

VaRTM成形接着されたCFRPによる鋼板の 曲げ補強と非剥離破壊設計

三枝 玄希¹・松本 幸大²・中村 一史³・松井 孝洋⁴・越智 寛⁵

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

²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

³正会員 首都大学東京准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:hnaka@tmu.ac.jp

⁴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_Matusi@nts.toray.co.jp

⁵東レ アドバンスドコンポジットセンター (〒455-0024 愛知県名古屋市港区大江町9-1)
E-mail:Yutaka_Ochi@nts.toray.co.jp

近年の鋼構造部材へのCFRPによる接着補修・補強技術の開発と研究が多くなされている。しかし、曲げ変形に対するこれらの接着補修・補強方法ではハンドレイアップ成形や成形CFRP板による接着面に対して平行な積層方法が用いられている。これは曲げ剛性への向上効果を鑑みると効率的な積層方法とはいえない。そこで、本研究では従来の2次元的な積層方法に加え、事前成形により3次元的な立体成形が可能な炭素繊維シートを用いることによって効率的な曲げ剛性の向上を目的に有限要素解析による曲げ補強設計を行った。また、補強設計に際して既往研究から得られた結果からCFRPの剥離を抑制し鋼材の降伏後にCFRPの破断で終局耐力となるような補強設計を試み、VaRTMによる成形接着によって施工、3点曲げ試験を通して分析・評価した。

Key Words : CFRP, VaRTM, Bending test, Reinforcement, steel plate

1. はじめに

近年の構造物の維持管理・長寿命化への要求・期待は大きく高まっており、炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）による補修・補強技術の研究・開発が盛んに行われている^{1,2}。従来、CFRPによる補修・補強は炭素繊維シートを現場で含浸成形と接着を施すハンドレイアップ成形法やCFRPプレートを接着樹脂によって接着する方法が多く用いられている^{3,4}。しかし、ハンドレイアップ成形法を用いる場合は補強面に対して柔軟な対応が可能であり、繊維の配向方向や積層数を任意に設定できるという利点はあるが、積層数や施工範囲の増加によって施工時間が大きく長期化してしまう。加えて、機械的性質が施工者の技量に依存してしまうことからCFRPプレ

ートに比べて機械的性質の変動が大きくなってしまう。CFRPプレートの接着は機械的性質の安定性は極めて高いが、補強面が平面に限定されてしまう。これら2種それぞれの方法の利点である、平面に限らず補修・補強が可能であり、且つ機械的性質が安定した施工法として、筆者らは真空樹脂含浸成形（以下、VaRTM）を用いた補修・補強法を研究している⁵。VaRTMは真空減圧による成形法であり、作業環境に優れ、が高く安定した強化材含有率を有しているという特徴を持つ⁶。そこで、既往研究⁷では鋼材に対してVaRTMを用いた成形接着工法による曲げ補強設計を行った。その際、曲げ剛性の効率的な向上を目的として事前成形が可能な炭素繊維シートによってCFRPの立体成形を試みた。その結果、設計寸法に概ね対応を示した成形・施工を実証し、少ない炭素

繊維シート使用量で曲げ剛性の確保には成功したものの、鋼材の弾性範囲で剥離破壊が生じた。接着接合による補修・補強設計では剥離破壊が懸念され、様々な対処法が提案されている⁴⁾。そこで本研究では、事前成形が可能な炭素繊維シートを使用し平面積層に加え、立体成形による効率的な曲げ剛性の向上とCFRPの剥離破壊を抑制し、鋼材の降伏後にCFRPの破断によって終局耐力を迎えるような補強設計を有限要素解析（以下、FEA）によって試みた。そして、VaRTMによる成形接着試験体を作製し、3点曲げ試験を通して分析・評価を行った。

2. 補強設計

(1) 補強設計の概要

本研究では厚さ19mm、幅150mmのSS400鋼材を対象として、CFRP接着成形による曲げ補強設計を曲げスパン900mm、CFRPによる補強長さ800mm、補強幅75mmの3点曲げ試験として行う。本研究では、図-1に示すような3種類の補強断面を採用し、補強設計を行った。ここで、採用した断面の形状について説明する。図-1(a)は従来の補修・補強設計に用いられている平面積層型、図-1(b)、(c)は効率的な曲げ剛性の向上を目的とした立体成型型となっている。

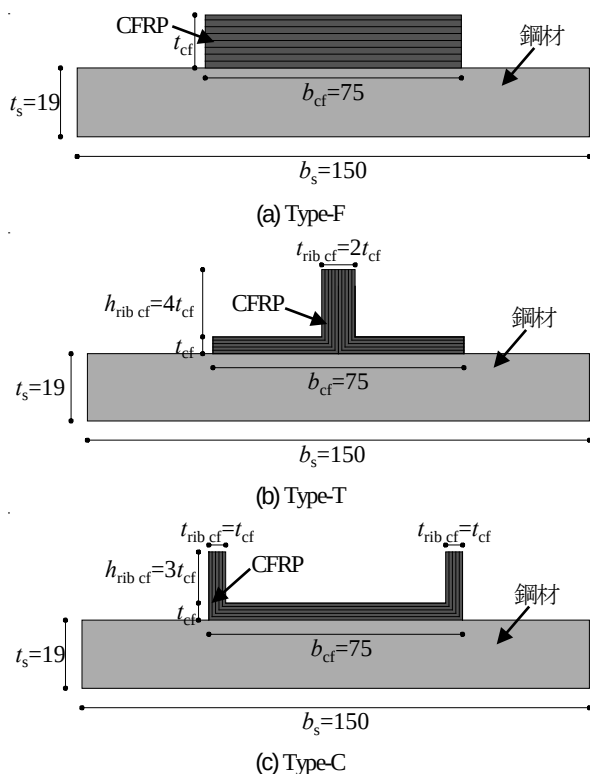


図-1 補強断面 [単位 : mm]

鋼材に対するCFRPを用いた補修・補強の際には、電気化学的腐食を防止するため、鋼材の補修・補強面とCFRPの界面には十分な接着層が必要となる⁴⁾。しかし、本研究に用いたVaRTMは真空減圧によって樹脂を含浸させる成形法であり、十分な接着層の形成はされないと考えられるため、鋼材/CFRP間に目付量450gsmのチョップドストランドガラスマット（以下、CM）を設置した。

補強設計では初めに合成断面を考慮した梁理論によって線形解析を行うことで断面の算定を行い、補強量を決定した。次にFEAによる非線形解析を行い、以下に示す条件を満たしていることを確認し、満たさなかった場合は断面算定・補強形状を再考し、条件を満たすよう探索した。補強設計の条件は、

- 1) CFRPによる補強後の剛性は無補強（NS）時の1.5倍程度を目標とする
- 2) 既往研究⁸⁾による曲げ変形によって生じる接着面垂直方向の剥離時の応力（以下、ピール応力）は約20MPaと推定されることから、最大を20MPa未満とする
- 3) 破壊は鋼材の降伏後にCFRPの破断となることを目標とし、設計する

こととした。表-1に使用した被補強材及び強化材の機械的性質を示す。なお、表-1(b)に示すCMの値は成形後のGFRPとして仮定した値とし、表-1(c)に示すCFRPの値は繊維体積含有率が38.41%時の材料試験により得られた値を補強設計時に用いる45%に換算したものととした。繊維体積含有率を45%としたのは、VaRTM法を用いた場合の繊維体積含有率は40%から50%程度であり、繊維体積含有率を低く設定し設計を行った場合は曲げ剛性は安全側評価、ピール応力は危険側評価となるため、中間である45%ととした。

表-1 使用材料の機械的性質

(a) 鋼材				
Type	弾性係数 E_s [GPa]	降伏点 σ_y [MPa]	引張強度 σ_t [MPa]	ポアソン 比
T	200	289	445	0.3
F, C		304	448	

(b) CM		
厚さ [mm]	弾性係数 [GPa]	ポアソン比
0.55	8	0.3

(c) CFRP（繊維体積含有率45%）		
厚さ [mm/層]	軸方向弾性係数 [GPa]	軸直交方向弾性係数 [GPa]
0.233	110.12	6.60
引張強度 [GPa]	剪断弾性係数 [GPa]	ポアソン比
1.897	2.37	0.308

FEAは対称条件を考慮した2次元モデル，要素は平面応力状態を仮定した2次要素三角形及び四角形要素とした．また，鋼材は図-2に示すような等方性弾塑性材料のトリリニアモデルとし，CMは等方性弾性材料，CFRPは異方性弾性材料とした．

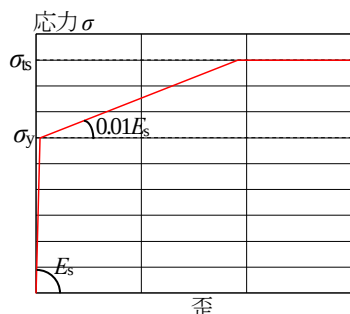


図-2 鋼材の構成則

(2) 補強設計モデル

図-3に補強形状，後述するピール応力・CFRP軸方向歪の最大発生位置を示す．本補強設計によるモデルは左右対称であることから，図-3は半分を省略して示す．図-3(a)，(b)，(d)は端部に施すテーパ状積層を10mm/2層

とした．図-3(b)は図-3(a)に対し，中央部についても19層以降に10mm/2層でテーパ状積層を行ったモデルとなっている．図-3(c)，(d)は立体成形による効率的な曲げ剛性の向上を目的としたモデルであり，図-3(c)は既往研究でのモデルとなっている．図-3(d)は図-3(c)に生じた鋼材の弾性範囲での剥離破壊を抑制するために端部にType-Fと同様のテーパ状積層を施し，リブ部の形状はFEAによって剪断遅れが発生する部分，中央部のピール応力を考慮し除去したモデルとなっている．図-4にFEAによる荷重-ピール応力関係，荷重-歪関係，荷重-変位関係を示す．ピール応力は接着面鉛直方向に生じる応力の最大発生位置，歪はCFRPの最大軸方向歪の発生位置，変位は曲げスパン中央の鋼材の鉛直変位とした．図-4(a)，(b)より，Type-F-1はCFRPの剥離・破断は生じない結果となり，鋼材の降伏後も変形に追従すると予想された．Type-F-2はCFRPの破断前に中央側テーパ積層部の18・19層間でピール応力が20MPaを迎えるため，19層以降が徐々に剥離すると予想された．Type-Tについては7kNを超えたところで端部リブ部にてCFRPの層間剥離が生じると予想された．Type-Cでは剥離前の約40kNで中央リブにおいてCFRPの破断歪へ到達すると予想される．図-4(c)から，全モデルにおいてNSの1.5倍の曲げ剛性を満足

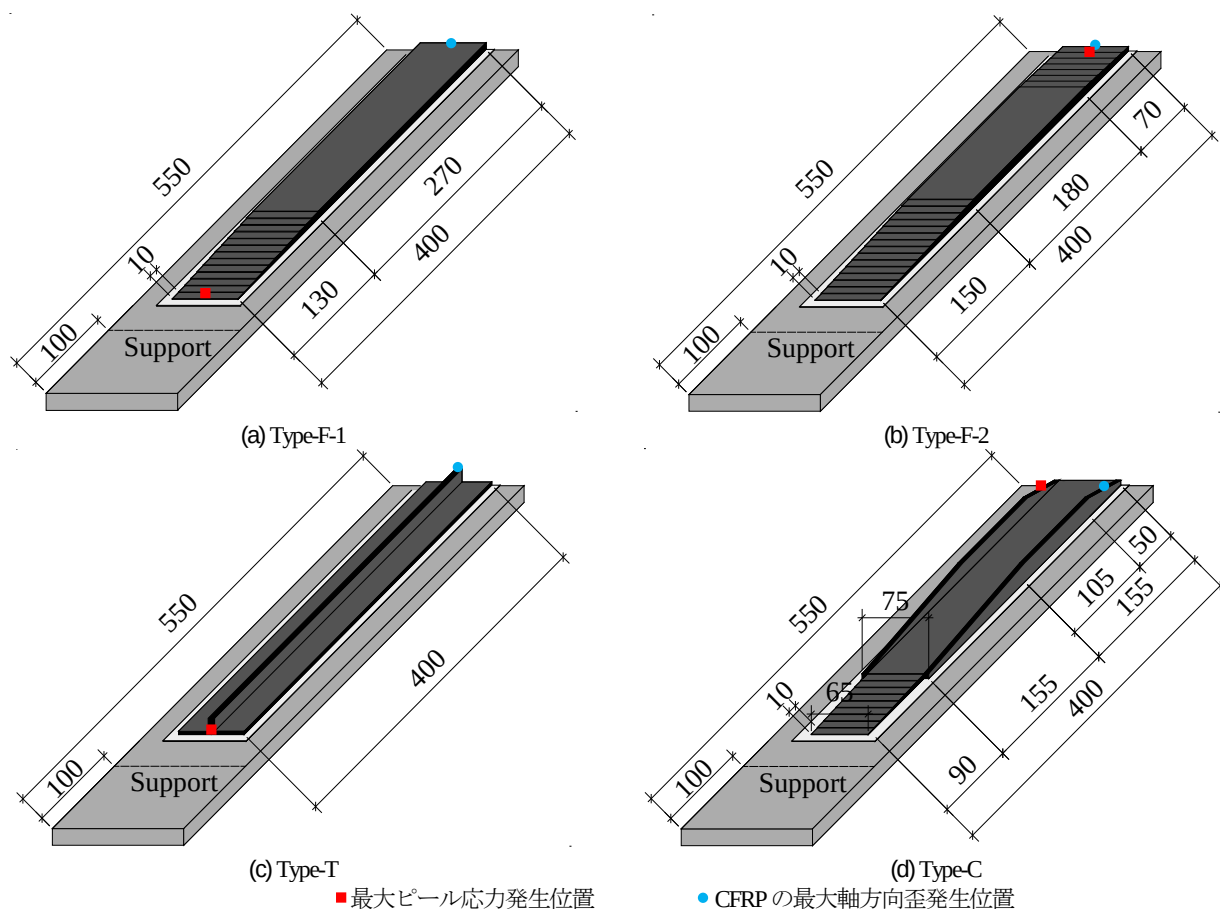


図-3 補強設計モデル[単位:mm]

していることを確認した。また、表-2に各断面の補強設計寸法と炭素繊維シート量を示す。なお、炭素繊維シート量は図-3に示しているモデルの総面積ではなく、各モデルの形状を作製するために使用する面積としている。

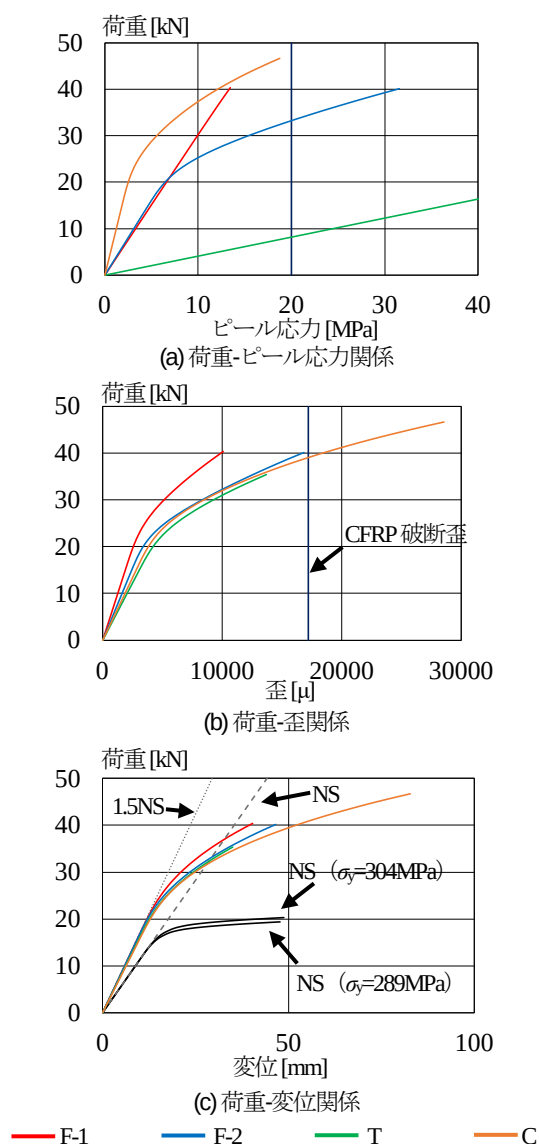


図-4 FEA結果（補強設計モデル）

表-2 補強設計断面寸法

Type	t_{cf} [mm] (積層数)	h_{ibcf} [mm]	t_{ibcf} [mm]	炭素繊維シート量 [m ²]
F-1	6.524 (28)	13.048	6.524	1.407
F-2	7.456 (32)			1.476
T	3.262 (14)	13.048	6.524	1.350
C	4.660 (20)	13.980	4.660	1.377

3. VaRTMによる成形接着

図-5にType-CにおけるCFRPの成形接着の手順を示す。図-5(a), (b)はVaRTM前に行った事前成形の状況である。使用した炭素繊維シートの表面には熱可塑性樹脂の粒子が塗布されており、所定の温度に加温することで表面の熱可塑性樹脂が熔融し、冷却によって形状が保持される。これにより、事前成形が可能となっている。図-5(a)に示すように、加熱・冷却後の炭素繊維シートは自重に十分耐える剛性をもつ。事前成形は初めに所定層数を図-1(c)に示すような溝型で積層し、図-5(b)のように端部と中央部を設計寸法に従って除去した。図-5(c)～(f)はVaRTMによる成形接着の手順である。図-5(c)はロータリー式ブラスターによる鋼材の下地処理後の状況であり、十点平均粗さ R_z (JIS)が $20\mu\text{m}$ 以上であることを確認している。下地処理後は図-5(d)のように必要資材を積層し、真空度が -100kPa であることを確認し、図-5(e)に示すように樹脂を含浸させる。図-5(f)に硬化・脱型後の状況を示す。表-3に実測による全試験体の寸法と繊維体積含有率を示しており、実測による結果、Type-F-2で繊維体積含有率が40%をやや下回ったものの、概ね40%以上の繊維体積含有率を確保することができた。

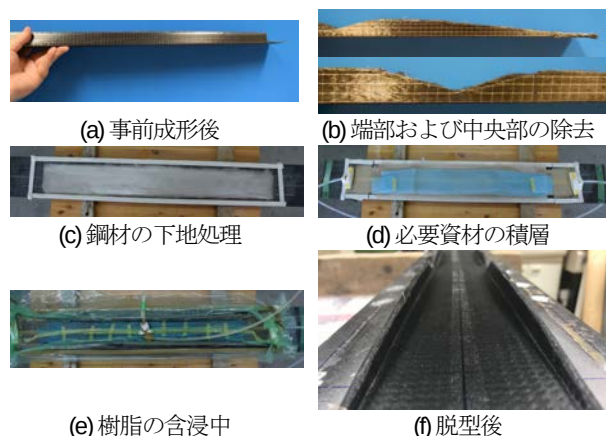


図-5 VaRTMによる成形接着

表-3 試験体断面寸法

Type		t_{cf} [mm]	h_{ibcf} [mm]	t_{ibcf} [mm]	繊維体積含有率 [%]
F-1	設計	6.524	13.048	6.524	45.0
	実測	7.056			41.7
F-2	設計	7.456			45.0
	実測	8.448			39.7
T	設計	3.262	13.048	6.524	45.0
	実測	3.920	15.280	8.520	36.0
C	設計	4.660	13.980	4.660	45.0
	実測	4.850	15.150	4.917	43.3

4. 試験結果および考察

図-6に試験状況の写真，図-7に各試験体の破壊モードを示す．Type-F-1はCFRPの剥離・破断は生じずに鋼材の曲げ変形に追従する結果となった．試験は試験機の都合のため約80mmの変形にて終了した．Type-F-2は補強設計で予想された中央側テーパ積層部の18・19層間で剥離が生じ，その後は18層分が剥離せずに鋼材の変形に追従する結果となった．Type-Tは鋼材/CM層間で剥離が生じた．Type-Cでは，中央リブ部の平面積層部との境界で約100mmの剥離が発生・進行し，最終的にはCM/CFRP層で剥離が生じた．

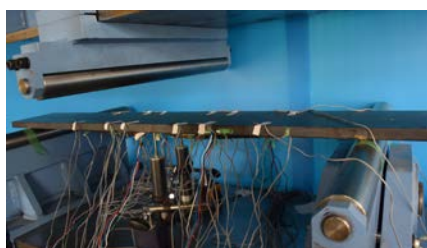
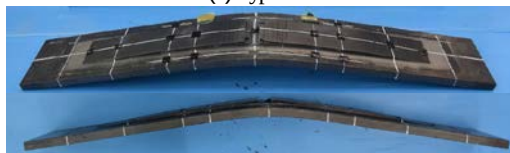


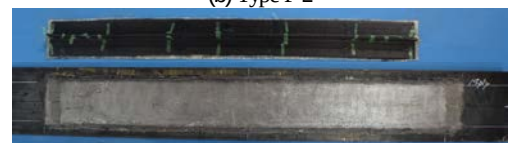
図-6 試験状況 (Type-C)



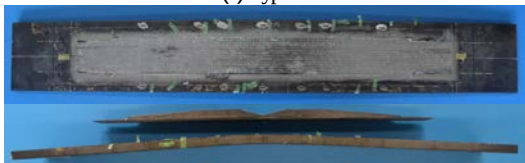
(a) Type-F-1



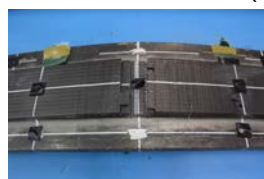
(b) Type-F-2



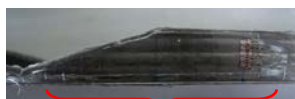
(c) Type-T



(d) Type-C



(e) Type-F-2の中央部



約 100mm の層間剥離
(f) Type-Cのリブ部

図-7 破壊モード

図-8に荷重-変位関係を示す．図-8中には試験値および試験体の実測値によるFEAの結果を示している．変位はFEAは図-4(c)と同様に曲げスパン中央部の鋼材の変位とし，試験値はType-Fは試験機のカロスヘッド変位，Type-T, Cは変位計の値としている．前述したように，CFRPの剥離が生じたType-F-2, T, CではType-Tでは剥離が即座に進行したため荷重の低下は見られなかったがType-F-2, Cのように一部で剥離が生じた試験体については剥離の進行に伴って荷重が減増する挙動が見られた．曲げ剛性の向上はType-Tは1.5倍を満足し，Type-F-1, F-2, Cは順に1.42, 1.41, 1.35倍程度となった．

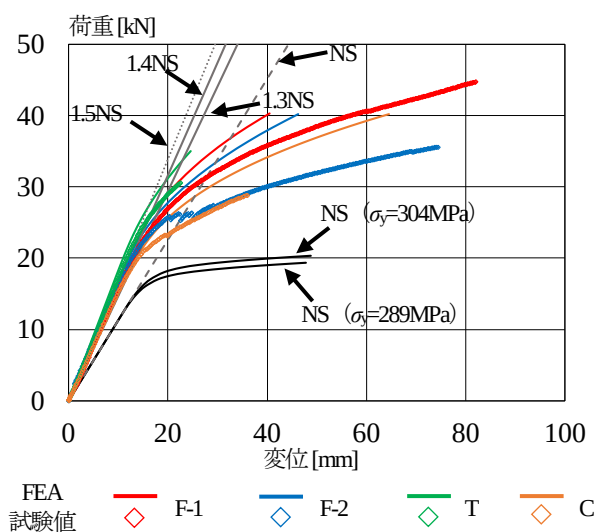


図-8 荷重-変位関係

(1) Type-F

図-9にFEAによる荷重-ピール応力関係，図-10に曲げスパン中央部におけるCFRPの荷重-歪関係，図-11に曲げスパン中央部から130mm位置における歪分布を示す．図-11に示している試験値は曲げスパン中央部から±130mm位置の歪ゲージから得られる値の平均値としている．図-9から，補強設計時と同様にType-F-1ではテーパ積層部の26・27層間で最も高い結果となった．図-4(a)に比べ，両試験体で40kN時のピール応力が増加したのは設計値よりも繊維体積含有率が低くなり，CFRP厚が増加したためであると考えられる．

Type-F-1のFEAは歪が約10000 μ までの結果が得られているが，試験ではその後荷重が5kNほど増加し歪が破断歪に到達していることが図-10からわかる．図-9に示したピール応力が線形性を維持すると仮定すると45kN時点でも20MPaは超えないと考えられる．試験は途中で終了したため，目視によるCFRPの破断は見られなかったが，CFRPの剥離よりも前に破断歪へ到達していること

から、破断後に中央部の曲げ剛性が低下すると共にピール応力も低下するため、剥離は生じずに破断が進行していたと予想される。また、図-11(a)から、合成断面での弾性域および鋼材の降伏後についてFEAと試験値が対応を示し、中立軸がCFRP側へ移動していることがわかる。

Type-F-2では、図-9から20kNを超えたあたりでピール応力に非線形性が見られている。20MPaに到達するのは32.5kNとなっているが、実際に剥離が生じたのは26.2kNであった。これは図-8からわかるように、鋼材の降伏後の剛性は総じて試験値が低い傾向であることから、実際のピール応力は鋼材の降伏後の曲げ変形量の増加によってFEAよりも早く20MPaへ到達すると予想されるため、このような破壊モードに至ったと考えられる。図-11(b)から、図-7(e)に示したような中央部の剥離が生じる以前まではType-F-1と同様にFEAと試験値が対応を示している。しかし、19層以降のCFRPについて、剥離後の30、34kN時には完全に補強効果を発揮することができていないことがわかる。

これらの結果から、従来の積層方法であるType-Fではピール応力を抑えることを目的に最大ピール応力が発生すると予想される端部に本試験体に用いたテーパ積層のような適切な処理を施すことによって鋼材の降伏後にもCFRPが剥離せずに曲げ変形に追従し続ける設計が可能であることがわかった。

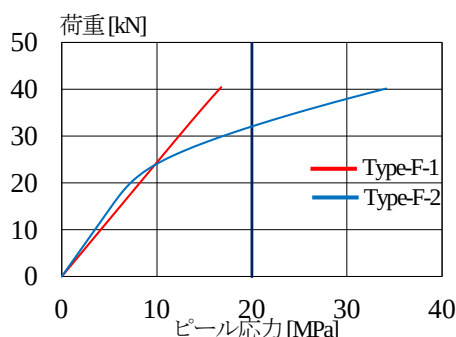


図-9 荷重-ピール応力関係

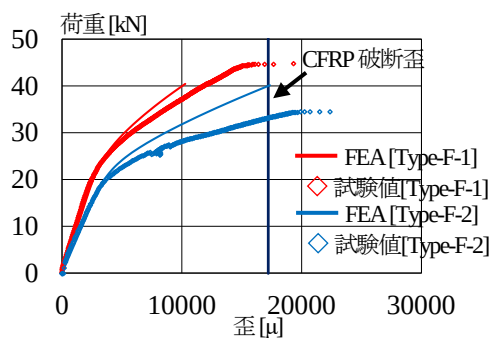


図-10 荷重-歪関係

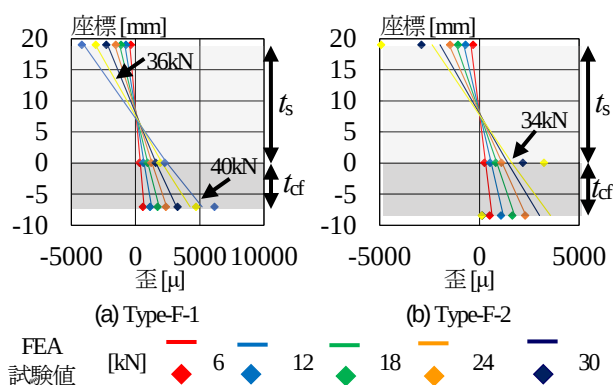


図-11 曲げスパン中央から130mmにおける歪分布

(2) Type-T

補強設計時には早期にCFRP端部のリブ中央の層間剥離となることが予想されたが、試験では30kN時で剥離破壊となった。図-12にFEAによる荷重-ピール応力関係、図-13にCFRP軸方向歪の最大位置および曲げスパン中央部から380mmのリブ中央でのCFRPの荷重-歪関係を示す。図-12に示すように端部リブ中央は7kN程度、鋼材/CM界面では24kNで20MPaに到達していることがわかる。図-13(a)に示すように端部から20mmにおいて20kNから剥離が生じていることが確認でき、試験による破壊モードと鋼材/CM界面でのピール応力は概ね対応を示した。

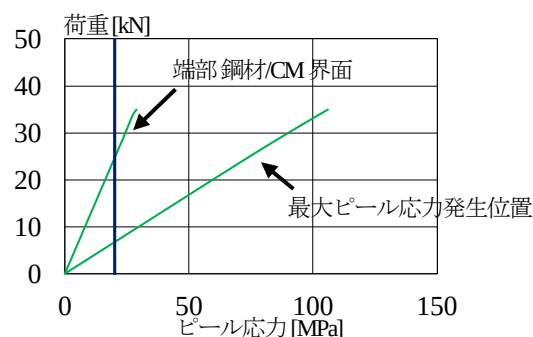


図-12 荷重-ピール応力関係

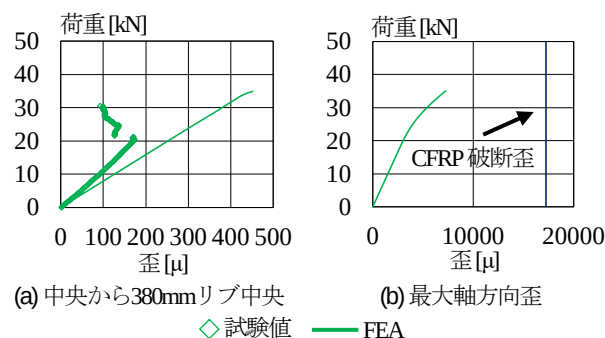


図-13 荷重-歪関係

(3) Type-C

Type-Cでは、図-14に示しているFEAによる結果から予想されるようなCFRPの剥離破壊は生じず、約35kNでの中央側リブにおけるCFRPの破断とはならなかった。試験では図-7(f)のように20kNを超えたところでリブ部と平面積層部での層間剥離が生じ、最終的には図-7(d)のようにCM/CFRP間での剥離となり、Type-Tとほぼ同等の耐力となった。この結果から、Type-Cの試験体では中央部に応力集中が生じ、FEAによる結果以上のピール応力が発生していたと考えられる。ここで、図-15に曲げスパン中央から130mmの断面における歪分布を示す。図-15の歪分布をみると6kNの時点でFEAと試験値でリブ部に対応がみられておらず、荷重が増加するにつれ、鋼材の歪は対応を示すもののリブ部が効果を発揮していない状態であった。このFEAと異なった剪断遅れによって中央リブ部に応力集中が生じたため、補教設計と異なった破壊モードになったと考えられる。

しかし、Type-Tと比較し、弾性範囲での剛性はほぼ等しい断面性能を持ちながら、剥離の発生後にも変形性能が保持されていた。これにより、立体成形の場合においてもリブの中央および端部の処理によってはType-F-2のような一部の剥離後も変形に追従するような設計が可能ではないかと考えられる。また、鋼材の弾性範囲内に限定はされるが立体成形によって少量のCFRPで曲げ剛性を増加させることが可能であることがわかった。

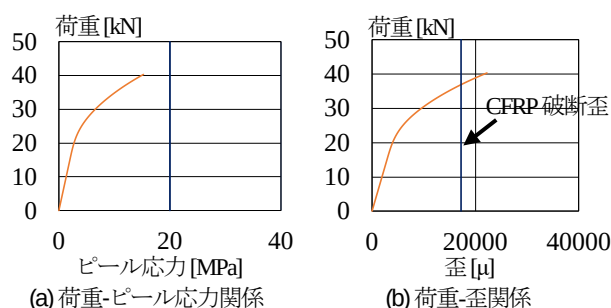


図-14 FEAによる結果

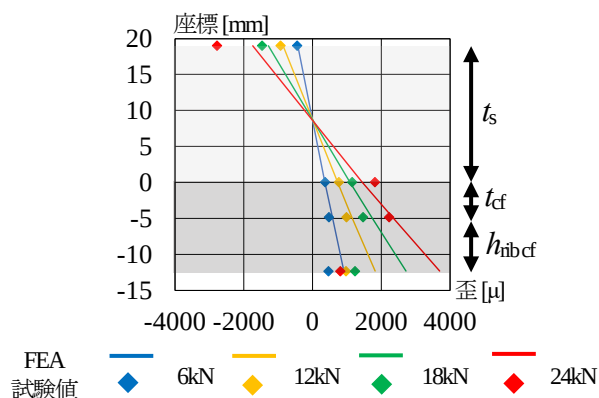


図-15 曲げスパン中央から130mmにおける歪分布

5. おわりに

本研究では、事前成形が可能な炭素繊維シートとVaRTMを用いて鋼材へ成形接着することによる曲げ補強設計を試みた。この補強設計では、CFRPを平面積層方法と立体成形方法の2種によって鋼材の曲げ剛性の1.5倍程度となるように有限要素解析を用いてCFRPの剥離を抑制するような形状を探索すること、効率的な曲げ剛性の向上を目的とし、3点曲げ試験を通して分析・評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 補強設計によって設定した成形寸法に対して、全ての試験体で概ね対応したVaRTMによる成形接着を実証した。
- 2) 平面積層型では端部の処理によって非剥離破壊設計が可能であることを示した。一方で立体成形型では、平面積層型に比べ同程度の剛性を少ない炭素繊維シート量で設計することは可能である。しかし、剥離を抑制することは平面積層型よりも難しく、鋼材の弾性範囲内に限定することで設計が可能であることを示した。

謝辞

本研究につきまして、元豊橋技術科学大学 竹本耀君、西田末有さん両名には実験に際し多大なご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

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の補修・補強技術の最先端，2012
- 2) Xiao-Ling Zhao：FRP-Strengthened Metallic Structures, CRC Press, 2012
- 3) (株) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル, pp.52-53, 2013
- 4) 土木学会：複合構造シリーズ 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），2018
- 5) 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
- 6) 強化プラスチック協会：基礎からわかる FRP, 2016
- 7) 三枝 玄希, カオ ミン, 竹本 耀, 松本 幸大, 中村 一史, 松井 孝洋, 越智 寛：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，第 12 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），2017.11
- 8) 三枝 玄希, Cao Minh, 松本 幸大, 中村 一史, 松井 孝洋, 越智 寛：VaRTM 成形接着により CFRP 補強された鋼板の曲げ挙動と損傷センシング，第 12 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），2017.11

CFRP STRENGTHENING MOLDED BY VARTM FOR STEEL PLATE UNDER BENDING WITH DESIGN OF DEBONDING PREVENTION

Genki MIEDA, Yukihiro MATSUMOTO, Hitoshi NAKAMURA,
Takahiro MATSUI and Yutaka OCHI

In this study, reinforcement design under bending was attempted by forming and bonding CFRP to a steel plate using pre-formable carbon fiber sheet and VaRTM technology. In its design, it was searched for a shape that suppresses peeling of CFRP, improving efficient bending stiffness about 1.5 times the bending stiffness of steel plate by finite element analysis by two methods, flat laminating method and three-dimensional forming method. Then, it was analyzed and evaluated the experimental result through 3-point bending test. Eventually, 1) Molded and bonded by VaRTM which corresponded in all specimens against the molded dimensions set by reinforcement design was demonstrated, 2) In the flat laminated type, it was shown that non-peeling fracture design is possible by considered peel stress. On the other hand, in three-dimensional type, it is possible to design the same stiffness with less amount of carbon fiber sheet than flat laminated type. However, it was difficult to suppress peeling than the flat laminated type, and it was shown that it can be designed by limiting it within the elastic range of the steel plate.