

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○清水 優,
 京都大学工学部 学生員 古谷 貴洋,
 京都大学大学院工学研究科 正会員 石川 敏之, 服部 篤史, 河野 広隆

1. はじめに

近年コンクリート部材のみならず鋼部材に対しても CFRP 板を用いた補修補強が行われている^{1), 2)}. CFRP 板を用いることのメリットとしては, 鋼板当て板補強のように鋼部材にボルト孔をあける必要がないという点が挙げられる. さらに CFRP 板は密度が鋼の約 1/5 でハンドリングが良く, 接着するだけで補修補強できる. 一方, CFRP 板接着鋼部材が温度変化を受けると, 鋼と CFRP 板の線膨張係数の違いから, 内部応力 (以下, 熱応力とする) が鋼部材に生じるという課題がある³⁾. これに対して, 熱応力を考慮した設計方法が検討されているが, 熱応力の低減を図った研究は報告されていない. そこで本研究では CFRP 板接着の際にアルミニウム合金板 (以下, AL 板とする) の層を設けることで, 鋼部材に生じる熱応力を低減する方法を提案し, その有効性を実験により確認することを目的とする.

2. AL 板の寸法の設計法

本工法は線膨張係数がほぼ 0 である CFRP 板に対して, 鋼の約 2 倍の線膨張係数をもつ AL 板を接着することで, 補強板の見かけの線膨張係数を鋼の線膨張係数と同程度にするものである.

図-1 に示すような片面 n 層から成る補強板の, 見かけの線膨張係数 α_v は次式により求められる.

$$\alpha_v = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i E_i A_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \quad (1)$$

ここに, E_i は第 i 層の部材のヤング率, A_i は第 i 層の部材の断面積, α_i は第 i 層の部材の線膨張係数である. 式(1)の α_v を鋼の線膨張係数 α_s に近づける程, 鋼部材の熱応力は低減される. 補強板として CFRP 板を n_f 層, AL 板を n_a 層設けた場合, AL 板の寸法は次式を用いて設計できる.

$$E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai} \Big/ E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi} = (\alpha_s - \alpha_f) / (\alpha_a - \alpha_s) \quad (2)$$

ここに, E_f , E_a はそれぞれ CFRP 板と AL 板のヤング率, A_{fi} , A_{ai} はそれぞれ i 番目の CFRP 板の断面積と i 番目の AL 板の断面積, α_f , α_a はそれぞれ CFRP 板と AL 板の線膨張係数である.

3. 実験方法

試験体の概略図を図-1 に示す. 試験体は厚さ 4.2mm の鋼板の上下面に CFRP 板および AL 板を接着したものであり, 表-1 に示す 5 種類の供試体を作成した. ここで CFRP 板と AL 板の板厚比は, 式(2)に $E_f=140\text{GPa}$, $E_a=70\text{GPa}$, $\alpha_s=12\mu\text{/}^\circ\text{C}$, $\alpha_f=1\mu\text{/}^\circ\text{C}$, $\alpha_a=23\mu\text{/}^\circ\text{C}$ をそれぞれ代入して設計した値であり, これは表-2 の値を用いて板厚を算出した場合とほぼ一致した. 作成した試験体は接着剤が十分に硬化するまで, 室温 20°C の恒温状態で 2 日以上養生した後, 乾燥炉中に吊り, 乾燥炉内温度を (20°C から 40°C および 40°C から 20°C へ) 変化させて供試体の温度およびひずみを計測した. ひずみゲージは図-2 に示す通り鋼板の両側面および, 最外に接着された補強板の上下面に貼付した.

4. 実験結果

鋼板, CFRP 板および AL 板の熱応力の分布をそれぞれ図-3~図-5 に示す. ここで x は図-1 に示すように試験体中央からの距離であり, 各部材の熱応力 σ は次式を用いて算出した.

$$\sigma = E(\varepsilon_m - \varepsilon_n) \quad (3)$$

ここに, E は各部材のヤング率, ε_m は各部材のひずみの実測値, ε_n は各部材が無拘束状態で温度変化を受けたときのひずみである. CFRP 板あるいは AL 板についてはひずみゲージ貼付位置の都合から, 最外に接着された補強板の熱応力のみ算出した. また, 温度上昇試験と下降試験では熱応力の正負が反転するのみであったため, 温度上昇試験の結果

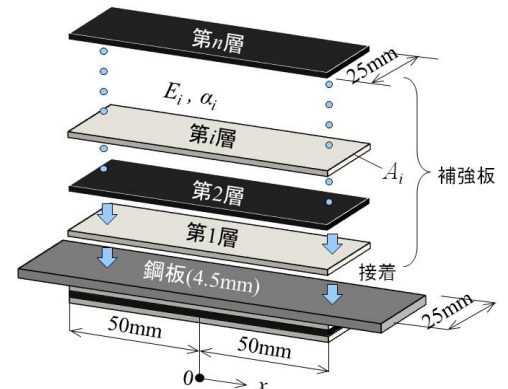


図-1 試験体概略図

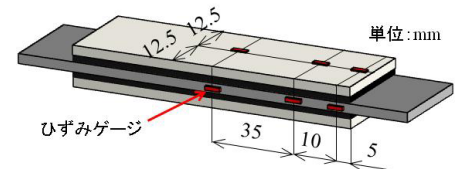


図-2 ひずみゲージ貼付位置

表-1 試験体一覧

試験体	第1層	板厚 [mm]	第2層	板厚 [mm]	第3層	板厚 [mm]	α_v [$\mu/\text{°C}$]	温度範囲 ΔT [°C]
CC	CFRP板	1.0	CFRP板	1.0	—		0.8	18.5
AA	AL板	2.0	AL板	2.0	—		21.4	18.5
CA	CFRP板	1.0	AL板	2.0	—		11.0	18.5
AC	AL板	2.0	CFRP板	1.0	—		11.1	18.5
ACA	AL板	1.0	CFRP板	1.0	AL板	1.0	11.0	15.9

表-2 材料特性

材料	ヤング率 [GPa]	線膨張係数 [$\mu/\text{°C}$]
鋼材	205	11.3
CFRP板	141	0.8
AL板	69.9	21.4

のみを示す。

図-3 より AL 板の層を設けた CA, AC, ACA では, CFRP 板のみ接着した CC および AL 板のみ接着した AA に比べ, 鋼板の熱応力が大幅に低減し, ほぼ 0 になっていることがわかる. したがって, 式(2)によって鋼板の熱応力を低減させる AL 板の板厚を設計することができる. しかし, 図-4 および図-5 から分かるように, AL 板の層を設けると最外に接着された補強板の熱応力は CC や AA に生じる値よりも大きくなっている.

図-3~図-5 より, 熱応力は $x=0$ に近づくにつれて一定の値に収束する傾向が見られる. $x=0$ の位置における各部材の熱応力は, 3 つの部材の内力の釣り合いおよび伸びが等しい条件から次式の通りとなる.

$$\sigma_{sT} = - \frac{2 \left(E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi} + E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai} \right)}{E_s A_s + 2 \left(E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi} + E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai} \right)} E_s (\alpha_s - \alpha_v) \Delta T \quad (4)$$

$$\sigma_{fT} = - \frac{E_s A_s + 2 E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai}}{E_s A_s + 2 \left(E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi} + E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai} \right)} E_f \left(\alpha_f - \frac{\alpha_s E_s A_s + 2 \alpha_a E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai}}{E_s A_s + 2 E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai}} \right) \Delta T \quad (5)$$

$$\sigma_{aT} = - \frac{E_s A_s + 2 E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi}}{E_s A_s + 2 \left(E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi} + E_a \sum_{i=1}^{n_a} A_{ai} \right)} E_a \left(\alpha_a - \frac{\alpha_s E_s A_s + 2 \alpha_f E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi}}{E_s A_s + 2 E_f \sum_{i=1}^{n_f} A_{fi}} \right) \Delta T \quad (6)$$

ここに, E_s は鋼板のヤング率, A_s は鋼板の断面積である. 式(4)~(6)より算出された値 (図-3~図-5 の破線) は鋼板, CFRP 板および AL 板のいずれも概ね一致しており, 熱応力の収束値として用いることができる.

5. 結論

本研究では, 鋼部材に生じる熱応力を低減する方法を提案し, その有効性を実験により確認した. 主な結果を以下に示す.

- (1) CFRP 補強板に対して, 式(2)を満足するように AL 板の層を設けることで, 鋼板の熱応力を低減できる.
- (2) 各部材にはたらく熱応力の収束値を式(4)~(6)で与えた.

謝辞

実験では, 日本軽金属株式会社の長尾隆史氏および新日鉄マテリアルズ株式会社的小林朗氏にご協力頂きました. ここに感謝の意を表します.

【参考文献】

- 1) 板垣, 渡邊, 鈴木: 炭素繊維強化樹脂板 (カーボン板) による鋼橋の補強の事例, 第 8 回鋼構造の補修・補強技術報告論文集, pp.49-54, 2002.
- 2) 土木学会, 複合構造委員会, 新材料による複合構造技術小委員会: 各種材料の特性と新しい複合構造の性能評価-マーケティング手法を用いた工法分析-, 丸善, pp.62-73, 2008.
- 3) 山谷, 姜, 中村, 前田, 鈴木: 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.

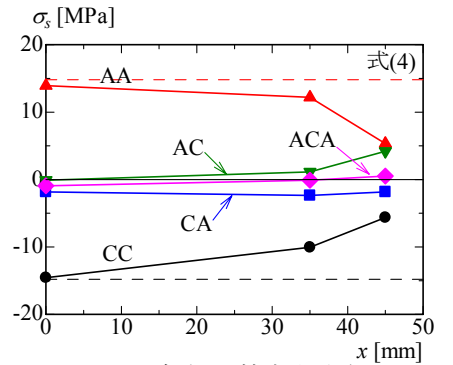


図-3 鋼板の熱応力分布

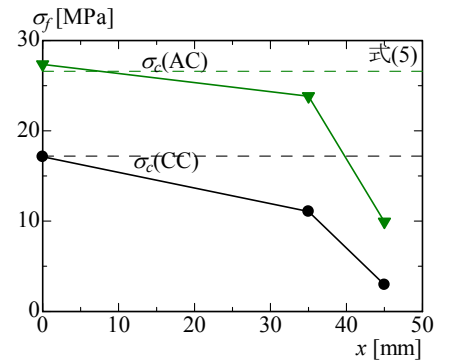


図-4 CFRP 板の熱応力分布

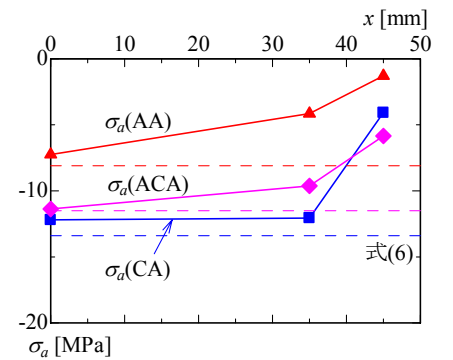


図-5 AL 板の熱応力分布