

FRP 貼合せ部材の接着層せん断応力の評価

Evaluation of the shear stress in the adhesive layer of secondary bonded FRP beam

木嶋 健, 西崎 到, 明嵐 政司

Takeshi Kishima, Itaru Nishizaki, Seishi Meiarashi

独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

This paper aims at evaluation of shear stress in the adhesive layers of the secondary bonded FRP beams. The secondary bonded FRP beams are manufactured due to restriction of FRP molding size. The stress in the adhesive layers of the secondary bonded FRP beam is a main subject because the strength of the adhesive layer is lower than that of FRP. The author evaluates the shear stress in the adhesive layer by an analytical method, assuming that the curvatures of all the FRP beams are equivalent and their shear deformations are neglected. The comparison between the calculated results and the experimental results for simply supported secondary bonded FRP beams shows that debonding at the adhesive layer is considered to occur due to not only the shear stress but also the FRP strength.

Key Words: shear stress, adhesive layer, secondary bonded beam

キーワード: せん断応力, 接着層, 貼合せ部材

1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced Plastics : 繊維強化プラスチック) は軽量性および耐食性能に優れているため、構造部材として使用する場合には、軟弱地盤地域や塩害地域での使用あるいは耐震性能の向上を目的とした使用が有力視される。インフラ分野で FRP を構造部材として適用している事例は少ないが、これは、従来の鉄鋼材料やコンクリート材料と比較してコストが高くなっている点にその大きな理由があると考えられる。但し、ライフサイクルコストの観点から見ると、維持補修費を必要としないため、ケースによっては従来の材料に比べて有利になる場合もある¹⁾。欧米においては、FRP を構造部材として使用した歩道橋や道路橋の例は幾つか報告されている²⁾が、わが国においては近年まで試験的に施工された一例が見られるのみであった。ところが、2000 年 3 月に沖縄において、FRP 歩道橋が架設されたことで、FRP を構造部材として使用する概念が認知されるようになった³⁾。

FRP を構造部材として使用する場合には、部材断面の大型化が大きな課題となる。FRP は製造コストが従来の材料に比べて高いため、コスト面も考慮した効率的な部材製造方法について検討を行っていく必要がある。FRP の成形方法としては、ハンドレイアップ成形法、レジントランスファー成形法 (RTM)、引抜成形法等があるが、

いずれの成形方法も型枠を用いた成形加工を行っている。そのため、型枠が存在しない場合には、新規に型枠を製造する必要があるため、コスト面では著しく不利になる。これまでの FRP の使用実績から、大型断面を成形する型枠は存在しない。既存の型枠から作成される小断面部材を 2 次的に接着接合して、大断面部材を製造することはコスト面から有力な手法である⁴⁾。インフラ分野で FRP を接着接合して構造物として用いた例は FRP 床版で見られ²⁾、FRP に比べて強度の低い接着層が十分に機能すれば有力な手法となり得る。

FRP 部材を接着接合して大断面の梁部材を形成する場合、多数の FRP 部材の接着が想定される。本研究では、基本的な例として 3 個の FRP 部材を接着接合した梁を取り上げ、接着層のせん断応力を評価するための定式化を行う。さらに、接着接合した FRP 梁部材の接着層せん断応力を試算し、剛性向上を目的とした幾つかの接着例を対象に、別途実施した 4 点曲げ試験で見られた接着層の剥離状況⁴⁾と比較評価を行う。

2. 接着層応力の評価方法

本研究では、3 個の FRP 部材を接着接合した梁の接着層せん断応力について評価を行うが、2 個を超える部材の接着層応力について詳細な研究を行った例はない。接

着層せん断応力については、接着接合した FRP 梁を複合梁と見なし解析を行う方法が最も単純と考えられる。接着接合を行う場合には、梁全体にわたって接着を行う方法が普通であるが、コスト面の制約から梁の一部分への接着も想定される。本研究では、このような点も視野に入れ、接着層のせん断変形に基づいた評価方法について定式化を行う。

部材接着層の応力を評価する方法として、離散化解析手法と連続体解析手法とが考えられる。前者の代表的な例が有限要素法である。有限要素法は、モデル化や数値解析に多大な時間を要するという問題はあるが、一般的にモデル化する対象の性質によらずに解析することが可能であり、汎用性が極めて高い手法であるといえる。一方、連続体解析手法は、解を得るために仮定の単純化を必要とする場合はあるが、解の性質を把握する場合に有用な方法であると考えられる。

一方、梁部材の接着を広義に捉えた場合、RC 梁の一部に FRP 板等を接着して補強する方法が、インフラ分野では広く認知されている。RC 梁の一部に FRP 板を接着した補強梁は、接着層端部で応力が高くなり、接着層応力を解析する方法がこれまでに幾つか提案されている^{5)~8)}。これらの方法の中では、Smith and Teng の提案式が最も完成された方法であり、ここでは、これを拡張した形で定式化し、接着層せん断応力を評価する。定式化にあたっては、接着接合した梁を構成する各部材について平面保持の仮定が成立するものとし、各部材の曲率も等しい⁸⁾と仮定した。

3. 貼合せ梁部材の接着層せん断応力の定式化

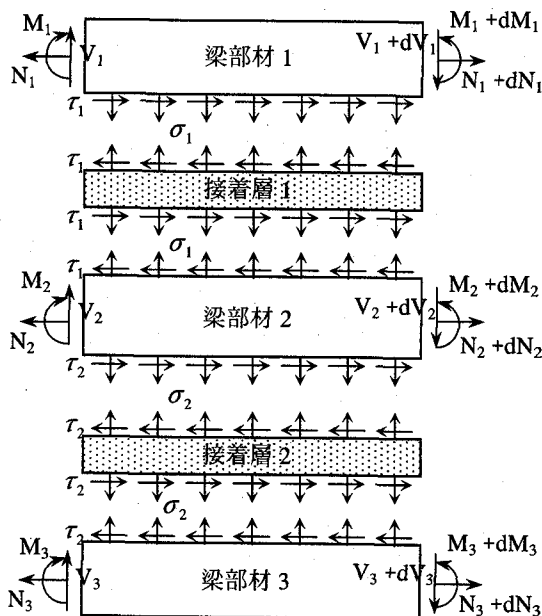


図-1 梁部材の微小部分に作用する応力状況

接着剤で貼合せた梁部材の曲げを対象に、接着層のせん断応力を評価する。ここでは、貼合せた梁部材として 3 個の梁部材を接着した梁を取り上げ、接着層せん断応力の算定式を定式化する。次に、梁全体にわたって接着されている縦断方向に等断面な梁について、等分布荷重が載荷された梁と梁中央に対称な 2 点に集中荷重が載荷 (4 点曲げ) された梁⁴⁾の 2 ケースを代表的な例として取り上げ、接着層せん断応力の評価を行うこととした。

3.1 接着層せん断応力の支配方程式

図-1 は、貼合せた梁部材の微小部分を個々の梁部材と接着層に分割し、それぞれの部材や接着層に作用する応力の状況を示したものである。図-1 に示される曲げモーメントおよびせん断力の正負の符号は通常の記述に従っている。なお、 x 軸は梁軸方向、 y 軸は梁軸と垂直 (鉛直) な方向としている。

個々の梁部材には、曲げモーメント、軸力、せん断力が作用するものとする。接着層には、厚さ方向に一定なせん断応力および垂直応力が作用するものとする。接着層のせん断応力 τ は式 (1) で示される。

$$\tau(x) = G_a \left(\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここで、 u, v は接着層の梁軸方向の変位および梁軸方向に垂直な変位、 G_a は接着層のせん断弾性係数である。

接着層のせん断応力が一定であることを考慮すると、式 (1) に示されるせん断ひずみの第一項は、接着層上下端の被着部材の変位の差と接着層厚さの比で決定される。また、接着層の曲率は梁全体の曲率と同じであると考え⁸⁾と、式 (1) の x 軸に対する 1 階微分は式 (2) のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \frac{d\tau(x)}{dx} &= G_a \left(\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} \right) \\ &= \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} - \frac{t_a}{(EI)_T} M_T \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 u_2 は接着層下端の被着部材の変位、 u_1 は接着層上端の被着部材の変位を表している。また、 t_a は接着層の厚さ、 $(EI)_T$ は梁全体の剛性、 M_T は梁全体にかかる曲げモーメントである。これを、図-1 に示す接着層 1, 2 におけるせん断応力の x 軸に対する 1 階微分として定式化する。括弧内第 3 項の接着層曲率に関する項が無視できると考える⁸⁾と、式 (3) のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_1}{dx} &= \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \left(\frac{du_2^U}{dx} - \frac{du_1^L}{dx} \right) \\ \frac{d\tau_2}{dx} &= \frac{G_{a2}}{t_{a2}} \left(\frac{du_3^U}{dx} - \frac{du_2^L}{dx} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 τ_1, τ_2 は接着層 1, 2 のせん断応力、変位の上付添字 U, L は、下付添字の示す被着部材の上端と下端

における変位を示している。また、 G_{a1}, G_{a2} は接着層 1,2 のせん断弾性係数、 t_{a1}, t_{a2} は接着層 1,2 の厚さを示している。式 (3) の中で示されるひずみ分布を、曲げモーメント、軸力等を用いて表わすと式 (4) のようになる。式

(4) の設定にあたっては、取り扱いを簡単にするため、個々の梁部材のせん断変形は無視することとした。せん断変形を無視することにより、接着層の垂直応力 σ を含む項が消去され、式は接着層のせん断応力 τ のみで記述されることになる。

$$\begin{aligned} \frac{du_1^L}{dx} &= \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1 + \frac{N_1}{E_1 A_1} \\ \frac{du_2^U}{dx} &= \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2 + \frac{N_2}{E_2 A_2}, \quad \frac{du_2^L}{dx} = \frac{y_2}{E_2 I_2} M_2 + \frac{N_2}{E_2 A_2} \\ \frac{du_3^U}{dx} &= \frac{-y_3}{E_3 I_3} M_3 + \frac{N_3}{E_3 A_3} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 G_1, G_2, G_3 は梁部材 1,2,3 のせん断弾性係数、 E_1, E_2, E_3 は梁部材 1,2,3 の弾性係数、 I_1, I_2, I_3 は梁部材 1,2,3 の断面 2 次モーメント、 A_1, A_2, A_3 は梁部材 1,2,3 の断面積、 M_1, M_2, M_3 は梁部材 1,2,3 の曲げモーメント、 N_1, N_2, N_3 は梁部材 1,2,3 の軸力、 y_1, y_2, y_3 は、梁部材 1,2,3 における中立軸から上下端までの距離、 b は梁部材の幅を示している

次に、梁部材に作用する軸力および曲げモーメントを接着層のせん断応力で表わす。梁部材 1,2,3 に対する水平方向の釣り合いを考慮すると、軸力と接着層のせん断応力との関係は式 (5) のようになる。

$$\begin{aligned} N_1(x) &= -b \int_0^x \tau_1(x) dx \\ N_2(x) &= b \int_0^x (\tau_1(x) - \tau_2(x)) dx \\ N_3(x) &= b \int_0^x \tau_2(x) dx \end{aligned} \quad (5)$$

接着剤で貼合せた梁部材の垂直断面に対する曲げモーメントの釣り合いを考慮すると、貼合せ梁を構成する各梁部材が同じ曲率で変形すると仮定しているため、各梁部材に作用する曲げモーメントと接着層のせん断応力との関係は式 (6) の通りになる。

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{E_1 I_1}{E_T} [M_T - b \int_0^x \tau_1(y_1 + y_2 + t_{a1}) dx \\ &\quad - b \int_0^x \tau_2(y_2 + y_3 + t_{a2}) dx \\ M_2 &= \frac{E_2 I_2}{E_T} [M_T - b \int_0^x \tau_1(y_1 + y_2 + t_{a1}) dx \\ &\quad - b \int_0^x \tau_2(y_2 + y_3 + t_{a2}) dx \\ M_3 &= \frac{E_3 I_3}{E_T} [M_T - b \int_0^x \tau_1(y_1 + y_2 + t_{a1}) dx \end{aligned}$$

$$- b \int_0^x \tau_2(y_2 + y_3 + t_{a2}) dx \quad (6)$$

$$(E_T = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3)$$

接着層のせん断応力に関する微分方程式を定式化すると、せん断応力の 2 階微分について式 (7) を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tau_1}{dx^2} &= \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \left(\frac{-y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2}{dx} + \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1}{dx} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1}{dx} \right) \\ \frac{d^2 \tau_2}{dx^2} &= \frac{G_{a2}}{t_{a2}} \left(\frac{-y_3}{E_3 I_3} \frac{dM_3}{dx} + \frac{1}{E_3 A_3} \frac{dN_3}{dx} - \frac{y_2}{E_2 I_2} \frac{dM_2}{dx} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{E_2 A_2} \frac{dN_2}{dx} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式 (5)、(6) の 1 階微分を用いて、式 (7) を表すと式 (8) を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tau_1}{dx^2} &= \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \left[\frac{b(y_1 + y_2)}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) + \frac{b}{E_1 A_1} + \frac{b}{E_2 A_2} \right] \tau_1 \\ &\quad + \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \left[\frac{b(y_1 + y_2)}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) - \frac{b}{E_2 A_2} \right] \tau_2 \\ &\quad - \frac{G_{a1} V_T}{t_{a1}} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_T} \right) \\ \frac{d^2 \tau_2}{dx^2} &= \frac{G_{a2}}{t_{a2}} \left[\frac{b(y_2 + y_3)}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) + \frac{b}{E_2 A_2} + \frac{b}{E_3 A_3} \right] \tau_2 \\ &\quad + \frac{G_{a2}}{t_{a2}} \left[\frac{b(y_2 + y_3)}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) - \frac{b}{E_2 A_2} \right] \tau_1 \\ &\quad - \frac{G_{a2} V_T}{t_{a2}} \left(\frac{y_2 + y_3}{E_T} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

τ_1 および τ_2 に関する式 (8) を、 τ_1 または τ_2 の式に統一すると、式 (9) を得る。

$$\begin{aligned} R_1 \frac{d^4 \tau_1}{dx^4} + R_2 \frac{d^2 \tau_1}{dx^2} + R_3 \tau_1 + R_4 V_T + R_5 \frac{d^2 V_T}{dx^2} &= 0 \\ S_1 \frac{d^4 \tau_2}{dx^4} + S_2 \frac{d^2 \tau_2}{dx^2} + S_3 \tau_2 + S_4 V_T + S_5 \frac{d^2 V_T}{dx^2} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 および S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 は式 (10) に示す通りである。

$$\begin{aligned} R_1 &= 1 \\ R_2 &= -\frac{G_{a1}}{t_{a1}} b \left(\frac{y_1 + y_2}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\ &\quad - \frac{G_{a2}}{t_{a2}} b \left(\frac{y_2 + y_3}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{1}{E_3 A_3} \right) \\ R_3 &= \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \frac{G_{a2}}{t_{a2}} b \left(\frac{y_1 + y_2}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\ &\quad \times b \left(\frac{y_2 + y_3}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{1}{E_3 A_3} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} b \left(\frac{y_1 + y_2}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) - \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\
& \times b \left(\frac{y_2 + y_3}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) - \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\
R_4 = & -\frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} b \left(\frac{y_2 + y_3}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{1}{E_3 A_3} \right) \\
& \times \frac{y_1 + y_2}{E_T} + \frac{y_2 + y_3}{E_T} \\
& \times \frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} b \left(\frac{y_1 + y_2}{E_T} (y_2 + y_3 + t_{a2}) - \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\
R_5 = & \frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} \frac{y_1 + y_2}{E_T} \\
S_1 = & R_1, \quad S_2 = R_2, \quad S_3 = R_3 \\
S_4 = & -\frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} b \left(\frac{y_1 + y_2}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\
& \times \frac{y_2 + y_3}{E_T} + \frac{y_1 + y_2}{E_T} \\
& \times \frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} b \left(\frac{y_2 + y_3}{E_T} (y_1 + y_2 + t_{a1}) - \frac{1}{E_2 A_2} \right) \\
S_5 = & \frac{G_{a1} G_{a2}}{t_{a1} t_{a2}} \frac{y_2 + y_3}{E_T} \quad (10)
\end{aligned}$$

3.2 等分布荷重を載荷した単純梁

図-2 に示すような、両端が単純支持され、等分布荷重 p が載荷された支間長 L の梁について、接着層せん断応力の算定式を導出する。

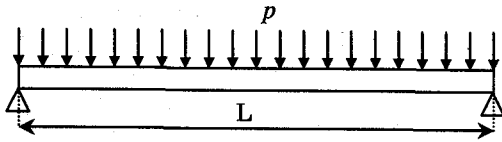


図-2 等分布荷重載荷

梁のせん断力が $V_T = p(L/2 - x)$ (x : 支点からの距離) で表わされることを考慮すると、式 (9) の一般解は式 (11) のように表わすことができる。

$$\tau(x) = \alpha_1 e^{mx} + \alpha_2 e^{-mx} + \alpha_3 e^{nx} + \alpha_4 e^{-nx} + \alpha_5 p \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad (11)$$

ここに、 m, n は式 (12) に示す値をとる。式 (12) に示される C_1, C_2, C_3 は、接着層 1 については R_1, R_2, R_3 、接着層 2 については S_1, S_2, S_3 となる。

$$\begin{aligned}
m^2 = & \frac{-C_2 + \sqrt{C_2^2 - 4C_1 C_3}}{2C_1} \\
n^2 = & \frac{-C_2 - \sqrt{C_2^2 - 4C_1 C_3}}{2C_1} \quad (12)
\end{aligned}$$

境界条件は、支点の曲げモーメントが 0、梁中央のせん断力が 0 となる。支点の曲げモーメントが 0 であると

の条件から、支点における接着層せん断応力の 1 階微分は 0 となる。また、梁中央のせん断力が 0 であること、曲げモーメントの変化率が 0 であることを考慮すると、梁中央の接着層せん断応力およびせん断応力の 2 階微分は 0 となる。以上の関係より算定式の係数をまとめると、式 (13) の通りになる。なお、係数 a は接着層 1、係数 b は接着層 2 に対する値である。

$$\begin{aligned}
a_1 = & \frac{p}{m(n^2 - m^2)(1 + e^{mL})} \left(n^2 a_5 - \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \frac{y_1 + y_2}{E_T} \right) \\
a_3 = & \frac{p}{n(m^2 - n^2)(1 + e^{nL})} \left(m^2 a_5 - \frac{G_{a1}}{t_{a1}} \frac{y_1 + y_2}{E_T} \right) \\
a_2 = & -e^{mL} a_1, \quad a_4 = -e^{nL} a_3 \\
b_1 = & \frac{p}{m(n^2 - m^2)(1 + e^{mL})} \left(n^2 b_5 - \frac{G_{a2}}{t_{a2}} \frac{y_2 + y_3}{E_T} \right) \\
b_3 = & \frac{p}{n(m^2 - n^2)(1 + e^{nL})} \left(m^2 b_5 - \frac{G_{a2}}{t_{a2}} \frac{y_2 + y_3}{E_T} \right) \\
b_2 = & -e^{mL} b_1, \quad b_4 = -e^{nL} b_3 \quad (13)
\end{aligned}$$

a_5, b_5 については、せん断力 V_T の 2 階微分が 0 であることを考慮すると、式 (14) の通りになる。

$$a_5 = -\frac{R_4}{R_3}, \quad b_5 = -\frac{S_4}{S_3} \quad (14)$$

3.3 2点集中荷重を載荷した単純梁

図-3 に示すような、両端が単純支持され、梁中央に対称な 2 点に集中荷重 P が載荷 (4 点曲げ) された支間長 L の梁について、接着層せん断応力の算定式を導出する。

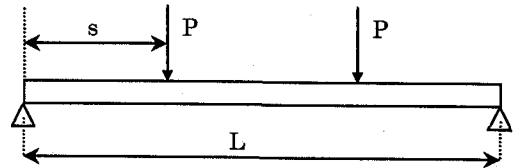


図-3 2点集中荷重載荷

せん断力は、支点と載荷点の間では $V_T = P$ であるが、載荷点 2 点の間では 0 である。支点から載荷点までの距離を s とすると、式 (9) の一般解は、 τ_1 及び τ_2 に対して、式 (15) のように表わすことができる。

$$\begin{aligned}
x \leq s \\
\tau(x) = & \alpha_1 e^{mx} + \alpha_2 e^{-mx} + \alpha_3 e^{nx} + \alpha_4 e^{-nx} + \alpha_5 P \\
x > s \\
\tau(x) = & \beta_1 e^{mx} + \beta_2 e^{-mx} + \beta_3 e^{nx} + \beta_4 e^{-nx} \quad (15)
\end{aligned}$$

境界条件は、支点の曲げモーメントが 0、梁中央のせん断力が 0 となる。また、載荷点において接着層せん断応力の連続性を仮定する。支点の曲げモーメントが 0 で

あることを考慮すると、支点における接着層せん断応力の1階微分は0になる。また、梁中央の接着層せん断応力および曲げモーメントの変化率は0である。さらに、載荷点において、せん断応力ならびにせん断応力の1階微分の連続性を仮定すると共に、2階微分、3階微分が連続となる条件を付け加える。境界条件に対応する係数 α, β は式(16)の通りである。

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{e^{ms} - e^{m(L-s)}}{e^{ms} - e^{-ms}} \beta_1, & \alpha_2 &= \alpha_1 \\ \alpha_3 &= \frac{e^{ns} - e^{n(L-s)}}{e^{ns} - e^{-ns}} \beta_3, & \alpha_4 &= \alpha_3 \\ \beta_1 &= -\frac{n^2 P}{n^2 - m^2} \frac{e^{ms} - e^{-ms}}{2(1 + e^{nL})} \alpha_5, & \beta_2 &= \beta_1 \\ \beta_3 &= -\frac{m^2 P}{m^2 - n^2} \frac{e^{ns} - e^{-ns}}{2(1 + e^{nL})} \alpha_5, & \beta_4 &= \beta_3\end{aligned}\quad (16)$$

ここで、 α_5 は、 τ_1 に対する算定式については式(14)に示す a_5 、 τ_2 に対する算定式については式(14)に示す b_5 となる。

4. 貼合せ梁部材の接着層せん断応力の評価

インフラへの適用が想定されるFRPとしては、GFRP（ガラス繊維強化プラスチック：Glass-fiber Reinforced Plastics）あるいはCFRP（炭素繊維強化プラスチック：Carbon-fiber Reinforced Plastics）が一般的と考えられる。また、FRPの成形断面材としては、板材の他にI型断面材あるいは□型断面材等が考えられる。ここでは、GFRPあるいはCFRPで成形されたI型断面あるいは□型断面梁の上面と下面に、GFRP板あるいはCFRP板を接着剤で貼合せた梁部材を対象に、接着層のせん断応力を評価することとした。

せん断応力の評価にあたっては、等分布荷重あるいは梁中央に対称な2点に集中荷重を載荷（4点曲げ）した3部材の貼合せ梁の曲げを対象に、複合梁と見なした計算値との比較を行った。さらに、剛性向上を目的としてFRPを適切に接着した梁部材について、今回の提案式による計算値と4点曲げ試験で見られた剥離状況と比較評価を行った。

GFRPを梁部材として使用する場合、弾性係数が鉄に比べて一桁程度低いことから、たわみ制限の確保が大きな課題となる。一方、CFRPは弾性係数が比較的高いため、たわみ制限の確保を図る上で有用な構造材料であるが、価格が高いのが問題となっている。そこで、接着層のせん断応力を算定するにあたっては、対象とする貼合せ梁部材の構成を、表-1に示す通りとした。なお、GFRPの弾性係数は23.26GPa、CFRPの弾性係数は83.58GPa、接着層のせん断弾性係数は1480MPaとしている。また、スパン長Lは1300mm、貼合せ梁部材を構成する各梁部

材の寸法は、実験で用いた図-4に示す寸法とした⁴⁾。

表-1 貼合せ梁部材の構成

	上部部材	中央部材	下部部材
Case1	GFRP	GFRP	GFRP
Case2	GFRP	GFRP	CFRP
Case3	CFRP	GFRP	CFRP
Case4	CFRP	CFRP	CFRP

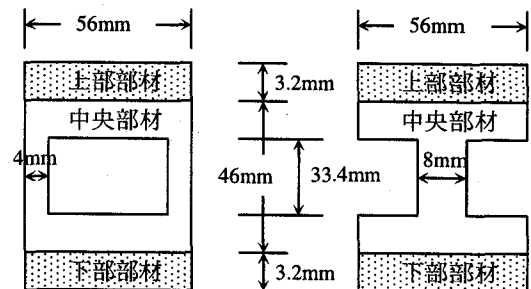


図-4 貼合せ梁部材を構成する各部材の寸法

4. 1 複合梁と見なした計算値との比較

3部材を貼合せた梁部材において、各接着層のせん断応力を、複合梁と見なして算出したせん断応力と比較する。比較は表-1に示すCase1～Case4の構成をもつ梁部材について行った。等分布荷重（ $p=10\text{N/mm}$ ）載荷の場合、支点上での接着層せん断応力に関する両者の誤差は、Case1で5.5%程度、Case2で3.3～4.9%程度、Case3で2.8%程度、Case4で4.5%程度となっている。いずれも、複合梁と見なして算出した計算値が今回の提案式による計算値をやや上回っているものの、両者は比較的良好一致する結果となっている。また、2点集中荷重（ $P=20\text{kN}$ ， $s=350\text{mm}$ ）載荷の場合、支点上での接着層せん断応力に関する両者の誤差は、Case1で4.7%程度、Case2で2.3～4.0%程度、Case3で1.7%程度、Case4で3.0%程度となっている。等分布荷重載荷の場合と同様、複合梁と見なした計算値と今回の提案式による計算値とは、比較的良好

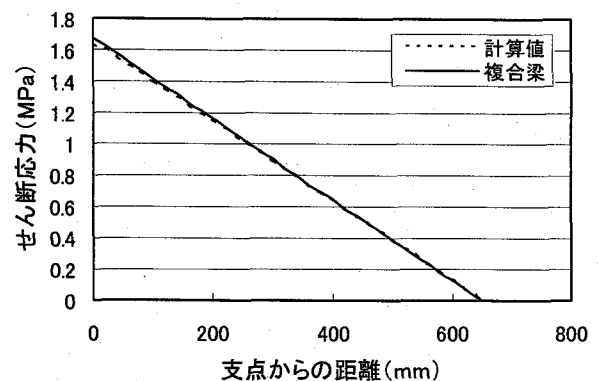


図-5 (a) 等分布荷重 (Case3)

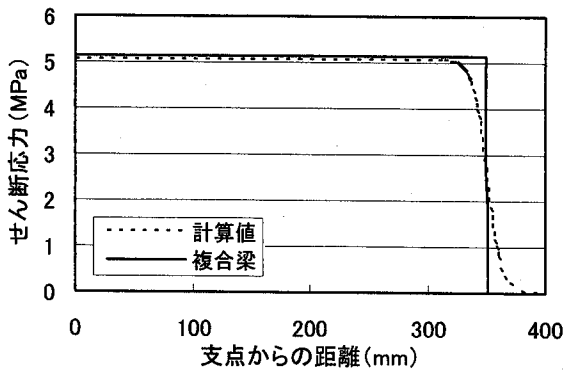


図-5(b) 2点集中荷重 (Case3)

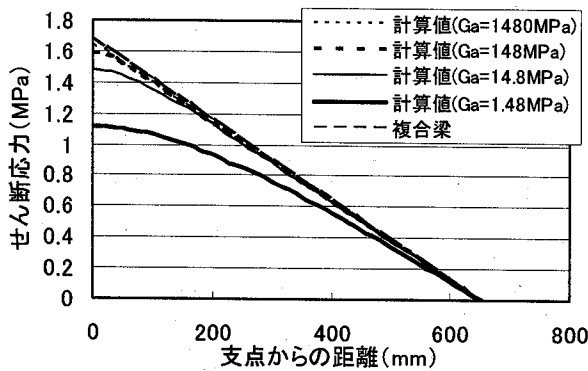


図-6(a) 等分布荷重 (Case3)

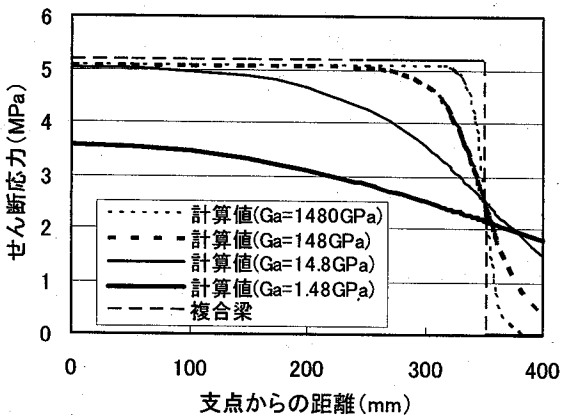


図-6(b) 2点集中荷重 (Case3)

一致する結果となっている。今回の提案式では、接着層のせん断変形を考慮しており、接着層のせん断弾性係数が低くなると、接着層での応力伝達は十分でなくなる。通常の接着剤を想定した今回のせん断弾性係数では、接着層での応力伝達が十分に行われたと考えられ、提案式による計算値と複合梁と見なした計算値との間には殆ど差が現れなかった。また、複合梁と見なした計算値が今回の提案式による計算値よりも若干上回った理由の一つとして、せん断応力導出の際に、接着層曲率を考慮した項を無視したことも考えられる。せん断弾性係数を、今回想定した値の 1/10、1/100、1/1000 とした場合について、接着層せん断応力を試算した結果は図-6 に示す通りで

ある。複合梁と見なした計算値は接着剤の弾性係数による差が殆どないことから、今回のせん断弾性係数より推定される弾性係数 3700MPa を用いた計算値のみを示している。これを見ると、せん断弾性係数を 1/100 以下とした場合に、接着層での応力伝達が十分に行われず、接着層せん断応力は複合梁と見なした計算値に比べて低下する傾向が見られた。しかし、接着層として、通常の接着剤を使用する場合には、複合梁と見なした計算値で十分と考えられる。

4. 2 貼合せ梁部材の接着層せん断応力

2点集中荷重 ($P=20\text{kN}$, $s=350\text{mm}$) 载荷の梁を対象に、表-1 に示す Case1~Case4 について、接着層せん断応力を試算した結果は、図-7 に示す通りである。図-7 (a) は接着層 1、図-7 (b) は接着層 2 に対する結果である。これを見ると、剛性の高い CFRP 板を I 型あるいは口型の GFRP 部材に貼合せた Case3 の場合には、接着層せん断応力が Case1,4 の約 1.7 倍になっている。また、Case2 の場合には、接着層 2 のせん断応力が Case1,4 の約 1.9 倍と高くなっている。

4.1 の検討結果により、今回の提案式による計算値が複合梁と見なした計算値と比較的よく一致していたことから、接着層せん断応力は複合梁の仮定を用いてある程度推定できると考えられる。複合梁と見なした場合には、接着層せん断応力は、上部部材あるいは下部部材の厚さ・

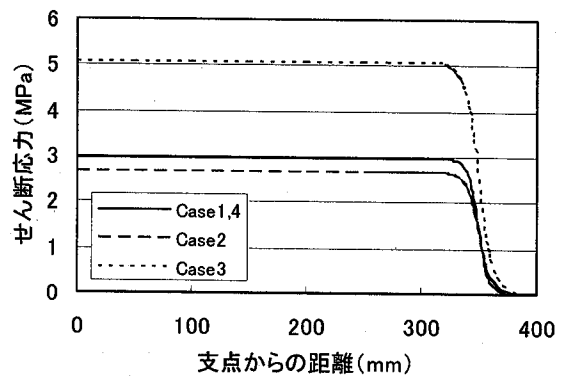


図-7 (a) 接着層 1 のせん断応力

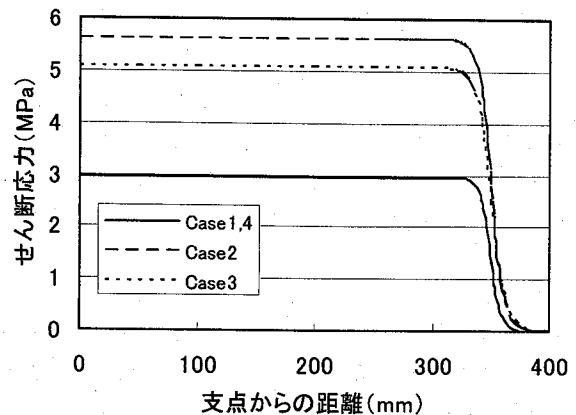


図-7 (b) 接着層 2 のせん断応力

弾性係数、および、梁の曲率、中立軸からの距離の積で規定される。Case3 の場合には、CFRP 板の弾性係数は GFRP 板の約 3.6 倍、曲率は Case1 の約 0.47 倍となっており、接着層せん断応力は Case1 の約 1.7 倍となる。この数値は、今回の提案式による上述の結果とほぼ等しい。Case2 の場合には、曲率は Case1 の約 0.7 倍であるが、中立軸の位置がやや下方に偏り、中立軸から下部部材重心までの距離は Case1,3,4 の約 0.74 倍となっている。この結果、接着層 2 のせん断応力は Case1 の約 1.9 倍となり、上述の結果に一致する。GFRP 部材に CFRP 板を貼合せて剛性を向上させる方法は、梁高の制限が加えられている場合には有用であるが、全ての梁部材に GFRP あるいは CFRP を用いて貼合せた場合に比べて、接着層せん断応力が高くなることに注意を払う必要がある。

実験は Case1,2,3 について実施したが、貼合せ部材が構造物として破壊する前に接着層に剥離が生じたのは Case2 および Case3 であった⁴⁾。Case3 では、載荷点直下付近で接着層 1 が剥離して上部部材に座屈が生じた。終局状態での接着層 1 のせん断応力を試算すると、Case1 では約 3.1MPa、Case2 では接着層 1 に対して約 3.3MPa、接着層 2 に対して約 6.9MPa となる。しかし、Case3 で上部部材に座屈が生じた時の接着層せん断応力は約 3.2MPa となっており、剥離を生じなかった Case1、Case2 のせん断応力と殆ど変わらない結果となった。また、同様に剥離を生じなかった Case2 に対する接着層 2 のせん断応力の方が高いことも考慮すると、剥離現象を接着層せん断応力だけで説明するのは困難と考えられる。一方、終局状態における載荷点直下付近での上部部材断面中央の圧縮応力を、複合梁と見なして試算すると、Case1 では約 340MPa、Case2 では約 360MPa であった。また、Case3 で上部部材座屈時の圧縮応力を試算すると約 350MPa であった。今回の実験と同じ樹脂を用いた FRP の圧縮強度を見ると、CFRP の強度は GFRP の強度よりも低い結果となっている⁹⁾。Case3 で接着層が剥離して上部部材に座屈が生じた理由として、CFRP の圧縮強度が低い点も影響していたと考えられる。

4. 3 等剛性貼合せ梁部材の接着層せん断応力

次に、中央部材を GFRP として上下部材に GFRP 板あるいは CFRP 板を用いた梁を対象に、全体剛性を同一とした場合の接着層せん断応力を評価する。前述した通り FRP を梁部材として用いる場合には、たわみが大きな問題となるため、梁全体の剛性確保が課題となる。ここでは、表-1 に示す Case1 および Case2 の梁剛性を、Case3 の梁剛性と同一にして、接着層せん断応力を評価した。Case3 の断面寸法を図-4 に示す数値として、Case1、Case2、Case3 の梁剛性を同一にした場合、Case1、Case2 で用いる GFRP 板および CFRP 板の寸法は表-2 の通りになる。梁のスパン長 L を 1300mm、荷重 P を 20kN、支点から載荷点までの距離 s を 350mm として、接着層せん

表-2 上部部材および下部部材の板厚

	上部部材	下部部材
Case1	9.16mm	9.16mm
Case2	9.18mm	3.2mm
Case3	3.2mm	3.2mm

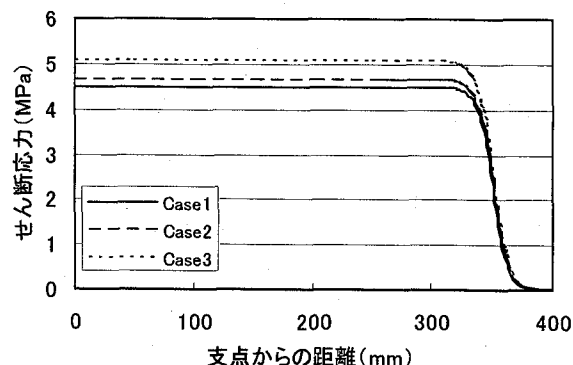


図-8 (a) 接着層 1 のせん断応力

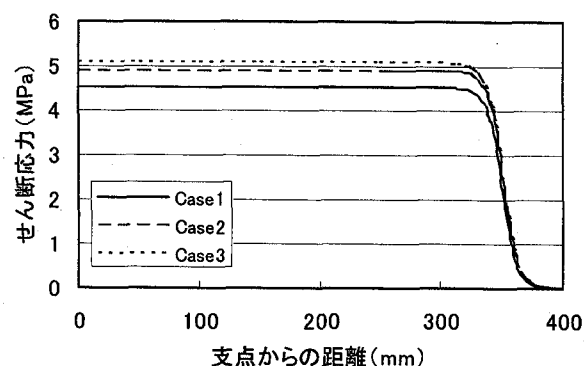


図-8 (b) 接着層 2 のせん断応力

断応力を試算した結果は図-8 に示す通りである。接着層 1 のせん断応力について Case2 と Case3 を比較すると、GFRP 板を上面に貼合せた Case2 のせん断応力は、CFRP 板を上面に貼合せた Case3 のせん断応力の約 0.92 倍となっている。一方、接着層 2 のせん断応力については、Case2 は Case3 の約 0.97 倍である。また、上下面に GFRP 板を貼合せた Case1 の接着層せん断応力は、上下面に CFRP 板を貼合せた Case3 のせん断応力の約 0.9 倍である。4.2 に記述した通り、接着層せん断応力は、上部部材あるいは下部部材の厚さ・弾性係数、および、梁の曲率、中立軸からの距離の積で規定される。梁の曲率を同一にした場合、上下部材の板厚・弾性係数および中立軸から上下部材までの距離が増大するほどせん断応力は大きくなる。図-8 を見ると、各々の要因が相殺され、Case1、Case2、Case3 のいずれの場合に対しても、接着層せん断応力に大きな違いは見られなかった。Case2、Case3 については実験を行っているが、4.2 で記述した通り Case3 の接着層 1 でのみ剥離が見られ、上部部材に座屈が生じた。終局

状態における載荷点直下付近での上部部材断面中央の圧縮応力を試算した結果は、Case2 では約 220MPa となっており、Case3 の接着層剥離時の圧縮応力約 350MPa に比べて低い値である。接着層せん断応力に大差がないことから、剥離には GFRP に比べて圧縮強度の低い CFRP の特性が影響していたと考えられる。

これまでの考察は、被着材のせん断変形を無視すると共に、個々の梁部材が同一の曲率で曲げ変形するとした計算値に基づいて行ってきた。一方、Case2 に対する実験では支間中央付近の接着層 2 で剥離が見られたことから⁴⁾、上記の仮定に基づいた計算では説明できない部分もあると考えられる。今後、有限要素法による解析を行い、貼合せ梁部材の力学特性を総合的に評価することが必要と考えられる。

5. まとめ

本研究では、部材のせん断変形やねじれ変形などを考慮せず、単純な曲げ変形のみを考慮して、接着層のせん断応力を評価した。本研究でまとめられた事項を列挙すると下記の通りになる。

- ① 3 部材を貼合せた梁部材の接着層せん断応力について、貼合せた梁部材を構成する個々の梁部材のせん断変形を考慮せず、同一の曲率で曲げ変形すると仮定した場合に、定式化することができた。
- ② 両端単純支持梁について、等分布荷重あるいは 2 点集中荷重載荷について、3 部材の接着を仮定して定式化した今回の式による計算値と複合梁と見なした計算値とを比較した結果、両者は比較的良く一致することが確認された。
- ③ 中央部材に GFRP を用い、上下面に剛性の高い CFRP 板を貼合せた梁の場合には、全部材に GFRP あるいは CFRP を用いた梁に比べて、接着層のせん断応力が高くなることが確認された。
- ④ 梁全体の剛性を同一にして、上面に CFRP 板の代わりに GFRP 板を貼合せた場合には、接着層せん断応力が CFRP 板を貼合せた場合に比べてやや小さくなることが分かった。また、下層接着層のせん断応力は、上面に CFRP を貼合せた場合とほぼ同一になっ

ていることが確認された。

- ⑤ 実験値との比較を行った結果、実験で見られた接着層の剥離状況は、せん断応力計算値だけで説明するのは困難と考えられた。今後、有限要素法により、材料強度も含めた詳細な検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) S. Meiarashi, I. Nishizaki, T. Kishima, Life-cycle cost of all composite suspension bridge, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.6, No.4 (2002.11)
- 2) C. E. Bakis, L. C. Bank, V. L. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla and T. C. Triantafillou, Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.6, No.2, 73-87 (2002.5)
- 3) 北山暢彦、佐伯彰一、山城和男、沖縄ロードパーク歩道橋の設計、第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集、土木学会、103-106 (2000.1)
- 4) 林耕四郎、渡邊哲也、明嵐政司、木嶋健、FRP 貼り合せ部材の 4 点曲げ試験、I-666、第 57 回土木学会年次学術講演会 (2002.9)
- 5) T. M. Roberts, Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams, The Structural Engineer, Vol.67, No.12, 229-233 (1989.6)
- 6) B. Taljsten, Strengthening of Beams by Plate Bonding, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 206-212 (1997.11)
- 7) A. M. Malek, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, ACI Structural Journal, 142-152 (1998)
- 8) S. T. Smith and J. G. Teng, Interfacial stresses in plated beams, Engineering Structures 23, 867-871 (2001)
- 9) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室他、繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書 (II)、16-47 (2000.12)

(2002年9月13日受付)