

腐食した等辺山形鋼に対する VaRTM法を用いたCFRP補修 法

REPAIR METHOD FOR CORRODED ANGLE STEEL USING CFRP BY VARTM TECHNIQUE

樋口彰悟 — * 1 山崎陽祐 — * 1
田原慎太郎 — * 1 松井孝洋 — * 2
松本幸大 — * 3

Shogo HIGUCHI — * 1 Yosuke YAMAZAKI — * 1
Shintaro TAHARA — * 1 Takahiro MATSUI — * 2
Yukihiro MATSUMOTO — * 3

キーワード：
等辺山形鋼, 腐食, 補修, CFRP, VaRTM

Keywords:
Angle steel, Corrosion, Repair, CFRP, VaRTM

In this study, CFRP repair method using VaRTM technique is proposed for angle steel with the simulated corrosion. Full-scale cyclic horizontal loading tests were conducted to evaluate the effectiveness of the repair method in restoring the structural performance of the member. The results show that the proposed CFRP repair method using VaRTM technique effectively restored the structural performance of perforated angle steel with simulated corrosion. Furthermore, the design approach mitigates early debonding by ensuring that the plastic hinge position is avoided from the CFRP adhesive zone.

1. 研究背景・目的

現在, 鋼構造建築物を構成する鋼部材が長期間の供用によって腐食・減肉劣化し耐震性能や保有耐力の低下が報告されており, その補修法が求められている¹⁻⁵⁾。このような鋼部材に対する補修・補強は溶接や高力ボルトによる当て板を用いた方法や部材を交換する方法が用いられている。しかし, 大掛かりな養生や火気の使用が制限されることから鋼材や炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics:以下, CFRP)を鋼部材に接着することにより応力伝達を行う接着工法を用いた補修・補強法が検討されている¹⁻⁷⁾。中でも, CFRPは耐腐食性に優れ, 軽量でありながら, 鋼材と同等以上の弾性係数・強度を持つという特性から耐腐食に強く, 構造体の重量増加を抑制した補修・補強が可能である。また, 筆者らはCFRPを用いた補修・補強の中でも, 多積層・広範囲の成形が容易であり, 高い繊維体積含有率 V_f と安定した成形品の機械的特性に期待できる真空樹脂含浸成形法(Vacuum assisted Resin Transfer Molding:以下, VaRTM法)を応用した成形接着による補修・補強法の研究開発を進めており, 腐食した鋼管²⁾や鋼桁橋の桁端³⁾に対する補修効果や保有耐力接合を満たしていない鋼構造ブレース接合部⁴⁾に対する補強効果が確認されている。VaRTM法は, 鋼材の不整面や部材形状に合わせたCFRPの成形が可能であり, 炭素繊維シートの積層数によらず樹脂含浸の時間はほぼ一定である。よって, VaRTM法は現在のCFRPを用いた補修法であるCFRP板材の接着やハンドレイアップ成形による補修法に比べて, 構造性能の安定性やCFRPの形状自由度が優れた補修法である。

このような背景から, 本研究では文献2,3)の知見を発展させ, 腐食を模擬した等辺山形鋼に対するVaRTM法によるCFRP補修法を提案する。また, 補修対象の等辺山形鋼をブレース材と想定した実大スケールの正負交番漸増繰り返し水平加力試験を行い, 部材性能の回復効果の評価を行う。

2. 補修材設計

本研究で対象とする部材は等辺山形鋼であり, 以下に示す工程にて補修材の設計を行う。

はじめに, 部材断面寸法・断面欠損割合に応じて, 補修面数・補修幅を定める。次に炭素繊維シートの必要積層数を算出する。加えて, 積層数に応じた必要定着長の算出, テーパー形状を定める。併せて, 座屈に伴うCFRPの剥離の検討を目的として塑性ヒンジ形成箇所のCFRP接着区間外であるか確認する。各工程の設計詳細を以下に示す。

2.1 積層数の設計

積層数の設計として, 断面軸剛性と断面曲げ剛性の2つの条件により必要積層数を算出することとした。

はじめに, 断面軸剛性の条件について述べる。断面欠損を有する鋼材の補修方法として, 軸力が作用する部材の場合, 断面欠損分の引張剛性と同等以上の引張剛性を有する炭素繊維シートを接着し, 欠損部の軸剛性を同等以上までに回復する方法が一般に用いられている。しかし, 欠損部に急激な断面変化を有する鋼材の場合, 断面変化部周辺で鋼材に対して引張剛性比から定まる分担以上の荷重が作用することとなる。そこで, 文献8)では定着部の炭素繊維シートと鋼材の引張剛性比が欠損部の欠損鋼材と残存鋼材の引張剛性比と同等以上とする設計式が提案され, 欠損部全区間においてCFRPを接着していないブレース部分(以下, 一般部)の応力度以下になることが確認されている。そこで, 本研究においてもこの設計式を準用し, 式(1)を満たすような積層数を断面軸剛性の条件とした。また, CFRPは炭素繊維と含浸樹脂の複合材料であるが, 炭素繊維に対して含浸樹脂の弾性係数は十分に小さいため, 含浸樹脂の引張剛性は無視し炭素繊維のみの引張剛性を採用した。

$$\frac{E_c A_c}{E_s A_s} \geq \frac{E_s A_{sd}}{E_s A_{sr}} \quad (1)$$

E_s, E_c : 鋼材, CFRPの弾性係数
 A_s, A_c : 鋼材, CFRPの断面積
 A_{sd}, A_{sr} : 鋼材の欠損分, 残存分の断面積

*1 豊橋技術科学大学大学院工学研究科建築・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)

*2 東レ(株)ACM技術部 主席部員

*3 島根大学学術研究院環境システム科学系 教授・博士(工学)
(研究当時 豊橋技術科学大学)

*1 Graduate Student, Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech.

*2 ACM Technology Dept., Toray Industries, Inc.

*3 Prof., Institute of Environmental Systems Science, Shimane Univ., Dr. Eng.
(Toyohashi Univ. of Tech. at the time of research)

次に、断面曲げ剛性の条件について述べる。曲げ剛性は式(2)に示す通り、最弱軸周りの断面欠損部の等価な断面曲げ断面剛性が一般部の断面曲げ剛性以上となるかを検討した。また、弾性係数の異なる材料が同一断面に存在するため、鋼材に対する CFRP の弾性係数の比率に応じた弾性係数比に従い、鋼材と CFRP の合成断面となる欠損部の等価な断面二次モーメント I_{eq} を算定した。CFRP による接着補修を行うと断面重心位置が移動する。加えて、接合脚部側のみに補修を行う場合、一般部と補修部では断面二次モーメントが最弱となる軸の角度が異なる。この軸の角度を求めるために断面重心位置を中心として Z 軸周りに 1 度ずつ変化させ、断面二次モーメントが最小となる軸を最弱軸とした。

$$E_s I_{eq} \geq E_s I_s \quad (2)$$

I_{eq} : 補修部最弱軸周りの等価な断面二次モーメント
 I_s : 一般部最弱軸周りの断面二次モーメント

2.2 補修区間の設計

鋼材に作用する荷重を CFRP に伝達し、鋼材と CFRP が合成断面となるためには、適切な定着長を設ける必要がある。文献 4) による必要定着長は軸力を受ける部材と曲げを受ける部材によって算出式が異なる。本研究で対象とする等辺山形鋼はブレース材を想定しており、引張・圧縮力の両者が作用し、細長比が大きいため圧縮力作用時には座屈による面外変形が生じ、補修部において曲げが生じることが予想される。よって、軸力・曲げの両者が発生する部材とし、必要定着長は 2 つの算定法によって算出し、必要定着長の長い方を採用した。また、CFRP 端部の応力集中を避けるため CFRP 定着端部から段差を設けたテーパ形状とし、段差形状は既往研究 2), 7) をもとに 1 層あたり 10mm(10mm/ply) を基準とする。

さらに、座屈変形に伴う塑性ヒンジ形成箇所が CFRP 接着区間内であると鋼材の塑性変形による大変形に CFRP が追従できず、早期に剥離する恐れがある。そこで、座屈固有値解析を通じて塑性ヒンジ形成箇所の推定を行い、塑性ヒンジ形成箇所が CFRP 接着区間外であるかを検討する。塑性ヒンジ形成箇所の推定は以下の手順により行う。はじめに、前節及び本節において算出された必要積層数及び必要定着長、テーパ形状を採用した補修後の部材を梁要素によってモデル化し、座屈固有値解析を通じて座屈荷重及び座屈モードを求める。座屈荷重より、各区間の断面積で除すことで軸応力を求める。また、座屈モードに任意の定数乗じることで、各区間の面外変形量を設定し曲げによって生じる縁応力を圧縮側・引張側に對し求める。これらの軸応力と縁応力の和が各節点における鋼材端部に生じる応力となる。ある節点が降伏点を迎える任意の定数を座屈モードに乗ずることで塑性ヒンジ形成箇所が推定できる。また、積層数は必要積層数を下限とし、塑性ヒンジ形成箇所が CFRP 接着区間外となるような積層数及び定着長を採用する。

3. 試験体・試験概要

3.1 载荷装置

図 1 に試験装置の概要図を示す。図中には部材中心線及び部材軸に従った座標系を示しており本論文における座標系は全て同一としている。試験装置は両端ピン支承によって支持された柱と载荷梁からなる内側の载荷フレームと水平力を作用させるための油圧ジャッキ及びその反力を取る外側の反力フレームからなる本研究では、接

合部での破壊を防ぐために図 2 示すような板厚 19mm のガセットプレート及び板厚 16mm の当て板による接合部とした。

3.2 試験体概要

本研究で対象とする等辺山形鋼は、L50x4(SS400)であり、材料試験によって得られた物性値を表 1 に示す。試験体は補修効果を確認するために、健全部材、断面欠損割合 20, 40% の欠損試験体及びこれらを補修した試験体とした。また、欠損試験体は図 3 に示すように、部材幅方向の中央部に円孔をあけることで腐食による断面欠損を模擬した。断面欠損割合 20% の試験体については、接合脚部側のみの欠損としている。断面欠損箇所は座屈変形に伴う曲率が最大となる部材軸方向の中央部とした。補修に使用した炭素繊維シートは予め熱可塑性樹脂の粒子を塗布した 1 方向中弾性炭素繊維シート⁷⁾である。使用した炭素繊維の物性値を表 2 に示す。試験体設計において、補修幅は等辺山形鋼の角部及び端部の R 部を除いた長さである 36.5mm とした。また、断面曲げ剛性の算出には、図 3 に示すような R 部を省略した簡易的な断面としている。また、図中には断面重心位置及び Z 軸周りの X 軸に対する最弱軸の回転角度を図中に示している。VaRTM 法によって、CFRP の成形を行うと、成形毎に V_f の差が生じ CFRP の厚さや弾性係数が変動する。 V_f はこれまでの VaRTM 法による結果⁷⁾から、45~55% の範囲で変動すると仮定し、この範囲で最弱軸周りの等価な断面二次モーメントを算出すると、 $V_f=55\%$ の時が最も安全側で設計可能であったため、 V_f の仮定値を 55% とした。

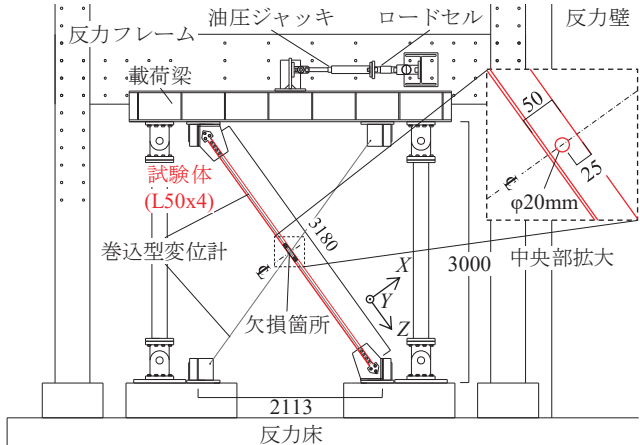


図 1 試験装置概要 [単位:mm]

表 1 鋼材の物性値				
弾性係数	降伏点	引張強さ	伸び	
[GPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	
196.7	322	450	36	

表 2 炭素繊維の物性値			
弾性係数	目付量	引張強さ	厚さ
[GPa]	[g/m ²]	[MPa]	[mm]
440	400	≥2400	0.217

図 2 接合部詳細図 [単位:mm]

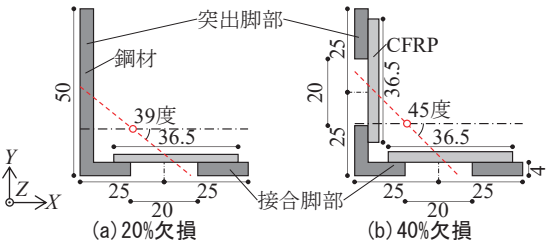


図 3 断面欠損・補修概要 [単位:mm]

図4に座屈固有値解析を用いて算出した各補修試験体の応力分布を示す。また、積層数・定着長・テーパ形状は表3に示す通りである。部材軸方向の中点を原点とし、部材軸方向（図1におけるZ軸方向）における各節点の応力を示している。座屈モードは図4における原点を基に正負対称であり、得られる応力分布も同様に対称であるため、負方向のみの応力分布を示している。部材長はガセットプレートを含めた3660mm、両端固定支持とし、10mm間隔の節点分割としている。各区間の曲げ剛性は断面曲げ剛性の算出と同様の最弱軸周りの断面二次モーメントによって計算を行った。最初に降伏点を超える節点は図中の塗りつぶしがされた点（テーパ端部の一般部）であり、塑性ヒンジ形成箇所がCFRP接着区間外となるような補修設計となっている。また、積層数は両者断面軸剛性による条件による必要積層数と同じ積層数である。図5に各試験体図を示す。実腐食では断面欠損周辺は腐食劣化が生じておりのCFRPの接着は期待できない。よって、円孔両端から10mmの区間をマスキング処理により鋼部材とCFRPの応力伝達の絶縁を施しており、CFRPを接着しないようにしている。また、ブレース材の伸びを計測することを目的として接合脚部側にポンチにより標点を記している。標点位置は部材中央から±20mmの位置より200mm間隔とし、補修試験体については、定着部・テーパ部の端部に標点を記し、これらの伸びも計測した。ひずみは部材中央部及びCFRP端部にて計測を行った。

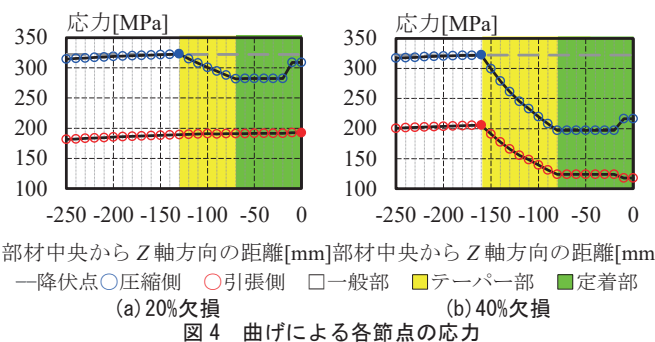
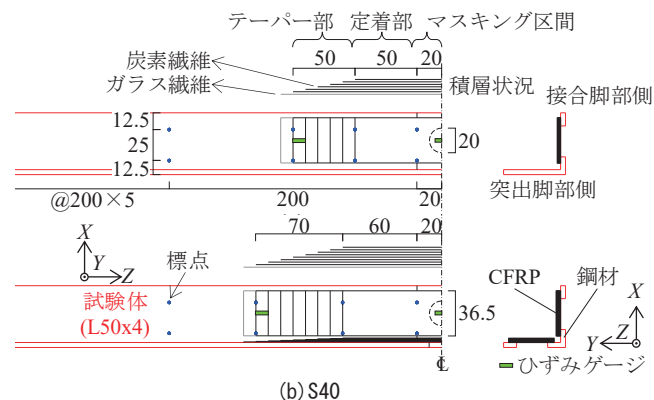


表3 積層設計結果

	補修面数	積層数[ply]	定着長[mm]	テーパ形状
20%欠損	1	6	50	10mm/ply
40%欠損	2	8	60	10mm/ply

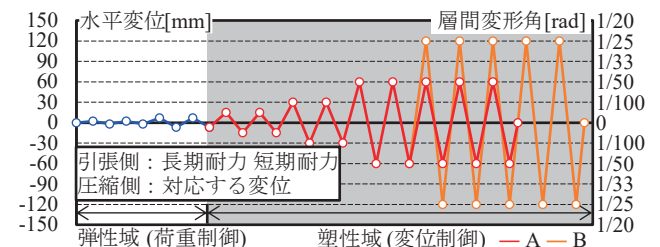


3.3 载荷概要

表4に試験変数を示す。また、試験は図1の試験装置を用いた正負交番漸増繰り返し水平加力試験とした。水平変位については、部材に引張力が作用する方向を正の向きとする。载荷プログラムは図6に示すように、同じ荷重もしくは同じ変位を2回繰り返すこととする。なお、最大変位によるサイクルでは5回繰り返し载荷を行う。文献9)において耐震診断の際に保有耐力接合を満足する山形鋼ブレースの塑性変形能力を表す指針として、構造特性係数0.3とすることが示されている。また、これを満足する水平変位は46.8mmであり、これを踏まえ最大変位についてはプログラムAでは±60mm(層間変形角:1/50rad)と定め、プログラムBではその倍の±120mm(層間変形角:1/25rad)とする。载荷プログラムの前半は、荷重制御による弾性域での载荷を行い、その後は変位制御による塑性域に及ぶ変形を与えることとした。弾性域の载荷では、鋼構造許容応力度設計規準¹⁰⁾に基づき、健全部材の長期許容応力度及び短期許容応力度から算出した水平方向長期耐力及び短期耐力を与える。部材に圧縮荷重が作用した場合、部材が早期に座屈し荷重が極めて小さいため、正の向きに作用させた制御荷重時点の変位を負の向きに与えることとした。また、作用した変位については、ガセットプレートを設置するための治具を利用し、载荷フレーム内にX形に配置した巻込型変位計により測定した部材軸方向変位を水平変位に変換する。

表4 試験変数

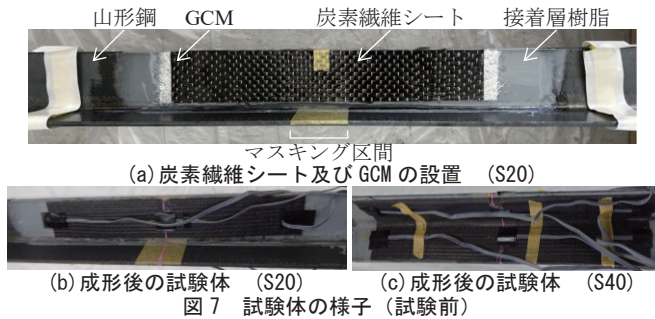
試験体名	補修	断面欠損割合	载荷サイクル
NS0-B	なし (NS)	0 %	B
NS20-A	なし (NS)	20 %	A
S20-A	あり (S)	20 %	A
S20-B	あり (S)	20 %	B
NS40-A	なし (NS)	40 %	A
S40-A	あり (S)	40 %	A
S40-B	あり (S)	40 %	B



3.4 成形方法

CFRP補修材の成形手順について述べる。はじめに、CFRP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、鋼材素地面を露出させるとともに適切な表面粗さとなるように処理する。本研究では、既往研究⁷⁾の結果を基に十点平均粗さRzJISが20μm以上となるように管理した。次に、断面欠損部においてCFRPの直線性を保持するために、速硬化型エポキシ樹脂系接着剤を用いて円孔部の穴うめ及び平滑化処理を施した。次に、鋼材表面とCFRPの接着性を高めるプライマーとして広く使用されている鋼構造物用耐熱型エポキシ樹脂系接着剤を接着層樹脂として塗布する。接着剤の硬化後、サンドペーパーを用いて接着剤表面の目粗しを行い、含浸接着樹脂である低粘度耐熱エポキシ樹脂を下塗りした後、図7(a)のように事前に積層された炭素繊維シートと電食防止及び樹脂の含浸を促すこ

とを目的としたガラス繊維チョップドストランドマット(以下 GCM)を接着層基材として設置する。VaRTM 法のための副資材の設置、真空化及び樹脂の含浸を行う。成形後の試験体を図 7(b),(c)に示す。成形の結果 V_f の平均値は 55.71%変動係数 4.3%であり、設計時に仮定した 55%に極めて近く、安定した成形が行えたことが確認できた。また、成形に必要な機材・工具は可搬性に優れていることから、狭隘な場所や高所における現場施工も可能であると考えられる。



4. 試験結果

表 5 に試験結果を示す。破断タイミングは、層間変形角の後に括弧書きでその層間変形角でのサイクル数としている。欠損試験体は、ガセットプレートを剛体とした時の部材伸びがそれぞれ 0.5%以下とブレース材としての塑性変形能力を示す前に破断が生じた。対して、補修試験体は一般部の降伏後まで CFRP の剥離が生じず、補修を行うことで約 2.6%(層間変位角:1/25rad)の部材伸びを確保することができた。

表 5 試験結果

試験体名	最大荷重 [kN]	破壊形態	最大伸び [%]	破断タイミング (サイクル数)
NS0-B	71.6	-	1.52	-
NS20-A	70.9	断面欠損部の破断	0.45	+1/100rad(1)
S20-A	71.7	-	1.27	-
S20-B	69.8	GCM 層間剥離	2.57	-1/25rad(2)
NS40-A	60.2	断面欠損部の破断	0.32	+1/100rad(1)
S40-A	72.4	-	1.27	-
S40-B	72.0	-	2.58	-

図 8 に -1/50rad(2)の各試験体の様子を示す。図中には面外変位の最大点を矢印で示し、部材端部を結ぶ線及び中点を併せて記している。健全試験体は部材中央部が面外変形の最大点となっており、部材中央を対称とした変形となっている。対して、補修試験体は CFRP 補修区間のやや上部で面外変形が最大となっている。これは、塑性ヒンジ形成箇所を CFRP 接着区間外とする補修設計を満たしており、早期の CFRP の剥離を防いだことがわかる。

図 9 に水平荷重-水平変位関係を示す。前述したように欠損試験体は、ブレース材としての塑性変形能力を示す前に断面欠損部から破断したことが確認できる。対して、補修試験体は健全試験体と同様の挙動を示している。また、図中には補修試験体の試験時の様子を示しており、写真左側がブレース上部である。S20-B は、剥離音が生じた後の+1/50rad(2)でテーパ区間での剥離が生じ、-1/25rad(2)にて CFRP 補修の上半分にて GCM 層の層間剥離が生じた。また、载荷プログラム A の試験体及び S40-B は、GCM 層の白化が確認されたが定着部の CFRP の剥離は生じなかった。

図 10 に载荷プログラム B の試験体の部材中央部で計測した水平荷重-ひずみ関係を示す。ひずみゲージ位置の断面図を併せて示しており、図中のひずみゲージの色は線色と合わせている。降伏荷重及び理論値の線種・線色は図 10 と図 11 で共通である。欠損部材の孔のある面では、理論値に対してひずみが大きい。補修試験体は欠損断面部降伏荷重を迎えるまで、理論値に対応した値を示している。すべての部材+1/200rad(1)にて鋼材の降伏に伴うひずみの増加が生じている。補修試験体はひずみの増加が抑制され、CFRP が応力を分担していることがわかる。S20-B では、繰り返し荷重に対してひずみが増加し、+1/25rad(2)にて接合脚部の顕著なひずみの増加が生じている。

図 11 に CFRP 両端で計測した水平荷重-ひずみ関係を示す。CFRP が完全に接着状態であると、引張荷重とひずみは線形関係となるが、CFRP 端部の剥離が生じると CFRP が応力負担しないため、引張荷重の増加に対してひずみが増加せず、CFRP 端部の剥離の検出が可能である。ひずみゲージ位置の断面図を併せて示しており、図中のひずみゲージの色は、線色と合わせている。CFRP 上端は図 1 における Z 軸負側の CFRP 端部であり、CFRP 下端は Z 軸正側の CFRP 端部に対応する。载荷プログラム A の試験体では、引張荷重時に概ね線形的な挙動を示したこと、目視での端部の剥離が確認できなかったことから、CFRP 端部の剥離は生じていないことがわかる。対して、载荷プログラム B の試験体では、剥離開始点から水平荷重の増加に伴いひずみが減少し、CFRP 端部の剥離が生じた。水平荷重の増加に対してひずみ減少し始めるステップを剥離開始点とし図中に○印を示している。S20-B は、CFRP 上端・接合脚部側で+1/100rad(1)にてひずみの減少が生じ、-1/50rad(1)では CFRP の剥離の進展が目視にて確認された。S40-B では、CFRP 上端・接合脚部側で+1/25rad(1)にてひずみの減少を示したが、目視による CFRP の剥離は観測されなかった。また、+1/25rad(2)以降引張荷重時に CFRP 端部のひずみの最大値が減少しており、引張荷重時に生じた CFRP 端部の剥離を起因として、圧縮荷重時に剥離が進展したと考えられる。これらを踏まえると地震力に代表されるような圧縮・引張力が交互に作用するブレース材では、単調圧縮ないし引張試験のみによって得られる接着補修・補強の鋼材降伏後に対する変形への追従性能は過小評価となる恐れがあり、正負繰り返し試験により剥離の進展を評価する必要があると考えられる。また、補修面が 1 面である 20%欠損試験体は、40%欠損試験体に比べ、図 3 に示す最弱軸に対する CFRP 接着面の角度が小さくなる。最弱軸周りの面外変形を考えたとき、接着層に作用する面外応力が大きくなる。よってこのことが、S40-B では CFRP 定着部での剥離は生じず、S20-B では生じた要因の一つであると考えられる。

図 12 に各試験体の試験後の様子を示す。载荷プログラム A の試験体は補修区間全体を、载荷プログラム B の試験体は CFRP 上端を示している。また、写真左側がブレース上部であり、写真上部が接合脚部側である。载荷プログラム A の試験体では、CFRP 上端から一般部にわたって黒皮の剥離が生じ、CFRP 接着区間では黒皮は剥がれておらず、塑性の進行が起きていないことが確認された。また、CFRP 上端のみ GCM 層の白化が確認されたが、CFRP の剥離は生じていない。S20-B は、図 12(c)に示すように、CFRP 上半分の GCM 層の層間剥離が生じた。S40-B は、図 12(d)のように座屈に伴う大変

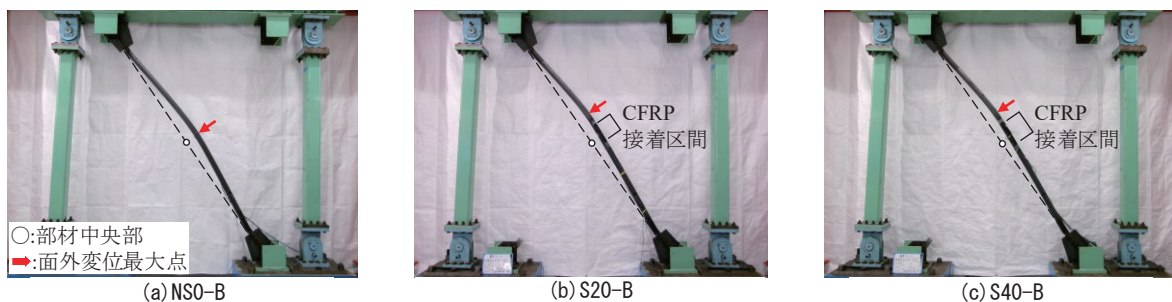


図8 試験時の様子 -1/50rad (2)

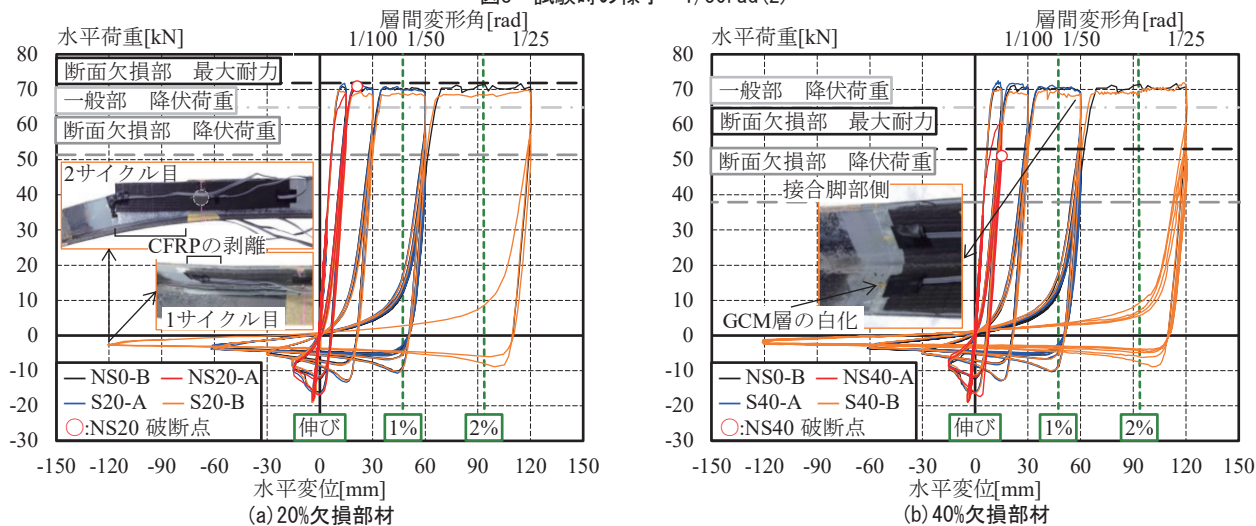


図9 水平荷重-水平変位関係

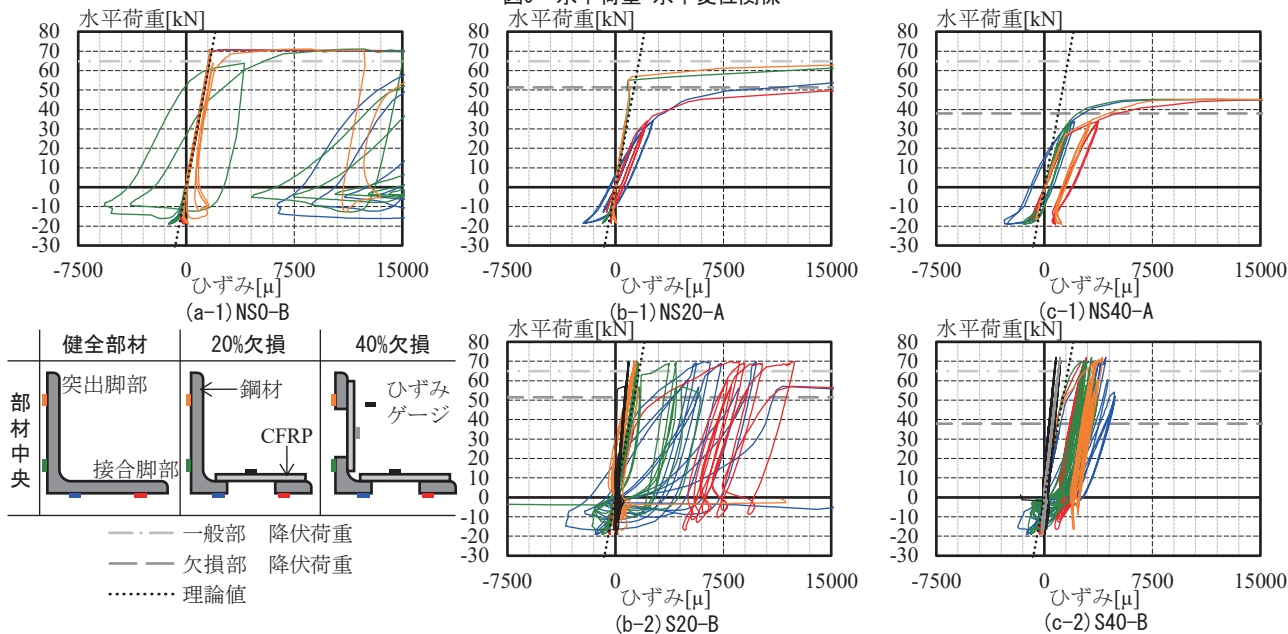


図10 水平荷重-ひずみ関係 (断面欠損部)

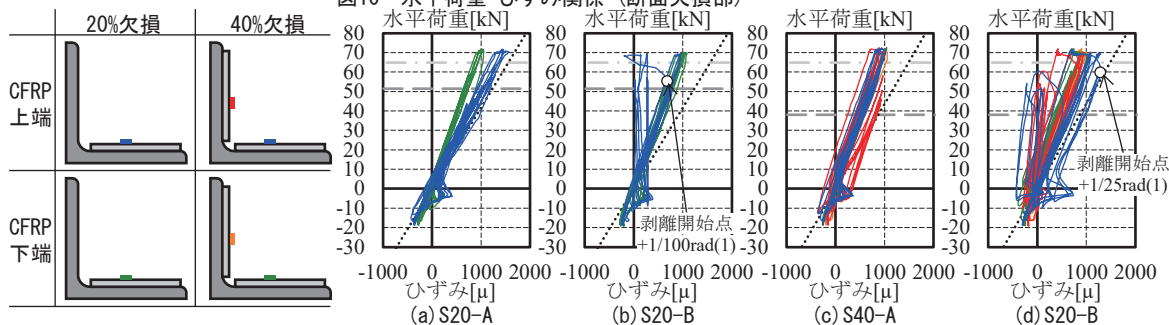


図11 水平荷重-ひずみ関係 (CFRP端部)

形によって山形鋼の開きが確認され、CFRP 上端・突出脚部側にて炭素繊維 1ply 分(CFRP 端部から 10mm)の剥離が確認された。しかし、山形鋼角部及び CFRP 定着部の CFRP の剥離は生じていない。

図 13 に各試験体の試験前と試験後に測定した標点間の差から算出した各標点間の伸びの平均値を示す。部材中央部を原点とし下方を正の向きとしている。健全試験体はブレース中央部の伸びが約 3%であり、中央部以外の伸びが 2~2.5%となった。対して、欠損試験体は部材全体で伸びがほとんど 0%であった。また、補修試験体の CFRP 定着区間・テーパ区間の伸びは 2%以下であり、山形鋼一般部は約 2~2.5%であった。このことより、欠損試験体は一般部の塑性化が生じる前に破断に至ったが、CFRP 補修を行うことで一般部の塑性化まで部材破断が生じず、健全部材と同等の部材性能の回復が確認された。また、図 8 のように補修試験体は健全試験体と座屈モードが変化し、CFRP 補修部の上部で曲率が最大となった。よって S20 試験体では-170mm の点で、S40 試験体では-320mm で伸びが最大(約 2.5~4%)となった。既往研究 11)で接着耐力を十分に確保し、プライマーとしてエポキシ樹脂系接着剤を塗布した場合、一般部の鋼材の塑性伸びが約 3%で CFRP の剥離が生じることが報告されている。S20-B は一般部の塑性伸びが約 2%であるにも関わらず CFRP の剥離が生じた。これは、座屈変形による接着層に面外応力が生じることや、繰り返し載荷による CFRP 端部の剥離の進展によって、単調引張試験に比べて早期に剥離が生じたと考えられる。

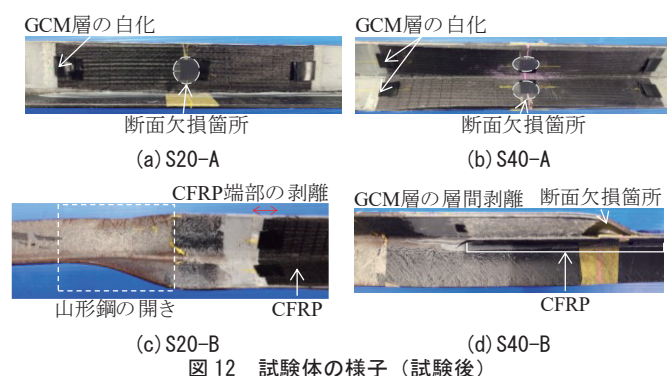


図 12 試験体の様子(試験後)

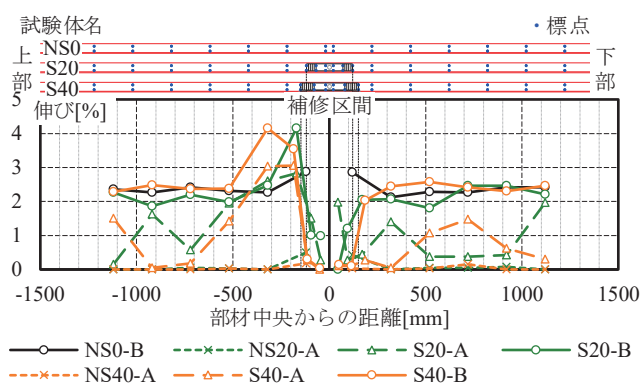


図 13 各標点間の伸び

5. まとめ

本研究では、腐食した鋼構造ブレースを想定し腐食を模擬した孔をあけた等辺山形鋼に対して VaRTM 法による CFRP 補修法を提案するとともに、実大スケールの正負繰り返し水平加力試験を行い、部材性能の回復効果の評価を通して、以下の知見が得られた。

- 1) 腐食を模擬し等辺山形鋼ブレースに対して、提案した補修法を施した試験体を用いて正負交番繰り返し水平荷重試験を行った結果、引張耐力及び変形性能が回復することを明らかにした。
- 2) 座屈固有値解析を用いて塑性ヒンジ形成箇所を CFRP 接着区間外とすることで面外変形に伴う早期の剥離は生じなかった。
- 3) 圧縮・引張力が繰り返し作用する鋼部材に対する接着工法を用いた補修・補強の場合、補修・補強材料の鋼部材降伏後に対する追従性能は、単調試験で得られる追従性能を下回る恐れがある。

参考文献

- 1) 秀熊佑哉, 宮下剛, 高森敦也, 奥山雄介, 大垣賀津雄, 長谷俊彦, 原田拓也: 溶接近傍に腐食損傷を有する溶接箱形断面柱の圧縮耐力とその FRP 接着補修に関する研究, 土木学会論文集, 第 79 巻 第 5 号, 2023.5
- 2) 松井孝洋, 大園智章, 山崎智之, 高野修一, 松本幸大: 腐食劣化した送電鉄塔鋼管に対する VaRTM 工法を用いた CFRP 補修技術の検討, 日本建築学会 構造工学論文集, Vol.67B, pp.471-482, 2021.3
- 3) 松山晃大, 佐藤潤, 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 部材による圧縮力を受ける鋼部材の補修・補強に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 74 巻, 第 5 号, pp. II_67~II80, 2018.5
- 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: 鋼橋の CFRP 接着補修・補強, 日本船舶海洋工学会誌, 110 巻, pp.18-23, 2023. 4
- 6) NAKAMURA, T., TERASAWA, Y. and TAKEUCHI, T.: Fundamental Study on Seismic Retrofit for Angle Brace Connections of Transmission Tower using Steel Plate Adhesive Bonding: Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.89, No.818, pp.462-472, 2024. 4 (in Japanese)
中村毅, 寺澤友貴, 竹内徹: 鋼板を接着補強した送電用山形鋼鉄塔腹材の接合部載荷実験と有限要素法解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 89 巻, 第 818 号, pp.462-472, 2024. 4
- 7) MATSUI T., SUZUKI K., SATO S., KUBOKAWA Y., NAKAMOTO D. and MATSUMOTO Y.: Strengthening Method for Connection of Steel Braces by Carbon Fiber Sheet Bonded and Molded by VaRTM, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.27, No.67, pp.1279-1284, 2021. 10 (in Japanese)
松井孝洋, 鈴木公平, 佐藤壮大, 久保川祐喜, 中本大暉, 松本幸大: 炭素繊維シートの VaRTM 成形接着法による鋼構造ブレース接合部の補強法, 日本建築学会技術報告集, 第 27 巻, 第 67 号, pp.1279-1284, 2021. 10
- 8) 秀熊祐哉, 小林朗, 宮下剛, 奥山雄介, 石川敏之: 断面欠損を有する鋼板の炭素繊維ストランドシート接着による補修方法, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-340pp.679-680, 2013.9
- 9) 財団法人日本建築防災協会: 2011 年改訂版耐震改修促進法のための既存鉄骨建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説, 2011.9
- 10) 日本建築学会: 鋼構造許容応力度設計規準, 2019.10
- 11) 濱崎瑞生, 三枝玄希, 中本大暉, 松井孝洋, 松本幸大: VaRTM 法により成形接着された鋼・CFRP ダブルストラップ接合部の力学挙動に及ぼす接着層の影響, 第 14 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 2021.11

[2024 年 10 月 2 日原稿受理 2025 年 1 月 7 日採用決定]