<総 説>

(受理:平成 21 年 1 月 7 日)

鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の現状と課題

The Current Situation and Issues of Repair and Strengthening of Steel Bridges by Bonding CFRP Strips

石川 敏之*
Toshiyuki ISHIKAWA

1. はじめに

2007 年 6 月, 国道 23 号線の本曾川大橋のトラス斜材が腐食により破断した。同年 8 月には, 国道 7 号線の本荘大橋でも同様な部材の破断が生じた。さらに米国において, 2007 年 8 月に, 鋼トラス橋が落橋した。このような状況を受け, 国内外を問わず, 鋼橋の維持管理の重要性が再認識されている。

鋼橋の補修・補強として, 例えば腐食による断面欠損を補う場合, 鋼板を, 高力ボルトを用いて接合する工法が一般に行われる。このような鋼板のボルト接合では, 足場の設置や接合作業に多大なコストと労力が掛かるため, 大きな損傷が生じている場所のみに適用され, 腐食損傷が小さい場所は, 再塗装を行う程度で, 補修が行われない場合がある。

これに対して, 鋼部材の応力の低減あるいは断面欠損を補うための簡易な補修・補強法として, 引抜成形された炭素繊維強化樹脂板 (CFRP 板) を接着する方法が提案されており, それに関する研究が盛んに行われている^{1~10)}。この工法では, CFRP 板が軽いため現場でのハンドリングが良く, さらに接着作業に特別な機械や技能が必要ないことなどの利点があるため, 工事期間の大幅な短縮が可能である¹¹⁾。しかし, 鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の事例はまだ少ない。これは, CFRP 板のはく離を防止する設計法が確立されていないため, 接着強度やその耐久性に対する懸念がその要因の一つであると考えられる。

本稿では, 国内外において実施された鋼橋の CFRP 板

接着補修・補強の事例を紹介する。さらに, 鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の設計に対する課題について述べる。

2. 鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の事例

現在, CFRP 板接着による鋼橋の補修・補強は, 国内外で試験的に行われている。本章では, それらの事例および事前に実施された試験を紹介する。

2.1 国内の事例

我が国では, 2002 年に宮城県の桜の目橋 (図 1) において, 設計荷重の変更に伴って横桁が CFRP 板接着補強

図 1 桜の目橋

石川 敏之

略歴: 2005 年 9 月大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程修了後, 大阪大学にて特任研究員に従事し, 2007 年 8 月より現職。1998 年~2002 年まで, 橋梁メーカーにて研究開発に従事。
専門: 鋼橋の維持管理, 橋梁工学, 鋼構造学

* 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻
愛知県名古屋市千種区不老町 〒464-8603
Department of Environmental Engineering and Architecture,
Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan

図2 横桁下フランジへのCFRP板接着補強

図3 浅利橋

図4 トラス下弦材のCFシート接着補修

されている¹¹⁾。この橋では、横桁の下フランジ下面に幅200mm、長さ2100mmに渡って厚さ1.2mm、ヤング率155GPaのCFRP板が10枚接着され、24~48時間の養生後、塗装が施されている。CFRP板10枚は、工場で積層接着されている。補強された横桁の下面を図2に示す。この橋のCFRP板接着補強の設計を行うために、下フランジ下面にCFRP板が接着された鋼桁の曲げ試験が行われ、主桁の応力がCFRP板と鋼桁を完全合成した場合の計算値まで低減されていること、CFRP板がはく離したときの荷重が鋼桁の降伏荷重に達した後であることが確認されている¹⁾。

他方、中央自動車道の浅利橋（鋼トラス橋：図3）では、

トラス下弦材の腐食による断面欠損を補うために、複数枚の炭素繊維シート（CFシート）接着による補修が行われている¹²⁾。CFシート接着補修では、エポキシ樹脂を含浸させながら複数枚のCFシートを部材に接着しているため、エポキシ樹脂の硬化後は、CFRP板と同様な部材になる。浅利橋では、トラス下弦材の上フランジとウェブへ、ヤング率640GPa、換算厚さ0.143mmのCFシートが、腐食の大きさに合わせて、CFシートの端が健全部になるように適宜接着されている。CFシートの接着状況を図4に示す。CFシート接着補修においても、CFRP板接着と同様に鋼部材の弾性範囲内ではく離が生じる場合があるため¹³⁾、浅利橋のCFシート接着補修を行うために、CFシート接着による鋼部材の応力の低減および、はく離に関する実験が行われている¹²⁾。さらに、各CFシートの端部を25mmずらして接着することにより、端部を揃えた場合と比べて接着剤に生じるせん断応力を低減させる工夫を施している。

2.2 海外の事例

アメリカのデラウェア州において、プレートガーダー橋の主桁の引張りを受ける下フランジの下面へ、幅222mm（幅37mm×6枚）、厚さ5.25mm、ヤング率112GPaのCFRP板接着補強が試験的に行われている¹⁴⁾。この橋では、接着剤の養生のために、CFRP板が接着された桁の直上の車線のみ8時間、通行止めされている。また、CFRP板と鋼桁との電解腐食を防止する目的で、CFRP板と鋼桁との間にガラス繊維シート（GFシート）が挿入されている。実橋の補強を行う前に、CFRP板接着の耐久性を確認するために、引張りを受ける下フランジの下面にCFRP板が接着された鋼桁の疲労試験が行われており、実際の橋の下フランジに生じている程度の応力範囲 $\Delta\sigma = 34\text{MPa}$ を1000万回繰返し与えた後、鋼桁の弾性範囲内の荷重を載荷してCFRP板が力を担っていることが確認されている。さらに、CFRP板接着鋼板の引張り疲労試験（ $\Delta\sigma = 82.5\text{MPa}$ で255万回繰返し載荷）も実施され、CFRP板がはく離していない事が確認されている¹⁴⁾。

アメリカのアイオワ州においても、プレートガーダー橋の主桁の引張りを受ける下フランジの上下面へのCFRP板接着補強が試験的に行われている¹⁵⁾。この橋では、ヤング率が138GPaのCFRP板を、長さ6.0~7.6m、接着枚数1~3枚および下フランジの下面（図5の左のパターン）のみあるいは上下面（図5の中央のパターン）へ接着するなど、1つの橋で様々なCFRP板接着の方法が試験的に適用されている。施工完了後も、環境による影響などの計測が予定されている¹⁵⁾。

イギリスでは、ロンドンの地下鉄のActon橋（鉄道橋）の横桁下フランジ下面（図6参照）へのCFRP板接着補強が行われている¹⁶⁾。この橋では、横桁が直接列車の荷重

図5 プレートガーダー橋の主桁へのCFRP板接着の例

図6 鉄道橋横桁へのCFRP板接着

を受ける部材になる。橋梁下面からのCFRP板接着の利点の一つとして、通行止めを行わずに補修・補強できることが挙げられる。Acton橋では、頻繁に列車が往来するため、列車を運行しながらCFRP板が確実に接着されることを検証するために、H形鋼の下フランジにCFRP板を接着し、養生中(24時間以上)に0.25Hzで繰返し荷重を与える試験を行っている¹⁶⁾。

3. CFRP板接着補修の設計に対する課題

第2章で紹介したCFRP板接着補修・補強の事例では、鋼桁とCFRP板が完全に合成されている状態、すなわち鋼桁とCFRP板の完全合成理論により、鋼桁の応力が所定の値まで低減されるように、CFRP板の材料選定および接着枚数が設計されている。CFシート接着でも同様に、CFシートの材料および接着枚数を設計できる。さらにCFRP板がはく離しないことを大型試験等によって確認した後、実橋に適用されている。

しかし、鋼桁のCFRP板接着補修・補強では、鋼桁の断面力が接着剤のせん断力を介してCFRP板へ伝達される際、断面力が部材の軸方向に沿って徐々に伝達される現象(せん断遅れ現象)が生じるため、CFRP板の端部近傍において鋼桁の応力が完全合成理論で与えられる値まで低減しない。さらにCFRP板の接着箇所、使用する接着剤および接着面の状態によっては、鋼桁が降伏あるいは設

計荷重に達する前にCFRP板がはく離する場合がある。また、これまでの様にCFRP板接着補修・補強を行う度に、鋼桁の応力の低減やCFRP板のはく離強度を確認するような実橋の補修・補強を再現した大型試験を行うことは現実的ではない。

したがって、鋼部材の応力が設計の値まで低減されるCFRP板の接着長さを設計する方法、およびCFRP板が設計荷重下ではく離しないように設計する方法の確立が、今後、鋼橋のCFRP板接着補修が広く利用されるための課題であろう。

4. 鋼橋のCFRP板接着補修・補強の設計

本章では、第3章で述べた、CFRP板の接着長さおよびCFRP板のはく離の防止について、これまでに行われてきた研究の成果を踏まえて、鋼桁のCFRP板接着補修・補強の設計法について述べる。

4.1 鋼桁の応力を低減させるCFRP板の接着長さの設計

鋼桁の下フランジの下面にCFRP板が接着される場合に対して、図7に示す断面力のつり合いが、鋼桁の断面力が接着剤を介してCFRP板へ伝達されるモデルとして用いられる^{5, 17, 18)}。すなわち、CFRP板と鋼桁が断面力を受け持ち、接着剤がせん断応力と垂直応力を受け持つと仮定し、次式の鋼桁が分担する軸力 N_s およびせん断力 V_s に対する微分方程式が導出される。

$$\frac{d^2 N_s}{dx^2} - c^2 N_s = c^2 \frac{K_1}{a} M + c^2 \frac{K_1 Z_1}{a^2} E_s I_s (\alpha_s - \alpha_c) \Delta T \quad (1)$$

$$\frac{d^4 V_s}{dx^4} + 4\omega^4 V_s = \frac{4\omega^4}{Z_1} \left[Q + J \frac{dN_s}{dx} \right] \quad (2)$$

ここに、 $c = \sqrt{bG_c a^2 / (hE_s I_s Z_1 K_1)}$ 、 $K_1 = 1 / \{ (r_s/a)^2 Z_1 Z_2 + 1 \}$ 、

図7 下フランジ下面にCFRP板が接着された鋼桁の微小区間の力のつり合い

$r_s = \sqrt{I_s/A_s}$, $Z_1 = 1 + bt_c^3/(12nI_s)$, $Z_2 = 1 + nA_s/(bt_c)$, $n = E_s/E_c$, $\omega = 1/t_c \cdot \sqrt[4]{3Z_1E_et_c/(E_ch)}$, $J = t_c/2 - (Z_1 - 1)d_s$, E_s , A_s , I_s : それぞれ, 鋼桁のヤング率, 断面積および断面2次モーメント, d_s : 鋼桁の中立軸から鋼桁下フランジ下面までの距離, E_c , t_c , b : それぞれ, CFRP板のヤング率, 厚さおよび幅, E_e , G_e , h : それぞれ, 接着剤のヤング率, せん断弾性係数および厚さ, a : 鋼桁とCFRP板の図心間の距離, α_s , α_c : それぞれ, 鋼およびCFRP板の線膨張係数, ΔT : 温度変化量 (温度上昇を正とする), M , Q : CFRP板が接着された鋼桁に生じる曲げモーメントとせん断力。ただし, 接着剤の厚さは鋼桁の高さやCFRP板の厚さと比べて非常に小さいため, CFRP板の図心間の距離を $a = d_s + t_c/2$ としている。

境界条件を与えて, 式(1)を解き, その解を式(2)へ代入して N_s および V_s が導出される。さらに次式から, 鋼桁が分担する曲げモーメント M_s が与えられる。

$$M_s = \frac{1}{Z_1}(M - N_s a) + \frac{1}{4\omega^4} \frac{d^3 V_s}{dx^3} \quad (3)$$

このようにして導出された鋼桁の分担断面力 (N_s , V_s , M_s) の式には, 一般に, $\sinh(cl)$, $\cosh(cl)$ あるいは $\tanh(cl)$ が含まれる。 cl は, せん断遅れ現象を支配するパラメータであり, cl の値がある一定以上になると鋼桁の断面力がCFRP板へ十分伝達される。したがって, CFRP板の接着長さ l_{req} は, 図8を参照して, 補修される部分の長さ l_r にせん断遅れ現象が生じている長さ l_{sl} を付加して次式で設計する必要がある。

$$l_{req} = l_r + 2l_{sl} \quad (4)$$

図8 下フランジ下面の応力分布の概念図

ここに, l_{req} : CFRP板の必要接着長さ, l_r : 鋼桁応力を低減させる範囲, $l_{sl} = \zeta/c$: せん断遅れ現象によって鋼桁応力が設計値まで低下しない範囲, ζ : 無次元パラメータ。

鋼桁の断面力がCFRP板へ十分伝達される値は, 鋼桁, CFRP板および接着剤の材料定数や寸法によって異なるが, ζ の値が10程度になると, 鋼桁の応力がほぼ設計値に収束する。ただし, CFRP板が積層接着される場合および複数のCFシートが接着される場合では, 各CFRP板間および各CFシート間の接着剤層においてもせん断遅れが生じるため, 安全率を含め, それらを考慮した ζ の値を決定する必要がある。

4.2 CFRP板のはく離を防止する設計

鋼桁, CFRP板の弾性範囲内におけるCFRP板のはく離を防止する設計式として, 次式が提案されている^{19, 20)}。

$$\frac{\sigma_{pe}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{pe}}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \leq \frac{\sigma_p}{\gamma} \quad (5)$$

ここに, σ_{pe} : CFRP板の端の接着剤に生じる垂直応力, τ_e : CFRP板の端の接着剤に生じるせん断応力, σ_p : 接着剤のはく離強度, γ : 安全率。

式(5)は, CFRP板の端の接着剤に生じる主応力がある値に達したときにはく離すると仮定し, 安全率が考慮された設計式である。著者は, 図9に示す試験を行い, CFRP板の端の接着剤に生じる垂直応力が, 圧縮になる場合と引張りになる場合の両極端なケースに対して, CFRP板がはく離 (鋼板とCFRP板の弾性範囲内) したときのCFRP板の端の接着剤に生じる主応力 (式(5)の左辺) が両者でほぼ同じになることを明らかにしている^{21, 22)}。したがって, 鋼桁とCFRP板の弾性範囲内におけるCFRP板のはく離を防止する設計式として式(5)が利用できると考えられる。

Schnerchらは, 実際に使用する材料および接着面の状態を考慮した1面あるいは2面の引張りせん断接着強さの結果を σ_p に用いることを提案している。ただし, σ_p の値は, 繰返し荷重作用下や温度環境によっても変化すると考えられるので^{23, 24)}, 実際に適用される条件に合わせて, σ_p の値を与える試験方法やその設計値を明らかにし, 適切な

(a) 試験体の寸法

図9 CFRP 板接着鋼板の板曲げ試験

安全率 γ を設ける必要がある。

CFRP 板が接着された鋼桁では、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は、両者ともに CFRP 板の端で最大になる。例えば、図 8 に示すようなモーメント M_0 , M_1 ($M_0 \geq M_1$) が作用し、CFRP 板の接着長さが式 (4) を満足する程度に長い場合、CFRP 板の端の接着剤に生じるせん断応力 τ_e と垂直応力 σ_{ye} の最大値は、 M_0 が作用している側 ($x = 0$) に生じ、それぞれ次式で与えられる。

$$\tau_e = \left\{ 1 - \frac{1 - M_1/M_0}{cl_{req}} \right\} \frac{cK_1}{ba} M_0 \quad (6)$$

$$\sigma_{ye} = \left[\frac{4}{4 + (c/\omega)^4} \left\{ 2 - \frac{c}{\omega} + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 \right\} + 2 \left\{ \left(\frac{\omega}{c} - \frac{1 - M_1/M_0}{cl_{req}} \right) (Z_1 - 1) - \frac{a}{JK_1} + \frac{1 - M_1/M_0}{cl_{req}} \right\} \right] \frac{c\omega JK_1}{baZ_1} M_0 \quad (7)$$

これらの式から分かるように、CFRP 板の端の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は共に、CFRP 板の端の位置の作用曲げモーメント M_0 に比例する。したがって、設計荷重範囲内で CFRP 板のはく離を防止するために、CFRP 板の端の位置を曲げモーメントが小さい範囲へ設けることが有効である。

CFRP 板が接着された鋼桁が温度変化 ΔT を受け、鋼と CFRP 板の線膨張係数が異なる場合、CFRP 板の端の接着剤に次式で与えられる、せん断応力 τ_{eT} と垂直応力 σ_{yeT} が生じる。

$$\tau_{eT} = \frac{cK_1Z_1}{ba^2} E_s I_s (\alpha_s - \alpha_c) \Delta T \quad (8)$$

$$\sigma_{yeT} = \frac{4}{4 + (c/\omega)^4} \left\{ 2 - \frac{c}{\omega} + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 \right\} \times \frac{c\omega JK_1}{ba^2} E_s I_s (\alpha_s - \alpha_c) \Delta T \quad (9)$$

これらの式から算出される、CFRP 板が接着され、接着剤が硬化したときからの温度変化によって生じる τ_{eT} と σ_{yeT} も、式 (5) の CFRP 板のはく離を防止する設計の際に考慮する必要がある。

他方、図 10 に示すような CFRP 板の端にテーパやステップを設けること^{20, 25, 26)}、CFRP 板よりも剛性の小さなガラス繊維シート (GF シート) を CFRP 板と鋼桁の間に挿入すること⁷⁾、ならびに CFRP 板の端近傍のみに低弾性の接着剤を塗布すること^{9, 26)} などの接着剤に生じる応力を低減させる工法の適用も、CFRP 板のはく離を防止するためには有効である。

5. まとめ

本稿では、鋼橋の簡易な補修・補強法として期待されている CFRP 板接着の適用事例の紹介と、CFRP 板接着補

図10 CFRP 板の端の接着剤に生じる応力を低減させる工法

修・補強の課題とその設計法について言及した。現在、鋼橋の CFRP 板接着補修・補強は、まだ試験的に行われている段階で、その事例は少ない。しかし、今後、補修・補強が必要になる鋼橋が増加すると予想されているので、比較的簡易にそして施工期間の短縮が可能になる CFRP 板接着が適用されると考えている。

謝辞

首都大学東京の中村一史先生、並びに日鉄コンポジット(株)の小林朗氏に、実橋への CFRP 板接着の適用事例の写真をご提供頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 渡邊憲市, 板垣一也, 鈴木博之, 鋼構造年次論文報告集, 8, 679 (2000).
- 2) 鈴木博之, 永崎央陽, 遠藤勇一, 池田圭一, 鋼構造年次論文報告集, 8, 683 (2000).
- 3) R. Sen, L. Liby and G. Mullins, *Composites: Part B*, 32, Issue 4, 309 (2001).
- 4) 野阪克義, 金子大昨, 古川喬朗, 鈴木研二, 西出 靖, 鋼構造論文集, 10, No. 38, 61 (2003).
- 5) J. Deng, M. M. K. Lee, S. S. J. Moy, *Composite Structures*, 65, 205 (2004).
- 6) 中村一史, 諸井敬嘉, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫, 鋼構造年次論文報告集, 13, 89 (2005).
- 7) 石川敏之, 大倉一郎, 喜多伸明, 構造工学論文集, 52A, 1317 (2006).
- 8) 姜 威, 中村一史, 鈴木博之, 前田研一, 入部孝夫, 鋼構造年次論文報告集, 14, 595 (2006).
- 9) 石川敏之, 西田貴裕, 大倉一郎, 横田季彦, 齊藤 誠, 構造工学論文集, 54A, 842 (2008).
- 10) 松村政秀, 北田俊行, 久部修弘, 構造工学論文集, 54A, 834 (2008).
- 11) 板垣一也, 渡邊憲市, 鈴木博之, 第 8 回鋼構造の補修・補強技術報告論文集, 49, (2002).
- 12) 杉浦 江, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣, 小林 朗, 第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム論文集, 56-1 (2007).
- 13) 杉浦 江, 大垣賀津雄, 長井正嗣, 小林 朗, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム論文集, 48-1 (2005).
- 14) T. C. Miller, M. J. Chajes, D. R. Mertz and J. N. Hastings, *Journal of Bridge Engineering*, 6, Issue 6, 514 (2001).
- 15) B. M. Phares and T. J. Wipf, *Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, (2003).
- 16) S. S. J. Moy and A. G. Bloodworth, *Structures & Buildings*, 160, Issue SB2, 81 (2007).
- 17) S. T. Smith, J. G. Teng, *Engineering Structures*, 23, 857 (2001).
- 18) 西田貴裕・石川敏之・大倉一郎, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 62, 535 (2007).
- 19) J. Deng, M. M. L. Lee, *Composite Structures*, 78, 222 (2007).
- 20) D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla and E. Sumner, *Construction and Building Materials*, 21, 1001 (2007).
- 21) 石川敏之, 佐々木裕, 山田健太郎, 日本接着学会第 46 回年次大会講演要旨集, 213 (2008).
- 22) 石川敏之, 佐々木裕, 山田健太郎, 応用力学論文集, 11, 903 (2008).
- 23) 山谷佑介, 姜 威, 中村一史, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 伊原啓裕, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 63, 931 (2008).
- 24) M. Bocciarelli, P. Colombi, G. Fava and C. Poggi, *Composite Structures*, 83, 334 (2009).
- 25) J. Deng and M. M. K. Lee, *Composites: Part B*, 39, 731 (2008).
- 26) 小村啓太, 石川敏之, 大倉一郎, 横田季彦, 齊藤 誠, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 62, 537 (2007).
- 27) M. D. Fitton and J. G. Broughton, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25, 329 (2005).