部分的に緊張力を与えた当て板接着鋼板のはく離曲げモーメント

清水 優¹・石川敏之²・服部篤史³・河野広隆⁴

¹正会員 名古屋大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail: shimizu@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 関西大学准教授 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail: t-ishi@kansai-u.ac.jp

³正会員 京都大学准教授, 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: hattori.atsushi.7z@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学教授, 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: kawano.hiroataka.8n@kyoto-u.ac.jp

経年劣化や設計荷重の変更によって耐荷力が不足した鋼部材に対して、当て板を接着して補強する方法が行われ始めている。さらに、施工事例は少ないが、緊張力を与えた当て板を鋼部材に接着することで鋼部材にプレストレスを導入する方法が一部で用いられている。一方、当て板に緊張力を与えて接着する場合には、緊張力の解放時に接着剤にせん断応力や垂直応力が作用するため、小さな荷重で当て板がはく離してしまう可能性がある。当て板に緊張力を与えて接着する際のはく離荷重を向上するため、当て板端部に非緊張部を設ける方法が提案されている。本研究では、当て板の端部を除く範囲に緊張力を与えられる装置を用いて当て板に部分的に緊張力を与え、プレストレス導入量やはく離荷重を検証した。その結果、当て板端部に非緊張部を設けた場合であっても、当て板接着中央部では当て板全体を緊張したときと同等のプレストレスが導入されることがわかった。また、非緊張部を設けた試験体と当て板全体を緊張した試験体では、非緊張部を設けた方がはく離荷重が大きくなった。さらに、接着剤に生じる主応力を用いてはく離荷重の向上効果を定量的に評価した。

Key Words : pre-tensioned, debonding, adhesive, steel plate, strengthening

1. はじめに

経年劣化や設計荷重の変更によって耐荷力が不足した鋼部材に対して、炭素繊維強化樹脂(CFRP)板や鋼板などの当て板を接着する方法が用いられ始めている¹⁾⁵⁾。さらに、当て板にあらかじめ緊張力を導入して接着することによって被着体にプレストレスを導入する方法も開発されており、一部のコンクリート部材や鋼部材の補強に用いられている⁶⁾⁸⁾。この補強方法では、プレストレスによる死荷重応力の低減および当て板と被着体の合成による活荷重応力の低減が期待される。

当て板に緊張力を導入する方法には、当て板の一端を定着具で被着体に固定し油圧ジャッキ等で緊張する方法と、図-1に示すようにあらかじめ緊張した当て板を接着し接着剤の硬化後に補強材の緊張力を解放する方法がある。後者の方法は、橋梁本体にボルト孔などを設けることなく設置することができ、被着体の外観上の変化が

図-1 緊張力を与えた当て板を接着することによる鋼部材へのプレストレスの導入

表-1 試験体

試験体	母材鋼板			当て板			接着剤厚さ [mm]	導入ひずみ $\varepsilon_{pre} [\mu]$	非緊張部長さ l_n [mm]
	幅 [mm]	板厚 [mm]	弾性係数 [GPa]	幅 [mm]	板厚 [mm]	弾性係数 [GPa]			
S90-P50-50	90	11.6	221.0	50	4.45	197.3	1.02	129	50
S90-P50-0								(-100, 358)	—
S50-P25-100	50	11.6	221.0	25	4.45	197.3	1.12	181	100
S50-P25-0								(-165, 527)	—

小さいといったメリットがある。

一方、当て板に緊張力を与えて接着すると、緊張力解放時に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が示されている⁹⁾。当て板端部の接着剤には外力作用時にも高いせん断応力と垂直応力が生じるため、当て板に緊張力を与えて接着する場合には小さい外力で当て板がはく離することが示唆されている。緊張力を導入した当て板のはく離荷重を向上する方法として、著者らは図-2 に示すような当て板端部に非緊張部を設ける方法を提案し、理論解析から当て板端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を低減できることを示している¹⁰⁾。この方法では、緊張力解放時には緊張力導入部端部、外力作用時には当て板端部でそれぞれ接着剤に生じる応力が高くなるため、当て板全体に緊張力を与える場合よりもはく離荷重が向上する。本研究では、当て板端部に非緊張部を設けて緊張する装置を開発し、鋼部材に所定のプレストレスが導入されるか検証する。また、プレストレスを導入した鋼板の载荷試験を行い、当て板端部へ非緊張部を設けることによるはく離荷重の向上効果を検討する。

2. 鋼板へのプレストレスの導入

(1) 試験体の作製

緊張力の導入には図-3 に示す装置を用いた。図-3 の装置は上面に当て板を設置した後、長ネジに設置したナットを回転させることによって、当て板の非緊張部を除く範囲に緊張力を導入できる。緊張力導入装置と当て板は皿ネジで接合されており、接着面に凹凸が生じないように配慮している。加工の容易さから、当て板には鋼板を用いた。また、試験体の詳細については後述するが、本研究では当て板の幅方向にできるだけ均一に緊張力が導入されるように、長さに対して幅の小さい当て板を用いている。

図-4 に試験体の作製手順を示す。当て板および母材鋼板の接着面はグラインダーで研磨して素地出した後、#100 のサンドペーパーで目粗し、洗浄および脱脂を行った。当て板に緊張力を与えたまま当て板上面に接着剤を塗布し母材鋼板に接着した。接着後は 20℃ の恒温室内で一週間養生した。接着剤の硬化後に当て板に与えた緊張力を解放し、鋼板にプレストレスを導入した。また、皿ネジに設置したナットを緩め、緊張力導入装置を当て板から除去した。

図-2 部分的に緊張力を与えた当て板の接着による鋼部材へのプレストレスの導入

図-3 当て板への緊張力導入装置

(a) 当て板への緊張力の導入

(b) 当て板の接着

(c) 当て板の緊張力の解放

図-4 母材鋼板へのプレストレスの導入

後の3章で示すように、本研究では試験体を片持ち状態にセットし、自由端側に荷重を載荷して当て板のはく離試験を行う。そこで、はく離が生じる固定端側の当て板端部のみに非緊張部を設けるように試験体を作製した。

(2) 試験体

試験体の一覧を表-1に示す。本研究では緊張力解放後のひずみの変化が明確に表れるように母材は鋼板とした。S90-P50 シリーズは母材鋼板が幅 90×厚さ 12mm、当て板が幅 50×厚さ 4.5mm、S50-P25 シリーズは母材鋼板が幅 50×厚さ 12mm、当て板が幅 25×厚さ 4.5mm となっており、シリーズごとに母材鋼板に対する当て板の曲げ剛性が異なっている。非緊張部の長さについては、文献10)を参考に緊張力導入部端部の接着剤に生じるせん断応力が十分に小さくなるように決定し、S90-P50-50 では 50mm、S50-P25-100 では 100mm となっている。非緊張部長さの決定方法の詳細は付録(1)に示している。また、はく離荷重を比較するため、それぞれのシリーズに対して当て板全体を緊張した試験体(末尾が 0)も用いた。

当て板に与える緊張力は、当て板の緊張部中央の表裏に貼付したゲージ長 2mm のひずみゲージによって管理した。表-1 の括弧内には当て板上面(接着面)および下面のひずみの値を示している。当て板皿ネジの接合部で滑りが生じない範囲で緊張力を与えた結果、S90-P50 シリーズでは膜ひずみ成分が 129μ 、S50-P25 では膜ひずみ成分が 181μ となった。一方、今回の研究で用いた緊張力導入装置では、緊張力導入時に当て板中央が緊張力導入装置側に変形するため、膜ひずみ成分のみでなく、板曲げひずみ成分も含まれている。板曲げひずみ成分は S90-P50 シリーズでは 229μ 、S50-P25 シリーズでは 346μ となっており、膜ひずみ成分の 1.78 倍および 1.91 倍となっている。この曲げ変形は、当て板の緊張力を解放した後に母材鋼板に正のプレストレスを付与する。ただし、当て板の曲げ変形によって、当て板中央と端部では接着剤厚さが均等となっていないと考えられる。

本研究で用いた接着剤は 2 液混合型のエポキシ樹脂であり、主成分および硬化後の機械的特性は表-2 に示している。本研究でははく離荷重を比較することを目的としているため、はく離に対して条件が厳しい弾性係数が大きい接着剤を選定した。

(3) 緊張力の解放によって母材鋼板および当て板に生じるひずみ

S50-P25-100 について、当て板への緊張力の導入から緊張力解放後のひずみを計測した。計測には全てゲージ長 2mm のひずみゲージを用いている。当て板の緊張力の解放後の母材鋼板および当て板のひずみを図-5 に示す。x 軸は緊張力導入部の中央からの距離となっている。母材鋼板および当て板のひずみゲージ貼付位置は図-5 に示す通りである。2.(2)でも示した通り、緊張部中央では当て板の両面にひずみゲージを貼付した。図-5 の灰

表-2 接着剤の材料特性

主剤	エポキシ樹脂
硬化剤	変性ポリアミン
可使時間	60分以上
ガラス転移点 T_g [°C]	40
弾性係数 E_e [GPa]	6.50
せん断弾性係数 G_e [GPa]	2.39
ポアソン比	0.36
引張強さ [MP] (規格値, JISK7113-1995による)	20以上
引張せん断強度 [MP] (規格値, JISK6850-1994による)	14以上

(a) 母材鋼板

(b) 当て板

図-5 当て板の緊張力解放によって生じるひずみ

色でハッチングされている範囲は当て板が緊張力導入装置に接合されている範囲であり、この範囲では当て板に与えた緊張力の大きさが一定になっていないと考えられる。

図-5 の一点鎖線は母材鋼板と当て板が完全に合成されているとしたときのひずみの計算値であり、次式で表される。

$$\varepsilon_s = \begin{cases} -\frac{P_{pre}}{E_s A_v} + \frac{M_{pre}}{E_s I_v} y_v & (0 \leq x \leq l_p) \\ 0 & (l_p \leq x \leq l) \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_p = \begin{cases} -\frac{P_{pre}}{E_p A_p} + \frac{M_{pre}}{E_p I_p} y_p + \varepsilon_{pre} & (0 \leq x \leq l_p) \\ 0 & (l_p \leq x \leq l) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、

$$M_{pre} = P_{pre} a_p \quad (3)$$

$$P_{pre} = E_p A_p \varepsilon_{pre} \quad (4)$$

$\varepsilon_s, \varepsilon_p$: 母材鋼板および当て板のひずみ,
 E_s, E_p : 母材鋼板および当て板の弾性係数,
 A_p : 当て板の断面積,
 A_v : 母材鋼板と当て板の合成断面の断面積,
 I_v : 母材鋼板と当て板の合成断面の断面二次モーメント,
 y_v : 母材鋼板と当て板の合成断面の中立軸からの距離(下向きを正とする),
 a_p : 母材鋼板と当て板の合成断面の中立軸から当て板の図心までの距離,
 x : 当て板中央からの距離,
 l_p : 当て板緊張部の半長さ,
 l : 当て板緊張部中央から当て板端部までの長さ,
 ε_{pre} : 緊張力によって当て板に与えたひずみ(膜ひずみ成分)。

図-5 に示す実線および破線は接着剤のせん断方向と垂直方向の変形を考慮して求めたひずみの理論解である。母材鋼板および当て板のひずみは次式より求めた。

$$\varepsilon_s(x) = \frac{N_s(x)}{E_s A_s} + \frac{M_s(x)}{E_s I_s} y_s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(x) &= \frac{N_p(x)}{E_p A_p} + \frac{M_p(x)}{E_p I_p} y_p \\ &= -\frac{N_s(x)}{E_p A_p} + \frac{N_s(x)a - M_s(x)}{E_p I_p} y_p \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、

N_s, N_p : 母材鋼板および当て板の軸力,

M_s, M_p : 母材鋼板および当て板の曲げモーメント,
 A_s : 母材鋼板の断面積,
 I_s, I_p : 母材鋼板および当て板の断面二次モーメント,
 y_s, y_p : 母材鋼板および当て板の図心からの距離(下向きを正とする),
 a : 母材鋼板と当て板の図心間の距離。

式(5)および式(6)に用いる母材鋼板の軸力と曲げモーメントは、微小区間の釣合いから導出される母材鋼板の軸力およびせん断力に関する微分方程式の解を用いて得られる。文献10)では、端部に非緊張部を設けた当て板を接着した単純支持の鋼部材に対して等曲げモーメントが作用する場合を対象に、鋼部材の軸力およびせん断力の理論解を与えている。当て板の緊張力解放時に母材鋼板に生じる軸力およびせん断力の理論解は、文献10)で与えられている理論解において作用曲げモーメントを 0 とすることによって次式で得られる。

$$N_s(x) = \begin{cases} X_1 \cosh(cx) - \frac{G_e b_p}{hc^2} \varepsilon_{pre} & (0 \leq x \leq l_p) \\ X_2 \sinh\{c(x-l_p)\} \\ + X_3 \cosh\{c(x-l_p)\} & (l_p \leq x \leq l) \end{cases} \quad (7)$$

$$V_s(x) = \begin{cases} Y_1 \cosh(\omega x) \sin(\omega x) \\ + Y_2 \sinh(\omega x) \cos(\omega x) \\ + \frac{WX_1}{c^2} \sinh(cx) & (0 \leq x \leq l_p) \\ Y_3 \cosh\{\omega(x-l_p)\} \cos\{\omega(x-l_p)\} \\ + Y_4 \cosh\{\omega(x-l_p)\} \sin\{\omega(x-l_p)\} \\ + Y_5 \sinh\{\omega(x-l_p)\} \cos\{\omega(x-l_p)\} \\ + Y_6 \sinh\{\omega(x-l_p)\} \sin\{\omega(x-l_p)\} \\ + \frac{WX_1}{c^2} \cdot \frac{\sinh(cl_p)}{\cosh(cl_n)} \cdot \cosh\{c(l-x)\} & (l_p \leq x \leq l) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、

$$X_1 = \frac{\cosh(cl_n)}{\cosh(cl)} \cdot \frac{G_e b_p}{hc^2} \varepsilon_{pre} \quad (9)$$

$$X_2 = \frac{\tanh(cl_p)}{1 + \tanh(cl_p) \tanh(cl_n)} \cdot \frac{G_e b_p}{hc^2} \varepsilon_{pre} \quad (10)$$

$$X_3 = -\frac{\tanh(cl_p) \tanh(cl_n)}{1 + \tanh(cl_p) \tanh(cl_n)} \cdot \frac{G_e b_p}{hc^2} \varepsilon_{pre} \quad (11)$$

$$[Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4 \ Y_5 \ Y_6]^T = \Omega_1^{-1} \Omega_2 \quad (12)$$

表-3 はく離荷重, はく離曲げモーメントおよび接着剤に生じる主応力

試験体	はく離荷重 [N]	はく離 曲げモーメント [N・m]	接着剤に生じる主応力 [MPa]					
			緊張力の解放		曲げモーメント		合計	
			$x=l_p$	$x=l$	$x=l_p$	$x=l$	$x=l_p$	$x=l$
S90-P50-50	702	246	1.8	0	0.4	36.5	2.2	36.5
S90-P50-0	497	174	—	4.9	—	25.8	—	30.7
S50-P25-100	276	110	2.5	0	0.2	29.1	2.7	29.1
S50-P25-0	181	72	—	6.7	—	19.1	—	25.8

$$c = \sqrt{\frac{b_p G_e}{h} \cdot \frac{1}{K Z_1} \cdot \frac{a^2}{E_s I_s}} \quad (13)$$

$$K = \frac{1}{1 + Z_1 Z_2 r_s^2 / a^2} \quad (14)$$

$$Z_1 = 1 + \frac{I_p}{n I_s} \quad (15)$$

$$Z_2 = 1 + \frac{n A_s}{A_p} \quad (16)$$

$$r_s = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} \quad (17)$$

$$n = E_s / E_p \quad (18)$$

$$J = d_p - (Z_1 - 1) d_s \quad (19)$$

$$\omega = 4 \sqrt{\frac{b_p E_e}{4h} \cdot \frac{Z_1}{E_p I_p}} \quad (20)$$

- l_n : 当て板非緊張部の長さ,
 d_s : 母材鋼板の図心から下面までの距離,
 d_p : 当て板の図心から上面までの距離,
 b_p : 当て板の幅(接着幅),
 h : 接着剤の厚さ,
 E_e, G_e : 接着剤の弾性係数およびせん断弾性係数,
 Ω_1 : 境界条件に関する 6 行×6 列の行列(付録(2)参照),
 Ω_2 : 外力および緊張力に関する 6 行×1 列のベクトル(付録(2)参照).

当て板の緊張力を解放することによって母材鋼板に生じる曲げモーメントの理論解は次式となる.

$$M_s(x) = \frac{N_s(x)a}{Z_1} - \frac{1}{4\omega^4} \cdot \frac{d^3 V_s(x)}{dx^3} \quad (22)$$

式(5)および式(6)に式(7), (22)を代入することによって, 緊張力解放時に母材鋼板および当て板に生じるひずみの理論解が得られる.

(a) S90-P50-50, S50-P25-100

(b) S90-P50-0, S50-P25-0

図-6 荷重方法

図-7 はく離曲げモーメント

図-5 には式(1), (2)の完全合成理論や式(5), (6)から求められるひずみの理論解を示している。S50-P25-100 では当て板の緊張部と非緊張部の境界から 25mm 程度の範囲で両者の違いが大きくなっている。母材鋼板および当て板のひずみの実測値はそれぞれ, 完全合成理論や理論解よりも若干圧縮側および引張側にシフトしている。これは 2.(2)でも示したように, 当て板への緊張力導入の際に当て板に板曲げひずみ成分が生じたためと考えられる。但し, 実測したひずみ分布の全体的な傾向は完全合成理論や理論解と近くなっている。

3. 当て板のはく離試験

(1) 荷重方法

非緊張部を設けることによる当て板のはく離荷重向上

効果を検証するため、当て板のはく離試験を行った。載荷方法は図-6に示す通り、母材鋼板を片持ち状態で架台に固定し、当て板接着面が引張側となるように試験体下面から載荷した。各シリーズで、はく離が生じる固定端側の当て板端部の位置に作用する曲げモーメントが等しくなるように載荷位置を決定した。S90-P50シリーズでは載荷位置から固定端側当て板端部までの距離が350mm、S50-P25シリーズでは400mmとなっている。当て板接着鋼板が曲げモーメントによってはく離するとき、当て板は端部から徐々にはく離するためにはく離荷重が明確に表れない場合がある¹¹⁾。本研究では、当て板端部から5mmの位置にひずみゲージを設置し、ひずみの値が低下し始めた荷重をはく離荷重とした。

(2) はく離曲げモーメント

当て板がはく離したときの荷重を表-3に示している。また図-7には当て板がはく離したときの固定端側の当て板端部の曲げモーメント M （以下、はく離曲げモーメントとする）を示している。この図から、S90-P50シリーズおよびS50-P25シリーズに対して、非緊張部を設けることで当て板のはく離曲げモーメントがそれぞれ1.41倍および1.53倍向上していることがわかる。また、当て板に与えた緊張力が大きいS50-P25シリーズの方がはく離曲げモーメントの向上効果が大きくなっている。

(3) 接着剤に生じる応力

はく離荷重の向上効果を定量的に評価するため、非緊張部の有無が接着剤に生じるせん断応力や垂直応力に与える影響を検討する。

緊張力を解放することによって接着剤に生じるせん断応力 τ および垂直応力 σ_y は式(7)および式(8)で示した鋼板の軸力およびせん断力を用いて次式で与えられる⁹⁾。

$$\tau = -\frac{1}{b_p} \cdot \frac{dN_s}{dx} \quad (23)$$

$$\sigma_y = -\frac{1}{b_p} \cdot \frac{dV_s}{dx} \quad (24)$$

図-8にS50-P25シリーズの接着剤に生じるせん断応力および垂直応力の分布を示している。この図から、非緊張部を設けないS50-P25-0では、当て板端部で接着剤に高いせん断応力と垂直応力が生じていることがわかる。非緊張部を設けずに接着した場合、緊張力を解放することによって当て板端部の接着剤に生じるせん断応力および垂直応力は次式となる⁹⁾。

$$\bar{\tau}(l) = -\frac{G_e}{hc} \varepsilon_{pre} \quad (25)$$

(a) せん断応力

(b) 垂直応力

図-8 当て板の緊張力解放によって接着剤に生じるせん断応力と垂直応力(S50-P25 シリーズ)

$$\bar{\sigma}_y(l) = W \left\{ 1 - \frac{2\omega}{c} - \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^2 \right\} \bar{\tau}(l) \quad (26)$$

一方、当て板端部に十分に長い非緊張部を設けることによって、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は0に収束する¹⁰⁾。非緊張部の長さの詳細な決定方法については付録(2)に示している。また、図-8からわかるように非緊張部を設けた場合には $x = l_p$ の位置で接着剤に生じるせん断応力が最大となっている。非緊張部が十分に長い場合、 $x = l_p$ の位置の接着剤に生じるせん断応力は次式に収束する¹⁰⁾。

$$\bar{\tau}(l_p) = -\frac{G_e}{2hc} \varepsilon_{pre} \quad (27)$$

図-8にプロットしている式(25)～(27)の収束式は式(23)、(24)の理論解にほぼ一致しており、収束式の妥当性が確認できる。

片持ち状態の当て板接着鋼板に上向きの荷重が作用することによって接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は、非緊張部の有無に関わらず、固定端側の当て板端部で最大となる。当て板が十分に長いとき、固定端側の当

て板端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力は当て板端部の位置に作用するせん断力と曲げモーメントの関数として次式に収束する¹²⁾。

$$\tau_e = -\frac{cK}{ab_p} \left(M_e - \frac{1}{c} Q_e \right) \quad (28)$$

$$\sigma_{ye} = \frac{\omega}{b_p} \left[W \frac{K}{a} \left\{ 2 + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 - \frac{c}{\omega} \right\} M_e + 2\omega \left(1 - \frac{1}{Z_1} \right) M_e - 2 \left(1 - \frac{1}{Z_1} + \frac{JK}{aZ_1} \right) Q_e \right] \quad (29)$$

Q_e, M_e : 固定端側の当て板端部に位置に作用するせん断力および曲げモーメント。

著者らはこれまでに当て板接着鋼部材の当て板のはく離に対する統一的な破壊基準を検討しており、接着剤に生じる主応力を用いて当て板のはく離を評価できる可能性を示している¹¹⁾。本研究では固定端側の当て板端部の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力から主応力を算出し、はく離の抑制効果を荷重を定量的に評価する。接着剤に生じる主応力は次式で与えられる。

$$\sigma_p = \frac{\sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y}{2} \right)^2 + \tau^2} \quad (30)$$

表-3に当て板の緊張力を解放することによって $x=l_p$ および $x=l$ の位置の接着剤に生じる主応力を示している。緊張部を設けていないS90-P50-0およびS50-P25-0では、当て板の緊張力を解放することによって当て板端部の接着剤にそれぞれ4.9MPaおよび6.7MPaの主応力が生じている。当て板がはく離したとき、荷重による主応力との和はそれぞれ30.7MPaおよび25.8MPaであり、緊張力の解放による主応力は全主応力の15.9%および30.0%であった。一方、非緊張部を設けた場合、当て板端部の接着剤に生じる主応力は荷重の作用によるもののみを示している。また、 $x=l_p$ の位置では緊張力の解放および荷重の作用の両方によって主応力が生じるが、その値は当て板端部で荷重の作用のみによって生じる主応力よりも小さい。本研究では各試験体に対して試験体が1体ずつと少なく、はく離時の当て板端部の接着剤に生じている主応力は25.8~36.5MPaとばらつきが大きくなっている。

4. まとめ

本研究では、当て板に緊張力を与えて鋼板に接着する場合を対象に、当て板の端部に非緊張部を設けることによる当て板のはく離抑制効果について検討した。本研究の条件下で得られた結果を以下に記す。

- 1) 端部に非緊張部を設けた当て板を母材鋼板に接着した場合でも、当て板の緊張部の母材鋼板には完全合成理論から算出されるひずみと同程度のひずみが導入された。

- 2) 当て板全体を緊張した場合と端部に非緊張部を設けた場合のはく離荷重を比較すると、当て板端部に非緊張部を設けた方がはく離荷重が大きくなった。
- 3) 接着剤に生じる主応力を用いて当て板のはく離荷重を評価した。当て板全体に緊張力を与える時、緊張力解放後に接着剤に生じる主応力によって、はく離荷重が低減したと考えらる。
- 4) 非緊張部を設ける場合、緊張力解放によって接着剤に生じる主応力が最も高くなるのは、緊張部と非緊張部の境目の位置である。ただし、その値は、荷重の作用によって当て板端部に生じる主応力よりも小さい。

謝辞： 試験体の作製にあたっては、コニシ株式会社の堀井久一様より接着剤をご提供いただきました。ここに感謝の意を記します。

付録

(1) 非緊張部の長さの決定方法

当て板端部に非緊張部を設けた場合に、接着剤に生じるせん断応力の絶対値は緊張力導入部端部で最大となり、その値は非緊張部が十分に長くなると式(27)に収束する。また、非緊張部を設けない場合に緊張力導入部端部のせん断応力の絶対値が最大となり、その値は式(24)となる。

文献10)では、緊張力導入部端部の接着剤に生じるせん断応力の絶対値が式(27)に近くなるように、次式を用いて必要非緊張部長さの決定している。

$$l_n \geq -\frac{1}{c} \ln(\lambda) \quad (A1)$$

ここに、 λ は緊張力導入部端部の接着剤に生じるせん断応力が式(27)に収束する精度を表している。非緊張部の長さを決定する際には λ に0に近い正の値を代入する。式(A1)には、式(13)に示す係数 c が含まれており、母材鋼板に対する当て板の曲げ剛性や、接着剤厚さが大きくなるほど必要非緊張部長さは大きくなる。

本研究では、試験体を作製するにあたって、 $\lambda = 0.01$ 、接着剤の厚さを0.5mmとして式(A1)から必要な非緊張部長さを算出した。それぞれの必要非緊張部長さはS90-P50シリーズでは40.3mm、S50-P25シリーズでは41.6mmであり、試験体では作製の都合上、算出結果よりも大きい50mmおよび100mmとした。

(2) 境界条件に関する行列および外力と緊張力に関するベクトル

式(12)に用いる境界条件に関する行列 Ω_1 および外力と緊張力に関するベクトル Ω_2 をそれぞれ式(A2)および式(A3)に示す。

$$\Omega_1 = \begin{pmatrix} CH(\omega_p)S(\omega_p) & SH(\omega_p)C(\omega_p) & 0 & 0 & -1 & 0 \\ SH(\omega_p)S(\omega_p) & CH(\omega_p)C(\omega_p) & -1 & -1 & 0 & 0 \\ + CH(\omega_p)C(\omega_p) & -SH(\omega_p)S(\omega_p) & 0 & 0 & 0 & -1 \\ SH(\omega_p)C(\omega_p) & -CH(\omega_p)S(\omega_p) & 0 & 0 & 0 & -1 \\ CH(\omega_p)C(\omega_p) & -SH(\omega_p)S(\omega_p) & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -SH(\omega_p)S(\omega_p) & -CH(\omega_p)C(\omega_p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -CH(\omega_n)S(\omega_n) & -SH(\omega_n)C(\omega_n) & -CH(\omega_n)C(\omega_n) & -SH(\omega_n)S(\omega_n) \\ 0 & 0 & -CH(\omega_n)C(\omega_n) & SH(\omega_n)S(\omega_n) & CH(\omega_n)S(\omega_n) & -SH(\omega_n)C(\omega_n) \\ & & + SH(\omega_n)S(\omega_n) & + CH(\omega_n)C(\omega_n) & + SH(\omega_n)C(\omega_n) & + CH(\omega_n)S(\omega_n) \end{pmatrix} \quad (A2)$$

$$\Omega_2 = \frac{Wb_p G_e}{hc^2} \varepsilon_{pre} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{c}{\omega} & 0 & -\left(\frac{c}{\omega}\right)^3 & \frac{\sinh(cl_p)}{\cosh(cl)} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (A3)$$

参考文献

- 1) 渡邊憲市, 板垣一也, 鈴木博之: 炭素繊維強化樹脂板による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, 2000.
- 2) Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R. and Hastings, J. N.: Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, USA, Vol.6, pp.514-522, 2001.
- 3) Moy, S.S.J. and Bloodworth, A.G.: Strengthening a steel bridge with CFRP composites, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings* 160 Issue SB2, pp.81-93, 2007.
- 4) 森下太陽, 藤井堅, 森田和也, 堀井久一, 中村秀治: 腐食した鋼板の鋼板接着による性能回復, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.747-755, 2011.
- 5) 植村有馬, 藤井堅, 井上太郎: 繰り返し軸力を受ける鋼板接着補強された腐食鋼板の耐久性, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.554-563, 2014.
- 6) 濱田譲, 安森浩, 小林朗, 葛目和宏: 炭素繊維プレート緊張材によるコンクリート構造物の補強, コンクリート工学, Vol.43, No.8, pp.17-24, 2005.
- 7) 立神久雄, 長谷川剛, 栗田幸治, 井上浩男: 炭素繊維プレート緊張剤を用いた構造物の補強工法(アウトプレート工法), 三井造船技報, No.201, pp.35-40, 2010.
- 8) Luke, S., Darby, J. and Skwarski, A.: Using stressed and unstressed composite plates for strengthening existing structures, *Proceedings of the Eighth International Conference on Fibre Reinforced Composites*, pp.35-40, 2000.
- 9) 石川敏之: プレストレスが導入された CFRP 板接着鋼部材のはく離曲げモーメント, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.991-998, 2010.
- 10) 清水優, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: プレストレス導入 CFRP 板接着鋼部材のはく離曲げモーメント向上法の提案, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.2(応用力学論文集 Vol.14), I_777-I_784, 2011.
- 11) Shimizu, M., Ishikawa, T., Hattori, A. and Kawano, H.: Failure criteria for debonding of patch plate bonded onto steel members subjected to bending, *Journal of JSCE*, Vol.2, No.1, 2014.
- 12) 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 (応用力学), Vol.68, No.2 (応用力学論文集 Vol.15), pp.I_715-I_726, 2012.

(2015. 6. 23 受付)

DEBONDING BENDING MOMENT OF PARTIALLY PRE-TENSIONED PATCH PLATE BONDED TO STEEL PLATE

Masaru SHIMIZU, Toshiyuki ISHIKAWA, Atsushi HATTORI
and Hirotaka KAWANO

For strengthening of steel members suffering deterioration and/or insufficiency of load carrying capacity, externally bonding patch plate have been used. Furthermore, pretensioned patch plate have also been used in several strengthening cases. Although the pretensioned patch plate can improve stress in steel member not only by live load but also dead load, the shear and normal stress tend to be introduced in adhesive layer. The stresses may cause the reduction of debonding load of patch plate. To improve the debonding load of pretensioned patch plate, applying non-pretensioned region at the end of patch plate

was proposed. In this study, prestress introduced into steel plate by partially pre-tensioned patch plate was observed. In addition, the improvement of debonding load due to the non-pretentioned region is confirmed from debonding tests. The improvement effect in the debonding load is evaluated from the view of principal stress in adhesive.