

(19) 鋼構造アングル材ボルト接合部に対する VaRTM法を応用したCFRP補強法

松本 幸大¹・中本 大暉²・鈴木 公平³・佐藤 壮大⁴・
松井 孝洋⁵・前田 浩徳⁶

¹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

²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: nakamoto.daiki.md@tut.jp

³正会員 (株) コンステック 技術本部 構造ソリューション部
(〒143-0006 東京都大田区平和島6丁1番1号 東京流通センター アネックス5階)
E-mail: suzuki-kohei@cons-hd.co.jp

⁴正会員 (株) コンステック 技術本部 建築技術部
(〒143-0006 東京都大田区平和島6丁1番1号 東京流通センター アネックス5階)
E-mail: sato-sota@cons-hd.co.jp

⁵正会員 東レ (株) ACM技術部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)
E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

⁶東レ (株) 産業材料部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)
E-mail: hironori.maeda.u8@mail.toray

鋼構造において多用されているブレース材は、地震時において耐力と塑性変形能力を発揮できる必要があるが、接合部が保有耐力接合となっておらず、ボルト孔による断面欠損部で早期に破断する事例と、それに対する補強の必要性が指摘されている。これに対し、筆者らは現場で短時間の成形接着が可能な真空樹脂含浸法を応用した接着による補強法の提案を行ってきている。本論文では、山形鋼ブレース接合部に対して段差処理も含めたCFRPの一括成形接着による補強法の提案を行うとともに、その縮尺試験体に対して引張試験および圧縮試験を行い補強効果と接着補強部の力学性状を示す。結果として、約3%の引張歪まで補強効果が維持され、耐力・塑性変形能力が改善すること、圧縮においても約3%まで接着補強部に損傷が無いことを明らかにした。

Key Words : Steel structure, angle brace, connection, CFRP, strengthening, VaRTM

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震による甚大な被害を契機として、既存構造物に対する耐震補強の法整備、補強法の研究開発、ならびに施工が行われてきている^{1,2)}。鋼構造物の耐震要素の一つにブレース材が挙げられ、ボルト接合された山形や溝形、丸形の断面を有するブレース部材が広く用いられている。耐震要素であるブレース部材は、地震時の大きな変形においても破断しないよう、十分な塑性変形能力を有していることが必要であるが、ボルト

孔部分の有効断面部において早期に破断し、ブレース材全体の塑性変形能力を発揮できない事例が報告されている³⁾。このような断面欠損部に対する補強法としては、鋼板の溶接等による対策が用いられている^{1,2)}。一方で、溶接やボルト接合による鋼補強材の追加では、施工時の火器・重機の使用等を必要とする場合があり、対象構造物の用途によっては施工の際に大掛かりな養生が必要となったり、施工期間中に構造物の継続使用が困難となる場合がある。近年、既存鋼構造物への補強・補修材料として、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber

Reinforced Plastic：以下CFRP）を接着することで補強を行う手法が提案されており，研究開発・実用化が活発に行われている^{4,5)}．CFRPは鋼と同等の弾性係数・強度を有し，比重は約1.8と軽量であることから，施工時の可搬性に優れ，固定荷重の増加を最小限に抑えつつ補強が可能となる．また，接着による補強は，火器・重機使用の削減に繋がるため，施工環境の制約が厳しい場合でも適用可能となる場合がある．現在，建築・土木構造分野における炭素繊維シート（以下，CFシート）を用いた補強・補修の多くは，現場で既存部材の表面上に，CFシートにエポキシ樹脂等を含浸成形・接着するハンドレイアップ成形法か，引抜成形等で成形されたCFRP板材の接着が用いられている^{4,5)}．ハンドレイアップ成形は既存構造物の不陸面や，任意の積層数・繊維配向に容易に対応できることから，所望の補強設計に対応するCFシート補強法として広い適用範囲を有する方法であるが，積層数に比例した成形時間が必要になること，施工の体勢や作業による性能のバラつきが生じることが課題である．CFRP板材は優れた機械的性質を有する部材であるが，対象構造物が複雑な表面であった場合に追従させることが困難であるため，接着は補強面が平坦な面に限定される．

これに対し，近年，多積層かつ広範囲の成形が短時間で可能となえ，高い繊維体積含有率と安定した成形品の機械的性質に繋がる真空樹脂含浸成形法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding，以下，VaRTM法）を応用したCFRPの成形接着による補強法の研究開発が進められている^{6,9)}．この方法は，ハンドレイアップ成形の利点である積層設計・形状の自由度を損なうことなく，施工時間の大幅な短縮と構造性能の安定性・信頼性を高めることができる補強法である．

筆者らは，VaRTM法を応用することで，極めて複雑な表面形状を有する鋼構造ブレース材のボルト接合部周辺の補強法の確立を目標に実験的研究を進めている^{9,10)}．接合部においてはガセットプレート（以下，G.PL）とブレース材とに段差を有しているとともに，ボルト頭部によって表面に凸部が存在するが，多積層であっても成形に支障がないVaRTM法を用いることで，不陸調整と補強が同時に実施できると考えられる．本論文では，VaRTM法の成形性を活かした補強法として，鋼構造ボルト接合部周辺へのVaRTM法によるCFRPの一括成形接着によってCFRPの成形接着が可能となることを示すとともに，建築鋼構造物の耐震設計上の要求性能を補強後の接合部力学性能の目標値として定め，力学試験を行った結果について報告する．

2. 補強性能の目標値

(1) 接合部耐力

文献1)では，ブレース材が十分な塑性変形能力を発揮できる条件として，以下の判定式が示されており，これらを満たさない場合，非保有耐力接合と判定し耐震補強が推奨される．

$$1.2 \times A \times F = P_{req} \leq P_u \quad (1)$$

$$P_u = \min \{P_1, P_2, P_3, P_4\} \quad (2)$$

ボルトの剪断耐力

$$P_1 = 0.6 \times m \times n \times A_b \times f_u \quad (3)$$

ブレース材有効断面の引張耐力

$$P_2 = A_e \times F_u = (A - d_0 t_2 - h_n t_1) n_B \times F_u \quad (4)$$

ブレースまたはG.PLの剪断抜け耐力

$$P_3 = \{e + (m - 1)p\} n \times t \times F_u \quad (5)$$

G.PL有効断面の引張耐力

$$P_4 = A_g \times F_u \quad (6)$$

ここで， A ：ブレース材の断面積， F ：ブレース材の基準強度， P_{req} ：保有耐力接合のための必要耐力， P_u ：既存部材の耐力， m ：ブレース材軸方向のボルト本数， n ：ブレース材幅方向のボルト本数， A_b ：ボルトの軸断面積， f_u ：ボルトの引張強さ， A_e ：ブレース材の有効断面積（ボルト孔および突出部の無効断面積を考慮したもの）， d_0 ：ボルト孔径， t_2 ：ボルト接合面のブレース材板厚， h_n ：ブレース材突出部の無効高さ（ボルト2本の場合， $0.7 \times$ 突出高さ h ）， t_1 ：突出部のブレース材板厚， n_B ：ブレースの本数， F_u ：ブレース材（式(5)，(6)ではG.PLも含む）の引張強さ， e ：端空き距離， m ：摩擦面数， p ：ボルトピッチ， t ：ボルト接合面のブレース材板厚ないしG.PLの板厚， A_g ：G.PLの有効断面積，である．

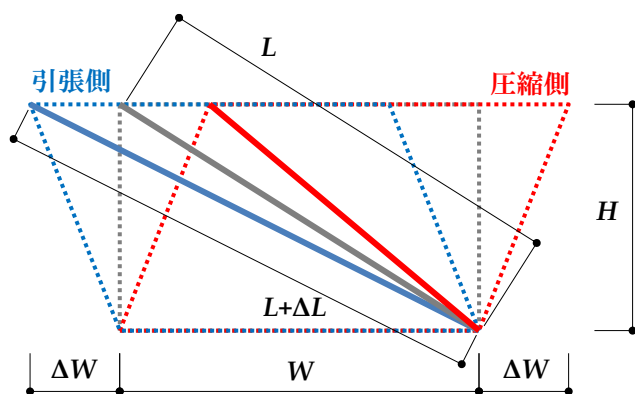
これらより，補強後の耐力の目標値として，式(1)に示すブレース材の断面積と基準強度との積を1.2倍した値を採用する．なお，上式において，G.PLの溶接耐力については記載を省略している．

(2) 塑性変形

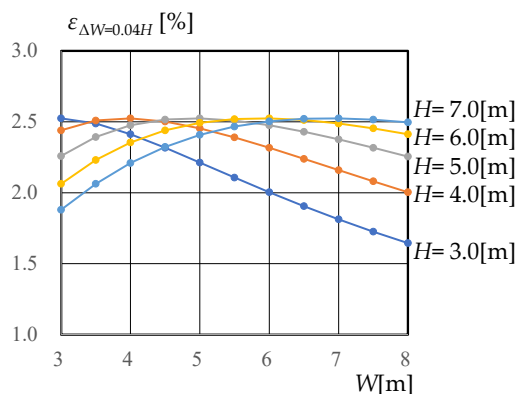
図-1 (a)に示すような高さ H ，スパン W のフレーム構造に層間変形が生じた場合を考える．図より，ブレース材は ΔL 伸びることとなるが，ブレース材両端のG.PLやボルト接合された部分は相対的に剛であると考えられたため，この剛な領域をブレースの長さ L の20%と仮定すると，ブレース材に作用する歪 ε は，次式で表すことができる．

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{0.8L} = \frac{\sqrt{(W + \Delta W)^2 + H^2} - \sqrt{W^2 + H^2}}{0.8\sqrt{W^2 + H^2}} \quad (7)$$

ここで、 W を3~8m、 H を3~7mとし、最大層間変形角を1/25 ($\Delta W = 0.04H$) としたとき、式(7)より得られるブレース材の最大歪を算出した結果を図-1 (b)に示す。図-1 (b)より、ブレース材の伸びは最大2.5%となることから、最大塑性変形量の目標値として3%を採用する。



(a) フレームの水平変形とブレース材の伸び



(b) 層間変形角1/25に対応するブレース材の伸び

図-1 ブレース架構の層間変形とブレース材の伸び

3. 補強法

本研究では、現場で急速施工可能なVaRTM法による成形接着接合による補強法を採用している。VaRTM法は、補強面を真空化することで、大気圧により炭素繊維シートに樹脂を含浸させるため、多積層のCFシートに対しても一括で含浸成形が行え、立面への適用も容易となる。図-2にブレース接合部へのVaRTM法による成形接着補強の模式図を示す。CFシートは、段差用基材・ボルト用基材・伝達用基材・拡幅用基材と称する基材と

しており、段差用基材はブレース材板厚によって生じている補強面の段差を調整するための基材・ボルト用基材はボルト頭部の高さを調整するための基材・伝達用基材はブレース材からG.PLに応力を伝達するための基材・拡幅用基材は狭小で定着長が確保できないG.PL側において幅方向に定着力を拡大するための基材である。段差用基材・ボルト用基材は伝達用基材を曲がり・不陸の無い状態に近づけるための基材であり、これにより、段差面に直接CFシートを接着した場合に生じるピール応力を低減させる役割を持つ。なお、補強は作業性を考慮して片側のみとし、補強側がトルシア型ボルト頭部となるよう、必要に応じて交換する。

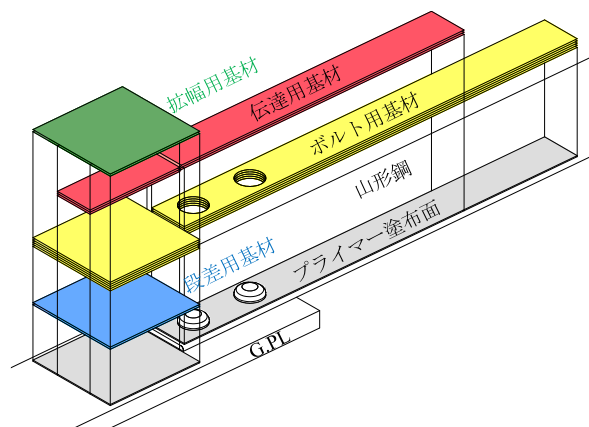


図-2 補強法の概要

図-3に施工の流れを示す。まず、鋼材表面の接着範囲をブラスト面形成動力工具によって下地処理し、塗装や黒皮の除去を行い、鋼材素地面の露出と適切な表面粗さとなる加工を施す（図-3 (a)）。本研究では、既往の接着試験の結果⁷⁾から、10点平均表面粗さ R_z (JIS) が $20\mu\text{m}$ 以上となるよう管理した。次に、プライマーとして鋼構造物用耐熱型エポキシ樹脂系接着剤 (E258R) を塗布する（図-3 (b)）。プライマーの硬化後、表面に目粗しを行い含浸接着樹脂である低粘度耐熱エポキシ樹脂 (AUP40T1) を下塗りした後、事前成形されたCFシート（図-3 (c)）を設置し（図-3 (d)）、VaRTM法のための副資材の設置、真空化および樹脂の含浸を行う（図-3 (e)）。含浸接着樹脂が指触硬化に達した後、副資材等を取り外す（図-3 (f)）。

本研究では、一方向CFシートに中弾性型のUM46-40P、二方向炭素繊維クロスに高強度型のBT70-20を用いる。各CFシートには熱可塑性の粒子を塗布しており、加温によって図-3 (c)に示すように複数のCFシートを事前に一体化（仮止め）させている。CFシートの物性値を表-1に示す。また、鋼材表面とCFシートの間にはチョップドストランドガラスマット（目付450gsm）を1ply用いている。

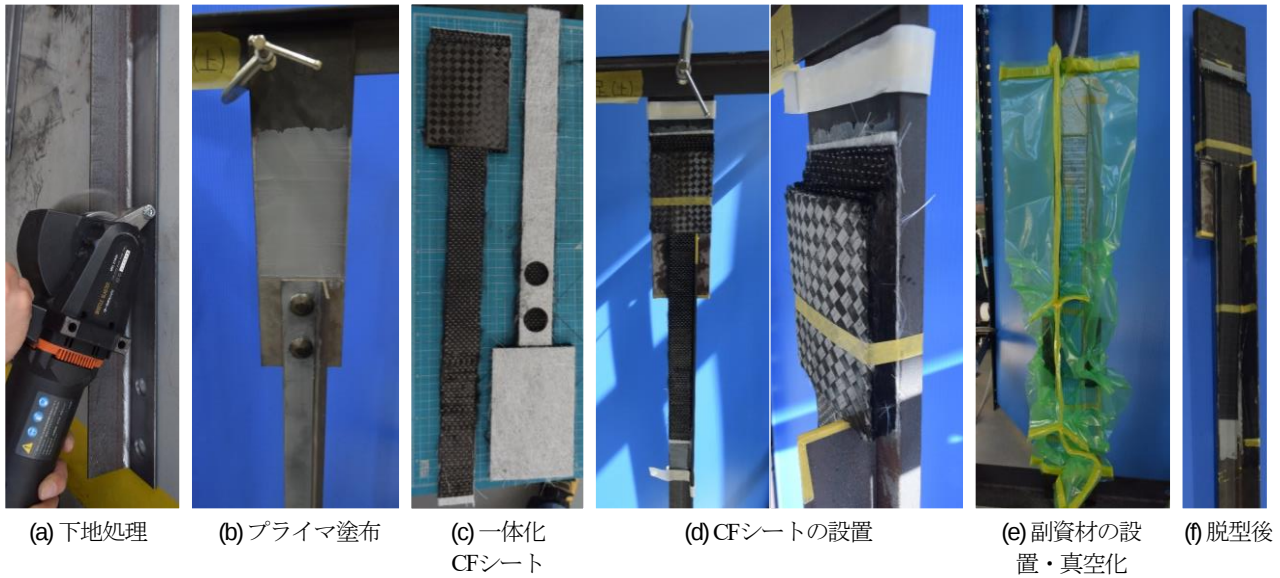


図-3 補強の流れ

表-1 CFシートの物性値

	中弾性型 UM46-40P	高強度型 BT70-20
目付[gsm]	400	200
弾性係数[GPa]	440	230
引張強度[GPa]	2.4	2.9

4. 試験体

前章で述べた補強法を用いた引張および圧縮試験を行う。試験体はブレース材に等辺山形鋼L50×4、G.PLにFB16×100（引張試験）およびFB9×100（圧縮試験）、接合用ボルトはSI10T、M16（2本）を用いた。試験は、ブレース材の有効断面部における引張耐力が保有耐力接合を満たしていない条件とした。式(1)~(6)に示した接合部耐力を算出した結果を式(8)~(13)に示す。

$$1.2 \times A \times F = P_{req} = 110 \text{ kN} \geq P_u = 71 \text{ kN} \quad (8)$$

$$\min \{P_1, P_2, P_3, P_4\} = P_u = 71 \text{ kN} \quad (9)$$

ボルトの剪断耐力

$$0.6 \times 2 \times 1 \times 201 \times 1000 = 241 \text{ kN} = P_1 \quad (10)$$

ブレース材有効断面の引張耐力

$$(389 - 18 \times 4 - 0.7 \times 50 \times 4) \times 1 \times 400 = 71 \text{ kN} = P_2 \quad (11)$$

ブレースの剪断抜け耐力

$$\{30 + (2 - 1) \times 60\} \times 1 \times 4 \times 400 = 144 \text{ kN} = P_3 \quad (12)$$

G.PL 有効断面の引張耐力

$$60 \times \frac{2}{\sqrt{3}} \times 16 \times 400 = 443 \text{ kN} = P_4 \quad (13)$$

表-2に使用した鋼材およびG.PLの機械的性質を示す。試験変数は、保有耐力接合の条件を満たさない試験体（以

下、NS），摩擦接合面への樹脂含浸の影響を確認する目的で、NSに樹脂のみをVaRTM法により含浸させた試験体（以下、RS），CFRPにより補強した試験体（以下、CFS）とした。CFSの積層数は、ボルト孔による断面欠損分を補うとともに、段差調整用基材によっても不可避免に残留する段差によって付加される曲げモーメントを考慮して設計しており、結果として4plyとなった。不可避免に残留する段差とは、成形毎の繊維体積含有率の差によって生じるものであり、これまでのVaRTM法による知見から、繊維体積含有率の変動範囲を45~55%として算出した。残留する段差は、山形鋼の板厚と山形鋼の板厚を調整する段差用基材との板厚差で生じるが、本試験条件では、式(14)に示すようにCFシート1層の厚さを0.217mmとして最大でも0.5mmに満たない距離となる。

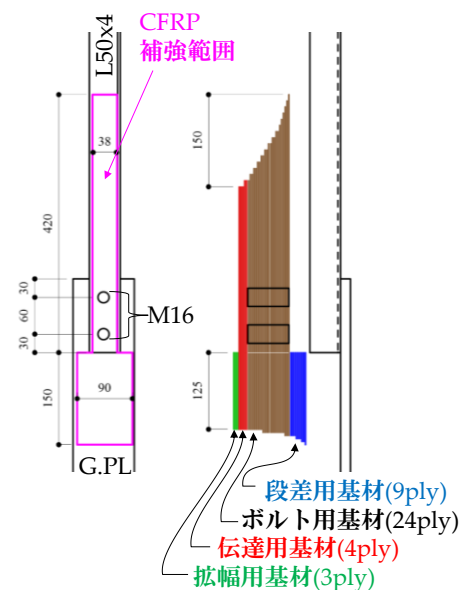


図-4 CFRP補強の寸法

$$\begin{cases} \frac{0.217}{0.45} \times 9 - 4 = 0.34\text{mm} \\ \frac{0.217}{0.55} \times 9 - 4 = -0.45\text{mm} \end{cases} \quad (14)$$

表-3に試験体一覧と試験体名を示す。また、CFRP補強部の寸法を図-4に示す。

表-2 試験体一覧と試験体名

試験	部位	降伏点 [MPa]	引張強さ [MPa]
引張	ブレース	370	465
圧縮	ブレース	372	480
	GPL	329	445

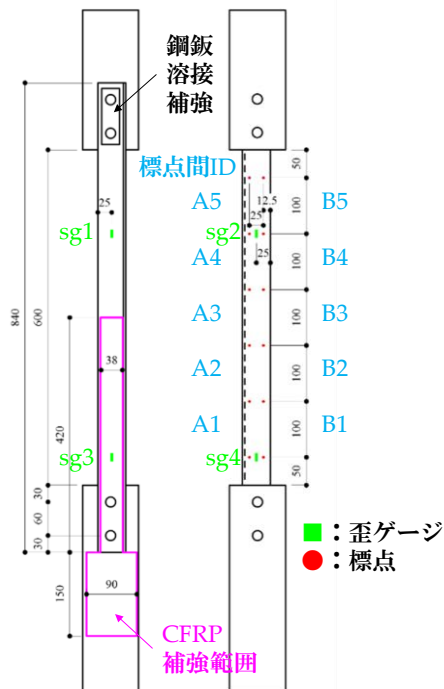
表-3 試験体一覧と試験体名

試験変数	引張試験	圧縮試験
無補強	NS-T	NS-C
樹脂のみ含浸	RS-T	-
CFRP補強	CFS-T-1, CFS-T-2	CFS-C-1, CFS-C-2

4. 引張試験

(1) 試験方法

図-5に試験体図および試験状況を示す。試験は1000kN 万能試験機を用いた静的引張試験とした。引張試験のブレース材の長さ（接合部を含む）は試験機の有効試験体



(a) 形状寸法

図-5 引張試験の寸法



(b) 試験状況

長の都合により840mmとし、CFRP補強試験体は片側のみを第2, 3章の方法により補強し、反対側は鋼板の当て板溶接により補強した。ブレース材には100mmピッチで標点を打刻しており、試験前後の標点間距離より伸びを評価した。

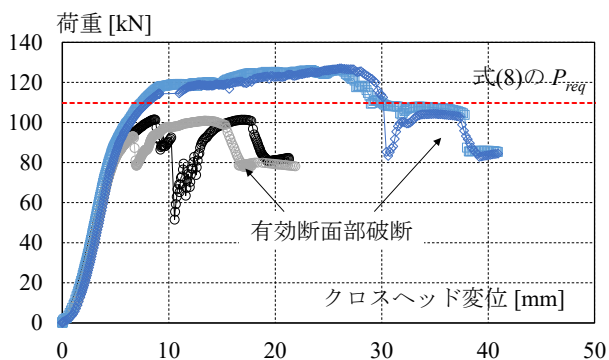
(2) 試験結果

表-4に最大耐力を、図-6に荷重－クロスヘッド変位関係と荷重歪関係を示す。NS-TおよびRS-Tは最大耐力、荷重変位関係に大差が見られないことから、摩擦接合部への樹脂含浸に影響が無いことが分かった。補強後の試験体であるCFS-Tは最大耐力が式(1)の目標値である110kNを超え、降伏後の伸びも改善していることが分かる。また、試験条件が等しいCFS-T-1とCFS-T-2に大きな挙動の違いも見られないことから、接着性能など力学特性も安定していると考えられる。図-6 (b)に示す非補強部での歪データより、CFRP補強を行うことによって、有効断面部での降伏を遅延できたことで、ボルト孔の無いブレース材軸部が降伏する挙動に改善できており、ブレース部材全体で塑性変形能力を発揮できる保有耐力接合が満たされる部材引張挙動となっている。一方で、歪が3.5%を超えると接着層が塑性歪に追従できず剥離が生じることで耐力が低下し、最終的には剥離が有効断面部に達すると無補強と同様の挙動で有効断面部破断を生じる。図-6 (c)に示すCFRP補強部での歪データより、鋼・CFRPは合成断面として応力分担ができていていると判断できる。なお、ここでのCFRP剛性はボルト用基材の剛性も加味したものであり、不陸調整用として用いたCFRP層も鋼材の応力低減として機能していることを意味していることから、今後、より経済的なCFRP層数の設計法に関する検討を行う予定である。

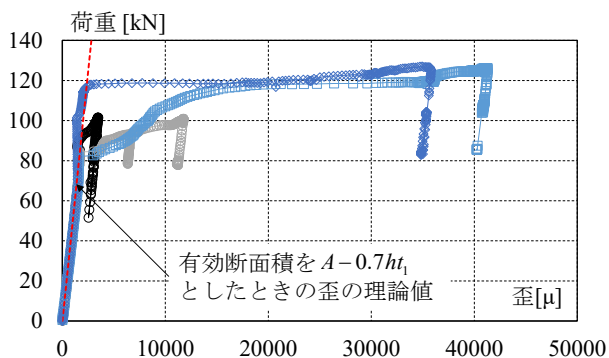
図-7に試験前後の標点間を計測することで算出した部材の伸びを示す。ボルト孔に近い標点間A1およびB1を除いた全ての標点間で3%を超える伸びが得られており、第2章 (2)で算出した要求性能を満足できる結果となっていることが分かる。なお、第2章 (2)ではブレース材の剛域を全長の20%として算出したが、本論文での試験体におけるCFRP補強範囲の長さ670mmを塑性変形が期待できない長さと考えると、図-1 (a)において $W \geq 3.5\text{m}$, $H \geq 2.0\text{m}$ ($L = 4\text{m}$) が層間変形角1/25においてブレース材の剛域を除いた長さ3%の伸びが生じる状態に対応することから、実用上も支障ないCFRP補強範囲であると考えられる。

表-4 最大耐力

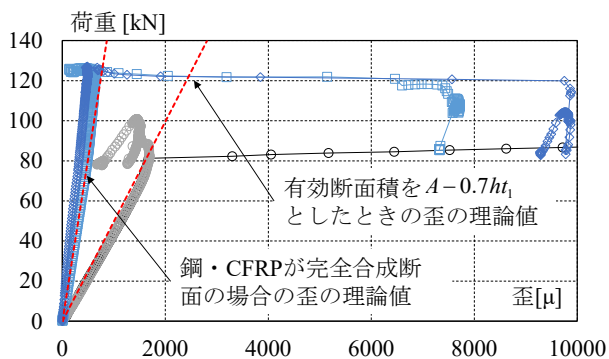
	NS-T	RS-T	CFS-T-1	CFS-T-2
最大耐力 [kN]	101.5	100.7	126.2	127.0
補強効果 [%]	-	-0.6	+24	+25



(a) 荷重－クロスヘッド変位関係



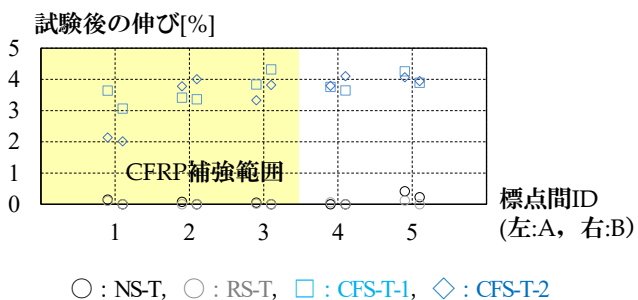
(b) 荷重－歪 (sg1とsg2の平均) 関係



(c) 荷重－歪 (sg3とsg4の平均) 関係

○ : NS-T, ○ : RS-T, □ : CFS-T-1, ◇ : CFS-T-2

図-6 引張試験結果



○ : NS-T, ○ : RS-T, □ : CFS-T-1, ◇ : CFS-T-2

図-7 試験後の伸び

5. 圧縮試験

(1) 試験方法

図-8に試験体図および試験状況を示す。試験は2000kN圧縮試験機を用いた静的引張試験とした。圧縮試験のブレース材の長さ（接合部を含む）は試験機の有効試験体長の都合により1640mmとし、第2章で述べた変形量を満たすよう、最大変位を60mmとして実施した。引張試験体と異なり、CFRP補強試験体では両側を補強し、上下対称の挙動となるよう配慮している。変位は試験体両側のベースプレートの相対変位を計測した。



(a) 形状寸法

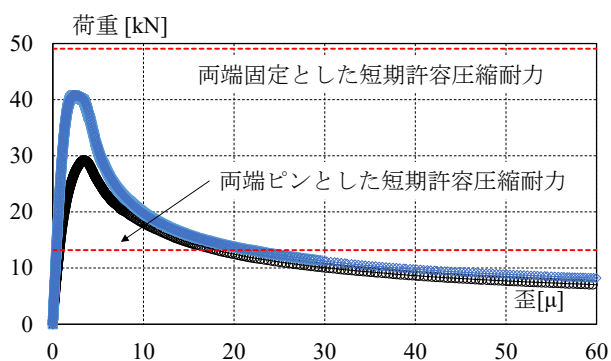
(b) 試験状況

図-8 引張試験の寸法

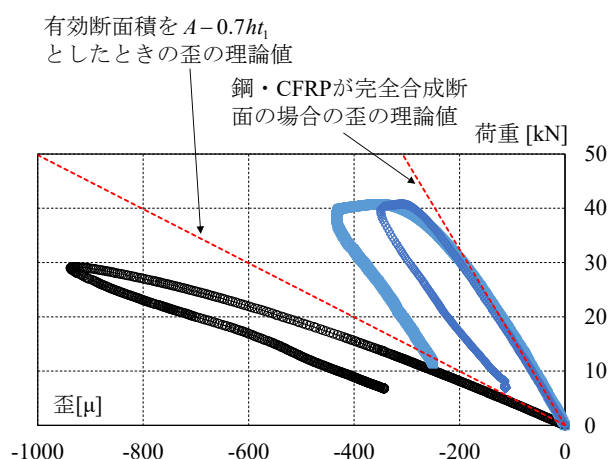
(2) 試験結果

図-9に荷重－変位関係と荷重－歪関係を示す。補強後の試験体であるCFS-Cは最大耐力が無補強に比べ34%程度上昇した。最大耐力到達後は座屈・鋼材の降伏に伴って緩やかに耐力が低下し、CFRP補強試験体においては試験中に剥離・破断音などは観察されなかった。また、試験条件が等しいCFS-C-1とCFS-C-2に挙動の違いは見られないことから、引張試験同様に安定した力学特性が得られていると考えられる。図-7 (b)に示すCFRP補強部での歪データより、座屈変形が顕著となる荷重未満の範囲では引張試験同様に鋼・CFRPは合成断面として応力分担ができていないと判断できる。

図-10に試験後の試験体の様子を示す。ブレース材の定着部においては試験後も剥離などは観察されず、健全な接着状態が維持できていると判断できる。また、G.PL端部においては、CFRP補強によってG.PLの降伏域が集中し、非補強部に曲げ変形が集中していることが確認された。G.PL側の接着部についても目視および打音により剥離の可能性は検出できなかった。



(a) 荷重－変位関係



(b) 荷重－歪 (sg5とsg6の平均) 関係

○ : NS-C, □ : CFS-C-1, ◇ : CFS-C-2

図-9 圧縮試験結果

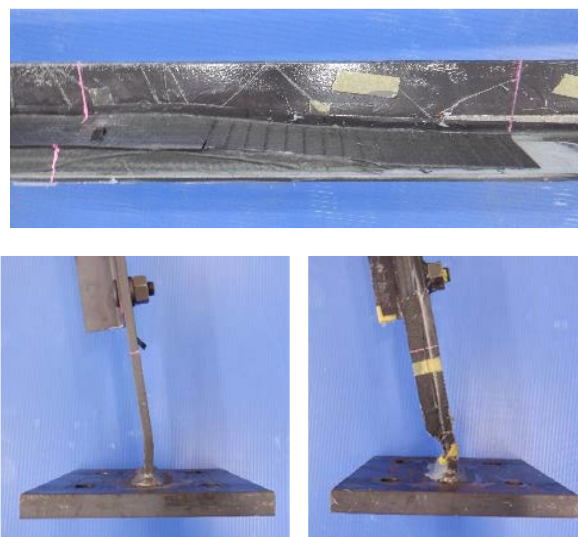


図-10 試験後の様子

6. おわりに

本論文では、鋼構造ブレース材接合部にCFRPの現場成形接着補強を確立することを目的として、要求性能を整理したうえで、ボルトを残置させたVaRTM法による一括成形によって補強する手法の提案と引張・圧縮試験を通じた基本的な力学特性の確認を行った。その結果、以下のことが言えた。

- 1) 本手法によりブレース材の有効断面部の降伏を遅延させることができ、非有効断面部の降伏と部材としての塑性変形能力の改善が可能であることを示した。
- 2) CFRP接着接合部の剥離は鋼材の歪が3.5%に達することで生じ、部材の最大伸びは3%以上が期待できることを示した。
- 3) 部材長の3%に対応する圧縮変形によっても、CFRP補強部に剥離などの損傷は確認されないことを示した。

今後、実大繰返し試験などを通して、実部材としての挙動と補強効果を明らかにする予定である。

謝辞：本研究は、元豊橋技術科学大学 久保川裕喜修士・Shijir Davaakhishig学士、豊橋技術科学大学工学部 酒井優人氏・宮阪裕一氏、呉工業高等専門学校 三枝玄希助教・牛坂淳二技官の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2011 年改訂版 耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説，2011.
- 2) 日本鋼構造協会・日本建築防災協会：2013 年改訂版 既存鉄骨造建築物の耐震改修施工マニュアル，2013.
- 3) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011.
- 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) 石川敏之，中村一史，大垣賀津雄：特集 異材接合技術の最新動向 鋼構造物の CFRP 接着補修・補強，日本機械学会誌 Vol.122，2019.
- 6) 小林光貴，近藤諒翼，タイ ウィサル，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：VaRTM 成形を応用した CFRP 部材による鋼桁端部の補強に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），複合構造論文集第 5 巻(論文)，Vol.74, No. 5, p.II_44-II_55, 2018.
- 7) Genki Mieda, Hitoshi Nakamura, Takahiro Matsui, Yutaka Ochi, Yukihiro Matsumoto: Mechanical behavior of CFRP on steel surface molded and bonded by vacuum assisted resin transfer molding technology, SN Applied Sciences, Volume 1, Issue 6, 2019.
- 8) 西岡裕次郎，タイ ウィサル，中村一史，坪川毅彦，松井孝洋：断面欠損した鋼材と補剛材の溶接隅角部の CFRP 接着による補修に関する検討，第 8 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集，pp.158-167, 2020.
- 9) 久保川裕喜，中本大暉，鈴木公平，佐藤壮大，松井孝洋，前田浩徳，松本幸大：段差を有する鋼構造接合部への CFRP による VaRTM 成形接着補強に関する基礎検討，第 8 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集，pp.143-150, 2020.
- 10) Takahiro Matsui, Kohei Suzuki, Sota Sato, Yuki Kubokawa, Daiki Nakamoto, Shijir Davaakhishig and Yukihiro Matsumoto: Pilot Demonstration of a Strengthening Method for Steel-Bolted Connections Using Pre-Formable Carbon Fiber Cloth with VaRTM, Materials, Volume 14, Issue 9, 2184, 2021.

(Received September 10, 2021)

STRENGTHENING METHOD USING CFRP WITH VARTM TECHNIQUE FOR CONNECTION OF L-SHAPED STEEL MEMBER

Yukihiro MATSUMOTO, Daiki NAKAMOTO, Kohei SUZUKI, Sota SATO,
Takahiro MATSUI and Hironori MAEDA

In recent years, many seismic retrofitting methods have been performed to improve the structural performance and prevent the brittle failure of structural members. In the case of steel structures, slender seismic braces have been widely used for buildings, towers, and bridges. The brace connections should resist the full plastic axial tension load to ensure adequate plastic deformation performance for vibration energy absorption. However, several connections do not satisfy these requirements.

Recently, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has been used extensively to strengthen existing structures because of its high strength, high elastic modulus, and light-weight characteristics. In this paper, we investigate the applicability of CFRP strengthening for brace connections and gusset plates with stepped surfaces using the vacuum-assisted resin transfer molding technique. Stepped surfaces can be eliminated by using alternative CFRP layers to straighten the structural CFRP layers in order to effectively transfer the axial stress. Eventually, it is shown that CFRP strengthening can improve the connection strength and plastic deformation with 3% elongation under tensile loading. And it is confirmed that debonding and/or damage does not occur in the bonding layer between CFRP and steel under compressive loading.