

# 一軸引張を受ける上下非対称当て板両面接着鋼板の理論解析

セントラルコンサルタント(株) 正会員 ○坂本 貴大  
 関西大学 正会員 石川 敏之

## 1. はじめに

近年、損傷した鋼部材に対する当て板工法として、鋼板やFRPを用いた当て板接着工法が適用されている<sup>1)</sup>。当て板接着による工法は、当て板を接着剤により貼り付けるだけであり、母材へボルト孔等を設けないため、部材への応力集中やそれに伴う断面欠損が生じないといった利点がある。しかし、接着剤を用いた当て板補修の問題点として、断面が急激に変化する当て板端部の接着剤に高いせん断応力と垂直応力が生じることにより、当て板がはく離することが報告されている<sup>2)</sup>。種々の断面力を受ける接着接合の接着剤に生じるせん断応力や垂直応力の理論的解法に関する研究が行われており、その解の妥当性が報告されている。本研究では、これまでに理論解析が行われていない、軸力を受ける主板の両面に厚さなどの条件が両者で異なる当て板が接着された場合に対して、接着剤に生じる応力の導出を試みる。

## 2. 上下非対称当て板両面接着鋼板の理論解析

### 2.1 接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の理論解

上下非対称当て板両面接着接合の理論解析モデルを図1に示す。本研究では接着端部の部材に断面力を与え、接着区間では外力を作用させていない。主板が軸力を受ける条件としているため、当て板端の主板にはせん断力が生じない( $Q=0$ )。また、接着剤は主板および当て板と比べて剛性が低いため、断面力を受け持たないと仮定する。当て板(上側部材, 下側部材)と母材間の接着剤に生じるそれぞれのせん断応力 $\tau_u(x)$ ,  $\tau_l(x)$ および、垂直応力 $\sigma_{yu}(x)$ ,  $\sigma_{yl}(x)$ は図1に示す微小区間の力のつり合いと、応力と変位の関係より次式で与える。

$$\tau_u(x) = -\frac{1}{b} \frac{dN_u(x)}{dx} = G_{eu} \frac{u_{uu}(x) - u_{ul}(x)}{h_u} \quad (1)$$

$$\tau_l(x) = -\frac{1}{b} \frac{dN_l(x)}{dx} = G_{el} \frac{u_{ll}(x) - u_{lu}(x)}{h_l} \quad (2)$$

$$\sigma_{yu}(x) = -\frac{1}{b} \frac{dV_u(x)}{dx} = E_{eu} \frac{v_{uu}(x) - v_{ul}(x)}{h} \quad (3)$$

$$\sigma_{yl}(x) = -\frac{1}{b} \frac{dV_l(x)}{dx} = E_{el} \frac{v_{ll}(x) - v_{lu}(x)}{h_l} \quad (4)$$

ここに、 $b$ は接着幅(部材の幅)、 $u_{uu}(x)$ ,  $u_{ul}(x)$ は当て板(上側部材)と主板間の接着剤のそれぞれ上下面の水平方向変位、 $u_{lu}(x)$ ,  $u_{ll}(x)$ は当て板(下側部材)と主板間の接着剤のそれぞれ上下面の水平方向変位、 $v_{uu}(x)$ ,  $v_{ul}(x)$ は当て板(上側部材)と主板間の接着剤のそれぞれ上下面の鉛直方向変位、 $v_{lu}(x)$ ,  $v_{ll}(x)$ は当て板(下側部材)と主板間の接着剤のそれぞれ上下面の鉛直方向変位、 $E_{eu}$ ,  $E_{el}$ は当て板(上側部材, 下側部材)と主板間のそれぞれの接着剤の弾性係数、 $G_{eu}$ ,  $G_{el}$ は当て板(上側部材, 下側部材)と主板間のそれぞれの接着剤のせん断弾性係数、 $h_u$ ,  $h_l$ は当て板(上側部材, 下側部材)と主板間のそれぞれの接着剤厚さである。

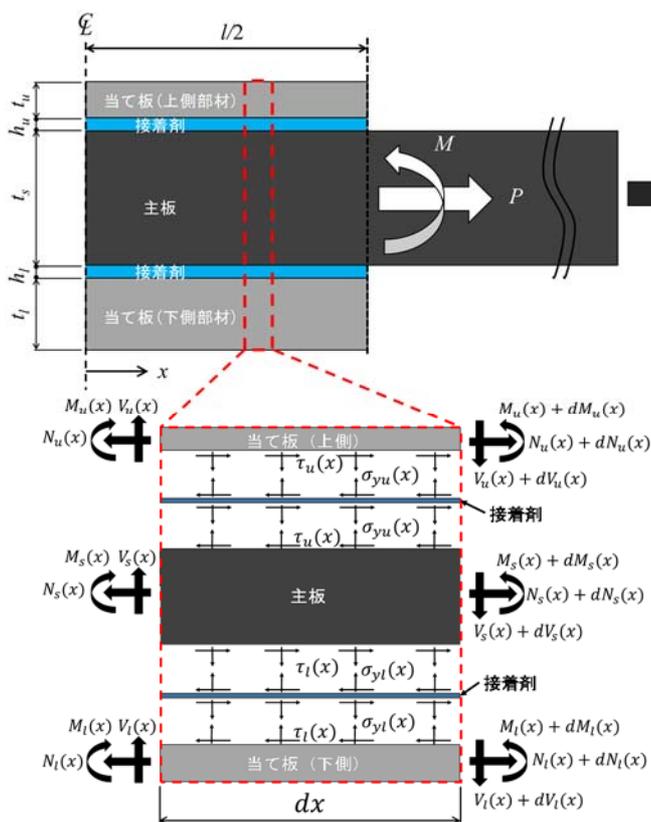


図1 上下非対称当て板両面接着接合の理論解析モデル

主板に接着される上下の当て板の厚さなどの条件がそれぞれ異なる場合に既往の研究と同様に理論解析を行うと、軸力、せん断力に関してそれぞれ4階と8階の微分方程式を解くこととなり、理論解が煩雑となる。そこで、本研究では、図2に示すように、当て板(上側部材)に関する理論解析を行う際には、主板と当て板(下側部材)を合成断面として扱い、当て板(下側部材)に関する理論解析を行う際には、主板と当て板(上側部材)を合成断面として扱うことで、簡易的に理論解の導出を行った。

式(1), (3)または、式(2), (4)からそれぞれの当て板の軸力 $N_u(x)$ ,  $N_l(x)$ およびせん断力 $V_u(x)$ ,  $V_l(x)$ に関する2階および4階の微分方程式を導出することができる。主板と当て板(下側部材)を合成断面(以下、合成断面と呼ぶ。)として、当て板(上側部材)に関して解く場合を代表すると、微分方程式の一般解は次式で与えられる。

式(1), (3)または、式(2), (4)からそれぞれの当て板の軸力 $N_u(x)$ ,  $N_l(x)$ およびせん断力 $V_u(x)$ ,  $V_l(x)$ に関する2階および4階の微分方程式を導出することができる。主板と当て板(下側部材)を合成断面(以下、合成断面と呼ぶ。)として、当て板(上側部材)に関して解く場合を代表すると、微分方程式の一般解は次式で与えられる。

キーワード 上下非対称当て板両面接着接合, 理論解析, 合成断面

連絡先 〒460-0003 名古屋市中区錦1丁目18番22号 TEL. 052-223-0378

表1 解析モデルの寸法と材料定数

解析モデル	幅 [mm]	主板と当て板					接着剤			
		弾性係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	主板厚 [mm]	当て板厚 [mm]		弾性係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	接着厚さ [mm]	接着長さ [mm]
					上側	下側				
	50	200	0.3	12.0	4.0	8.0	2.0	0.35	0.6	200

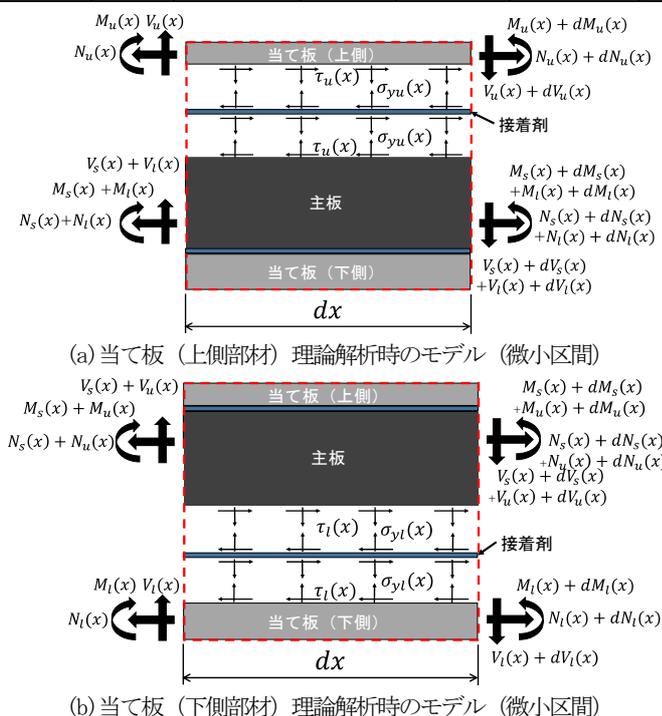
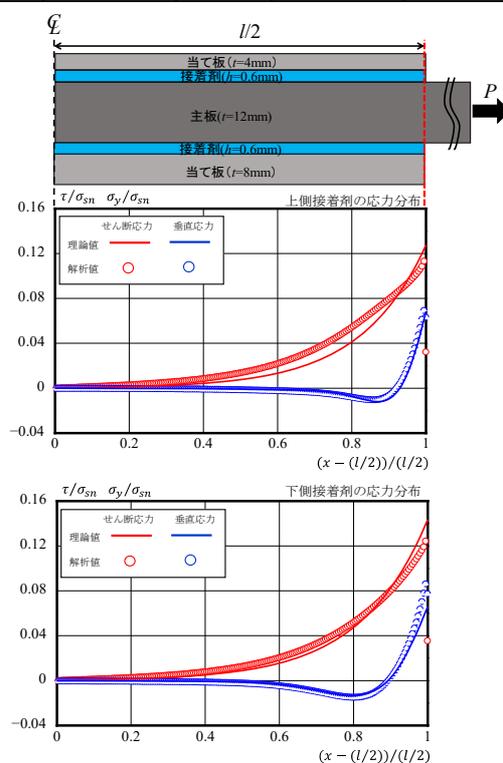


図2 主板と当て板を合成断面として扱う際の上下非対称当て板両面接着接合の理論解析モデル



$$N_u(x) = B_1 \sinh(\lambda x) + B_2 \cosh(\lambda x) + (1 - K)(1/Z_2)P - (K/a_1)M \quad (5)$$

$$V_u(x) = \cosh(\omega x) \{C_1 \sin(\omega x) + C_2 \cos(\omega x)\} + \sinh(\omega x) \{C_3 \sin(\omega x) + C_4 \cos(\omega x)\} + (W/\lambda Z_1) dN_u(x)/dx \quad (6)$$

ここに、 $\lambda = \sqrt{(bG_{eu}/h_u) \{a_1 a_2 / (E_v I_v Z_1 K)\}}$ 、 $K = 1/[1 + (Z_1 Z_2 r_v^2)/(a_1 a_2)]$ 、 $Z_1 = 1 + I_u/(nI_v)$ 、 $Z_2 = 1 + nA_v/A_u$ 、 $r_v = \sqrt{I_v/A_v}$ 、 $n = E_v/E_u$ 、 $\omega = \sqrt[4]{bE_{eu}/(4h_u) \{Z_1/(E_u I_u)\}}$ 、 $J = (t_u + h_u)/2 - (Z_1 - 1)(t_s + h_l + t_u)/2$ 、 $W = 4\lambda J/(4 + \lambda^4/\omega^4)$

$I_u$ 、 $I_v$ は当て板 (上側部材) および合成断面の断面二次モーメント、 $t_s$ 、 $t_u$ 、 $t_l$ は主板および当て板 (上側部材) および下側部材) の厚さ、 $A_u$ 、 $A_v$ は当て板 (上側部材) および合成断面の断面積、 $a_1$ は当て板 (上側部材) および合成断面の図心間距離で、 $a_2$ は当て板 (上側部材) および主板の図心間距離である。未定係数  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1 \sim C_4$ は、図2に示す接着端部の断面力 ( $B_1$ 、 $B_2$ に対しては  $N_u(\pm l/2) = 0$ 、 $C_1 \sim C_4$ に対しては  $V_u(\pm l/2) = 0$ 、 $M_u(\pm l/2) = 0$ ) を境界条件として与えることにより求められる。軸力  $N_u(x)$ 、せん断力  $V_u(x)$  を式(1)、(3)にそれぞれ代入することにより、接着剤に生じるせん断応力  $\tau_u(x)$ 、垂直応力  $\sigma_{yu}(x)$  が求められる。

## 2.2. 理論解とFEM解析結果の比較

2.1節で導出した理論解と汎用の有限要素解析プログラム MARC を用いた解析結果を比較する。比較に用いるモデルの寸法と材料定数を表1に示す。応力分布は接着中央 ( $x=0$ ) に対して対称な応力分布となるため、接着中央から片側の応力分布を示している。縦軸は作用引張応力  $\sigma_n$  で、横軸は接着半長さ ( $l/2$ ) で正規化している。接着剤に生じるせん断応力と垂直応力の分布が理論解とFEM解で同様な傾向を示しているが、せん断応力分布に若干のずれがみられた。これは、当て板と母材を合成断面としたことや曲率を一定と仮定したことが一因であると考えられる。これらの誤差に対しては、数値解析を行うことで厳密に値を算出できると考えられる。

## 3. 結論

- 1) 一定条件のもと理論解析を行い簡易的に接着剤に生じる応力を求める方法を示した。
- 2) 接着剤の応力分布は理論解とFEM解析結果で同様な傾向がみられたが、せん断応力分布に誤差がみられた。

## 参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法、鋼構造シリーズ23、2014。
- 2) 土木学会 複合構造委員会：FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術、複合構造レポート09、2013。