

CFRP を用いた腐食鋼桁の補修，補強方法の開発

建設構造研究室 奥山 雄介
指導教官 長井 正嗣

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．これまで鋼構造物の性能を回復させるために，ボルトや溶接による鋼板当て板補修や，損傷部材を交換する部材交換等が行なわれてきた．しかし，これらの補修・補強方法では，ボルト孔による断面欠損や溶接入熱による熱影響が生じるなど，様々な制約を受けることとなる．そのため，効果的な補修，補強工法が求められている．このような状況の中，軽量で高強度，高い耐久性を有する繊維強化プラスチック（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．

これまで，FRP を鋼橋の補修・補強に適用した事例は，軸力や曲げを受ける部材に対してのみであり，座屈変形が生じる腹板には適用されたことはない．そこで，本研究では，鋼桁腹板の補修，補強工法の確立に向けた基礎研究として，FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験と FRP を腹板に接着した鋼桁のせん断座屈試験を実施し，腹板の座屈変形に追従して強度を発現することが可能な FRP シートの選定と貼付け方法について検討する．また，FRP 補強された鋼桁のせん断座屈強度評価方法の開発，さらには，有限要素解析により鋼桁の腐食領域と耐力低下の関係について検討をおこなう．

2. FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験

2.1 試験概要

本試験では，試験体を接着する FRP の積層数で CASE1 と CASE2 に分けている．CASE1 は，鋼板の両面に FRP を 1 層貼付け，CASE2 は，鋼板両面に 2 層貼付けたケースである．実験ケースは，繊維シートの組合せ，パテ材の有無，鋼材長をパラメータとして，全 22 ケース（CASE1：42 体，CASE2：24 体，計 66 体）実施する．

2.2 試験結果および考察

荷重－中央変位関係曲線の代表例として，2CE の結果を図-1 に示す．図中の△，○印はパテ材の有無を示している．パテ材を使用していない 2CE1 では，中央変位 40mm 付近で FRP シートのはく離により，荷重が急激に低下している．これに対し，パテ材を使用した 2CE2 では，中央変位が 70mm 付近で FRP シートにはく離が生じている．これより，パテ材によって大変形に追従し，FRP シートのはく離が抑制されていることが分かる．

3. FRP 接着鋼桁のせん断座屈試験

3.1 試験概要

本試験では，無補強の試験体 1 体(G1-1)，試験体の腹板（800×800mm）の両面に繊維シートを貼付けた試験体 2 体(G1-2, G1-3)，の計 3 体についてせん断座屈試験を実施した．

繊維シートの種類と貼付け方法はそれぞれ次のようになっている．

- 1) 炭素繊維バイアスシート：腹板全面に片面 1 層貼付けとする(G1-2)．
- 2) 一方向炭素繊維シート：腹板の対角方向に片面 2 層貼付けとする(G1-3)．

なお，両ケースともに，全体の炭素繊維使用量を等しくしている．

3.2 試験結果および考察

図-2 に，各ケースの荷重-変位曲線を示す．図中の○印が各ケースの試験結果，赤の破線が Basler 式による終局せん断強度，緑の破線がせん断座屈荷重を表わしている．

図より，FRP 補強により終局強度が向上することが分かる．また，G1-3 では，最大荷重に達するまでのパネルの変形が小さいことが分かる．これに対し，G1-2 では G1-1 と同様の結果となっている．このことから，一方向炭素繊維シートを 2 層貼付けた場合には，腹板の面外変形を抑えることができるということが出来る．

4. FRP 補強された鋼桁のせん断強度予測

4.1 無補強鋼桁

無補強鋼桁のせん断座屈強度は以下の式で求めることができる．

$$Q_u = Q_y \left[\frac{\tau_{cr} + \sqrt{3} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{2}}{\tau_y} \right] \quad (1)$$

ここで， Q_y は降伏せん断座屈強度， τ_{cr} はせん断座屈応力度， τ_y はせん断降伏応力度， α は腹板のアスペクト比を示す．

4.2 FRP 補強鋼桁

FRP 補強された鋼桁のせん断座屈強度は，次のように考えることができる．

$$Q_u = Q_{cr} + Q_t \quad (2)$$

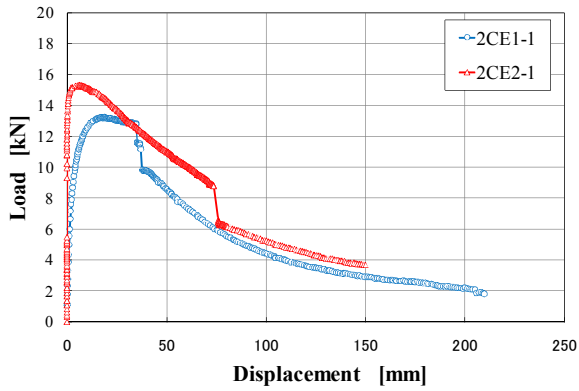


図-1 荷重-中央変位関係曲線

ここで、 Q_t : 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_t の評価は、後座屈強度に対して、FRP の引張強度を考慮するかしないかで、次のように行う。

・FRP の引張強度を考慮しない場合

$$Q_t = Q_y \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (3a)$$

・FRP の引張強度を考慮する場合

$$Q_t = Q_y \frac{\sigma_{fu} t_w + 2\sigma_{fu} t_{cf}}{\sigma_y t_w} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (3b)$$

ここで、 σ_{fu} : FRP の引張強度、 t_{cf} : 繊維シートの厚さ (設計値) である。

4.3 数値計算例

式(1)および式(2)を用いて、G1-1、G1-2、G1-3 について、数値計算を実施する。せん断座屈強度の計算結果を以下に示す。なお、() 内の数値は実験により得られた最大荷重である。

- G1-1 : 1171kN (1182kN), 誤差 = 0.9%
- G1-2 : 1262kN (1255kN), 誤差 = -0.55%
- G1-3 : 1366kN (1328kN), 誤差 = -2.8%

以上より、本手法を用いることで、FRP 接着鋼桁のせん断強度を精度よく評価できると言える。しかしながら、比較対象とした試験は、各ケース 1 体のみであるため、さらに試験体数を追加して、本手法のさらなる検証が必要であると考えられる。また、FRP の引張強度に関しては、実測値を用いているため、実際に設計に用いる場合には、実測値ではなく、基準値を用意する必要があると考える。

5. 有限要素解析

腹板パネルの腐食状態とせん断耐荷力の低下量の関係については、研究事例が少なく、明確でないことから、この関係を FEA により明確にし、腹板の合理的な補修、補強方法について検討する。

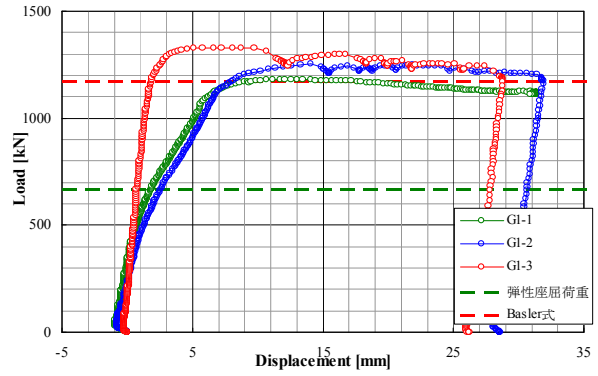


図-2 荷重-変位曲線

5.1 解析モデル

腐食形状は、矩形腐食 (腐食形状 I) と三角形腐食 (腐食形状 II) の 2 種類とする。腐食パラメータは、腐食高さ : h (mm)、腐食幅 : W (%), 残存板厚 : t_w (mm) の 3 種類であり、腐食形状 I では全 72 ケース、腐食形状 II では全 36 ケースで解析を実施する。

5.2 解析結果

腐食部の残存板厚が、2mm や 0mm といった腐食が著しいケースでは、腐食幅が大きくなるにつれて、耐力が大きく低下し、最も腐食の厳しいケースでは、約 30% の耐力低下が見られた。また、どちらの腐食形状でも、腐食領域の小さいケースでは、耐力の低下はほとんど見られないが、腐食領域が大きく、特に腐食領域と斜張力場が重なるような腐食形状では、耐力の低下が大きいことが確認できた。

6. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) FRP 接着鋼板の弾性座屈荷重は、最外層の FRP シート長さが同一の場合、その引張剛性に比例して増加することが確認された。
- 2) 鋼板と FRP シートの間にパテ材を挿入することで、FRP シートのはく離を抑制し、十分な補強効果を発揮することが分かった。
- 3) FRP シートには補修・補強効果があり、その終局強度は、Basler 式を修正した評価式を用いることで、精度良く評価できることが確認された。
- 4) 腐食領域と耐荷力の関係を把握するために実施した FEA により、腐食領域の小さいケースでは、耐力の低下はほとんど見られないが、腐食領域が大きく、特に、斜張力場に腐食領域が重なるようなケースでは、耐力の低下が大きいことが分かった。

今後の課題としては、シートの貼付け方法や異種繊維の組合せ等を考慮したせん断座屈試験の実施および実際に腐食を模擬した試験体に対して FRP による補修・補強を行った試験体でのせん断座屈試験の実施といったことが挙げられる。