

## CFRP 板が接着された鋼板に生じる熱応力の低減工法の開発

京都大学 正会員 ○石川 敏之, 正会員 服部 篤史, 正会員 河野 広隆  
 日本軽金属 正会員 長尾 隆史, 新日鉄マテリアルズ 正会員 小林 朗

### 1. はじめに

鋼部材の炭素繊維強化樹脂成型板(以下, CFRP 板と呼ぶ)接着補修・補強では, CFRP 板の線膨張係数がほぼ  $0\mu\text{C}$ であるため, 温度変化を受けると鋼部材には内部応力(以下, 熱応力と呼ぶ)が生じることが問題として挙げられている<sup>1)</sup>. 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, 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ことにより, 鋼板に生じる熱応力を低減させる方法を提案し, その効果を温度変化試験を行い明らかにする.

### 2. AL 板の伸び剛性の設計

本研究では, CFRP 板と AL 板が接着され, 一体となった合成板を鋼の線膨張係数と等しくするように, CFRP 板と AL 板を接着する方法を提案する. CFRP 板と AL 板からなる合成板の線膨張係数が鋼と等しくなる, CFRP 板に対する AL 板の伸び剛性比  $E_a A_a / (E_f A_f)$  は次式で与えられる.

$$E_a A_a / (E_f A_f) = (\alpha_s - \alpha_f) / (\alpha_a - \alpha_s) \quad (1)$$

ここに,  $E_f$  と  $E_a$  はそれぞれCFRP板とAL板のヤング率,  $A_f$  と  $A_a$  はそれぞれCFRP板とAL板の断面積,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_f$  および  $\alpha_a$  はそれぞれ鋼, CFRP板およびAL板の線膨張係数である.

式(1)に, 鋼, CFRP 板および AL 板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 板に対する AL 板の伸び剛性が設計できる.

### 3. 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 枚を接着した場合(従来工法)を対象として, 提案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 2 枚の CFRP 板の伸び剛性の和と同じになるように設計する.  $\alpha_s$ ,  $\alpha_f$  および  $\alpha_a$  をそれぞれ,  $12\mu\text{C}$ ,  $1\mu\text{C}$  および  $23\mu\text{C}$  とすると,

式(1)から  $E_a A_a / (E_f A_f) = 1$  を得る. さらに AL 板のヤング率  $E_a = 70\text{GPa}$  を与えて AL 板の厚さが設計できる. 実測した各材料のヤング率と線膨張係数は, 設計で与えた値とほぼ同じであった. 試験体の一覧を表-1 に示す. CFRP 板および AL 板の長さを 100mm(鋼板の長さ 160mm)とした. 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-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. 図-2 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, CFRP 板および AL 板に生じるひずみの計測には, 鋼材に用いられる線膨張係数  $11.7\mu\text{C}$  に調整されたひずみゲージを利用した.

### 4. 温度変化試験

乾燥炉に試験体を鉛直に吊るし, 扉を開けた状態で  $20\text{C}$  の恒温室に 2 時間程度放置した後, ひずみを計測し, 乾燥炉の扉を閉め, 炉内の設定温度を  $40\text{C}$  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(2 時間程度)し, ひずみを計測した. 各試験体に加え, 無拘束の鋼板, CFRP 板, AL 板も同様に温度変化を与えてひずみを計測した. 熱伝対を用いて計測した温度変化量  $\Delta T$  も表-1 に示している.

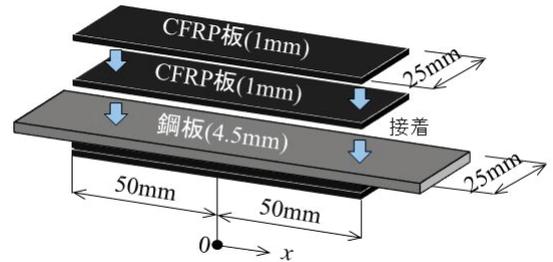


図-1 対象とするCFRP板接着鋼板

表-1 試験体一覧と温度変化量

試験体	1層目	2層目	3層目	$\Delta T$ [°C]
CC	CFRP : 1mm	CFRP : 1mm	—	18.5
AA	AL : 2mm	AL : 2mm	—	18.5
CA	CFRP : 1mm	AL : 2mm	—	18.5
AC	AL : 2mm	CFRP : 1mm	—	18.5
ACA	AL : 1mm	CFRP : 1mm	AL : 2mm	15.9

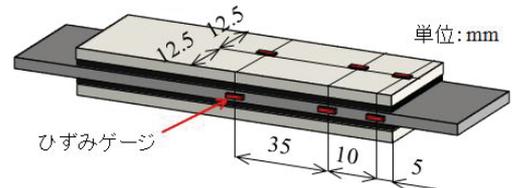


図-2 ひずみの計測位置

キーワード 熱応力, CFRP 板, アルミニウム合金板

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-220 TEL 075-383-3321 FAX 075-383-3324

計測された鋼板に生じるひずみ  $\varepsilon_{sm}$  と無拘束の鋼板に生じるひずみ  $\varepsilon_{sn}$  および鋼のヤング率  $E_s$  を用いて、鋼板に生じる熱応力  $\sigma_s (= E_s(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sn}))$  を算出した。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無拘束の 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  $\sigma_f, \sigma_a$  を算出した。温度変化を与えて生じた熱応力を図-3~7 にそれぞれ示す。  $\sigma_s$  は、鋼板の両側面の平均値を示し、  $\sigma_f, \sigma_a$  は、再外の CFRP 板あるいは AL 板の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) を示している。これらの図からわかるように、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、鋼板に圧縮応力および引張応力がそれぞれ生じていることがわかる。接着端部では鋼板に生じる熱応力が小さいが、試験体中央に生じる熱応力は、部材内力のつり合いと伸びのつり合いから導出される次式の値とほぼ一致している。

$$\sigma_{sT} = -(1-\xi_0)E_s(\alpha_s - \alpha_f)\Delta T \quad (2), \quad \sigma_{fT} = -A_s/(2A_f)\sigma_{sT} \quad (3)$$

ここに  $\xi_0 = E_s A_s / (E_s A_s + 2E_f A_f)$ 。ただし、試験体 AA の熱応力  $\sigma_{sT}, \sigma_{aT}$  は、  $E_f, A_f$  をそれぞれ  $E_a, A_a$  に置換して式(2), (3)を用いて算出した。

一方、試験体 CA, AC および ACA では、試験体中央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。ただし、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-3) の CFRP 板あるいは試験体 AA (図-4) の AL 板に生じる熱応力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, ACA に対して、試験体中央に生じる熱応力は、部材内力のつり合いと伸びのつり合いから導出される次式の値とほぼ一致している。

$$\sigma_{sT} = -E_s \{ (1-\xi)(\alpha_s - \alpha_f) + (\alpha_f - \alpha_a)J / (1+J) \} \Delta T \quad (4)$$

$$\sigma_{fT} = E_f \{ \xi(\alpha_s - \alpha_f) - (\alpha_f - \alpha_a)J / (1+J) \} \Delta T \quad (5)$$

$$\sigma_{aT} = E_a \{ \xi(\alpha_s - \alpha_f) + (\alpha_f - \alpha_a)J / (1+J) \} \Delta T \quad (6)$$

ここに  $\xi = E_s A_s / \{ E_s A_s + 2(E_f A_f + E_a A_a) \}$ ,  $J = 2E_a A_a / (E_s A_s + 2E_f A_f)$  である。

5. まとめ

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、温度変化試験によりその効果を明らかにした。

謝辞：本実験を実施するにあたり、研究当時京都大学工学部 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) 石川ら：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.

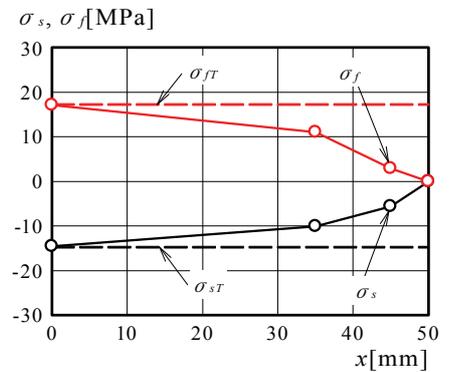


図-3 試験体 CC

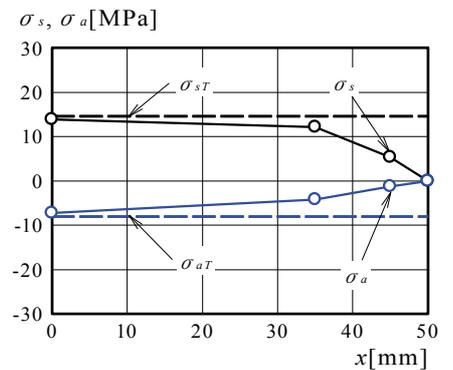


図-4 試験体 AA

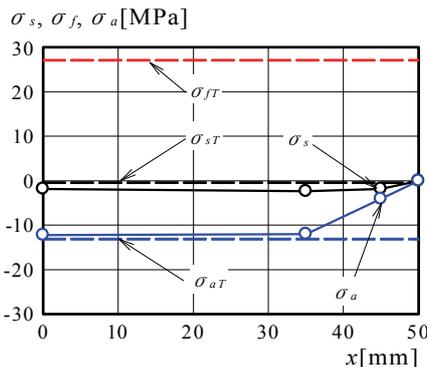


図-5 試験体 CA

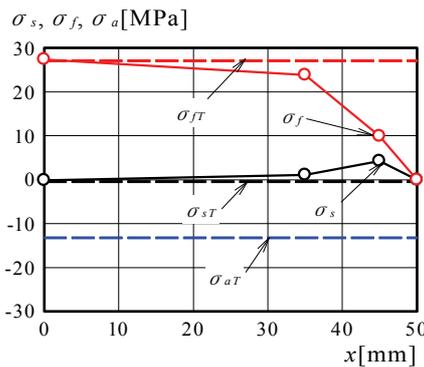


図-6 試験体 AC

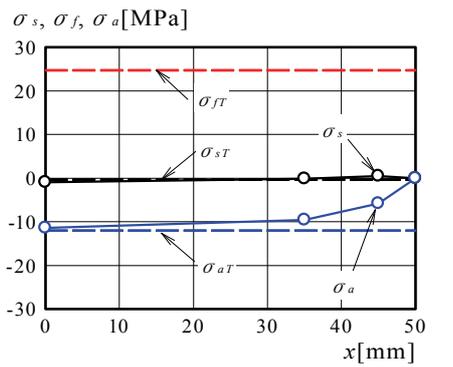


図-7 試験体 ACA