

曲げおよびせん断を受ける鋼桁のCFRPシート による補強効果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、高速道路会社等では大規模更新事業として床版取替えを実施している。一方で、鋼桁の耐力不足が懸念されており、鋼桁の補強が必要となる場合がある。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、注目されている。本研究では、曲げとせん断を受ける鋼桁に対して、水平補剛材の有無や CFRP シートの貼付け方向をパラメータとして CFRP 補強を施し、載荷実験を行って補強効果の検討を行った。本文は、曲げとせん断を受ける中間支点部付近の鋼桁に対して CFRP による合理的な補強方法を提示するものである。

Key Words: CFRP sheets, steel girder, flexure-shear interaction, reinforcement method

1. はじめに

道路橋の多くは高度経済成長期に建設されたものであり、経過年数や車両重量の増大などによって健全度の低下がみられる。高速道路会社等ではこれに伴って、床版取替えを実施している¹⁾。鋼橋の床版取替えでは、施工時間短縮などの観点からプレキャスト床版を標準としており、床版の継手構造やB活荷重対応によって床版重量が増加傾向にある。これらのことから、鋼桁の耐力不足が懸念されている。

鋼構造物の補強では、一般に当て板など鋼材を用いて行われるが、供用中や狹隘施工となる場合では軽量で簡便な補強工法が必要となる。近年、鋼構造物の補修・補強においては、炭素繊維シート（以下、CFRP シートと呼ぶ）による補強が注目されている。CFRP シートは鋼材と比較しても、軽量で高強度・高弾性、腐食しないなど補強材料として優位な点が多い。また、CFRP シート

は含浸・接着樹脂を用いて鋼部材に接着するのみなので、重機や特殊技能も不要である。さらに、溶接による入熱やボルト孔の削孔を行うこともないため、上記で述べたような老朽化が進展しているような既設鋼桁の補強には有効であると考えられる²⁾。一方で主な課題として、CFRP シートと鋼材の界面におけるはく離が挙げられる。このため、はく離を抑制するためにいくつかの検討がなされている³⁾⁵⁾。たとえば、文献 3)では宮下らが、CFRP シートと鋼部材の間に CFRP や鋼材と比較して非常に低弾性で伸び率が大きい高伸度弾性パテ材（以下、パテ材と呼ぶ）を挿入して、はく離を抑制している。これを踏まえて、CFRP シートによる補修・補強工法の設計施工マニュアル⁶⁾（以下、現行マニュアルと呼ぶ）がまとめられている。

鋼桁の補修・補強では、いくつかの研究がなされている⁷⁾¹¹⁾。例えば、現行マニュアルの拡張を目的として鋼桁の曲げ耐力に対して CFRP シートによる補強効果に

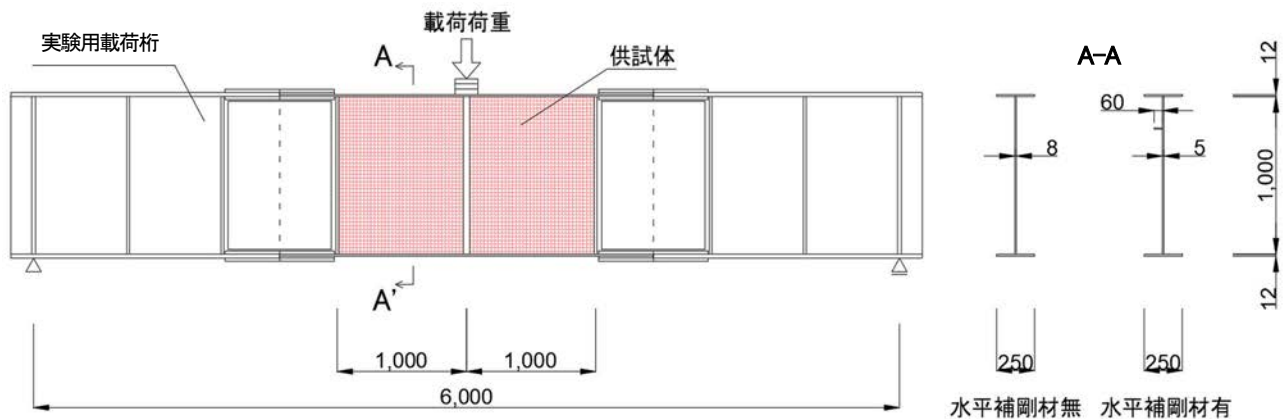


図-1 実験概要

表-1 鋼桁材料特性

項目	弾性率 GPa	降伏点 MPa	引張強度 MPa
フランジ	200	418	548
腹板		410	558
水平補剛材		313	439

表-2 補強材料の材料特性

項目	弾性率 GPa	引張強度 MPa
CFRP シート(高弾性)	654	2485
CFRP シート(中弾性)	427	3925
接着含浸樹脂	3	58
高伸度弾性バテ材	0.059	9

対する実験的研究を行い、その有効性が示されている^{10),11)}。曲げを受ける鋼桁に対して腹板に CFRP シートを水平方向（以下、 0° 方向）と鉛直方向（以下、 90° 方向）に積層することで、腹板の座屈を抑制して曲げ耐力を向上させている。また、せん断耐力に対する補強に対しては、奥山らが鋼桁腹板に $\pm 45^\circ$ 方向に CFRP シートを貼付することで補強効果を確認している¹²⁾。一方で、連続鋼桁橋の中間支点部のような曲げモーメントとせん断力が負荷されるような箇所での検討はほとんどされていない。このような箇所における CFRP シートによる補強では曲げに対して 0° 方向と 90° 方向、せん断に対して $\pm 45^\circ$ 方向に CFRP シートを貼付して補強すると施工の際に煩雑となる恐れがある。これに伴って、筆者らは先行研究として鋼桁に対して、 0° 、 90° 方向に CFRP シート貼付補強を実施してせん断力が卓越するような载荷実験を行い、補強効果を確認している¹³⁾。

これらの鋼桁の CFRP シートの補強効果の確認実験結果から、補強する際にはく離対策としてバテ材を挿入して CFRP シートを貼付している。本研究では中間支点部のような曲げモーメントとせん断力が同時に負荷されるような鋼桁に対して、CFRP シート貼付による鋼桁腹板の補強効果について実験的な検討を行った。

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

腹板および曲げ圧縮側フランジに CFRP シート貼付による補強を施した供試体に対して、3 点曲げ载荷によって曲げモーメントとせん断力を負荷する。中間支点部付近では鋼桁下部が圧縮側となるが、本実験では鋼桁の上下を逆転させて実験を行った。供試体は、実験用载荷桁に高力ボルト継手によって接合しており、各実験ケースが終了するごとに取替えられるよう製作した。载荷実験は、最大荷重まで漸増させ、最大荷重以降は変位制御によって载荷した。

(2) 供試体

本実験では、支間長 35m 程度の鋼連続桁橋の中間支点部の桁断面を想定しており、供試体では想定した鋼連続桁橋断面の寸法 1/2 断面模型とした。本供試体鋼桁の材料特性を表-1に示す。供試体鋼桁の腹板および曲げ圧縮側フランジに CFRP シートによる補強を施した。実験ケースは、水平補剛材の有無、CFRP シートによる補強方法を変化させて、6 ケースの実験を行った。本実験で用いた、CFRP シートおよび接着樹脂の材料特性を表-2に示す。また、本実験供試体パラメータを表-3に示す。CFRP シートによるせん断補強では、文献 13)のせん断载荷実験で 0° 、 90° 方向に CFRP シートを貼付した場合でも補強効果が確認されたため、せん断補強として供試体腹板全面に 0° 、 90° 方向で補強したケース、既存の考え方に従ってせん断に対して $\pm 45^\circ$ で 2 方向の積層を 1 層として片面 2 層ずつ補強したケースとしている。また、曲げ補強ではすべての補強ケースで腹板に 0° 、 90° 方向で中立軸まで補強し、ケース H4 に関しては圧縮フラン

表-3 供試体パラメータ

名 称	水平補 剛材	CFRP シート補強方法*				幅厚比パラメータ			
		腹板				圧縮 フランジ	圧縮フランジ R_f	腹板 R_w	
		曲げ		せん断					
H1	有	無		無		無	0.768	1.948	
H2		中 弾 性	0°、90° 12 層**	高 弾 性	±45° 2 層**			0.766	
H3				中 弾 性	0°、90° 10 層**				0°、90° 2 層**
H4									
N1	無	無		無		無	0.768	1.218	
N2		中 弾 性	0°、90° 5 層**	中 弾 性	0°、90° 2 層**			0.779	

*腹板補強に関して、曲げ補強範囲は中立軸までとし、せん断補強範囲では腹板全面とした。

**片側層数

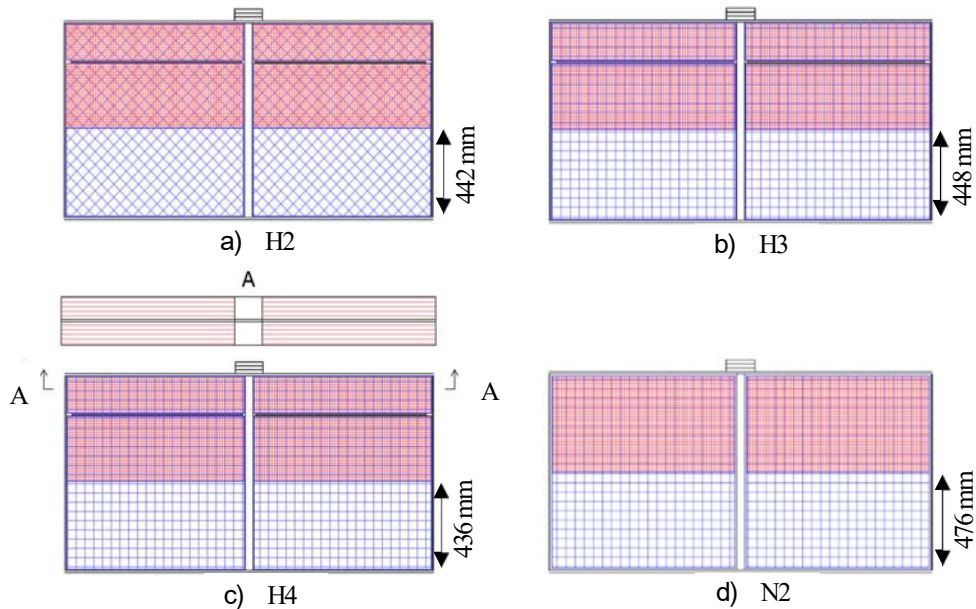


図-2 補強方法

ジも軸方向に補強した。

局部座屈による強度低下が少ない領域まで補強するため、圧縮フランジでは幅厚比パラメータ R_f が 0.7 以下とし、腹板では幅厚比パラメータ R_w が 0.8 以下を目指して CFRP シートの積層数を決定した。N2 ケースでは、せん断補強として全面に 0°、90° 方向で貼付した CFRP シートも曲げ補強に寄与すると考え、H3 ケースでは H2 よりも腹板の曲げ補強層数を 2 層減らしている。各ケースの CFRP シートの補強方法を図-2 に示す。また、計測位置図を図-3 に示す。

3. 実験結果

(1) 鉛直変位

図-4 に荷重と鉛直変位の関係を示す。縦軸は載荷荷重、

横軸は載荷点直下の下フランジの鉛直変位を示す。

また、それぞれのケースの線形弾性計算値を破線で併記し、無補強ケースの初期降伏荷重と全塑性荷重についても併記している。ここで初期降伏荷重および全塑性荷重は、曲げモーメント分布がパネル内で変化するため、等曲げモーメント換算位置を用いた。

水平補剛材がある H ケースでは、補強したケース H2、H3、H4 は無補強ケース H1 の初期降伏荷重を超え、H2、H3 は全塑性荷重近くまで耐力が上昇し、H4 は全塑性荷重を超えている。H1 はフランジ降伏よりもフランジ、腹板の座屈が先行するスレンダー断面であるが、H2、H3 ではフランジの降伏が先行するノンコンパクト断面相当に、H4 ではコンパクト断面相当の耐力まで補強できたといえる。H2、H3、H4 ケースでは、初期降伏荷重まではほぼ同様の曲線になり、圧縮フランジを補強したケース H4 は初期降伏荷重後、H2、H3 よりも変形が小さ

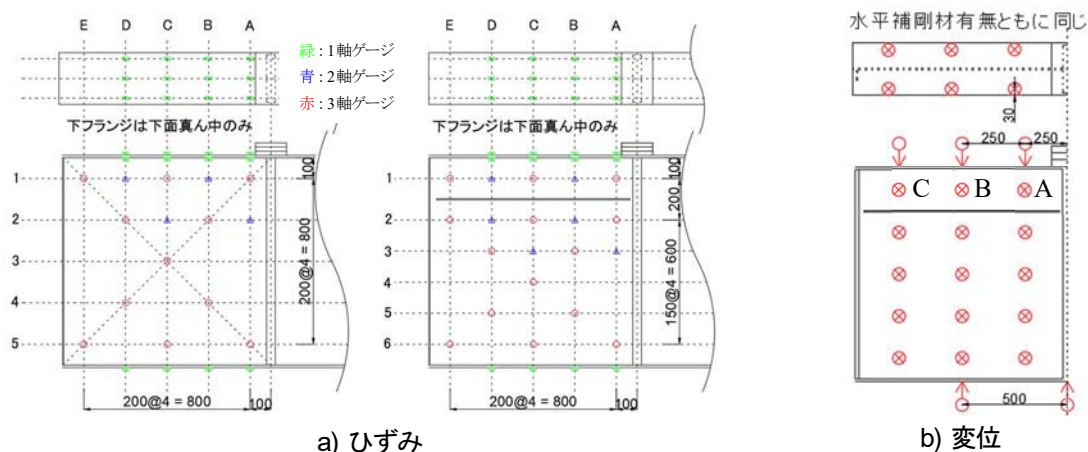


図-3 計測位置

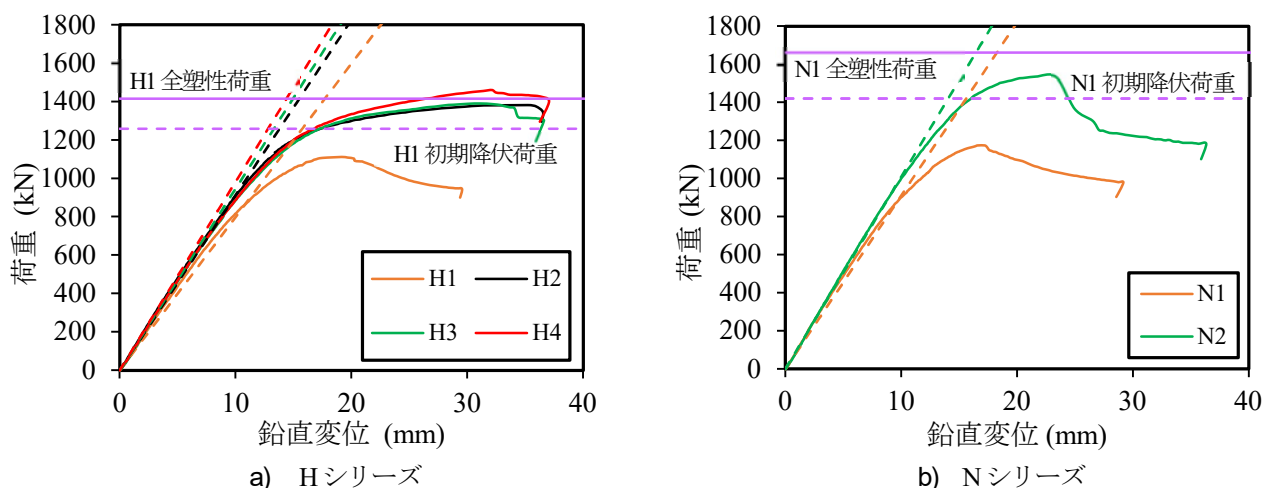


図-4 荷重と鉛直変位の関係

く、最大荷重は大きくなった。また、Nシリーズでも H シリーズと同様に水平補剛材がない N1 の初期降伏荷重を超えるまで補強できたことが確認できる。

(2) 面外変位

図-5に荷重と各ケースの耐力までの面外変位の関係を示す。縦軸は載荷荷重であり、横軸は座屈変形が大きかった側の図-3に示す変位計測位置のB列の面外変位である。

無補強ケースであるH1やN1では、初期降伏荷重よりも低い荷重で、弾性座屈による面外変形が急激に大きくなっているのに対して、Hシリーズ、Nシリーズともに補強したケースでは、それぞれ無補強ケースの初期降伏荷重程度まで面外変形を抑制していることがわかる。また、補強したケースでは耐力力近くまで面外変位量がほとんど発生していないことがわかる。

(3) 主ひずみ分布

図-6, 7に腹板の座屈時の主ひずみ分布、耐力時の主ひずみ分布を示す。Hシリーズにおいて、補強したケースを見るとせん断に対して全面 $\pm 45^\circ$ 方向にCFRPシートを貼付しているH2は、終局段階においても鋼桁の

補強後中立軸までの曲げ圧縮側の主ひずみを低減している。一方で、曲げ引張側ではH3やH4よりも主ひずみが大きくなっていることがわかる。また、曲げ引張側の主ひずみの角度が桁軸方向の 0° 方向に近くなっている。これは、 $\pm 45^\circ$ 方向にCFRPシートを貼付しているため 0° 方向の引張力に対してほぼ効果がないためであると考えられる。反対にH3, H4では中立軸付近の約 $\pm 45^\circ$ 方向の主ひずみが大きくなっている。これは、せん断に対して $0^\circ, 90^\circ$ 方向にCFRPシートを貼付しているためせん断による斜め方向のひずみを抑制できないことによるものと考えられる。

Nシリーズにおいては、Hシリーズよりも主ひずみが小さい値であるが、これは水平補剛材を設置していないので腹板厚が大きくなっていることによる。

(4) 耐力力

表-4に各ケースの腹板座屈荷重および耐力力を示す。本研究では、図-8に示す通り、腹板の座屈した箇所付近の面外変位を2乗することにより座屈荷重を算定しており、図-8に荷重と面外変位の2乗の関係を示す。

補強していない水平補剛材有ケースH1では、腹板座屈荷重(959kN)と耐力力(1113kN)の差が154kNと大きく離

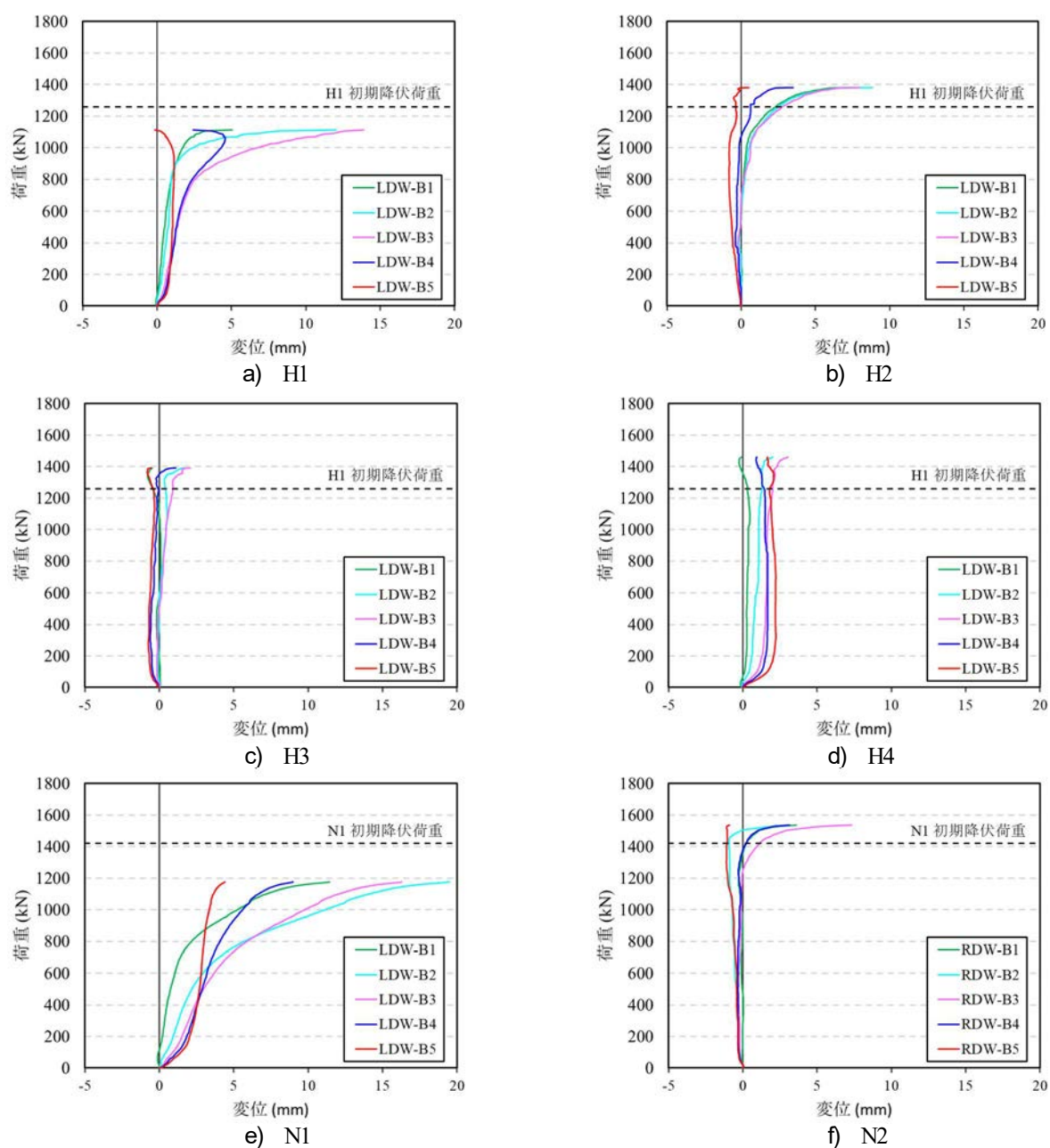


図-5 荷重と面外変位の関係

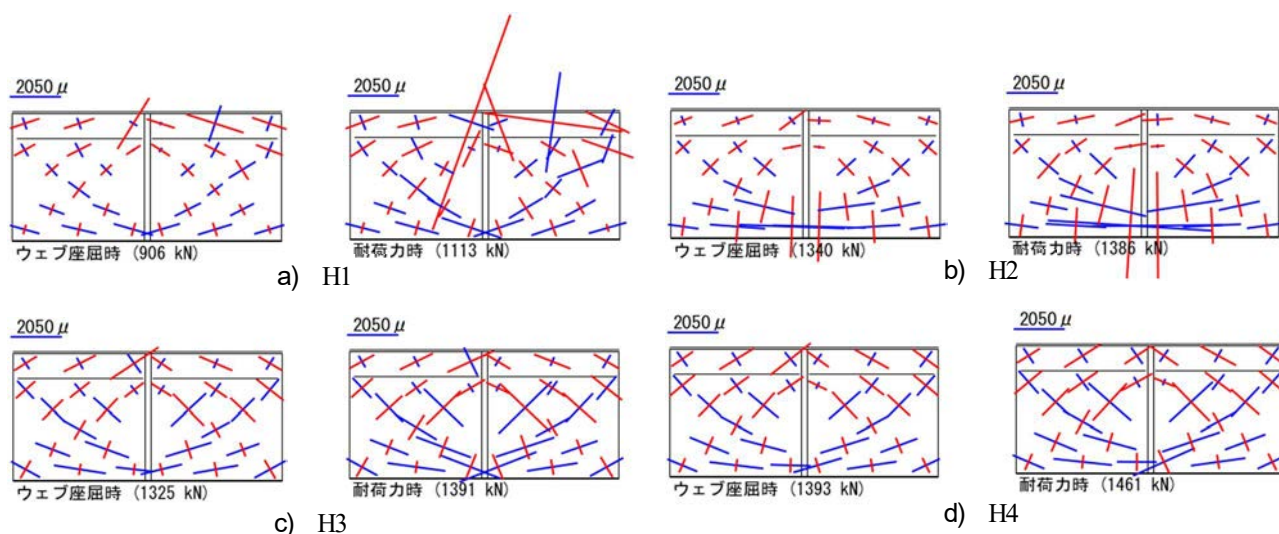


図-6 H シリーズの主ひずみ分

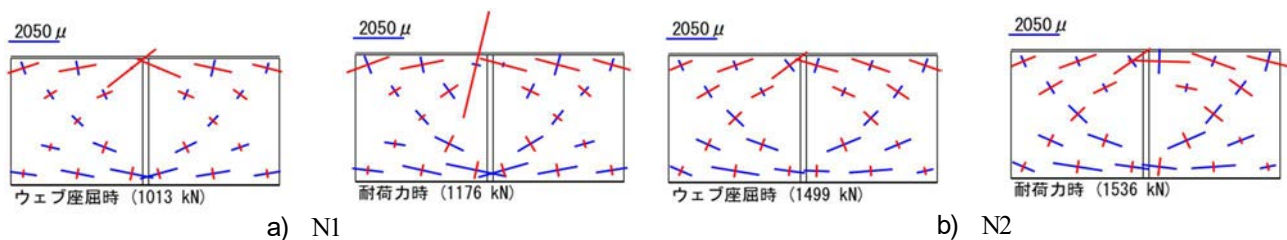


図-7 N シリーズの主ひずみ分

表-4 腹板座屈荷重と耐力力

ケース名	腹板座屈荷重	耐力力	$P_{wr}/P_{wr_H1/N1}$	$P_u/P_{u_H1/N1}$
	P_{wr} kN	P_u kN		
H1	959	1113	1.00	1.00
H2	1311	1386	1.37	1.25
H3	1327	1391	1.38	1.25
H4	1379	1461	1.44	1.31
N1	848	1176	1.00	1.00
N2	1490	1538	1.76	1.31

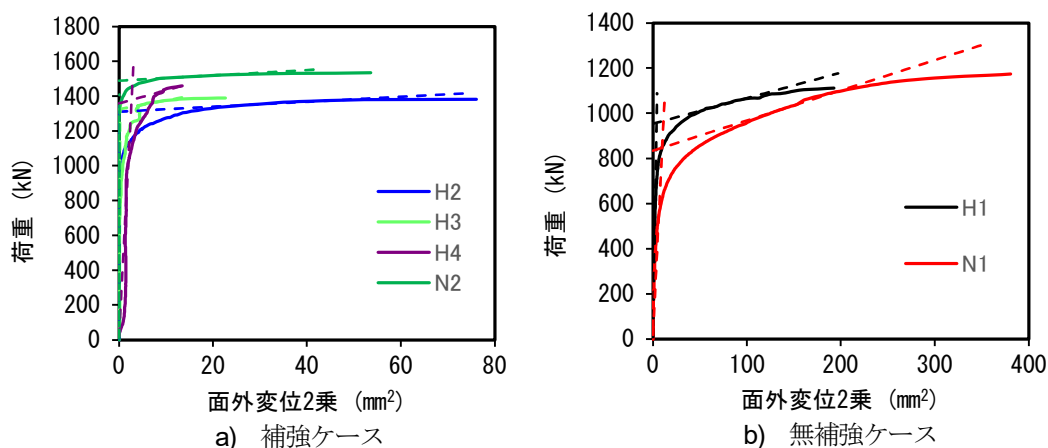


図-8 腹板座屈判定 (荷重と面外変位 2 乗関係)

れているものの、補強したケースでは腹板の座屈荷重 (H2: 1311 kN, H3: 1327 kN, H4: 1379 kN) と耐力力 (H2: 1386 kN, H3: 1391 kN, H4: 1461 kN) の差が 60 kN～80 kN まで小さくなっており、腹板を補強して座屈を抑制したことで後座屈強度が減少していることがわかる。

H2 と H3 を比較すると、せん断に対して CFRP シートを ±45° 方向で補強して、0°、90° 方向の補強を H3 とほぼ同様に 12 層補強している H2 の方が、H3 よりも補強効果が向上することが考えられたが、それぞれの耐力力増加率が無補強に対して 24.5 % (1386 kN) と 25.0 % (1391 kN) とほぼ同等となった。これは、本実験では、H2 と H3 は双方ともに耐力力付近まで腹板が座屈していないことや座屈後も耐力力までの腹板の面外変形が小さいことから、耐力力に対して腹板の面外変形の影響が小さくなり、補強されていない圧縮フランジの局部座屈が終局強度を支配したためと考えられる。

また、H3 と H4 を比較すると圧縮フランジを補強している H4 のほうが H3 よりも耐力力が 6 % 増加して 1,461 kN となっている。さらに H4 のほうが H2 と H3 よりも腹板の座屈荷重が増加しており、H2 と H3 は圧縮フランジの塑性や局部座屈の影響により、腹板の座屈荷重が低下していると考えられる。

(5) 破壊状況

図-9 に各供試体ケースの破壊状況を示す。圧縮フランジの座屈部は赤線、腹板座屈部は青線、CFRP シートの離れはピンク線、CFRP シートの破断は黄緑線で示している。H シリーズの CFRP シートで補強したケースでは、腹板圧縮側の載荷点垂直補剛材近傍ではなく離れが観察された。図-10 に腹板の載荷点角で見られた CFRP シートの座屈破断状況を示す。これは終局段階で、供試体圧縮フランジの局所的な変形が大きくなり圧縮フランジと

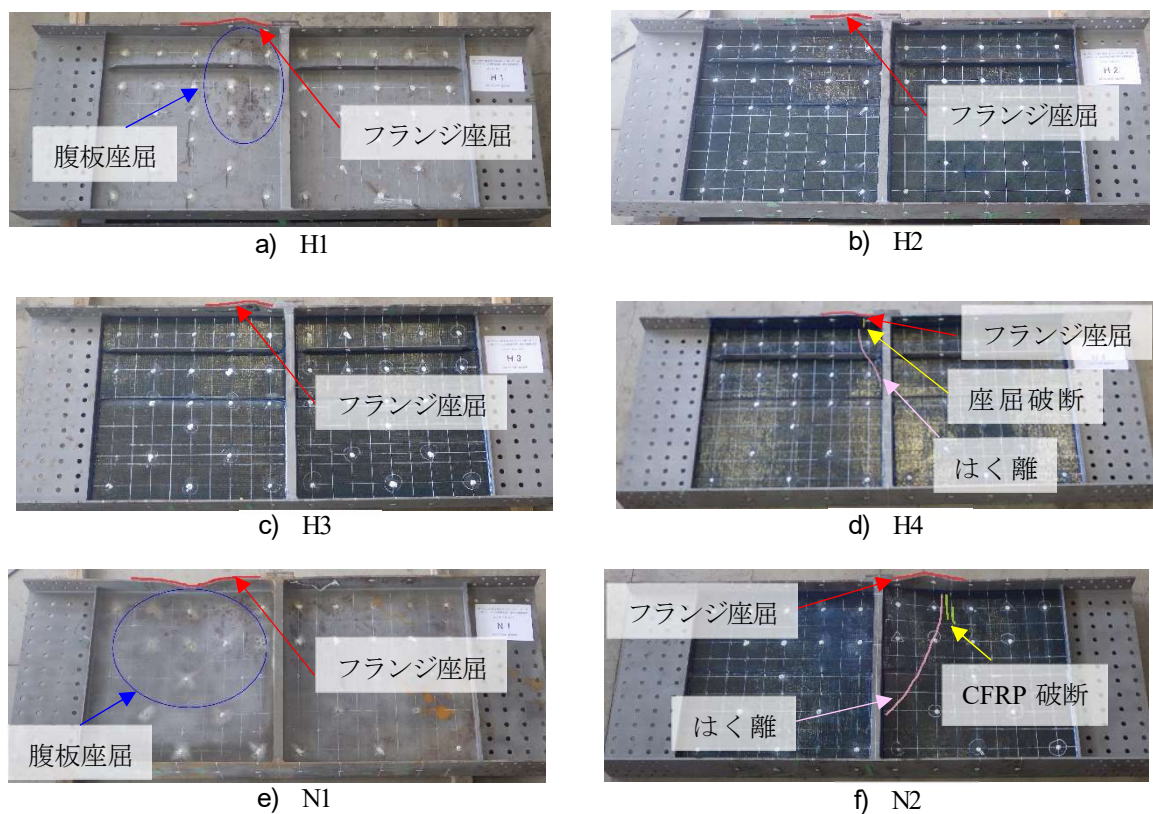


図-9 破壊状況

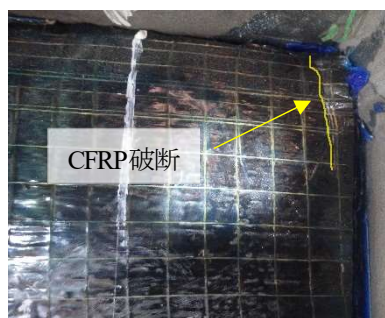


図-10 パネル角載荷点部近傍の CFRP の座屈破壊

CFRP が接触し、直接 CFRP に力が加えられたためと考えられる。

N2 ケースでは図-9f) に示す通り、はく離や座屈による CFRP の破断も観察されており、座屈による破断部付近における腹板の変形が大きいことが確認できる。また、N1 ケースと N2 ケースで圧縮フランジの座屈箇所が変化しており、N1 では左側パネルの中央部近傍で圧縮フランジの変形が最も大きいものに対して N2 では H シリーズのように載荷点近傍で変形が大きいことがわかる。

4. 耐荷力評価

本研究では、文献 14) をもとに耐荷力評価を行った。耐荷力計算結果を表-5 に示す。また、補強したケースの耐荷力計算値と実験値の比較を図-11 に示す。

表-5 耐荷力計算結果

ケース名	耐荷力実験値 $P_{u,exp}$ (kN)	耐荷力計算値 $P_{u,cal}$ (kN)	実験値/計算値 $P_{u,exp}/P_{u,cal}$
H1	1113	1187	0.94
H2	1386	1569	0.88
H3	1391	1476	0.94
H4	1461	1537	0.95
N1	1176	1300	0.90
N2	1538	1477	1.04

文献 14) の方法は、鋼桁を対象に曲げ耐荷力について各構成要素ごと（フランジ、腹板）に強度を算出して、それらの強度を足し合わせる評価式である。

$$M_{ult} = M_{uf} + M_{uwc} + M_{fl} + M_{uwt} \quad (1)$$

ここで、 M_{ult} は終局曲げモーメント、 M_{uf} は圧縮側フランジの曲げモーメント、 M_{uwc} は圧縮側腹板の曲げモーメント、 M_{fl} は終局曲げ強度時の引張側フランジの分担曲げモーメント、 M_{uwt} は終局曲げ強度時の引張側腹板の分担曲げモーメントである。本検討では、幅厚比パラメータは簡便のため $0^\circ, 90^\circ$ 方向に貼り付けた CFRP シートが腹板全面に貼付されているとして計算を行う。CFRP シートは、鋼換算厚さとして補強前の鋼桁の腹板厚に足し合わせた断面と仮定して算出した。詳しい算定方法は付録を参照されたい。さらに局部座屈強度と部材

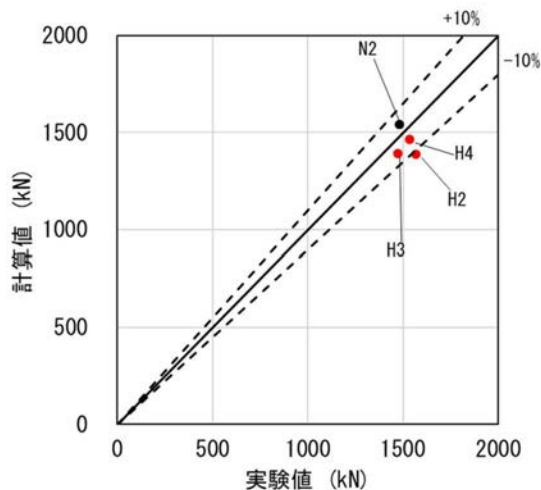


図-11 補強ケースの計算値と実験値の比較

座屈の連成座屈強度については文献 14)同様、Perry-Robertson 型の強度低減係数で評価する。

せん断耐力は、せん断補強として $\pm 45^\circ$ 方向に CFRP シートを貼付した H2 ケースでは文献 12)で奥山らが提案している簡易式により算定し、せん断補強として $0^\circ, 90^\circ$ 方向に CFRP シートを貼付している H3, H4, N2 ケースについては筆者らが先行研究としてせん断の補強に対して $0^\circ, 90^\circ$ 方向補強に関する実験を実施しており、せん断耐力評価を検討している¹³⁾。文献 13)では、奥山らによって提案されている Basler 式¹⁵⁾を変形させた簡易式¹²⁾をもとに評価している。本研究においても文献 13)を踏襲してせん断耐力を評価する。

せん断耐力算定の際はせん断補強として全面に貼付した CFRP シート分のみがせん断補強として寄与するものとして計算した。

曲げ耐力とせん断耐力の相関強度には以下に示す 4 乗則で評価する。

$$\left(\frac{M}{M_{ult}}\right)^4 + \left(\frac{V}{V_{ult}}\right)^4 = 1 \quad (2)$$

ここで、 M は供試体に作用する曲げモーメント、ただし供試体パネル内の曲げモーメントは変化するのでパネル内の曲げモーメント分布重心位置における値を採用した。 M_{ult} は終局曲げモーメントである。 V は供試体パネルに作用するせん断力、 V_{ult} は終局せん断力である。

表-5 の計算結果をみると H シリーズ、N シリーズともに誤差 10 %以内であり、耐力の評価が可能であることがわかる。

5. まとめ

本稿では、曲げとせん断を受ける中間支点部を想定して、水平補剛材の有無や CFRP シートの貼付方向などをパラメータとして CFRP シートの補強効果の検討を行った。

以下に得られた知見を記す。

1. CFRP シート厚さを鋼換算厚さとして、幅厚比パラメータを座屈強度低減がないよう CFRP シート積層数を設定して腹板に貼付することで、腹板の面外変形を抑制し、スレンダー断面の無補強ケースと比較して、補強ケースではノンコンパクト断面相当まで耐力向上させることができた。
2. せん断に対して、CFRP シートを $\pm 45^\circ$ 方向に貼付した場合と CFRP シートを $0^\circ, 90^\circ$ 方向で貼付した場合には、本検討の鋼桁の範囲ではどちらも同等の補強効果が発揮され、曲げとせん断の相関による強度低下は見られず、曲げとせん断を受けるような中間支点部において $0^\circ, 90^\circ$ 方向補強のみでも有効であることがわかった。
3. 本研究では、圧縮フランジを補強したケース H4 では圧縮フランジを補強していないケース H3 で初期剛性に差は見られなかったものの、耐力が 6 %程度大きくなった。
4. CFRP シートの厚さを鋼換算厚さとして鋼桁断面に加えることとして、文献 14)の式で評価すると H2 のケースで誤差が 12 %程度あり、検討課題が残るものの、他ケースでは誤差 10 %以内で評価が可能であるといえる。

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。また、ものづくり大学大学院の下前照氏に実験棟の協力をいただきました。ここに感謝いたします。

付録 曲げ耐力評価式

第 4 章で使用した西村らによる評価式（以下、西村式と呼ぶ）を以下に示す。西村式は図-A1 に示すように曲げによる応力分布を仮定することで鋼桁の曲げ耐力を算出している。

1) フランジ座屈強度

$$\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_{Yuf}} = \begin{cases} 1.0 & (R_f \leq 0.7) \\ \left(\frac{0.7}{R_f}\right)^{0.64} & (R_f > 0.7) \end{cases} \quad (A1)$$

ここで、 σ_{uf} はフランジ座屈強度、 σ_{Yuf} はフランジ降伏応力である。 R_f は以下で計算される。

$$R_f = \frac{b_{fu}}{2t_{fu,c}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_{Yuf}}{k_c\pi^2 E}} \quad (A2)$$

b_{fu} はフランジ全幅、 $t_{fu,c}$ はフランジの CFRP シート鋼換算厚さと鋼板厚さの合成厚さ、 k_c は軸方向圧縮における座屈係数で本検討では 0.425、 E は鋼弾性係数、 ν は鋼ポアソン比である。

2) 腹板座屈強度

$$\frac{\sigma_{uw}}{\sigma_{Yw}} = \begin{cases} 1.0 & (R_w \leq 1.0) \\ \left(\frac{1.0}{R_w}\right)^{0.72} & (R_w > 1.0) \end{cases} \quad (A3)$$

ここに、 σ_{uw} は腹板座屈強度、 σ_{Yw} は腹板降伏応力である。 R_w は以下で計算される。

$$R_w = \frac{b_w}{t_{w,c}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_{Yw}}{k_b\pi^2 E}} \quad (A4)$$

b_w は、垂直補剛材間の腹板幅、 $t_{w,c}$ は腹板の CFRP シート鋼換算厚さと鋼板厚さの合成厚さ、 k_b は曲げに対する座屈係数である¹⁷⁾。

3) 曲げ耐力

水平補剛材がない場合

$$M_{ult} = M_{fu} + M_{uwc} + M_{fl} + M_{uwt} \quad (A5)$$

水平補剛材が 1 段の場合

$$M_{ult} = M_{fu} + M_{uw1} + M_{uw} + M_{fl} + M_{uwt} \quad (A6)$$

ここで、

$$M_{fu} = \sigma_{uf} A_{fu} \left(e_{yu} - \frac{t_{fu,c}}{2} \right) \quad (A7)$$

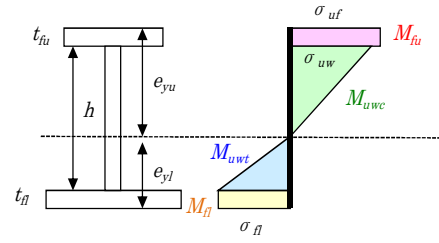
$$M_{uwc} = \frac{1}{3} C_{rw} \sigma_{uw} A_{w,c} \frac{(e_{yu} - t_{fu,c})^2}{h} \quad (A8)$$

$$M_{uwt} = \frac{1}{3} \sigma_{fl} A_{w,c} \frac{(e_{yl} - t_{fl})^2}{h} \quad (A9)$$

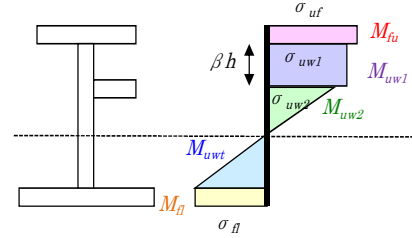
$$M_{fl} = \sigma_{fl} A_{fl} \left(e_{yl} - \frac{t_{fl}}{2} \right) \quad (A10)$$

$$M_{uw1} = C_{rw} \sigma_{uw1} A_{w,c} \beta \left(e_{yu} - t_{fu,c} - \frac{\beta h}{2} \right) \quad (A11)$$

$$M_{uw2} = C_{rw2} \sigma_{uw2} A_{w,c} \beta \frac{(e_{yu} - t_{fu,c} - \beta h)^2}{h} \quad (A12)$$



a) 水平補剛材なしの場合



b) 水平補剛材 1 段の場合

図-A1 終局状態における曲げ応力分布

ここに、 $A_{fu,c}$ は圧縮フランジの補強後の合成断面積、 $A_{fu,w}$ は腹板の補強後の合成断面積、 A_{fl} は引張フランジの断面積、 σ_{fl} は引張フランジの限界応力度である。そして、 C_{rw} は圧縮側フランジと腹板の耐力力ピークの発現時期にかかわる補正係数となるが、以下で算出される。水平補剛材が 1 段の場合は、 C_{rw} を圧縮側腹板の上段と下段で分けて計算する。

$$C_{rw} = \begin{cases} 1.0 & (R_f R_w \leq 1.0) \\ \left(\frac{1.0}{R_f R_w}\right)^{-0.5} & (R_f R_w > 1.0) \end{cases} \quad (A13)$$

参考文献

- 1) 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.1，1-18，2017.1
- 2) 大垣賀津雄：既設合成桁の床版取替えにおける設計・施工上の課題について，道路橋床版シンポジウム論文報告集，第 10 回，pp291-300，2018.11
- 3) 宮下剛，若林大，秀熊佑哉，小林朗，小出宜央，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-Ⅱ_38，2015.5
- 4) 石川敏之，大倉一郎，西田貴裕，横田季彦，斉藤誠：CFRP 板付着近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減，構造工学論文集論文集，Vol.54A，pp842-849，2008.3 ジウム，2017.11
- 5) 石川敏之，大倉一郎，小村啓太：CFRP 板の端部に段差を設けることによるはく離荷重上昇の理論解析，土木学会論文集 A，Vol.65，No.2，pp362-367，2009
- 6) (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

- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 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 軸対称鋼桁の 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
- 11) 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 軸対称鋼桁の CFRP による曲げ耐荷力補強に関する実験的研究, FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 第 7 回, pp155-162, 2018.11
- 12) 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, 635-654, 2012.11
- 13) 菊地新平, 大垣賀津雄, 宮下剛, 奥山雄介, 小林朗, 秀熊佑哉, 原田拓也: CFRP シートによる腹板の補強方 法をパラメータとしたせん断耐荷力に関する実験的研究, FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 第 9 回, [投 稿中]
- 14) 西村宣男, 玉田和也, 小野潔: 鋼桁橋を対象とした強度 設計の性能規定化, 構造工学論文 集, Vol.53A, pp87-96, 2007.3
- 15) Basler, K.: Strength of plate girders in shear, Journal of the Structural Division, Proceedinf of the American Society of Civil Engineers, pp.151-197, 1961
- 16) (一社)日本橋梁建設協会: デザインデータブック, 2016
- 17) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 2005

(Received August 26, 2022)

EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCING EFFECTS OF CFRP SHEETS ON STEEL GIRDERS SUBJECTED TO BENDING AND SHEAR

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 reinforcement is required. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) has attracted attention to the reinforcement of the steel girder due to its acceptable characteristics: light weight, high strength, and high durability. This study investigates the effect of CFRP reinforcement on load-carrying capacity under bending moment and shear force. A buckling test is carried out for steel girders considering several parameters: the direction of the CFRP sheet and the presence of horizontal stiffeners. As a result, it is shown that CFRP sheets make it possible to reinforce steel girders at 0° and 90°.