

論文 Article

等辺山形鋼の CFRP シートによる補修・補強効果に関する実験的研究

原稿受付 2022 年 8 月 30 日

ものづくり大学紀要 第 12 号 (2022) 19~25

Preshan BHANDARI^{*1}, 大垣賀津雄^{*2}, Pham Ngoc VINH^{*2}, 渡辺健也^{*3},
秀熊佑哉^{*4}, 櫻井俊太^{*4}

^{*1} ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科 学生

^{*2} ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科

^{*3} ものづくり大学 大学院 ものづくり学研究科 学生

^{*4} 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部

概要 送電鉄塔でよく用いられる等辺山形鋼を対象に、炭素繊維シート接着工法による腐食損傷部の補修に着目した実験的研究を行い、性能回復効果を検証した。また地震時や風荷重時に対する同部材全体の炭素繊維シート接着工法による補強に着目した実験的研究を行い、その耐荷力向上効果を検証した。

キーワード : CFRP, 鉄塔, 山形鋼, 補修, 補強

Experimental study on Repair and Reinforcement Effects of Equilateral Angle Steel with CFRP Sheets

Bhandari PRESHAN^{*1}, Kazuo OHGAKI^{*2}, Pham Ngoc VINH^{*2}, Tatsuya WATANABE^{*3},
Yuya HIDEKUMA^{*4} and Syunta SAKURAI^{*4}

^{*1} Student, Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists

^{*2} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists

^{*3} Graduate student, Graduate School of Technologists, Institute of Technologists

^{*4} NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd., Composite Division

Abstract An experimental study was conducted focusing on the repair of corrosion damage by the carbon fiber sheet bonding method for equilateral angle steel, which is often used in transmission towers, and the performance recovery effect was verified. In addition, an experimental study was conducted focusing on the reinforcement by the carbon fiber sheet bonding method for the entire length of the member against earthquakes and wind loads, and the compressive strength reinforcement effect was verified.

Key Words : CFRP, Steel tower, Angle steel, Repair, Reinforcement

1. はじめに

送電鉄塔、橋梁、および水門等で用いられている等辺山形鋼部材は、経年劣化等により腐食損傷を受けている。また、阪神淡路大震災後の耐震設計基準の大幅変更や東日本大震災後の部分見直し

により、元々の等辺山形鋼部材が耐荷力不足の状況にあり、耐震補強が必要な構造物が数多く供用されている状態である。さらに、等辺山形鋼部材の部分腐食や耐荷力不足が原因で、台風による倒壊事故が複数件発生しており、一部地域において長期間に及ぶ停電を余儀なくされる等の社会問題

が発生している。

このような補修・補強では、一般的に鋼板を添接板で補強する当て板工法や部材を交換する部材交換工法が用いられている。しかしながら、構造部材に当て板用のボルト孔を開けると、その孔引きにより補強鋼板の板厚が増加するので、自重がさらに増加することとなり、設計、施工上の課題が多い状況にある。また、部材交換工法についても、対象構造物の供用状況によっては、安全性確保に大掛かりな仮設機材が必要となる。さらに、等辺山形鋼の内面には R 部があって幅も狭いことから、鋼板の当て板工法の適用が困難な場合が多い。以上のことから、等辺山形鋼を用いた鉄塔、橋梁および水門等構造物の部材の補修・補強は容易ではないといえる。

このような状況の中で、炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP と呼ぶ）を接着することによる補修・補強工法が注目され、種々の部材に適用されるようになってきている¹⁾²⁾。CFRP は軽量、高弾性、高強度、腐食しない等の特性があり、高所での CFRP 接着による補修・補強作業も比較的容易で、大掛かりな仮設機材や特殊技能等が不要であり、死荷重の増加を最小限に抑えることができる。

そこで、本研究では腐食を模擬した孔を開けた等辺山形鋼の CFRP 接着工法による補修に着目した圧縮載荷実験を行い、対象部材の本来の耐荷性能回復効果を検証した³⁾。また、地震時や風荷重時に対する同部材全体の CFRP 接着工法による補強に着目した圧縮載荷実験を行い、その耐荷力向上効果を検証した。

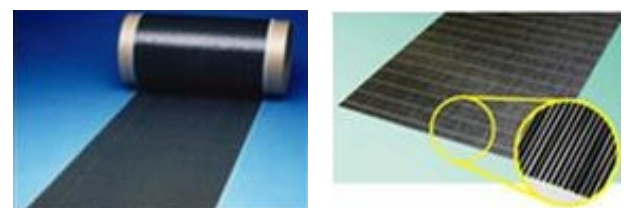
2. 実験概要

2.1 CFRP シート接着工法

Fig.1 に示す通り、炭素繊維をシート状にした標準の CFRP シートと CFRP スtrandシートがある。本研究では、補強工事における施工の合理化を図るために、CFRP スtrandシートを用いることとした。ここで、CFRP スtrandシートとは、炭素繊維束を樹脂で含浸硬化させた直径 1mm～2mm 程度の繊維strandを横糸で連結したもので、ペースト状の接着剤によって鋼部材に貼付

できるよう製造されたものである。施工ではエポキシ樹脂塗布後、含浸させる必要がなく、CFRP スtrandシートを押し付けて接着するため、標準の CFRP シートよりも施工が容易となる。

本研究に用いた高弾性 CFRP スtrandシートおよび接着樹脂の材料諸元は、Table 1 に示す通りである。ここで、高弾性 CFRP スtrandシートの設計厚は鋼換算厚を示している。これらの接着施工手順は Fig.2 に示す通りであり、まず接着部の鋼材表面をケレンして素地調整を行い、次に高伸度弾性パテ用のプライマを塗布した後、高伸度弾性パテを平均 0.8mm 厚で塗布する。その後エポキシ樹脂で高弾性 CFRP スtrandシートを接着する。CFRP スtrandシートの接着は、補修・補強の目標性能に合わせて、必要な層数を積層して施工する。

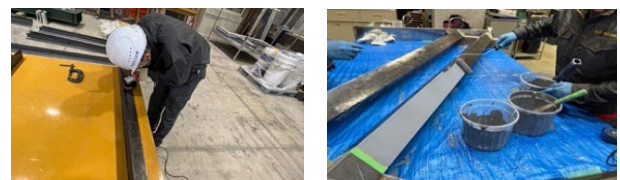


(a) Standard CFRP sheet (b) CFRP Strand sheet

Fig.1 CFRP sheet type

Table 1 Material specifications

項目	設計厚 mm	引張強度 N/mm ²	弾性率 N/mm ²
高弾性 CFRP スtrandシート	0.429	1,900	6.4×10^5
高伸度弾性パテ(FU-Z)	—	8	55～75
エポキシ樹脂	—	29	—



(a) Polishing of base material

(b) Primer paint



(c) Application of elastic putty



(d) Lamination by bonding

Fig.2 CFRP sheet bonding method

2.2 補修実験供試体

腐食を模擬した等辺山形鋼は、鋼材の材質が SS400 であり、断面寸法 L-65×6mm, L-75×6mm, L-90×6mm の 3 種類を使用した。部材長はそれぞれ 1500mm, 1600mm, 1800mm とし、腐食を模擬した円孔は各部材の長手方向中央の片側に設け、L-65 と L-75 では直径 24mm, L-90 では直径 26mm とした。また円孔の幅方向の位置は、実際の構造物の腐食状況を勘案して、円孔端部と山形鋼刃先の縁端距離が 2mm となるようにした。

CFRP スtrandシートは円孔のある側にのみ接着しており、Fig.3 に接着範囲や接着位置を示す。また、Table 2 に腐食円孔補修実験供試体のパラメータを整理して示す。等辺山形鋼サイズ L-65 を A, L-75 を B, L-90 を C と名付けて、それぞれ円孔を開けていない健全な供試体を AN, BN, CN と呼び、円孔を開けているものを AC-0, BC-0, CC-0 とした。

補修供試体については 3 種類の補修パラメータを設定している。円孔が開いている辺の表裏の幅方向全体に CFRP スtrandシートを貼付けるケースを補修 CF と呼び、それぞれ供試体を AC-1, BC-1, CC-1 とした。また、Strandシートの

Table 2 Parameters of corrosion hole repair specimens

供試体	寸法	欠損	補修	b	Lo1	Lo2	Lo3	Lo4	Li1	Li2	Li3
AN		健全	なし	—	—	—	—	—	—	—	—
AC-0	L65	24 φ	なし	—	—	—	—	—	—	—	—
AC-1	×6		CF	60	674	524	—	—	524	—	—
AC-2	1500		CF 細	30	824	674	524	—	824	674	524
AC-3			CF 定着 50	60	474	399	324	—	399	324	—
BN		健全	なし	—	—	—	—	—	—	—	—
BC-0	L75	24 φ	なし	—	—	—	—	—	—	—	—
BC-1	×6		CF	70	674	524	—	—	524	—	—
BC-2	1600		CF 細	35	824	674	524	—	824	674	524
BC-3			CF 定着 50	70	474	399	324	—	399	324	—
CN		健全	なし	—	—	—	—	—	—	—	—
CC-0	L90	26 φ	なし	—	—	—	—	—	—	—	—
CC-1	×6		CF	85	676	526	—	—	676	526	—
CC-2	1800		CF 細	43	976	826	676	526	976	826	676
CC-3			CF 定着 50	85	551	476	401	326	476	401	325

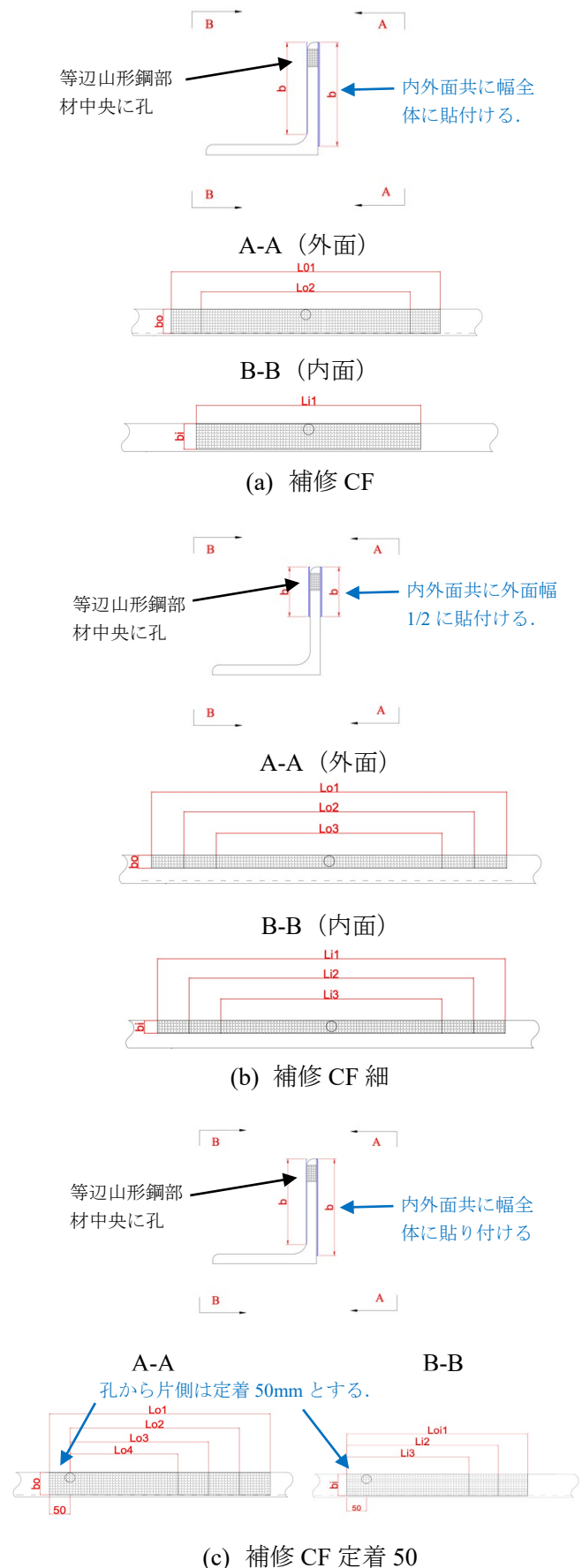


Fig.3 Corrosion hole repair specimens of angle steel

幅を補修 CF の半分にして、円孔付近のみに CFRP スtrandシートを貼り付けるケースを補修 CF 細と呼び、それぞれ供試体を AC-2, BC-2, CC-2 とした。

補修 CF 供試体は円孔端部から軸方向両側に 250mm ずつの定着長を設けており、下層シートを長くして各層間で 75mm のずらし貼りを行っている。一方、補修 CF 定着 50 については、現場で軸方向の片側の定着長が継手部等で 50mm しか確保できない状態を想定した供試体であり、その部分はずらし貼りを行っていないもので、それぞれ供試体を AC-3, BC-3, CC-3 とした。

2.3 補強実験供試体

補強実験で用いた等辺山形鋼は補修実験と同様に、鋼材の材質を SS400, 断面寸法は L-65×6mm, L-75×6mm, L-90×6mm の 3 種類を使用した。部材長はそれぞれ 1500mm, 1600mm, 1800mm である。各種供試体を 3 体製作し、Table 1 に示した CFRP スtrandシートを用いて、Fig.4 および Table 3 に示すとおり、それぞれの供試体の補強の方法を変えている。

Fig.4(a)の補強 1 では CFRP スtrandシート 1 枚を接着した。鋼部材面のシート長さは、すべての供試体において Fig.4(f)に示すように固定治具部があるので、両端 100mm ずつ短くした長さとしている。Fig.4(b)の補強 2 ではシート 2 枚を接着した。1 枚目のシートは補強 1 と同様の長さであるが、2 枚目は両端から 75mm 短くしたずらし貼りで接着している。Fig.4(c)～(e)の補強 1 改では、等辺山形鋼の弱軸回りの断面補強となるように、山形頂点付近と刃先付近を補強することとした。この際に外面シート合計幅が補強 1 と同様になるように、幅方向を 15mm 以下の狭いシートを積層している。

2.4 載荷方法と変位計測

本圧縮載荷実験では、Fig.5 に示す端部固定治具と等辺山形鋼供試体端部を万力で固定して、Fig.6 に示すように、両端を固定の境界条件で圧縮実験を行った。供試体を設置するには等辺山形鋼の外側を固定治具と密着させ、供試体の端部断面が

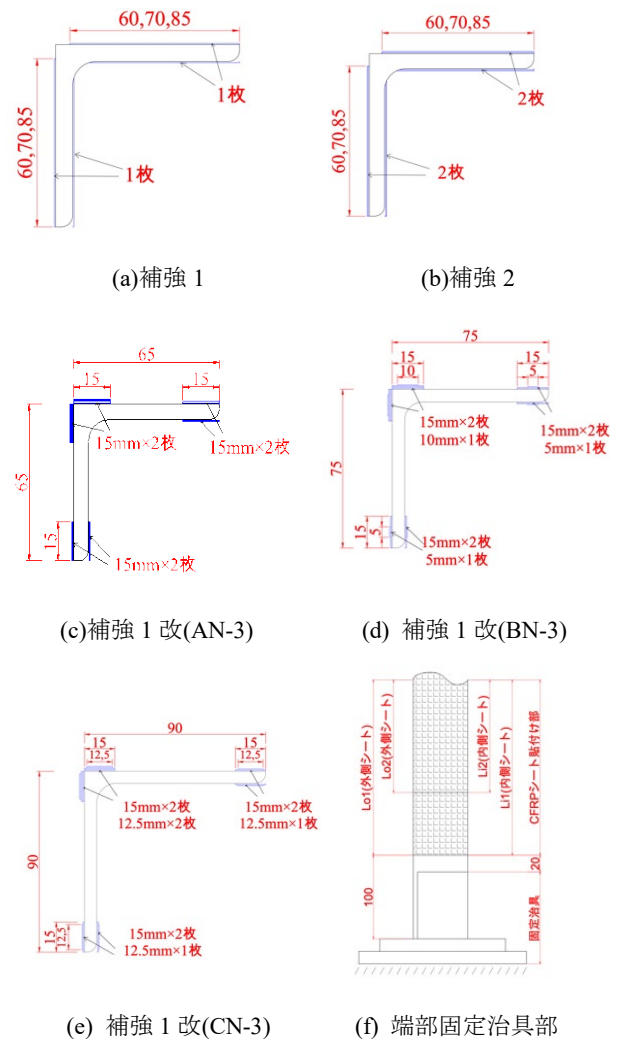


Fig.4 Overall reinforced specimens of angle steel

Table 3 Parameters of overall reinforced specimens

供試体	寸法	補強	b	Lo1	Lo2	Lo3	Lo4	Li1	Li2
AN-0	L65 ×6	なし	—	—	—	—	—	—	—
AN-1		補強 1	60	1300	—	—	—	1300	—
AN-2		補強 2	60	1300	1150	—	—	1300	1150
AN-3	1500	補強 1 改	変化	1300	1150	1000	850	1300	1150
BN-0	L75 ×6	なし	—	—	—	—	—	—	—
BN-1		補強 1	70	1400	—	—	—	1400	—
BN-2		補強 2	70	1400	1250	—	—	1400	1250
BN-3	1600	補強 1 改	変化	1400	1250	1100	850	1300	—
CN-0	L90 ×6	なし	—	—	—	—	—	—	—
CN-1		補強 1	85	1600	—	—	—	—	—
CN-2		補強 2	85	1600	1450	—	—	—	—
CN-3	1800	補強 1 改	変化	1600	1450	1300	1150	1600	1450

注)補強 1 改のシート幅は、15mm 以下で積層している。

固定治具ベースプレートとメタルタッチするようにした。このように一軸圧縮载荷実験を単調荷重増加で行い、Fig.6 に示すように、上下の等辺山形鋼内側固定治具ベースプレート部における鉛直変位、および部材中央の等辺山形鋼内側の面外変位を計測した。

3. 実験結果

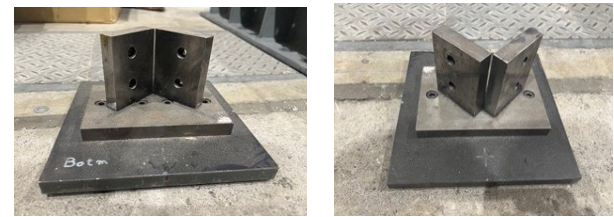
3.1 補修実験

補修供試体の圧縮载荷実験結果を Table 4 にまとめて示す。また、载荷荷重と鉛直変位および面外変位の関係を Fig.7 に示す。これらの図表から、健全な等辺山形鋼に対して、腐食を模擬した孔のある供試体の耐荷力は AC-0 で 62%, BC-0 で 67%, および CC-0 で 73% に低下している。耐荷力の低下率が一定ではなく小型の等辺山形鋼の方が大きくなるのは、断面に対する孔が占める比率が一定ではないためである。

腐食を模擬した孔を全幅シートで補修した供試体 CF では、AC-1 で 62% から 76% に耐荷力が 14% 向上しているが、100% の補修効果は得られていない。また、BC-1 で 67% から 88% に耐荷力が 21% 向上しており、CC-1 で 73% から 100% に耐荷力が 27% 向上している。耐荷力の向上率の差異は、各供試体での補強量に違いがあり、幅が広いほど補強量が大きくなるのが原因であると考えられる。また、断面に対する孔が占める比率が一定ではないことも原因であると考えられる。

一方、腐食を模擬した孔を細幅シートの積層で補修した供試体 CF 細では、AC-2 で 98% まで耐荷力が向上しており、BC-2 でも 98%, CC-2 で 101% まで耐荷力が向上している。このことから、腐食欠損部に合わせた細幅シートで補修する CF 細の工法で施工すると、ほぼ 100% の耐荷力回復効果が得られることがわかった。

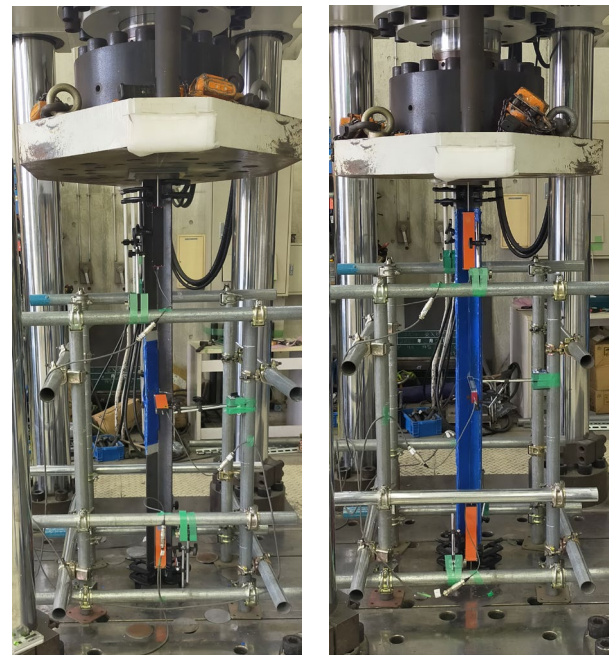
補修 CF 定着 50 については、現場で軸方向の片側の定着長が継手部等で 50mm しか確保できない状態を想定した供試体であり、シートの積層量も CF 供試体よりも約 1.7 倍に増やしているものの、AC-3 で 93%, BC-2 で 94%, CC-2 で 98% の耐荷力回復率であり、十分ではないケースがある。し



(a)内面側

(b)外面側

Fig.5 End fixing member



(a)補修供試体

(b)補強供試体

Fig.6 Photo of compression loading test

Table 4 Parameters of corrosion hole repair specimens

供試体	寸法	欠損	補修	最大荷重 kN	無補強 との比	健全と の比	破壊形態
AN		健全	なし	226	—	1.00	局部
AC-0	L65		なし	140	1.00	0.62	局部
AC-1	×6		CF	171	1.22	0.76	局部
AC-2	1500		CF 細	222	1.59	0.98	全体
AC-3			CF 定着 50	210	1.50	0.93	局部
BN		健全	なし	269	—	1.00	局部
BC-0	L75		なし	179	1.00	0.67	局部
BC-1	×6		CF	237	1.32	0.88	局部
BC-2	1600		CF 細	263	1.47	0.98	全体
BC-3			CF 定着 50	252	1.41	0.94	局部
CN		健全	なし	311	—	1.00	局部
CC-0	L90		なし	227	1.00	0.73	局部
CC-1	×6		CF	312	1.37	1.00	局部
CC-2	1800		CF 細	315	1.39	1.01	局部
CC-3			CF 定着 50	306	1.35	0.98	局部

かしながら、回復効果は補修 CF 工法の場合よりも向上しているといえる。

Fig.7 の荷重と鉛直変位の関係から、初期の剛性は、健全、腐食あり、補強ありでほとんど差異が無く部分的に孔が開いていても弾性範囲でも全体挙動に差異が少ないといえる。同図の荷重と面外変位関係からも初期段階での面外変位は生じていないことがわかる。しかしながら、腐食有りて無補修の供試体は、低い荷重段階で鉛直変位や面外変位が大きくなることがわかる。Table 4 に示した破壊形態から、これらの腐食を有する供試体の破壊は孔周辺の局部座屈により終局状態を迎えることがわかる。一方、健全な供試体や補修した供試体では、局部座屈が抑えられ、全体的な座屈変形が大きくなった段階で、部材中央付近の断面で局部的な圧壊が生じるような連成座屈モードが得られている。

3.2 補強実験

等辺山形鋼の補強効果確認のために実施した圧縮載荷実験結果を Table 5 にまとめて示す。また、載荷荷重と鉛直変位および面外変位の関係を Fig.8 に示す。これらの図表から、健全な等辺山形鋼に対して、CFRP スtrandシートで補強した供試体は 2%から 12%の耐荷力向上効果が得られた。シート 1 層施工による補強 1 で 3%から 10%の効果があつたが、シート 2 層施工による補強 2 で 6%から 12%の効果であった。同表に示す通り、補強後の計算で求められる全塑性軸力は Table 1 に示す鋼換算設計厚を加えており、2 層施工の場合 1 層施工の 1.12 倍程度の差があるものの、実験結果ではその効果が十分発揮できているとは言い難い状況である。

Fig.8 の荷重と鉛直変位の関係から、初期の剛性は、補強 2 がやや大きいことがわかる。これは補強しているシートの量が最も多く、鋼換算断面積では、補強 1 で無補強の 1.14 倍、補強 2 で無補強の 1.27 倍であることと、ほぼ連動するものと考えられる。Fig.8 の荷重と面外変位の関係から、部材中央の面外変位は最大強度付近までほとんど生じておらず、ほぼ最大強度に達してから急に面外変位が生じていることがわかる。

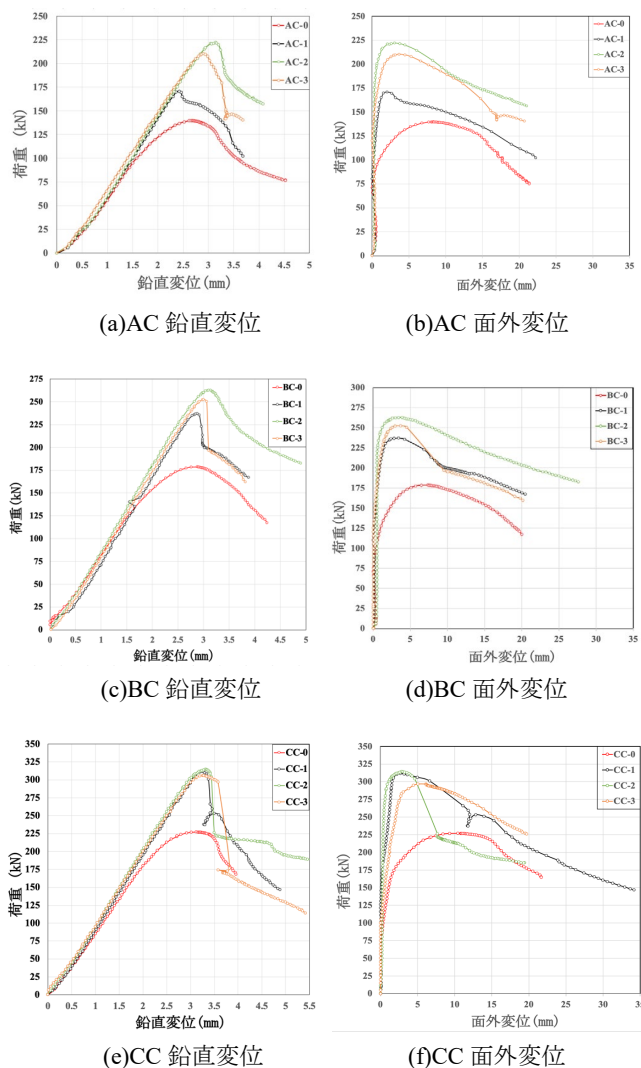


Fig.7 Load-displacement curve (repair experiment)

Table 5 Parameters of overall reinforced specimens

供試体	寸法	補強	最大荷重 kN	無補強と の比	全塑性 軸力 kN	破壊形態
AN-0	L65 ×6 1500	なし	226	1.00	225	局部
AN-1		補強 1	232	1.03	256	全体
AN-2		補強 2	240	1.06	287	全体
AN-3		補強 1 改	242	1.07	248	全体
BN-0	L75 ×6 1600	なし	270	1.00	262	局部
BN-1		補強 1	287	1.06	298	全体
BN-2		補強 2	282	1.04	334	全体
BN-3		補強 1 改	289	1.07	290	全体
CN-0	L90 ×6 1800	なし	311	1.00	317	局部
CN-1		補強 1	341	1.10	361	全体
CN-2		補強 2	348	1.12	405	全体
CN-3		補強 1 改	338	1.02	353	局部

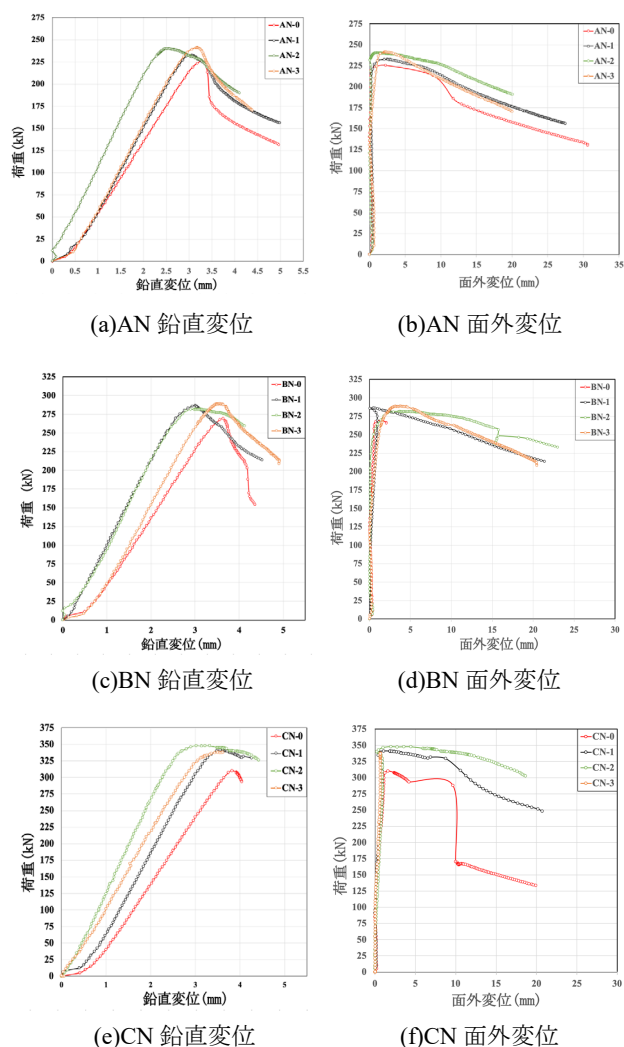


Fig.8 Load-displacement curve (reinforcement experiment)

破壊に至るまでの状況を推論すると以下の通りである。補強なしの供試体の終局強度が全塑性軸力とほぼ等しいことから、補強供試体でも端部付近の無補強部分で塑性化が進行して、部材端部で塑性ヒンジ化したものと考えられる。その後、両端ヒンジの全体座屈モードに移行して、部材中央の塑性局部座屈で終局を迎えることとなる。部材中央断面のシート補強により最大荷重の若干の上昇は確認できたが、端部付近の塑性化により十分な補強性能の確認に至らなかったといえる。

以上のことから、CFRP シートによる補強効果を確認するためには、端部固定治具の改良等が今後の課題として挙げられる。

4. まとめ

本研究では腐食を模擬した孔を開けた等辺山形鋼の CFRP 接着工法による補修に着目した圧縮載荷実験を行い、耐荷性能回復効果を検証した。また、地震時や風荷重時に対する同部材全体の CFRP 接着工法による補強に着目した圧縮載荷実験を行い、その耐荷力向上効果を検証した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 腐食を模擬した孔を有する供試体の耐荷力は 60% 台に低下するが、細幅シートの積層で補修した供試体 CF 細では、ほぼ 100% の補修効果が得られることがわかった。
- (2) 軸方向の片側の定着長が継手部等で 50mm しか確保できない状態を想定した補修 CF 定着 50 供試体については、93% 以上の補修性能を確保できることがわかった。
- (3) 健全な等辺山形鋼に対して、CFRP ストランドシートで補強したすべての供試体は 2% から 12% の耐荷力向上効果が得られた。
- (4) 補強なしの供試体の終局強度が全塑性軸力とほぼ等しく、補強している供試体でも端部付近の無補強部分で終局を迎えたので、十分な補強効果が確認できなかった。

謝 辞

本実験に際し、東京電力パワーグリッド株式会社の方々にご指導いただきましたこと感謝いたします。

文 献

- 1) 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，2013.10
- 2) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018.7
- 3) 秀熊，山崎，村上，山戸，石川：圧縮軸力を受ける断面欠損した等辺山形鋼の炭素繊維シートによる補修に関する実験的研究，2022 年度日本建築学会学術講演会，2022.9

