

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○西田 貴裕
 名古屋大学大学院環境学研究科 正会員 石川 敏之
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 大倉 一郎

1. はじめに

近年、鋼部材の補修・補強に、高力ボルト接合や溶接接合と比べて、施工性が良い接着接合が用いられ始めている¹⁾。図-1に示すような付加板が接着補強された部材(以下、接着補強部材と呼ぶ)が引張を受ける場合に対して、付加板の付着端近傍の接着剤に生じる高いせん断応力によって、付加板のはく離挙動が支配されている²⁾。しかし、引張を受ける接着補強部材の FEM 解析の結果から、付加板の付着端近傍の接着剤には垂直応力が生じていることが明らかにされており、垂直応力も付加板のはく離に影響を与えると考えられる。そこで本研究では、引張を受ける接着補強部材の接着剤に生じる垂直応力を導出し、この応力がはく離に与える影響について考察する。

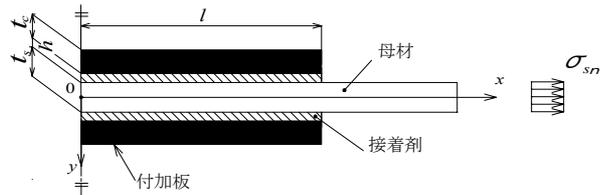


図-1 接着補強部材の側面図

2. 微分方程式の誘導

母材の板厚中央から上の部分において、引張を受ける接着補強部材の微小区間 dx の断面力のつりあいを図-2に、接着剤の変形を図-3に示す。図-2と図-3から分かるように、母材に生じる断面力および変位はそれぞれ軸力および水平方向変位のみと仮定する。図-3を参照して、接着剤に生じるせん断応力 tau と垂直応力 sigma_y がそれぞれ次式で与えられると仮定する。

$$\tau = G_e \frac{u_s - u_c}{h} \quad (1) \quad \sigma_y = -E_e \frac{v_c}{h} \quad (2)$$

ここに、 G_e 、 E_e および h はそれぞれ接着剤のせん断弾性係数、ヤング係数およびその厚さ、 u_c と u_s はそれぞれ付加板と母材の水平方向変位、ならびに v_c は付加板の鉛直方向変位である。図-2に示した微小区間 dx の断面力のつりあい、ならびに式(1)と(2)より母材に生じる応力 σ_s および付加板に生じるせん断力 V_c に関する微分方程式がそれぞれ次式で与えられる。

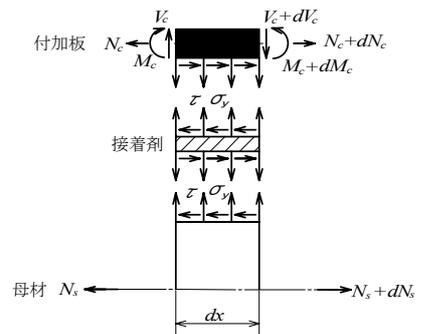


図-2 微小区間 dx の断面力

$$\frac{d^2 \sigma_s}{dx^2} - c^2 \sigma_s = -c^2 \xi_0 \sigma_{sn} \quad (3) \quad \frac{d^4 V_c}{dx^4} + 4\beta^4 V_c = \beta^4 t_c t_s b \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (4)$$

ここに、 $c = \sqrt{G_e/h} \sqrt{2/(1-\xi_0)} / \sqrt{E_s t_s}$ 、 $\beta = \sqrt{3E_e/(hE_c t_c^3)}$ 、 $\xi_0 = 1/\{1 + 2E_c t_c/(E_s t_s)\}$ は母材と付加板が完全合成された場合の母材の応力低下率、 E_s と t_s はそれぞれ母材のヤング係数とその板厚、 E_c と t_c はそれぞれ付加板のヤング係数とその板厚、 b は接着幅、ならびに σ_{sn} は付加板が接着されていない位置の母材に生じる引張応力である。

3. 微分方程式の解

図-1を参照して、 $x = \pm l$ (l は付加板の半長さ)において、 $\sigma_s = \sigma_{sn}$ の境界条件より、式(3)の解は次式で与えられる²⁾。

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{sn}} = \xi_0 + (1-\xi_0) \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} \quad (5)$$

$x = \pm l$ において、 $V_c = M_c = 0$ の境界条件より、式(4)の解は次式で与えられる。

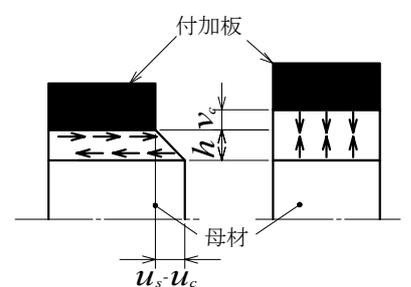


図-3 接着剤の変形

$$\frac{V_c}{b\sigma_{sn}} = \frac{t_c c t_s (1 - \xi_0)}{4 + (J\gamma)^4} \left\{ -A_1 \cos(\beta x) \sinh(\beta x) + A_2 \sin(\beta x) \cosh(\beta x) + \frac{\sinh(\beta x)}{\cosh(\beta l)} \right\} \quad (6)$$

ここに, $A_1 = \frac{\tanh(\beta l) + A_2 \sin(\beta l) \cosh(\beta l)}{\cos(\beta l) \sinh(\beta l)}$, $A_2 = -\frac{(J\gamma)^3 / 2 + \tanh(\beta l) \{ \tan(\beta l) + 1 / \tanh(\beta l) \}}{\sin(\beta l) / \sinh(\beta l) + \cosh(\beta l) / \cos(\beta l)}$, $J\gamma = c / \beta$, $\gamma = \sqrt[4]{t_c E_e / (h E_c)}$,

$J = 1 / \sqrt{2\sqrt{3}(1 + \mu_e)\xi_0}$, μ_e は接着剤のポアソン比である.

4. 接着剤に生じるせん断応力と垂直応力

図-2 に示した微小区間 dx の断面力のつりあいより, 接着剤に生じるせん断応力 τ と垂直応力 σ_y はそれぞれ次式で与えられる.

$$\tau = \frac{t_s}{2} \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (7) \quad \sigma_y = -\frac{1}{b} \frac{dV_c}{dx} \quad (8)$$

式(7)と(8)から算出される τ と σ_y の分布を図-4 に示す. この図から分かるように, 付加板の付着端近傍において τ と σ_y は高くなる.

付加板の付着端の接着剤に生じるせん断応力 τ_e と垂直応力 σ_{ye} は, 式(5)を(7)に, 式(6)を(8)に代入したものに, $x=l$ をそれぞれ代入して与えられる. さらに, 付加板の付着半長さ l が大きくなると $\tanh(\beta l) \approx 1$, $\tanh(\beta l) \approx 1$ となるため, τ_e と σ_{ye} はそれぞれ次式に収束する.

$$\tau_e = c t_s \frac{1 - \xi_0}{2} \sigma_{sn} \quad (9) \quad \sigma_{ye} = c t_s \frac{\sqrt[4]{3}\gamma(1 - \xi_0)}{4 + (J\gamma)^4} \left\{ 2 + \frac{1}{2}(J\gamma)^3 - J\gamma \right\} \sigma_{sn} \quad (10)$$

5. 接着剤に生じる主応力

板曲げを受ける接着補強部材に対して, 付加板の付着端の接着剤に生じる主応力 σ_{pe} によって付加板のはく離が評価できることが明らかにされている³⁾. 引張を受ける場合も同様に, 次式で与えられる付加板の付着端の接着剤に生じる主応力がはく離を支配すると考える.

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \quad (11)$$

式(11)を変形して次式を得る.

$$\sigma_{pe} = \alpha \tau_e \quad (12)$$

ここに, $\alpha = \frac{\sigma_{ye}}{2\tau_e} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2\tau_e}\right)^2 + 1}$, $\frac{\sigma_{ye}}{\tau_e} = \frac{2\sqrt[4]{3}\gamma}{4 + (J\gamma)^4} \left\{ 2 + \frac{1}{2}(J\gamma)^3 - J\gamma \right\}$.

式(12)から算出される α と γ の関係を図-5 に示す. この図から分かるように, γ が大きくなると, α は大きくなる. すなわち, 付加板の板厚 t_c が大きくなると σ_{ye} がはく離に与える影響が大きくなると言える.

参考文献

- 1) 板垣一也, 渡邊憲市, 鈴木博之: 炭素繊維許可樹脂板 (カーボン板) による鋼橋補強の事例, 第8回鋼構造の補修・補強技術報告論文集, 2002.
- 2) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 村上泰三: 炭素繊維シートによる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, 2001.
- 3) 石川敏之, 佐々木裕, 山田健太郎: 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板のはく離強度, 材料学会東海支部第2回学術講演会概要集, No.102, 2008.

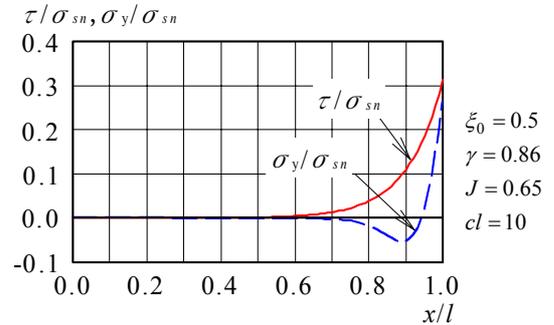


図-4 τ と σ_y の分布

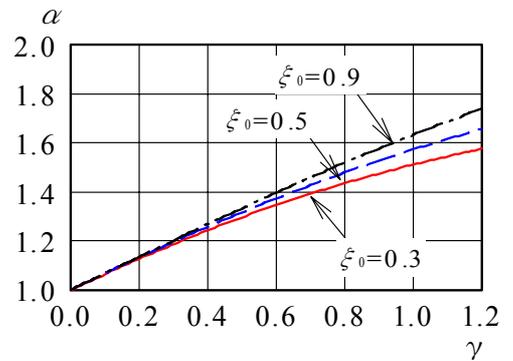


図-5 α と γ の関係