

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工法の開発

石川 敏之¹ 服部篤史²・河野広隆³・長尾隆史⁴・小林 朗⁵

- ¹正会員 京都大学助教, 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)
²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)
³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)
⁴正会員 日本軽金属(株), グループ技術センター (〒421-3291 静岡県静岡市清水区蒲原 1-34-1)
⁵正会員 新日鉄マテリアルズ(株), 日鉄コンポジット社 社会資本材料事業部
(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

要旨

CFRP 板が接着された鋼板では, CFRP 板の線膨張係数がほぼ $0 \mu / ^\circ\text{C}$ であるため, 温度変化を受けると, 鋼板に熱応力が生じる. 本研究では, CFRP 板接着鋼板に生じる熱応力を低減させるために, 線膨張係数が鋼の約 2 倍のアルミニウム合金板を CFRP 板と共に鋼板に接着する方法を提案した. そして, 鋼板の上下面に CFRP 板とアルミニウム合金板が接着された試験体を製作し, 温度変化試験を行い, 開発工法による鋼板の熱応力の低減効果を明らかにした. さらに, 数値解析を行い, 本工法の有効性を明らかにした.

キーワード: 熱応力, アルミニウム合金板, CFRP 板, 接着

1. はじめに

鋼部材の補修・補強工法として, 炭素繊維強化樹脂成形板(以下, CFRP板と呼ぶ)を接着する方法が国内外で行われ始めている^{1)~4)}. CFRP板接着の利点としては, 材料が軽量であるので施工時のハンドリングが容易であること, 接着するだけで補修・補強できるので, 鋼部材にボルト孔を設けるなど特別な加工が必要ないことが挙げられる. しかし, CFRP板の線膨張係数がほぼ $0 \mu / ^\circ\text{C}$ であるため, 温度変化を受けるとCFRP板が接着された鋼部材には内部応力(以下, 熱応力と呼ぶ)が生じる^{5), 6)}. これまでに, CFRP板接着による鋼構造物の補修・補強において, 熱応力を考慮する設計法は提案^{7), 8)}されているが, 鋼部材に生じる熱応力自体を下げる研究は行われていない.

本研究では, CFRP板が上下面に対称に接着された鋼板を対象に, 温度変化によって鋼板に生じる熱応力を低減させる方法として, 線膨張係数が鋼の約2倍のアルミニウム合金板(以下AL板と呼ぶ)をCFRP板と共に鋼板に接着する方法を提案する. そして, 鋼板の上下面にCFRP板とAL板が接着された試験体に温度変化を与えて, 開発した工法による鋼板の熱応力の低減効果を明らかにする. さらに, 数値解析を行い, 本工法の有効性を明らかにする.

2. AL板の必要伸び剛性の設計

一般に、炭素繊維の繊維含有率を変化させることにより、CFRP板の線膨張係数を設定することができる。しかし、マトリクス樹脂のヤング率が炭素繊維と比べて非常に小さいので、CFRP板の線膨張係数を鋼と同程度にすると、繊維含有率が小さくなり、力学的性質が乏しくなる。そこで、鋼板に生じる熱応力を低減させる方法として、CFRP板に加え、ヤング率70GPa、線膨張係数 $23 \mu / ^\circ\text{C}$ のAL板を鋼板に接着する工法を提案する。つまり、CFRP板とAL板が接着され一体となった合成板の線膨張係数を、鋼板の線膨張係数に近づけることによって、CFRP板とAL板が接着された鋼板に生じる熱応力を小さくする。

CFRP板とAL板が接着され、一体となった合成板の線膨張係数 α_v は、各CFRP板と各AL板の熱伸縮による内力のつり合いから次式で与えられる。

$$\alpha_v = \frac{\alpha_f E_f A_f + \alpha_a E_a A_a}{E_f A_f + E_a A_a} \quad (1)$$

ここに、

E_f , E_a : それぞれ、CFRP板とAL板のヤング率、

A_f , A_a : それぞれ、CFRP板とAL板の断面積、

α_f , α_a : それぞれ、CFRP板とAL板の線膨張係数($\mu / ^\circ\text{C}$)。

式(1)の α_v を鋼の線膨張係数 α_s に置換し、CFRP板に対するAL板の伸び剛性比 $E_a A_a / (E_f A_f)$ に対して解いて次式を得る。

$$\frac{E_a A_a}{E_f A_f} = \frac{\alpha_s - \alpha_f}{\alpha_a - \alpha_s} \quad (2)$$

この式に、鋼、CFRP板およびアルミニウム合金の線膨張係数を代入して、CFRP板とAL板の合成板の線膨張係数を、鋼板のそれと等しくするCFRP板の伸び剛性に対するAL板の伸び剛性が設計できる。

3. 試験条件

(1) 試験体

図-1に示す、厚さ4.5mm、幅25mmの鋼板の上下面に、ヤング率140GPa、厚さ1mm、幅25mmのCFRP板2枚をそれぞれ接着した場合(従来工法)を対象として、開発工法による熱応力の低減効果を明らかにする。鋼板の補修・補強効果を一定にするために、CFRP板とAL板の和の伸び剛性を、図-1のCFRP板の伸び剛性と同一になるように設計する。

接着するAL板の伸び剛性を設計するために、鋼板の線膨張係数 α_s 、CFRP板の線膨張係数 α_f およびAL板の線膨張係数 α_a をそれぞれ、 $\alpha_s = 12 \mu / ^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_f = 1 \mu / ^\circ\text{C}$ および $\alpha_a = 23 \mu / ^\circ\text{C}$ として与えた。それらの値を式(2)に代入して、 $E_a A_a / (E_f A_f) = 1$ を得る。したがって、AL板の伸び剛性をCFRP板のそれと等しくすることにより、CFRP板とAL板の合成板の線膨張係数を、鋼板のそれと等しくすることができる。すなわち、図-1に対して、鋼板の片面に接着された2枚のCFRP板のうち、1枚のCFRP板を、それと同じ伸び剛性のAL板に置換する。AL板のヤング率が70GPa(CFRP板の1/2倍)であるので、熱応力を低減させるAL板の断面はCFRP板の2倍になる。このように設計した、CFRP板とAL板が接着された鋼板を図-2~4に示す。図-4の試験体ACAには、各1mmのAL板の間にCFRP板が接着された3層の積層板としている。図-2~4の試験体に加え、図-1で示したCFRP板が2枚接着された試験体CCおよび、鋼板の両面に2mmのAL板が各2枚接着された試験体AAの温度変化試験も行った。

CFRP板接着による補修・補強では、接着剤を介して鋼板とCFRP板あるいはAL板の相互の力が伝達される。したがって、鋼板、CFRP板およびAL板間の力の伝達が十分になされるように接着長さを設計する必要

があるが、本研究では、試験に用いた乾燥炉の大きさからCFRP板およびAL板の長さを100mm(鋼板の長さ160mm)とした。後に示す、計測した試験体の寸法および材料定数を、文献9)で提案されている複数枚のCFRP板が接着された場合に対するCFRP板の必要接着長さの算定式に代入して、CFRP板あるいはAL板の必要接着長さを算出すると、試験体CC, AA, CA, ACおよびACAに対してそれぞれ、72, 68, 71, 69および76mmであった。

鋼板、CFRP板およびAL板の各接着面を、#100のサンドペーパーで研磨し、油脂を拭き取ってから接着した。鋼板の片面にCFRP板およびAL板を接着し室温20°Cの恒温状態で1日養生した後、もう片面に同様にCFRP板とAL板を接着し、室温20°Cの恒温状態で1週間以上養生した。

計測した試験体の各寸法を表-1に示す。各材料の厚さは表-2の材料定数に示している。接着剤の厚さは、ノギスで計測した試験体の全厚さから、鋼板および接着したCFRP板とAL板の各厚さを引いて、接着剤層の数で除した平均厚さが示されている。

図-5に、試験体に貼付けたひずみゲージの位置を示している。鋼板の両側面と、最外に接着されたCFRP板あるいはAL板の両表面に普通鋼用(線膨張係数 $11.7 \mu / ^\circ\text{C}$)のひずみゲージを貼付けている。

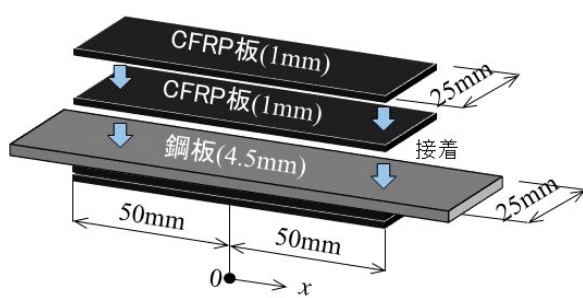


図-1 対象とするCFRP板接着鋼板(試験体CC)

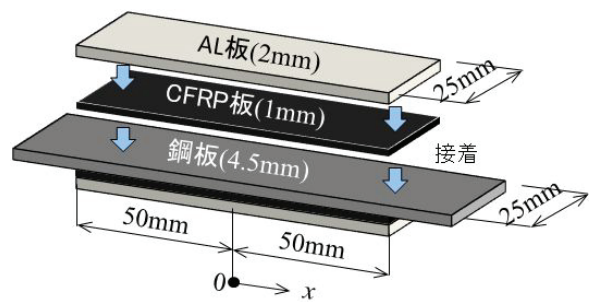


図-2 試験体CA

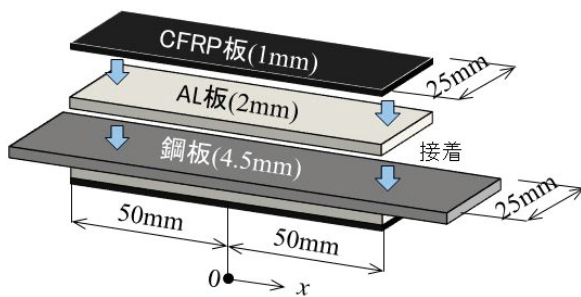


図-3 試験体AC

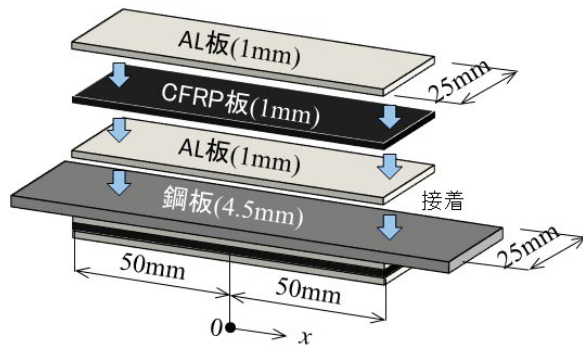


図-4 試験体ACA

表-1 計測した試験体の寸法と α_v の値および試験時の温度

試験体	鋼板の幅 b_s [mm]	CFRP板の 幅 b_f [mm]	AL板の幅 b_a [mm]	α_v [$\mu / ^\circ\text{C}$]	接着剤の 平均厚さ [mm]	温度上昇時 T_1, T_2 [$^\circ\text{C}$]	温度下降時 T_1, T_2 [$^\circ\text{C}$]
CC	25.2	23.1	—	0.8	0.16	20.0, 38.5	38.5, 20.0
AA	25.6	—	25.1	21.4	0.13	20.0, 38.5	38.5, 20.0
CA	25.4	25.3	25.1	11.0	0.14	20.0, 38.5	38.5, 20.0
AC	25.5	24.0	23.7	11.1	0.14	20.0, 38.5	38.5, 20.0
ACA	25.4	25.1	25.0	11.0	0.13	21.2, 37.1	37.1, 20.9

表-2 材料定数

(a) 鋼材		(b) CFRP 板	
鋼種	SS400	板厚 t_f	1.0
板厚 t_s	4.2	線膨張係数 α_f [$\mu / ^\circ\text{C}$]	0.8
線膨張係数 α_s [$\mu / ^\circ\text{C}$]	11.3	ヤング率 E_f [GPa]	141
ヤング率 E_s [GPa]	205	引張強さ [MPa]	2801
降伏応力 σ_Y [MPa]	上降伏点		
	下降伏点		
引張強さ [MPa]	444		
ポアソン比	0.29		
伸び率 [%]	41.9		

(c) 接着剤		(d) アルミニウム合金板	
ガラス転移温度 T_g [$^\circ\text{C}$]	74.0*	アルミニウム合金	A5052 A5052
可使時間 [分]	37*	板厚 t_a	1.0 2.0
引張せん断強度 [MPa]	23.8*	線膨張係数 α_a [$\mu / ^\circ\text{C}$]	21.4 21.4
圧縮弾性係数 [GP]	2.61*, 1.60	ヤング率 E_a [GPa]	70.0 69.7
ポアソン比	0.35	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	227 190
		引張強さ [MPa]	283 252
		ポアソン比	0.33 0.33
		伸び率 [%]	8.3 10.7

* : 材料試験成績書の値

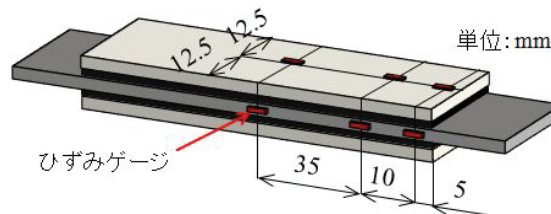


図-5 ひずみの計測位置

(2) 試験体に用いた材料の特性

試験体に用いた鋼板、CFRP 板、AL 板および接着剤の材料定数を表-2 に示す。鋼板、CFRP 板および AL 板は引張試験および、温度変化を与えた試験から得られた値を示している。接着剤の材料定数は、材料試験成績書の値に加え、試験体で用いた接着剤で作成した立方体(一辺 14mm)の供試体の圧縮試験(20 $^\circ\text{C}$)から得られた圧縮弾性係数とポアソン比も示している。

表-2 に示す鋼板、CFRP 板および AL 板の線膨張係数は、次節で説明する温度変化試験において、単体の鋼板、CFRP 板および AL 板に生じたひずみから次式を利用して算出した。

$$\alpha = \frac{\{\varepsilon_m(T_2) + 11.7T_2 + \varepsilon_g(T_2)\} - \{\varepsilon_m(T_1) + 11.7T_1 + \varepsilon_g(T_1)\}}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

ここに、

$$\varepsilon_g(T) = -26 + 2.2T - 0.47 \times 10^{-1} T^2 + 0.12 \times 10^{-3} T^3 + 0.72 \times 10^{-6} T^4 \quad (4)$$

α : 鋼板, CFRP板あるいはAL板の線膨張係数[$\mu/^\circ\text{C}$],
 $\varepsilon_m(T)$: 温度 T [$^\circ\text{C}$]のときの鋼板, CFRP板あるいはAL板に接着したひずみゲージから計測されたひずみ[μ],
 T_1, T_2 : それぞれ, 試験開始時と終了時の温度[$^\circ\text{C}$].
 $\varepsilon_g(T)$ [μ]は, 自己温度補償ひずみゲージの見掛けひずみの近似式であり, 製造ロットによって係数が異なる.

表-2から, 試験体に用いた鋼板, CFRP板およびAL板の各ヤング率と各線膨張係数は, それぞれ設計で仮定した各材料の値と同程度であることがわかる. 表-1, 2の計測寸法と材料定数を式(1)へ代入し算出されたCFRP板とAL板からなる合成板の線膨張係数 α_v を表-1に示す. 試験体CA, ACおよびACAに対して, 合成板の線膨張係数 α_v は, 鋼の線膨張係数 α_s に近い値になっていることがわかる.

(3) 試験方法

本研究では, 乾燥炉を用いて, 温度変化試験を行った. 20°C に設定された恒温室に乾燥炉を設置し, 炉内に試験体を鉛直に吊るし, 扉を開けた状態で2時間程度放置した. その後, ひずみを計測し, 乾燥炉の扉を閉め, 炉内の設定温度を 40°C まで上昇させて, 各ひずみの変動がなくなるまで温度を保持した後, ひずみを計測して温度上昇に対する試験とした. さらに, その状態から乾燥炉の扉を開けて, 温度を 20°C まで低下させ, 同様に各ひずみの変動がなくなった後, ひずみを計測して温度下降に対する試験とした. 単体の鋼板, CFRP板およびAL板も同様に温度変化を与えてひずみを計測した. 試験体の温度は熱伝対を用いて計測した. 実際に計測された試験開始時と終了時の温度 T_1, T_2 を表-1に示している.

4. 試験結果

計測された鋼板に生じるひずみ ε_{sm} と単体の鋼板に生じるひずみ ε_{sn} および鋼のヤング率 E_s を用いて, 次式から鋼板に生じる熱応力 σ_s を算出した.

$$\sigma_s = E_s (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sn}) \quad (5)$$

同様に, 試験体のCFRP板あるいはAL板に生じるひずみおよび単体のCFRP板あるいはAL板に生じるひずみを用いて, 最外のCFRP板あるいはAL板の熱応力 σ_f, σ_a を算出した. 温度上昇時および下降時の各試験体に生じる熱応力を図-6~10にそれぞれ示す. 鋼板に生じる熱応力は, 鋼板の両側面の平均値を示し, CFRP板およびAL板に生じる熱応力は, 上下面の平均値を示している. 図の横軸は, CFRP板とAL板の接着長さの中央からの距離 x (図-1~4参照)を示している. 図-6~10には, 後の第5章で説明する数値解析の結果も実線と破線で示されている.

図-6~10からわかるように, 温度上昇時と降下時に生じる熱応力は, 符号が異なるのみで絶対値はほぼ等しい.

図-6, 7から, 温度上昇時, CFRP板のみが接着された試験体CCとAL板のみが接着された試験体AAでは, 鋼板に, 圧縮および引張の熱応力がそれぞれ生じていることがわかる. CFRP板あるいはAL板の端部では, 鋼板に生じる熱応力の値は小さく, $x=0$ の位置で, 大きな引張あるいは圧縮の熱応力が生じている. $x=0$ の位置の鋼板およびCFRP板に生じる熱応力は, 部材内力のつり合いから導出される次式に, 表-1, 2の計測寸法と材料定数を代入して算出された値 σ_{sT}, σ_{fT} (図中の $x=0$ の位置の■)とほぼ一致している.

$$\sigma_{sT} = -(1-\xi_0)E_s(\alpha_s - \alpha_f)(T_2 - T_1) \quad (6)$$

$$\sigma_{fT} = -\frac{A_s}{2A_f}\sigma_{sT} \quad (7)$$

ここに,

$$\xi_0 = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + 2E_f A_f} \quad (8)$$

式(6)~(8)の CFRP 板の断面 A_f と材料定数 E_f , α_f をそれぞれ AL 板の A_a , E_a および α_a に置換することにより, 試験体 AA の鋼板と AL 板に生じる熱応力の収束値 σ_{sT} , σ_{aT} がそれぞれ計算できる.

図-8~10 から, 試験体 CA, AC および ACA では, $x=0$ の位置の鋼板に生じる熱応力がほぼ 0 になっていることがわかる. 試験体 CA, AC では, 補強板の端部近傍の鋼板に若干熱応力が生じているが, 試験体 ACA では, 接着端部近傍においても鋼板に生じる熱応力が低減されていることがわかる. したがって, 式(2)で算出される CFRP 板の伸び剛性に対する AL 板の伸び剛性の比を満足するように, CFRP 板および AL 板を接着することにより, 鋼板に生じる熱応力を大幅に低減できる.

一方, 図-8~10 から, 試験体 CA, AC および ACA の最外の CFRP 板あるいは AL 板に生じる熱応力は, 試験体 CC(図-6)あるいは試験体 AA(図-7)に生じる熱応力 σ_f , σ_a よりも大きくなっている. これは, 鋼板と CFRP 板あるいは鋼板と AL 板の線膨張係数の差より, CFRP 板と AL 板の線膨張係数の差が大きいためである.

試験体 CA, AC および ACA の $x=0$ の位置の鋼板, CFRP 板および AL 板に生じる熱応力は, 鋼板, CFRP 板および AL 板の内力のつり合いから導出される次式に, 表-1, 2 の計測寸法と材料定数を代入して算出された値 σ_{sT} , σ_{fT} および σ_{aT} (図中の $x=0$ の位置の■)とほぼ一致している.

$$\sigma_{sT} = -E_s \left\{ (1-\xi)(\alpha_s - \alpha_f) + \frac{J}{1+J}(\alpha_f - \alpha_a) \right\} (T_2 - T_1) \quad (9)$$

$$\sigma_{fT} = E_f \left\{ \xi(\alpha_s - \alpha_f) - \frac{J}{1+J}(\alpha_f - \alpha_a) \right\} (T_2 - T_1) \quad (10)$$

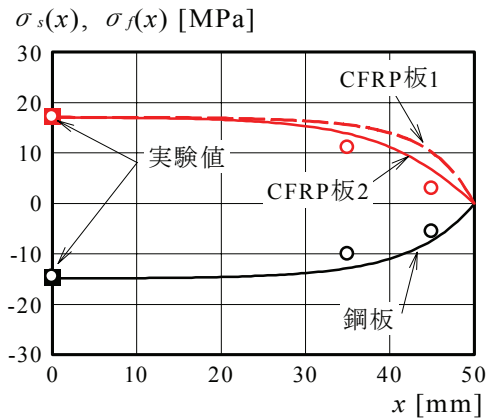
$$\sigma_{aT} = E_a \left\{ \xi(\alpha_s - \alpha_f) + \frac{1}{1+J}(\alpha_f - \alpha_a) \right\} (T_2 - T_1) \quad (11)$$

ここに,

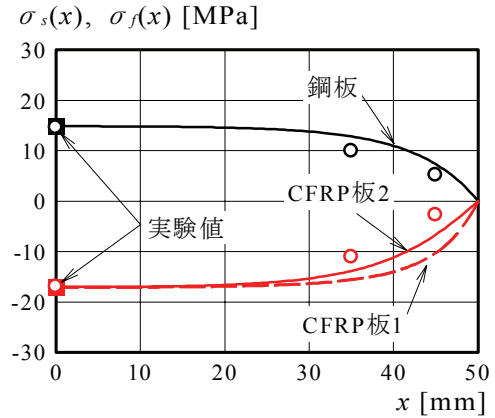
$$\xi = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + 2(E_f A_f + E_a A_a)} \quad (12)$$

$$J = \frac{2E_a A_a}{E_s A_s + 2E_f A_f} \quad (13)$$

試験体 ACA に対して, AL 板の断面積 A_a は, 2 枚の AL 板の断面積の和を与えた.

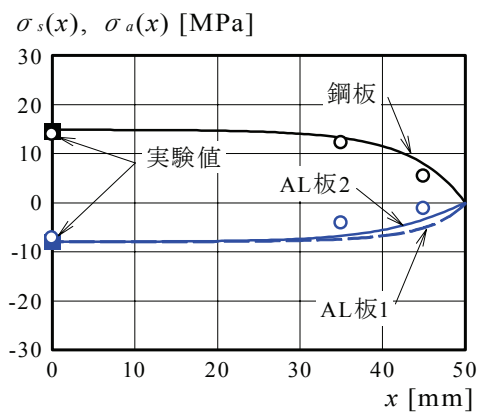


(a) 温度上昇

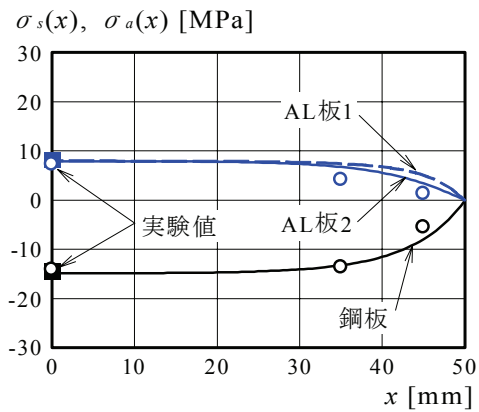


(b) 温度下降

図-6 試験体CC

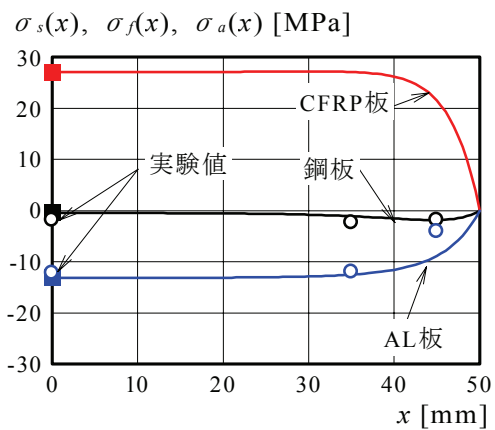


(a) 温度上昇

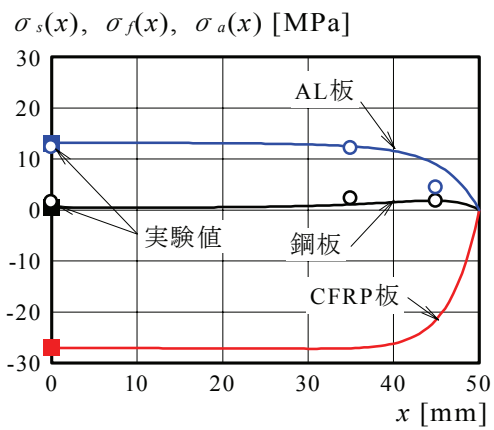


(b) 温度下降

図-7 試験体AA

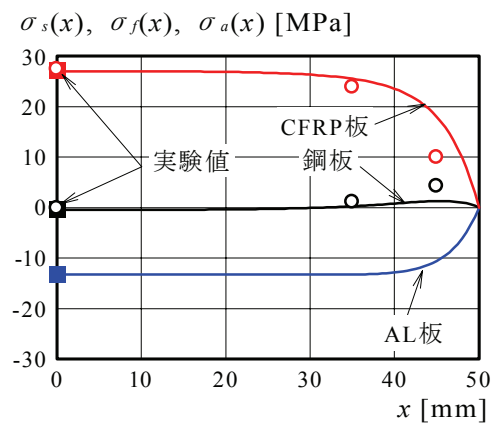


(a) 温度上昇

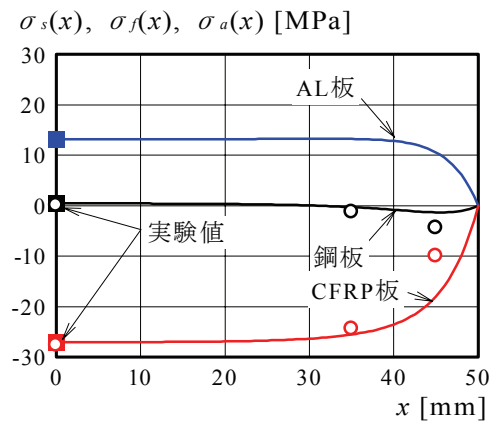


(b) 温度下降

図-8 試験体CA



(a) 温度上昇



(b) 温度下降

図-9 試験体AC

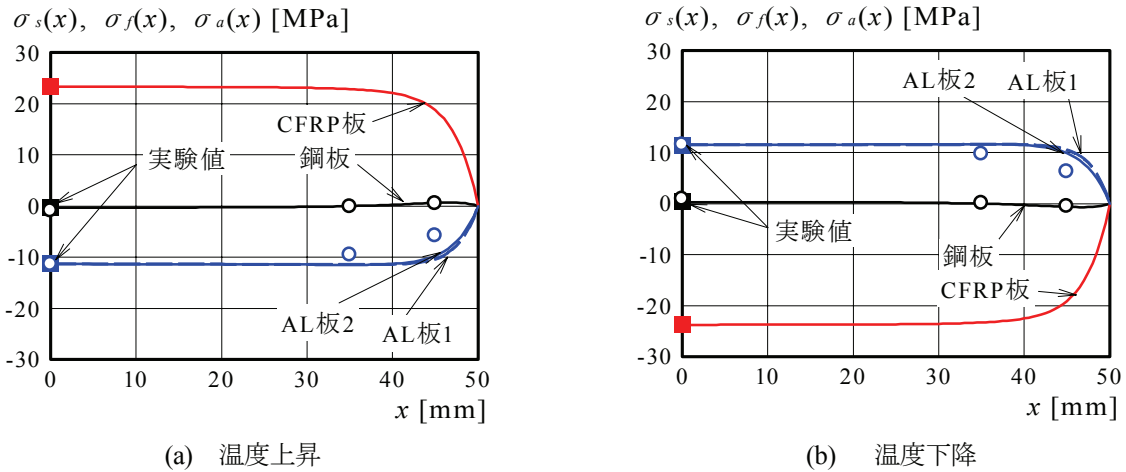


図-10 試験体ACA

5. 数値解析¹⁰⁾

本章では、 N 枚のCFRP板とAL板が鋼板の上下面に接着された場合に対して、数値解析によって鋼板、CFRP板およびAL板に生じる熱応力を算出する。図-11に示すように、鋼板に近い側から、補強板1、2と番号付をして数値解析を行う。

(1) 解析方法

鋼板に生じる応力 $\sigma_s(x)$ とひずみ $\varepsilon_s(x)$ の関係および補強板 i に生じる応力 $\sigma_i(x)$ とひずみ $\varepsilon_i(x)$ の関係をそれぞれ次式で与える。

$$\varepsilon_s(x) = \frac{du_s(x)}{dx} = \frac{\sigma_s(x)}{E_s} + \varepsilon_{Ts} \quad (14)$$

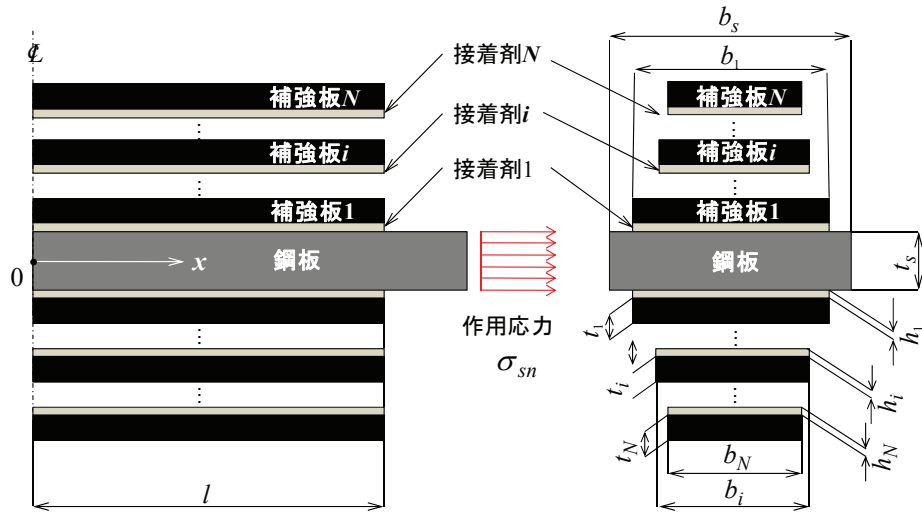
$$\varepsilon_i(x) = \frac{du_i(x)}{dx} = \frac{\sigma_i(x)}{E_i} + \varepsilon_{Ti} \quad (15)$$

ここに、

$$\varepsilon_{Ts} = \alpha_s \Delta T \quad (16)$$

$$\varepsilon_{Ti} = \alpha_i \Delta T \quad (17)$$

- E_i : 補強板 i のヤング率,
- α_i : 補強板 i の線膨張係数,
- i : 1から N (積層数)までの整数.



(a) 縦断面図 (b) 横断面図
 図-11 複数の補強板が接着された鋼板の側面と断面

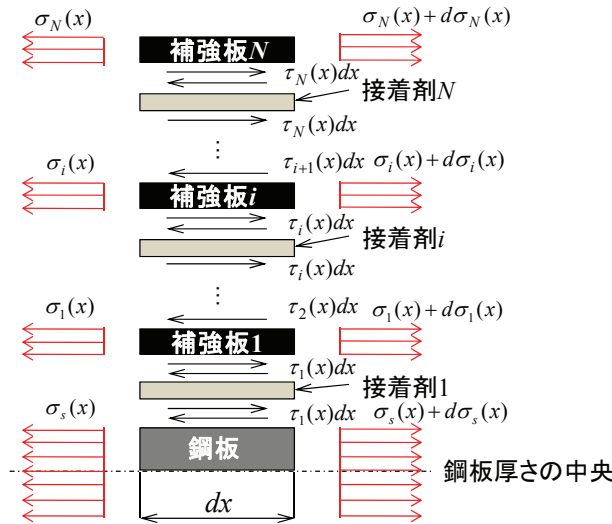


図-12 複数の補強板が接着された鋼板の微小区間の水平方向の力のつり合い

接着剤 i に生じるせん断応力 $\tau_i(x)$ とせん断ひずみ $\gamma_i(x)$ の関係を次式で与える.

$$\tau_i(x) = G_{ei} \gamma_i(x) = G_{ei} \frac{u_{i-1}(x) - u_i(x)}{h_i} \quad (18)$$

ここに,

$u_i(x)$: 補強板 i の水平変位(ただし $u_0(x) = u_s(x)$),

G_{ei} : 接着剤 i のせん断弾性係数,

h_i : 接着剤 i の厚さ.

式(14), (15)および(18)を行列・ベクトル形式で表すと次式になる.

$$\boldsymbol{\sigma}(x) = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon}(x) - \boldsymbol{\varepsilon}_T) \quad (19)$$

ここに,

式(24)の一般解は、次式で与えられる^{11)~13)}.

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x) = \mathbf{Y}(x)\mathbf{C} \quad (26)$$

ここに、

$$\mathbf{C}_{(2N+1) \times 1} = \{C_1 \quad \dots \quad C_j \quad \dots \quad C_{2N+1}\}^T \quad (27)$$

$$\mathbf{Y}(x)_{(2N+1) \times (2N+1)} = \mathbf{T} \mathbf{e}^{\Lambda(x)} \mathbf{T}^{-1} \quad (28)$$

$$\mathbf{e}^{\Lambda(x)}_{(2N+1) \times (2N+1)} = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 x} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & e^{\lambda_j x} & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & e^{\lambda_{2N+1} x} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{T}_{(2N+1) \times (2N+1)} = [\mathbf{v}_1 \quad \dots \quad \mathbf{v}_j \quad \dots \quad \mathbf{v}_{2N+1}] \quad (30)$$

- λ_j : 行列 \mathbf{A} の j 番目の固有値,
- \mathbf{v}_j : j 番目の固有値に対する固有ベクトル,
- j : 1 から $2N+1$ までの整数.

未定係数ベクトル \mathbf{C} は、境界条件を与えて決定される. 図-11に示す複数の補強板が接着された鋼板に対して、補強板の端部において、鋼板に生じるひずみ $\varepsilon_s(x)$ が作用応力 σ_{sn} によって生じるひずみと等しく、各補強板に生じるひずみ $\varepsilon_i(x)$ が全て0になり、さらに補強板の付着中央($x=0$)で各接着剤に生じるせん断ひずみ $\gamma_i(x)$ が全て0になる境界条件を与えて、未定係数ベクトル \mathbf{C} が次式で算出される.

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}^{-1}(\boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\varepsilon}_T) \quad (31)$$

ここに、

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0_{(2N+1) \times 1} = \{\sigma_{sn}/E_s \quad 0 \quad \dots \quad 0\}^T \quad (32)$$

$\mathbf{B}_{(2N+1) \times (2N+1)}$: 1行目および $2i$ 行目は、それぞれ $\mathbf{Y}(l)$ の 1行目および $2i$ 行目の値、 $2i+1$ 行目は $\mathbf{Y}(0)$ の $2i+1$ 行目の値を有する行列、

σ_{sn} : 作用応力.

したがって、複数の補強板が接着された場合に対して、式(31)から算出される未定係数ベクトルを式(26)に代入し、式(19)から、鋼板、各補強板および各接着剤に生じる応力が数値解析によって計算できる.

他方、 \mathbf{B} の行列の中に非常に大きな成分 $e^{\lambda_l l}$ と非常に小さな成分 $e^{-\lambda_l l}$ が混在しているため、補強板の接着長さが長くなると、情報落ちによる数値計算の誤差が大きくなり、 \mathbf{B}^{-1} が精度良く計算できなくなる¹¹⁾. ただし、その際の補強板の接着長さは、鋼板、補強板および接着剤の材料定数によって異なる. そのような場合は、文献11)に示されているように、 x 軸の原点をずらして数値計算を行うか、補強板を長さ方向に幾つか分割し、分割位置において、鋼板、補強板および接着剤のひずみの連続性を考慮して未定係数を増やして数値計算することにより、情報落ちによる数値計算の誤差を小さくできる.

(2) 数値解析結果

a) 鋼板、CFRP板およびAL板に生じる応力

表-1、2 の試験体の寸法と材料定数を与えて、算出した数値解析結果を図-6~10 に実線と破線で示している. 解析値には、CFRP 板を形成する樹脂の影響、すなわち CFRP 板内の樹脂によるせん断遅れが考慮されていない. したがって、接着端部近傍で、解析値が実験値よりも若干大きくなっているが、両者は同

様な傾向を示していることがわかる。

図-8~10に示すように、解析によって、試験体CA、ACおよびACAの接着端部の鋼板に若干生じる熱応力も評価できていることがわかる。温度上昇時、試験体CAでは、接着端部の鋼板の熱応力は圧縮であるが、試験体ACでは引張が生じている。この理由は、鋼板から、補強板1に軸力が伝達され、次に補強板1から補強板2に軸力が伝達されるため、接着端部近傍の鋼板は、他の補強板と比べて補強板1の線膨張係数の影響を強く受けるためである。さらに、解析結果では、積層数が3層の試験体ACAの接着端部の鋼板に生じる熱応力が試験体CAおよびACよりも小さくなっており、実験結果と同じ傾向を示した。

CFRP板あるいはAL板に生じる応力は、 $x=0$ の位置では、解析値と実験値がほぼ一致しているが、試験体CA、ACおよびACAでは、接着端部近傍($x=45\text{ mm}$)において、両者の値に差が見られた。これは、本解析が軸力のみを取り扱った手法であるため、CFRP板あるいはAL板の上下面に生じるせん断応力の差に起因する曲げモーメントによる表面応力が考慮されていないことが原因であると考えられる。CFRP板あるいはAL板の接着端部近傍に生じる曲げモーメントによって接着剤に垂直応力が生じるので、CFRP板やAL板のはく離を評価する際には、それらに生じる曲げモーメントを明らかにする必要があると考えられる。

b) 接着剤に生じるせん断応力

数値解析で得られた、温度上昇時に対する各試験体の接着剤に生じるせん断応力の分布を図-13~17に示す。これらの図からわかるように、試験体CCおよびAAでは、各接着剤に生じるせん断応力の符号は等しく、鋼板に近い接着剤1に生じるせん断応力の絶対値が接着剤2のそれよりも大きくなる。一方、試験体CAおよびACでは、接着剤1と2に生じるせん断応力の符号が異なり、接着剤2に生じるせん断応力の絶対値が接着剤1のそれよりも大きい。さらに、試験体CAおよびACの接着剤2に生じるせん断応力の絶対値は、試験体CC、AAの接着剤1に生じるせん断応力の絶対値よりも大きくなっていく。試験体ACAでは、接着剤1と3に生じるせん断応力の符号が等しく、接着剤3に生じるせん断応力の絶対値が最大になる。さらに、試験体ACAの接着剤3に生じるせん断応力の絶対値は、試験体CC、AAの接着剤1に生じるせん断応力の絶対値よりも小さくなっていく。これらの現象は、鋼板とCFRP板、鋼板とAL板およびCFRP板とAL板の線膨張係数の差と各材料の伸び剛性に依存している。

先に述べたように、実験で計測された最外のCFRP板あるいはAL板の接着端部近傍の表面のひずみは、曲げモーメントによって生じるひずみを含んでいるので、それらの値を用いて接着剤に生じるせん断応力が算出できない。一方、鋼板では、上下面に同方向にせん断応力が生じるため、曲げモーメントが生じない。したがって、鋼板応力の計測値を利用して、接着剤1に生じるせん断応力を計算する。

接着剤1に生じるせん断応力と鋼板応力の間には、以下の関係がある¹⁴⁾。

$$\tau_1(x) = \frac{t_s}{2} \cdot \frac{d\sigma_s(x)}{dx} \quad (33)$$

ここに、

$\tau_1(x)$: 鋼板側から1層目の接着剤に生じるせん断応力。

この式を差分の形で表すと次式になる。

$$\tau_1 \left(\frac{L_{k+1} + L_k}{2} \right) = \frac{t_s}{2} \cdot \frac{\sigma_s(L_{k+1}) - \sigma_s(L_k)}{L_{k+1} - L_k} \quad (34)$$

ここに、

L_k : 補強板の接着中央から鋼板応力の計測位置 k までの距離、

k : 鋼板応力の計測位置の番号。

各試験体の鋼板の熱応力を利用して式(34)から算出される温度上昇時の接着剤1に生じるせん断応力 τ_1 を図-13~17にプロットしている。鋼板に生じるひずみの計測点数が少なく、それらの間隔が大きいため、精度の良い値は得られていないが、これらの図から、実験値から算出した接着剤1に生じるせん断応力は、解析値と同様な傾向を示していることがわかる。さらに、3層積層された試験体ACAの接着剤1に生じるせん断応力が最も低減されていることが実験値からも明らかである。

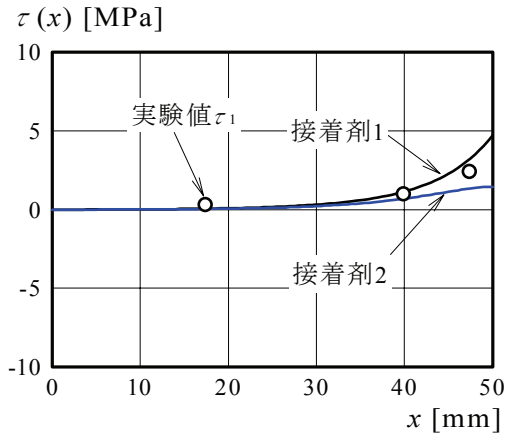


図-13 試験体CCの接着剤に生じるせん断応力

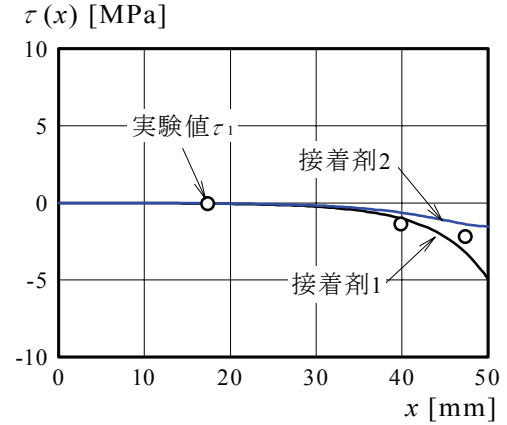


図-14 試験体AAの接着剤に生じるせん断応力

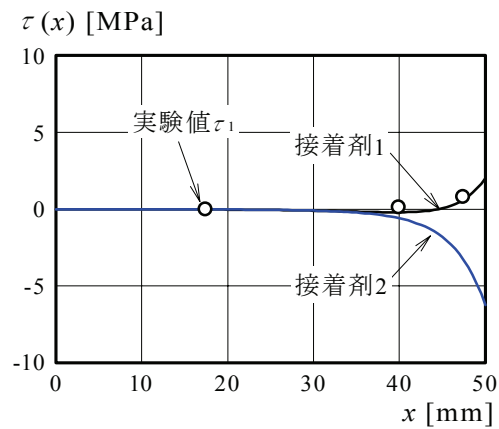


図-15 試験体CAの接着剤に生じるせん断応力

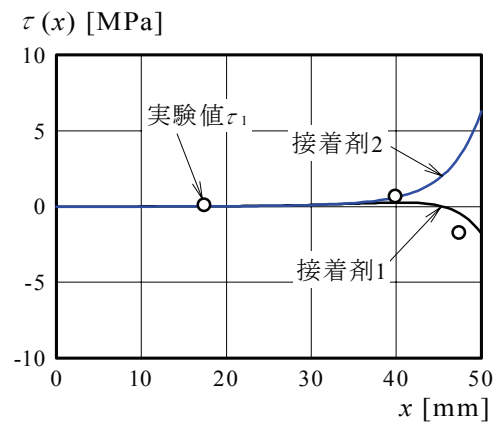


図-16 試験体ACの接着剤に生じるせん断応力

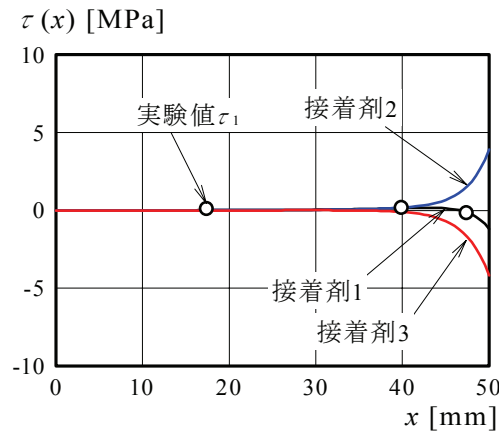


図-17 試験体ACAの接着剤に生じるせん断応力

6. まとめ

本研究では、CFRP板が上下面に対称に接着された鋼板を対象に、温度変化によって鋼板に生じる熱応力を低減させる方法として、線膨張係数が鋼の約2倍のアルミニウム合金板をCFRP板と共に鋼板に接着す

る方法を提案した。そして、鋼板に CFRP 板とアルミニウム合金板を接着した試験体の温度変化試験および数値解析を行い、開発した工法による鋼板の熱応力の低減効果を明らかにした。主な結論を以下に示す。

- 1) アルミニウム合金板を CFRP 板と共に接着して、鋼板に熱応力が発生しない CFRP 板を用いた補修・補強工法を開発した。CFRP 板の接着の中央で、鋼板に生じる熱応力を 0 にするのに必要なアルミニウム合金板の伸び剛性は式(2)から計算できる。
- 2) 式(2)を満足するように設計した CFRP 板とアルミニウム合金板が接着された鋼板の温度変化試験を行い、接着端部の鋼板に若干熱応力が生じるが、CFRP 板とアルミニウム合金板の接着の中央では鋼板の熱応力がほぼ 0 になることを示した。さらに補強板全体の伸び剛性が等しい条件において、補強板の積層数を増やすことによって接着端部の鋼板に生じる熱応力を小さくできる。接着端部に生じる鋼板の熱応力の符号は、鋼板に近い側の補強板の線膨張係数に依存する。
- 3) 開発した工法によって、鋼板直上の接着剤に生じるせん断応力の絶対値が、CFRP 板のみが接着されている場合よりも小さくなることを示した。さらに、補強板全体の伸び剛性が等しい条件において、補強板の積層数を増加させることによって鋼板直上の接着剤に生じるせん断応力の絶対値を小さくできる。

謝辞：本研究の試験では、京都大学工学部4回生の古谷貴洋君にご協力頂いた。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 板垣一也, 渡邊憲市, 鈴木博之: 炭素繊維強化樹脂板 (カーボン板) による鋼橋補強の事例, 第 8 回鋼構造の補修・補強技術報告論文集, pp.49-54, 2002.
- 3) 玉井宏章, 高松隆夫, 服部明生, 灰谷徳治, 櫻庭誠: 炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ばり補剛の施工例, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.545-552, 2005.
- 4) Moy, S. S. J. and Bloodworth, A. G.: Strengthening a steel bridge with CFRP composites, *Structures & Buildings*, Vol.160, Issue SB2, pp.81-93, 2007.
- 5) 石川敏之, 大倉一郎, 横田季彦, 齊藤 誠: 温度変化によって CFRP 板接着鋼板に生じるはく離せん断応力, 応用力学論文集, Vol.10, pp.963-970, 2007.
- 6) 山谷佑介, 姜 威, 中村一史, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 伊原啓裕: 温度変化時における鋼板と CFRP 板の接着特性に関する実験的検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集 I, I-466, pp.931,932, 2008.
- 7) Schnerch, D., Dawood, M., Rizkalla, S. and Sumner, E. : Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials, *Construction and Building Materials*, Vol.21, Issue 5, pp.1001-1010, 2007.
- 8) National Research Council - Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, CNR-DT 202/2005, 2007.
- 9) 大倉一郎, 長井和樹: 鋼板に接着された複数枚の CFRP 板の必要接着長さとはく離せん断応力, 土木学会論文集 A1, Vol. 67, No. 1, pp.72-85, 2011.
- 10) 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, No.2, pp.336-350, 2011.
- 11) 宮下 剛, 長井正嗣: 一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.378-392, 2010.
- 12) 稲見武夫: 理工系の基礎数学 3・常微分方程式, 岩波書店, 1998.
- 13) 神保秀一: 数学基礎コース=H4・微分方程式概論, サイエンス社, 1999.
- 14) 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, pp.239-249, 2001.