

炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着剤せん断耐力 その1 引張载荷試験

玉井 宏章*, 陣川 晃司**, 中村 憲一**

Shear Bond Strength of Rehabilitated Steel Plate Bonding CFRP Plates. Part 1 Tensile Loading Tests

by

Hiroyuki TAMAI*, and Koji JINKAWA**, and Kenichi NAKAMURA**

To enhance the usable life of existing building, a strengthening method with bonding CFRP Plates has been developed by authors. The CFRP Plates is high-strength (2100MPa) in longitudinal normal stress. The composite member of steel bonding CFRP Plates has enough bending strength when no bending moment works at the edge of CFRP Plates. The composite of steel bonding CFRP may easily peel out under tensile loading because shear bonding stress is concentrated at the edge of CFRP Plates. In this paper, Tensile Loading Tests of composite of steel bonding CFRP Plates were performed to clarify the shear bonding stress distribution and failure condition of adhesive. Also, analytical solution of shear stress distribution was presented. Strength improvement method for the composite was discussed through the test and analytical results.

Key words: Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, Bonding Strengthening, Tensile Loading Test

1 はじめに

近年、高度成長期に建設された鋼構造物の多くが老朽化しており、補修・補強が必要となる事例が増加している。近年では構造物の長寿命化が重要視されており、様々な補強方法の研究が行われている。本研究で取り扱う炭素繊維プレート(CFRP)を用いた鋼構造物への補強補剛は接着剤を使つての接着補強であるため、従来の方法にはない様々な利点が存在する。近年様々な炭素繊維を鋼構造物に接着する耐震補強工法、長寿命化技術の提案・研究が行われており^{1)~4)}、炭素繊維接着工法は十分な補修・補強効果があることが分かっているものの、接着剤の破壊条件が明確となっていない。

そこで、本研究では CFRP によって接着補強された鋼板の接着応力分布を検討することで接着剤の破壊条件を検討する。また、それと共に複合材の引張耐力改善法についても提案・検討を行う。

2 弾性応力理論式^{5)~7)}

鋼梁のフランジ外面に炭素繊維プレート(CFRP)を接着した時の接着剤のせん断強度を検討するため、図1に示す引張力 P を受ける CFRP を鋼板に接着した複合材について、CFRP、鋼板の垂直応力と接着剤のせん断応力分布の弾性理論式を求める。以下に基本仮定を示す。

- 1) 板幅方向の応力変化は無視する。
- 2) 板の曲げ応力は無視できる。
- 3) CFRP 板、接着剤、鋼板は薄く、厚さ方向の応力変化は生じない。
- 4) CFRP 及び鋼板の応力は単軸応力状態で表される。
- 5) 接着剤はせん断変形が卓越し、せん断応力のみが生じる。

図2の微小要素の力の釣り合い方程式は、

$$A_c \cdot d\sigma_c = \tau_a \cdot dx \cdot W_a \cdots \cdots (1.a)$$

$$A_s \cdot d\sigma_s = -\tau_a \cdot dx \cdot W_a \cdots \cdots (1.b)$$

平成 26 年 7 月 4 日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 工学研究科部門 (Graduate School of Engineering)

ここに,

σ_c, A_c : CFRP の垂直応力, 断面積

σ_s, A_s : 鋼板の垂直応力, 断面積

τ_a, W_a : 接着剤のせん断応力, 接着幅

(1.a,b)式より,

$$\frac{d\sigma_c}{dx} = \frac{\tau_a \cdot W_a}{A_c} \dots\dots\dots(2.a)$$

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{\tau_a \cdot W_a}{A_c} \dots\dots\dots(2.b)$$

接着剤のせん断ひずみは

$$\gamma_a = \frac{u_c - u_s}{t_a} \dots\dots\dots(3)$$

ここに,

u_c, u_s : CFRP 及び鋼板の軸方向変位

t_a : 接着層厚

また,

$$du_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \cdot dx, \quad du_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot dx$$

であるので,

$$d\gamma_a = \frac{du_c - du_s}{t_a} = \left(\frac{\sigma_c}{E_c} - \frac{\sigma_s}{E_s} \right) \cdot \frac{dx}{t_a}$$

よって

$$d\tau_a = G_a \cdot d\gamma_a = \left(\frac{\sigma_c}{E_c} - \frac{\sigma_s}{E_s} \right) \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot dx$$

これより

$$\frac{d\tau_a}{d\tau} = \left(\frac{\sigma_c}{E_c} - \frac{\sigma_s}{E_s} \right) \cdot \frac{G_a}{t_a} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式を微分して(2a,b)式を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{d^2\tau_a}{dx^2} &= \left(\frac{1}{E_c} \frac{d\sigma_c}{dx} - \frac{1}{E_s} \frac{d\sigma_s}{dx} \right) \cdot \frac{G_a}{t_a} = \left(\frac{\tau_a \cdot W_a}{E_c \cdot A_c} + \frac{\tau_a \cdot W_a}{E_s \cdot A_s} \right) \cdot \frac{G_a}{t_a} \\ &= \left(\frac{1}{E_c \cdot A_c} + \frac{1}{E_s \cdot A_s} \right) \cdot \frac{G_a \cdot W_a}{t_a} \cdot \tau_a \end{aligned}$$

τ_a で表示した釣り合い方程式は結局,

$$\frac{d^2\tau_a}{dx^2} - \frac{1}{\lambda^2} \tau_a = 0 \dots\dots\dots(5.a)$$

$$\lambda^2 = \frac{t_a^2}{G_a \cdot A_c} \cdot \frac{E_s \cdot A_s \cdot E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \dots\dots\dots(5.b)$$

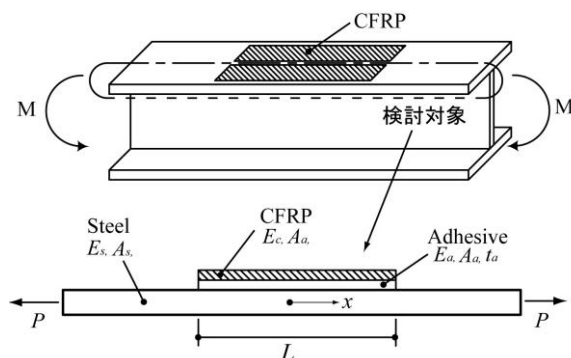


図1 複合材のモデル化

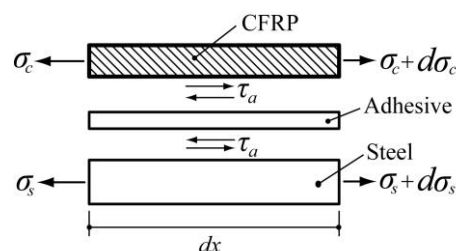


図2 微小要素の力の釣り合い

ここに,

λ : 基準接着付加長さ

$$A_a = t_a \cdot W_a$$

(5.a)式的一般解はよく知られるように,

$$\tau_a = C_1 \cdot \cosh \frac{x}{\lambda} + C_2 \cdot \sinh \frac{x}{\lambda} \dots\dots\dots(6)$$

ここに, C_1, C_2 は積分定数である.

力学的境界条件は

$$x = -\frac{L}{2} \text{ で } \sigma_c = 0, \sigma_s = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(7.a)$$

$$x = \frac{L}{2} \text{ で } \sigma_c = 0, \sigma_s = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(7.b)$$

であるので, (4)式より

$$x = -\frac{L}{2} \text{ で } \frac{d\tau_a}{dx} = -\frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \frac{G_a}{t_a} = -\frac{P}{E_s \cdot A_s} \cdot \frac{G_a}{t_a} \dots\dots\dots(8.a)$$

$$x = \frac{L}{2} \text{ で } \frac{d\tau_a}{dx} = -\frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \frac{G_a}{t_a} = -\frac{P}{E_s \cdot A_s} \cdot \frac{G_a}{t_a} \dots\dots\dots(8.b)$$

(8.a,b)式から(6)式の C_1, C_2 を求めると

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = -\frac{\lambda}{\cosh \frac{L}{2\lambda}} \cdot \frac{P}{E_s \cdot A_s} \cdot \frac{G_a}{t_a}$$

となる。これを(6)式に代入し整理すると、

$$\begin{aligned}\tau_a &= -\frac{\lambda}{\cosh \frac{L}{2\lambda}} \cdot \frac{P}{E_s \cdot A_s} \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \frac{\sinh x}{\lambda} \\ &= -\frac{P}{\lambda \cdot \cosh \frac{L}{2\lambda}} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \cdot \frac{\sinh x}{\lambda} \dots\dots\dots(9)\end{aligned}$$

次に CFRP の垂直応力 σ_c を求める。

(9)式を積分し、(7.a,b)式の境界条件を考慮すると、CFRP の垂直応力 σ_c は次式のようになる。

$$\sigma_c = P \cdot \frac{E_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \left(1 - \frac{\cosh \frac{x}{\lambda}}{\cosh \frac{L}{2\lambda}} \right) \dots\dots\dots(10.a)$$

$\sigma_c \cdot A_c + \sigma_s \cdot A_s = P$ なので、(10.a)式から鋼板の垂直応力 σ_s は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \frac{P}{A_s} - \frac{\sigma_c \cdot A_c}{A_s} = \frac{P}{A_s} \left(1 - \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \left(1 - \frac{\cosh \frac{x}{\lambda}}{\cosh \frac{L}{2\lambda}} \right) \right) \\ &\dots\dots\dots(10.b)\end{aligned}$$

次に接着剤の最大せん断応力について考える。

(9)式より接着剤のせん断応力 $|\tau_a|$ は $x = -\frac{L}{2}, \frac{L}{2}$ のときに最大となる。よって最大値 $\tau_{a\max}$ は

$$\begin{aligned}\tau_{a\max} &= \frac{P}{\lambda \cdot \cosh \frac{L}{2\lambda}} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \cdot \frac{\sinh L}{2\lambda} \\ &= \frac{P}{\lambda} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \cdot \frac{\tanh \frac{L}{2\lambda}}{2\lambda}\end{aligned}$$

L が十分長いときは、 $\tanh \frac{L}{2\lambda} = 1$ となるので、

$$\tau_{a\max} = \frac{P}{\lambda} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a}$$

λ を代入し整理すると

$$\begin{aligned}\tau_{a\max} &= P \cdot \sqrt{\frac{G_a}{t_a \cdot W_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s \cdot (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c)}} \\ &\dots\dots\dots(11)\end{aligned}$$

3 複合材の引張耐力改善法

2 節で求めた(11)式の接着剤のせん断応力の式より、接着剤のせん断応力は CFRP 端部で最大となることがわかる。

接着補強された複合材の強度が接着剤のせん断強度で決定されるとすると、2 節の(11)式より、最大せん断応力 $\tau_{a\max}$ を抑えるためには以下に示す改善方法が考えられる。

(11)式より CFRP による接着補強をしつつ、 $\tau_{a\max}$ を小さくするためには、

- 1) 接着層厚 t_a を大きくする。
- 2) 鋼材の断面積 A_s を大きくする。
- 3) 接着幅: w_a を小さくする。

以上の 3 つが考えられる。そこで本研究では 1)と 2) の引張耐力改善方法について検討を行う。

4 複合材の引張試験と解析の概要

4.1 引張試験

2 節, 3 節で示した理論式の精度と引張耐力改善法の有効性を検討するため、CFRP と鋼板とを接着した複合材の引張試験を行った。

○ 試験体

試験体形状を図 3 に試験体シリーズを表 1 に示す。L1, L2, N1 試験体は、帯形状の板厚 6 mm, 幅 90 mm, 全長 800 mm の鋼材を、T1 試験体は CFRP 端部周辺の板幅を 2 倍にしている。

鋼種は L1, L2, T1 試験体は H-SA700, N1 試験体は SS400 とした。いずれの試験体も中弾性型炭素繊維プレート(CFRP ML;幅 50 mm, 板厚 2 mm)一層を両面に接着し、L1 試験体を基準に、L2 試験体では 2 倍、T1 試験体では 0.7 倍、N1 試験体では 0.5 倍となるよう CFRP の四隅に径が決まった針金を入れることで接着層厚を調整した。

降伏応力度が SS400 の 2 倍以上ある H-SA700 を用いるのは、接着剤のせん断強度に達する前に鋼板が降伏することを防止するためである。

引張耐力改善効果の基準とするため、L1 試験体を、接着層厚の引張耐力に及ぼす影響を検討するため、L2 試験体(改善法 1 の検討)を、接着剤端部補剛の引張耐力に及ぼす影響を検討するため T1 試験体(改善法 2 の検討)を、鋼板降伏後の接着特性を検討するため N1 試験体を用意した。

鋼板, CFRP, 接着剤の素材特性を表 2, 3 に示す。接着剤は二液タイプの常温硬化型エポキシ樹脂を使用する。接着剤は主剤 2:硬化剤 1 の割合で調合し、CFRP 貼付け後、気温 5°C 以上の環境で 7 日以上養生した。

○ 荷重プログラム

荷重プログラムは単調引張とし、CFRP のはく離破壊するまで荷重を行った。試験装置は 2000 kN のアムスラー試験機を用いる。

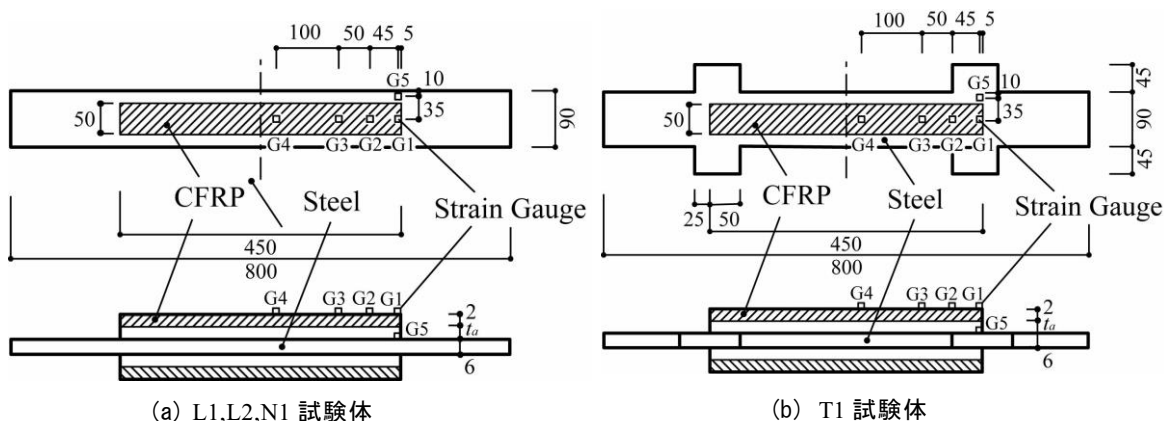


図3 試験体形状

表1 試験体シリーズ

試験体名	鋼材	接着剤	W_1 mm	W_2 mm	t_s mm	t_a mm
N1	SS400	E258RW	90.1	90.1	5.96	0.46
L1	H-SA700	E258RS	90.7	90.7	6.07	0.97
L2	H-SA700	E258RS	90.8	90.8	6.05	1.84
T1	H-SA700	E258RS	89.9	179.2	5.94	0.66

W_1 : 鋼板の板幅, W_2 : CFRP 端部の鋼板の板幅, $W_a = 50$ mm

表2 鋼材と CFRP の素材特性

	ヤング係数 N/mm ²	降伏応力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断ひずみ %	一様伸び %	絞り %
H-SA700	205000	795	862	11.7	6.6	48.0
SS400	205000	329	443	26.1	15.4	58.6
CFRP ML	295000	—	2,169	0.71	—	—

表3 接着剤力学特性

接着剤名	ヤング係数 N/mm ²	横弾性係数 N/mm ²	曲げ強度 N/mm ²	圧縮降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	引張せん断付着強度 N/mm ²	衝撃強度 kJ/mm ²
E258RW	4000	1438	61.0	67.0	37.0	27.0	4.2
E258RS	3100	1115	58.0	71.0	34.0	29.0	4.2
	JIS K7208	JIS K7208	JIS K7203	JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850	JIS K7111

○ 計測方法

計測は, 荷重 P はアムスラー試験機の荷重計から, ひずみは図 3 に示す箇所にひずみゲージを貼付し CFRP の材軸方向垂直ひずみを端部から, 5mm, 45mm, 50mm, 100mm の間隔に(G1, G2, G3, G4)と並べて, また鋼板のひずみは CFRP 端部位置(G5)を箔ひずみゲージを用いて計測した.

荷重の増加に対して, G1 点の CFRP のひずみ値がピークとなり減少し始める荷重をはく離荷重 P_{cr} として求めた.

4.2 有限要素解析

4.1 節で述べた表 1 の引張試験体すべてについて有限要素法解析を行って CFRP, 鋼板の垂直応力分布, 接着剤のせん断応力分布を求める. 特に理論式では表せない変断面鋼板の各応力分布を詳細に検討する.

解析対象は平面応力状態にあると仮定し, 2 次元問題として取扱う. また, 対象の対称性から 1/4 領域を解析する.

幾何学的境界条件は, 鋼板下面を鉛直方向に鋼板中

央を水平方向に変位を拘束した. 加力は自由端に強制変位 δ を与えて行った. 材軸方向に x 軸をとり原点を鋼板中央とした.

要素は定歪三角形要素を用い, 全要素分割数は 4800 とした. 尚, 炭素繊維プレートは異方性材料であるが, 本解析では等方均質材料として取扱った.

5 試験と解析の結果

試験及び解析の結果を表 4, 図 4~6 に示す.

表 4 には各試験体の使用接着剤名, 接着層厚 t_a , はく離荷重 P_{cr} , 理論式または有限要素解析で求めた, 単位荷重あたりの接着剤最大せん断応力度 $\tau_{a,max}/P$, 接着剤のせん断耐力 τ_{cr} を示す. τ_{cr} は次式で算定した.

$$\tau_{cr} = P_{cr} \cdot \tau_{a,max} / P \quad \dots\dots\dots(12)$$

図 4 には各試験体の荷重 P とひずみ ϵ 関係の実験値を示す. 図 5 には荷重 P が 70 kN の時の CFRP と鋼の垂直応力分布を L1, L2 試験体については, CFRP の応

炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着剤せん断耐力 その1 引張荷重試験

表 4 実験・解析結果

試験体名	接着剤	t_a mm	P_{cr} kN	τ_{amax}/P N/mm ² /kN	τ_{cr} N/mm ²
L1	E258RS	0.968	162.6 (1.00)	0.187 (1.00)	30.44
L2	E258RS	1.844	202.9 (1.25)	0.138 (0.74)	27.92
T1	E258RS	0.66	201.9 (1.24)	0.122** (0.65)	24.6**
N1	E258RW	0.46	148.2* (0.91)	0.319 (1.70)	-
Ave.	-	-	-	-	29.2

* 鋼板降伏荷重 ** F.E.M.解析による

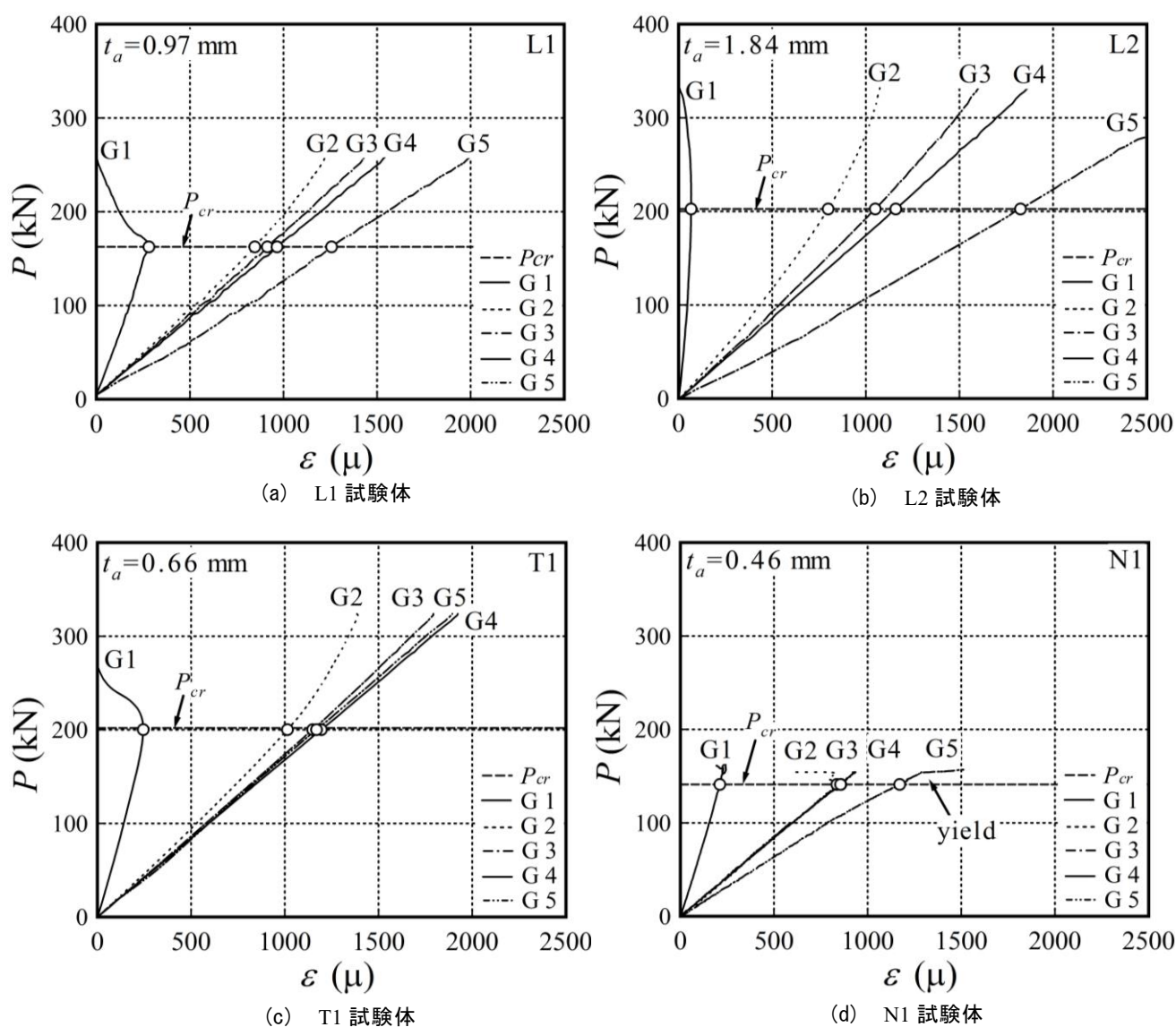


図 4 各試験体の荷重-ひずみ関係

力は実験値を○印で理論値を実線で、有限要素解析値は破線で示す。鋼板の応力は実験値を◆で示す。実験値の応力はひずみゲージから求めたひずみ値に素材のヤング率をかけた値を採用した。

図 6 には P/A_v で無次元化した接着剤のせん断応力 $\tau_a/(P/A_v)$ の分布を L1, L2 試験体では理論値を T1 試験体については有限要素解析値を実線(L1), 破線(L2), 一点鎖線(T1)で示し, 最大せん断応力について L1 試験体に対する比の百分率を併せ示す。

各項目についての考察をまとめて示す。

○ CFRP のひずみ性状

- 1) 図 4 よりいづれの試験体についても CFRP 端部のひずみ(G1)がピークとなると G2 のひずみの増加量が減少する。
- 2) N1 試験体では、はく離荷重(鋼板の降伏荷重)に達すると G5 の鋼板のひずみは急増する一方、L1, L2, T1 試験体では、はく離荷重後も鋼板のひずみの増加率に大きな変化はない。よって L1, L2, T1 試験体では鋼材の弾性範囲内で接着剤のはく離が生じたといえる。

○ 理論解の妥当性

- 3) 図 5(a), (b)より 2 節で示した理論値は弾性範囲内で CFRP 端部近傍の応力低下特性を良好に表す。
- 4) したがって応力の釣り合いで求まる接着剤のせん断応力分布理論値は、妥当といえる。

○ 有限要素解析値の精度

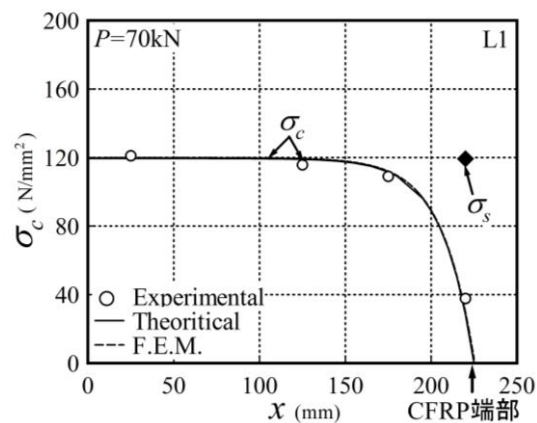
- 5) 図 5(a), (b)より今回行った解析の要素分割だと CFRP の垂直応力分布は理論値と良好に一致する。
- 6) 図 5(c)より変断面の鋼板の場合も、実験値と有限要素解析値の垂直応力分布はほぼ一致することから、有限要素法で求めた接着剤のせん断応力分布は妥当である。

○ 接着剤のせん断耐力

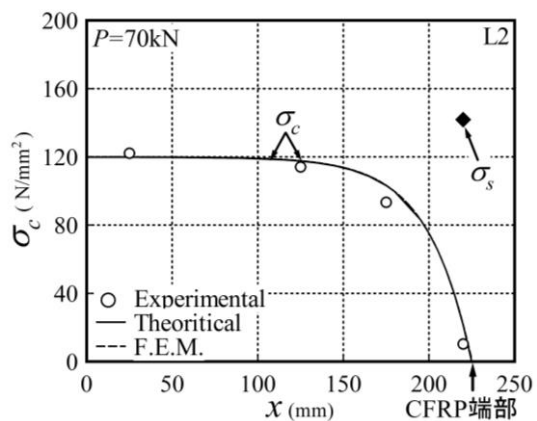
- 7) 表 4 より接着層厚や変断面鋼等、様々でもはく離時に生じる最大せん断応力 τ_a (はく離せん断耐力)は $30.44\sim 24.6\text{N/mm}^2$ で平均 27.7N/mm^2 となる。このことから接着剤の耐力は最大せん断応力のみで判定しうる可能性がある。

○ 複合材の引張耐力改善法の妥当性

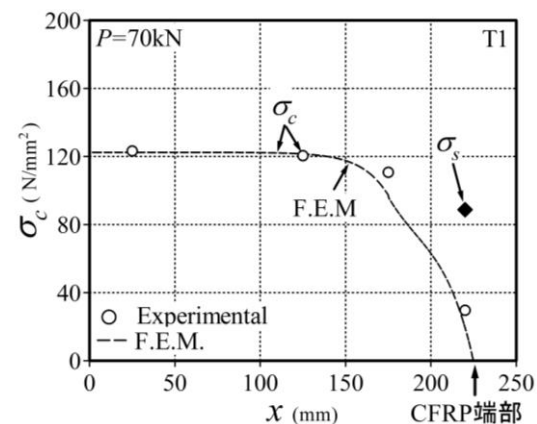
- 8) 表 4 及び図 6 より L2 試験体の耐力は L1 試験体の 1.25 倍となることから接着層厚の増大は複合材の引張耐力改善に有効である。



(a) L1 試験体



(b) L2 試験体



(c) T1 試験体

図 5 CFRP と鋼の垂直応力分布

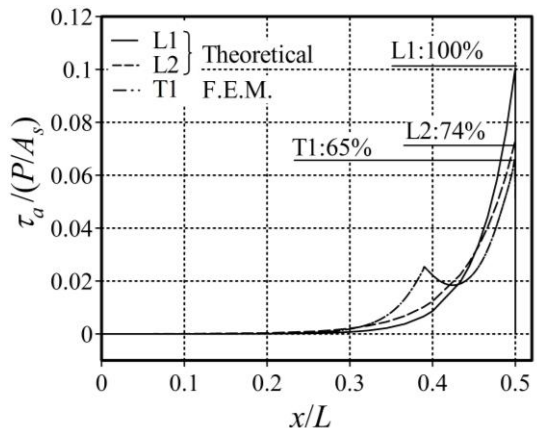


図 6 接着剤のせん断応力分布

- 9) 図 6 よりはく離現象が端部における最大せん断応力で決定されるなら、CFRP 端部のみの鋼板の補剛により接着層を厚くすることと同等の効果がある。

6 まとめ

本報では接着剤の破壊条件を明らかにするために CFRP によって接着補強された鋼部材の接着応力分布の理論解を導出し、実験及び解析を行い接着剤の破壊条件の検討を行った。また、複合材の引張耐力改善法についても提案及び検討を行った。

本研究で得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 理論解は実験値、解析値と良好に一致している。このことから理論解と解析値の精度は良好である。
- 2) 接着層厚や鋼板が変断面の場合においてもはく離現象が生じる最大せん断応力は平均 27.7 N/mm^2 と大きくばらつかないことから、はく離耐力は接着剤の弾性最大せん断応力で判定できる可能性がある。
- 3) 接着層厚を大きくすると複合材の引張耐力は改善する。
- 4) CFRP 端部の鋼板の補剛は理論的には複合材の引張耐力は改善する。

今後の課題としては、今回試験を行った試験体は 4 体であり、接着剤の正確な弾性最大せん断応力を判定するには試験体数が足りないと思われる。そこで、L1 試験体と L2 試験体と同寸法の試験体を複数製作し、今回と同様の試験を行うことで、より正確な接着剤の弾性最大せん断応力の判定を行う。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生: 連続繊維プレートによる鋼構造建物の補強法に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 12 巻, pp.239-246, 2004.11.
- 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 原伸幸, 灰谷徳治, 服部明生, 炭素繊維プレートによる鋼構造建物の長寿命化に関する基礎的研究(その 1) 小ばりの曲げ補強について広島工業大学紀要, 研究編, 第 39 巻別冊, pp.119-128, 2005.2.
- 3) 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, pp991-998, 2010.
- 4) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三, 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, pp239-249, 2001.10
- 5) 小野昌孝: 接着と接着剤, 財団法人日本規格協会, pp179-190, 1991.
- 6) 大沼康二, 金属外版接着部の応力分布と強さ特性について, 日本航空学会誌第 7 巻, 第 60 号, 1959 年 1 月
- 7) 玉井宏章, 服部明生, 小澤吉幸, 高松隆夫, 灰谷徳治, 久保田啓仁, 炭素繊維プレートと鋼との複合材の接着応力について, 日本建築学会学術講演梗概集, No22473, 945~946, 2013.8.

謝辞

本研究を実施するにあたり、高松隆夫(広島工大),服部明生,藤本信介(東レ建設),堀井久一(コニシ(株)),松井孝洋(東レ(株))の諸氏には、試験体作成の協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。