

(33) CFRPが接着された 鋼部材の熱応力に関する検討

秀熊 佑哉¹・原田 拓也²・大垣 賀津雄³・宮下 剛⁴・奥山 雄介⁵

¹正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部（〒103-0027 東京都中央区日本橋一丁目13番1号）

E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

²正会員 ㈱高速道路総合技術研究所 橋梁研究室（〒194-0035 東京都町田市忠生1丁目4-1）

E-mail: t.harada.ab@ri-nexco.co.jp

³正会員 ものづくり大学教授 建設学科（〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷333）

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学大学院准教授 工学研究科（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1）

E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁵正会員 長野工業高等専門学校准教授（〒381-0041 長野県長野市大字徳間716）

E-mail: y_okuyama@nagano-nct.ac.jp

近年、鋼構造物に対して炭素繊維シート（CFRP）を接着して補修・補強する工法が適用され始めているが、CFRPの線膨張係数が鋼材と比較して小さいことから、CFRPが接着された鋼構造物が温度変化を受けると熱応力が発生することが知られている。熱応力に関する検討は多数行われているが、接着長が長くなった場合の検討は行われていない。

そこで本研究では、形鋼の上下フランジにCFRPの接着長を変えて貼り付けて温度変化を与え、発生する熱応力を測定し、接着長さの影響を検討した。その結果、鋼部材に発生する熱応力は長さに依存しないことを明らかとした。また、CFRPで補強された鋼板の引張試験も実施し、部材耐力に及ぼす熱応力の影響についても検討を行った。

Key Words: CFRP, steel member, bond, thermal stress

1. はじめに

近年、鋼構造物に対して、炭素繊維シート（以下CFRPと呼ぶ）を樹脂で接着して補修・補強する研究が数多く実施され¹⁾²⁾、実際の工事で適用され始めている³⁾。鋼部材の補修・補強工法としては、当て板を高力ボルトで添接する工法が一般的であるが、CFRP接着工法は、CFRPが軽量で高強度・高弾性、耐食性にも優れることから鋼部材の腐食補修に対して効果的であると考えられる。

一方で、CFRP接着工法では、CFRPの線膨張係数が鋼材と比較して小さいことから、CFRPが接着された鋼構造物が温度変化を受けると熱応力が発生することが知られている。熱応力に関する検討は多数行われており⁴⁾⁻⁶⁾、

発生する熱応力を低減させる方法も提案されているが⁷⁾⁸⁾、接着長さが及ぼす影響については検討されていない。そこで本研究では、形鋼の上下フランジにCFRPの接着長を変えて貼り付けて温度変化を与え、発生する熱応力を測定し、接着長さの影響を検討した。

また、近年の道路橋示方書の改定に伴い、FRP接着による補修・補強に関しても、限界状態設計法を取り入れる動きがあり⁹⁾、部材耐力に及ぼす熱応力の影響についても検討する必要がある。そこで本研究では、熱応力が外力と同方向に発生するように施工・養生した試験体を用いて、温度差を与えた状態で引張試験を実施し、部材耐力に及ぼす熱応力の影響についても検討を行った。

2. 材料

接着長さが熱応力に及ぼす影響の検討(実験A)および、部材耐力に及ぼす熱応力の影響についての検討(実験B)に使用した材料物性を表-1, 表-2に示す。CFRPとしては、高弾性型炭素繊維シート(実験A)および高弾性型炭素繊維ストランドシート(実験B)を使用し、文献3)に従い、高伸度弾性パテ(ポリウレアパテ)を使用した。

3. 試験体および試験方法

接着長さが熱応力に及ぼす影響の検討(実験A)および、部材耐力に及ぼす熱応力の影響についての検討(実験B)の試験体概要および試験方法を以下に示す。

表-1 炭素繊維補強材の材料定数

CFRP	弾性率 E_f (kN/mm ²)	設計厚 t_f (mm)
高弾性300目付CFRPシート	699.0	0.143
高弾性900目付CFRPストランドシート	715.4	0.429

表-2 樹脂材料の材料定数

樹脂	弾性率 E_e (N/mm ²)	ポアソン比 ν_e	備考
FP-UL1	-※	-※	ウレタンプライマー
FU-Z	66.0	0.49	ポリウレアパテ
FP-E9S	3227	0.4	エポキシパテ接着樹脂

※溶剤系のため測定不可

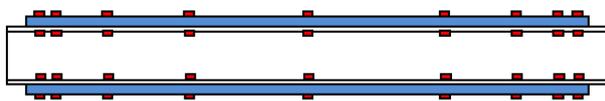


図-1 長さ影響検討用試験体

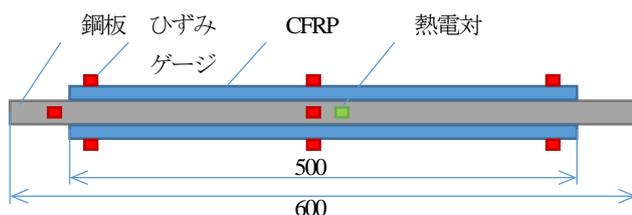


図-2 部材耐力検討用試験体

(1) 接着長さが熱応力に及ぼす影響(実験A)

図-1に試験体の概要図を示す。用いた鋼材は、H100×50×5×7で長さは1m, 3m, 5mの3種類を使用した。それぞれ上下フランジの外面に、表-1に示す高弾性CFRPシートを3層接着し、常温にて1週間養生した。試験体一覧を表-3に示す。

図-1に示すように上下フランジのCFRP面および鋼材面にひずみゲージを貼付し、常温にて初期値を測定した。その後、電気カーペット・ブルーシートで試験体を覆い、 $\Delta T=45^\circ\text{C}$ まで昇温し、試験体に設置した熱電対およびひずみゲージの値が安定した後、昇温後のひずみを計測した。また、ひずみゲージは鉄用を用いたため、CFRP上のひずみ計測には、CFRP単体に設置したダミーゲージを用いて補正を行った。ひずみゲージは、各試験体のCFRP端部から、12.5mm, 25mm, 100mm, 200mm, 試験体中央のCFRP部、鋼材部に貼付した。

(2) 部材耐力に及ぼす熱応力影響(実験B)

図-2に試験体の概要図を示す。用いた鋼材は、600L×20B×9tで、両面にCFRPストランドシートを1層貼り付けた。また、試験体一覧を表-4に示す通り、比較のポリウレアパテのない場合の試験体も同様に作製した。CFRPストランドシートの定着長(接着半長さ)は文献3)に従い250mmとした。

引張試験にて耐力評価を行うため、CFRP施工後、樹脂の効果前に60°C加熱した恒温槽にて試験体を養生し、低温で試験した際に鋼材に引張の残留応力が発生するようにした。

60°Cにて3日間養生後、試験体にひずみゲージを貼付し、図-3に示すようなチャンバー付きの引張試験機に試験体を設置した。その後60°Cまで昇温し試験体に設置した熱電対およびひずみゲージの値が安定した後、ひずみゲージの初期値を測定した。その後、チャンバー内の温度を0°Cまで降温し、試験体の $\Delta T=-60^\circ\text{C}$ の温度差を導入し、0°Cに保った状態で引張試験を実施し、荷重とひずみの計測を行った。

表-3 試験体一覧(実験A)

ID	試験体長さ	温度変化 (°C)
A-S	1m	+45
A-M	3m	+45
A-L	5m	+45

表-4 試験体一覧(実験B)

ID	積層数 (層)	ポリウレア の有無	施工と試験温度差 (°C)
B-P1	1	○	-60, -70
B-N1	1	-	-60



図-3 引張試験のチャンバー内の様子

4. 熱応力の理論値

両面に CFRP が接着された鋼材が、外力と温度変化を受ける場合の任意の位置 x に発生する応力の理論値は式(1)にて表される^{7,8)}。実験 A では外力はないため、 $\sigma_{sn}=0$ として任意の位置での熱応力を算出する。

実験 B では CFRP 中央のひずみに着目するため、 $x=0$ として熱応力を求め、弾性係数で除して鋼材に発生する外力と線膨張係数差によるひずみを算出する。

$$\sigma = \left\{ \xi_0 + (1 - \xi_0) \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} \right\} \sigma_{sn} - (1 - \xi_0) \left(\frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} \right) E_s (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T \quad (1)$$

ここに、

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + (2E_f A_f) / (E_s A_s)}$$

$$c = \sqrt{\frac{b_f G_e}{h} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{E_s A_s}}$$

$$G_e = \frac{E_e}{2(1 + \nu_e)}$$

- l : 接着半長さ
 x : CFRP 中央からの距離 ($x < l$)

- σ_{sn} : 鋼材に作用する外力
 ΔT : 施工温度と試験温度の温度差
 α_s, α_f : 鋼と CFRP の線膨張係数
 E_s, A_s : 鋼板の弾性係数と断面積
 E_f, A_f : CFRP の弾性係数と断面積
 b_f : CFRP の幅
 G_e, h_e : 接着樹脂のせん断弾性係数と厚さ
 E_e, ν_e : 接着樹脂の弾性係数とポアソン比

5. 結果と考察

接着長さが熱応力に及ぼす影響の検討 (実験 A) および、部材耐力に及ぼす熱応力の影響についての検討 (実験 B) の試験結果および考察を以下に示す。

(1) 接着長さが熱応力に及ぼす影響 (実験 A)

図-4 に各試験体のひずみゲージの値から計算された鋼材に発生する熱応力と CFRP 端部からの距離の関係を示す。また、同図に式(1)から算出された熱応力の理論値および理論収束値も示す。

同図より、端部の応力分布は試験体の長さによらず同じであり、その値は理論値とほぼ一致していることがわかる。従って接着長がある程度長ければ (合成断面に必要な接着長以上であれば)、長さによらず、CFRP に発生する熱応力は変わらず、端部の応力分布にも相違はない。

(2) 部材耐力に及ぼす熱応力影響 (実験 B)

図-5 に各試験体の 0°C での引張試験から得られた応力とひずみの関係を示す。実験値のひずみは、鋼材の無補強部と中央の補強部を、計算値は式(1)から算出された無補強部と補強部の応力とひずみの関係を示す。同図において、補強部のひずみの初期値が+側へシフトしてい

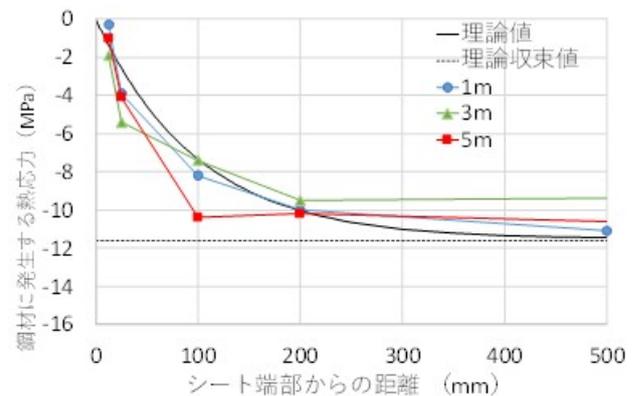
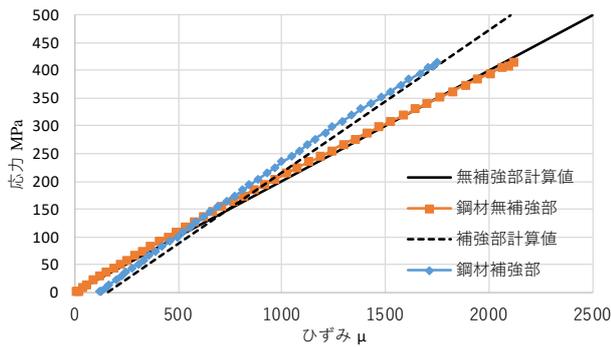


図-4 鋼材の熱応力分布 ($\Delta T=43^\circ\text{C}$)

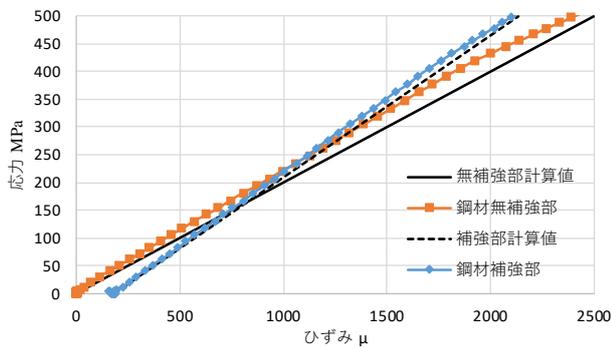
るのは、施工時と試験時の温度差による残留熱ひずみによるものである。その値は、実験値と計算値で概ね一致している。

P1 試験体では、はく離発生の懸念が少ないことから、 $\Delta T = -60^{\circ}\text{C}$ の試験は400MPa程度までとし、より熱応力の影響が顕著になる $\Delta T = -70^{\circ}\text{C}$ にて再度引張試験を実施した。その結果、実験値と計算値はよく一致しており、鋼材応力 500MPa まで CFRP のはく離は発生しなかった。

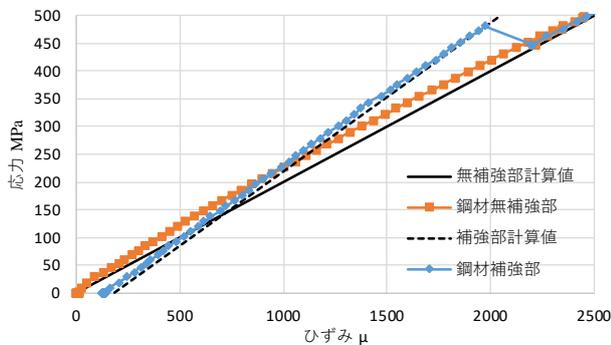
N1 試験体では実験値と計算値はよく一致しているが、鋼材応力 480MPa にて CFRP のはく離が生じた。同じ補



(A) P1 $\Delta T = -60^{\circ}\text{C}$



(B) P1 $\Delta T = -70^{\circ}\text{C}$



(C) N1 $\Delta T = -60^{\circ}\text{C}$

図-5 引張試験結果 応力とひずみの関係

強仕様でも外力だけでははく離しないと考えられるが、温度差による残留ひずみにより、通常よりもはく離が早く生じたと考えられる。

6. まとめ

形鋼の上下フランジに CFRP の接着長を変えて貼り付けて温度変化を与え、発生する熱応力を測定し、接着長さの影響を検討した実験 A を行った。また、熱応力が外力と同方向に発生するように施工・養生した試験体を用いて、温度差を与えた状態で引張試験を実施し、部材耐力に及ぼす熱応力の影響を検討した実験 B を実施した。その結果以下の知見を得た。

- ・実験 A において、端部の応力分布は試験体の長さによらず同じであり、その値は理論値とほぼ一致していることがわかる。従って接着長がある程度長ければ（合成断面に必要な接着長以上であれば）、長さによらず、CFRP に発生する熱応力は変わらず、端部の応力分布にも差異は少ない。

- ・実験 B において、温度変化による残留ひずみは発生するものの、その値は計算値と一致する。ポリウレアパテがある場合は鋼材応力 500MPa でもはく離は発生しないことが分かった。一方、ポリウレアパテがない場合は 480MPa で CFRP のはく離が発生したことから、ポリウレアパテの有効性が確認された。

今後は、中央に欠損があり、欠損部が健全部より先に降伏するような試験体を用いて降伏後の補強効果、はく離の有無についての検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 杉浦江, 大垣賀津雄, 長井正嗣, 小林朗: 炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究: 第 6 回復合構造の活用に関するシンポジウム, pp.48-1-48-6, 2005.
- 2) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F4, Vol. 71, No. 1, pp. 44-63, 2015.
- 3) (株) 高速道路総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル, 2013.
- 4) 神菌卓海, 岡本陽介, 並木宏徳, 鈴木博之: CFRP 補強された引張り鋼部材の温度変化の影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol.65, pp.861-862, 2010.
- 5) 並木宏徳, 松本健太郎, 山口善彰, 鳥山正吾, 鈴木博之: 鋼桁の CFRP 補強において温度応力が過積載

- 荷重に重畳した時の疲労寿命, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol.68, pp.CS3-29, 2013.
- 6) 糸瀬潤平, 津田久嗣, 原田雅也, 久部修弘, 吉武勇: 線膨張係数の異なる鋼材と CFRP 板の低温下における接着特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol.68, pp.CS3-30, 2013.
- 7) 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: アルミニウム合金板接着による CFRP 板接着鋼板に生じる熱応力の低減, 土木学会論文集 A1, Vol. 67, pp.336-350, 2011.
- 8) 石川敏之, 河野広隆, 長尾隆史, 小林朗: 炭素繊維
- 接着によって鋼板に生じる熱応力の低減工法に関する研究, 構造工学論文集 61A, pp.808-815, 2015.
- 9) 土木学会: FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案), 土木学会 複合構造シリーズ 09, 2018.

(Received August 30, 2019)

THERMAL STRESS OF CFRP BONDED STEEL MEMBER

Yuya HIDEKUMA, Takuya HARADA, Kazuo OHGAKI, Tateshi MIYASHITA and Yusuke OKUYAMA

In recent years, a method of repairing and strengthening carbon fiber sheets (CFRP) on steel structures has been applied. However, since the thermal expansion coefficient of CFRP is smaller than that of steel, it is known that thermal stress is generated when the temperature of the steel structure bonded with CFRP is changed. Some studies on thermal stress have been conducted, but the effect of bond length has not been studied.

In this study, the effect of bond length on the generated thermal stress was examined with CFRP bonded to the upper and lower flanges of the steel while changing the bonding length of the CFRP. As a result, it was clarified that the thermal stress generated in the steel member does not depend on the length. In addition, a tensile test was performed on a steel plate strengthened with CFRP, and the effect of thermal stress on the proof stress was also examined.