

中弾性CFRP成型板を用いたI型断面鋼桁の上フランジ補強に関する研究

櫻井 俊太¹・秀熊 佑哉²・後藤 七海³
PHAM NGOC VHIH⁴・大垣 賀津雄⁵

¹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1-13-1)
E-mail:sakurai.sh.msu@nscm.nipponsteel.com

²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1-13-1)
E-mail:hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

³学生会員 ものづくり大学 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷333)
E-mail: b01912073@iot.ac.jp

⁴正会員 ものづくり大学特任講師 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷333)
E-mail:pvninh@iot.ac.jp

⁵正会員 ものづくり大学教授 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷333)
E-mail:ohgaki@iot.ac.jp

現在、床版を取替える等の大規模更新事業が進められており、鋼桁補強の需要が増加している。しかし、上フランジの補強には上面に床版があるため、上フランジ下面から補強を行う必要がある。近年、炭素繊維を用いた補強工法が行われているが、上フランジ下面には垂直補剛材が設置されており、炭素繊維を桁軸方向に連続して貼ることができない。そこで本研究では、中弾性型CFRP成型板を用いて、垂直補剛材が設置されている箇所においても上フランジ下面から補強できる工法を提案し、提案した工法で補強したI型断面の鋼桁供試体について、4点曲げ試験を行った。試験は正曲げ試験および負曲げ試験を行い、補強効果の検討を行った。その結果、両試験ともに垂直補剛材がある箇所においても上フランジの応力を低減する効果が確認された。

Key Words: *medium modulus CFRP molded plate, steel girder, upper flange, bond, reinforcement*

1. はじめに

現在、高速道路リニューアルプロジェクトの一環として、床版取替え等の大規模更新工事等が進められている。その際、床版を取替えることによって、既設鋼桁の耐荷力が不足する場合がある。既設鋼桁の耐荷力が不足する理由には、取替え後の床版による死荷重の増加、竣工時点の設計活荷重からB活荷重への引き上げ、合成桁から非合成桁となる構造上の変化等が挙げられる。そのため、既設鋼桁の補強に対する需要は今後増加することが考えられる。

既設鋼桁の耐荷力が不足する場合の補強工法として、鋼板当て板工法^{2,3)}があるが、当て板工法は補強後の死荷重の増加が大きいこと、ボルト孔をあけることによる既設鋼桁の断面減少等の問題点を有している。今日、鋼桁

の補修・補強工法として軽量で剛性が高い炭素繊維シートを現場で含浸接着する工法が適用されている^{4,6)}。炭素繊維は鋼材より軽量であるため、補強後の死荷重増加が少ない。また、樹脂を用いて既設鋼桁に接着するため、特殊工等の必要がなく施工が容易、ボルト孔をあける必要がなく既設鋼桁の断面減少が生じないという利点がある。しかし、鋼桁補強において、上フランジを補強する必要がある場合には、上フランジ上面に床版があるため炭素繊維を上フランジ下面に接着して補強する必要があるが、上フランジ下面には垂直補剛材が設置されているため炭素繊維を桁軸方向に連続して貼ることができない。

著者らは、炭素繊維を用いて上フランジを下面から補強できる工法として、図-1に示すような、垂直補剛材をかかわすための切欠きがある炭素繊維成型板（以下、CFRP成型板という）を既設鋼桁に接着する鋼桁補強工

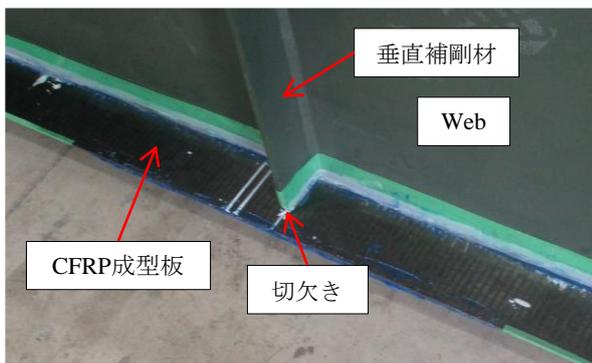


図-1 切欠きがあるCFRP成型板補強概要



図-2 CFバイパス工法概要

表-1 中弾性型炭素繊維シートの特長値

	繊維目付 (g/m ²)	設計厚 (mm)	弾性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
炭素繊維シート	307	0.165	427,000	3,925
炭素繊維ストランドシート	725	0.385	430,000	4,150

表-2 使用樹脂の材料特性値

樹脂	弾性係数 (N/mm ²)	備考
エポキシ系樹脂	2,860	CFRP成型板マトリックス樹脂
ポリウレタ樹脂	74	高伸度弾性パテ
エポキシ樹脂	2,830	接着樹脂

表-3 供試体一覧

供試体名	曲げモード	補強	
		上フランジ	下フランジ
N2	-	無	無
P-UL-MM	正曲げ	CFRP成型板	シート
N-UL-MM	負曲げ	シート	CFRP成型板

法を提案した⁷⁾。しかし、CFRP成型板のはく離耐力および圧縮耐力に課題が残る結果となった。

そこで本研究では、既往の研究⁷⁾で用いた高弾性型の炭素繊維より強度の高い中弾性型の炭素繊維を用いてCFRP成型板を製作し、既往の研究⁷⁾で検討された接着方法でCFRP成型板を接着して補強した鋼桁供試体の4点曲げ試験を行い、補強効果の検討を行った。

さらに、フランジに一方向CFRP成型板を設置し、垂直補剛材がある箇所は垂直補剛材をかわす形状のCFRP成型板部材（以下、バイパス部材という）をCFRP成型板に接着し、応力がバイパス部材を通じて鋼桁軸方向に伝達され補強する工法（以下、CFバイパス工法という）を新たに提案する。ここで、本工法の概要を図-2に示す。本工法においても、補強効果を検討するため本工法で補強した鋼桁供試体の4点曲げ試験を行った。

2. 使用材料

本試験に用いた材料特性値を表-1、表-2に示す。本実験で用いた炭素繊維および、CFRP成型板の接着に用いる樹脂は既存のマニュアル⁸⁾に記載されている材料である。炭素繊維は中弾性型炭素繊維シートおよびストランドシートを用いた。本材料は既往の研究⁷⁾で用いた高弾

性型炭素繊維シート（弾性係数：674,000N/mm²、引張強度：2,848N/mm²）より、弾性係数は低いが、引張強度が高い材料である。CFRP成型板のマトリックス樹脂にはエポキシ系樹脂を用い、CFRP成型板の接着は高伸度弾性パテ（ポリウレタ樹脂）およびエポキシ樹脂を使用した。試験に用いた鋼桁供試体の試験パネル部分の鋼材はSS400であり、降伏強度は293N/mm²（試験値）であった。

3. 切欠きのあるCFRP成型板を用いた曲げ試験

(1) 供試体概要

本試験で作製した供試体一覧を表-3に示す。本試験では曲げモードおよび上下フランジの補強の有無をパラメータとした。曲げモードは上フランジが圧縮となる正曲げ試験と、上フランジが引張となる負曲げ試験を行った。負曲げ試験については、供試体を天地反転させ、上フランジが引張となるように载荷した。鋼桁供試体概要を図-3に示す。鋼桁供試体は既往の研究⁷⁾で用いた供試体と同一寸法であり、全長6,300mmとした。また、実橋と同様に一方の面に垂直補剛材および水平補剛材を設置した。試験では中央の試験パネルでの破壊を先行させるため、左右の载荷桁の上下フランジの幅および板厚を大きくした。本試験では両側の载荷桁は転用しており、中央の試験パネルのみ交換しながら試験を行った。

(2) CFRP成型板概要

本試験に用いたCFRP成型板の材料特性値を表-4に示す。表中のCFRP成型板の板厚は実際の測定値であり、測定した板厚と表-1、表-2の値から複合則・積層理論に

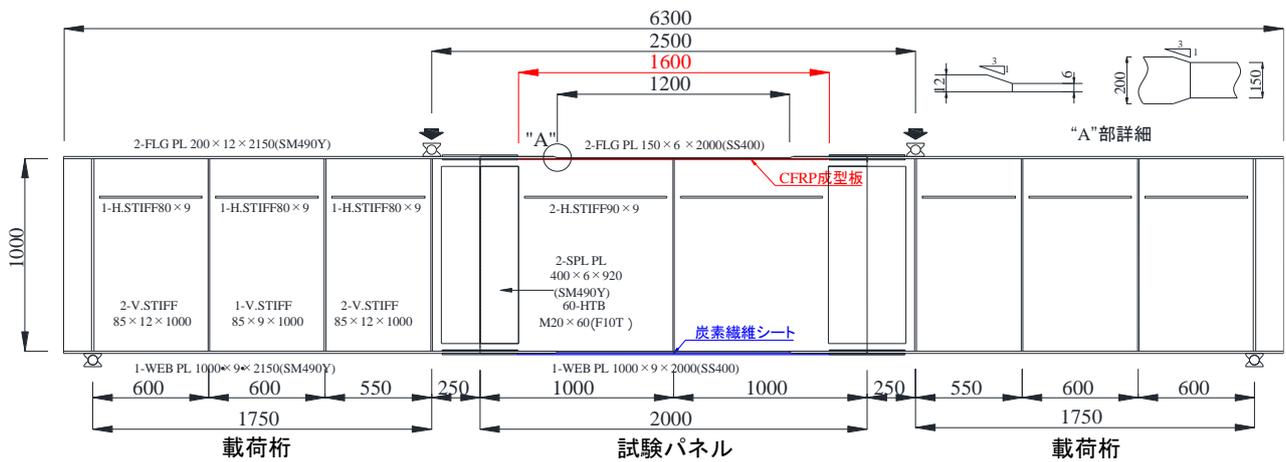


図-3 鋼桁供試体概要 (単位: mm)

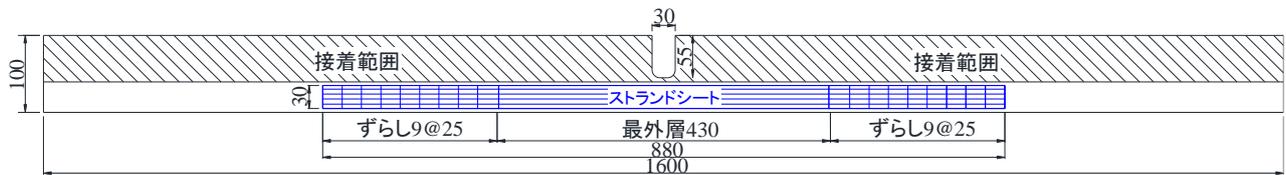


図-4 中弾性CFRP成型板形状 (単位: mm)

表-4 CFRP成型板の材料特性値

	積層数	厚さ (mm)	繊維体積含有率 V_f	軸方向弾性係数 (N/mm ²)
CFRP成型板	[0°/±45°/0°] ₆ (対称積層)	7.85	0.50	113,263

に基づき、繊維体積含有率 V_f および軸方向弾性係数を算出した。CFRP成型板の形状および補強断面図を図-4、図-5に示す。CFRP成型板の形状は既往の研究⁷⁾と同様とし、繊維配向は切欠き部分においても応力伝達するように軸方向に対し45°/0°/45°方向に1/2/1層の比率とした。積層数は上下フランジを補強した際に鋼桁供試体中央部の曲げ剛性が25%増加するように決定し、6/12/6層とした。また、切欠き部のストランドシートの層数はストランドシートの引張剛性がCFRP成型板の欠損断面の引張剛性と等しくなるように決定し、10層とした。ストランドシートはエポキシ樹脂を用いてCFRP成型板に接着した。

(3) 供試体作製手順および試験手順

上フランジへのCFRP成型板の接着には、既往の研究⁷⁾の引張付着試験で検討した結果から、ポリウレアパテ層を鋼材側に設けた。接着手順は、鋼材とCFRP成型板ともに接着範囲のケレンを行い、鋼材にウレタンプライマーを塗布した後にポリウレアパテを塗布した。ポリウレアパテの乾燥後、エポキシ樹脂を用いて上フランジ下面にCFRP成型板を接着した。下フランジ補強の炭素繊維シート接着の手順はマニュアル⁸⁾に従った。

試験は支間長6,000mm、等曲げ区間2,500mm、せん断

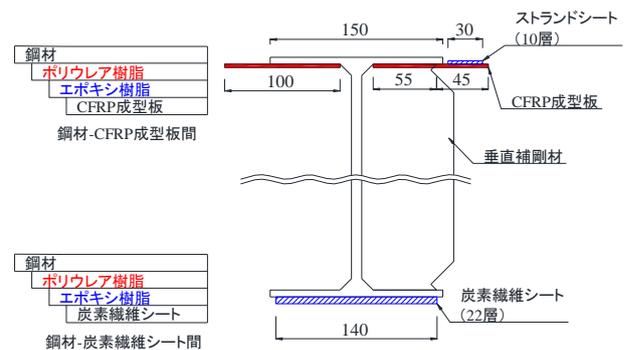


図-5 補強断面および接着樹脂層 (単位: mm)

区間1,750mmの4点曲げ試験とした。荷重は荷重制御による単調荷重とし、荷重の増加量が減少したら変位制御として終局状態になるまで荷重した。

(4) 曲げ試験結果および考察

a) 試験結果および破壊状況

表-5に試験結果一覧を示す。N1、P-UL、N-UL 供試体の結果は既往の研究⁷⁾から得られた高弾性型CFRP成型板で補強した場合の試験結果である。

破壊状況はP-UL-MM 供試体で944kN、N-UL-MM 供試体で830kN時にCFRP成型板-エポキシ樹脂間ではく離が生じた。既往の研究⁷⁾の結果と比較すると、P-UL-MM 供試体は70% (P-UL)、N-UL-MM 供試体は23% (N-UL) 破壊荷重が向上した。P-UL-MM 供試体ではCFRP成型板に圧縮応力が生じるが、本試験では既往の研究⁷⁾において使用した高弾性型炭素繊維シートより強度が高い中弾性型炭素繊維シートを用いたため、CFRP成型板の圧縮

表-5 切欠きのあるCFRP成型板を用いた曲げ試験結果一覧

供試体名	最大荷重 (kN)		破壊荷重 (kN)		破壊状況
	実験値	比 (N1, N2)	実験値	比 (P-UL, N-UL)	
N2	889	1.00	-	-	-
P-UL-MM	944	1.06 (N2)	944	1.70 (P-UL)	CFRP成型板はく離 (CFRP成型板-エポキシ樹脂間)
N-UL-MM	1,045	1.18 (N2)	830	1.23 (N-UL)	CFRP成型板はく離 (CFRP成型板-エポキシ樹脂間)
N1*	942	1.00	-	-	-
P-UL*	1,026	1.09 (N1)	555	1.00	CFRP成型板圧縮破壊
N-UL*	945	1.00 (N1)	675	1.00	CFRP成型板はく離 (鋼材-エポキシ樹脂間)

*既往の研究⁷⁾から得られた結果

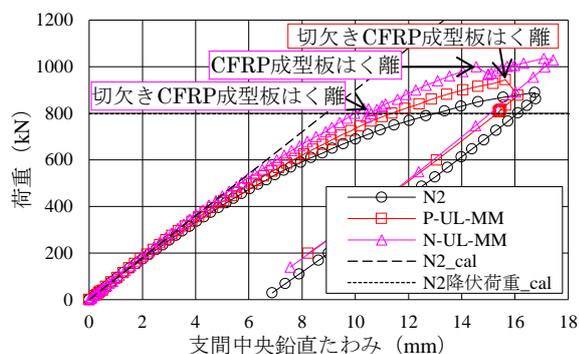


図-6 荷重-支間中央鉛直たわみ関係

耐力が向上し、CFRP成型板の圧縮破壊よりCFRP成型板のはく離破壊が先行したと考えられる。N-UL-MM供試体とN-UL供試体の比較により、はく離荷重の向上が確認されたが、これは既往の研究⁷⁾の引張付着試験で確認されたように、鋼材-エポキシ樹脂間のポリウレアパテが変形することでひずみエネルギーを吸収し、接着層の各界面のせん断応力およびCFRP成型板接着端部のせん断応力集中が低減されたためであると考えられる。

最大荷重は無補強供試体(N2)で889kNであったのに対し、補強供試体のP-UL-MM供試体では、はく離荷重と同様の944kNであり約6%向上した。N-UL-MM供試体では最大荷重は1,045kNであり、無補強供試体(N2)と比較すると約18%向上した。既往の研究⁷⁾のN-UL供試体はCFRP成型板のはく離および炭素繊維シートの圧縮破壊が生じたため、無補強供試体(N1)と比較し、最大荷重の向上が確認されなかったが、N-UL-MM供試体はCFRP成型板のはく離は生じたものの下フランジ補強の炭素繊維シートの圧縮破壊は生じなかったため、無補強供試体(N2)より最大荷重が向上したと考えられる。今後はさらなるはく離耐力の向上、はく離耐力の高度な予測ができるように破壊メカニズムの解明が必要である。

b) 荷重-支間中央鉛直たわみ関係

図-6に荷重-支間中央鉛直たわみ関係および無補強供試体の計算値を示す。計算値の算出は鋼材の弾性係数を200,000N/mm²とし、垂直補剛材および水平補剛材は無視して、梁理論に従い算出した。

同図より、P-UL-MM供試体は最大荷重時までCFRP成

型板のはく離、下フランジ補強の炭素繊維シートの圧縮破壊等の変状は生じず、無補強供試体より高い剛性を保ったまま最大荷重に達した。その後、CFRP成型板がはく離し、下フランジ補強の炭素繊維シートにはく離等の変状はなかったが、無補強供試体(N2)と同様の荷重まで低下した。これは、CFRP成型板のはく離が脆性的であり、急激な応力再分配が生じたことに起因すると考えられる。そのため、CFRP成型板のはく離後もさらに変位を与えればN-UL-MM供試体の最大荷重と同程度まで荷重が増加する可能性があると考えられる。

N-UL-MM供試体は830kN時に垂直補剛材側の切欠きのあるCFRP成型板がはく離したことにより剛性が低下、さらに1,000kN時に切欠きのあるCFRP成型板と反対側のCFRP成型板がはく離し剛性が低下する挙動を示した。

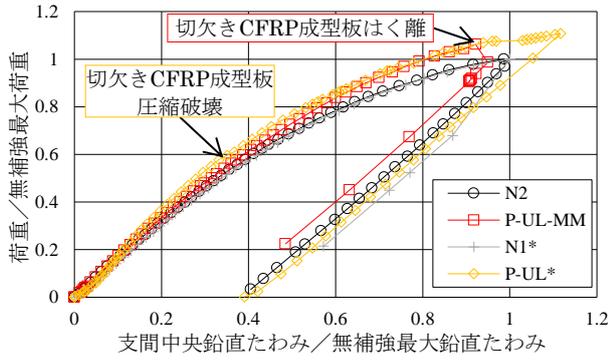
計算値と比較すると、無補強の降伏荷重(計算値)は798kNであるため、本試験において、正曲げ負曲げ供試体ともに無補強供試体の降伏荷重(計算値)までCFRP成型板がはく離、圧縮破壊が生じないことが確認された。

c) 炭素繊維種類(高弾性型-中弾性型)による違い

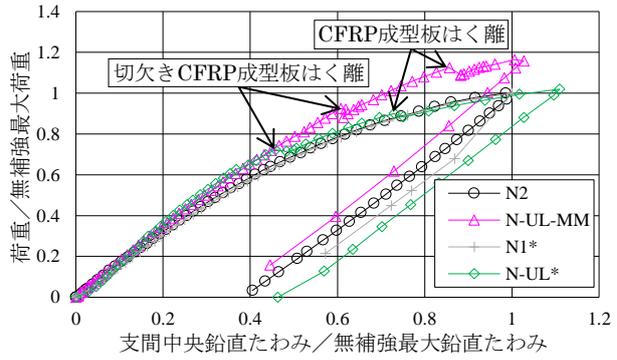
図-7に無次元化した荷重-支間中央鉛直たわみ関係を示す。P-UL-MM供試体およびN-UL-MM供試体はN2供試体の最大荷重および最大荷重時の鉛直たわみで各値を除くことで無次元化した。同様にP-UL供試体およびN-UL供試体はN1供試体の各値を除くことで無次元化した。

正曲げ供試体のP-UL-MM供試体は最大荷重時にCFRP成型板のはく離により荷重が急激に低下し、無補強と同様の荷重まで低下した。P-UL供試体はCFRP成型板の圧縮破壊が生じながら、徐々に剛性が低下する挙動であった。これはCFRP成型板の圧縮破壊後はCFRP成型板の圧縮破壊した断面同士は接しており、圧縮応力を一定数伝達できていたため、急激な荷重の低下が生じなかったと考えられる。

負曲げ供試体はCFRP成型板のはく離により剛性が低下する挙動を示した。N-UL供試体はCFRP成型板のはく離および下フランジ補強の炭素繊維シートの圧縮破壊後は無補強と同様の挙動を示した。N-UL-MM供試体はCFRP成型板のはく離により剛性が低下したが、下フランジ補強の炭素繊維シートは圧縮破壊が生じなかったため、N-UL供試体と比較して、剛性の低下は小さく、無

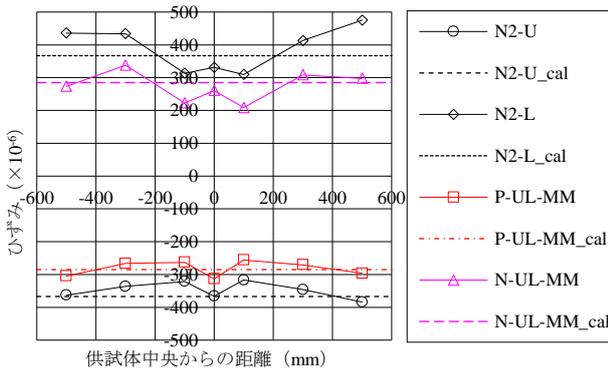


(a) 正曲げ供試体

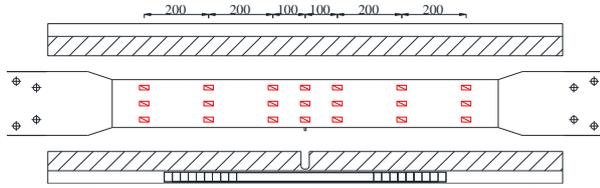


(b) 負曲げ供試体

図7 荷重一支間中央鉛直たわみ関係 (無次元化)



(a) 鋼桁上フランジのひずみ分布



(b) 上フランジひずみゲージ位置 (単位: mm)

図8 上フランジ鋼材ひずみ分布

補強供試体より高い剛性を保ったまま終局となった。したがって、中弾性炭素繊維シートを用いた方が高い荷重時まで圧縮破壊が生じず、高い剛性が保たれることが確認された。

d) 上フランジの応力低減効果

図8に供試体の座屈、はく離等が発生する以前である200kN時における、各供試体の上フランジ鋼材のひずみ分布およびひずみゲージ位置図を示す。N2-UおよびN2-Lはそれぞれ無補強供試体の上フランジおよび下フランジを表している。ひずみゲージは桁軸直角方向に3か所ずつ設置されており、ひずみ分布図の値は桁軸直角方向に並ぶ3か所のひずみゲージ位置のひずみの平均値である。各破線は各供試体における計算値である。発生応力度の計算を行う際、ポリウレアパテを接着に用いた場合はポリウレアパテによる影響で完全合成断面とならないため、既存のマニュアル⁸⁾では炭素繊維の断面積に応力低減係数を乗じて設計を行うことが示されている。しかし、本試験で用いたCFRP成型板による補強における応

力低減係数は未検討であるため、応力低減係数を考慮せずに完全合成断面として算出した。

P-UL-MM 供試体、N-UL-MM 供試体ともに無補強供試体と比較して、測定したすべての断面で応力が低減していることが確認された。各供試体上フランジの全ひずみゲージ21か所のひずみを平均し、無補強供試体と比較すると、P-UL-MM 供試体は約19%、N-UL-MM 供試体は約30%上フランジ鋼材の応力が低減されたことが確認され、概ね計算通りの補強効果が得られた。

以上から、中弾性型CFRP成型板で上フランジを補強した場合においても、切欠き部分で欠損断面補強のストランドシートまで応力が伝達し、CFRP成型板が応力を受け持つことによる鋼桁供試体の応力低減が確認された。

4. CF バイパス工法で補強した鋼桁曲げ試験

(1) CF バイパス工法概要

近年、鋼板当て板工法の構造としてバイパス構造が提案されている^{9,11)}。そこで本研究では、一方向CFRP成型板およびバイパス部材を樹脂を用いて鋼材に接着するCFバイパス工法を提案する。図9にCFバイパス工法に用いるCFRP成型板概要、図10にCFバイパス工法の補強断面を示す。本工法は垂直補剛材等がある鋼桁上フランジ下面等への適用を想定している。上フランジ下面に一方向CFRP成型板、垂直補剛材がある箇所にはバイパス部材を接着し、一方向CFRP成型板が連続していない箇所ではバイパス部材を通して鋼桁軸方向に応力が伝達され鋼桁を補強する工法である。バイパス部材は幅方向への応力伝達ができるように、軸方向(0°)に対して、±45°方向にも炭素繊維シートが積層されたCFRP成型板である。本工法は前章で述べた切欠きのあるCFRP成型板による補強工法と比較し、材料の使用量が少なく経済的であり、部材の製作および現場施工作業が容易であるという利点がある。以下に本工法の補強効果を確認す

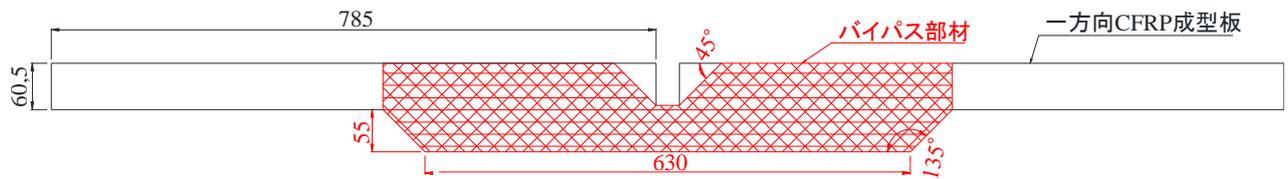


図-9 CFバイパス工法CFRP成型板概要 (単位: mm)

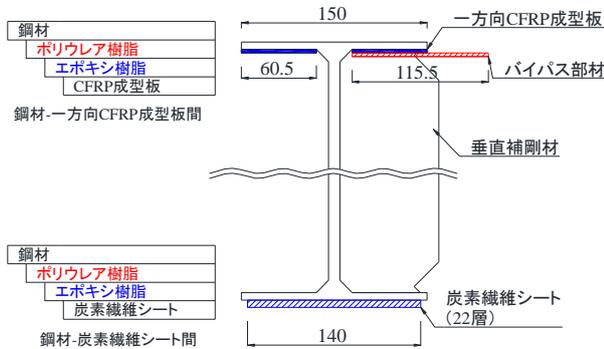


図-10 CFバイパス工法の補強断面 (単位: mm)

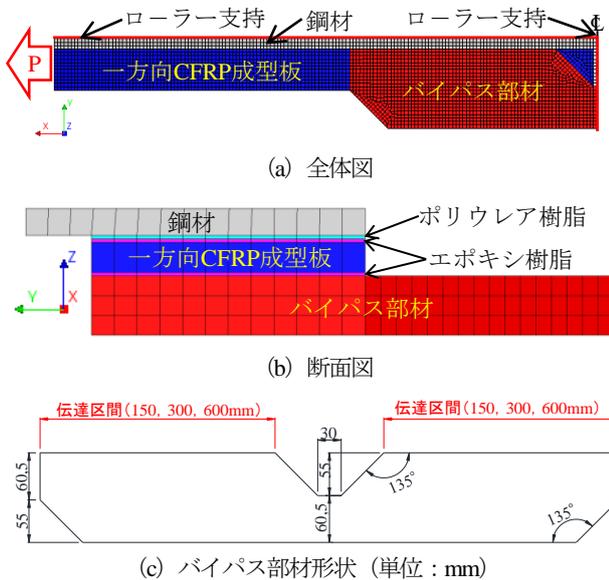


図-11 FEM解析モデル概要

るための鋼桁供試体曲げ試験について示す。

(2) 試験概要

表-6 に CF バイパス工法供試体一覧を示す。本研究では、CFRP 成型板が圧縮となる正曲げ試験と CFRP 成型板が引張となる負曲げ試験を行った。鋼桁供試体は図-3 に示したものと同様とし、前章と同様の試験を行った。

(3) CFRP 成型板概要

本試験に用いた CFRP 成型板の材料特性値を表-7 に示す。バイパス部材の繊維配向は幅方向へ応力伝達するように軸方向に対し $-45/45^\circ$ 方向に 1/21 層の比率とした。表中の CFRP 成型板の板厚は測定値であり、板厚と表-1、表-2 に示す値から複合則・積層理論に基づき、繊維体積含有率 V_f および軸方向弾性率を算出した。CFRP 成型板

表-6 CFバイパス工法供試体一覧

供試体名	曲げモード	補強	
		上フランジ	下フランジ
P-by	正曲げ	CFバイパス工法	シート
N-by	負曲げ	シート	CFバイパス工法

表-7 CFバイパス工法に用いた CFRP 成型板の材料特性値

	積層数	厚さ (mm)	繊維体積含有率 V_f	軸方向弾性係数 (N/mm^2)
一方向 CFRP 成型板	$[0^\circ]_{20}$	6.75	0.49	210,256
バイパス部材	$[0^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_{10}$ (対称積層)	13.33	0.50	111,169

表-8 解析に用いた CFRP 成型板の材料特性値

	一方向 CFRP 成型板	バイパス部材	
厚さ (mm)	t	6.600	13.200
弾性係数 (N/mm^2)	E_x	196,430	102,970
	E_y	5,678	24,395
	E_z	5,678	5,678
ポアソン比	ν_{xy}	0.35	0.87
	ν_{yz}	0.35	0.35
	ν_{xz}	0.35	0.35
せん断剛性 (N/mm^2)	G_{xy}	2,029	25,869
	G_{yz}	2,029	2,029
	G_{xz}	2,029	2,029

および補強断面は図-9、図-10 に示す。一方向 CFRP 成型板は前章と同様の方法で接着し、バイパス部材は一方向 CFRP 成型板にエポキシ樹脂を用いて接着した。CFRP 成型板の積層数は上下フランジを補強した際に鋼桁供試体中央部の曲げ剛性が 25% 増加するように決定した。また、バイパス部材の積層数は中央の最も断面積が小さい部分での引張剛性が一方向材の引張剛性と同等となるように決定した。また、バイパス部材の形状は FEM 解析を用いて検討した。以下に検討内容を示す。

a) FEM 解析によるバイパス部材形状の検討

図-11 に本検討に用いた FEM 解析モデル概要を示す。解析モデルはフランジ部分のみをモデル化し、ソリッド要素でモデル化した。各材料はすべて線形材料とし、接着樹脂の弾性係数は表-2 の値を用いた。表-8 に解析に用いた CFRP 成型板の材料特性値を示す。各値は繊維体積含有率 $V_f=0.5$ として、炭素繊維シート ($E_f=390,000N/mm^2$, $\nu_f=0.3$) およびマトリックス樹脂 ($E_m=2,860N/mm^2$, $\nu_m=0.4$) の物性値から算出した。拘束条件は端部をローラー支持

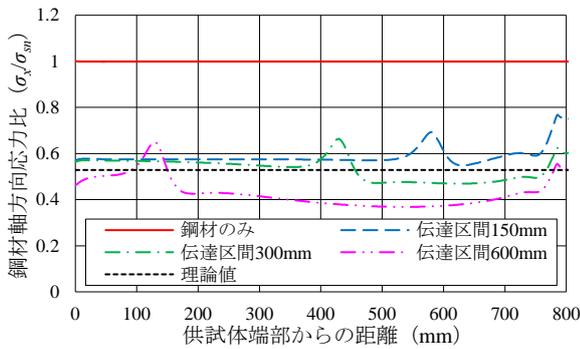


図-12 鋼板下面中央における軸方向応力比分布図（解析）

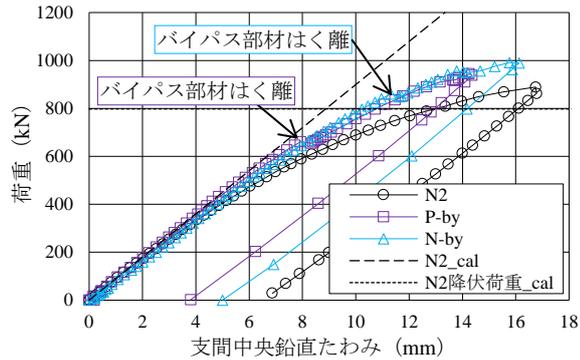


図-13 荷重－支間中央鉛直たわみ関係

とし、一軸引張荷重を与えた。解析パラメータは図-11 (c) に示すように、バイパス部材の幅方向伝達区間の長さ (150, 300, 600mm) とした。

b) 解析結果

図-12 に鋼板下面中央における軸方向応力比分布図を示す。理論値は CFRP 成型板と鋼板の引張剛性比から算出した。各 CASE バイパス部材の端部および中央（端部から 800mm）で鋼材の応力が大きくなる傾向であった。各 CASE を比較すると伝達区間が長いほど中央の鋼材応力が小さくなる傾向を示した。伝達区間 600mm の場合は中央の鋼材応力は概ね理論値通りであるが、伝達区間においては鋼材の応力が理論値を下回っており、過補強となる区間が多く、経済性に欠ける。また、実橋鋼桁の垂直補剛材間隔は 1m 程度であることが多く、伝達区間 600mm の場合は隣り合うバイパス部材同士が干渉し、適用できない。伝達区間 300mm の場合は中央の鋼材応力は理論値より約 7%大きい、本モデルにおいて、端部から中央までの全区間において、概ね理論値に近い。そのため、経済性および現場での適用性を考慮し、本試験においては伝達区間 300mm のバイパス部材を採用した。

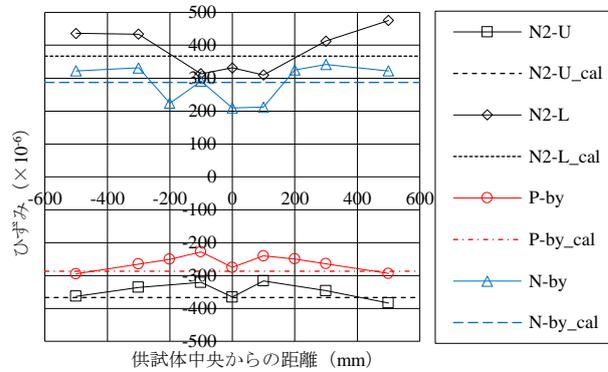
(4) 曲げ試験結果および考察

a) 試験結果および破壊状況

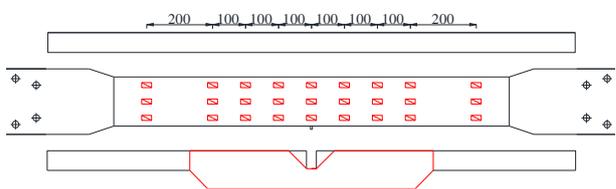
表-9 に試験結果一覧を示す。破壊状況は P-by 供試体、N-by 供試体ともに一方向 CFRP 成型板－バイパス部材間のはく離が先行する結果であり、P-by 供試体では 661kN、

表-9 CF バイパス工法供試体曲げ試験結果一覧

供試体名	最大荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	破壊状況
N2	889	-	-
P-by	950	661	バイパス部材はく離
N-by	1,000	850	バイパス部材はく離



(a) 鋼桁上フランジのひずみ分布



(b) 上フランジひずみゲージ位置 (単位: mm)

図-14 上フランジ鋼材ひずみ分布

N-by 供試体では 850kN でバイパス部材がはく離した。

b) 荷重－支間中央鉛直たわみ関係

図-13 に荷重－支間中央鉛直たわみ関係を示す。計算値は前章と同様梁理論により算出した。同図より P-by 供試体は無補強供試体の降伏荷重（計算値）である 798kN 以前の 661kN でバイパス部材のはく離により、剛性が低下する挙動を示した。本試験で用いたバイパス部材は端部のテーパ処理等を施していないため、バイパス部材の接着端部の急な断面変化により剛性が変化する。そのため、接着端部に応力集中が生じ、母材鋼桁の降伏以前にはく離が生じたと考えられる。

N-by 供試体は 889kN 時にバイパス部材のはく離により剛性が低下した。P-by 供試体と比較すると、はく離荷重が約 29%大きくなっており、バイパス部材の応力状態が圧縮か引張かによってはく離のメカニズムに違いがある可能性が示唆された。また、本試験ではバイパス部材を一方向 CFRP 成型板に接着しており、CFRP 成型板同士の接着である。CFRP 成型板同士の付着挙動は検討されている例が少なく不明な点が多い。そのため、今後は CFRP 成型板同士の付着挙動の解明およびはく離が生じない最適なバイパス部材の形状の検討を行う必要がある。

c) 上フランジの応力低減効果

図-14 に供試体の座屈、はく離等が発生する以前である 200kN 時における、各供試体の上フランジ鋼材のひず

み分布およびひずみゲージ位置図を示す。P-by 供試体、N-by 供試体ともに無補強供試体と比較して、測定したすべての断面で応力が低減したことが確認された。各供試体上フランジの全ひずみゲージ 21 か所のひずみを平均し、無補強供試体と比較すると、P-by 供試体は約 24%、N-by 供試体は約 26%上フランジ鋼材の応力が低減されたことが確認され、概ね計算通りの補強効果が得られた。

以上から、CF バイパス工法で上フランジを補強した場合においても、バイパス部材まで応力が伝達することで、鋼桁供試体の応力低減が確認された。

5. まとめ

切欠きのある中弾性型CFRP成型板、CFバイパス工法で上フランジ下面を補強したI型断面鋼桁の正曲げ・負曲げ試験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 切欠きのある中弾性型CFRP成型板で上フランジを補強した場合において、切欠き部分で欠損断面補強のストランドシートまで応力伝達が行われ、鋼材の応力低減効果が確認された。
- (2) 高弾性型から中弾性型CFRP成型板で補強することにより、CFRP成型板の圧縮破壊耐力の向上が確認された。また、接着層におけるポリウレアパテ層の位置をCFRP成型板側から鋼材側にすることによるはく離耐力の向上が確認された。
- (3) CF バイパス工法で補強された鋼桁曲げ試験において、バイパス部材まで応力が伝達することで、鋼桁供試体の応力低減が確認された。

参考文献

- 1) 東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西

- 日本高速道路(株)：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方 報告書、高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術委員会、2014.1
- 2) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術(2009年度版改定)、2009
- 3) 土木学会鋼構造委員会：腐食した鋼構造物の長寿命化のための性能回復技術検討小委員会、鋼構造シリーズ 23、丸善出版、2014.8
- 4) 板垣一也、渡邊憲市、鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板(カーボン板)による鋼橋補強の事例、第8回鋼構造の補修・補強技術報告論文集、pp.49-54、2002.
- 5) 杉浦江、小林朗、稲葉尚文、本間敦史、大垣賀津雄、長井正 嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案、土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.106-118, 2009.
- 6) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)、土木学会複合構造シリーズ 09, 2018.
- 7) 櫻井俊太、秀熊佑哉、寺崎詠介、Vinh PHAM NGOC、大垣賀津雄：CFRP 成型板を用いた I 型断面鋼桁の上フランジ補強に関する研究、第 14 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、2021.11
- 8) (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、2020.
- 9) 松本崇志、小林駿祐、山口隆司：現場接合部を含む当て板による主桁断面の曲げ補強効果と補強範囲に関する解析的検討、鋼構造論文集第 28 巻第 109 号、2021.3
- 10) 松井駿、山口隆司、戸田健介、荒木健二、山内誉史：鋼 I 桁下フランジ連結板取替えのためのウェブバイパス工法の適用範囲およびバイパス部材の形状に関する解析的検討、構造工学論文集、Vol. 67A、2021.3
- 11) 戸田健介、田畑晶子、山口隆司：施工ステップを考慮した鋼 I 桁下フランジ連結板取替えのためのウェブに取り付けるバイパス部材に関する解析的検討、構造工学論文集、Vol.66A, pp.81-93, 2020.3

(Received August 26, 2022)

STUDY ON REINFORCEMENT USING MEDIUM MODULUS CFRP MOLDED PLATE FOR THE UPPER FLANGE OF I-SECTION STEEL GIRDER

Shunta SAKURAI, Yuya HIDEKUMA, Nanami GOTO,
Vinh PHAM NGOC and Kazuo OHGAKI

Currently, large-scale replacement projects are underway to replace floor slabs, and demand for steel girder reinforcement is increasing. However, the upper flange must be reinforced from the underside of the upper flange because there are floor slabs on the upper surface of the upper flange. Recently, carbon fiber has been used as a reinforcement material, but the vertical stiffeners are installed on the underside of the upper flange, which prevents the continuous application of carbon fiber in the direction of the girder axis. In this study, we proposed a reinforcement method that uses a medium-elasticity type CFRP molded plate to enable bending reinforcement from the lower surface of the upper flange even at locations where vertical stiffeners are installed. A four-point bending test was performed on steel girder specimens reinforced by proposed method. A positive bending test and a negative bending test were performed to examine the reinforcement effect. As a result, in both tests, the effect of reducing the stress on the upper flange was confirmed even at the location where the vertical stiffener was present.