対変位 δu (mm)	2.1



(c) パテ 法線方向 (σ-δ)
 (d) パテ せん断方向 (τ-δ)
 図-3 材料モデル

(1) FEM 解析の概要

解析で使用した解析ソフトウェアはDIANA104である. CASE-TA と CASE-C は、板厚変化の段差が片面にしかな いため、段差がついた片面のみに補強を行っている.し たがって偏心曲げや座屈の影響が大きく出ることが予想 されたので、供試体全体のモデルを作成した. CASE-TB については軸方向の中心から端部までの 1/2 モデルを作 成した.境界条件は片側の端部を全方向固定し、もう片 方に強制変位による荷重を設定した.モデルの有限要素 メッシュは軸方向と幅方向が 5mm、鋼板のみ厚さ方向 を4分割とした.そして、材料非線形と幾何学的非線形 を考慮した解析を実施した.

(2) 解析モデルの詳細

鋼板と CFRP の接着部における詳細図を図-4 に示す. 鋼板とエポキシ樹脂は 20 節点ソリッド要素,炭素繊維 シートは 8 節点シェル要素で構成されている.炭素繊維 シートの 1 層目と鋼材の間に挿入されたポリウレアパテ による接着層は,応力と相対変位を材料モデル化したイ ンターフェイス要素で構成した. CFRP の構成は図-4 に 示すように,炭素繊維シートのシェル要素を,エポキシ 樹脂の厚み 0.8mm 間隔で,高さ方向に層数分を配置し, そのシェル要素の間に,エポキシ樹脂の 20 節点ソリッ ド要素を配置している.



図-4 各材料の構成モデル



図-5 CASE-TA 解析モデル



図-6 CASE-TB 解析モデル



4. 実験結果

表-4 に本実験の結果を示す.同表には供試体の記号, 補強方法,実験方法,最大荷重及び,剥離箇所を示して いる.図-8~12に荷重を降伏荷重で除し,無次元化した 値と,供試体の断面変化部におけるひずみの関係を示す. 無補強供試体を基準にして結果を整理した.

(1) CASE-TA

表-4 と図-8 に示す通り, TA-1 と TA-2 は無補強の TA-N に対して, 弾性限界が上昇しており, TA-1 が 41%, TA-2が28%高い値になっていることがわかる.また, 補 強した供試体のひずみは無補強より小さくなり, 剛性が 向上していることがわかる.表-4 に示す最大荷重に大 きな差はないが,これは鋼材が降伏し,ひずみが大きく なったことと, 偏心曲げの影響で,板厚変化のない供試 体に比べ, CFRP 端部のはく離が早期に発生したことに よるものだと考えられる.

(2) CASE-TB

表-4, 図-9 に示す通り, TB-1, TB-2 の弾性限界は, TB-Nより43%上昇した. さらに CASE-TA と同様に, 剛 性が向上していることがわかる. このケースは板厚変化 がなく,補強も両面に同じように行ったため, 偏心曲げ は起こらず,ポリウレアパテ材による剥離の抑制効果が 十分に発揮されたため,最大荷重の増加も確認すること ができたと推測される.

(3) CASE-C

表-4、図-10 に示す通り、無補強供試体 C-N は早期に 座屈し、最大荷重が 7.2kN であった.補強した供試体 C-1、C-2 の最大荷重はそれぞれ 24.4kN と 20.4kN であり、 無補強と比べ 340%と 284%まで増加している.このこと から、CFRP による補強で早期の座屈を抑えることが可 能であり、座屈による最大荷重が上昇し、圧縮に対する 補強効果を確認することができた.



			補強層数 最大荷重		大荷重	剥離箇所			
	頂目		無補強	炭素繊維 シート	ストランド シート	Pmax (kN)	Pmax/Py	中央部	端部
TA-N			0			210.2	1.59		
TA-1		板厚変化		5		219.3	1.70	0	なし
TA-2	引張計論				2	207.8	1.54	0	なし
TB-N	了门及即小时天		0			108.8	1.37		
TB-1		板幅変化		6		130.1	1.63	0	0
TB-2					2	131.8	1.65	0	0
C-N			0			7.2	0.04		
C-1	圧縮試験	板厚変化		9		24.4	0.12	0	なし
C-2					3	20.4	0.10	CFRP 層	間はく離

表-4	実験結果
表─4	美颖結果

(1) CASE-TA

図-11に供試体 TA-1の荷重-鉛直変位関係の実験結果 と解析結果を比較する.また,図-12 に解析による面外 変位,写真-3 に実験後の供試体 TA-1の写真を示す.図-11 のグラフについて,解析値の降伏荷重が実験値と一 致しており,その後の挙動も概ね合っている.引張試験 では試験機の性質上,供試体を固定するチャック部です べりが発生しており,正確な鉛直変位を計測することが 困難であったため,実験値と解析値の弾性域における剛 性に差が出てしまったのだが,理論値と解析値の剛性が 一致しており,解析結果に問題はないと考えている.

また,解析はインターフェイス要素の相対変位が,設定した値以上に大きくなったことで計算を終了しており,これは前述した,ひずみの増加と図-12で示すような偏心曲げの影響でパテ材のはく離が発生していることを表している.さらにこのはく離が発生した位置は CFRP の端部であり,実験結果と一致している.







写真-3 TA-1 供試体側面 破壊状況

(2) CASE-TB

図-13にTB-1荷重一鉛直変位関係の実験結果と解析結 果を比較する.また、図-14に実験値の最大荷重である 130kN時の、鋼材における軸方向応力コンター図、写真 -4に実験後の供試体TB-1の写真を示す.このケースに ついても CASE-TA と同様に降伏荷重が一致しているが、 弾性範囲内の剛性に若干の差が生じている.

また,降伏後の挙動について,実験値の荷重が急激に 下がっているが,これは CFRP がはく離することなく, 破断したことによるものである.これに対し,解析では 炭素繊維シートの材料モデルを線形弾性体として設定し たため,荷重が落ちることなく計算が継続している. 図-14 から,板幅変化部の応力が非常に高くなっている ことがわかり,実験において,この板幅変化部近傍で CFRPが破断していることが写真-4 から確認できる.





図-14 CASE-TB 130kN 時 軸方向応力



写真-4 TB-1 供試体側面 破壊状況



(3) CASE-C

図-15 に供試体 C-1 の荷重-鉛直変位関係の実験結果 と解析結果を比較する.また,写真-5 に実験後の供試 体 C-1 の写真を示す.図-15 より,実験の最大荷重は解 析値より若干低くなっていることがわかる.このケース の解析において,偏心曲げの影響が大きく出ると推測し, 初期不整の設定を行わなかった.座屈荷重に若干の差が 生まれた原因として,実験供試体の初期不整の影響が考 えられる.

また,解析において CFRP のはく離は確認できず,座 屈後は緩やかに荷重が落ちている.これに対して実験で は解析と比較し急激に荷重が低下しており,板厚変化部 からはく離が発生したことが原因と考えられる.

6. まとめ

本研究では、鋼構造物の継手溶接部などでよくみられ る板厚変化部を対象とした CFRP 補強に着目し、その基 礎的な研究として、断面変化を有する鋼板に CFRP 補強 を施し、実験および解析を行った.本研究では以下の結 果が得られた.

(1) 断面変化を有する鋼板に対し CFRP 補強を行うこ とで,弾性限界が上昇することがわかった.ま



写真-5 C-1 供試体側面 破壞状況

た,剛性の向上も確認できた.

- (2) 圧縮を受けるケースについては、CFRP 補強によって早期の座屈を抑えることで、大幅な最大荷重の向上が期待できる.
- (3) CASE-TA のように、引張に加え、板厚変化およ び片面のみの補強の影響による偏心曲げが同時 にかかる場合は、パテ材の CFRP はく離抑制効果 が十分に発揮できない可能性がある。しかし、 CASE-TB のような引張のみを受ける場合は、 CFRP の破断まではく離を発生させることなく、 最大荷重の上昇が期待できる。
- (4) ポリウレアパテをインターフェイス要素で、
 CFRP シートをシェル要素で、エポキシ樹脂や鋼板をソリッド要素でモデル化を行い⁴、実験値と
 FEM解析がほぼ一致することがわかった。

参考文献

- 酒造敏廣:繰り返し水平力を受ける鋼変断面片持ち柱の 崩壊メカニズムの変動特性,土木学会論文集 Al, Vol. 73, No. 4, pp. I_9-I_18, 2017.
- 2) 土木学会: FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案),複合構造シリーズ09,2018.7
- 杉浦江,小林朗,大垣賀津雄,冨田芳男,長井正 嗣:鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シー ト接着方法に関する解析的研究土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 806_813,2008
- 4) Ngoc Vinh PHAM, Takeshi MIYASHITA: NONLINEAR STRESS ANALYSIS FOR CFRP-SHEET-BONDED STEEL PLATES UNDER UNIAXIAL TENSILE LOADING, Journal of JSCE, Vol. 8, pp.127-143, 2020

(Received August 28, 2020)

FUNDAMENTAL STUDY ON STRENGTHENING METHOD USING CFRP FOR STEEL MEMBERS WITH VARYING THICKNESS

Teru SHIMOMAE, Kazuo OHGAKI, Ngoc Vinh PHAM, Tosihiro MIKI and Yuya HIDEKUMA

Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) has been used as a repairing and strengthening material for aging or damaged structures because of its lightweight, highstrength, and superior durability; this applicability of CFRP has attracted a great dealof attention over the past several decades in the world. In steel structures, there are several locations in which the thickness of the cross-section of members was changed atthe welded joints, therefore it is concerned that at these locations the load-carryingcapacity of members is not sufficient to resist earthquakes loads. As a fundamental study, this study investigates the effectiveness of a strengthening method using CFRPsheets and CFRP strands for steel plates under uniaxial loading by loading tests and finite element analyses.