

CFRP成形材による鋼桁の曲げ補強効果に関する研究

Study on Bending Reinforcement Effect of Steel Girder Using CFRP Molded Plate

櫻井 俊太*
Shunta SAKURAI

秀熊 佑哉
Yuya HIDEKUMA

大垣 賀津雄
Kazuo OHGAKI

抄 録

合成桁の床版撤去時は、鋼桁のみの状態となるため、鋼桁の横倒れ座屈が生じやすくなり、鋼桁の補強が必要となる場合がある。鋼構造物の補強工法には、高強度、高弾性、軽量、および腐食しない炭素繊維シートを用いた工法がある。しかし、鋼桁の横倒れ座屈に対する補強効果については確認されていない。本研究では、CFバイパス工法により上フランジ下面を補強した横倒れ座屈先行型の鋼桁供試体の4点曲げ試験により、横倒れ座屈に対する補強効果を検証した。その結果、補強により鋼桁の曲げ剛性を向上させることで横倒れ座屈に対する耐荷力を制御できると考えられるが、横倒れ座屈発生時の応力度の向上効果は小さいと考えられる。

Abstract

In composite girders, only steel girders remain when the floor slab is removed during slab replacement. This can lead to lateral buckling of the steel girders necessitating reinforcement. One method of reinforcing steel structures involves using high-strength, highly elastic, lightweight, and non-corrosive carbon fiber reinforced plastic (CFRP). However, the effectiveness of CFRP reinforcement in preventing lateral buckling has not been fully confirmed. In this study, the effect of reinforcement on lateral buckling was verified through four-point bending tests on steel girder specimens reinforced by the CF bypass method. As a result, it is considered that the load capacity against lateral buckling can be controlled by improving the bending rigidity of the steel girder through reinforcement, but the effect of improving the stress level at the occurrence of lateral buckling is considered to be small.

1. 緒 言

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が進められている。合成桁の場合、既設床版を撤去した時に鋼桁と床版の合成作用がなくなるため、鋼桁のみの不安定な構造となり、上フランジに大きな曲げ圧縮応力が発生し、上フランジが横方向に変形する横倒れ座屈が生じることが懸念される²⁾。過去には床版撤去時に主桁の横倒れ座屈が生じ、落橋した事例が報告されており³⁾、横倒れ座屈の発生は重大な事故につながるため、床版撤去時には適切な対策が必要である。床版撤去時の鋼桁の耐荷力が不足する場合の補強として、補強部材を摩擦接合高力ボルトで添接する補強方法があり、経済性や施工の確実性に優れることから適用事例が多い⁴⁾。しかし、補強部材は上フランジに近い位置に設置する方が

効率的であるものの、上フランジ上面には床版があるため、通常、上フランジへのボルト接合は困難である。また、合成桁は上フランジ付近に合成時の中立軸があるため、上フランジの断面積は小さい場合が多い。そのため、ボルトの孔引きによる影響が大きく、補強部材の断面積が大きくなる傾向にあり、死荷重の増加による下部工への影響も懸念される。また、横倒れ座屈に対して特に有効な対策として、横桁や対傾構などの部材追加により固定点間距離を短縮する方法が挙げられる。しかし、部材の運搬、設置に重機が必要となるため、施工が困難であり、工期の長期化が懸念される。特に床版取替え工事においては交通規制が必要であることから工期の短縮が求められる。

近年、鋼橋の補修・補強工法として軽量、高強度、高弾性および腐食しない等の特徴がある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^{5,6)}。炭素繊維は鋼

* 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部 社会資本材料部 材料技術センター 埼玉県朝霞市三原 5-1-10 〒351-0025

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、樹脂を用いて部材に接着するため、特殊技能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部材の断面減少が生じないという利点がある。さらに、接着工法の課題とされる補強材のはく離に関しては、接着に高伸度弾性パテ材を用いて炭素繊維のはく離を抑制する工法⁷⁾が開発され、はく離に対する懸念が少なくなった。そして現在も炭素繊維を用いた補強工法の適用範囲拡大に向けた研究開発が行われている⁸⁾。

炭素繊維シートを用いた補修補強工法は様々な部材や応力状態に対して補強できることが確認されており、設計・施工マニュアルが発刊されている⁹⁾。しかし、鋼桁の横倒れ座屈に対する補強方法や設計手法は確立されていないのが現状である。

著者らは、炭素繊維を用いて鋼桁の上フランジを下面から補強でき、垂直補剛材等が設置されている部分の曲げ補強ができる補強工法としてCFバイパス工法を提案した¹⁰⁾。図1にCFバイパス工法の概要図を示す。本工法は、垂直補剛材がない一般部は繊維方向が部材軸方向のみである炭素繊維シートもしくは炭素繊維を事前に樹脂で固め板状に成形した炭素繊維成形材（以下、CFRP成形材という）を接着し、垂直補剛材があり繊維を連続させて施工できない箇所は、垂直補剛材をかわし垂直補剛材の両側のCFRPを接続するような形状のバイパス部材を接着することで補強部材を連続化させ、CFRPが連続していない部分（以下、バイパス部という）においても曲げ補強できる補強工法である。バイパス部材はCFRP成形材で作製されており、部材幅方向（Y軸方向）へ効率よく応力を伝達できるように、炭素繊維の繊維方向が部材軸方向（X軸方向）に加え、部材軸方向に対しY軸方向に $\pm 45^\circ$ となるように積層された部材である。このように炭素繊維を積層することでCFRP成形材

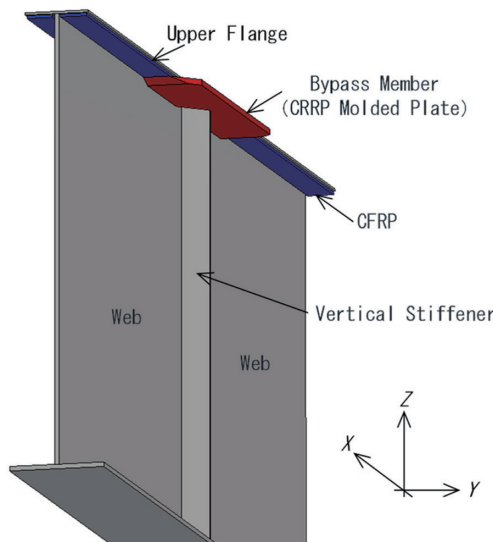


図1 CFバイパス工法概要図
CF bypass method outline

のせん断弾性係数 G_{xy} が大きくなり、部材幅方向（Y軸方向）への応力伝達効率が向上する。既往の研究¹⁰⁾で、本工法で補強した鋼桁供試体による曲げ載荷試験を実施し、本工法で補強することで、バイパス部における鋼材の曲げ応力が低減されることを確認した。

そこで本研究では、CFバイパス工法により上フランジ下面を補強した横倒れ座屈先行型の鋼桁供試体の4点曲げ試験により、横倒れ座屈に対する補強効果の検証を行った。

2. 使用材料

本試験に用いた材料特性値を表1に示す。供試体の作製にはSS400を用いた。CFRP成形材製作には中弾性型の炭素繊維シートを用いた。鋼部材の補修補強では高弾性型の炭素繊維シートが一般に用いられている⁹⁾が、CFRP成形材を用いて梁曲げ試験を行った既往の研究¹¹⁾により、高弾性型の炭素繊維シートで製作したCFRP成形材は圧縮応力作用時に母材の降伏以前に圧縮破壊する結果であったため、CFRP成形材の圧縮強度を高めるために高弾性型よりは弾性係数は低いが高強度の中弾性型の炭素繊維シートを本試験では用いた。CFRP成形材は中弾性炭素繊維シートをエポキシ系のマトリックス樹脂を用いて成形した。CFRP成形材の接着にはエポキシ樹脂およびCFRP成形材

表1 使用材料特性値
Used material property

(a) Steel

Material	Item	Unit	Design value	Test value
Steel (SS400)	Elastic modulus	N/mm ²	200 000	—
	Yield strength	N/mm ²	240	326 (Flg) 308 (Web)
	Tensile strength	N/mm ²	—	430 (Flg) 454 (Web)

(b) CFRP sheet

Material	Item	Unit	Design value	Test value
Medium modulus CFRP sheet	Fiber weight	g/m ²	300	310
	Design thickness	mm	0.165	—
	Elastic modulus	N/mm ²	390 000	405 000
	Poisson's ratio	—	0.3	—
	Tensile strength	N/mm ²	2 900	4 033
High modulus CFRP strand sheet	Fracture strain	$\times 10^{-6}$	7 436	9 958
	Fiber weight	g/m ²	900	933
	Design thickness	mm	0.429	—
	Elastic modulus	N/mm ²	640 000	692 000
	Tensile strength	N/mm ²	1 900	2 830

(c) Resin

Material	Item	Unit	Design value	Test value
Matrix resin (Epoxy resin)	Elastic modulus	N/mm ²	2 860	—
	Poisson's ratio	—	0.4	—
Adhesive (Epoxy resin)	Elastic modulus	N/mm ²	2 500	3 317
	Poisson's ratio	—	0.35	—
Elongated elastic putty (Polyurea resin)	Elastic modulus	N/mm ²	65	74
	Poisson's ratio	—	0.499	—

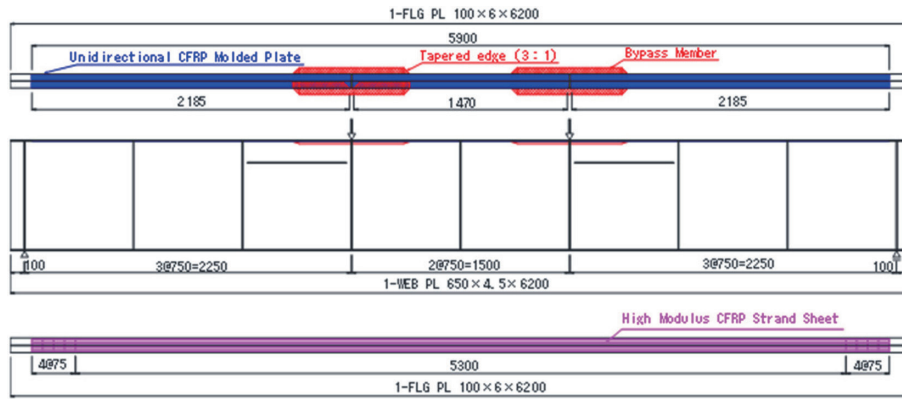


図2 供試体概要図
Specimen outline

のはく離を抑制するための高伸度弾性パテ材を用いた。これは既存の設計・施工マニュアル⁹⁾の品質規格を満たす材料である。高弾性ストランドシートは下フランジの補強に用いた。

3. 鋼桁曲げ試験概要

3.1 供試体概要

補強後の供試体概要図を図2に示す。供試体は実橋の1/3～1/2程度の大きさであり、供試体長さは6200mm、上下フランジは幅100mm、厚さ6mm、腹板は高さ650mm、板厚4.5mmとし、横倒れ座屈が先行するようなI形断面桁とした。

3.2 補強概要

補強後の供試体断面図を図3に示す。本試験で補強材として用いたCFRP成形材の材料特性値を表2に示す。CFRP成形材はハンドレイアップ成形法で製作し、一方向CFRP成形材は繊維方向を軸方向(0°方向)のみに積層、バイパス部材は接着面から伝達された応力をCFRP成形材幅方向へ応力伝達するように炭素繊維を軸方向(0°方向)に加え±45°方向にも積層し、既往の研究^{10,11)}で検討した結果を踏まえて、その積層数の比率を-45°/0°/45°方向に1/2/1層とした。表中のCFRP成形材の板厚は測定値であり、板厚と表1(b), (c)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¹²⁾。バイパス部材形状を図4に示す。バイパス部材の接着範囲は一方向CFRP成形材と同一幅である42mm幅の範囲とし、成形材から幅方向にはみ出す未接着の範囲も同様に42mmとした。積層数はバイパス部材中央の最も断面積が小さい部分での引張剛性が一方向CFRP成形材の引張剛性と同等となるように決定した。一方向CFRP成形材およびバイパス部材の端部のはく離を防止するため、成形後にテーパ処理を施した⁶⁾。その比率は既往の研究¹³⁾で検討した3:1とした。

一方向CFRP成形材の接着には、設計・施工マニユア

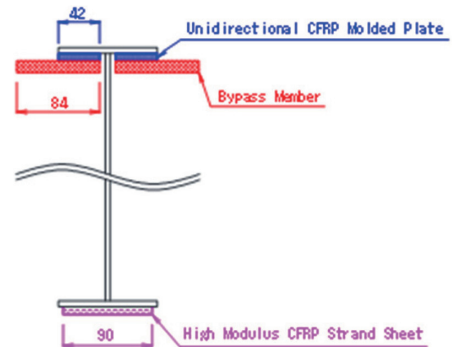


図3 補強断面図
Reinforced cross-section

表2 CFRP 成形材の材料特性値
Material property of CFRP molded plate

Material	Item	Unit	Value
Unidirectional CFRP molded plate	Number of layers	—	[0°] ₂₃
	Thickness	mm	7.88
	Fiber volume V_f	—	0.48
	Axial elastic modulus	N/mm ²	196530
Bypass member	Tensile strength*	N/mm ²	1957
	Number of layers	—	[0°/±45°/0°] ₁₁ (Symmetrical layering)
	Thickness	mm	14.40
	Fiber volume V_f	—	0.50
	Axial elastic modulus	N/mm ²	107615
	Tensile strength*	N/mm ²	1072

* Stress when the strain generated in carbon fiber reaches the fracture strain

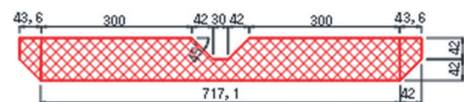


図4 バイパス部材形状
Bypass member shape

ル⁹⁾に準拠し、鋼材の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、一方向CFRP成形材の接着面をサンドペーパーで磨き、エポキシ樹脂を用いて一方向CFRP成形材を接着した。エポキシ樹脂の初期硬化後、一

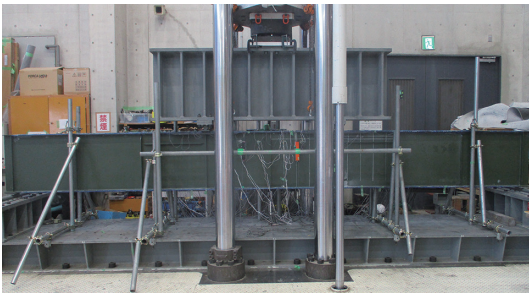


写真 1 試験状況
Test situation

方向 CFRP 成形材およびバイパス部材の接着範囲をケレンし、バイパス部材を一方向 CFRP 成形材上にエポキシ樹脂を用いて接着した。その後、樹脂の完全硬化まで 1 週間以上養生した。

下フランジは補強後の中立軸位置が桁高さの中央となるように積層数を決定し、高弾性型のストランドシート 5 層とした。端部は設計・施工マニュアル⁹⁾に従い、各層片側 75 mm のずらし貼りとした。

3.3 試験手順および供試体作製手順

本試験では初めに補強前の図 2 に示す供試体を曲げ載荷し、横倒れ座屈を発生させてその耐荷力を確認した。その後、除荷を行い、CFRP 成形材および炭素繊維ストランドシートの接着作業を行い、再度曲げ載荷を行った。試験は支間長 6000 mm、載荷スパン 1500 mm の 4 点曲げ載荷とした。ここで、試験状況を写真 1 に示す。

4. 試験結果および考察

4.1 試験結果一覧および破壊状況

試験結果一覧を表 3 に示す。初期降伏荷重の計算値は供試体上縁の応力度がフランジの降伏強度の特性値である 235 N/mm^2 となるときの載荷荷重である。また表中のカッコ内の数値は補強前との比を表す。破壊状況は補強前、補強後ともに横倒れ座屈であった。補強後は横倒れ座屈後の CFRP 成形材および下フランジ補強の炭素繊維ストランドシートのはく離は生じていなかった。表より、最大荷重は補強前は 111 kN、補強後は 160 kN であり、補強により 1.44 倍に向上した。最大荷重時応力度は最大荷重から供試体上

表 3 試験結果一覧
Test result

Item	Unit	Before reinforcement	After reinforcement
Yield load (Calculated value)	kN	146	232
Maximum load	kN	111 (1.00)	160 (1.44)
Stress at maximum load	N/mm^2	178 (1.00)	162 (0.91)
Failure mode	—	Lateral buckling No delamination of CFRP in reinforced specimen	

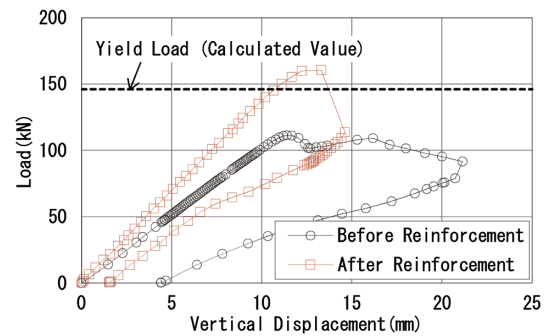


図 5 荷重—支間中央鉛直変位関係
Relationship between load and vertical displacement of center of support

縁の応力度を求めた結果である。この応力度は補強前は 178 N/mm^2 、補強後は 164 N/mm^2 となり、補強により 0.91 倍となった。

4.2 荷重—支間中央鉛直変位関係

補強前後の荷重—支間中央鉛直変位関係を図 5 に示す。補強前は終局まで概ね線形に荷重が増加し、鉛直変位 11.7 mm 時に横倒れ座屈により荷重が低下して、終局に至った。除荷後の残留変位は 4.4 mm であった。補強後は補強前より曲げ剛性が向上し、降伏強度の特性値から求めた補強前の降伏荷重の計算値を超え、終局前まで概ね線形に荷重が増加し、鉛直変位 13.3 mm 時に横倒れ座屈により荷重が低下して、終局に至った。

CF バイパス工法による補強により最大荷重は向上したものの、最大荷重時の上フランジ応力度は補強前より低下、最大荷重時鉛直変位は補強前と同程度であった。これは補強前に載荷したことにより残留変形が生じていたことが一因であると考えられる。また、横倒れ座屈の耐荷力には鉛直軸方向の周りの断面 2 次モーメントや反りねじり定数が影響する¹⁴⁾が、本工法ではそれらの向上効果は小さいと考えられる。したがって、鋼桁の曲げ剛性を向上させることにより横倒れ座屈に対する耐荷力の制御はできると考えられるが、横倒れ座屈発生時の応力度の向上効果は小さいと考えられる。

5. 結 言

本検討では CFRP 成形材を用いた CF バイパス工法による横倒れ座屈に対する補強効果の検討を目的として、鋼桁供試体の 4 点曲げ試験を行った。その結果、CF バイパス工法による補強で鋼桁の曲げ剛性を向上させることにより横倒れ座屈に対する耐荷力を制御できると考えられるが、横倒れ座屈発生時の応力度の向上効果は小さいと考えられる。

今後は実験や FEM 解析を行うことにより、耐荷力評価手法や設計手法を確立する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究の実験は、ものづくり大学建設学科の研究室学生諸氏のご協力のもと実施されたものである。ここに記して関係各位に感謝致します。

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
- 2) 土木学会: 連続合成桁橋における床版取替え技術の現状と課題. 複合構造レポート 17. 2021
- 3) 佐藤恒明, 吉田悠亮, 中嶋優: 旧橋撤去作業時の問題点に着目した実務を意識できる教育実践について. 土木学会 68 回 年次学術講演会講演概要集, CS1-012, 24 (2013)
- 4) 山田秀美, 龍頭実, 水野浩, 原孝志, 庄谷秀男, 米倉健二: 御幸大橋(下り線)床版取替え II 期工事. 川田技報. 31, 13-20 (2012)
- 5) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 本間敦史, 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. 65 (1), 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). 複合構造シリーズ 09. 2018
- 7) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性バテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案. 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント). 71 (1), 44-63 (2015)
- 8) 大垣賀津雄: CFRP による鋼部材の補修・補強に関する現状と将来展望. 土木学会論文集. 80 (14), 23-14001 (2024)
- 9) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): 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
- 10) 櫻井俊太, 秀熊佑哉, 後藤七海, Pham Ngoc Vinh, 大垣賀津雄: 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. 第 9 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 121-128 (2022)
- 11) 櫻井俊太, 秀熊佑哉, 寺崎詠介, Pham Ngoc Vinh, 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
- 12) 福田博, 邊吾一: 複合材料の力学序説. 古今書院, 1989
- 13) Sakurai, S., Hidekuma, Y., Ohgaki, K., Okui, Y.: Bond Behavior of CFRP Plates with Tapered Ends for Steel Structure Reinforcement, 13th-German-Japanese Bridge Symposium, 327-333 (2023)
- 14) 伊藤學, 奥井義昭: 鋼構造学. コロナ社, 2021



櫻井俊太 Shunta SAKURAI
日鉄ケミカル&マテリアル(株)
コンポジット事業部 社会資本材料部
材料技術センター
埼玉県朝霞市三原5-1-10 〒351-0025



秀熊佑哉 Yuya HIDEKUMA
日鉄ケミカル&マテリアル(株)
コンポジット事業部 社会資本材料部
材料技術センター センター長 博士(工学)



大垣賀津雄 Kazuo OHGAKI
ものづくり大学
技能工学学部長 建設学科 教授
博士(工学)