

(60) VaRTM成形で接着されたCFRP部材による 鋼板の座屈補強に関する実験的研究

佐藤 潤¹・タイ ウィサル²・中村 一史³
松本 幸大⁴・松井 孝洋⁵・越智 寛⁶

¹学生会員 首都大学東京 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: sato-jun1@ed.tmu.ac.jp

²学生会員 首都大学東京 大学院 博士後期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: thay-visal@ed.tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学 准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

⁵正会員 東レ株式会社 ACM技術部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)
E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁶正会員 東レ株式会社 アドバンスドコンポジットセンター (〒455-8502 愛知県名古屋市中港区大江町9-1)
E-mail: Yutaka_Ochi@nts.toray.co.jp

本研究は、真空含浸（VaRTM）によりCFRP部材を鋼構造物に短工期で一体化させて補強する工法の開発を目的としたものである。基礎的な検討として、CFRP部材を鋼板に接着した試験体に軸圧縮力を載荷し、座屈耐力を実験的に検討した。実験では、鋼板（1200×150×9mm）を用いて、両端ピン支持条件下で軸圧縮力を載荷した。真空含浸により、積層数（0, 5, 10, 15, 20層）をパラメータとして炭素繊維シートを接着して補強した。CFRP端部には、各シートで5mmの段差を設けるとともに、多積層における真空含浸の施工性も検討した。その結果、10層以上の試験体の場合、含浸方法を工夫しなければ施工が困難であること、CFRPは座屈するまではく離しないこと、また、炭素繊維シートを最大20層まで積層した試験体の座屈荷重は、10%以下の精度で予測できることが確かめられた。

Key Words : steel plate, CFRP, Strengthening of Buckling, VaRTM

1. はじめに

日本における橋梁は、その多くが高度経済成長期に建設されており¹⁾、それらの劣化、損傷に対する対策が取り組むべき課題となっている。鋼橋の補修・補強としては、ボルトや溶接による当て板工法が挙げられるが、重機の使用や交通規制等の施工上の制約もあることから、今後、増大すると考えられる補修・補強が必要な鋼橋に対して、従来よりも迅速かつ柔軟に対応できる工法の開発が求められている。

実橋への適用が進められている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）接着による補修・補強技術は、これらの課題を合理的に解決できる工法として、近年、注目されている手法の一つである²⁾。CFRPの特長は、従来の鋼材と比較して、軽量・高強度であること、耐腐食性に優れていることが挙げられ、実橋の補修・補強に対して、軽量化による施工性の向上、および耐久性の向上が期待されている。CFRPの製作方法には、手作業で含浸・積層するハンドレイアップ成形や工場で行う引抜成形のほか、風力発電設備のブレードや、航空機の部材などの

作製に用いられているVaRTM（Vacuum assisted Resin Transfer Molding：真空含浸工法）が挙げられる。VaRTMの特長として、現場の複雑な形状に柔軟に対応できること、多積層の炭素繊維シート（以下、CFシートとよぶ）を1回の工程で含浸できるため、急速施工が可能となることが挙げられる。

本研究は、CFRPの特長を享受しつつ、VaRTMを用いることで、従来工法よりも柔軟かつ迅速な補修・補強技術の開発を目的としたものである。そこで、多積層のCFシート含浸方法を検討するとともに、多積層CFシート接着による補強効果を検証するために、VaRTMによりCFRPが接着された鋼板の座屈実験を行った。

2. VaRTMによる多層接着の方法と検証実験

(1) 座屈補強で必要とされる性能とVaRTMの適用

CFRPを接着接合した鋼板の座屈耐力が検討されている^{3,4)}。座屈耐力はCFRPの剛性に依存するため、CFRPを現場で効率的に施工する必要がある。前述したようにCFシートをハンドレイアップ成形により接着する場合、多積層では工期が長くなる。一方、引抜成形されたCFRPは、現場で接着するだけであるが、現場で、断面欠損や溶接ビード等の複雑な形状に対応することが難しい場合がある。前述したように、鋼部材の補修・補強においては、現場で多積層のCFシートを柔軟かつ急速に施工できれば、極めて有用であるといえる。

これらの課題を解決する方法の一つとして、著者らはVaRTMを提案している。図-1に、VaRTMによる鋼板へのCFシートの含浸・接着の概念図を示す。VaRTMでは、バッキングフィルムと呼ばれるプラスチックフィルムで外側を覆い、その内部を真空ポンプで真空状態とし、含浸接着樹脂を流して、CFシートに樹脂を含浸するとともに、鋼板へ接着する。その特長としては、天候に左右されずに、作業ができること、品質の高いCFRPが製作できること、大型の設備が不要で、規模の大きい構造物に適用できることが挙げられる。

(2) 試験体とCFシートの設置条件

表-1に、CFシートの材料物性値を示す。CFシートは、一方向材の高強度タイプを用いた。含浸接着樹脂には、コンクリート構造物の補修・補強で用いられているエポキシ樹脂（AUP40）を適用した。図-2に、治具を設置した状態の試験体図を示す。これは、後述する座屈実験で用いる試験体である。鋼板（150×1200×9mm，SS400）の両端に、写真-1に示すようなナイフエッジの治具を設置することで、両端ピン支持条件下における座屈試験を行うものである。CFシートの接着範囲は150×1000mmで

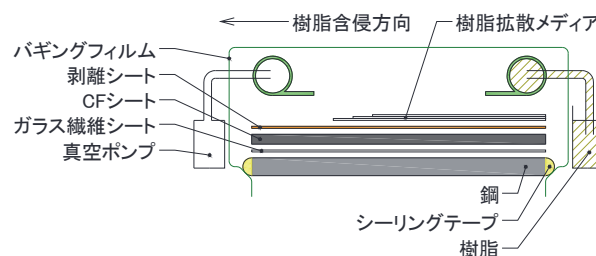


図-1 VaRTMによる鋼板へのCFシートの含浸・接着の概念図



写真-1 鋼板端部に設置したナイフエッジの治具

表-1 CFシートの材料物性値

引張弾性係数 (kN/mm ²)	245
引張強度 (N/mm ²)	3400
設計厚さ (mm/ply)	0.167
繊維重量 (g/m ²)	300
繊維含有率 (%)	0.50

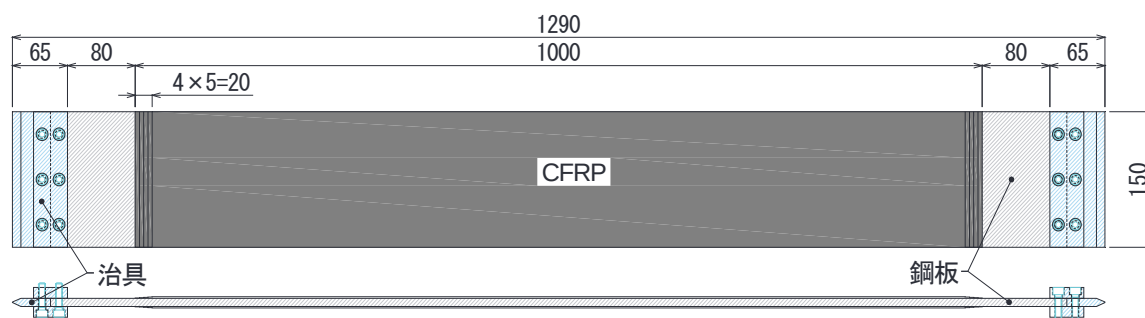


図-2 治具を設置した状態の試験体図（5層試験体）

あり、VaRTMで鋼板両面に接着することとした。CFシートの端部には、応力集中を防ぐため、1層ごとに長手方向5mmのずらして段差を設けることとした。

(3) 多積層CFシートの含浸方法の検討

VaRTMでは、CFシートに樹脂を含浸する場合、樹脂は、樹脂拡散メディアを通じてCFシート最上層に最初に含浸する。さらに、最下層まで厚さ方向に徐々に含浸が進行する。多積層となる場合、最上層の樹脂の含浸は透明なバギングフィルムの上から目視で確認できるが、最下層への樹脂の含浸は目視では確認することができない。そこで、本検討では、鋼板をガラス板に置き換えることで、ガラス板の裏面から最下層への樹脂の含浸の様子を目視で確認することとした。

樹脂の含浸方向は、鋼板の長手方向に対して、CFシートを繊維方向に設置する場合を0°とし、0°、90°の2種類を設定し、樹脂の含浸方向の差異を検討した。

写真-2に、0°、90°方向（10層）含浸における資材の設置状況を示す。図-1を省略したが、樹脂の含浸補助のため、CFシート5層につき、1層のガラス繊維マット（GM）を挿入している。CFシートの最下層に使用するガラス繊維は、10層の場合、サーフェスマット（SF）、15層の場合、チョップドストランドマット（CSM）としている。写真-3に、最下層へのガラス繊維（SF、CSM）の設置状況を示す。SFは薄い不織布の状態であり、CFシートが見える状態であるが、CSMはガラス繊維マットが厚いため、ガラス繊維がランダムに配置されている状況がわかる。

(4) 樹脂の含浸状況の検討結果

写真-4に、ガラス裏面から観察した最下層（10層）の樹脂の含浸状況を、また、表-2に、含浸施工検討結果を示す。表-2における含浸時間は、樹脂が全面に到達するまで、あるいは、流動が停止するまでの時間を示している。なお、含浸速度は、樹脂の粘度に依存し、それは施工時の温度により変化する。施工時の温度は室温で、27～29℃であった。含浸面積は、CFシートの最下層まで樹脂の含浸が確認できた面積を示している。これは、ガラス裏面から確認した。含浸割合は、最下層全面へ含浸した場合を100%とした割合である。

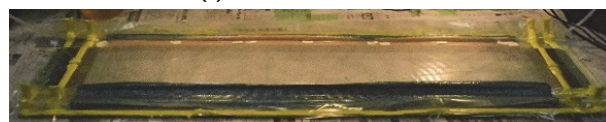
本検討における成形方法では、含浸方向によって含浸割合に差異が見られ、90°方向含浸では含浸割合100%となり、CFシート全面に含浸することが確認できたが、0°方向含浸では未含浸部分が確認された。

単位時間あたりの含浸面積A/Tの値は、同一な積層数である10層のケースで比較しても、含浸方向0°で13 cm²/min、含浸方向90°で17 cm²/minであり、含浸方向を90°とした方が単位時間当たりにより多くの面積へ含浸

していることが確認できた。また、90°方向でも、SFより繊維密度が小さいCSMの方が、多積層でもよく含浸することがわかる。以上の検討結果より、本研究における寸法形状でCFRPを接着する場合、含浸方向は繊維に対して直角（90°）方向とし、CSMを用いることとした。



(a) 0°方向含浸 (10層)

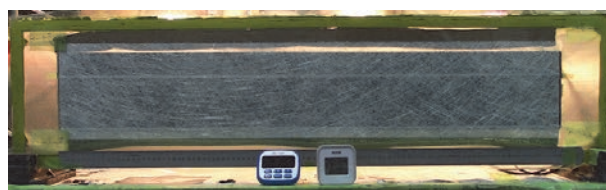


(b) 90°方向含浸 (10層)

写真-2 資材の設置状況



(a) サーフェスマット (SF)

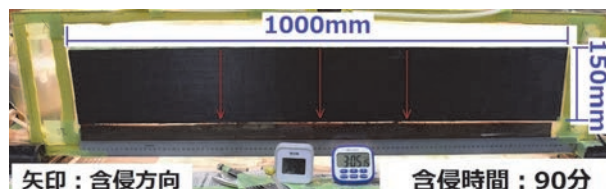


(b) チョップドストランドマット (CSM)

写真-3 最下層へのガラス繊維の設置状況



(a) 0°方向含浸 (10層)



(b) 90°方向含浸 (10層)

写真-4 ガラス板裏面から観察した樹脂の含浸状況

表-2 含浸施工検討結果

含浸方向	積層数 (ply)	含浸時間 T(min)	含浸面積 A(cm ²)	A/T (cm ² /min)	含浸割合 (%)
0°	10	70	900	13	60
	15	52	1500	29	100
90°	10	90	1500	17	100
	15	52	1500	29	100

3. VaRTMによりCFRPが接着された鋼板の座屈耐力の検討

(1) 試験体とVaRTMによるCFRPの接着方法

試験体には、1200×150×9mmの鋼板（SS400）を用いた。表面は、ブラスト面形成動力工具を用いて素地調整を行った。アセトンによる清掃後、プライマー処理として、表面に薄く含浸接着樹脂（エポキシ樹脂AUP40）を塗布した。表-3に、積層CFシートのパラメータを示す。樹脂の塗布後は、40℃前後で24時間の加温養生を行って、樹脂が硬化した後、VaRTMにより、所定のCFシートを積層接着した。図-3に、ひずみゲージの設置位置の一例を示す。試験体の定着長 l_d は、文献5)を参考に、CFRPの段差部分を無視することで算出した。また、接着後は、同様に40℃前後で24時間の加温養生を行った。

(2) 実験方法とセットアップ

写真-5、図-4に試験体セットアップ時の様子を示す。圧縮荷重試験では、VaRTMで鋼板に接着されたCFRP部材による鋼板の座屈耐力を評価するために、鉛直荷重、試験体の鉛直変位、水平変位、各部位のひずみを測定した。鉛直荷重は1mm/minの荷重速度による変位制御により荷重を行った。

(3) 座屈荷重の算定と弾塑性挙動の解析条件

CFシートを接着しない試験体は、オイラーの座屈式により座屈荷重を算定した。また、CFシートを接着した試験体の座屈荷重は、文献4)を参考に求めた。CFRPの段差を無視し、有効なCFRPの長さは、段差の部分を除いた長さとして簡易的に座屈荷重を算出した。

さらに、座屈耐力以降の弾塑性挙動を検討するために、汎用有限要素解析ソフトウェアMarc/Mentat 2013による弾塑性有限変位解析を行った。解析モデルは、図-5に示すように、鋼板とCFRPの間に厚さ0.1mmの接着層とCFRP端部に5mmの段差を考慮し、平面ソリッド要素で作成して、平面解析を行った。支持条件は、鋼板両端の厚さ中

心をピン支持とした。また、面外方向に正弦半波の初期たわみ（全長 $L=1290\text{mm}$ に対して鋼板中央部にて最大 $L/500$ ）を式(1)で与えた。なお、 x 、 y 軸方向は、図-4(a)にある方向と同一である。

$$x = \frac{L}{500} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{L} \cdot y\right) \quad (1)$$

数値解析は、弧長増分法により行い、最大荷重を求めた。この時、設定最大荷重が大きすぎると誤差が出やすくなるため、理論的手法で求めた座屈荷重の約1.5倍を設定最大荷重として与えた。表-4に、各部位の材料物性値を示す。



写真-5 セットアップ全体

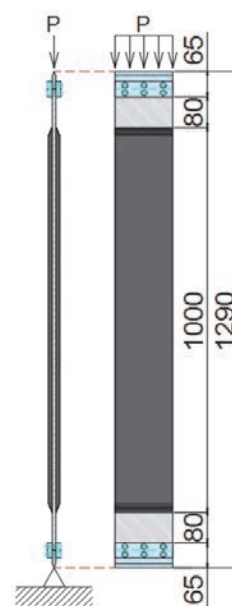


図-4 荷重方法概念図

表-3 積層CFシートのパラメータ

積層数	片側の段差長 l_s (mm)	定着長 l_d (mm)	有効長さ l_e (mm)	接着範囲 l (mm)
0	—	—	—	—
5	20	35	960	1,000
10	45	71	910	1,000
15	70	106	860	1,000
20	90	131	820	1,000

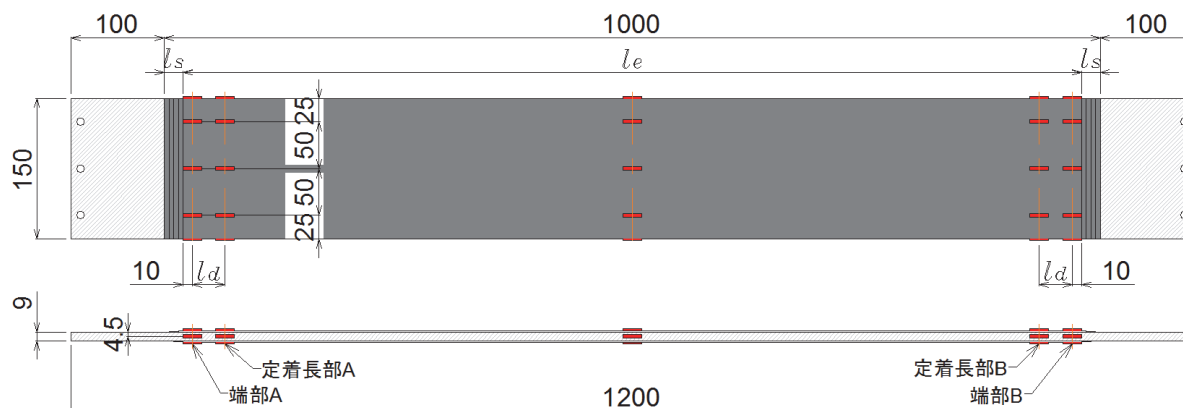


図-3 ひずみゲージの設置位置の一例

(4) 検討結果と考察

a) 荷重と変位の関係

図-6に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を、図-7に、荷重と試験体中央部の水平変位の関係をそれぞれ示す。図-6、7には、参考値として解析値と理論値を併記し、実験および解析における荷重の最大値に、積層数別のマーカーを記している。

図-6、7より、10層以上の全ての試験体において、最大荷重以降では、荷重が急激に低下することがわかる。これは、10層以上の全ての試験体において、最大荷重時にCFRPの端部からはく離が発生したためである。解析では、はく離の影響を考慮していないが、実験と同様に、最大荷重後に局部曲げが生じ、荷重が急激に低下する傾向を示している。

また、図-7より、積層数の増加とともに、はく離発生までの面外変形量が小さくなることがわかった。これは、CFシート積層数が多くなると断面剛性が増加し、面外変形に対する抵抗が増加するためである。

b) 座屈荷重とはく離荷重

表-5に、座屈荷重の理論値、解析値、実験値を示す。表より、理論値と実験値の誤差は2～11%程度となり、解析値と実験値の誤差は2～7%となった。FE解析による解析値の方が理論値よりも精度がよいといえるが、有効長さを考慮した、簡便な理論解析においても約10%の精度で予測できることが確かめられた。

また、図-6、7に併記した、はく離発生時の荷重に着目すると、はく離は、最大荷重後に発生していることがわかる。なお、はく離は、CFRP端部の引張側で発生するため、その箇所のひずみの値が正から負に変化した点で発生したと判断している。

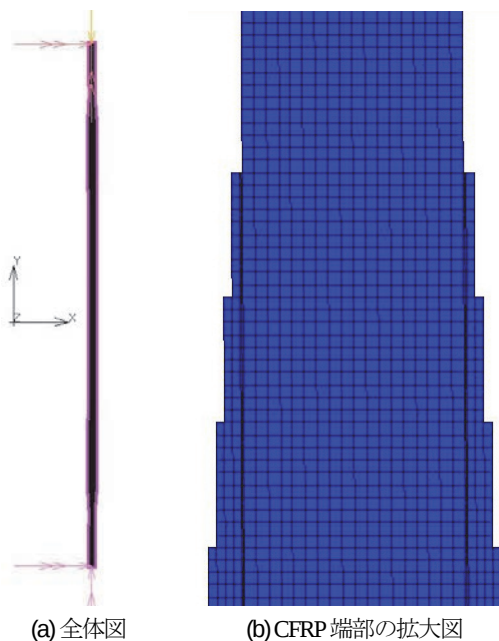


図-5 解析モデル (5層)

c) ひずみ挙動

図-8に、鉛直荷重時のひずみ挙動の一例として、10層試験体において、最大荷重の20%時の鋼板中央部のひずみ挙動の図を示す。評価位置を最大荷重の20%時とした

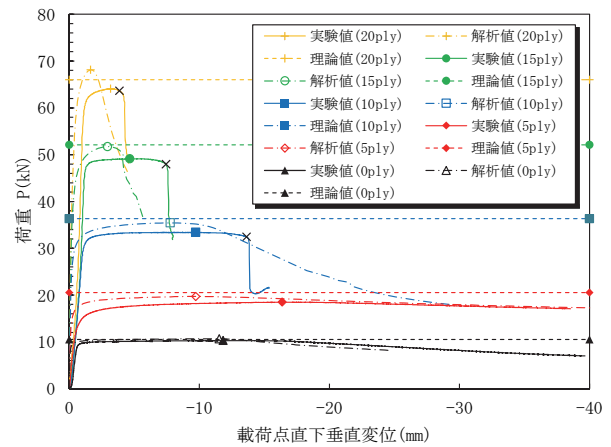


図-6 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

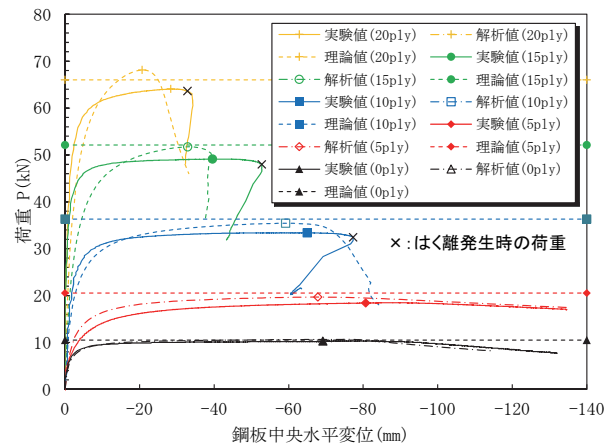


図-7 荷重と試験体中央部の水平変位の関係

表-4 各部材の材料物性値

鋼 (SS400)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	208.7
	厚さ t_s (mm)	各実測値
	ポアソン比 ν_s	0.30
	降伏強度 σ_Y (N/mm ²)	330.2
CFRP	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	122.5
	1層当たりの厚さ t_c/V_f (mm)	0.334
	ポアソン比 ν_c	0.34
接着層	弾性係数 E_e (kN/mm ²)	5.0
	厚さ t_e (mm)	0.1
	ポアソン比 ν_e	0.30

表-5 最大荷重の比較

積層数	理論値 $P_{\sigma 1}$ [kN]	解析値 $P_{\sigma 2}$ [kN]	実験値 $P_{\sigma 3}$ [kN]	$P_{\sigma 1}/P_{\sigma 3}$	$P_{\sigma 2}/P_{\sigma 3}$
0	10.53	10.52	10.28	1.02	1.02
5	20.51	19.69	18.47	1.11	1.07
10	36.30	35.41	33.38	1.09	1.06
15	52.12	51.72	49.19	1.06	1.05
20	65.99	68.12	64.10	1.03	1.06

のは、座屈変形にともなって曲げが生じる前の段階において、圧縮力による軸ひずみとして評価をするためである。図-8における理論値とは、鋼とCFRPの合成断面が一樣に圧縮されていると仮定した場合のひずみの値である。そのため、実験値は、表裏のひずみの平均値をとることで曲げによる影響を除去して評価した。一方、解析値は、FE解析モデルを平面ソリッド要素で作成したため、ひずみはそれぞれ幅方向の平均値である。実験値と同様に、試験体の表裏で平均値を求め、曲げによる影響を除去した。

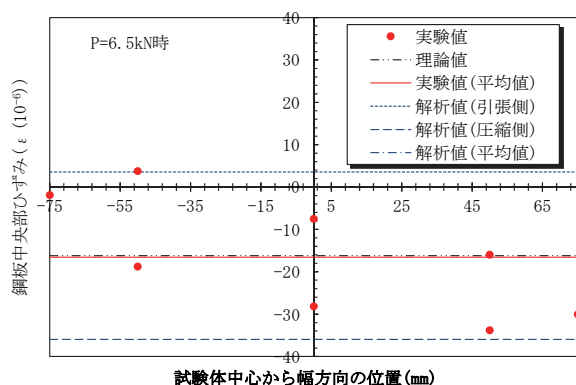
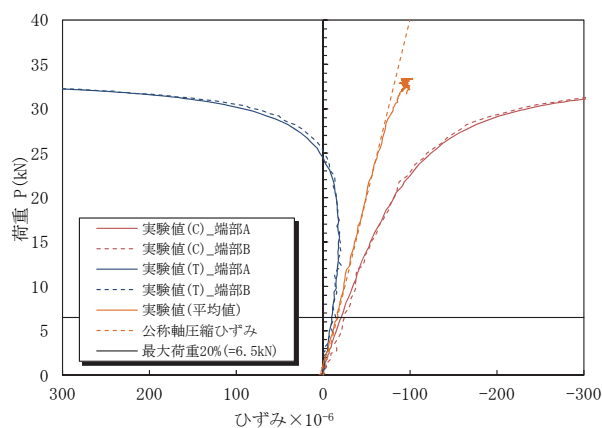
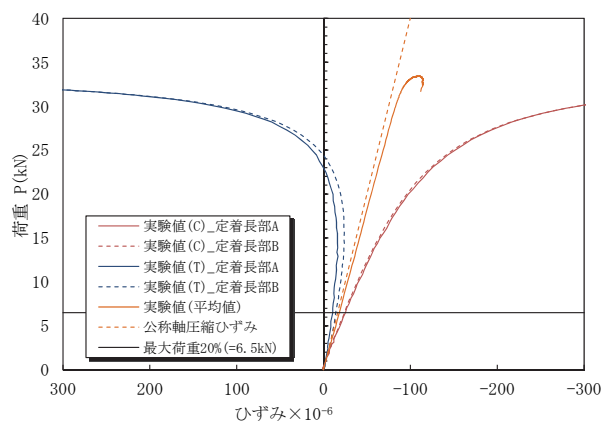


図-8 鋼板中央部のひずみ分布 (10層)



(a) CFRP 端部



(b) CFRP 定着長部

図-9 荷重とひずみの関係 (10層)

図-8より、実験値 (8箇所のひずみの値) は、対称に分布していないことがわかる。これは鋼板の幅方向に一樣に圧縮が作用していないためである。また、曲げによる影響もあることがわかる。

図-9に、CFRP端部および定着長部における荷重-ひずみ関係図を示す。Cは圧縮側の平均値、Tは引張側の平均値を示している。CFRP端部まで応力が伝わり、全断面一樣に圧縮されると仮定した理論値 (公称軸圧縮ひずみ) とほぼ一致していることから、応力伝達はCFRP端部まで十分に行われており、理論計算において段差を無視して有効長さとする方法は妥当であったと考えられる。

d) 座屈後の変形挙動

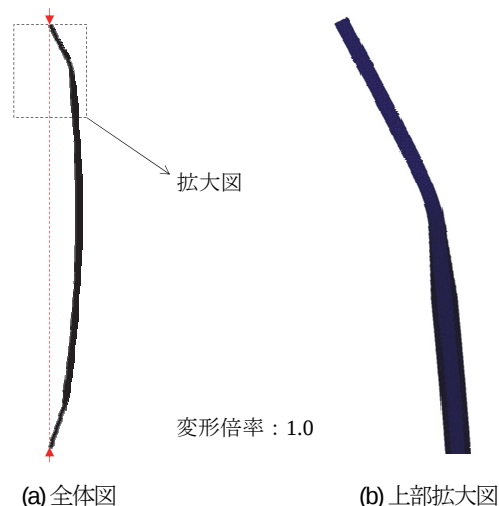
写真-6に、一例として10層の試験体において試験終了時、徐荷前の変形形状とはく離発生部の拡大図を示す。CFシートの積層数が10層以上の試験体において、座屈後、CFRPの補強部分と無補強部分の境界でCFRPのはく離が発生し、局部的に折れ曲がることわかる。はく離は、CFRP上下端のいずれか一方のみで発生し、はく離



(a) 全体図

(b) はく離部の拡大図

写真-6 CFRP 端部のはく離の発生状況 (10層)



(a) 全体図

(b) 上部拡大図

図-10 最大荷重後 (20kN時) の変形図 (10層)

が発生した端部のみで鋼板が折れ曲がるように、上下非対称な挙動を示していた。また、はく離は10層以上の試験体全てにおいて、CFRPが引張力を受ける面のCFRP端部で発生する傾向が見られた。なお、5層の試験体では、局部的な折れ曲がりが生じず、はく離も生じなかった。

一例として、図-10に、10層モデルにおける最大荷重後の変形図 ($P=20\text{kN}$) を示す。解析では、はく離を考慮していないが、実験と同様に、最大荷重後に、CFRPの接着端部で局部曲げが生じていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、VaRTMによる多積層のCFシートを含侵方法を検討するとともに、多積層CFシート接着による補強効果を検証するために、CFRPが接着された鋼板の座屈実験を行った。それらの結果、次のことがいえた。

- (1) 多積層CFシートでVaRTMを行った結果、含侵方向を繊維直角方向とし、含侵距離を短くすることで、多積層CFシートの最下層まで樹脂を含侵させることが可能であることが確かめられた。
- (2) VaRTM成形で接着されたCFRPは、最大荷重まではく離しないこと、はく離は、無補強部の局部曲げによることから、座屈補強に有効であるといえた。
- (3) CFRP部材が接着された鋼板において、段差を無視することで簡易的に算出した座屈荷重の理論値は、実験値に対して約10%の精度で座屈荷重を予測できること、FE解析モデルで段差を考慮すれば数%の精度で座屈荷重を予測できることがわかった。
- (4) CFシートを10層以上とした場合、CFRP端部ではく離が発生し、その位置で鋼板が局部的に折れ曲が

る挙動を示した。FE解析では、はく離を考慮していないが、実験と同様の変形モードであった。

謝辞：本研究は、平成27～28年度国土交通省建設技術研究開発助成制度の一部として行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 玉越 隆史, 大久保 雅憲, 横井 芳輝：平成23年度道路構造物に関する基本データ集, 国土技術政策総合研究所資料, No.693, pp35-40, 2012.
- 2) 新谷 和友：現道橋面補強工事での交通開放について, 第13回土木施工管理技術論文集, pp.153-156, 2008.
- 3) 奥山 雄介, 宮下 剛, 若林 大, 秀熊 佑哉, 長井 正嗣：一軸圧縮を受ける部材への炭素繊維シート接着工法の適用に関する一考察, 鋼構造年次論文報告集, 第23巻, pp.507-512, 2015.
- 4) 奥山 雄介, 宮下 剛, 緒方 辰男, 藤野 和雄, 大垣 賀津雄, 秀熊 佑哉, 堀本 歴, 長井 正嗣：鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP接着鋼板の一軸圧縮試験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.735-746, 2011.
- 5) 複合構造委員会編：FRP 部材の接合および鋼とFRP の接着接合に関する先端技術, 複合構造レポート 09, 土木学会, pp.217-232, 2013.
- 6) 白井 瑛人, 北根 安雄, 石川 敏之, 伊藤 義人：軸力が作用するCFRP接着接着補修鋼板に対するCFRP板のせん断座屈変形を考慮した理論解析, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.798-807, 2015.

STRENGTHENING OF STEEL PLATES UNDER UNIAXIAL COMPRESSION USING CFRP MEMBERS FABRICATED BY VARTM

Jun SATO, Visal THAY, Hitoshi NAKAMURA,
Yukihiro MATSUMOTO, Takahiro MATSUI and Yutaka OCHI

The objective in this study is to develop a method of strengthening steel structures using externally bonded CFRP by VaRTM. As a fundamental study, the effect of strengthening of steel plates using proposed method under compressive force has been investigated experimentally analytically. Compressive tests were conducted using steel plates with pinned ends varying the number of carbon fiber (CF) sheets. And the workability of VaRTM was also investigated in multi-layered CF sheets. As a result, it was confirmed in the case of 10 or more layers of CF sheets, the appropriate construction method has been provided, and CF sheets did not debonded under buckling load. Moreover, buckling load of specimens with laminated up to 20 layers of CF sheets can be predicted with accuracy of 10% or less.