

CFRPシート補強による鋼桁腹板のせん断耐荷力に関する実験的研究

菊地 新平¹・大垣 賀津雄²・宮下 剛³・秀熊 佑哉⁴・服部 雅史⁵

¹正会員 (一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

E-mail: kikuchi_s@cmi.or.jp

²正会員 ものつくり大学 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: m.akeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部

(〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)

E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

⁵正会員 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: m.hattori.ab@ri-nexco.co.jp

近年、高速道路橋梁等では大規模更新事業として RC 床版取替えを実施しており、あわせて必要に応じて鋼桁補強を行うこととしている。このような中で鋼構造物の補強材料として CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) は、軽量で高強度、高弾性といった特徴を持っており、近年注目されている。本研究では、鋼桁のせん断耐荷力に対して、CFRP シートの種類や貼付方向、高伸度弾性パテ材の有無、CFRP シートの層数を変化させて CFRP 補強を施し、せん断力載荷実験を行ってせん断耐荷力に与える影響について検討を行った。

Key Words: CFRP sheet, shear load carrying capacity, steel girder, reinforcing method

1. はじめに

近年、道路橋では、供用年数の経過や車両重量の増大等によって健全度不足が見受けられる。このことから、高速道路会社は、大規模更新事業として床版取替えを15年計画で実施している¹⁾。RC床版の取替え工事では、軽量化や施工時間の短縮のためプレキャスト PC 床版が標準とされている。しかし、B 活荷重への対応や継手構造の制約によって床版重量が増大傾向にあり、鋼桁の耐荷力不足が懸念されている。従来、鋼桁の補強は、鋼板を溶接やボルトなどによって接合するのが一般的である。しかし、重機や専用機材類が必要となるため施工性に欠ける。よって、近年では、炭素繊維 (以下、CFRP と呼ぶ) シートや CFRP 板を鋼構造物に接着して補強する工法 (以下、CFRP 接着工法と呼ぶ) が注目されている。

しかし、CFRP 接着工法には、はく離という課題がある。はく離対策として1層ごとにシート端部をずらして

貼付する工法²⁾があるものの、十分なはく離抑制効果が得られない場合があった。さらに特殊な成形法を用いた工法の研究事例³⁾があるが、はく離抑制の対策は必要である。そこで、鋼材や CFRP などと比べて、低弾性の特性を有する高伸度弾性パテ材 (以下、パテ材と呼ぶ) を鋼材と CFRP の間に挿入してはく離を抑制する工法が研究⁴⁾されている。高速道路総合技術研究所から発刊されている炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強設計施工マニュアル⁵⁾ (以下、マニュアルと呼ぶ) では、この工法と CFRP シート端部をずらして貼付する工法の両者が採用されている。

CFRP 接着工法による鋼桁の補修・補強に関しては、いくつかの研究^{6)~14)}がある。鋼桁の曲げ補強として、文献⁷⁾では、鋼 I 桁腹板に CFRP シートを貼付して、補強効果の検討が行われている。鋼桁腹板の水平方向 (以下、0° と呼ぶ) と鉛直方向 (以下、90° と呼ぶ) に CFRP シートを貼付することで腹板の座屈を抑制し、曲げ耐荷力

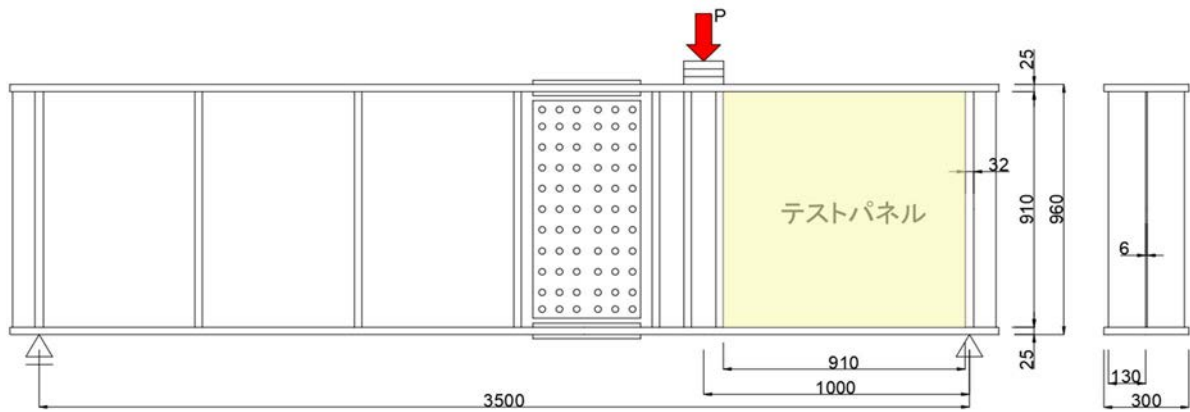


図-1 せん断実験概要 (単位 : mm)

が向上することを確認している。鋼桁端部のせん断補強として、文献 9)では、鋼桁腹板の $\pm 45^\circ$ 方向に高弾性型 CFRP シートを貼付し、補強効果を確認している。また、文献 10)では高強度型 CFRP シートの貼付方向等に着目して、鋼桁端部のせん断耐荷力向上効果を検討している。

一方、中間支点部付近の鋼桁は、負曲げモーメントとせん断力を同時に受ける。しかし、このような箇所に対して CFRP シートを用いた補強の検討はこれまで行われていない。曲げとせん断を同時に受ける場合、既往の研究を参考にして、曲げ補強として $0^\circ, 90^\circ$ 方向に、せん断補強として $\pm 45^\circ$ 方向に CFRP シートを貼付すると、施工が煩雑になる恐れがある。そこで、本研究では、CFRP シートによる補強方法における、貼付方向や、そのほかパテ材の有無、CFRP シートの繊維種に着目して、鋼桁端部のせん断耐荷力に与える影響を検討する。

2. 実験概要

(1) 実験方法

本実験の概要を図-1に示す。本実験では同図に示す通り、I 形断面の鋼桁（支間長 3,500mm、桁高さ 960mm）のテストパネルに CFRP シート貼付による補強を施し、文献 9)と同様に 3 点曲げ载荷によるせん断実験を行った。テストパネル部は、高力ボルト継手により鋼桁と接合しており、各実験が終了するごとに交換できるようにした。

载荷は、最大荷重まで荷重制御とし、最大荷重以降は変位制御とした。また、载荷点直下の下フランジの変位が 50mm 程度となるときを目安に载荷を終了させた。

(2) 供試体

鋼桁の材料特性を表-1に示す。図-1に示すようにアスペクト比 1.0 で鋼材の板厚 6 mm、材質 SS400 の腹板テストパネル部に対して、CFRP シートの種類、図-2 に示す貼付方向、貼付層数、パテ材の有無をパラメータとして、表-2に示す通り 12 ケースの供試体を製作した。CFRP シ

表-1 鋼桁材料特性

項目	弾性係数 GPa	降伏点 MPa	引張強度 MPa
腹板	200	306	437
フランジ		449	569
垂直補剛材		438	559

ートの種類および材料特性を表-3に、接着樹脂などの材料特性を表-4に示す。

マニュアルでは、腹板のせん断力に対する補修において図-3 (a)に示すような標準の高弾性型 CFRP シート (THM) を使用して、シート積層端部を 20 mm ずらして貼りつける（以下、ずらし貼りと呼ぶ）こととしている。しかし、本研究は腹板補強を目的としており、シートを折り曲げる必要もないので、図-3 (b)に示す CFRP スtrandシートによる補強で施工の合理化を図ることとした。ここで、CFRP スtrandシートとは、炭素繊維束を樹脂などで含浸硬化させた直径 1 mm~2 mm 程度の繊維ストランド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¹⁾。施工ではエポキシ樹脂塗布後、含浸する必要がなく、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簡易となる。

さらに、本研究では、CFRP シートの引張強度や弾性係数がせん断耐荷力の補強効果に与える影響を把握するため、既往の研究⁹⁾で用いられている高弾性 CFRP シートの他に高強度ならびに中弾性の CFRP スtrandシートを用いる。表-2に示す供試体名称の最初の記号はパテ材の有無（有：P、無：N）を表しており、次の記号は CFRP シートの種類と層数を表す。ここで、HM は高弾性ストランドシート、MM は中弾性ストランドシート、HS は高強度ストランドシート、THM は標準の連続繊維を用いた高弾性シートを意味する。最後の記号は CFRP シートの貼付方向を表す。

本研究では、テストパネル端部まで板曲げ剛性を向上させるためにずらし貼りを施さず、端部を揃えて積層し

表-2 補強方法

ケース	シート 貼り方	パ テ 材	補強シート			
			内層	外層	シート種類	層数（片面）
N	無	×	無			
N-HM1-TC45	±45° 貼り	×	+45° 引張	-45° 圧縮	HM	1
P-HM1-TC45		○			内：HS 外：HM	1
P-HSM1-TC45		○				1
N-THM2-TC45		×			THM	2
P-HS1-C45	斜め 1 方向 貼り	○	-45° 圧縮	無	HS	1
P-HM1-C45		○			HM	1
P-HS1-T45		○			HS	1
P-HM1-T45		○			HM	1
P-HM1-0,90	0°,90° 貼り	○	90°	0°	HM	1
P-MM1-0,90		○			MM	1
P-MM2-0,90		○			MM	2

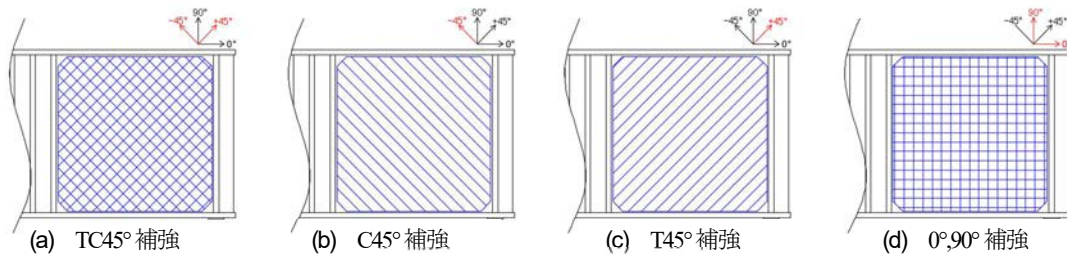


図-2 CFRPシート貼付方向

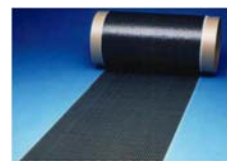
表-3 CFRPシート種類および材料特性

CFRPシート種類	繊維目付* g/m ²	厚さ* mm	弾性係数 GPa	引張強度 MPa
高弾性ストランドシート(HM)	600	0.286	692	2,840
中弾性ストランドシート(MM)	600	0.330	417	3,950
高強度ストランドシート(HS)	600	0.333	270	4,370
高弾性シート(THM)	300	0.143	640*	1,900*

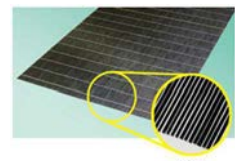
※設計値

表-4 接着樹脂の材料特性

材料	弾性係数 MPa	強度 MPa
高伸度弾性パテ	58	9
接着樹脂	2940	109
接着含浸樹脂	3000	-



(a) 標準のCFRPシート



(b) CFRPストランドシート

図-3 CFRPシート

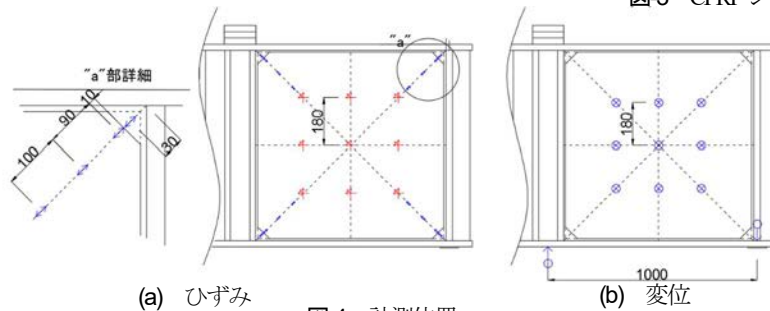


図-4 計測位置

ている。N-THM2-TC45では、CFRPシートTHMの繊維目付量がCFRPストランドシートの2分の1となるため、N-HM1-TC45と繊維目付量を合わせるように2層積層し

た。図-4に、ひずみと変位の計測位置を示す。本研究では、鋼材からCFRPシートへのひずみ伝達を把握するため、CFRPシートの四隅を±45°方向に60mmカットし

表-5 実験結果

ケース	せん断座屈荷重 P_{cr} kN	せん断耐力 $P_u(P_{uN})$ kN	せん断座屈荷重 増加率 P_{cr}/P_{crN}	せん断耐力 増加率 P_u/P_{uN}
N	646	970(1324)	1.00	1.00
N-HM1-TC45	判定不能	1496	-	1.54
P-HM1-TC45	1592	1628	2.46	1.68
P-HSM1-TC45	1036	1290	1.63	1.33
N-NHM2-TC45	1188	1499	1.84	1.55
P-HS1-C45	1120	1192	1.73	1.23
P-HM1-C45	1189	1233	1.84	1.27
P-HS1-T45	981	1255	1.52	1.29
P-HM1-T45	1092	1156	1.69	1.19
P-HM1-0,90	1376	1406(1200)	2.13	1.45(1.24)
P-MM1-0,90	1333	1366(1240)	2.06	1.41(1.28)
P-MM2-0,90	1398	2106(1330)	2.16	2.17(1.37)

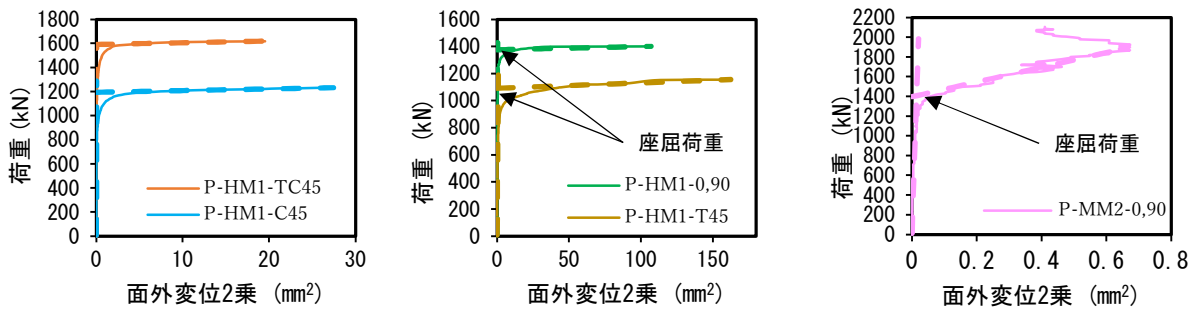


図-5 せん断座屈判定例

てテストパネルに貼付しており、四隅の鋼材部分にひずみゲージを貼付できるようにした。

3. パテ材の影響

表-5に全ケースの実験結果を示す。同表中、せん断座屈増加率およびせん断耐力増加率は、無補強ケース N に対する比率を示している。腹板のせん断座屈荷重は、腹板の表裏のひずみの分岐点、荷重-面外変位関係より求められる^{16)~18)}。本研究では面外変位量が最も大きいパネル中心部の面外変位 2 乗を用いて腹板の座屈荷重を判定した。図-5に判定例を示す。

(1) 荷重—鉛直変位関係

図-6に、パテ材の有無および CFRP シートの比較ケースの荷重—鉛直変位関係を示す。縦軸が載荷荷重を示し、横軸は載荷点直下の下フランジの鉛直変位を示す。同図中の丸印はせん断耐力 P_u を示す。弾性域においてパテ材の有無による影響は見られず、双方ともせん断耐力までほぼ線形性を保っている。一方で、せん断耐力後では、パテ材を挿入していない N-HM1-TC45 はせん断耐力が急激に低下して、P-HM1-TC45 ではせん断耐力が徐々に低下する結果となった。N-HM1-TC45 では、せん断耐力直後に大きな音を立てて CFRP が全面にわ

たってはく離しており、じん性を確保できていないといえる。P-HM1-TC45 では、CFRP シートの破断や圧壊が徐々に生じるものの、パテ材を挿入していないケースよりも緩やかに耐力が低下している。

また、CFRP シートの違いによる差はほとんど見られず、N-THM2-TC45 においても CFRP のはく離によって急激に耐力が低下した。

(2) 荷重—面外変位関係

図-7に、N-HM1-TC45 と P-HM1-TC45 の荷重—パネル中央の面外変位関係を示す。同図中に示すせん断座屈荷重を○で併記した。

N-THM1-TC45 では腹板の面外変位が小さく、せん断座屈が生じる前に CFRP シートがはく離しており、せん断座屈荷重は判断不能であった。P-HM1-TC45 では、せん断座屈が 1592 kN で生じているものの、パテ材によってはく離が抑制され、腹板の座屈変形に追従しており、面外変位を低減できることがわかる。

CFRP シートの違いによる比較をすると、N-HM1-TC45 は面外変形が生じていないのに対して、TN-HM2-TC45 は 1200 kN 程度から座屈による面外変形が生じていることがわかる。標準の CFRP シートは CFRP ストランドシートよりも接着層が薄いため、面外変形が生じたと考えられる。

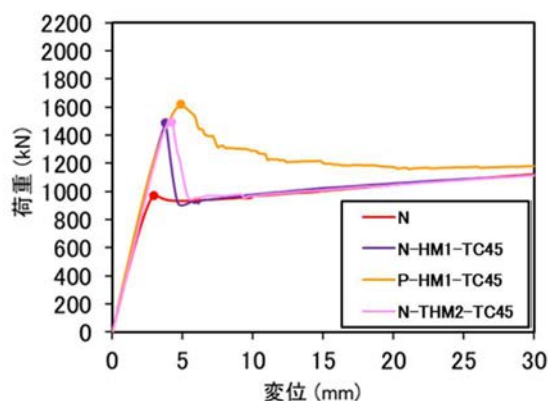


図-6 荷重—鉛直変位関係

(パテ材の有無およびCFRPシートの比較)

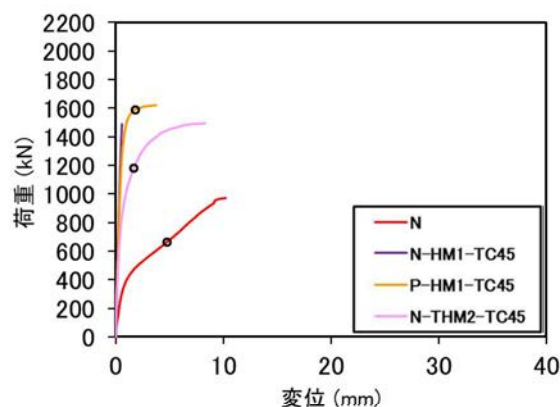
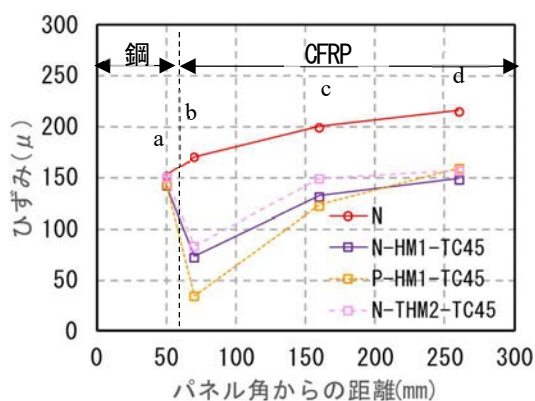
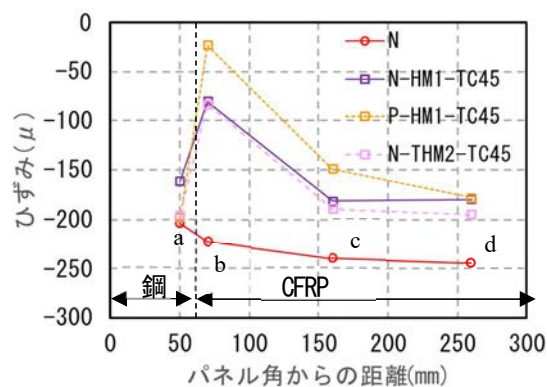


図-7 荷重—面外変位関係

(パテ材の有無およびCFRPシートの比較)

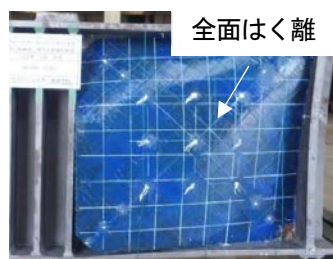


(a) 斜張力場の引張方向

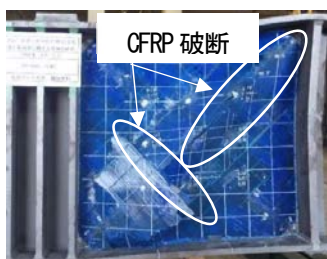


(b) 斜張力場の圧縮方向

図-8 ひずみ分布 (パテ材の有無およびCFRPシートの比較)



(a) N-HM1-TC45



(b) P-HM1-TC45



(c) N-THM2-TC45

図-9 破壊状況 (パテ材の有無およびCFRPシートの比較)

(3) ひずみ伝達

図-4 (a)の”a”部の対角線方向のひずみ分布を、図-8に比較して示す。このときの載荷荷重は弾性範囲の300 kNとした。横軸は、テストパネル角部からテストパネル中心部へ至る対角線方向の距離である。

無補強ケースNに比べて、補強ケースではパテ材の有無を問わず、CFRP端部のb点でのひずみ値が低い。図-8 (a)より、b点の引張方向ひずみはN-HM1-TC45で70～80 μ 、P-HM1-TC45では30～40 μ であり、パテ材なしケースのほうがb点におけるCFRP上面ひずみが大きい。図-8 (b)から、b点の圧縮方向ひずみにおいても同様の傾向である。これは、CFRP端部ではパテ材が水平せん断変形して、ひずみの伝達が小さくなったためと考えられる。しかし、b点からd点に向かうと、ひずみ値は大き

くなり、d点ではパテ材有りはパテ材無しケースとほぼ同等のひずみ(約150 μ)が生じている。

(4) せん断座屈荷重とせん断耐荷力

表-5に示した通りパテ材を挿入したP-HM1-TC45のせん断座屈荷重は、無補強ケースNに対して2.46倍向上した。せん断耐荷力は、N-HM1-TC45とP-HM1-TC45の双方ともパテ材の有無にかかわらず、Nのせん断耐荷力に対して向上した。しかしながら、P-HM1-TC45はN-HM1-TC45に比べて14%せん断耐荷力が大きくなっている。これは、パテ材によってはく離が抑制されたためと考えられる。

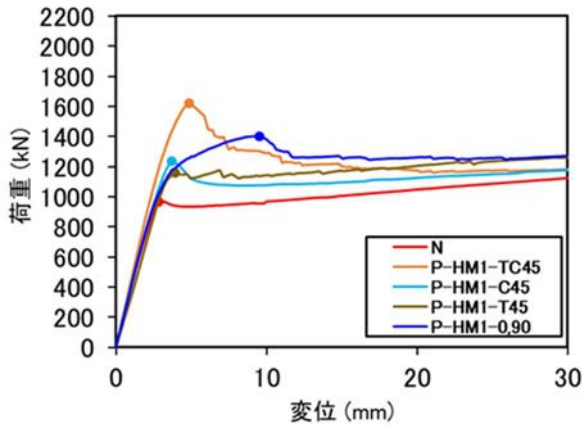


図-10 荷重—鉛直変位関係（繊維方向の比較）

(5) 破壊状況

図-9 にパテ材の有無および CFRP シート種類に応じた破壊状況を示す。N-HMI-TC45 と N-THM2-TC45 では、載荷途中に突然テストパネル全面にわたりはく離した。一方、パテ材を挿入した P-HMI-TC45 では、パテ材によるはく離抑制効果が確認され、高弾性ストランドシートの破断や座屈が生じてシートのはく離は見られなかった。

4. 繊維方向の影響

(1) 荷重—鉛直変位関係

図-10 に CFRP シート繊維方向を比較したケースの荷重—鉛直変位関係を示す。同図中の丸印はせん断耐荷力 P_0 を示す。P-HMI-T45 や P-HMI-C45 では、N に対して初期剛性はほとんど差がみられなかった。これは、高強度型においても共通していることである。斜め 1 方向貼ケースは、層数が小さく 1 方向に貼付しているのみなので剛性差が顕著に表れなかったことが考えられる。せん断耐荷力後の挙動では P-HMI-T45 の荷重—鉛直変位関係の変動が大きい一方で、P-HMI-C45 はせん断耐荷力後に荷重が低下していることがわかる。P-HMI-T45 は斜張力場の引張方向のみに CFRP シートを貼付しているため、座屈変形が大きくなった後も効果を発揮して荷重が徐々に上昇している。ただし、CFRP シートが破断するごとに荷重の低下が確認される。

P-HMI-TC45 では、 $\pm 45^\circ$ 方向の主ひずみを抑制してせん断耐荷力まで線形性を保持している。一方、P-HMI-0.90 では、N に対して初期剛性の向上は見られない。しかし、1200 kN 程度から非線形性が見られ、変形が大きくなるものの、せん断耐荷力は 1400 kN 程度まで上昇している。これは、板曲げ剛性の増加によって、座屈による面外変形の進行を抑制したことによる効果と考えられる。

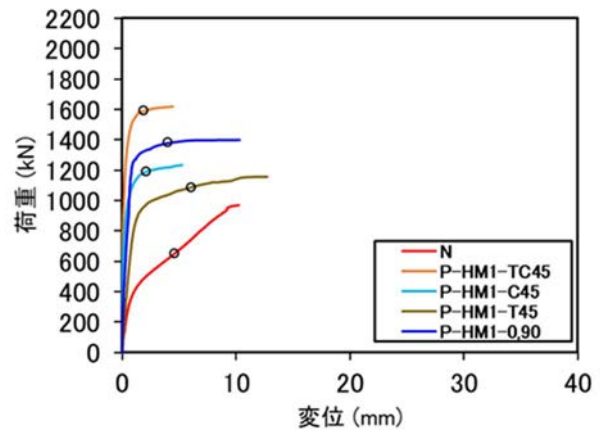


図-11 荷重—面外変位関係（繊維方向の比較）

(2) 荷重—面外変位関係

図-11 に繊維方向による影響を比較したケースの荷重—面外変位関係を示す。同図から CFRP を斜張力場の圧縮方向に貼付している P-HMI-C45 は P-HMI-T45 と比べて、面外変形が小さい値でせん断耐荷力に到達している。この結果は、斜め 1 方向貼りケースのうち、高強度型の CFRP ストランドシートを貼付しているケースでも同様の傾向がみられた。このことから、斜張力場の圧縮方向を補強すると座屈変形を抑制してせん断耐荷力を向上させることができるといえる。また、斜張力場の引張方向に補強すると座屈による面外変形が大きくなっても補強効果を発揮していることがわかる。

(3) ひずみ伝達

図-4(a)の”a”部の対角線方向のひずみ分布を、図-12 に比較して示す。このときの載荷荷重は 300 kN である。図-12 から P-HMI-C45 は、斜張力場の圧縮方向の b 点のひずみが -30μ 程度であり、斜張力場の引張方向の b 点ひずみは約 100μ である。一方、P-HMI-T45 は斜張力場の圧縮方向の b 点のひずみが -100μ 程度であり、斜張力場の引張方向のひずみは約 20μ となっている。これは、補強をしていない方向では剛性が低くなり、鋼材の変形に CFRP がより追従するためと考えられる。

P-HMI-0.90 では $\pm 45^\circ$ 貼りケースや斜め 1 方向貼りケースよりも b 点におけるひずみ低下が小さく、c,d 点では無補強ケース N とほぼ同等のひずみとなっている。鋼桁の腹板の弾性範囲内では腹板のせん断剛性に対して CFRP のせん断剛性が非常に小さいためと考えられる。

(4) せん断座屈荷重とせん断耐荷力

表-5 から、CFRP シートの繊維方向を斜張力場の引張方向に貼付した P-HMI-T45 では、斜張力場の圧縮方向に貼付した P-HMI-C45 よりもせん断座屈荷重増加率が 15% 低いものの、せん断座屈荷重はケース N に対して増加している。これは、斜張力場の引張方向のひずみが拘束

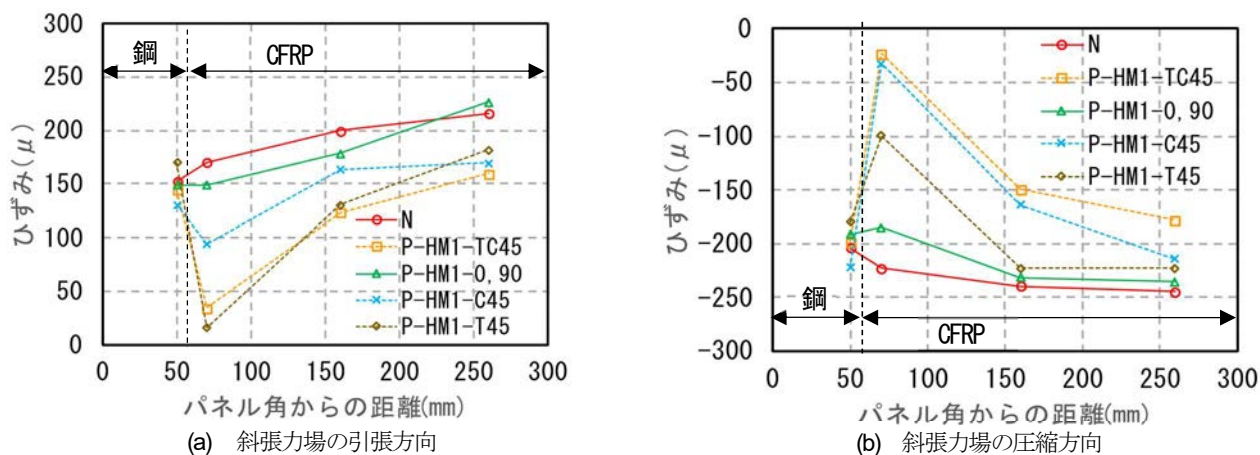


図-12 ひずみ分布（繊維方向の比較）

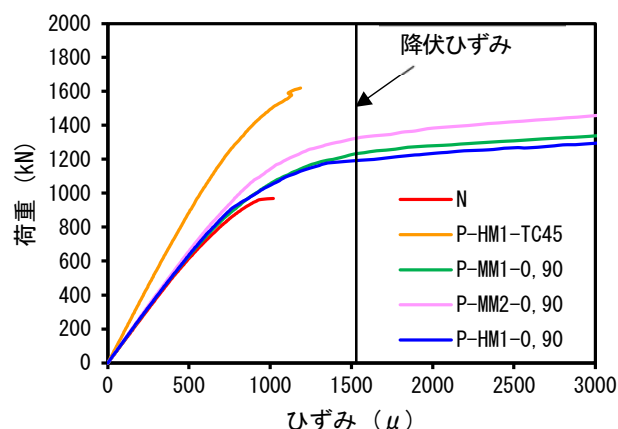


図-13 荷重と腹板の+45°方向の平均ひずみ関係



図-14 破壊状況（繊維方向の比較）

され、テストパネルのせん断変形が小さくなったことによるものと考えられる。また、斜張力場の圧縮方向にCFRPシートを貼付していないため、座屈変形を抑制する効果がP-HM1-C45よりも低いと考えられる。せん断耐荷力増加率は、P-HM1-T45よりもP-HM1-C45の方が8%大きい程度で、有意な差は見られない。斜張力場の引張方向および圧縮方向に補強しているP-HM1-TC45はせん断座屈耐荷力増加率が斜め1方向貼りケースよりも62～77%大きく、せん断耐荷力増加率は41～48%大きい。

図-13に荷重と腹板の+45°方向の平均ひずみの関係を示す。同図より、±45°に高弾性ストランドシートで補強しているケースP-HM1-TC45では、無補強ケースN

よりも弾性範囲におけるせん断剛性が明らかに向上しているのに対して、0°、90°方向貼りケースはケースNとほぼ同等の剛性となっている。また、0°、90°方向貼りケースは、降伏ひずみを超えても耐力が上昇している。

図-11に示した通り、0°、90°方向貼りケースは面外変形を抑制しているものの、せん断による+45°方向のひずみを低減できていないといえる。よって、腹板のひずみ硬化やCFRPの面内せん断剛性および腹板が塑性化しても座屈変形が小さいことによって耐力が上昇したものと考えられる。

一般的な鋼桁のせん断耐荷力の評価¹⁹⁾は、せん断弾性座屈強度を用いて評価されるため最大強度は腹板のせん

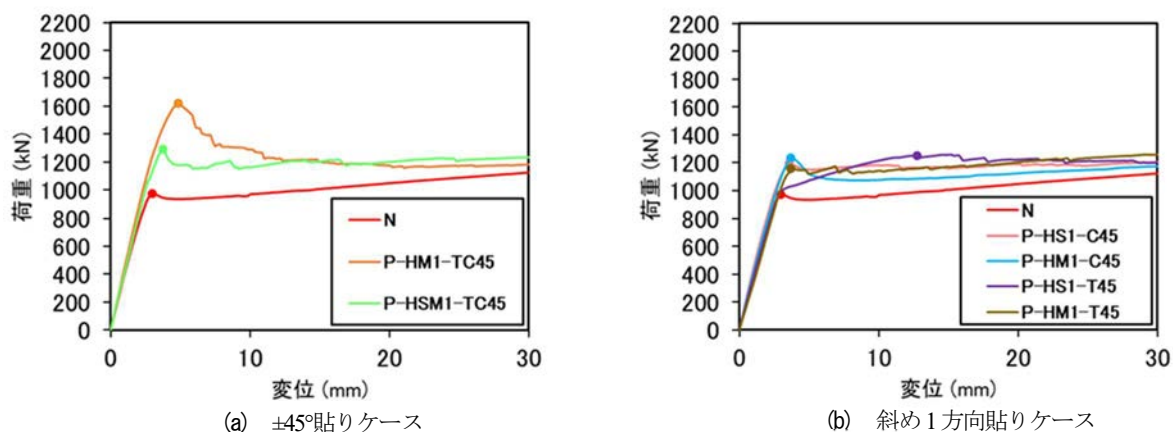


図-15 荷重—鉛直変位関係（繊維種の比較）

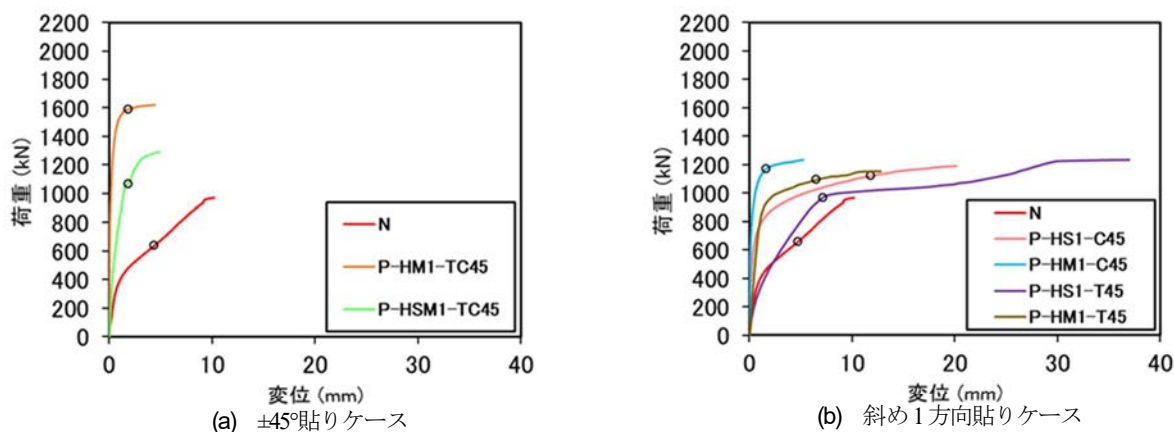


図-16 荷重—面外変位関係（繊維種の比較）

断降伏強度となる。したがって、 0° 、 90° 方向貼りケースにおいて、 P_{iy} は腹板に貼付した 3 軸ひずみ計測点の $+45^\circ$ 方向のひずみが降伏ひずみに達した時点の荷重 P_{iy} をせん断耐力として考察や評価を行う。P-HM1-0.90 は、P-HM1-TC45 よりもせん断座屈荷重増加率は 33 % 低く、せん断耐力増加率は 44 % 低い。腹板の主応力方向に CFRP を貼付していないため、補強効果が P-HM1-TC45 よりも低かったことが考えられる。

(5) 破壊状況

図-14 に CFRP シート貼付方向で比較した破壊状況を示す。斜め 1 方向貼りケースでは、斜張力場の引張方向、圧縮方向問わず、CFRP シートの繊維が繊維直角方向に破断あるいは座屈している。

0° 、 90° 方向貼りケースは、せん断によってテストパネル内に生じる引張力による斜張力場とは直角方向に破断が生じており、はく離は見られなかった。

5. 繊維種の影響

(1) 荷重—鉛直変位関係

図-15 に繊維種を比較したケースの荷重—鉛直変位関係

を示す。 $\pm 45^\circ$ 方向貼りケースでは、P-HSM1-TC45 と P-HM1-TC45 で初期剛性にほとんど差は見られない。せん断耐力後は、P-HM1-TC45 では耐力が徐々に低下するのに対して、P-HSM1-TC45 のせん断耐力は P-HM1-TC45 よりも低いものの耐力が大きく下らず上下変動を繰り返している。

斜め 1 方向貼りケースでは繊維による初期剛性の差はほとんど見られないものの、P-HS1-T45 ではせん断座屈後に面外変形が大きくなり、載荷荷重が徐々に増加している。低弾性かつ高強度の CFRP スtrand シートの効果により、腹板の変形に追従しやすく破断強度が高いためと考えられる。

(2) 荷重—面外変位関係

図-16 に繊維方向を比較したケースの荷重—面外変位関係を示す。図-16 (b) より、斜め 1 方向貼りケースでは、高弾性の P-HM1-C45 や P-HM1-T45 の方が高強度の P-HS1-C45 や P-HS1-T45 よりも面外変形が小さく抑えられている。上述したように高弾性型の CFRP スtrand シートの剛性が大きいことによる。

(3) ひずみ伝達

図-4 (a) の”a” 部に示した位置の 300 kN 載荷時の対

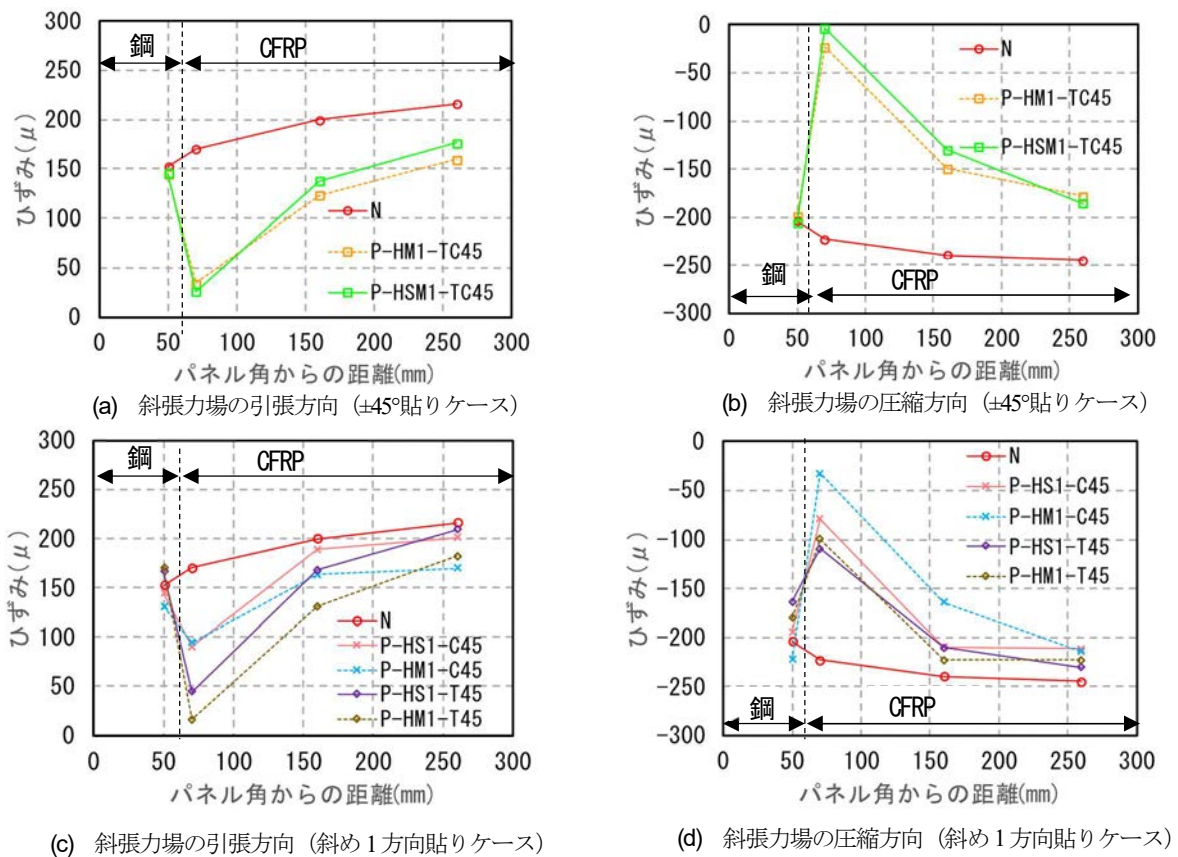


図-17 ひずみ分布

角線方向のひずみ分布を、図-17 に比較して示す。同図(a), (b)より、斜張力場の引張方向を高強度 CFRP ストランドシート、斜張力場の圧縮方向を高弾性 CFRP ストランドシートとした場合と±45° 方向を HM とした場合のひずみ分布に大きな差は見られない。また、同図(c), (d)より、斜め 1 方向貼りケースでは、b 点におけるひずみ低下は高強度型の方が小さいことがわかる。高強度型の CFRP ストランドシートが低弾性であり、腹板の変形に追従しやすかったことによると考えられる。

(4) せん断座屈荷重とせん断耐荷力

表-5 より±45° 貼りケースでは、P-HM1-TC45 に対して斜張力場の引張方向を高強度型としている P-HSM1-TC45 ではせん断座屈荷重増加率およびせん断耐荷力増加率双方ともそれぞれ 83%, 35% 下回る結果となった。これは、せん断座屈荷重付近ではく離したことによる。

斜め 1 方向貼りケースを比較すると高強度型の CFRP ストランドシートで補強している P-HS1-C45, P-HS1-T45 よりも高弾性型の CFRP ストランドシートを貼付している P-HM1-C45, P-HM1-T45 の方がせん断座屈荷重の増加率がそれぞれ 11~17% 高い結果であった。これは表-3 に示す通り、高弾性型の CFRP ストランドシートの方が 1 層あたりの剛性が大きいためと考えられる。せん断耐荷力は、斜張力場の圧縮方向に貼付したケースでは、高強度型と高弾性型の CFRP シートに有意な差は見られない。

また、斜張力場の引張方向を補強したケースでは、高強度型を貼付した方が 10 %せん断耐荷力増加率大きい。これは、高弾性型の方は高強度型よりも剛性が大きい一方で、引張強度は高強度型の方が大きいため、せん断座屈後の強度が大きくなると考えられる。

0°, 90° 方向貼りケースはせん断座屈荷重、せん断耐荷力ともに CFRP シートの高弾性型と中弾性型で大きな差は見られない。

(5) 破壊状況

図-18 に高強度型を用いたケースの破壊状況を示す。

図-14 に示した高弾性型の破壊状況と共に見比べると以下のことがわかる。

±45° 貼りケースにおいてはく離が見られない P-HM1-TC45 に対して P-HSM1-TC45 は、はく離および破断が生じる結果であった。斜め 1 方向貼りケースの斜張力場の引張方向を比較すると、P-HM1-T45 は破断しているのに対して、P-HS1-T45 は破断が見られず CFRP 端部ではく離していることがわかる。また、斜張力場の圧縮方向の補強ケースを比較すると P-HM1-C45 は繊維が座屈による破断が顕著に見られるが、P-HS1-C45 では座屈による破断がほとんど見られず、CFRP 表層のマトリックス樹脂が破壊している。これは、高弾性型と高強度型の CFRP ストランドシートの剛性の差によるものと考えられる。

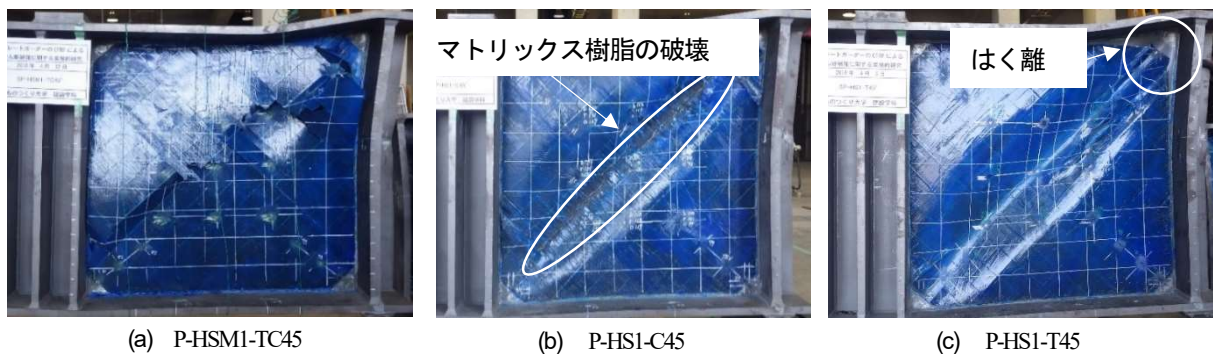


図-18 破壊状況（繊維種の比較）

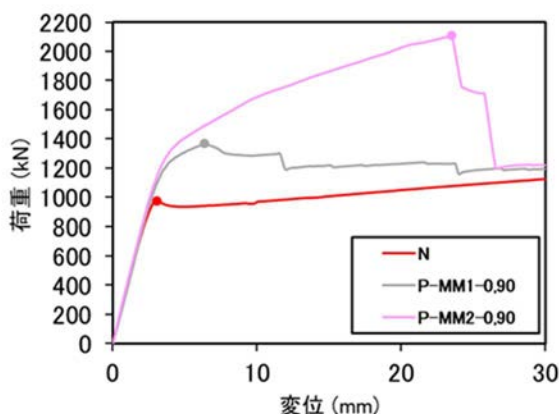


図-19 荷重—鉛直変位関係（積層数の比較）

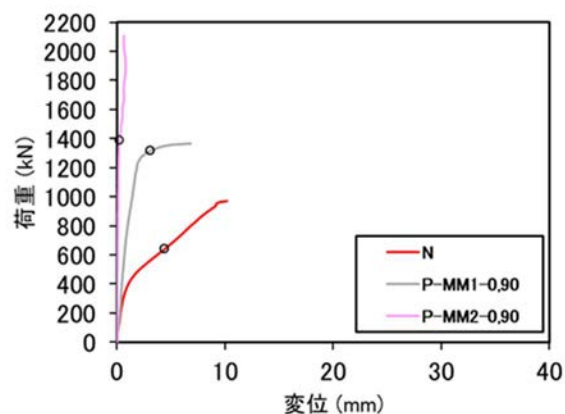


図-20 荷重—面外変位関係（積層数の比較）

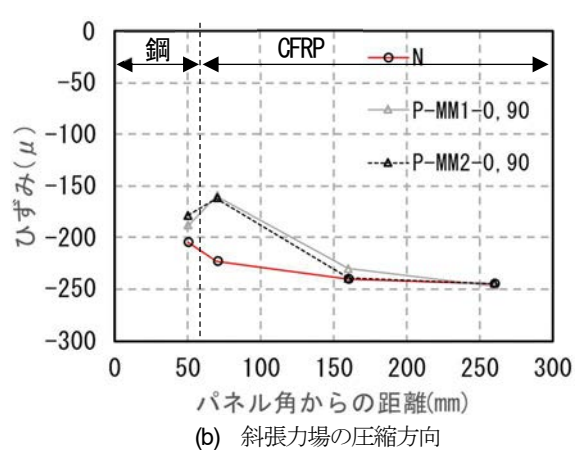
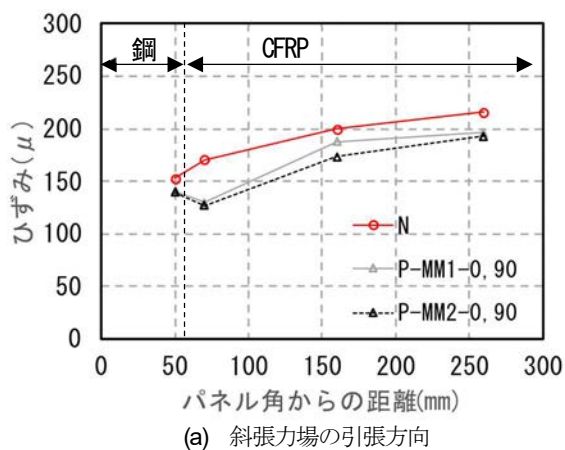


図-21 ひずみ分布（積層数の比較）

6. 繊維方向の影響

本研究では、せん断耐荷力に対して 0° 、 90° 方向貼りケースの中弾性 CFRP スtrandシートで補強しているケースでのみ、積層数をパラメータとしている。

(1) 荷重—鉛直変位関係

図-19 に積層数の比較をしたケースの荷重—鉛直変位関係を示す。初期剛性は、P-MM1-0.90、P-MM2-0.90 で差がなく、ケース N とほぼ同等であることがわかる。積層数が大きくなって初期剛性に差が見られないのは、 0° 、 90° の補強ではせん断剛性が向上しないためと考えられる。P-MM2-0.90 は、鉛直変位が 23mm 程度の大変形時に CFRP のはく離によって耐荷力が急激に低下した。

(2) 荷重—面外変位関係

図-20 に積層数を比較したケースの荷重—面外変位関係を示す。同図より CFRP スtrandシートを 2 層ずつ積層している P-MM2-0.90 は P_d までほとんど面外変形が生じていないことがわかる。積層数を増やすことで面外変形に対する補強効果が大きくなるといえる。

(3) ひずみ伝達

図-4 (a) の”a”部に示した位置の 300 kN 載荷時の対角線方向のひずみ分布を、図-21 に比較して示す。ひずみ伝達における積層数の違いによる差は、ほとんど見られない。



図-22 P-MM2-0.90 の破壊状況

(4) せん断座屈荷重とせん断耐力

P-MM1-0.90 と P-MM2-0.90 で比較すると P_{iy} におけるせん断耐力増加率は P-MM2-0.90 の方が 9% 大きい。一方、 P_u のせん断耐力増加率は 76% 大きい結果となった。2 層ずつ積層している P-MM2-0.90 では P_u まで面外変形が非常に小さく座屈変形を抑制したためテストパネル鋼板のひずみ硬化が顕著に現れたことによるものと考えられる。

(5) 破壊状況

図-22 に P-MM2-0.90 の破壊状況を示す。P-MM1-0.90 と P-MM2-0.90 とともに破壊は、はく離による破壊であり、CFRP のマトリックス樹脂層間のはく離による破壊であった。

7. せん断耐力評価

実験から得られたせん断耐力 V_u の評価に向けて、表-6 に、 V_u を載荷荷重に変換した値である P_u ならびにせん断耐力の計算値である $P_{u,cal}$ を整理した。 V_u は Basler の理論²⁰⁾をもとに計算しており、式(1)の通り V_σ と V_t の 2 項に分けて評価される。右辺第 1 項が弾性座屈強度に、右辺第 2 項が後座屈強度に関する項である。

$$V_u = V_{cr} + V_t \quad (1)$$

CFRP シートによって補強された鋼桁腹板のせん断耐力の評価では、奥山らによって Basler 式を修正した簡易式(2)が提案されており⁹⁾、 $P_{u,cal}$ の計算ではこれを用いた。

$$\frac{V_u}{V_y} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr}/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \left(1 + \frac{E_L \bar{t}_{ct}}{E_s t_s} \right) \quad (2)$$

ここで、 V_y は降伏せん断強度、 τ_y は降伏せん断応力、 E_L は CFRP シートの繊維方向の弾性率、 $\bar{t}_{ct}$ は斜張力場の

引張方向に貼付した CFRP の総厚さ($=2t_{ct}$)、 E_s は腹板鋼板の弾性係数、 t_s は腹板鋼板の板厚である。

斜め 1 方向貼りのケースのうち、C45 シリーズでは CFRP が V_σ に寄与し、 V_t には寄与しないものとする。一方、T45 シリーズでは CFRP が V_σ には寄与せず、 V_t に寄与するものとする。また、 0° 、 90° 方向貼りケースでは、実験結果より面外変形を抑制しているものの、せん断力による腹板内の $\pm 45^\circ$ 方向のひずみを低減できていない。したがって、 V_σ において CFRP がせん断座屈応力 τ_σ には寄与するものの、降伏せん断強度 V_y には寄与せず、さらに後座屈強度 V_t にも寄与しないとして算出した。 V_y の計算では、腹板厚と斜張力場の圧縮側に貼付した CFRP を鋼換算した厚さの和である t_{sc} と鋼板厚と斜張力場の引張側に貼付した CFRP を鋼換算した厚さの和である t_{sa} を用いる。

$$\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_e & (\tau_e \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8\tau_e\tau_y} & (\tau_e > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_e = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_{sc}}{h} \right)^2 \quad (4)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 k_s はせん断座屈係数、 h は腹板高さ、 ν は鋼材のポアソン比である。 0° 、 90° 方向貼りケースでは、CFRP が腹板の座屈のみを抑制するとして、 τ_σ の計算時のみ CFRP を鋼換算して t_{sc} を算出している。

また、表-6 の計算値と実験値を比較すると、P-HSM1-TC45、P-HM1-C45、P-HS1-T45 といったケースでは、両者の差が大きく検討課題である。他ケースでは、両者は比較的近い値を示す。

7. まとめ

本研究では、CFRP スtrandシート の貼付方向やパテ材の有無、CFRP シートの種類などをパラメータとして補強した鋼桁のせん断耐力実験を行った。得られた知見は、以下の通りである。

- テストパネルの $\pm 45^\circ$ 方向に CFRP シートを貼付した TC45 シリーズではせん断耐力について、パテ材有りのケースではパテ材無しのケースよりも耐力が 9% 大きい。耐力に達した後は、CFRP シートの繊維破断や座屈が生じて徐々に荷重が低下する。パテ材無しのケースにおいては FRP スtrandシート と標準の CFRP シートの差はほとんど見られず、

表-6 セン断耐荷力

ケース	実験値	計算値	$P_u/P_{u,cal}$
	P_u kN	$P_{u,cal}$ kN	
N	970	996	0.974
N-HM1-TC45	1496	1615	0.926
P-HM1-TC45	1628	1585	1.027
P-HSM1-TC45	1290	1561	0.826
N-THM2-TC45	1499	1561	0.960
P-HS1-C45	1192	1184	1.007
P-HM1-C45	1233	1487	0.829
P-HS1-T45	1255	1114	1.127
P-HM1-T45	1156	1281	0.902
P-HM1-0,90	1200 (P_{ig})	1176	1.020
P-MM1-0,90	1240 (P_{ig})	1118	1.109
P-MM2-0,90	1330 (P_{ig})	1237	1.075

荷重と鉛直変位の関係において線形域で大きな音を立てて全面ではなく離して耐荷力が急激に低下する。

- (b) 繊維方向が引張方向になるように補強する T45 シリーズより、CFRP シートの繊維方向を斜張力場の圧縮方向に補強する C45 シリーズの方がせん断座屈荷重は向上する。一方で、T45 シリーズはせん断座屈変形が大きくなっても耐荷力が向上して、せん断耐荷力については両者の差は少ない。斜張力場の圧縮方向、引張方向のみに CFRP シートを貼付して補強するよりも両方向に補強した方が、せん断耐荷力が 40%~50%増加する。
- (c) 0° , 90° 方向貼りケースは、 $\pm 45^\circ$ 方向貼りケースと比べて、主ひずみ方向の変形を抑制できないものの、面外変形を抑制してせん断座屈荷重およびせん断耐荷力を向上させることが可能である。
- (d) 0° , 90° 方向貼りケースは腹板の 45° 方向のひずみが降伏ひずみに達する荷重をせん断耐荷力として、計算ではせん断座屈応力のみに CFRP の板厚分を考慮することで簡易式⁹⁾によって一部は実験値と 18%程度の誤差を示し、これについては今後の検討課題であるものの、多くは $\pm 10\%$ 以内でせん断耐荷力評価が可能となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、研究当時、高速道路総合技術研究所の広瀬剛氏、原田拓也氏、日鉄ケミカル&マテリアルの小林朗氏にご指導いただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 松坂敏博，森山陽一，小笹浩司，太田秀樹，藤野陽三，宮川豊章，西村和夫：高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題，土木学会論文集 F4，Vol.73，No.1，pp.1-18，2017.1
- 杉浦江，小林朗，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究，土木学会論文 集，Vol.64，No.4，pp.806-813，2008.11
- 杉浦江，稲葉尚文，小林朗，大垣賀津雄，長井正嗣：鋼部材補修における炭素繊維シートのはく離挙動に関する実験的研究，鋼構造論文集，第 16 巻，第 63 号，pp.87-98，2009.9
- 小林洸貴，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修・補強に関する検討，第 12 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2017.11
- 宮下剛，若林大，秀熊佑哉，小林朗，小出宣央，堀本歴，長井正嗣：高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修，土木学会論文集 F，Vol.71，No.5，pp.Ⅱ 23-38，2015.5
- (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，2013.10
- 服部雅史，広瀬剛，大垣賀津雄，宮下剛，奥山雄介，小林朗，秀熊佑哉：2 軸対称鉄桁の CFRP による曲げ耐荷力補強に関する実験的研究，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第 25 巻，第 99 号，2018.9
- 原田拓也，広瀬剛，大垣賀津雄，宮下剛，奥山雄介，小林朗，秀熊佑哉：1 軸対称鉄桁の CFRP による曲げ耐荷力補強に関する実験的研究，第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.155-162，2018.11
- 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宣央，小林朗，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と強度評価法，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.3，pp.635-654，2012.11
- 田井政行，下里哲弘，高橋鴻，長坂康史：CFRP によるウェブのせん断耐荷力向上メカニズムに関する一考察，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第 25 巻，第 99 号，pp.41-51，2018.9
- 小林洸貴，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，Vol.74，No.5，pp.Ⅱ 44-55，2018.5
- 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宣央，秀熊佑哉，

- 堀本歴，長井正嗣：鋼橋桁端部の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究，構造工学論文集，Vol.58A，pp.710-720，2012.3
- 13) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宣央，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.60A，pp.541-553，2014.3
- 14) 下里哲弘，長坂康史，矢吹哲哉，有住康則：腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する基礎的実験，構造工学論文集，Vol.62A，pp.559-570，2016.3
- 15) 土木学会複合構造委員会：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
- 16) 中井博，総田完治，阪野雅則：プレート・ガーダー端支点上補剛材の耐荷力の実験と解析，構造工学論文集，Vol.32A，pp.399-410，1986.3
- 17) 下里哲弘，玉城喜章，有住康則，矢吹哲哉，小野秀一，三木千壽：実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.70，No.3，pp.359-376，2014.9
- 18) 森脇良一，藤野真之：初期不整を有するプレートガーダーのせん断強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 249 号，pp.41-54，1976
- 19) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005
- 20) Konrad Basler：Strength of Plate Girders in Shear, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp.151-197, 1961.

(Received August 26, 2022)

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR LOAD-CARRYING CAPACITY OF STEEL GIRDER REINFORCED BY CFRP SHEET

Shimpei KIKUCHI, Kazuo OHGAKI, Takeshi MIYASHITA
Yuya HIDEKUMA and Masafumi HATTORI

In recent years, the reinforced concrete slabs of a steel plate girder have been changed through renewal works in expressway companies. Herein, there are cases where the steel girder does not have enough load-carrying capacity and requires reinforcement. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) has attracted attention to the reinforcement of the steel girder due to its acceptable characteristics: lightweight, high strength, and high durability. This study investigates the effect of CFRP reinforcement on load-carrying capacity under shear. A shear buckling test is carried out for steel girders considering several parameters: the type and the direction of the CFRP sheet, the effect of the low elastic putty layer, and the number of CFRP sheets.