

(10) プリフォーム基材とVaRTM成形接着技術 を応用したCFRP補強鋼板の曲げ挙動

三枝 玄希¹・カオ ミン²・竹本 燿³・松本 幸大⁴
中村 一史⁵・松井 孝洋⁶・越智 寛⁷

^{1,2}AIJ正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学専攻 大学院生
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail: {g155503,c153552}@edu.imc.tut.ac.jp

³豊橋技術科学大学 建築・都市システム学課程 学部生
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail: y163531@edu.tut.ac.jp

⁴AIJ正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 准教授
(〒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

⁵JSCE正会員 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

⁶JSCE正会員 東レ 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

⁷東レ株式会社 アドバンスドコンポジットセンター (〒455-8502 愛知県名古屋市港区大江町9-1)
E-mail: Yutaka_Ochi@nts.toray.co.jp

近年、炭素繊維強化樹脂を用いた既存構造物の補修補強工法の応用が進んでいる。その工法には、現場ハンドレイアップ成形・接着か、成形品であるCFRPプレート接着の何れかが用いられることが多いが、前者は積層数に伴い施工時間が膨大となり作業環境に課題があり、後者は曲面や角部への適用は困難であり、より適用性・施工性・高い補強効果を有する手法が望まれている。本研究では、これらの課題を解決できる既存構造物表面での真空含浸成形・接着法を用いた場合の曲げ強度・形状維持可能なプリフォーム基材を用いることで、急速で且つ効率的な剛性の付与が可能な手法を実証し、その力学特性を実験と解析より検証する。

Key Words : *pre-formable CF sheet, VaRTM, strengthening, Bending test*

1. はじめに

近年、構造物の維持管理・長寿命化に関する需要が高まり、炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）を用いた補修・補強技術の研究開発が盛んに行われている^{1,2)}。従来、CFRPによる補強工法としては、炭素繊維シート（以下、CFシート）を現場で含浸成形・接着するハンドレイアップ法やCFRPプレートを接着する方法が用いられてきた。前者は被補強材の状態に応じた自由な形状

の成形が可能で、必要とされる強化方向に応じて繊維配向・積層数を任意に設定でき、適用範囲も広いが、技術者による現場成形のためCFシートの積総数に応じて施工時間が増大することが避けられず、また、CFRPの機械的性質の変動も工場での成形品と比較すると大きい。後者については、CFRPの機械的性質は極めて安定しているが、補強対象の表面は平面に限られる。これら両者の欠点を補う方法として、筆者らは、真空樹脂含浸成形（以下、VaRTM）法による補修工法を提案・研究して

きている³⁷⁾。本手法は、従来の接触圧による成形法の一つであるハンドレイアップ法が、真空圧を利用して含浸される方法に置き換わったものと言え、引抜成形に匹敵する高い繊維体積含有率と寸法および材料物性値の安定性が得られるとともに、複数のCFシートを瞬時に含浸させることが可能で、様々な表面形状の被補強材にも追従可能である⁸⁾。本研究では、VaRTM成形による補強に加え、断面性能を飛躍的に上昇させ、少ないCFRPで効果的な補強効果を得ることを目的に、三次元的なCFRPの現場成形接着を可能とするプリフォーム（以下、PF）を試行し、その力学的性能および有限要素解析（以下、FEM）による設計の妥当性を検証するものである。

2. PF基材を用いたVaRTM成形

(1) PF基材およびPF成形手順

本研究で使用したPF基材は、一方向CFシートに熱可塑性樹脂（TP）の粒子を付着させたものを使用した。これにより、所定の温度に加温することで表面に付着したTPが熔融し、冷却すると形状が保持されることから、事前成形（PF）が可能となる。PFは始めに、PF基材を所定層重ね、平面や立体形状にする。その上からテフロンシートを介してアイロンをあて、TPを熔融させ一体にし、冷却・再硬化させる。図-1に事前成形時の様子と成形後のPF基材を示す。



図-1 PF成形時と成形後写真

(2) VaRTM成形

VaRTM成形は、真空減圧を利用して樹脂を含浸させる成形法である。この工法の特徴として、ボイド（気泡）含有率が低く、高品質のFRPを成形できること、オートクレーブなどの大掛かりな設備が不要であることや、大型構造物の一体成形が容易であることが挙げられる。応用例には、風力発電用のブレード、掃海艇、船艇などに応用されている⁸⁾。成形は下型の上に樹脂を塗布し、その上に強化繊維基材を配置し、ピールプライ、メッシュ状のフローメディア（樹脂流動体）を載せ、フィルムによって密封し真空減圧をする。所定の真空圧に達した時点で、硬化剤を混合した樹脂を周囲から吸引し、硬化さ

せる。樹脂が十分に含浸されたのを確認した後、脱型する。本研究では、被補強材である鋼材を下型として用いている。図-2にVaRTM成形の模式図を示す。

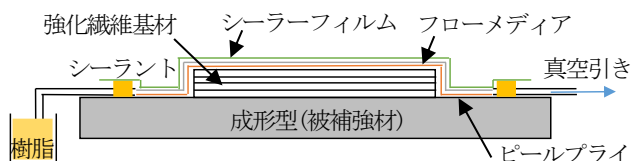


図-2 VaRTM模式図

3. 材料試験

本試験で使用するCFRPについて、JIS K 7164を参考に材料試験を行った。材料試験体の成形は、補強時と同様の条件で成形することとし、まずPF基材を板状に積層し加温・事前成形し、VaRTM成形によってCFRPを成形した。積層数は2層と5層の2種類とした。試験体形状は幅25mm、長さ350mm（試験区間150mm、両端に100mmのアルミタブを接着）とし、各積層数に対して5体の計10体とした。図-3に試験時の写真および応力-歪関係を示す。歪ゲージは試験区間中央に貼付し、繊維軸方向と直交方向を計測した。表-1に材料試験によって得られたCFRPの物性値を示す。ポアソン比、弾性係数は最大荷重の20~50%での線形補間より求めた。

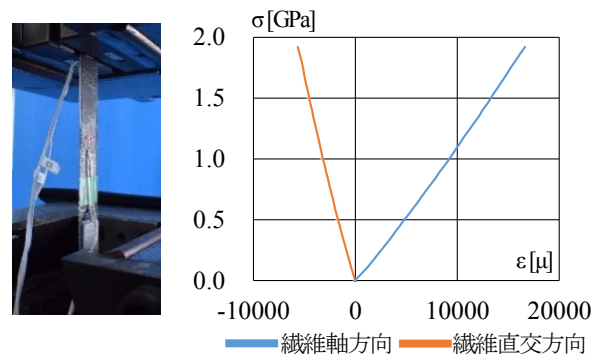


図-3 試験時写真と応力-歪関係（2層試験体）

表-1 材料試験によって得られたCFRPの物性値(全試験体平均)

厚さ [mm/layer]	0.271
繊維体積含有率 V_f [%]	39
V_f の変動係数 [%]	4.31
繊維軸方向弾性係数 E_{cfp} [GPa]	116.9
E_{cfp} の変動係数 [%]	2.72
ポアソン比	0.33
引張強度 [GPa]	2.12
破断歪 [μ]	17232

4. 補強設計

本研究では、鋼板を対象としてCFRPによる補強量を初等梁理論およびFEMによって求めた。補強量は、鋼材の曲げ剛性の1.5倍（Aモデル）、2.0倍（Bモデル）となるように設計を行い、CFRPの形状は鋼材の上に平面的に積層したもの（以下、FB）、リブを付けT形の立体にしたもの（以下、CT）の2種類の形状とした。表-2、3に設計に用いた鋼板およびCFRPの諸量を示す。

表-2 鋼材の材料特性

厚さ t_s [mm]	幅 b_s [mm]	弾性係数 E_s [GPa]
19	150	200

表-3 CFRPの材料特性

1層あたり厚さ t_{cfrp} [mm/layer]	弾性係数 E_{cfrp} [GPa]
0.271	117

(1) 梁理論によるFB形状の補強設計

図-4に示す形状で補強を行うこととし、本研究では、 $b_{cfrp} = 0.5b_s$ として、所定の剛性となるように t_{cfrp} を求めた。

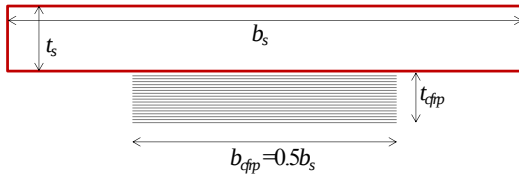


図-4 FB形状CFRPの補強寸法

弾性係数の比を考慮したCFRPの等価幅・厚さを、

$$b_{cfrp,eq} = \frac{E_{cfrp}}{E_s} 0.5b_s, \quad t_{cfrp,eq} = \frac{E_{cfrp}}{E_s} t_{cfrp} \quad (1)$$

と表すと、補強後の曲げ剛性 K_{FB} は、

$$K_{FB} = E_s (I_s + I_{cfrp}) \quad (2)$$

$$I_s = \frac{b_s t_s^3}{12} + (t_s b_s) (y_0 - \frac{t_s}{2})^2 \quad (3)$$

$$I_{cfrp} = \frac{b_{cfrp,eq} t_{cfrp}^3}{12} + (b_{cfrp,eq} t_{cfrp}) (t_s - y_0 + \frac{t_{cfrp}}{2})^2 \quad (4)$$

より得られる。ここで、 y_0 は鋼板上面と補強後の中立軸位置との距離であり、

$$y_0 = \frac{(t_s b_s) \frac{t_s}{2} + (b_{cfrp,eq} t_{cfrp}) (t_s + \frac{t_{cfrp}}{2})}{b_s t_s + b_{cfrp,eq} t_{cfrp}} \quad (5)$$

である。

(2) 梁理論によるCT形状の補強設計

図-5に示す形状で補強を行うこととし、本研究では、 $b_{cfrp} = 0.5b_s$ 、 $h_{cfrp} = 5t_{cfrp}$ として、所定の剛性となるように t_{cfrp} を求めた。

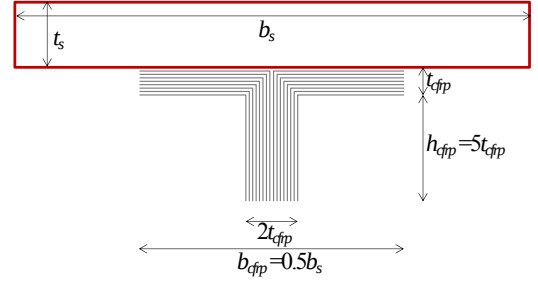


図-5 CT形状CFRPの補強寸法

CT形状とした際の曲げ剛性 K_{CT} は、

$$K_{CT} = E_s (I_s + I_{cfrp1} + I_{cfrp2}) \quad (6)$$

$$I_s = \frac{b_s t_s^3}{12} + (t_s b_s) (y_0 - \frac{t_s}{2})^2 \quad (7)$$

$$I_{cfrp1} = \frac{b_{cfrp,eq} t_{cfrp}^3}{12} + (b_{cfrp,eq} t_{cfrp}) (t_s - y_0 + \frac{t_{cfrp}}{2})^2 \quad (8)$$

$$I_{cfrp2} = \frac{2t_{cfrp,eq} h_{cfrp}^3}{12} + (2t_{cfrp,eq} h_{cfrp}) (t_s - y_0 + t_{cfrp} + \frac{h_{cfrp}}{2})^2 \quad (9)$$

より得られる。ここで、 y_0 は鋼板上面と補強後の中立軸位置との距離であり、

$$y_0 = \frac{\{(b_s t_s) \frac{t_s}{2} + (t_{cfrp} b_{cfrp,eq}) (t_s + \frac{t_{cfrp}}{2}) + (h_{cfrp} t_{cfrp,eq}) (t_s + t_{cfrp} + \frac{h_{cfrp}}{2})\}}{t_s b_s + t_{cfrp} 2t_{cfrp,eq} + h_{cfrp} 2t_{cfrp,eq}} \quad (10)$$

である。

(3) FEMによる補強設計

FEMによる補強設計では、シェル要素を用いた2次元解析を行い、補強量の算定を行った。図-6に各試験体のFEMモデル図を示す。境界条件はピン支持とした。なお、鋼材は等方性材料、CFRPは異方性材料とし、CFRPの剪断弾性係数は複合則より2.3GPaとした。なお、FEMでは鋼材とCFRPの間にVaRTM成形時に必要なチョップドストランドマット（以下、CM）層（厚さ0.36mm、400gsm、弾性係数は8GPa、ポアソン比0.3とした等方弾性材料）をモデル化している。FB形状の積層は端部への応力集中を緩和させるために10mm/4plyのテーパ状の積層方法を用いた。

表-4に梁理論、FEMによって得られた剛性率と無補強試験体（以下、NS）に対するを比を、図-7にNS、初等梁理論およびFEMの荷重-変位関係を示す。まず、梁理論で算出した積層数に対してFEM解析を実施した結果と、図-7の荷重-変位関係からわかるように、梁理論に対してFEMの剛性が低下しており、特にCT形状の補強に対して所定の剛性が期待できない結果となった。これは、接着層やCFRP内における剪断遅れによる影響や、図-8の応力分布図に示すように端部において補強材が有効に作用していないことが原因と考えられる。

以上の結果より、本試験に用いるCFRP補強材の形状は、初等梁理論によるCFRPの補強量計算では剛性低下が見込まれるため、初等梁理論に対して補強量を増加させる必要があると考えられる。そこで、NSに対する曲げ剛性が各形状で1.5、2.0倍を満足すること、および実際の施工性を考慮したCFRP積層数をFEMによって推定した。表-4に積層数を増加させた場合のFEMによる剛性を示す。表から、全形状を通して剛性が1.5、2.0倍を満たしていることを確認した。

また、表-5に使用したPF基材の総面積を示している。表-5からCT形状ではFB形状の約86%の使用量で同等以上の剛性が確保できると予想される。

表-4 補強設計の結果

名称		梁理論	FEM	FEM (再評価)
NS	CF層数	-	-	-
	剛性 [kN/mm]	1.16		1.19
	NSに対する比	1.00		1.03
FB-A	CF層数	25		28
	剛性 [kN/mm]	1.76	1.75	1.86
	NSに対する比	1.52	1.51	1.60
FB-B	CF層数	38		44
	剛性 [kN/mm]	2.31	2.27	2.53
	NSに対する比	2.00	1.96	2.18
CT-A	CF層数	12		14
	剛性 [kN/mm]	1.72	1.69	1.92
	NSに対する比	1.49	1.46	1.66
CT-B	CF層数	16		19
	剛性 [kN/mm]	2.37	2.10	2.92
	NSに対する比	2.05	1.81	2.53

表-5 各試験体のPF基材使用料

試験体名	PF基材使用面積 [m ²]
FB-A	1.55
FB-B	2.31
CT-A	1.35
CT-B	2.00

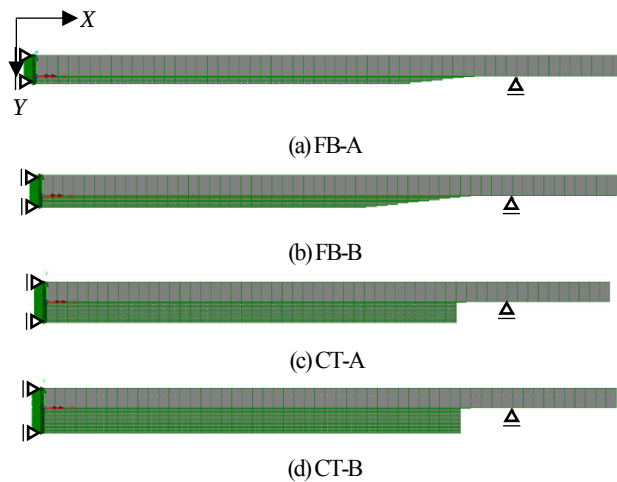


図-6 各FEMモデル図

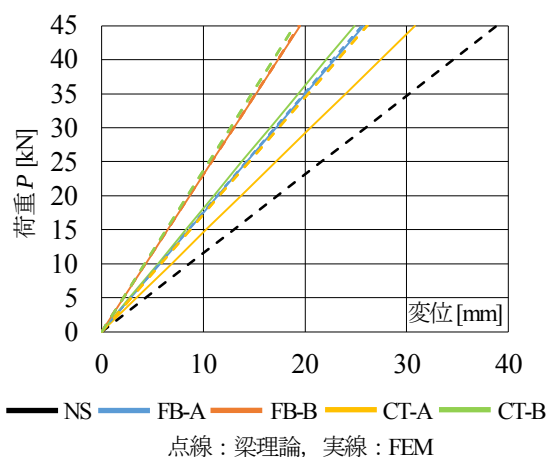


図-7 荷重-変位関係

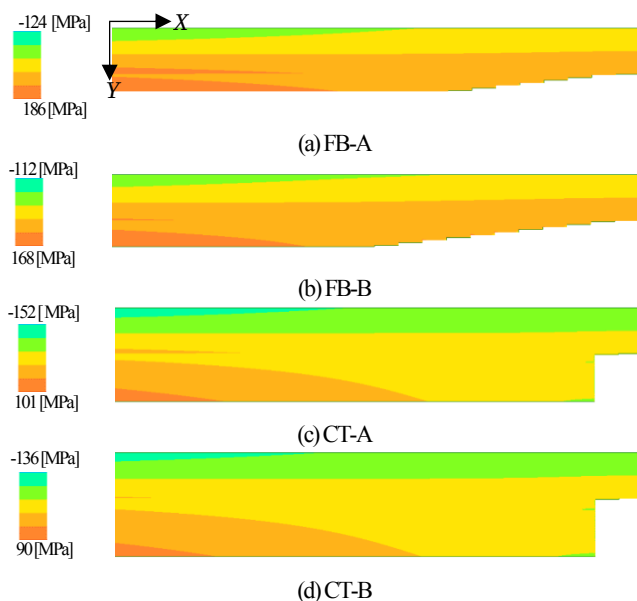


図-8 各モデルのX方向応力図 (P=10kN)

5. 実験の概要および結果

表-6 各試験体の実測寸法

試験体名	t_{CFRP} [mm]	h_{CFRP} [mm]	リブ厚 [mm]	V_f [%]
FB-A	8.9			33.04
FB-B	11.82			40.31
CT-A	3.92	192	8.52	36.00
CT-B	5.22	21.0	11.47	36.51

(1) 試験体および試験概要

試験体はNSと4章より得られた結果を考慮したCFRP補強鋼板4体の計5体とした。図-9にVaRTM成形時、脱型後の写真を示す。

表-6に成形後のCFRPの実測寸法と繊維体積含有率 V_f を示す。計測は膜厚計および電子ノギスを用いた。実測した結果、CT形状のリブ高さがリブ厚の5倍を確保することができなかった。これはVaRTMによる真空圧でリブ部分が押し縮められたことによるものであると考えられる。 V_f は3章で示した材料試験による39%に対して、-6%から+1%の範囲となった。

図-10に試験概要図、試験時の写真、変位計および歪ゲージ位置図を示す。また、図-10(c), (d)に示しているように、載荷点を原点としてX, Y方向とする。試験は曲げスパン900mmの3点曲げ試験とした。

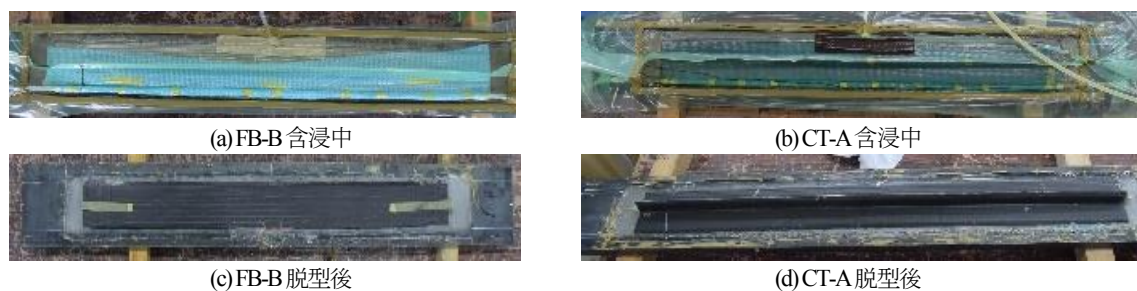


図-9 試験体の成形および脱型時の写真

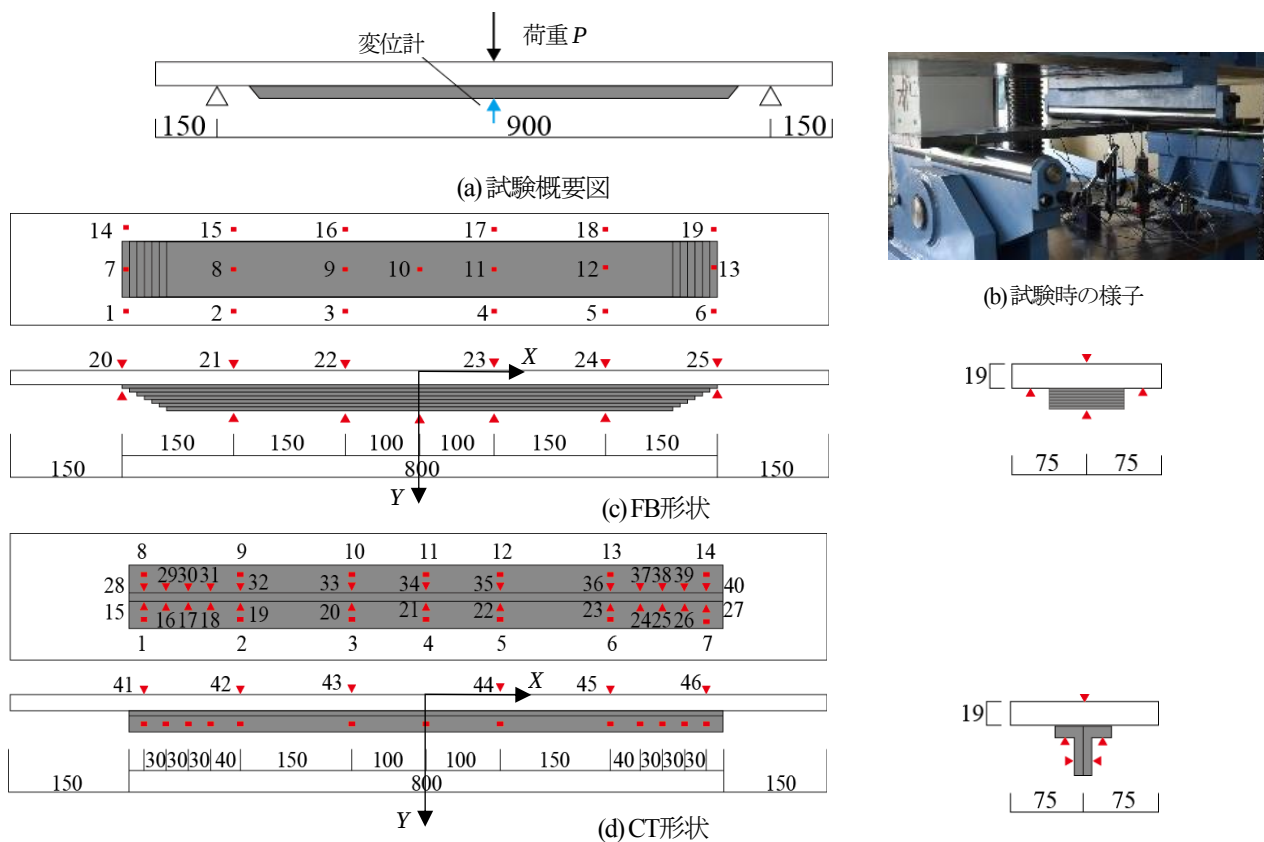


図-10 試験時の様子、試験概要図、変位計および歪ゲージ位置図

(2) 試験結果と考察

a) 荷重-変位関係

図-11に各試験体の試験結果およびFEMによる線形解析結果を示す。試験体の剛性はNS試験体の0kNから曲げ降伏荷重 ($M_y=13.7\text{kN}$) までの範囲において線形近似によって算出している。試験およびFEMの結果から、CT-BよりもFB-Bが剛性が高い結果となった。4章2節で推定した際には、CT-Bが剛性が最も高いと予想されたが、施工後の試験体形状等を考慮したFEMではFB-Bが最も高い結果となり、実際の試験についても同様の結果が得られた。試験結果とFEMによる解析結果に差異が見られたのは試験体の形状不整等が考えられる。破壊モードは全試験体通してCFRPの剥離となった。図-11より得られる最大耐力とNSに対する剛性比を表-6に示す。表-6および図-11から、FB形状試験体の方が鋼材の降伏後も補強効果が続き、耐力が維持できている結果となっている。CT形状についてはCT-Bでは弾性域での剥離が生じており、CT-Aでは剛性がFB-Aと同等であるが早期に破壊が生じた。これは高剛性が期待されるCT形状ではあるが、鋼材の変形にCFRPが追従できなくなるためであると考えられる。

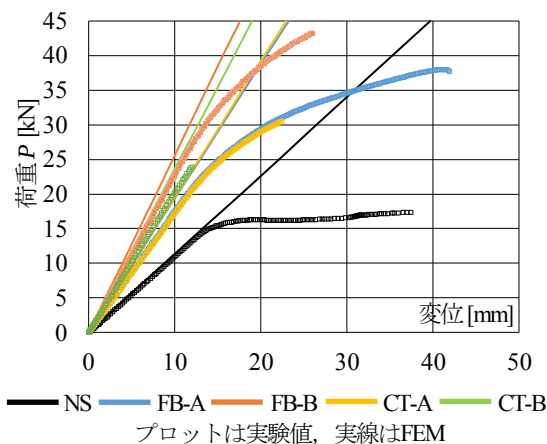


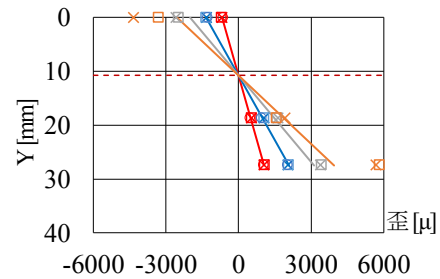
図-11 荷重-変位関係

表-7 最大耐力とNSに対する剛性比

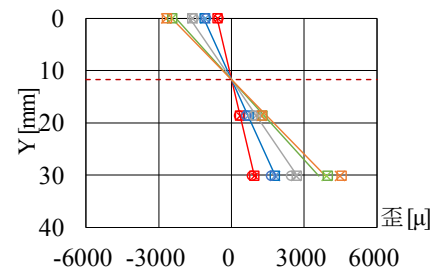
試験体名		最大耐力 [kN]	NSに対する剛性比
NS	実験	$M_y=13.7$	1.00
	FEM		1.03
FB-A	実験	37.9	1.58
	FEM		1.77
FB-B	実験	43.2	2.06
	FEM		2.34
CT-A	実験	30.5	1.56
	FEM		1.79
CT-B	実験	23.8	1.84
	FEM		2.16

b) 断面歪分布

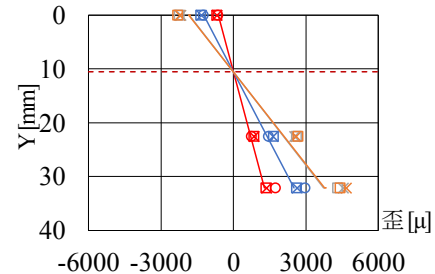
図-12に $X=\pm 100\text{mm}$ における幅方向断面の歪分布について弾性梁理論、弾性域におけるFEM解析結果と実験値をプロットしたものを示す。また、Y座標が同じ位置である歪ゲージ (FB形状(No.3と16, No.4と17), CT形状(No.3と10, No.5と12)) は平均値としてプロットしている。弾性域ではすべての試験体で弾性理論、FEMと対応することが確認できた。また、降伏後には中立軸が移動するため弾性梁理論より大きな値となっている。



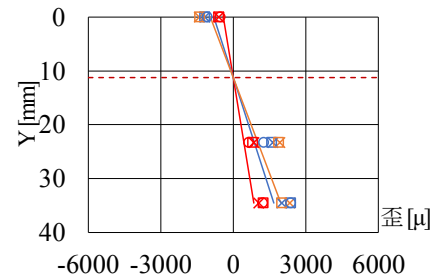
(a)FB-A



(b)FB-B



(c)CT-A



(d)CT-B

— 10kN — 20kN — 30kN — 40kN — Pmax — 中立軸
実線は弾性理論, ×は $X=100\text{mm}$, □は $X=-100\text{mm}$ の実験値,
○はFEMを示す。

図-12 板厚方向断面の歪分布

c) 荷重-歪関係

図-13に荷重と各試験体の歪について弾性梁理論と、弾性域におけるFEM解析結果および実験値をプロットしたものを示す。FB形状については弾性理論、FEM共に同程度の結果となっており、実験値とも概ね対応を示した。CT形状については弾性理論よりもFEMの結果が実験値に近い傾向を示しており、立体形状の補強に対する力学分析はFEM等の詳細解析が必要であると言える。ま

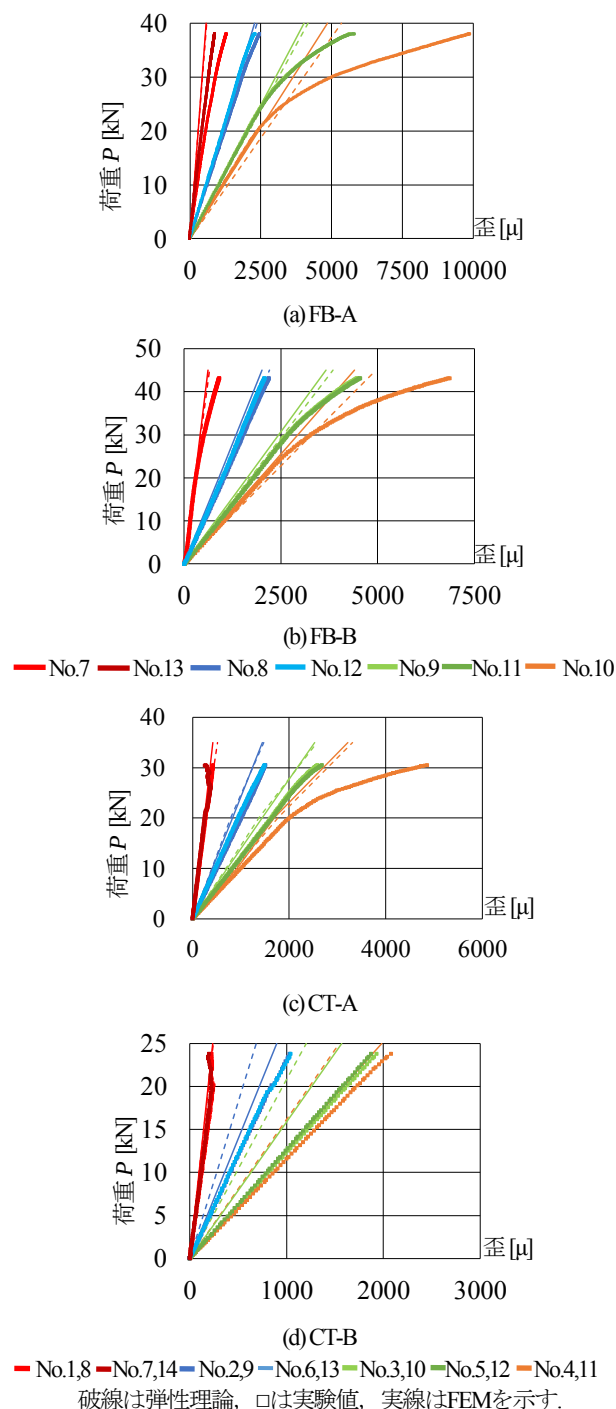


図-13 荷重-歪関係

た、歪値の対応状況に関してはFB形状よりも差が大きく、解析値より実験における歪が大きい結果となった。特に、本章a)で示したように、FEMで設計・推定した剛性よりも大きく剛性が低下したCT-Bでは実験値との差が見られた。

6. おわりに

本研究ではプリフォーム成形が可能な炭素繊維シートをVaRTMによって鋼材へ成形・接着し、3点曲げ試験を行い、基本的な力学挙動の分析を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) プリフォーム基材とVaRTM成形法を用いてリブ状の立体CFRPの成形が可能であり、立体成形により所定の剛性を得るための炭素繊維使用量を低減できることを示した。
- 2) 梁理論およびFEMにより補強前の鋼材の曲げ剛性に対して補強後の曲げ剛性が1.5, 2.0倍になるようCFRP補強設計を行った結果、FB形状では両者の差は小さいが、CT形状では差が大きく、梁理論では剛性が過大評価となることを示した。
- 3) 3点曲げ試験より得られた曲げ剛性は、梁理論より算出されたものに比べ、FEMにより算出されたものに近い値を示したが、全ての試験体において、実験による曲げ剛性がFEMによるものよりも低い値を示した。

今後、弾塑性挙動や文献6)において示した剥離荷重との対応を進め、立体成形法を活かした高剛性で変形能力にも優れた補強法の検討を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は国土交通省建設技術研究開発助成制度（平成27, 28年度）の一部として行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造レポート05 FRP接着による鋼構造物補修・補強技術の最先端，2012
- 2) Xiao-Ling Zhao：FRP-Strengthened Metallic Structures, CRC Press, 2012
- 3) 三枝玄希, Cao Minh, 中村一史, 松井孝洋, 越智寛, 松本幸大：VaRTM成形を応用したCFRPと鋼材との接着強度，日本建築学会東海支部研究報告集，CD-ROM, 2017.3
- 4) 近藤諒翼, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大：VaRTM成形法を応用した鋼部材の補修・補強工法に関する実験的検討，第11回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集(CD-ROM), 2015.11
- 5) 小林洸貴, 近藤諒翼, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋,

越智寛：真空含浸工法を応用したCFRP接着による鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学），複合構造論文集第4巻(論文)，Vol.73, No. 5, p.11_20-11_31, 2017.5

- 6) カオミン，三枝玄希，松井孝洋，松本幸大，中村一史：炭素繊維強化樹脂と鋼材との接着接合部応力性状と損傷センシング その1 3点曲げ試験による耐力と破壊性状分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），

Vol.B3, pp.1517-1518, 2017.8

- 7) 三枝玄希，カオミン，松井孝洋，松本幸大，中村一史：炭素繊維強化樹脂と鋼材との接着接合部応力性状と損傷センシング その2 FBG型光ファイバセンサを用いたCFRP内部の損傷センシング，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），Vol.B3, pp.1519-1520, 2017.8
- 8) 強化プラスチック協会：基礎からわかるFRP，2016

BENDING BEHAVIOR OF CFRP STRENGTHENED STEEL PLATES USING PREFORMED CF BASE AND VARTM TECHNIQUE

Genki MIEDA, Minh CAO, Yo TAKEMOTO, Yukihiro MATSUMOTO, Hitoshi NAKAMURA, Takahiro MATSUI and Yutaka Ochi

In recent years, the application of repair and reinforcement method of existing structure is advanced with carbon fiber reinforced polymer. In the construction method, on-site hand lay-up molding/bonding or CFRP plate bonding is often used. But in the case of hand lay-up method, the construction time is increased with the number of layers. Also, the case of CFRP plates, it is difficult to apply to curved surfaces and corners. Then, a method with more applicability, workability and high reinforcement effect should be developed to increase the structural performance. In this research, we propose a technique that can increase stiffness rapidly and efficiently by using pre-formable carbon fiber sheets that can solve these problems by vacuum assisted resin transfer molding and bonding method on the surface of existing structure, and demonstrated its bending strength by experiment.