

炭素繊維シートで補強した 2 軸対称プレートガーダーの曲げ耐荷力実験

(株)高速道路総合技術研究所 正会員 ○服部雅史, 広瀬剛 ものつくり大学 正会員 大垣賀津雄
長岡技術科学大学 正会員 宮下剛 長野工業高等専門学校 正会員 奥山雄介
新日鉄住金マテリアルズ(株) 正会員 小林朗, 秀熊佑哉

1. はじめに

東, 中, 西日本高速道路株式会社の管理する高速道路橋に対して, 大規模更新事業としての床版取替えが延長約 230km, 概算事業費約 16,500 億円で 2015 年 3 月から 15 年計画で実施されている. 床版取替えは施工時間短縮のためプレキャスト床版に取替えることを標準としており, 床版同士の継手構造の制約より床版厚が取替え前より増大する傾向にある. また, 取替え工事中には一時的に床版がない状態となり, 合成桁においては鋼桁のみで荷重に抵抗することになる. このように死荷重の増大や構造系の変化により, 鋼桁の補強が必要となる場合が考えられる. 鋼桁の補強は一般に鋼材を用いて実施されるが, 供用中の制約条件下では軽量で簡易な補強材料が望まれる.

そのような中, 炭素繊維シート(以下, CFRP と記す)が注目されている. CFRP は鋼材に比べ, 高弾性・高強度, 軽量であり, 腐食しないといった材料特性を有している. また, 含浸・接着樹脂を用いて CFRP を接着することで, 大掛かりな施工機械や特殊技能が不要であり, 鋼材への溶接による熱影響やボルト孔の欠損もない. 一方で, 接着端部では大きなはく離せん断応力が生じ, はく離により脆性的に補修・補強効果がなくなることが懸念される. 筆者らは, CFRP と鋼材との接着界面に高伸度弾性パテ材を入れることではく離抵抗性を高めた工法を検討しており, その成果をマニュアル¹⁾にまとめた.

本検討では, 上記マニュアルの適用範囲拡大を目指し, 鋼桁の曲げ耐荷力補強に CFRP が適用できるかを確認する. そのために, 実橋を模した桁試験体に CFRP を接着して 4 点曲げ試験を実施した.

2. 試験概要

試験は図 1 のような 4 点曲げ試験を実施した. 等曲げ区間に試験体(図 1 の黄色着色部)をボルト継手により設置して試験を実施した. 荷重は最大荷重まで荷重を漸増させ, 荷重の低下を目安に荷重を終了した.

試験体は表 1 のように鋼材の材質, 腹板の幅厚比, 水平補剛材の有無, 圧縮フランジの幅厚比, CFRP 補強の有無をパラメータとした 16 パターンとした. 腹板の幅厚比は道示の最小腹板厚付近なるように, 圧縮フランジの幅厚比は道示の圧縮応力を受ける自由突出板として, 試験体 1, 3, 5, 7 については局部座屈に対する許容応力度の低減が無いように, 試験体 2, 4, 6, 8 については最小板厚付近となるように設定した. 上下フランジは同一の 2 軸対称断面とした.

試験体 B シリーズについては, 一方向繊維シート(引張強度 2900MPa, 弾性係数 390GPa, 繊維目付量 300g/m²)を用い, 座屈変形のような大変形に対して補強効果を発揮させるため, 高伸度弾性パテ材(伸び 300~500%)を鋼材と CFRP の間に挿入して接着した. CFRP の接着箇所は, 試験体 B シリーズ全ての圧縮応力を受ける腹板の上半分の表裏両面と, 試験体 2B, 4B, 6B, 8B の 4 体の圧縮フランジ下面とした. CFRP の積層枚数は, 鋼材と CFRP の弾性係数比と炭素繊維の目付量と密度の比から鋼換算厚さを求め(本検討では 0.272mm/枚), 圧縮フランジの幅厚比を最小板厚付近としたもののうち最も厳しい寸法の試験体に対して, 局部座屈に対する許容応力度の低減が無い

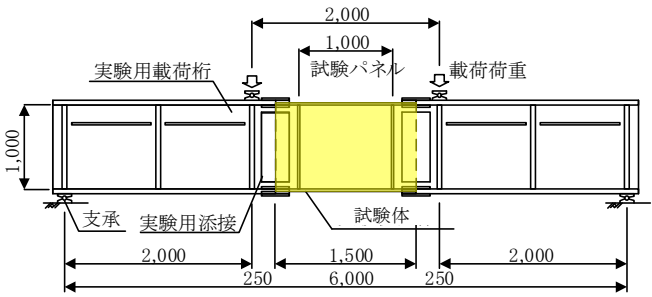


図 1 試験概要図

表 1 試験ケース

試験体	鋼材の材質	腹板の幅厚比	水平補剛材	圧縮フランジの幅厚比	腹板の最大初期たわみ(mm)	CFRP
1A	SS400	167	無	8.8	5.2	無
1B					7.2	腹板のみ
2A				16.0	2.8	無
2B					4.5	腹板, 上フランジ
3A		222	有	9.0	4.9	無
3B					4.8	腹板のみ
4A				16.2	6.2	無
4B					6.4	腹板, 上フランジ
5A	SM490Y	125	無	8.7	2.1	無
5B					1.9	腹板のみ
6A				15.8	3.2	無
6B					2.2	腹板, 上フランジ
7A		222	有	9.0	2.5	無
7B					1.3	腹板のみ
8A				16.2	4.2	無
8B					2.8	腹板, 上フランジ

板厚付近まで補強するように 8 枚と決定した. 本検討は CFRP が曲げ耐力補強に適用できるかの基礎的な検討を目的としているため, 簡単のため積層枚数は一律 8 枚とし, 主応力方向(水平方向)に接着した. 加えて, 腹板には主応力直角方向(垂直方向)にも同枚数を交互に接着した. これは, 2 方向に接着することで板の曲げ剛性を上げ, 局部座屈強度を向上させるためである.

表 2 曲げ耐力と最初に塑性化する箇所

試験体		1	2	3	4	5	6	7	8
A	① 曲げ耐力 (kN)	416	369	486	410	634	644	524	509
	最初に塑性する箇所	上フランジ	腹板 上部	上フランジ	腹板 上部	上フランジ	上フランジ	上フランジ	上フランジ
B	② 曲げ耐力 (kN)	599	636	493	511	899	949	583	702
	最初に塑性する箇所	上フランジ	下フランジ	上フランジ	下フランジ	上フランジ	下フランジ	下フランジ	下フランジ
耐力増加率 ②/① (%)		144%	172%	101%	125%	142%	147%	111%	138%

め, 簡単のため積層枚数は一律 8 枚とし, 主応力方向(水平方向)に接着した. 加えて, 腹板には主応力直角方向(垂直方向)にも同枚数を交互に接着した. これは, 2 方向に接着することで板の曲げ剛性を上げ, 局部座屈強度を向上させるためである.

3. 試験結果

はじめに, 曲げ耐力は全ての試験体において CFRP 補強有の方が無より大きくなった(表 2). 水平補剛材がない試験体は平均で 151%増加しているのに対し, 水平補剛材がある試験体は平均で 119%と補強効果が小さい. 水平補剛材がない場合において, CFRP による補強効果がより発揮されることがわかった.

また, 圧縮フランジの幅厚比が大きい試験体(2, 4, 6, 8)は平均で 146%増加しているのに対し, 圧縮フランジの幅厚比が小さい試験体(1, 3, 5, 7)は 125%と補強効果が小さい. 前者は圧縮フランジ下面に CFRP を接着したが, 後者は接着していないことが影響したと考えられる.

次に, 荷重を漸増させたとき, 最初に塑性化する箇所を調べた. 塑性ひずみはひずみゲージ測定値より, 材料試験で得た降伏応力に相当するひずみを閾値として判断した. 結果を表 2 に示す. CFRP 補強無では, 上フランジや腹板上部の圧縮側が先に塑性するが, CFRP 補強有では, 引張側の下フランジが先に降伏しているものもある. 下フランジが先に降伏した試験体 2B, 4B, 6B, 8B は圧縮フランジにも CFRP を接着しており, その効果により圧縮側の座屈が先行する挙動から, 引張側の降伏が先行する断面へと変化していることがわかる.

最後に, 補強効果の最も高かった試験体 2 について, CFRP 補強無で腹板の残留たわみの大きかった位置付近のひずみゲージの測定値と荷重の関係を図 2 に示す. ひずみゲージは同じ箇所の腹板の表裏に貼り付けてあり, 水平方向のひずみである. 面内成分は表裏の平均値, 面外成分は(裏-表)÷2 である. 試験体 2A は, 降伏ひずみよりもひずみが十分小さい段階においても, 面外成分ひずみが面内成分ひずみと同等程度に生じている. また, 荷重の増加と共に面外成分ひずみが面内成分ひずみよりも倍程度大きくなっている. 荷重増加により, 腹板の座屈が進行していることがわかる. 一方で, 試験体 2B は, 面外成分のひずみはほぼ 0 に抑えられていることがわかる. また, 載荷試験において, 試験体 2B の面内成分ひずみが急変することなく, CFRP は最大荷重まではく離することなく変形に追従することが確認できた. なお, 同じ箇所において鉛直方向のひずみも測定しているが, 試験体 2A で最大荷重時において面内成分ひずみが 999 μ , 面外成分ひずみが-2024 μ 発生していた. 本検討のように 2 方向に CFRP を接着することが有効であると考えられる.

4. まとめと今後予定

- CFRP 補強で曲げ耐力が向上し, 水平補剛材がない場合や, 圧縮フランジ強度が低い場合により有効である.
- CFRP 補強で圧縮側の座屈が先行する挙動から, 引張側の降伏が先行する断面へと変化させることができる.
- CFRP 補強で圧縮側の腹板の面外成分ひずみを抑えることができる.
- CFRP は最大荷重まではく離することなく変形に追従する.

今後は 1 軸対称断面の鋼桁への適用性と, CFRP 接着位置や枚数の設計方法を引き続き検討する予定である.

謝辞 実験に関しては, ものつくり大学学生の加藤慎也氏, 菊地新平氏はじめ, 橋梁・構造研究室の方々に多大な協力を得ました. ここに記して深謝いたします.

参考文献

- 1) 梶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.

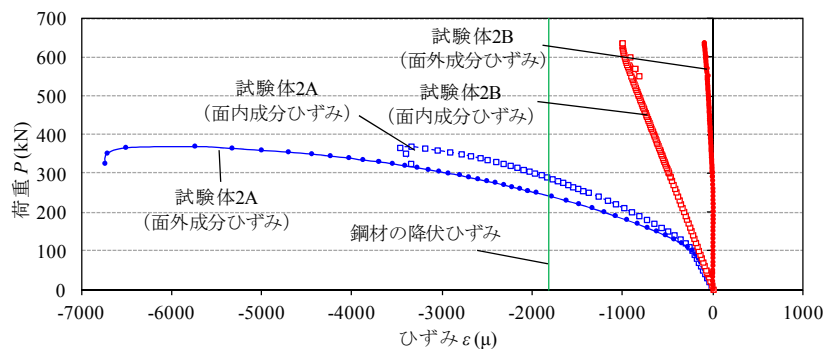


図 2 載荷荷重とひずみの関係