

断面欠損を有する鋼板の CFRP 板接着補修

京都大学 正会員 ○石川 敏之 名古屋大学 正会員 北根 安雄

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂板(CFRP 板)接着による腐食鋼部材の補修では, 一般に, CFRP 板と腐食鋼部材が完全合成断面を構成すると仮定し, その場合の鋼板腐食部断面に生じる応力が, 健全部の応力と同等以下に低減されるように CFRP 板の断面が設計される. しかし, このように設計された場合でも, 補修された鋼板の剛性が健全な状態まで回復していない場合があることが報告されている¹⁾. 本研究では, 腐食鋼部材の CFRP 板接着による補修設計を行うための基礎的な研究として, CFRP 板が接着された断面欠損を有する鋼板が軸力を受ける場合について, 理論解析を行い, 断面欠損を有する鋼板が機能回復するための CFRP 板の必要接着長さおよび板厚を明らかにする.

2. 鋼板に生じる応力

図-1 に示す, 断面欠損を有する鋼板の上下面に対称に CFRP 板を接着したモデルを考える. 接着剤はせん断力のみを伝達し, CFRP 板および鋼板は軸力のみを担うと仮定する. 微小区間の水平方向の力のつり合いから導出される2つの2階の微分方程式に対して, 図-1 を参照して, $x=0$ で鋼板の軸力が対称になる条件, $x=l_d$ で CFRP 板の軸力が連続する条件, $x=l_d$ で接着剤のせん断変位が連続する条件および $x=l$ で鋼板の軸力が作用外力と一致する条件を与えて, 断面欠損を有する CFRP 板接着鋼板に生じる応力 $\sigma_s(x)$ が次式で与えられる.

$$\sigma_s(x) = \begin{cases} \{Z \cosh(c_d x) / \cosh(c_d l_d) + \xi_d\} \sigma_{sn} / \lambda & (0 \leq x \leq l_d) \\ [B_1 \cosh\{c(x-l_d)\} + B_2 \sinh\{c(x-l_d)\} + \xi] \sigma_{sn} & (l_d \leq x \leq l) \end{cases} \quad (1)$$

ここに, $Z = \{ (1-\xi) / \cosh(c l_n) - \xi_d + \xi \} / \{ 1 + c_d h_d \tanh(c l_n) \tanh(c_d l_d) / (c h) \}$, $\lambda = t_{sd} / t_s$, $c_d = \sqrt{2 b_c G_e / \{ b_s h_d (1-\xi_d) E_s t_{sd} \}}$, $\xi_d = 1 / \{ 1 + 2 E_c b_c t_c / (E_s b_s t_s) \}$, $c = \sqrt{2 b_c G_e / \{ b_s h (1-\xi) E_s t_s \}}$, $\xi = 1 / \{ 1 + 2 E_c b_c t_c / (E_s b_s t_s) \}$, $B_1 = \xi_d - \xi + Z$, $B_2 = c_d h_d Z \tanh(c_d l_d) / (c h)$, $h_d = h + (t_s - t_{sd}) / 2$, $l = l_d + l_n$, σ_{sn} は作用応力, E_s , E_c はそれぞれ鋼板および CFRP 板のヤング率, t_{sd} は断面欠損部の鋼板の板厚, t_s は一般部の鋼板の板厚, t_c は CFRP 板の板厚, b_s , b_c はそれぞれ鋼板および CFRP 板の幅 ($b_c \leq b_s$), G_e は接着剤のせん断弾性係数, h_d は断面欠損部の接着剤の厚さ, h は一般部の接着剤の厚さ, l_d は断面欠損の半長さ, l_n は一般部の CFRP 板の片側長さおよび x は断面欠損中央からの距離である.

例として, 表-1 の条件および CFRP 板の半長さ $l=125$ mm に対して, 異なる断面欠損部の板厚 t_{sd} および断面欠損部の半長さ l_d を有する CFRP 板接着鋼板に生じる応力 $\sigma_s(x)$ を図-2 に示す. この図では, 縦軸に $\sigma_s(x)$ が σ_{sn} で除された値が示され, さらに CFRP 板と鋼板の完全合成断面を仮定した場合の鋼板に生じる応力 σ_s も青の破線で示されている. CFRP 板の板厚 t_c には, 完全合成断面を仮定した場合に, 断面欠損部の剛性を一般部の鋼板の剛性 $E_s b_s t_s$ まで回復させるのに必要な CFRP 板の板厚 $t_{c0} = (1-\lambda) E_s b_s t_s / (2 b_c E_c)$ が用いられている. この図から分かるように, 一般部と断面欠損部との境界, すなわち $x=l_d$ の位置で段差が生じ, 一般部では, $x=l_d$ の位置で最も鋼板応力が低減されるが, 断面欠損部では, その位置の鋼板応力が最大になり, CFRP 板が接着されていない場合の σ_{sn} よりも大きくなる.

断面欠損部の鋼板応力の最大値 $\sigma_{sd}(l_d)$ は, 式(1)へ $x=l_d$ を代入して次式で与えられる.

$$\sigma_{sd}(l_d) = (\xi_d + Z) \sigma_{sn} / \lambda \quad (2)$$

一般部へ CFRP 板を長く接着すると, $\sigma_{sd}(l_d)$ は次式に収束する.

$$\sigma_{sd}(l_d) = [\xi_d + (-\xi_d + \xi) / \{ 1 + (c_d h_d / c h) \tanh(c_d l_d) \}] \sigma_{sn} / \lambda \quad (3)$$

表-1 の条件および $\lambda=0.67$ ($t_{sd}=6$ mm), $t_c=2$ mm に対して, 式(3)から計算される $\sigma_{sd}(l_d) / \sigma_{sn}$ と $c_d l_d$ の関係を図-3 に示す. この図から分かるように, 断面欠損の半長さ l_d が短くなると, $\sigma_{sd}(l_d)$ が大

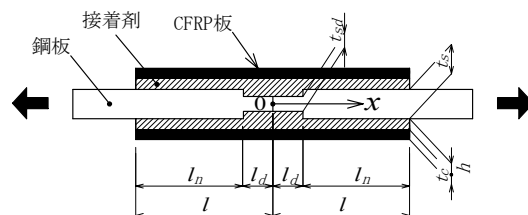


図-1 断面欠損を有する CFRP 板接着鋼板

表-1 材料定数

E_s [GPa]	200
E_c [GPa]	150
G_e [GPa]	0.735
t_s [mm]	9
b_s [mm]	50
b_c [mm]	50
h [mm]	0.2

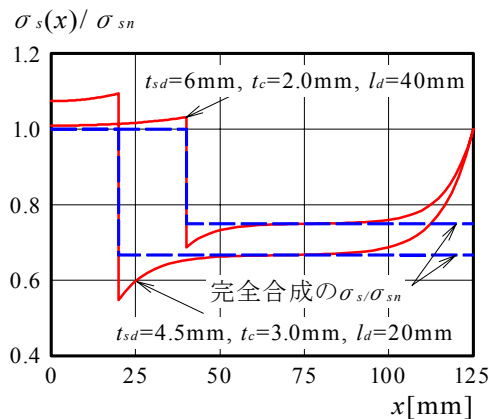


図-2 鋼板に生じる応力の分布

キーワード CFRP 板, 断面欠損, 接着, 補修

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C TEL 075-383-3321 FAX 075-383-3324

きくなり、 $l_d = 0$ で最大になる。 l_d が長くなると $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ は一定の値に収束する。

3. CFRP 板の必要接着長さと板厚

式(2)の一般部と断面欠損部の境界面の断面欠損側に生じる応力 $\sigma_{sd}(l_d)$ が式(3)の $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ に収束する程度を η (>1) とし、 η と cl_n の関係を図-4 に示す。この図では、表-1 の条件および $\lambda = 0.67$ ($t_{sd} = 6$ mm), $t_c = 2$ mm が用いられている。 $c_d l_d$ が 0 の場合、 η が 1 に近づく cl_n の値が大きくなるため、断面欠損の長さが非常に短く切欠きのような欠損の場合、 $\sigma_{sd}(l_d)$ を $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ に収束させる一般部の CFRP 板の接着半長さが長くなる。 $c_d l_d$ が 0 の場合、 η が式(4)で与えられ、板厚残存比 λ には関係せず、一般部の鋼板および CFRP 板の諸元のみ関数となる。さらに、式(4)を一般部の CFRP 板の片側長さに対して解くと式(5)になる。

$$\eta = 1 + (1 - \xi) / \{ \xi \cosh(cl_n) \} \quad (4)$$

$$l_n = 1/c \cdot \cosh^{-1} \{ (1 - \xi) / \{ \xi(\eta - 1) \} \} \quad (5)$$

式(5)の η に 1 に近い値 ($\eta > 1$) を与えることにより、 $\sigma_{sd}(l_d)$ が $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ に収束するのに十分な一般部の CFRP 板の片側長さ l_n を設計することができ、算出された l_n に断面欠損部の半長さ l_d を足して CFRP 板の必要接着半長さ l が決定できる。

一方、図-2 から分かるように、完全合成断面を仮定した場合に必要な板厚 t_{c0} の CFRP 板を接着しても、断面欠損部の σ_s が σ_{sn} よりも大きくなる。式(5)の η に 1 に近い値を与えて CFRP 板の片側長さ l_n が設計された場合、鋼板応力の最大値 $\sigma_{sd}(l_d)$ が式(3)の $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ に収束するので、 $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ が σ_{sn} 以下になれば、断面欠損部では鋼板応力が σ_{sn} 以下になる。 $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)$ が σ_{sn} 以下となる条件は次式で与えられる。

$$\left[\xi_d + (-\xi_d + \xi) / \{ 1 + (c_d h_d / ch) \tanh(c_d l_d) \} \right] / \lambda \leq 1 \quad (6)$$

表-1 の条件を用いて、式(6)を満足する CFRP 板の板厚 t_c と l_d の関係を $\lambda = 0.67$ と $\lambda = 0.5$ の場合に対して図-5 に示す。図の縦軸には t_c/t_{c0} が示されている。図の実線の上側が、式(6)を満足する t_c/t_{c0} と l_d の範囲である。この図から分かるように、断面欠損部の鋼板応力を σ_{sn} 以下にするための CFRP 板の必要板厚 t_c は、完全合成断面を仮定した場合に必要な CFRP 板の板厚 t_{c0} よりも常に厚くなる。また、 λ の値が小さくなり断面欠損の割合が大きくなると、式(6)を満足する t_c/t_{c0} の値が大きくなる。さらに、断面欠損の半長さ l_d が短くなると、同じ板厚残存比 λ であっても式(6)を満足する CFRP 板の板厚 t_c は厚くなり、 $l_d = 0$ で最大になる。 l_d が長くなると、 t_c/t_{c0} は、一定の値に収束している。断面欠損の半長さ l_d が短い場合、式(6)を満たす t_c は式(7)で表わされる。断面欠損の半長さ l_d が長い場合は、式(6)は式(8)となり、式(8)を満足する t_c を決定する必要がある。

$$t_c \geq t_{c0} / \lambda \quad (7)$$

$$\xi_d / \lambda + (-\xi_d + \xi) / \left[\lambda + \sqrt{\lambda h_d (1 - \xi) / \{ h(1 - \xi_d) \}} \right] \leq 1 \quad (8)$$

断面欠損の半長さ l_d の長短は、式(6)中の $\tanh(c_d l_d)$ により判断し、 $c_d l_d \geq 3$ の範囲では、 $\tanh(c_d l_d) \geq 0.995$ となり、 l_d は十分に長いと判断できる。

4. まとめ

本研究では、CFRP 板が接着された断面欠損を有する鋼板の理論解析を行い、断面欠損を有する鋼板が機能回復するのに必要な CFRP 板の必要接着長さおよび板厚を明らかにした。

参考文献

- 1) 立石晶洋, 小林 朗, 横田 弘, 岩波光保, 加藤絵万: 海洋環境下における鋼板の CFRP スtrandシート接着補強効果に関する検討, 第3回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.85-90, 2009.

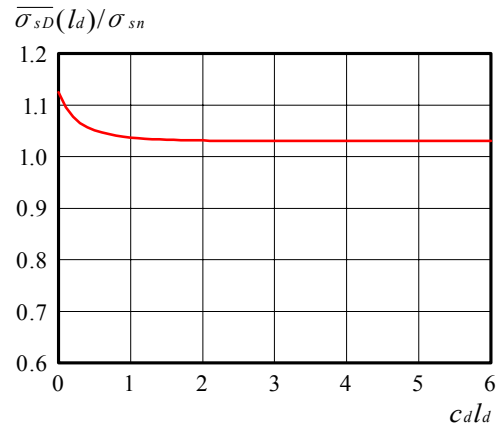


図-3 $\overline{\sigma_{sd}}(l_d)/\sigma_{sn}$ と $c_d l_d$ の関係

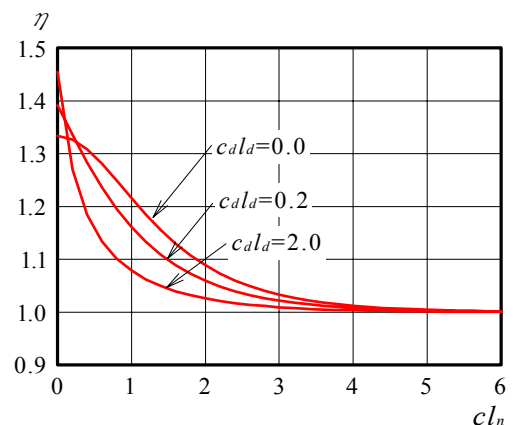


図-4 η と $c l_n$ の関係

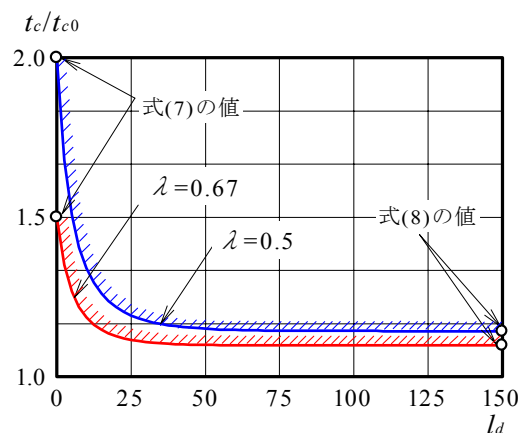


図-5 式(6)を満足する t_c/t_{c0} と l_d の範囲