

等曲げモーメントを受ける CFRP 接着補修鋼板の力学特性

Mechanical behavior of CFRP bonded repair of thickness-reduced steel plate under pure bending

水谷 壮志 (関西大院・理工) 石川 敏之 (関西大・環境都市工)

Morimune MIZUTANI, Kansai University

Toshiyuki ISHIKAWA, Kansai University

FAX: 06-6330-3770, E-mail: t-ishi@kansai-u.ac.jp

In this study, the shear lag theory using the conventional differential equation was extended to the CFRP bonded repair of the thickness-reduced plate under pure bending. The surface stress of the members obtained from this result almost agreed with the finite element analysis. Furthermore, it was found that the surface stress at the thickness-reduced section repaired by bonding CFRP is almost the same as that of the composite theory.

1. はじめに

現在、腐食などで劣化した鋼構造物に炭素繊維強化樹脂 (CFRP) を用いた当て板接着補修・補強に関する多数の研究が報告されている^{1)~4)}。CFRP は軽量かつ強度の高い材料であり、耐食性にも優れていることから初期の腐食損傷部に接着することで効果的な予防保全が期待できる。

図-1 に、腐食損傷を有する鋼板に CFRP 接着補修を適用する場合の基礎的なモデルを示す。CFRP 接着補修では、図-1 に示すように断面欠損部だけでなく、一般部においても CFRP を接着する必要がある⁴⁾。これは、接着接合では、接着剤を介して鋼板から CFRP へ力が伝達するため、CFRP 端部付近では、十分に力が伝達されないことに起因する。また、軸力を受ける断面欠損鋼板の両面に CFRP を接着した接合モデルでは、欠損部の鋼板と CFRP との合成断面を仮定した構造計算による応力が有限要素解析やせん断遅れ理論と一致しないことが確認されている²⁾。一方、図-1 に示すような等曲げモーメントを受ける CFRP 接着補修鋼板の力学特性は十分に明らかにされていない。

本研究では、曲げを受ける部材の CFRP 接着補修の基礎的なモデルとして、図-1 に示すような等曲げモーメントを受ける接着接合モデルを対象に、せん断遅れ理論および有限要素解析を行い、その力学特性を明らかにする。

2. 基礎微分方程式の解

本研究では、図-1 に示すように断面欠損部は接着剤で埋め戻されていると仮定する。図-2 に本研究で仮定する微小

区間における力のつり合いを示す。接着剤は鋼板と CFRP に比べ剛性が小さいため、断面力を受け持たず、せん断応力および垂直応力のみが作用すると仮定する。

文献 1), 3) を参考に、図-2 に示す微小区間における力のつり合いから、鋼板の軸力 $N_s(x)$ およびせん断力 $V_s(x)$ に関する 2 階および 4 階の微分方程式が導出でき、一般解はそれぞれ次式で与えられる。

$$N_s(x) = \begin{cases} A_1 \sinh(c_d x) + A_2 \cosh(c_d x) - (K_d/a_d)M & (0 \leq x \leq l_d) \\ A_3 \sinh\{c_n(x-l_d)\} + A_4 \cosh\{c_n(x-l_d)\} - (K_n/a_n)M & (l_d \leq x \leq l) \end{cases} \quad (1)$$

$$V_s(x) = \begin{cases} \cosh(\omega_d x) \{B_1 \sin(\omega_d x) + B_2 \cos(\omega_d x)\} + \sinh(\omega_d x) \{B_3 \sin(\omega_d x) + B_4 \cos(\omega_d x)\} + W_d \{A_1 \cosh(c_d x) + A_2 \sinh(c_d x)\} & (0 \leq x \leq l_d) \\ B_5 \cosh\{\omega_n(x-l_d)\} \sin\{\omega_n(x-l_d)\} + B_6 \cosh\{\omega_n(x-l_d)\} \cos\{\omega_n(x-l_d)\} + B_7 \sinh\{\omega_n(x-l_d)\} \sin\{\omega_n(x-l_d)\} + B_8 \sinh\{\omega_n(x-l_d)\} \cos\{\omega_n(x-l_d)\} + W_n A_3 \cosh\{c_n(x-l_d)\} + W_n A_4 \sinh\{c_n(x-l_d)\} & (l_d \leq x \leq l) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{ここに, } c_i = \sqrt{\frac{bG_e}{h_i} \frac{a_i^2}{E_s I_{si}} \frac{1}{K_i Z_{li}}}, \quad K_i = \frac{1}{1 + Z_{li} Z_{2i} r_{si}^2 / a_i^2},$$

$$a_i = d_{si} + h_i + d_f, \quad \omega_i = \sqrt[4]{\frac{bE_e}{4h_i} \frac{Z_{li}}{E_f I_f}}, \quad W_i = \frac{4\omega_i^4}{4\omega_i^4 + c_i^4} \frac{c_i J_i K}{a_i Z_{li}},$$

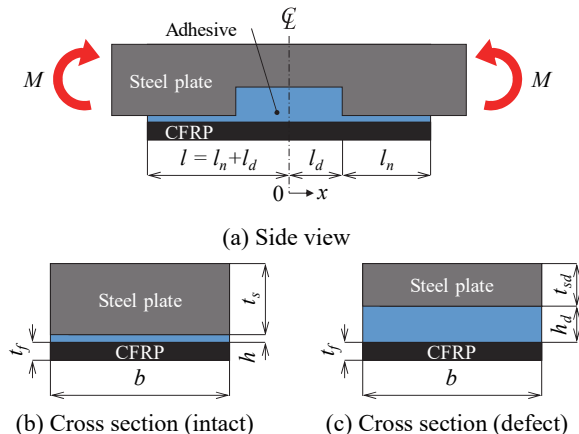


Fig. 1 Analysis model

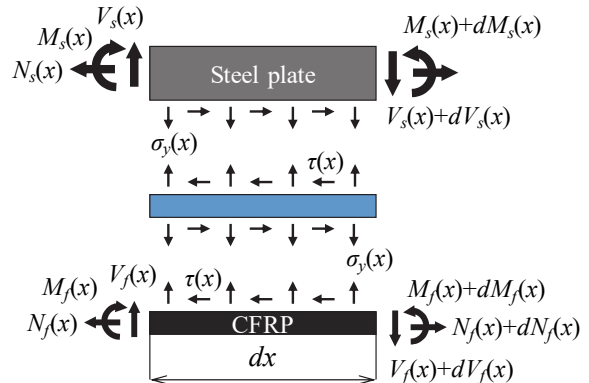


Fig. 2 Differential segment of steel plate with CFRP

$Z_{li}=1+E_f I_f/(E_s I_{si})$, $Z_{2i}=1+E_s A_{si}/(E_f A_f)$, $r_{si}=\sqrt{I_{si}/A_{si}}$, $J_i=d_f-(Z_{li}-1)d_{si}$, $A_i\sim A_4, B_i\sim B_8$:それぞれ不定係数, I_{si} :鋼板の断面2次モーメント, I_f :CFRPの断面2次モーメント, A_{si} :鋼板の断面積, A_f :CFRPの断面積, b :接着幅, d_{si} :鋼板の図心中央から鋼板下面までの距離, d_f :CFRPの図心中央からCFRP上面までの距離, h_i :接着剤の厚さ, E_s, E_f :それぞれ鋼板およびCFRPのヤング係数, E_e, G_e :それぞれ接着剤のヤング係数およびせん断弾性係数, l_d :欠損部の半長さ, l_n :一般部のCFRPの片側長さ, M :作用曲げモーメント. ただし, 添え字 i は欠損部 ($0\leq x\leq l_d$) で $i=d$, 一般部 ($l_d\leq x\leq l$) で $i=n$ とする.

鋼板およびCFRPに生じる断面力にはそれぞれ次の関係がある.

$$N_s(x)=N_f(x) \tag{3}$$

$$M_s(x)+M_f(x)-N_s(x)a_i=M \tag{4}$$

$$V_s(x)+V_f(x)=0 \tag{5}$$

また, 鋼板の曲げモーメント $M_s(x)$ は次式で与えられる.

$$M_s(x)=\frac{1}{Z_{li}}\left\{M+N_s(x)a_i\right\}-\frac{1}{4\omega_i}\frac{d^3V_s(x)}{dx^3} \tag{6}$$

さらに, 図-2に示す力のつり合いから, 接着剤のせん断応力 $\tau(x)$ および垂直応力 $\sigma_y(x)$ は次式で与えられる.

$$\tau(x)=-\frac{1}{b}\frac{dN_s(x)}{dx} \tag{7}$$

$$\sigma_y(x)=-\frac{1}{b}\frac{dV_s(x)}{dx} \tag{8}$$

図-1(a)より, $x=0$ で鋼板の軸力が対称になる条件, $x=l_d$ でCFRPの軸力および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0となる条件を与えることで, 不定係数 $A_i\sim A_4$ について解くことができる. また, 不定係数 $B_i\sim B_8$ は, $x=0$ で鋼板のせん断力および接着剤の垂直応力が対称になる条件, $x=l_d$ でCFRPのせん断力および曲げモーメントが連続する条件, $x=l_d$ で接着剤の垂直変位が連続する条件, $x=l_d$ で接着剤の垂直変位の傾きが連続する条件, $x=l$ で鋼板のせん断応力が0および鋼板の曲げモーメントが作用外力と一致する条件を与えて解くことができる. 以上の条件から, 不定係数に関する連立方程式を導出して解を求める.

3. せん断遅れ理論の妥当性

本研究では, 断面欠損を有するCFRP接着鋼板の有限要素解析による平面弾性解析を行い, 前節のせん断遅れ理論と比較する. 解析要素には4節点平面応力要素を用い, 1/2対称モデルとした. 図-3に解析モデルを示す. 作用曲げモーメント M は鋼板下面応力が $\sigma_{sm}=1.0\text{ N/mm}^2$ となるように与えた. 計算例とした部材の材料定数および寸法を表-1に示す. 図-4に有限要素解析により得られた鋼板上面の応力 $\sigma_{su}(x)$ およびCFRP下面の応力 $\sigma_{fl}(x)$ を作用曲げ応力 σ_{sm} で除した値を示す. 図には合成断面を仮定することで構造力学から得られる応力および2章の鋼板とCFRPの軸力と曲げモーメントを用いて算出した理論解も示している.

図-4より, 2章のせん断遅れ理論は有限要素解析とおおむね一致していることがわかる. また, CFRP端部 ($x=100\text{ mm}$) 付近では合成断面理論で得られる応力がその他の算出方法を一致していないことがわかる. しかし, 部材中央 ($x=0$) においては, 鋼板上面およびCFRP下面の応力は

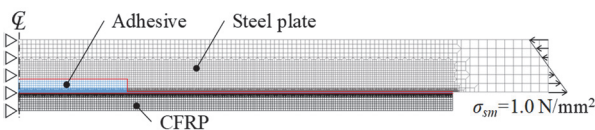


Fig 3 FE model

Table 1 Material properties and dimensions of members

Steel plate	$E_s=$	200,000	N/mm ²	$t_s=$	12	mm
	$\nu_s=$	0.30		$t_{sd}=$	9, 6	mm
				$l_d=$	25, 5	mm
CFRP	$E_f=$	150,000	N/mm ²	$t_f=$	4, 8	mm
	$\nu_f=$	0.35		$l=$	100	mm
	$E_e=$	2,500	N/mm ²	$b=$	50	mm
Adhesive	$\nu_e=$	0.36		$h=$	0.2	mm
	$G_e=$	919	N/mm ²			

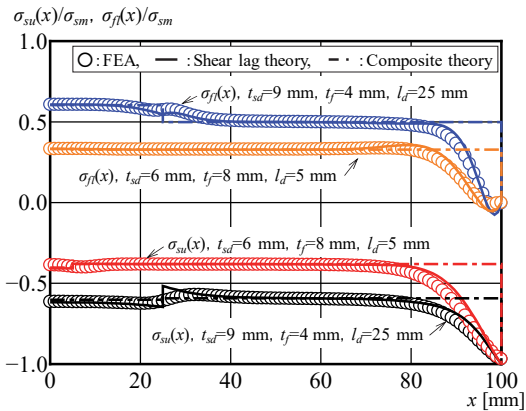


Fig. 4 Stress distribution of upper surface of steel plate and lower surface of CFRP

合成断面理論と有限要素解析やせん断遅れ理論はほぼ同じであった.

4. まとめ

本研究では, 図-1に示すような接着接合モデルに対して, 従来の微分方程式を用いた応力解析手法を拡張することができた. 本研究で対象としたモデルでは, せん断遅れ理論の結果は有限要素解析とおおむね一致した. また, 等曲げモーメントを受ける断面欠損補修鋼板では, 断面欠損部の鋼板およびCFRPの表面応力は合成断面理論と同程度であることがわかった.

参考文献

1) S.T. Smith, J.G. Teng: Interfacial stresses in plated beams, Engineering structures, pp.857-871, 2001.
2) 石川敏之, 北根安雄: 断面欠損を有する鋼板の接着補修に必要なCFRP板の長さおよび板厚の決定方法, 応用力学論文集, Vol.13, pp.911-920, 2010.
3) 石川敏之, 清水優, 服部篤史, 河野広隆: 作用外力がCFRP板接着鋼部材の接着剤に生じる応力に与える影響, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.2, pp.I_715-I_726, 2012.
4) 土木学会: FRPによる構造物の補修・補強指針(案), 複合構造シリーズ 09, 2018.