

鋼部材に接着されたCFRP板継目部の補強長さに関する研究

水谷 壮志¹・青木 健太²・石川 敏之³・宮下 剛⁴・秀熊 佑哉⁵

¹学生員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:k380531@kansai-u.ac.jp

²関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail: t-ishi@kansai-u.ac.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学大学院准教授 工学研究科 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁵正会員 新日鉄住金マテリアルズ(株)・コンポジットカンパニー (〒104-0061 東京都中央区銀座7-16-3)
E-mail: hidekuma.3ac.yuya@nsmat.nssmc.com

近年、損傷した鋼部材への補修工法として、鋼板やFRPを用いた当て板接着補修が適用され始めている。鋼部材の補修・補強の対象区間が長くなると、高弾性型のCFRP板やCFRPストランドシートでは、施工や輸送の面から、CFRPを分割して継目や継手を設ける必要がある。

本研究では、CFRPに継目を設けて鋼部材に接着し、継目部を補強するように外側にCFRPを接着するモデルに対して軸力が作用する場合を対象として、理論解析およびFEM解析によりその力学特性を明らかにした。さらに、外側のCFRPの補強長さをパラメータとして、CFRP継目位置における鋼板応力の収束式から外側のCFRPの必要補強長さを明らかにした。

Key Words : CFRP, bonding, joint, steel plate

1. はじめに

近年、腐食や疲労によって劣化した鋼部材に対して軽量かつ強度の高い炭素繊維強化樹脂(CFRP)等を用いた当て板接着補修が実構造物へ適用され始めている¹⁾⁹⁾。CFRPは軽量で、人力での運搬や施工が可能であり、重機等の大掛かりな装置を必要としない。また、CFRPを接着剤によって貼り付けるだけでよく、溶接による入熱やボルト孔による断面欠損がないため、場合によっては供用しながら短期間で施工できる。さらに、軽量で高弾性・高強度の材料であるため、施工後の負荷重量が小さい。加えて、腐食損傷部にCFRPを貼付けることにより鋼部材腐食部の外的劣化要因を遮断し、耐食性に高い効果が得られることから、初期の腐食発生部に適用することで、効果的な予防保全を行うことができると考えられる。

他方、接着するCFRPのうち、高弾性のCFRP板や炭素繊維ストランドシートなどは、施工や輸送の面から3-10m程度と長さが制約されるため、補修・補強部の接着長さがそれ以上に長くなる場合、CFRPを分割して、継目や継

手を設ける必要がある。文献6)において、実橋へのCFRP接着補修で、CFRP板に継目が設けられている事例が報告されている。本研究では、図-1に示すようなCFRP板に継目を設けて鋼部材に接着して補修や補強を行う工法に着目する。これは、鋼部材にCFRP板を突き合わせて接着することで継目を模擬し、さらにその外側にCFRPを継ぎ目のバイパスとして接着する継手構造である。

CFRP板に継目がある場合、実験、有限要素解析および順解析的なアプローチにより、継目位置で鋼板応力の増加やCFRP板の破断および継目位置からのはく離が生じる場合が報告されている⁶⁾。本研究では、図-1に示すモデル

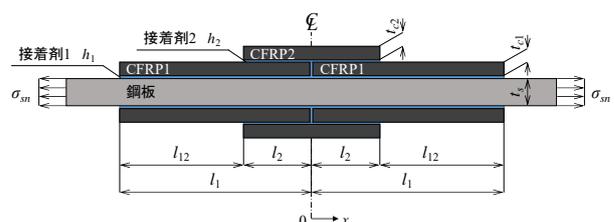


図-1 突合せ接着継手構造

に対して、理論解析を行い、継目位置での鋼板応力の収束式を導出する。また、導出した理論式から外側に接着されるCFRPの必要補強長さを明らかにする。

2. 一軸引張を受けるCFRP接着鋼板の理論解析

(1) 基礎微分方程式の導出

図-1に示すような上下面に対称にCFRP板が接着されている鋼板に対して、鋼板の厚さ中央より上側に対して、微小区間に働く水平方向の力のつり合いを図-2に示す。ここで、鋼板に突合せて接着するCFRP板をCFRP1、これを補強する外側のCFRP板をCFRP2と表す。また、鋼部材とCFRP1の間の接着剤を接着剤1、CFRP1とCFRP2の間の接着剤を接着剤2と表す。

図-2では、鋼板およびCFRPには軸応力のみが作用すると仮定している。また、接着剤のヤング係数が鋼と比べ非常に小さいことと、接着厚さが非常に薄いことから、接着剤は軸応力を分担せず、せん断応力のみが作用すると仮定している。また、CFRPには局部的に曲げモーメントが作用するが、鋼板とCFRP板との力の伝達への影響が少ないため、本研究では、接着剤のせん断応力のみに着目した評価を行う。

a) $0 \leq x \leq l_2$ における微分方程式

図-2(a)に示す範囲($0 \leq x \leq l_2$)に対して鋼板の応力に関して4階の微分方程式が導出されている。

$$\frac{d^4 \sigma_s(x)}{dx^4} - 2(cr)^2 \frac{d^2 \sigma_s(x)}{dx^2} + (cs)^4 \sigma_s(x) = \xi_0 (cs)^4 \sigma_{sm} \quad (1)$$

ここに、

$$c = \sqrt{\frac{FG_{e1}}{h_1} \frac{2}{1-\xi_0} \frac{1}{E_s t_s}}, \quad r = \sqrt{\frac{\lambda^2 + s^4}{2}},$$

$$s = \sqrt[4]{\frac{(1+J)^2 (1-\xi_0) \lambda^2 \xi_0}{DJ}}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{1-\xi_0}{1-(1+J)\xi_0}},$$

$$\xi_0 = \frac{E_s t_s}{E_s t_s + 2F(E_{c1} t_{c1} + E_{c2} t_{c2})}, \quad J = \frac{2FE_{c2} t_{c2}}{E_s t_s + 2FE_{c1} t_{c1}},$$

$$D = G_{e1} h_2 / (G_{e2} h_1), \quad F = b_c / b_s$$

$\sigma_s(x)$, σ_{sm} : それぞれCFRP板が接着されている範囲の鋼板に生じる応力および作用軸応力(鋼部材に作用する外力を断面積で除した応力)

x : 部材中央からの距離

l_2 : CFRP2の接着半長さ

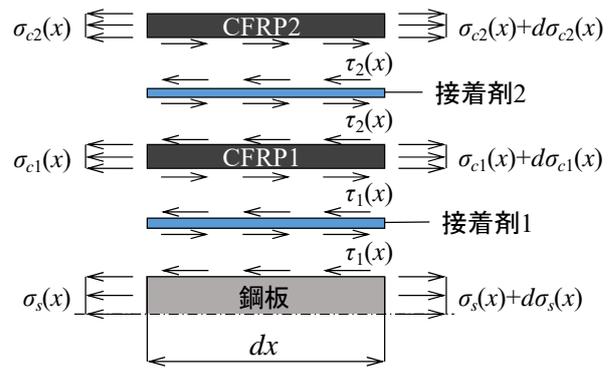
E_s : 鋼板のヤング係数

E_{c1} , E_{c2} : それぞれCFRP1, 2のヤング係数

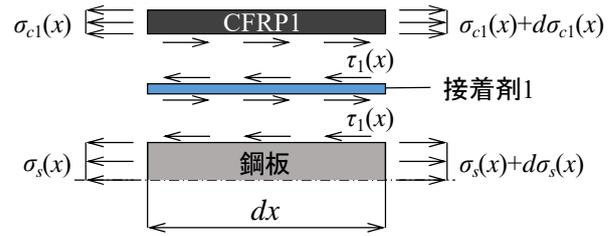
t_s : 鋼板の板厚

t_{c1} , t_{c2} : それぞれCFRP1, 2の厚さ

b_s : 鋼板の幅($b_s \geq b_c$)



(a) $0 \leq x \leq l_2$



(b) $l_2 \leq x \leq l_1$

図-2 微小区間の水平方向の力のつり合い

b_c : CFRP1, 2の幅(接着幅と等しい)

G_{e1} , G_{e2} : それぞれ接着剤1, 2のせん断性係数

h_1 , h_2 : それぞれ接着剤1, 2の厚さ

CFRP1に生じる応力 $\sigma_{c1}(x)$ は鋼板応力 $\sigma_s(x)$ を用いて、次式で与えられる。

$$\sigma_{c1}(x) = \frac{t_s}{2F(1+J)\lambda^2 t_{c1} \xi_0} \times \left\{ (1-\xi_0)\sigma_s(x) - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \sigma_s(x)}{dx^2} \right\} \quad (2)$$

CFRP2に生じる応力 $\sigma_{c2}(x)$ は、 $\sigma_s(x)$ と $\sigma_{c1}(x)$ を用いて、次式で与えられる。

$$\sigma_{c2}(x) = \frac{t_s}{2F t_{c2}} (\sigma_{sm} - \sigma_s(x)) - \frac{t_{c1}}{t_{c2}} \sigma_{c1}(x) \quad (3)$$

接着剤1, 2に生じるせん断応力 $\tau_1(x)$, $\tau_2(x)$ は、 $\sigma_s(x)$ と $\sigma_{c2}(x)$ を用いて、次式で与えられる。

$$\tau_1(x) = \frac{t_s}{2F} \frac{d\sigma_s(x)}{dx} \quad (4)$$

$$\tau_2(x) = -t_{c2} \frac{d\sigma_{c2}(x)}{dx} \quad (5)$$

b) $l_2 \leq x \leq l_1$ における微分方程式

図-2(b)に示すCFRP1のみが接着される範囲($l_2 \leq x \leq l_1$)に対して、鋼板の応力に関する2階の微分方程式が導出される。

$$\frac{d^2 \sigma_s(x)}{dx^2} - (\lambda c)^2 \sigma_s(x) = -(1+J)(\lambda c)^2 \xi_0 \sigma_{sm} \quad (6)$$

ここに、

l_1 : CFRP1 の長さ

CFRP1 に生じる応力 $\sigma_{c1}(x)$ は鋼板応力 $\sigma_s(x)$ を用いて、次式で与えられる。

$$\sigma_{c1}(x) = \frac{t_s}{2Ft_{c1}} (\sigma_{sn} - \sigma_s(x)) \quad (7)$$

接着剤 1 に生じるせん断応力 $\tau_1(x)$ は、鋼板に対する応力のつり合いから与えられ、図-2(a)に示す範囲 ($0 \leq x \leq l_2$) と同様に式(4)で表される。

(2) 微分方程式の解

式(1)および式(6)に対して $\sigma_s(x)$ に関する一般解が次式で与えられる。

$$\sigma_s(x) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} A_1 \cosh(\alpha cx) \\ + A_2 \sinh(\alpha cx) + A_3 \cosh(\beta cx) \\ + A_4 \sinh(\beta cx) + \xi_0 \sigma_{sn} \end{array} \right\} & (0 \leq x \leq l_2) \\ \left[\begin{array}{l} B_1 \cosh\{\lambda c(x-l_2)\} \\ + B_2 \sinh\{\lambda c(x-l_2)\} \\ + (1+J)\xi_0 \sigma_{sn} \end{array} \right] & (l_2 \leq x \leq l_1) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、

$$\alpha = \sqrt{r^2 + \sqrt{r^4 - s^4}} \quad , \quad \beta = \sqrt{r^2 - \sqrt{r^4 - s^4}}$$

A_{1-4} , $B_{1,2}$: 未定係数

部材中央で $\sigma_{c1}(0) = 0$, $\tau_1(0) = -D\tau_2(0)$, CFRP2 の端部で $\sigma_{c2}(l_2) = 0$, $\sigma_s(l_2)$ および $\tau_1(l_2)$ がそれぞれ連続, CFRP1 の端部で $\sigma_s(l_1) = \sigma_{sn}$ となる境界条件を与えて、未定係数 A_{1-4} および $B_{1,2}$ がそれぞれ次式で表される。

$$A_1 = \frac{(1-\xi_0) \left[Z_7 \left\{ 1 - \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^2 \cosh(\lambda cl_{12})} \right\} + Z_1 - K_1 K_2 \right]}{Z_6 (Z_4 + \alpha Z_3 Z_5) - Z_0 - K_1 K_3}$$

$$A_2 = \frac{(1-\xi_0) K_2 - K_3 A_1}{K_4} \quad , \quad A_3 = -Z_0 A_1 - (1-\xi_0) Z_1,$$

$$A_4 = -Z_2 A_2$$

$$B_1 = \frac{1-\xi_0}{\lambda^2 \cosh(\lambda cl_{12})} - B_2 \tanh(\lambda cl_{12}),$$

$$B_2 = \frac{1}{\lambda} \left[\alpha \{ A_1 \sinh(\alpha cl_2) + A_2 \cosh(\alpha cl_2) \} + \beta \{ A_3 \sinh(\beta cl_2) + A_4 \cosh(\beta cl_2) \} \right]$$

$$Z_0 = \frac{1-\xi_0-\alpha^2}{1-\xi_0-\beta^2} \quad , \quad Z_1 = \frac{\xi_0}{1-\xi_0-\beta^2},$$

$$Z_2 = \frac{\alpha(1+J)\xi_0\lambda^2 + D(\lambda^2 - \alpha^2)}{\beta(1+J)\xi_0\lambda^2 + D(\lambda^2 - \beta^2)} \quad , \quad Z_3 = \frac{\tanh(\lambda cl_{12})}{\lambda},$$

$$Z_4 = \frac{\cosh(\alpha cl_2)}{\cosh(\beta cl_2)} \quad , \quad Z_5 = \frac{\sinh(\alpha cl_2)}{\cosh(\beta cl_2)},$$

$$Z_6 = \frac{1}{1 + \beta Z_3 \tanh(\beta cl_2)} \quad , \quad Z_7 = \frac{Z_6}{\cosh(\beta cl_2)}$$

$$K_1 = \frac{Z_6}{K_4} \left[Z_5 + \alpha Z_3 Z_4 - Z_2 \{ \beta Z_3 + \tanh(\beta cl_2) \} \right],$$

$$K_2 = Z_1 + \frac{\lambda^2 - 1}{(\lambda^2 - \beta^2) \cosh(\beta cl_2)} \quad , \quad K_3 = \frac{\lambda^2 - \alpha^2}{\lambda^2 - \beta^2} Z_4 - Z_0,$$

$$K_4 = \frac{\lambda^2 - \alpha^2}{\lambda^2 - \beta^2} Z_5 - Z_2 \tanh(\beta cl_2)$$

$$l_{12} = l_1 - l_2$$

CFRP1 に生じる応力 $\sigma_{c1}(x)$ は、式(2)および式(7)に式(8)を代入して、次式で与えられる。

$$\sigma_{c1}(x) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_s}{2Ft_{c1}(1+J)\xi_0\lambda^2} \left[(1-\xi_0 - \alpha^2) \right. \\ \times \{ A_1 \cosh(\alpha cx) + A_2 \sinh(\alpha cx) \} \\ + (1-\xi_0 - \beta^2) \{ A_3 \cosh(\beta cx) \\ + A_4 \sinh(\beta cx) \} + (1-\xi_0)\xi_0 \sigma_{sn} \end{array} \right\} & (0 \leq x \leq l_2) \\ - \frac{t_s}{2Ft_{c1}\lambda^2} \left[\lambda^2 \left[B_1 \cosh\{\lambda c(x-l_2)\} \right. \right. \\ \left. \left. + B_2 \sinh\{\lambda c(x-l_2)\} \right] - (1-\xi_0) \right] \sigma_{sn} & (l_2 \leq x \leq l_1) \end{cases} \quad (9)$$

CFRP2 に生じる応力は $\sigma_{c2}(x)$, 式(3)に式(8)および式(9)を代入して、次式で与えられる。

$$\sigma_{c2}(x) = - \frac{t_s}{2Ft_{c2}(1+J)\xi_0\lambda^2} \times \left[(\lambda^2 - \alpha^2) \{ A_1 \cosh(\alpha cx) + A_2 \sinh(\alpha cx) \} + (\lambda^2 - \beta^2) \{ A_3 \cosh(\beta cx) + A_4 \sinh(\beta cx) \} - J\xi_0\lambda^2 \right] \sigma_{sn} \quad (10)$$

接着剤 1 に生じるせん断応力 $\tau_1(x)$ は、式(4)に式(8)を代入して、次式で与えられる。

$$\tau_1(x) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_s c}{2F} \left[\alpha \{ A_1 \sinh(\alpha cx) \right. \right. \\ \left. \left. + A_2 \cosh(\alpha cx) \right] + \beta \{ A_3 \sinh(\beta cx) \right. \\ \left. + A_4 \cosh(\beta cx) \right] \sigma_{sn} & (0 \leq x \leq l_2) \\ \frac{t_s \lambda c}{2F} \left[B_1 \sinh\{\lambda c(x-l_2)\} \right. \\ \left. + B_2 \cosh\{\lambda c(x-l_2)\} \right] \sigma_{sn} & (l_2 \leq x \leq l_1) \end{array} \right\} \quad (11)$$

接着剤 2 に生じるせん断応力 $\tau_2(x)$ は、式(5)に式(8)を代入して、次式で与えられる。

$$\tau_2(x) = \frac{t_s c}{2F(1+J)\xi_0\lambda^2} \times \left[\alpha (\lambda^2 - \alpha^2) \{ A_1 \sinh(\alpha cx) + A_2 \cosh(\alpha cx) \} + \beta (\lambda^2 - \beta^2) \{ A_3 \sinh(\beta cx) + A_4 \cosh(\beta cx) \} \right] \sigma_{sn} \quad (12)$$

3. 一軸引張を受けるCFRP接着鋼板の理論解析とFEM解析の比較

2章で導出した理論解およびFEM解析の比較を行う。

理論解析およびFEM解析に用いた部材寸法および材料定数を表-1に示す。FEM解析には、汎用の有限要素解析MARCを用い、四節点平面応力要素でモデルを作成した。接着剤の要素寸法は $0.1 \times 0.1 \text{mm}$ とした。解析モデルは図-3に示すように、対称性を考慮し1/4モデルとしている。境界条件は、CFRP1の継目を考慮し、鋼板およびCFRP2のみ軸方向の変位を拘束し、モデル下端で板厚方向の変位を拘束している。また、無補強部に作用する軸応力が 1N/mm^2 となるように荷重を与え、平面弾性解析を行った。

理論解析およびFEM解析から得られた、鋼板とCFRP1, 2に生じる応力分布および接着剤に生じるせん断応力分布を図-4に示す。この図では、各応力を作用軸応力 σ_{sn} で無次元化した値を示している。FEM解析による応力分布は各部材の厚さ中央の応力である。

図-4(a)に示す一点鎖線は鋼板とCFRP1, 2との完全合成および鋼板のみの断面に対する応力分布であり、破線はFEM解析により求めたCFRP1, 2の表面に生じる応力分布である。平面応力状態では、鋼板の板厚内で応力が一定ではないため、FEM解析の $\sigma_s(x)$ はCFRP1の端部で1となっていない。しかし、それ以外の範囲では、理論解とFEM解析の結果がよく一致している。CFRP1の継目位置のCFRP2の表面応力は、CFRP2の厚さの中央の応力と比べて局部的に小さくなっている。これは、継目近傍のCFRP2には局部的に板曲げ応力が作用しているためである。式(10)のCFRP2は軸力成分のみであるため、後の引張試験で、継目位置のCFRP2の表面に接着したひずみゲージか

ら計算される応力とは合致しないことに注意を要する。また、図-4(b)から接着剤1, 2に生じるせん断応力においても理論解FEM解析の結果がよく一致していることがわかる。

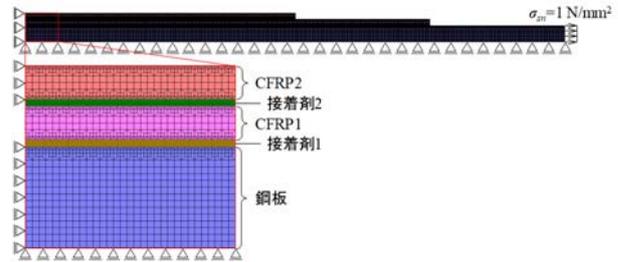
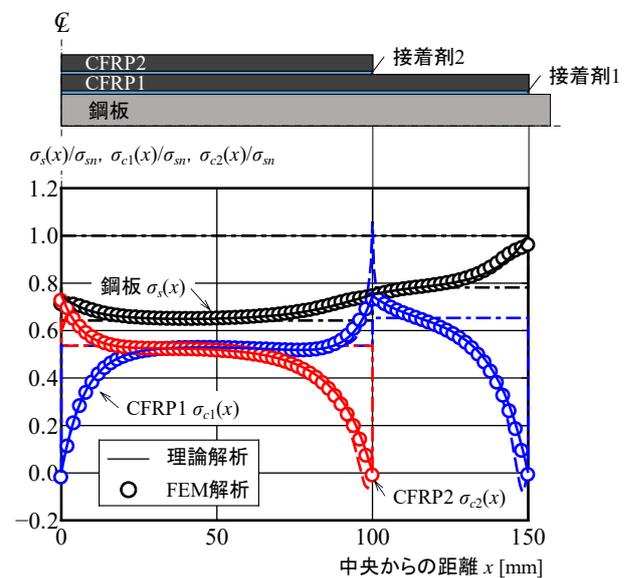
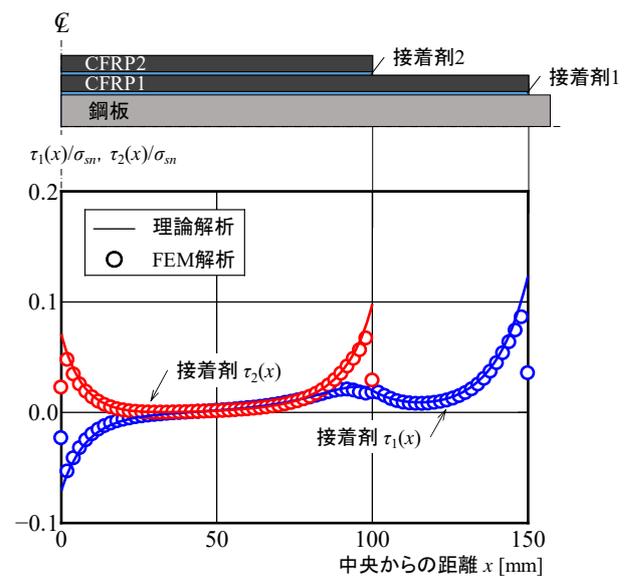


図-3 FEM解析モデル



(a) 鋼板およびCFRP1, 2に生じる応力分布



(b) 接着剤1, 2に生じるせん断応力分布

図-4 理論解析およびFEM解析の比較

表-1 部材寸法および材料定数

(a) 鋼板

板幅 $b_s \times$ 板厚 t_s [mm]	50×12
ヤング係数 E_s [kN/mm ²]	200

(b) CFRP1

幅 $b_c \times$ 厚さ t_{c1} [mm]	50×2
接着長さ l_1 [mm]	150
ヤング係数 E_{c1} [kN/mm ²]	167

(c) CFRP2

幅 $b_c \times$ 厚さ t_{c1} [mm]	50×2
接着半長さ l_2 [mm]	100
ヤング係数 E_{c2} [kN/mm ²]	167

(d) 接着剤1, 2

接着厚さ h_1, h_2 [mm]	0.4
せん断性係数 G_{c1}, G_{c2} [N/mm ²]	926

4. CFRP板継目位置に生じる応力の収束式

CFRP1 の継目を覆う CFRP2 の補強長さは一般に短く、CFRP1, 2 のずらし量である l_{12} は長くなる。 l_{12} が十分に長い場合、 A_1 は次式に収束する。

$$A_1 = \frac{(1-\xi_0)\{Z_7(1-1/\lambda^2)+Z_1-K_1K_2\}}{Z_6(Z_4+\alpha/\lambda\cdot Z_5)-Z_0-K_1K_3}$$

ここに、

$$K_1 = \frac{Z_6}{K_4} \left[Z_5 + \frac{\alpha}{\lambda} Z_4 - Z_2 \left\{ \frac{\beta}{\lambda} + 1 \right\} \right]$$

継目位置の鋼板および CFRP2 に生じる応力は式(8)および式(10)に $x=0$ を代入して、次式で与えられる。

$$\sigma_s(0) = \{(1-Z_0)A_1 - (1-\xi_0)Z_1 + \xi_0\} \sigma_{sm} \quad (13)$$

$$\sigma_{c2}(0) = -\frac{t_s}{2Ft_{c2}(1+J)\xi_0\lambda^2} \left\{ (\lambda^2 - \alpha^2)A_1 + (\lambda^2 - \beta^2)A_3 - J\xi_0\lambda^2 \right\} \sigma_{sm} \quad (14)$$

継目位置の鋼板に生じる応力 $\sigma_s(0)$ は、CFRP2 の接着半長さ l_2 が長くなると、式(13)は次式に収束する。

$$\overline{\sigma_s(0)} = \left\{ -Z_1 \frac{1-Z_2}{Z_0-Z_2} (1-\xi_0) + \xi_0 \right\} \sigma_{sm} \quad (15)$$

また、継目位置での力のつり合いより、CFRP2 に生じる応力 $\sigma_{c2}(0)$ は次式に収束する。

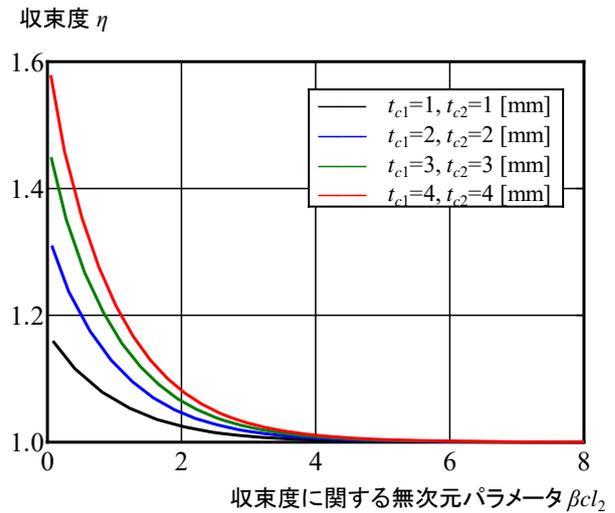
$$\overline{\sigma_{c2}(0)} = \frac{t_s}{2Ft_{c2}} (\sigma_{sm} - \sigma(x)) \quad (16)$$

CFRP1 の継目を CFRP2 で覆う場合、式(15)に収束するように十分な定着長を設ける必要がある。式(13)を式(15)で除した値を継目位置の鋼板応力の収束度 η として、図-5 に βcl_2 と η の関係を示す。ここで、 βcl_2 は η に関する無次元パラメータである。計算例として CFRP の板厚以外の材料定数および寸法は表-1 の値を用いる。図-5 より、 βcl_2 の増加にともない η が 1 に収束していることがわかる。

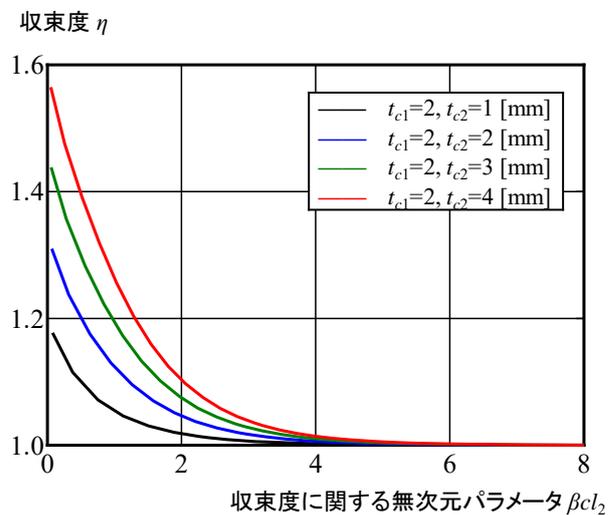
理論解析では、 $\eta=1$ となる βcl_2 の値は無限になる。このため、 η が 1 より大きく 1 に近い値をとる必要があり、文献7)では $\eta=1.01$ を基準にしている。しかし、本研究では η を設定し、CFRP1 を覆う CFRP2 の必要補強長さ(接着半長さ)を解くことは式(13)より困難である。したがって、本研究では η が 1 に近い βcl_2 の大きさ直接を決定する。

図-5 より、継目位置の鋼板応力が十分に収束しているとして、 βcl_2 を 5 とした。ここで、図-5 に示す計算例の中で $\beta cl_2=5$ に対する収束度の値が最も大きい計算例は $t_{c1}=1$ 、 $t_{c2}=4$ の寸法であり、 $\eta=1.005$ であった。以上より、CFRP1 の継目を覆う CFRP2 の必要補強長さが次式で与えられる。

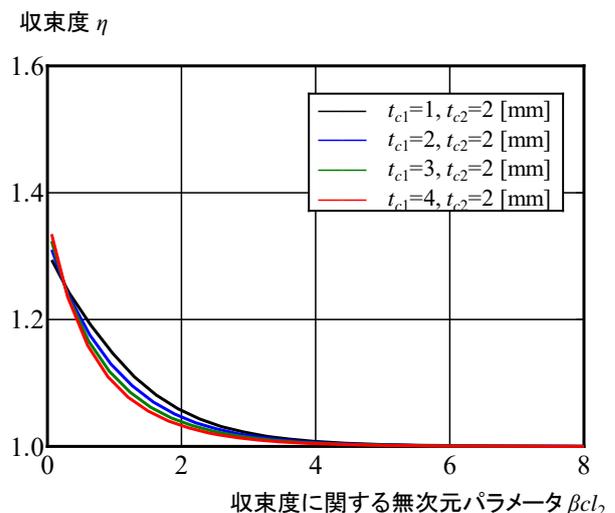
$$l_2 = 5/(\beta c) \quad (17)$$



(a) $t_{c1} = t_{c2}$



(b) t_{c1} 一定



(c) t_{c2} 一定

図-5 継目位置の鋼板応力の収束度と βcl_2 の関係

5. 一軸引張試験

(1) 試験体概要

試験パラメータを CFRP2 の接着半長さ l_2 とした試験体を製作した。CFRP2 の接着半長さ l_2 はそれぞれ 100mm, 75mm, 50mm, 25mm と変化させた。ここで、試験体名をそれぞれ PC2-100, PC2-75, PC2-50, PC2-25 と表す。試験体

の寸法および材料定数それぞれ表-2および表-3に示す。また、図-6 に試験体のひずみゲージ位置を示す。本試験では CFRP として高強度型の CFRP 板を使用した。

試験体の作成にあたって、鋼板の CFRP1 を板貼り付ける部分にグラインダー処理を行い、処理部を#100 のサンドペーパーで研磨した。研磨後に各試験体で計測された算術平均粗さ Ra は 0.51~1.54 μ m であった。CFRP2 を貼り

表-2 部材寸法

試験体	鋼板		CFRP1, 2					接着剤 1, 2	
	板厚 t_s [mm]	幅 b_s [mm]	板厚		幅 b_c [mm]	接着長さ l_1 [mm]	接着半長さ l_2 [mm]	厚さ	
			t_{c1} [mm]	t_{c2} [mm]				h_1 [mm]	h_2 [mm]
PC2-100	12	50	2	2	50	300	100	0.33	0.63
PC2-75	12	50	2	2	50	300	75	0.58	0.31
PC2-50	12	50	2	2	50	300	50	0.73	0.40
PC2-25	12	50	2	2	50	300	25	0.78	0.20

表-3 材料定数

(a) 鋼板		(b) CFRP1, 2		(c) 接着剤 1, 2	
鋼種	SM490Y	種類	FB-E9S	種類	FB-E9SST
引張強度 [N/mm ²]	548	引張強度 [N/mm ²]	2400	引張強度 [N/mm ²]	29
降伏応力 [N/mm ²]	409	ヤング係数 [kN/mm ²]	167	引張せん断強度 [N/mm ²]	25
				ポアソン比	0.35

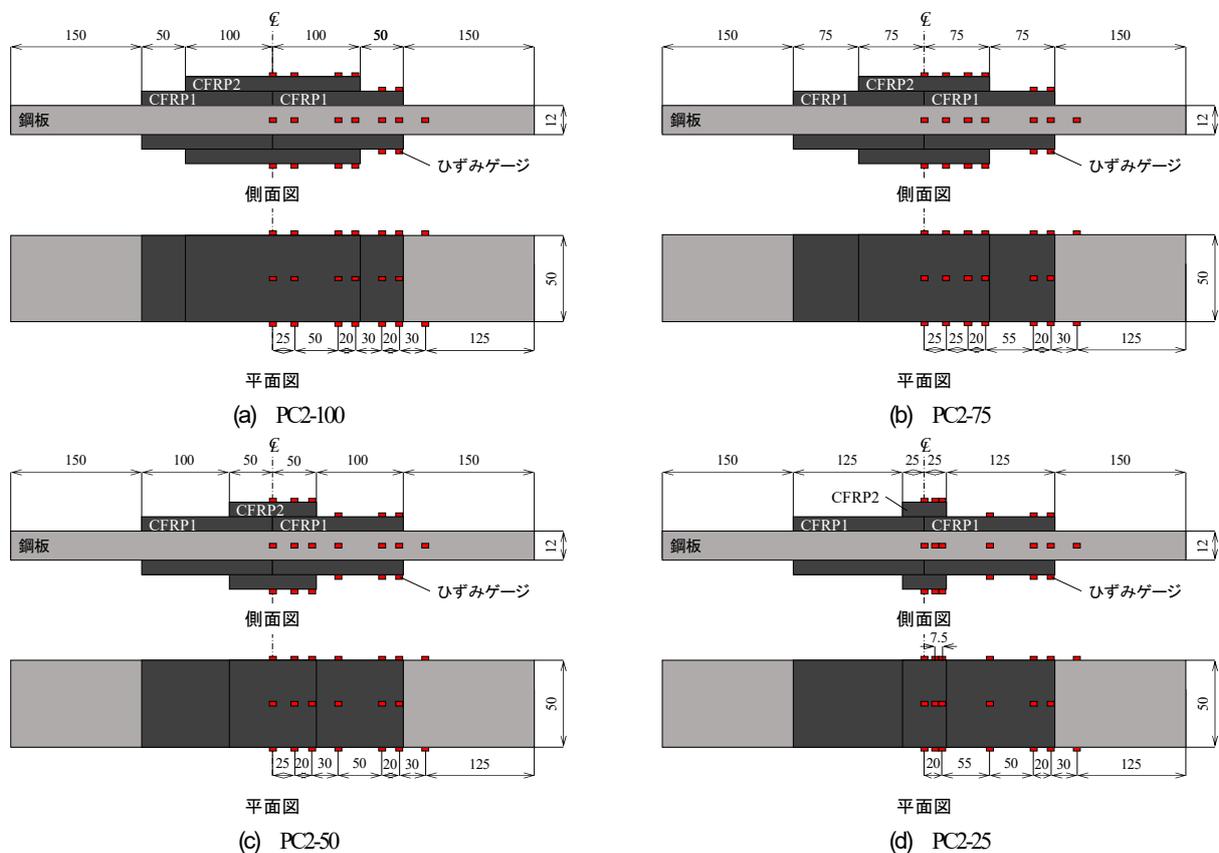


図-6 ひずみゲージ位置

付ける部分において CFRP1 の表面処理がなされていない面を#100 のサンドペーパーで研磨した。研磨後に計測された算術平均粗さ Ra は 1.63-2.46 μm であった。鋼板を脱脂し、CFRP1 の付着部に接着剤を塗布して、長さ 150mm の CFRP1 を 2 枚、突合せ状態で鋼板中央に圧着した。さらに、CFRP1 に接着剤を塗布し、外側に CFRP2 を圧着した。その後、20°C の部屋で 24 時間養生した。この作業を片面ずつ行った。両面の 35°C の乾燥炉内で 12 時間養生した。試験体の養生後、接着後の補強部の厚さを電子ノギスで計測し、同様に測定していた主板および CFRP 板の板厚を減じることで、接着剤の厚さとした。接着剤の厚さは表-2 に示している。

(2) 試験概要

載荷試験は、最大荷重 1,000kN の万能試験機を用いた。試験体両端部から 100mm をそれぞれ固定し、載荷速度が 0.5~1.0kN/秒となるように強制変位を与えた。各試験体に接着した CFRP 板のはく離が目視により確認できるまで載荷を行った。

(3) 試験結果

万能試験機により 20kN の荷重が作用したときの試験体に生じる応力を分布を図-7 に示す。この図では、各応力を作用軸応力 $\sigma_{sn} = 333 \text{ N/mm}^2$ で無次元化した値を示している。実験値による応力の値は、ひずみゲージから得られた値に各部材の各断面で対象に接着した 2 つのひずみゲ

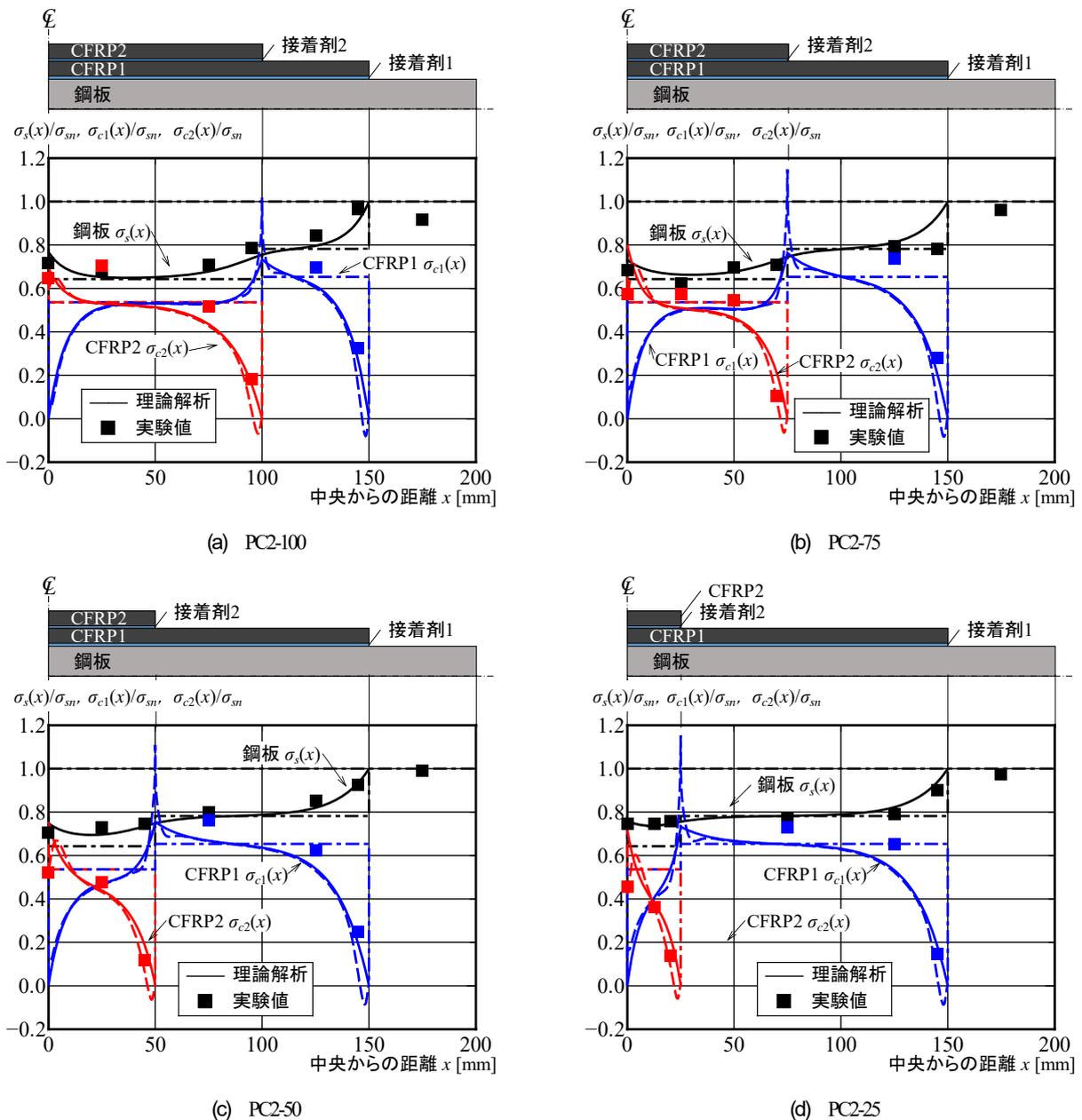


図-7 各部材に生じる応力分布

ージから得られる値を平均し、それぞれに鋼板または CFRP 板のヤング係数を乗じて算出した。図には、式(8)～式(10)により得られる応力分布も示している。また、CFRP 板表面に設置したひずみゲージを評価するため、FEM 解析によって得られた CFRP 板表面の応力分布も破線で示している。さらに、鋼板と CFRP1、2 との完全合成および鋼板のみの断面に対する応力分布を一点鎖線で示している。

一軸引張試験により、それぞれの応力分布が理論解析と同様な挙動となっていることがわかる。先に述べたように、継目位置の CFRP2 の表面の計測応力は、式(10)よりも小さく、FEM 解析の CFRP2 の表面の応力に近いことがわかる。継目位置の鋼板応力は式(8)と近い値となっている。本試験体の寸法から、CFRP2 の必要補強長さ l_2 は 91.7mm である。これを超える補強長さを有する PC2-100 の鋼板応力は、CFRP2 の半長さの中央の位置($x=50\text{mm}$)で完全合成に一度収束しているが、それ以外の試験体では CFRP2 の半長さの中央の位置でも、完全合成に収束していないことがわかる。

6. まとめ

本研究では、図-1 に示すモデルに対して、理論解析を行った。また、継目位置での鋼板応力の収束式を導出し、CFRP2 の必要補強長さを決定した。本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 一軸引張を受ける CFRP 接着鋼板の理論解析を行い、鋼板と CFRP1、2 に生じる応力および接着剤 1、2 に生じるせん断応力を算出する式を導出した。

- 2) 理論解析が FEM 解析と同様の分布を与えることを示した。
- 3) 継目位置での鋼板応力の収束式を導出し、CFRP2 の必要補強長さを式(17)で与えた。
- 4) 一軸引張試験結果から得られた鋼板の応力分布は、理論解析による応力分布とおおむね一致した。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 灰谷徳治, 櫻庭誠: 炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.545-552, 2005.
- 2) 村上英樹, 安森浩, 小林朗, 立石晶洋: 鋼部材に対する炭素繊維プレートを用いた緊張力導入に関する実験的研究, プレストレスコンクリート技術協会, 第 15 回シンポジウム論文集, pp.359-362, 2006.
- 3) 杉浦江, 小林朗, 稲葉尚文, 本間淳史, 大垣賀津雄, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.106-118, 2009.
- 4) 岩尾省吾, 今村壮宏, 山口弘信, 荒巻真二, 小林朗, 大垣賀津雄: CFRP シートによるけた端部の腐食補修に関する実橋載荷試験, 土木学会第 65 回年次学術講演会公演概要集, CS2-004, pp.7-8, 2010.
- 5) 宮島英樹, 中山太士, 坂本達郎, 正司誠, 石川敏之: シート接着工法を用いた鋼鉄道橋の補修, 鋼構造年次論文報告集, 第 18 巻, pp.531-536, 2010.
- 6) 宮下剛, 秀熊佑哉, 小林朗, 奥山雄介, 工藤晃也, 長井正嗣: 継目を有する CFRP スtrand シート接着鋼板の引張試験, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.2, 257-274, 2013.
- 7) 石川敏之, 大倉一郎, 小村啓太: CFRP 板の端部に段差を設けることによる離荷重上昇の理論解析, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.362-367, 2009.

RESEARCH ON THE LENGTH FOR STRENGTHENING OF JOINT OF CFRP PLATES BONDED TO STEEL MEMBER

Morimune MIZUTANI, Kenta AOKI, Toshiyuki Ishikawa,
Takeshi MIYASHITA and Yuya HIDEKUMA

In recent years, repair by adhesively-bonded using the steel plate or FRP has begun to be applied as a repairing method of damaged steel member. If the repair or strengthening region of steel member becomes larger, CFRP joint must be provided in the case of high elastic type of CFRP plate and CFRP strand sheet from the viewpoint of construction and transportation.

In this research, theoretical analysis and FEM analysis are conducted for the steel plate strengthening by the 2two layers of CFRP plates on both side under axial force. The joint is installed in the center of first layer of CFRP plate. Furthermore, by using the parameter of the length of the second layer of CFRP, the required length of the second layer of CFRP was given by the convergence of stress in steel plate at the CFRP joint.