

CFRP を接着した鋼桁のせん断耐荷力評価方法の提案

長岡技術科学大学 学生員 ○奥山雄介, 正会員 宮下剛, 長井正嗣
 高速道路総合技術研究所 正会員 緒方辰男, 藤野和雄, 若林大
 川崎重工業 正会員 大垣賀津雄, 小出宜央
 新日鉄マテリアルズ 正会員 小林朗, 秀熊佑哉
 倉敷紡績 正会員 堀本歴

1. はじめに

鋼構造物の劣化要因の大半は腐食であり, 供用期間の経過とともに劣化の進行が避けられない. このような中, 軽量で高強度, 高い耐久性を有する繊維強化樹脂材料(以下, FRP)が鋼構造物の補修・補強材料として期待されている. この中でも特に炭素繊維に樹脂を含浸硬化させた炭素繊維強化樹脂材料(以下, CFRP と記す)の適用を検討した事例が多く報告されている¹⁾.

これまで, CFRP を鋼橋の補修・補強に適用した事例は, 軸力部材や梁のフランジに対してのみであり, 後座屈強度が期待される腹板には適用されたことはない. また, 鋼桁のせん断耐荷力については, いくつか評価手法があるものの, CFRP 補強された際の評価式は提案されていない.

そこで, 本研究では, CFRP 補強された鋼桁のせん断耐荷力評価方法の開発を行う. 具体的には, 鋼桁のせん断耐荷力算定式として広く用いられている Basler 式²⁾の拡張を CFRP の直交異方性を考慮して行い, 実際に CFRP 補強を施した小型鋼桁のせん断座屈試験結果との比較から, 提案した手法の妥当性について検証する.

2. 定式化

(1) 積層板の曲げ剛性

図-1 に示すように, 腹板の両面に, パテ層を介して CFRP が腹板の対角線方向に直交して 2 層積層されているとき, 積層板としての腹板対角線方向の曲げ剛性を厳

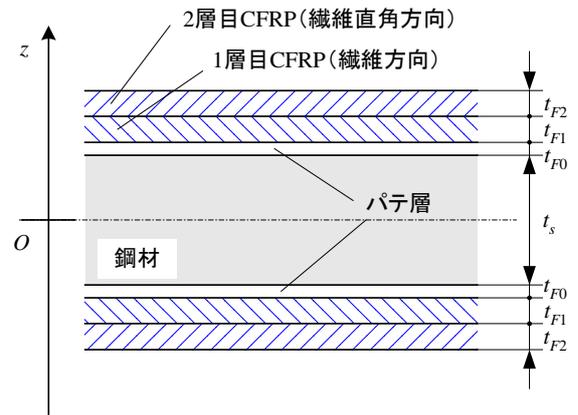


図-1 CFRP シートが 2 層接着された鋼板

密に計算すると, 式(1)のようになる.

ここで, $i = 1 \sim 2$ として, E_{F0} : パテの弾性係数, ν_{F0} : パテのポアソン比, t_{F0} : パテの厚さ, E_{Fi} : i 層目の CFRP の腹板対角線方向の弾性係数, ν_{Fi} : i 層目の CFRP のポアソン比, t_{Fi} : i 層目の CFRP の厚さを示す.

(2) 弾性せん断座屈応力度

CFRP 接着鋼桁のせん断座屈に対しては, 鋼材, パテ材, CFRP が寄与すると考えると, 弾性せん断座屈応力度 τ_{cr} は次のように求めることができる.

$$\tau_{cr} = k_s D_V \frac{\pi^2}{h_w^2 (t_w + 2t_{F0} + 2t_{F1} + 2t_{F2})} \quad (2)$$

(3) 降伏せん断強度

腹板の降伏に対しては, CFRP, パテ材は寄与せず, 鋼材のみ寄与すると考えると, CFRP 接着鋼桁の降伏せん断

$$\begin{aligned} D_V &= \int_{-t_w/2}^{t_w/2} \frac{E_s}{1-\nu_s^2} z^2 dz + 2 \int_{-t_w/2}^{t_w/2+t_{F0}} \frac{E_{F0}}{1-\nu_{F0}^2} z^2 dz + 2 \int_{-t_w/2}^{t_w/2+t_{F0}+t_{F1}} \frac{E_{F1}}{1-\nu_{F1}^2} z^2 dz + 2 \int_{-t_w/2}^{t_w/2+t_{F0}+t_{F1}+t_{F2}} \frac{E_{F2}}{1-\nu_{F2}^2} z^2 dz \\ &= \frac{E_s t_w^3}{12(1-\nu_s^2)} + \frac{2E_{F0}}{3(1-\nu_{F0}^2)} \left\{ \left(\frac{t_w}{2} + t_{F0} \right)^3 - \left(\frac{t_w}{2} \right)^3 \right\} + \frac{2E_{F1}}{3(1-\nu_{F1}^2)} \left\{ \left(\frac{t_w}{2} + t_{F0} + t_{F1} \right)^3 - \left(\frac{t_w}{2} + t_{F0} \right)^3 \right\} \\ &\quad + \frac{2E_{F2}}{3(1-\nu_{F2}^2)} \left\{ \left(\frac{t_w}{2} + t_{F0} + t_{F1} + t_{F2} \right)^3 - \left(\frac{t_w}{2} + t_{F0} + t_{F1} \right)^3 \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

キーワード

CFRP, 鋼桁, 腐食, せん断耐荷力, 後座屈強度

連絡先

〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1903-1 長岡技術科学大学 建設構造研究室 0258-47-9641

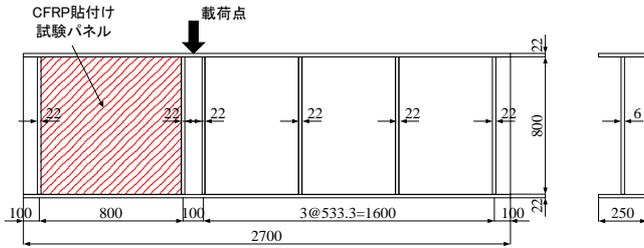


図-2 対象とする小型鋼桁

強度は、次式により求めることができる。

$$Q_y = h_w \cdot t_w \cdot \tau_y \tag{3}$$

(4) Basler 式への CFRP 寄与分の取り込み方法

CFRP 寄与分のせん断強度は、式(4)を用いる。

$$Q_u = Q_{cr} + Q_i \tag{4}$$

ここで、 Q_{cr} ：弾性せん断座屈強度、 Q_i ：斜張力場作用による座屈強度の増加分を表わしている。さらに、 Q_i の評価は、後座屈強度に対して、CFRP の引張強度を考慮するかしないかで、次のように行う。

- ・ CFRP の引張強度を考慮しない場合

$$Q_i = Q_y \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \tag{5a}$$

- ・ CFRP の引張強度を考慮する場合

$$Q_i = Q_y \frac{\sigma_y t_w + 2\sigma_{fu} t_{cf}}{\sigma_y t_w} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \tag{5b}$$

ここで、 σ_{fu} ：CFRP の繊維方向引張強度、 t_{cf} ：繊維シートの厚さ（設計値）である。ただし、式(5b)は、CFRP の繊維方向が斜張力場に対して引張方向となるように、CFRP がウェブ両面に 1 層貼付けられている場合の式である。

3. 数値計算例

3.1 計算モデル

ここでは、図-2 に示すような、桁長 2700mm、腹板高 800mm の小型鋼桁を対象とする。また、使用する繊維シートの材料特性を表-2 に示す。これらの繊維シートを繊維方向をパネル対角線方向として、試験パネル両面に接着し、せん断座屈試験を実施した。なお、バイアスシートは、±45 度方向に繊維を積層したシートである。

3.2 試験結果との比較

表-3 に本提案手法によって得られたせん断耐荷力とせん断座屈試験によって得られた最大荷重の比較を示す。また、表には、Basler 式により算出されるせん断耐荷力も合わせて示している。

表-2 繊維シートの材料特性

シート種	単位	一方向炭素繊維シート	バイアスシート
シート種	-	CE [†]	CE [†]
目付量	-	300g	150g・2方向
繊維シートの設計厚さ	mm	0.143	0.0715
繊維シートの弾性係数	繊維方向	6.40E+05	6.40E+05
	繊維直角方向	2533**	2533**
エポキシ樹脂の塗布量	kg/m ²	0.6	
エポキシ樹脂の密度	g/cm ³	1.17	
CFRP厚さ(施工値)	mm	0.656	0.328
CFRPの弾性係数(施工値)	繊維方向	1.42E+05	1.42E+05
	繊維直角方向	2533**	2533**
CFRPの弾性係数ポアソン比	繊維方向	0.3	
	繊維直角方向		

[†]: 高強性型炭素繊維
^{**}: 含浸樹脂の弾性率

表-3 計算結果まとめ

計算ケース	解析結果 (kN)		実験値 (kN)
	引張強度を考慮する場合(提案手法)	引張強度を考慮しない場合(Basler式)	
無補強鋼桁	-	1170	1182
炭素繊維バイアスシート	1262	1170	1255
一方向繊維シート	1366	1201	1328

表より、CFRP を接着したどちらのケースでも、CFRP の引張強度を考慮することで、実験値とおおむね一致した解が得られていることから、本手法によって CFRP の寄与によるせん断強度を表現できているものと考えられる。

4. まとめ

鋼桁のせん断座屈強度の評価について、Basler 式による評価方法を示し、実験結果との比較を行った。また、CFRP で補強された鋼桁腹板のせん断強度を評価できるように Basler 式の拡張を行い、実験結果との比較から、本手法の妥当性について検証した。得られた知見をまとめると次のようになる。

- 1) CFRP を接着したどちらのケースでも誤差が 5%以内であるため、本手法は、十分な予測精度を有しているものと考えられることができる。
- 2) CFRP シートの引張効果を考慮した場合、実験値との誤差が小さくなることを確認した。

以上より、本手法により、CFRP で補強された鋼桁腹板のせん断強度を評価できるということを確認した。今後は、さらに試験を追加して本手法の適用性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 中村一史, 諸井敬嘉, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫: 溶接継手に発生した疲労き裂の CFRP 板による補修, 鋼構造年次論文報告集, 第 12 巻, 日本鋼構造協会, pp425-430, 2004.
- 2) 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.