

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4 端部未接着処理の効果

玉井 宏章*, 陣川 晃司**, 御厨 健太**

Shear Bond Strength of Rehabilitated Steel Plate Bonding CFRP Plates. Part 4 Effect on unbonded area near edge of CFRP

By

Hiroyuki TAMAI*, Koji JINKAWA** and Kenta MIKURIYA**

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 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 effect on unbonded area near edge of CFRP. Also, F.E.M. was performed to investigate the effect on low stiffness adhesive area near edge of CFRP Plates. The results showed that to improve the yield strength as the effect on unbonded area near edge of CFRP. Also, it showed the possibility that use a low stiffness of the adhesive area near edge of CFRP can be improved than unbonded area near edge of CFRP.

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

1. はじめに

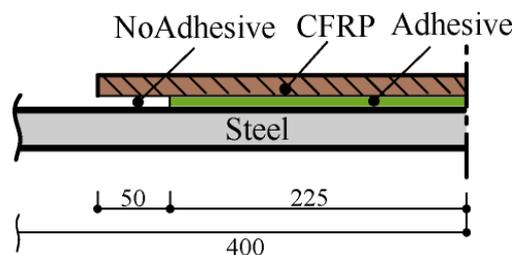
近年，高度成長期に建設された鋼構造物の多くが老朽化し，補修・補強が必要となる事例が増加している．

その解決法の1つとして，著者等は炭素繊維プレート(CFRP)を用いた接着補剛工法を提案している¹⁾．

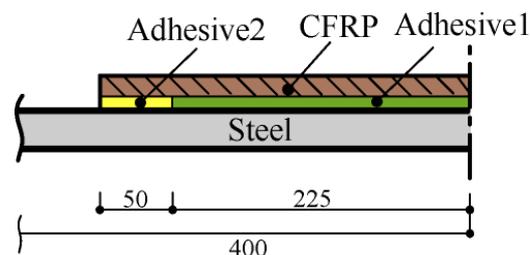
接着部端部ではCFRPプレート端部に発生する材軸方向への割れによって強度低下が予想される．その影響を緩和するため，図1(a)に示す接着部端部よりCFRPプレート端部を延長し，端部を未接着にすることでCFRP端部における損傷の影響を緩和する方法が提案されている²⁾．

前報ではCFRP端部を未接着処理した場合の影響を有限要素法解析を用いて検討を行った³⁾．

本研究では前報で示した端部を未接着処理した試験体を製作し，CFRPのはく離に対しどのような影響があるのかを検討すると共に，図1(b)に示す未接着部に低剛性接着剤(Adhesive2部分)を用いた場合の性状を検討するため，有限要素法解析を用いて端部未接着試験体との比較・検討を行った．



(a) 端部未接着処理試験体



(b) 端部低剛性試験体

図1 検討対象

また，未接着部に使用する低剛性接着剤の破壊性状について引張試験を行い，提案した破壊条件式⁴⁾を用いて検討を行った

平成27年12月21日受理

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

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

2. 引張試験概要

端部未接着処理した試験体と端部低剛性試験体を使用する予定である通常の接着剤より剛性が約 1/9 の低剛性接着剤 DA を用いて試験体を作成する。

また、引張試験を実施し、端部未接着処理の効果及び低剛性接着剤の破壊性状について検討を行う。

2.1 端部未接着処理試験体

○試験体

試験体形状を図 2、写真 1,2 に、試験体シリーズを表 3 に示す。試験体は帯形状の板厚 6 mm、幅 90 mm、全長 800 mm の鋼材(鋼種：H-SA700)に、中弾性型炭素繊維プレート(CFRP ML: 板厚 2 mm、幅 50 mm、全長 500mm)一層を両面に接着した。

鋼板、CFRP、接着剤の素材特性を表 1,2 に示す。

CFRP 中央部 450mm の範囲を接着し、両端部 50mm は鋼板を養生テープで覆い未接着処理とし、試験体 (KSN-01,02) を作成した。

接着剤は二液タイプの常温硬化型エポキシ樹脂(KS)を使用した。主剤 2：硬化剤 1 の割合で調合、鋼材及び CFRP プレートに半量ずつ塗布し、CFRP 貼付け後、気温 20℃以上の雰囲気中で 7 日以上養生した。

接着層厚を調整するために、CFRP の四隅及び中央縁に目標接着層厚の径の針金を設置し試験体を作成した。また、既往の研究で行った未接着部の無い通常の接着条件である試験体(KS-01~03)を参考として併せて示す。

○計測方法

ひずみは図 2 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接着部端部から CFRP 端部方向に 5mm,20mm 間隔に CN1,CN2 と並べ、接着部端部から中央方向に 5mm,20mm,25mm,50mm,100mm 間隔に C1,C2,C3,C4,C5 と並べて、また、鋼板のひずみは接着部端部位置(S1)を箔ひずみゲージを用いて計測した。また、鋼板のひずみは接着部端部位置(S1)を箔ひずみゲージを用いて計測した。

CFRP を接着する鋼板の部分はグラインダーで黒皮を除去後、サンドペーパー#1000 で表面処理した後アセトンで油分を除去し CFRP を貼付けた。

接着層厚 t_a については、CFRP 貼り付け部分の鋼板、接着剤、CFRP を含んだ厚さの平均値から、鋼板及び CFRP の板厚を差し引いた値を平均した値を片面の接着層厚として採用した。

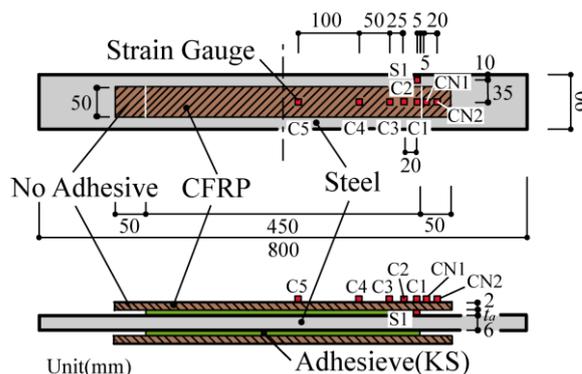


図 2 端部未接着処理試験体

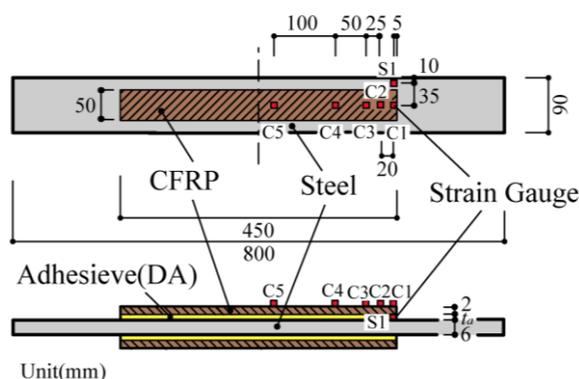


図 3 低剛性接着剤試験体

表 1 鋼材・CFRP の素材特性

| | ヤング係数 N/mm ² | 降伏強さ N/mm ² | 引張強さ N/mm ² | 破断ひずみ % | 一様伸び % |
|-----------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| H-SA700 | 205000 | 795 | 862 | 11.70 | 6.6 |
| CFRP (ML) | 295000 | — | 2169 | 0.71 | — |

表 2 接着剤の素材特性

| 名称 | ヤング係数 N/mm ² | せん断 弾性係数 N/mm ² | 曲げ強さ N/mm ² | 圧縮強さ N/mm ² | 引張強さ N/mm ² | 引張せん断 付着強度 N/mm ² |
|----|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| KS | 3100 | 1115 | 58 | 71 | 35 | 29 |
| DA | 362 | 132 | - | - | - | 8.1 |

表 3 試験体シリーズ

| 試験体名 | 接着剤 | | W_s mm | t_s mm | t_a mm |
|--------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | 中央部(450mm) | 端部(50mm) | | | |
| KSN-01 | KS | 未接着 | 90.90 | 5.95 | 1.13 |
| KSN-02 | | | 91.10 | 5.97 | 1.08 |
| KS-01 | | | 90.70 | 6.07 | 0.97 |
| KS-02 | KS | 未接着 | 90.20 | 5.98 | 1.08 |
| KS-03 | | | 90.30 | 5.97 | 1.10 |
| DA1-01 | | | DA1層 | 未接着 | 90.70 |
| DA1-02 | 91.10 | 5.89 | | | 0.46 |
| DA1-03 | 90.10 | 5.79 | | | 0.47 |
| DA2-01 | DA2層 | 未接着 | 91.00 | 6.08 | 0.60 |
| DA2-02 | | | 90.60 | 6.05 | 0.61 |
| DA2-03 | | | 90.70 | 6.06 | 0.78 |

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4 端部未接着処理の効果



写真1 端部未接着試験体

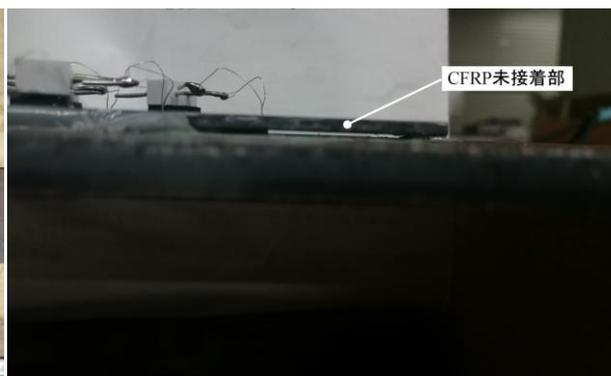


写真2 未接着部分

2.2 低剛性接着剤試験体

○試験体

試験体形状を図3に試験体シリーズを表4に示す。試験体は、2.1節で示した端部未接着処理試験体と同様の鋼材を用いて、CFRPは全長450mm、接着剤は粘接着シートDAを使用し試験体を作成した。接着シートDAにUV照射装置により、紫外線800mJ/cm²を接着シートに照射後、CFRP貼付け、気温15℃以上の雰囲気中で7日以上養生した。

接着シートを1層貼りしたものをDA1-01~03試験体と2層貼りとしたものをDA2-01~03試験体とした。

接着層厚の計測方法としては、2.1節と同様のものとした。

○計測方法

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接着部端部から中央方向に5mm,20mm,25mm,50mm,100mm間隔にC1,C2,C3,C4,C5と並べて、また、鋼板のひずみは接着部端部位置(S1)を箔ひずみゲージを用いて計測した

2.3 载荷装置

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

荷重 P はアムスラー試験機の荷重計から計測を行った。

荷重の増加に対して、接着部端部のひずみC1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。

3. 接着剤の破壊条件式

端部低剛性試験体に適用する低剛性接着剤の破壊性状を既往の研究で示した破壊条件式⁴⁾を用いて検討を行う。

3.1 弾性応力分布理論式

CFRPと鋼との複合材の引張時の弾性応力分布は次式のように表される。

$$\tau_a = -\frac{P}{\lambda \cdot \cosh \frac{L}{2 \cdot \lambda}} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \cdot \frac{t_a}{A_a} \cdot \sinh \frac{x}{\lambda} \quad (1.a)$$

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

ここに、 τ_a は接着剤のせん断応力、 σ_c はCFRPの垂直応力であり、

$$\lambda^2 = \frac{t_a^2}{G_a \cdot A_a} \cdot \frac{E_s \cdot A_s \cdot E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \quad (2)$$

ここに

P : 引張力, L : 接着長さ, λ : 基準長さ

E_c, A_c : CFRPのヤング係数, 断面積

E_s, A_s : 鋼のヤング係数, 断面積

G_a, A_a, t_a : 接着剤のせん断剛性, 断面積, 層厚

である。

これらの応力解は、炭素・鋼が単軸応力状態、接着剤が純せん断応力状態と仮定して求められている。

3.2 破壊条件式

破壊条件は、(1.a)式の最大値が限界せん断応力 $\bar{\tau}_{cr}$ に達した場合に接着剤にはく離が生じるとすると、以下の様に表される。

$$f(\sigma_{ij}) = \tau_a = \bar{\tau}_{cr} \quad (3)$$

接着長さ L が基準長さ λ の10倍以上あれば接着剤の τ_a の最大値は、接着端部で生じその値 $\tau_{a,max}$ は次式で近似できる。

$$\tau_{a,max} = P \cdot \sqrt{\frac{G_a}{A_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s \cdot (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c)}} \quad (4.a)$$

はく離荷重 \bar{P}_{cr} が求めれば $\bar{\tau}_{cr}$ は次式で得られる.

$$\bar{\tau}_{cr} = \bar{P}_{cr} \cdot \sqrt{\frac{G_a}{A_a} \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s \cdot (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c)}} \quad (4.b)$$

4. 有限要素法解析

端部未接着処理(図 1(a))及び端部に低剛性接着剤を用いた場合(図 1(b))の効果を検討するため, 有限要素法解析を用いて解析を行った.

解析対象は平面応力状態または平面ひずみ状態にあると仮定し, 2次元問題として取扱った. また, 対象の対称性から 1/4 領域を解析した.

要素は定歪三角形要素を用い, 全要素分割数は 7500 とした. なお, 炭素繊維プレートは等方均質材料として取扱った. 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. 解析に用いた各材料定数は表 1,2 に示す値を採用した.

○解析シリーズ

解析シリーズを表 4 に示す.

解析モデルは, 図 1(a)に示す端部未接着処理試験体をモデル化したもの(KS-NA), (b)に示す端部低剛性試験体をモデル化した(KS-DA)の 2 ケースの解析を行った.

5. 試験結果と考察

5.1 端部未接着処理効果

試験結果を表 5, 図 4~6 に示す.

表 5 に各試験体のはく離荷重 P_{cr} , はく離せん断応力 τ_{acr} 及び平均はく離せん断応力を示す.

図 4 に端部未接着試験体(KSN-01,02)の荷重ひずみ関係を示す. 各試験体のはく離荷重 P_{cr} のときのひずみ値を○印で示す.

図 5 に KSN-01,02 試験体における荷重 P が 70kN の時の CFRP の垂直応力分布 σ_c を示す. 実験値を○印で, 有限要素解析値は破線で示す.

図 6 に(a)通常の接着条件である KS-01 試験体及び(b)KSN-01 試験体における接着層のせん断応力分布を示す. 解析値を破線で示しており, KS-01 試験体には理論値を実線で示している.

試験結果より, 以下のことが分かる.

- 1) 図 4 より, KSN-01, KSN-02 試験体共に未接着部の CN2 点のひずみは変化しないものの, 接着部端部

表 4 解析シリーズ

| 試験体名 | 接着剤 | | W_s mm | t_s mm | t_a mm |
|-------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | 中央部(450mm) | 端部(50mm) | | | |
| KS-NA | KS | — | 90.00 | 6.00 | 1.00 |
| KS-DA | KS | DA | 90.00 | 6.00 | 1.00 |

表 5 試験結果

| 試験体名 | はく離荷重 P_{cr} kN | はく離せん断応力 τ_{acr} N/mm ² | 平均はく離せん断応力 N/mm ² |
|--------|-------------------------|---|---------------------------------|
| KSN-01 | 231.39 | 40.68 | 43.95 |
| KSN-02 | 263.79 | 47.22 | |
| KS-01 | 162.62 | 30.41 | 26.76 |
| KS-02 | 154.95 | 27.93 | |
| KS-03 | 122.88 | 21.95 | |
| DA1-01 | 50.78 | 4.88 | 4.45 |
| DA1-02 | 42.77 | 4.07 | |
| DA1-03 | 45.81 | 4.39 | |
| DA2-01 | 110.92 | 9.24 | 7.17 |
| DA2-02 | 90.30 | 7.35 | |
| DA2-03 | 68.40 | 4.91 | |

に近い CN1 点のひずみは KSN-02 試験体において逆ひずみが生じている.

- 2) 表 5 より, はく離荷重及びはく離せん断応力は共に端部を未接着処理した KSN-01,02 試験体は通常の接着条件である KS-01~03 試験体よりも大きく
- 3) 図 5 より, 実験結果と解析結果は良好に一致しており, KSN-02 試験体については, C2 点のひずみで逆ひずみが発生している.
- 4) 図 6 より, 通常の接着条件の KS-01 試験体よりも端部未接着処理した KSN-01 試験体のほうが接着層の最大せん断応力を低減できる.

5.2 低剛性接着剤の破壊性状

試験結果を表 5,6, 図 7~9 に示す.

表 5 に各試験体のはく離荷重 P_{cr} , はく離せん断応力 τ_{acr} 及び平均はく離せん断応力を示す.

図 7 に低剛性接着剤試験体(DA1-01~03, DA2-01~03)の C1 点における CFRP 端部のひずみ値と荷重との関係を示す. また, 各試験体のはく離荷重 P_{cr} のときのひずみ値を○印で示す

図 8 に DA2-01 試験体について荷重 P が 70kN の時の CFRP の垂直応力分布 σ_c を示す. 実験値を○印で, 理論式を実線で示す.

図 9 に破壊条件式の適合度を示す. 各条件式 $\tau_{acr}/\bar{\tau}_a$ と接着層厚 t_a の関係を示す.

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4 端部未接着処理の効果

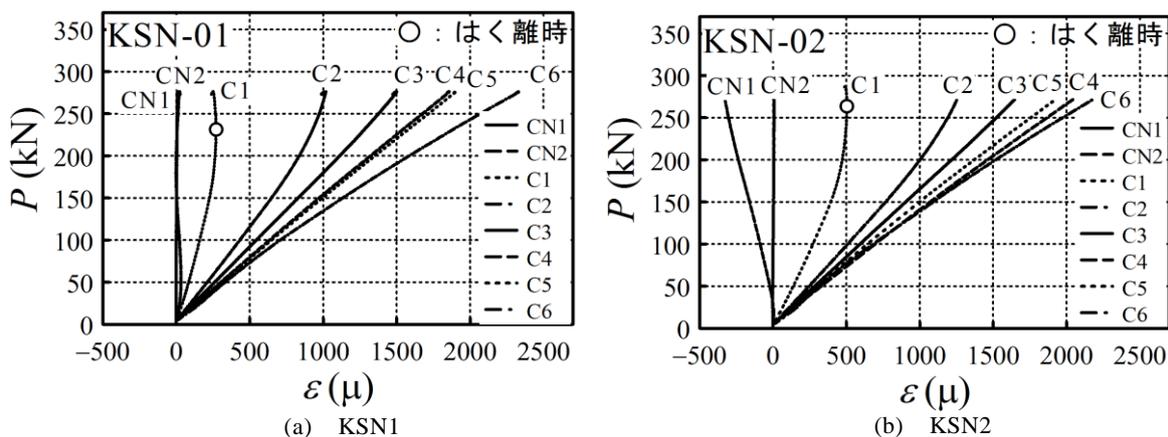


図4 荷重—ひずみ関係(端部未接着試験)

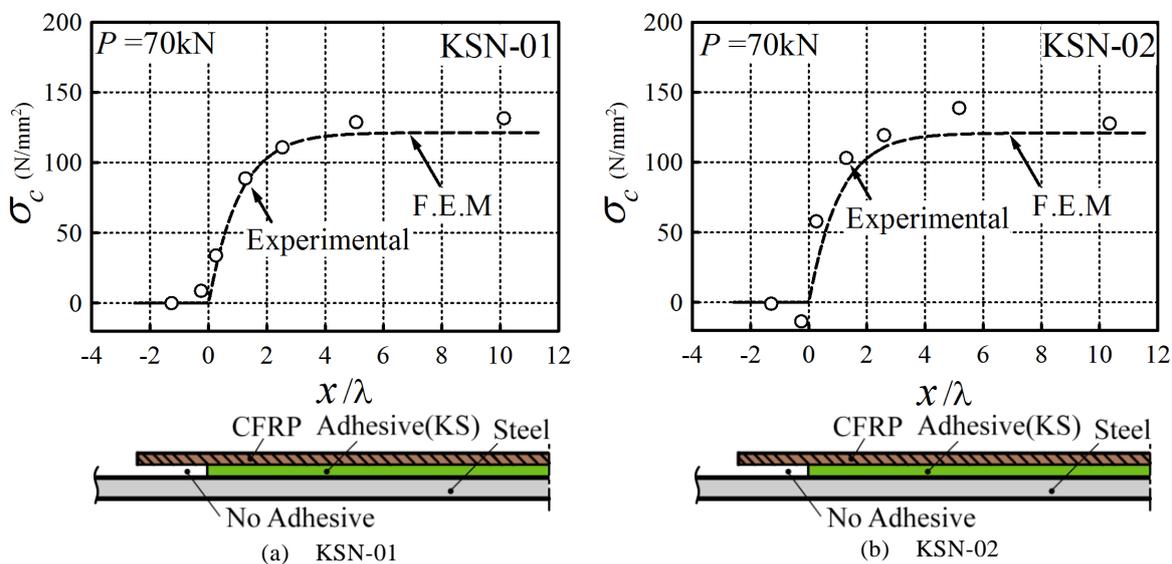


図5 CFRPの垂直応力分布(端部未接着試験体)

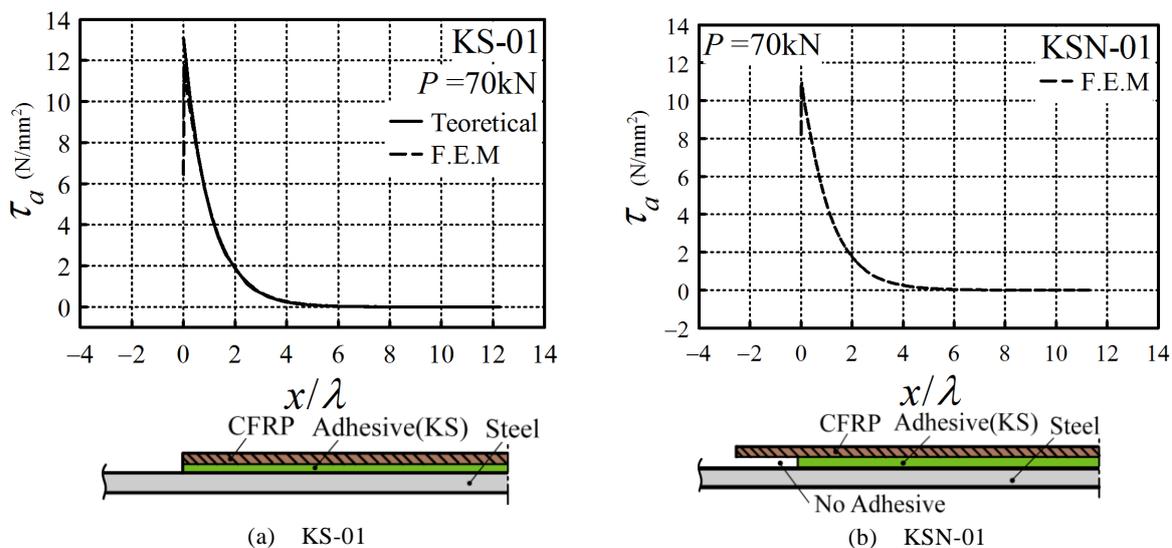


図6 接着剤のせん断応力分布(KS-01,KSN-01)

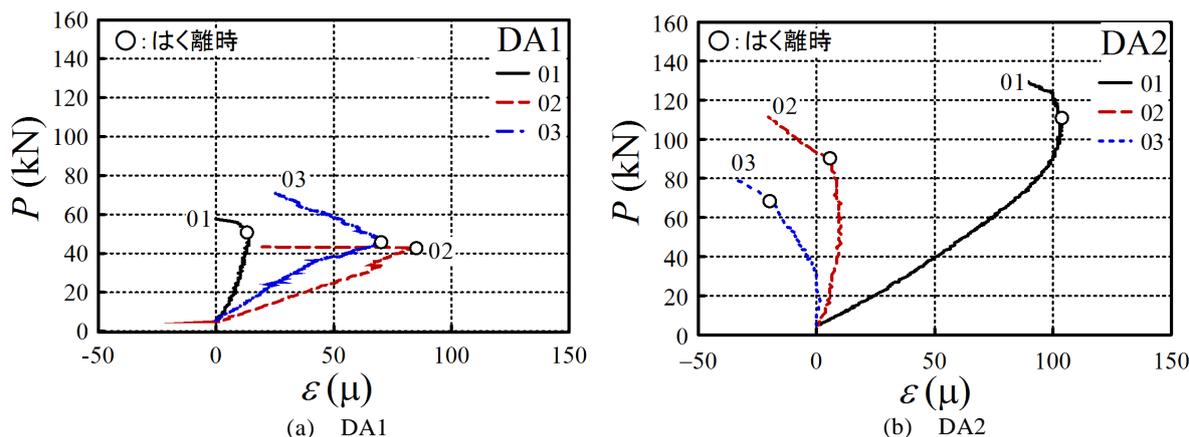


図7 荷重—端部ひずみ関係(低剛性接着剤試験体)

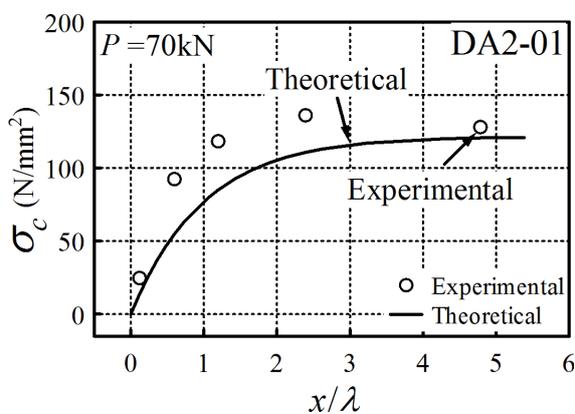


図8 CFRPの垂直応力分布(DA2-01)

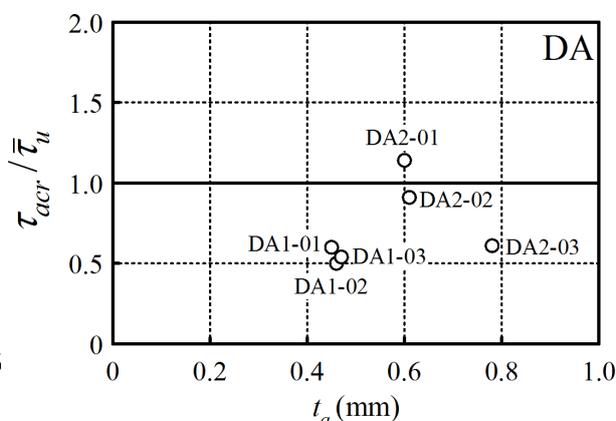


図9 破壊条件式適合度

表6に低剛性接着剤試験体における破壊条件式の適合度 $\tau_{acr}/\bar{\tau}_u$ を示す. また,破壊条件式の1.0の値からのばらつきを変動係数(=標準偏差)/(平均値))として示す.

試験結果より,以下のことが分かる.

- 1) 表5, 図7より, 低剛性接着剤試験体では, 接着層厚が薄い DA1-01,02,03 試験体よりも, 接着層厚が大きい DA2-01,02,03 試験体のほうがはく離荷重が大きくなった. これは, 接着部端部に生じる最大せん断応力 $\tau_{a,max}$ が接着層厚が厚いほど小さくなるためだと考えられる.
- 2) 図8より, 低剛性接着剤を用いた DA2-01 試験体では実験値と理論値は良好に一致している.
- 3) 表6, 図9より, 破壊条件式の適合度は変動係数が0.32と多少ばらつくものとなった. これは, 接着は化学変化によるものなので, 温度, 湿度などの養生条件や接着作業の誤差などの要因によって強度にバラツキが出たものと考えられる.

5.3 端部低剛処理効果解析

解析結果を, 図10~12に示す.

図10にKS-DA試験体及びKS-NA試験体における荷重 P が70kNの時のCFRPの垂直応力分布 σ_c を示す.

表6 破壊条件式適合度

| 試験体名 | 接着剤 | t_a mm | τ_{acr} N/mm ² | 破壊条件式 $\tau_{acr}/\bar{\tau}_u$ |
|--------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DA1-01 | DA1層(0.5) | 0.45 | 4.88 | 0.60 |
| DA1-02 | DA1層(0.5) | 0.46 | 4.07 | 0.50 |
| DA1-03 | DA1層(0.5) | 0.47 | 4.39 | 0.54 |
| DA2-01 | DA1層(0.5×2) | 0.60 | 9.24 | 1.14 |
| DA2-02 | DA1層(0.5×2) | 0.61 | 7.35 | 0.91 |
| DA2-03 | DA1層(0.5×2) | 0.78 | 4.91 | 0.61 |
| 変動係数 | — | — | — | 0.32 |

有限要素解析値を破線で示す.

図11にKS-DA試験体及びKS-NA試験体における接着層のせん断応力分布を示す. 解析値を破線で示している.

図12にKSN1及びKSDA試験体の各軸方向応力(材軸方向応力: σ_{ax} 板厚方向応力: σ_{ay} 板幅方向応力: σ_{az})を示す.

解析結果より, 以下のことが分かる.

- 1) 図10より, 端部を低剛性接着剤したKS-DA試験体では, 低剛性接着剤DAとKS接着剤の境界($x/\lambda=0$)でCFRP端部に生じるひずみが増加して

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4 端部未接着処理の効果

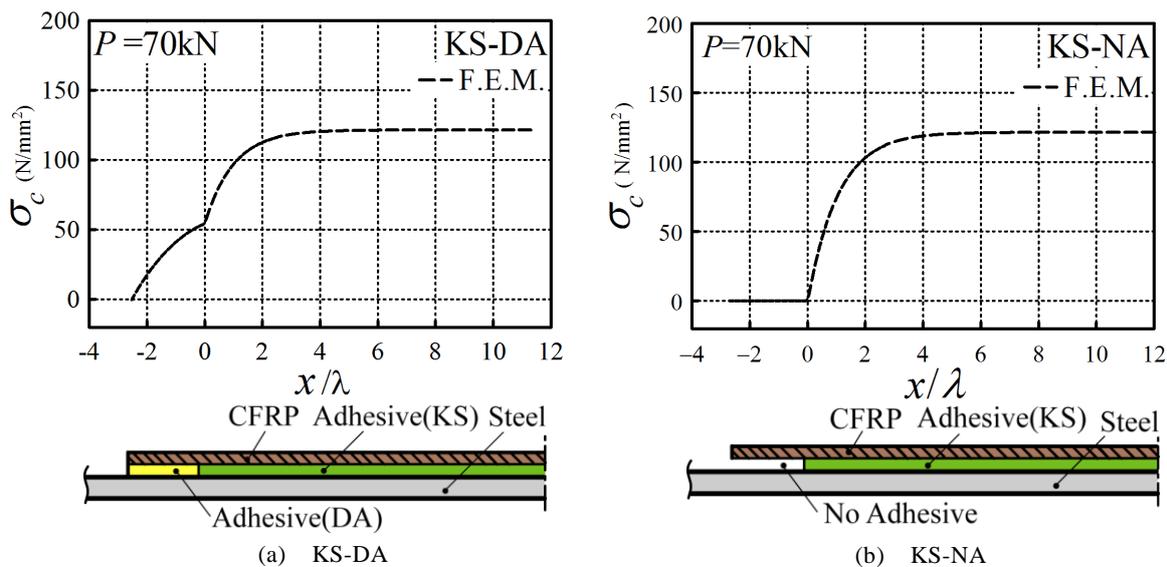


図 10 CFRP 材軸方向垂直応力分布(KS-DA,KS-NA)

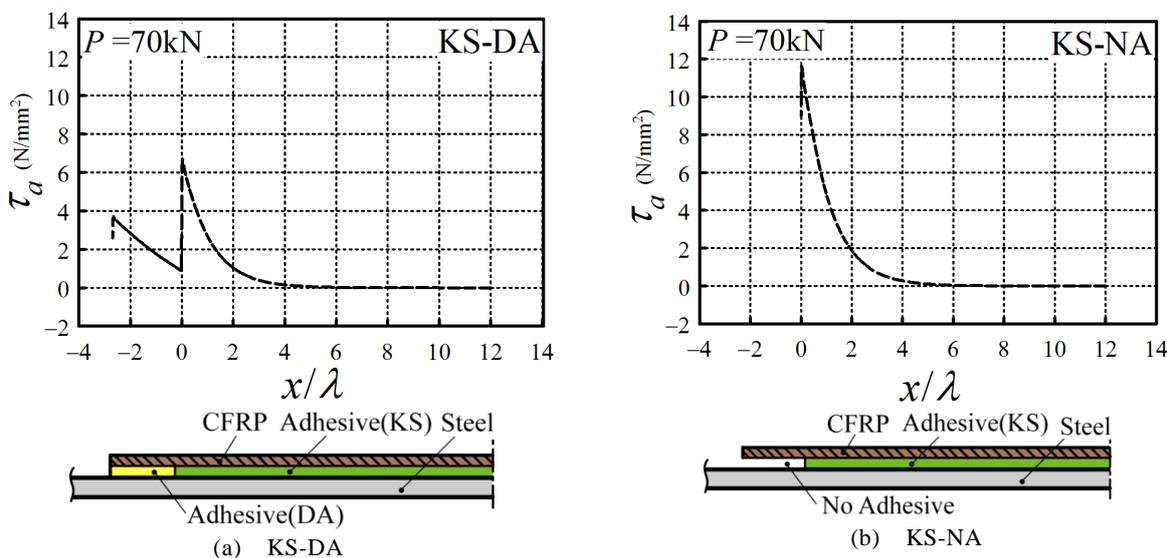


図 11 接着剤のせん断応力分布(KS-DA,KS-NA)

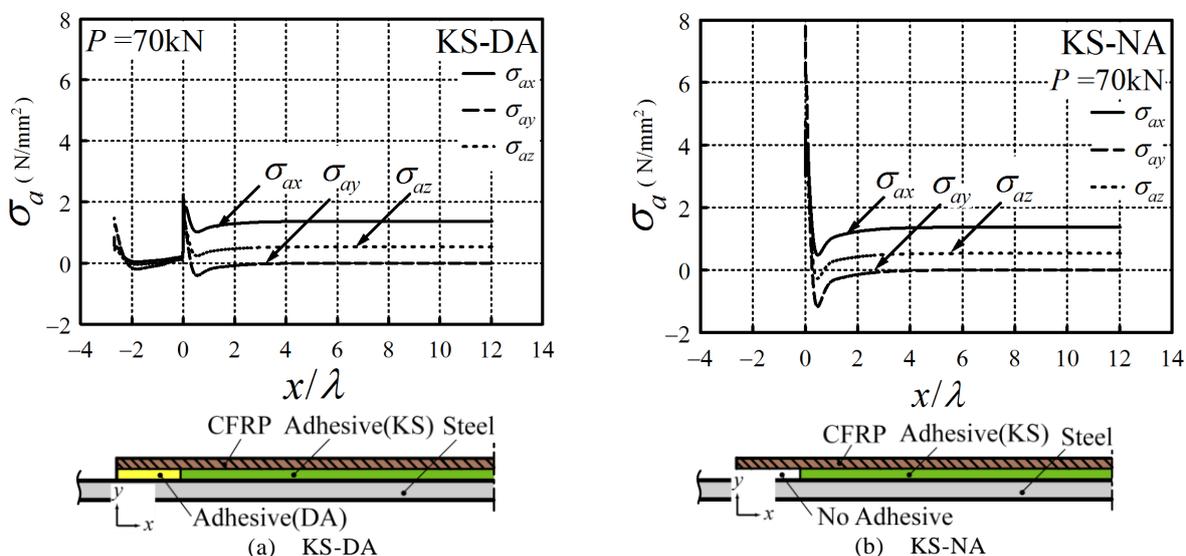


図 12 接着剤の各軸方向応力分布(KS-DA,KS-NA)

いる。また、端部を未接着にした KS-NA 試験体では未接着部ではひずみは発生しない。

2) 図 11 より、端部に低剛性接着剤を用いた KS-DA 試験体では、端部を未接着処理した KS-NA 試験体よりも接着剤の最大せん断応力を低減することができる。これは、端部に低剛性接着剤を用いることで、低剛性接着剤がせん断応力を負担し、背着部端部に生じる最大せん断応力を低減させたと考えられる。

3) 図 12 より、各軸方向応力は端部に低剛性接着剤を用いた KS-DA 試験体のほうが、端部を未接着処理した KS-NA 試験体よりも小さくなった。

このことから、端部に低剛性接着剤を用いることで、接着剤のはく離に最も影響があると考えられる板厚方向の応力 σ_y を低減することができる。

6. まとめ

本研究では端部を未接着処理した場合の効果及び端部に低剛性接着剤を適用した場合の効果を検討するため、引張試験及び、有限要素法解析を用いて検討を行った。

また、未接着部に使用する低剛性接着剤の破壊性状について引張試験を行い、提案した破壊条件式を用いて検討を行った。

本研究で得られた知見は以下のように要約できる。

○端部未接着処理の効果

- 1) 端部を未接着処理することによって通常の接着条件よりも接着部端部に生じる最大せん断応力を低減することができる。
- 2) このことから、端部未接着処理を行うことで、通常の接着条件よりもはく離耐力を改善することができる。

○端部低剛性処理の効果

- 1) 端部に低剛性接着剤を用いることで、端部を未接着処理した場合よりも、接着剤の最大せん断応力及び各軸方向垂直応力分布を低減できる。

- 2) このことから、端部に低剛性接着剤を用いることで、未接着処理を行う場合よりも、はく離耐力を改善することができると考えられる。

○低剛性接着剤の破壊性状

- 1) 低剛性接着剤では破壊条件の適合度に多少バラつきが見られる。接着は化学変化によるものなので、温度、湿度などの養生条件や接着作業の誤差などの要因によって強度にバラツキが出たものと考えられる。

今後は、端部に低剛性接着剤を用いた端部低剛性試験体を作成し、実験を行う予定である。また、接着は化学変化によるものなので、養生条件を合わせた研究を行うほか、実施工環境下における接着剤材料強度の標準偏差を求める必要がある。

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) 高松隆夫, 服部明生, 玉井宏章, 藤本信介: H形鋼梁に貼付けた CFRP の破壊性状に関する実験的研究, 広島工業大学紀要研究編, 第49巻, pp43-47, 2015.10
- 3) 玉井宏章, 陣川晃司, 中村憲一, 御厨 健太: 炭素繊維プレートと鋼の複合材接着剤せん断耐力 その3 端部未接着試験体の検討, 長崎大学大学院工学研究科研究報告,45(85),pp.1-7, 2015.7
- 4) 玉井宏章, 陣川晃司, 中村憲一, 御厨 健太: 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2 接着剤破壊条件, 長崎大学大学院工学研究科研究報告, 45(84), pp6-10;., 2015.1

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)), 立川智之(大日本印刷)の諸氏には、素材を提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。