

第I部門

エネルギー解放率の収束に基づいた CFRP 積層接着補修鋼板の段差長の設計

京橋ブリッジ(株) 正会員 ○水谷 壮志

関西大学 正会員 石川 敏之

1. はじめに

鋼橋の腐食や疲労の対策として炭素繊維強化樹脂 (CFRP) を当て板に用いた接着補修・補強工法がある¹⁻³⁾。CFRP 接着補修では、はく離荷重の向上を目的に、図-1 のように CFRP の端部に段差を設けて積層する場合がある。

土木学会の指針 (案)⁴⁾では、段差を設けた範囲は定着長に含まずに端部処理範囲とすること、はく離の照査は1段目のエネルギー解放率で行うことが示されている。同指針では、定着長は理論式で設計できるが、段差長に対する理論式は示されていない。

指針 (案)⁴⁾の設計方法とは異なるが、理論的に各段差を設計する方法も提案されている。文献 2)では一軸引張を受ける鋼板に剛性の等しい CFRP を積層して補修する場合の設計方法が示される。CFRP が1層接着された場合の定着長を各段差長へ拡張しているため、各段差長は各段差部で鋼板軸力が収束する長さとしている。しかし、端部処理範囲では各段差で鋼板軸力を収束させるような段差長は必要なく、過剰な接着長になる可能性が考えられる。

本研究では、図-1 に示す多層の CFRP が段差を設けて積層された一軸引張を受ける鋼板を対象に、1段目のエネルギー解放率が収束する段差長に着目した設計方法を提案する。

2. エネルギー解放率の算出方法

本研究では、指針 (案)⁴⁾に従い1段目のエネルギー解放率をはく離照査に用いる場合について考える。エネルギー解放率は接着剤に生じるせん断応力の近似解を用いて次式で与えられる³⁾。

$$G = h / (2G_e) \cdot \tau_e^2 \quad (1)$$

ここに、 G : エネルギー解放率、 τ_e : せん断応力の近似解、 h : 接着厚さ、 G_e : 接着剤のせん断弾性係数。

本研究では、エネルギー解放率が収束するために必要な段差長を求めるために、せん断応力の近似解の収束を考える。

3. 近似解のせん断応力が収束する長さ

図-1 のような計算モデルでは近似解に基づく数値解析手法⁴⁾が提案されている。数値解析により1段目の接着剤端部に生じるせん断応力を求めることができる。1段目の接着剤

端部に生じるせん断応力および段差長の関係を図-2 に示す。図の横軸は各段差の段差長さであり、縦軸は数値解析による1段目の接着剤端部に生じるせん断応力を次式に示すせん断応力の近似解の収束値で除した値である。

$$\overline{\tau_{e1}} = c / (2b_c) \cdot (1 - \xi_0) A_s \sigma_{sn} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{2b_c h / \{G_e (1 - \xi_1) E_s A_s\}}, \quad \xi_1 = 1 / (1 + 2E_c A_c / E_s A_s).$$

ここに、 b_c : 接着幅、 E_s : 鋼板のヤング係数、 A_s : 鋼板の断面積、 E_c : CFRP のヤング係数、 A_c : CFRP の断面積。

図-2 では、CFRP を5層積層したモデルを計算しており、計算例に用いた材料定数や部材寸法は図-2 の上部に示している。ここで、定着長の長さは力の伝達が十分に行われる $l_f = 200\text{mm}$ としている。

図-2 において、文献 4)の数値解析によるせん断応力の収束度と各段差の段差長の関係は◆で示している。図より、各段差長が長くなるほど η が1に近づくことから、数値解析により得られる1段目の接着剤端部のせん断応力が式(2)の値に収束することがわかる。

一方、2層の CFRP が積層されている場合のせん断応力の近似解は理論解が与えられている⁵⁾。文献 5)に対して、各層の CFRP および接着剤がそれぞれ等しく、2層目の長さを無限大とすることで1段目の接着剤端部に生じるせん断応力の近似解 τ_{e1} は次式で表すことができる。

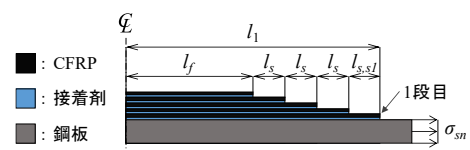


図-1 多層のCFRPが接着された一軸引張を受ける鋼板

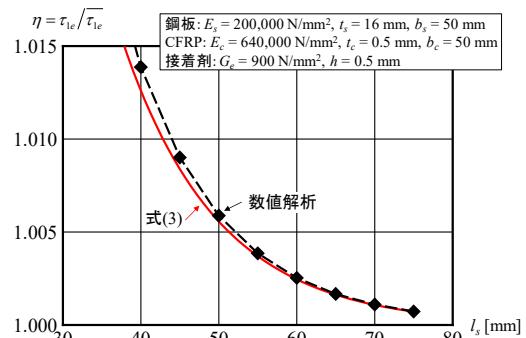


図-2 せん断応力の収束度と段差長の関係

表-1 本研究と文献2)の比較

CFRP		剛性比		本研究			文献2)		
板厚 t_c [mm]	積層数 n	CFRP1 層 ξ_1	CFRP 全層 ξ_n	段差長 式(5) l_s [mm]	接着半長さ l_1 [mm]	収束度 η	段差長 l_{s1} [mm]	接着半長さ l_1 [mm]	収束度 η
0.2	2	0.926	0.862	36	81	1.0048	29	69	1.0113
0.2	5	0.926	0.714	36	251	1.0051	36	291	1.0049
0.5	5	0.833	0.500	53	383	1.0046	65	519	1.0016

$$\tau_{le} = \frac{c}{2b_c} (1 - \xi_1) \frac{X_1 + X_2 \tanh(cl_{s1}) + X_3 / \cosh(cl_{s1})}{X_1 \tanh(cl_{s1}) + X_2} A_s \sigma_{sn} \quad (3)$$

ここに, $X_1 = 1 + \sqrt{\xi_1(1 - \xi_1)}$, $X_2 = \sqrt{1 + 2\xi_1 + 2\sqrt{\xi_1(2 - \xi_1)}}$, $X_3 = \xi_1^2 / \sqrt{\xi_1(1 - \xi_1)}$, l_{s1} : 1 段目の長さ.

図-2 に式(3)を式(2)で除した値を赤の実線で示している. 図より, 数値解析の結果と式(3)がおおむね一致していることがわかる. 本研究では多層の CFRP が接着された場合の 1 段目の接着剤端部に生じるせん断応力が式(3)で近似できると考え, 式(3)が式(2)に収束する長さを導出する.

式(4)の l_{s1} を l_{sreq} , 式(3)を式(2)で除した値を η_i として, l_{sreq} について解くと必要段差長が次式で得られる.

$$l_s \geq l_{sreq} = \frac{1}{c} \cosh^{-1} \frac{(\eta_i X_2 - X_1) X_3 + (X_2 - \eta_i X_1) \sqrt{X_3^2 - (\eta_i^2 - 1) \xi_1^2}}{(\eta_i^2 - 1) \xi_1^2} \quad (4)$$

ただし, $\eta_i > 1$, $X_2 / \xi_1 > \eta_i / \sqrt{\eta_i^2 - 1}$ である. 段差長 l_s を設計するためには η_i に 1 より大きい 1 に近い数値を設定する必要がある. 本研究では, 式(3)のせん断応力が式(2)の収束値に対して 1.005 倍となるとき 1 段目の長さを必要段差長 l_{sreq} とする. エネルギー解放率を算出するには式(1)のようにせん断応力が 2 乗されるため, $\eta_i = 1.005$ とするとエネルギー解放率の収束値に対して 1% 大きい値 ($\eta_i^2 \approx 1.01$) となる. また, ξ_1 は積層接着において考えられる範囲の $0.5 \leq \xi_1 < 1.0$ とする.

式(4)の必要段差長は煩雑な形であり, 設計の際に実用的に用いることが難しいと考えられる. そこで, 式(4)の必要段差長 l_{sreq} を簡易的に近似した次式を与える.

$$l_{sreq} = 1/c \cdot \cosh^{-1}(A_1 \xi_1 + A_2) \approx 1/c \cdot \cosh^{-1}(64 \xi_1 - 17) \quad (5)$$

ここに, A_1 , A_2 は未定係数であり, 本研究では, $\eta_i = 1.005$ の条件のもと $\xi_1 = 0.5, 1.0$ で式(4)と一致するように決定した. 段差長は 1mm 以上の単位で算出すると考え, 式(5)では未定係数を整数にまるめている.

4. 提案式の検証

提案した式(5)を用いて段差長を設計し, 文献 2) の設計法と比較する. 検証には数値解析を用いた. 表-1 に示す計算例に対して数値解析を実施し, 得られた 1 段目の接着剤端部に生じるせん断応力を式(2)で除した値を収束度 η として示している. 表に示していない各部材の材料定数および寸法は図-2 の計算モデルと同じである.

本研究における定着長は文献3)を参考に, n 層の CFRP が端部を揃えて積層されている場合のせん断変形を考慮した定着長を算出している. また, 文献2)では, 各段差長で力の伝達を考慮しており, 各段差で必要段差長が異なる. このため, 表-1 では 1 段目の接着剤端部のせん断応力に関する 1 段目の段差長 l_s , l_{s1} および各段差長および定着長の和である 1 層目の CFRP の接着半長さ l_1 を示している.

式(5)による段差の設計では $\eta_i = 1.005$ としており, 表-1 の本研究の収束度より, すべての計算結果がよく一致していることがわかる. また, $t_c = 0.2$ の $n = 2, 5$ より積層数 n が増加しても式(10)の段差長が有効なことがわかる.

文献2)の $t_c = 0.2$, $n = 2$ の計算結果 ($\eta = 1.0113$) より, 文献2)の設計は積層数が少なく CFRP1 層の剛性比 ξ_1 が 1 に近い場合に 1 段目の段差長が短く算出されせん断応力が収束しない. また, その他の計算結果より, 文献2)の設計法は本研究よりもせん断応力の収束値は 1 に近いが, 段差長が長く算出されていることがわかる. 以上より, 1 段目の離照査に用いるエネルギー解放率やせん断応力を収束させるための段差を設計する方法として本研究の提案は有用であるといえる.

5. おわりに

本研究では 2 層の CFRP が段差を設けて積層された場合の 1 段目の接着剤に生じるせん断応力と 1 段目の長さの関係式を示し, せん断応力が収束するために必要な段差長を導出した. いくつかの計算モデルにより, 提案手法が従来の設計手法より有用であることを示した.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 石川敏之, 宮下剛: 一軸引張を受ける CFRP 板接着鋼板に対する段差の設計法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.351-359, 2011.
- 3) 水谷壮志, 石川敏之, 宮下剛, 秀熊佑哉: 複数の段差を有する CFRP 接着鋼板のエネルギー解放率, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.5, pp.II_38-II_49, 2020.
- 4) 宮下剛, 長井正嗣: 一軸引張を受ける多層の CFRP が積層された鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.239-249, 2010.
- 5) 石川敏之, 大倉一郎, 小林啓太: CFRP 板の端部に段差を設けることによるはく離荷重向上の理論解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.362-367, 2009.