

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656269

研究課題名(和文)炭素繊維によって補強された部材に生じる熱応力低減工法の開発

研究課題名(英文)Development for reduction technique of thermal stress induced in structural members strengthened by carbon-fiber

研究代表者

河野 広隆 (Kawano, Hirotaka)

京都大学・経営学研究科・教授

研究者番号：80344018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：炭素繊維材料を接着することによる、社会基盤構造物の補修・補強では、一般的な材料である鋼やコンクリートの線膨張係数(10～12 $\mu$ /)と比べ炭素繊維材料の線膨張係数がほぼ0 $\mu$ /と大きく異なるため、温度変化を受けるだけで、構造物に熱応力が生じることが問題として挙げられている。本研究では、この課題を解決するために、炭素繊維材料と共に、線膨張係数が23 $\mu$ /の構造用アルミニウム合金を接着して、構造部材に生じる熱応力自体を低減させる新たな工法を提案し、温度変化試験によりその効果を明らかにした。また、炭素繊維接着に対するはく離評価法についても提案した。

研究成果の概要(英文)：In the structural members strengthened by bonding carbon-fiber reinforced polymer, CFRP, thermal stresses are introduced when the temperature changes because the linear thermal expansion coefficients of conventional structural materials, e.g. steel or concrete, and CFRP are mismatched. With this in mind, we proposed a technique to reduce the thermal stress in structural members strengthened by CFRP, which involves bonding aluminum alloy plates with CFRP. The thermal test results showed the effectiveness of proposed method for reduction of thermal stress in structural members. Furthermore, the evaluation method for debonding of CFRP from structural members was proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：熱応力 炭素繊維 アルミニウム合金 線膨張係数 固有値解析 温度 はく離 接着剤

1. 研究開始当初の背景

損傷した社会基盤構造物を簡易に補修・補強する方法の一つとして、軽量で強度が高い炭素繊維材料を接着する補修・補強が実用化されている。しかし、この工法では、鋼やコンクリートの線膨張係数(10~12 $\mu$ / )と炭素繊維材料の線膨張係数(ほぼ 0 $\mu$ / )が大きく異なるため、例えば、温度が低下すると、構造部材は収縮するが、炭素繊維材料が収縮しないため、構造部材に熱応力が生じるなどの課題がある。環境によっては、作用応力を低減させるために炭素繊維材料を接着したにも関わらず、低減される応力以上の熱応力が生じる場合も考えられ、接着補修・補強の設計が煩雑になる。さらに、熱応力によって炭素繊維材料が構造物からはく離しやすくなる恐れがある。したがって、炭素繊維接着補修・補強工法では、熱応力を低減させることが一つの課題となっている。

2. 研究の目的

構造物への炭素繊維接着補修・補強工法に対して、熱応力を低減させる新たな接着工法として、炭素繊維材料と共に線膨張係数が23 $\mu$ / でヤング係数と引張強度が比較的高いアルミニウム合金材を接着する工法を提案した。この方法は、炭素繊維材とアルミニウム合金材からなる補強材の線膨張係数を鋼やコンクリートのそれと同程度にすることにより、構造部材に生じる熱応力を低減させる方法である。

炭素繊維材料とアルミニウム合金材からなる積層板の線膨張係数を構造部材のそれと一致させるための、炭素繊維材料とアルミニウム合金材の剛性比を次式に示す。

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

ここに、 $E_f$ 、 $A_f$  および  $\alpha_f$  は、それぞれ炭素繊維材料のヤング係数、断面積および線膨張係数、 $E_a$ 、 $A_a$  および  $\alpha_a$  は、アルミニウム合金材のヤング係数、断面積および線膨張係数、 $\alpha_s$  は構造部材の線膨張係数である。

本研究では、式(1)を満足する炭素繊維材料とアルミニウム合金材を接着して構造部材

の熱応力を低減させる工法に対して、その効果を実験で明らかにする。また、炭素繊維接着補修・補強で問題となっている、補強材のはく離に対しても、簡易に評価できる式の検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、炭素繊維接着補修・補強工法に対する熱応力の低減およびはく離の評価に取り組んだ。本研究で実施したそれぞれの研究の内容を以下に示す。

(1) 温度変化試験と熱応力の算定法の提案

炭素繊維強化樹脂成形板(CFRP 板)とアルミニウム合金板(AL 板)からなる補強版を鋼板に接着し、20℃を基準として温度上昇および低下させた場合に、鋼板に生じる熱応力を計測し評価する。温度変化試験では、提案工法に加え、比較のために、従来のCFRP板接着の試験も行う。また、鋼、CFRP板およびアルミニウム合金板単体の自由膨張収縮ひずみも計測し、試験体で計測されたひずみから各材料の自由膨張収縮ひずみを差し引いて熱応力を算出した。さらに、設計に利用できるように熱応力の算定法や、接着剤に生じる応力の評価のための理論解析も行った。

試験体の一覧を図-1に、ひずみの計測位置を図-2に示す。CFRPストランドシートとアルミニウム合金板(幅3.2mm,厚さ2mm)を横に並べた試験体CSAも準備した。温度上昇には、電気乾燥炉、温度低下には冷凍庫を用い、ひずみの値が変化しなくなった状態に対して熱応力を評価した。

幅50mm,高さ100mm,長さ350mmのコンクリート部材に対しても、長さ200mmのCFRP板(幅50mm,厚さ2mm)を接着した試験体Cおよび幅50mm,長さ200mmのCFRP板(厚さ1mm)をアルミニウム合金板(厚さ1mm)2枚で挟み込んだ試験体ACAについても温度変化試験を行った。

(2) 長期暴露試験

幅50mm,長さ200mmのCFRP板(厚さ1mm)1枚とアルミニウム合金板(厚さ1mm)2枚を図-1の試験体ACAのように接着した鋼板(幅50mm,厚さ4.5mm,長さ300mm)の長期暴露試験を行い、本工法により年間を通

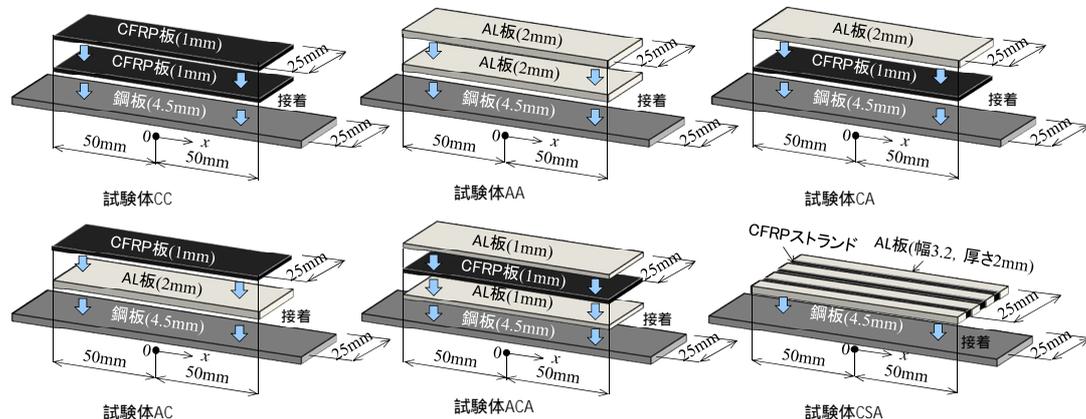


図-1 温度変化試験に用いた試験体

じて鋼板の熱応力の低減効果を確認した。比較として、CFRP 板 2 枚を図 - 1 の試験体 CC のように鋼板に接着した試験体も暴露試験を行った。両者の比較により、鋼板に生じる熱応力の低減効果を評価した。

(3) はく離評価に関する検討

CFRP 板を接着した鋼板に温度変化や荷重が作用した際の CFRP 板のはく離の評価法を提案するために、接着剤に生じる応力を推定する方法を提案し、それを用いて CFRP 板のはく離評価について検討した。

4. 研究成果

先に述べた、温度変化試験、長期暴露試験、はく離評価法に対して、それぞれの成果を以下に示す。

(1) 温度変化試験

試験体に用いた材料特性を表 - 1 に示す。温度上昇は 20 → 50、温度低下は 20 → 10 とし、道路橋示方書にある 20 ± 30 とした。

温度上昇によって、鋼板、CFRP 板およびアルミニウム合金板に生じた熱応力の分布を図 - 3 に示す。この図には、次式の構造力学で推定される構造部材および補強板の熱応力  $\sigma_s$ 、 $\sigma_i$  も示している。

$$\sigma_s = \frac{M_v}{I_v} y_{vs} + \frac{P_v}{A_v} \quad (2)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{n_i} \left( \frac{M_v}{I_v} y_{vi} + \frac{P_v}{A_v} \right) - \frac{P_i'}{A_i} \quad (3)$$

ここに、 $P_v = \sum P_i'$ 、 $M_v = \sum (P_i' \cdot d_{vi})$ 、 $P_i' = E_i A_i (\alpha_i - \alpha_s) \Delta T$ 、 $n_i = E_s / E_i$ 、 $I_v$ 、 $A_v$  および  $y_{vs}$  は、それぞれ構造部材と補強板からなる合成断面の構造部材換算した断面 2 次

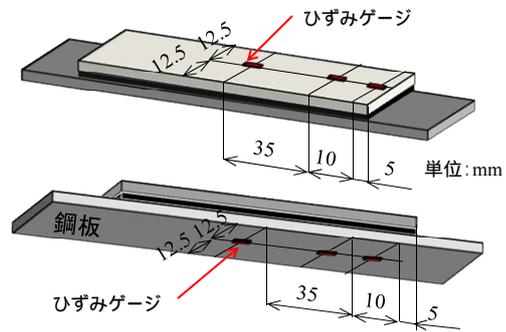


図 - 2 ひずみの計測位置

モーメント、断面積および図心からの距離、 $d_{vi}$  は、合成断面の図心から補強板  $i$  の図心までの距離、 $E_i$ 、 $A_i$  および  $\alpha_i$  は、それぞれ補強板  $i$  のヤング係数、断面積および線膨張係数、 $E_s$  は構造部材のヤング係数、 $\Delta T$  は温度変化量(温度上昇が正)、 $i$  は構造材に近い側からの補強板の番号(1 から補強板の積層数  $N$  までの整数であり、接着剤層の番号としても用いる)。

さらに提案した、接着剤を介して鋼板の断面力が当て板に伝達される理論解析(雑誌論文)による熱応力の分布も示している。

図 - 3 から、CFRP 板を 2 枚接着した試験体 CC では、温度上昇に伴って、鋼板に引張の熱応力が生じていることがわかる。また鋼板の熱応力の分布は理論解析値と同様であった。試験体中央の鋼板に生じる熱応力は式(2)の構造力学の値で評価できることがわかる。アルミニウム合金板 2 枚を接着した試験体 AA では、鋼板に圧縮の熱応力が生じている。これらに対して、本研究で提案した CFRP 板とアルミニウム合金板を接着した試験体 CA、AC では、鋼板に生じる熱応力は半分程度になっていることがわかる。本研究では、式(1)

表 - 1 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 $\alpha_f$ [ $\mu/$ ]	0.8
線膨張係数 $\alpha_s$ [ $\mu/$ ]	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 $\sigma_Y$ [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 $T_g$ [ ]	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 $\alpha_a$ [ $\mu/$ ]	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

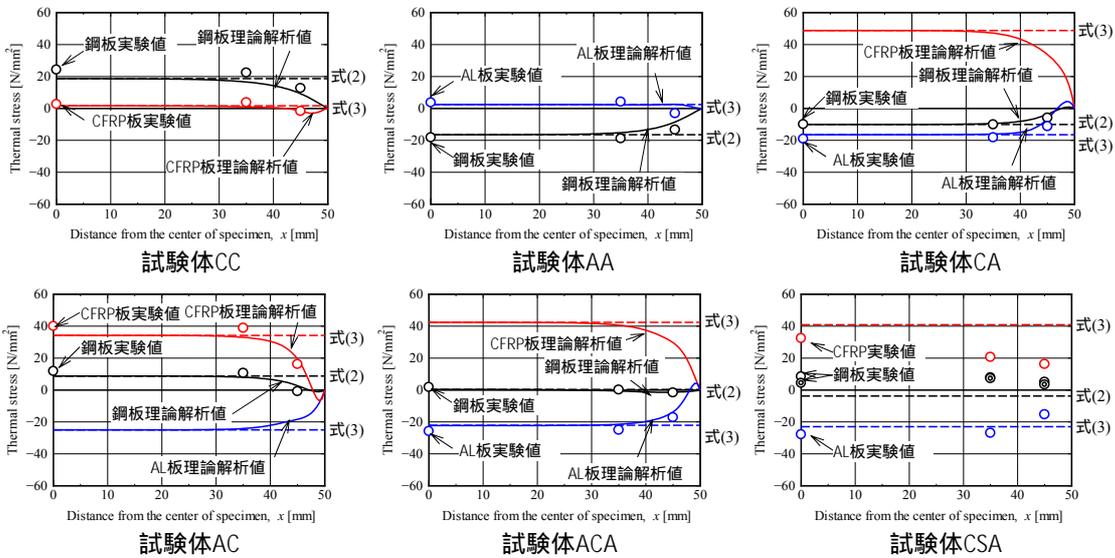


図 - 3 温度変化試験結果(20 50 )

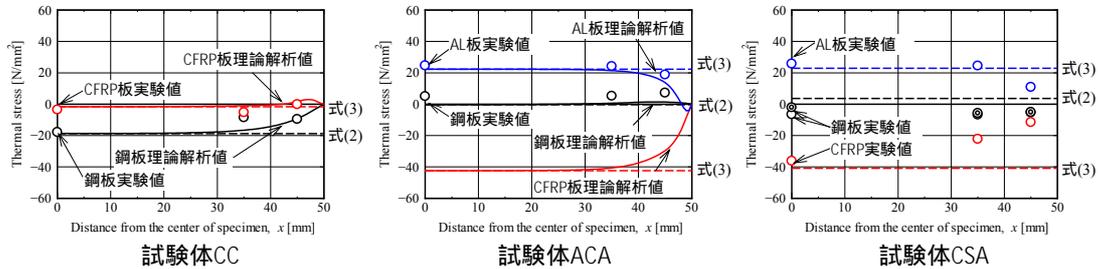


図 - 4 温度変化試験結果(20 -10 )

を満足する CFRP 板とアルミニウム合金板を用いているが、試験体 CA, AC では、それらを鋼板の片面に接着しているため、式(2), (3)に含まれる曲げモーメント  $M_x$  が生じ、鋼板の熱応力を完全に除去できていない。一方、 $M_x = 0$  となるように 2 枚のアルミニウム合金板の間に CFRP 板を挟んだ試験体 ACA では、鋼板の熱応力をほぼ 0 にできていることがわかる。また、短冊状に CFRP スtrand とアルミニウム合金板を並べた試験体 CSA では、図心から CFRP スtrand とアルミニウム合金板の距離が同じであり、両者の伸び剛性も近い値なので、 $M_x$  がほぼ 0 になり、鋼板に熱応力がほとんど生じていないことがわかる。

図 - 3 の試験結果からわかるように、CFRP 板とアルミニウム合金板を接着した場合、鋼板の熱応力は、従来の CFRP 板接着の場合より低減するが、CFRP 板に生じる熱応力やアルミニウム合金板に生じる熱応力は、従来工法の試験体 CC やアルミニウム合金板のみ接着した試験体 AA の値と比べて高くなる。これは、CFRP 板とアルミニウム合金間で、ひずみのつり合いによって内部応力が生じるためである。したがって、本研究で提案する工法を利用する場合、CFRP 板とアルミニウム合金板に生じる熱応力を設計に反映させる必要がある。また、CFRP 板とアルミニウム合金板に生じる熱応力は式(3)で評価できることが図 - 3 から明らかとなった。

他方、温度低下によって、鋼板、CFRP 板およびアルミニウム合金板に生じた熱応力の分布は、温度上昇によって生じる熱応力の分布と符号が異なるだけで絶対値がほぼ等しかったので、一部の例を図 - 4 に示す。以上より、-10 ~ 50 の範囲では、式(2), (3)から本工法だけでなく従来工法に対しても、構造部材、当て板に生じる熱応力が計算できる。

CFRP 板およびアルミニウム合金板を接着したコンクリート部材に対する温度変化試験(試験体中央断面の熱応力で引張を正としている)の結果を図 - 5 に示す。図には、式(2), (3)から計算される計算値も示している。この図から、計算値では、CFRP 板のみを接着した場合(試験体 C)、引張が生じる場合があることがわかる。一方、CFRP 板とアルミニウム合金板を接着した場合(試験体 ACA)、コンクリート部材に生じる熱応力は 0 である。しかし、コンクリート部材に生じる熱応力が比較的小さく、実験値は両者とも小さな値となった。CFRP 板とアルミニウム合金板に生じる熱応力は、実験値が計算値より高い値となっているが、両者は同様な傾向であった。

#### (2) 長期暴露試験

2013 年 6 月 25 日から長期暴露試験を開始した。長期暴露は、京都大学桂キャンパスの構造実験室前の通路とし、屋外の直射を避けた位置とした。暴露開始後からの温度の履歴を図 - 6 に示している。直射を避けていたた

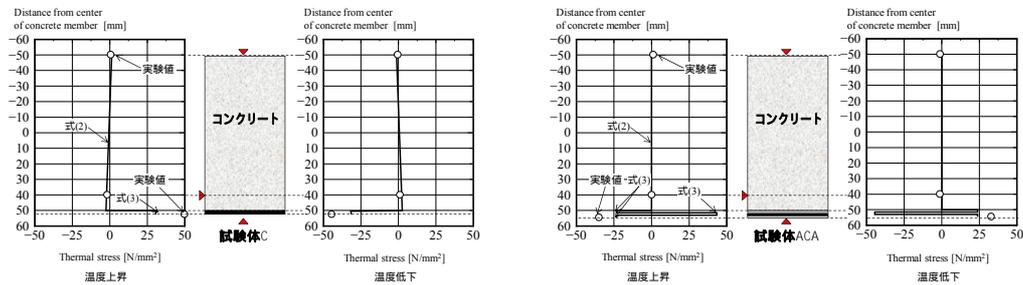


図 - 5 温度変化試験結果(コンクリート部材)

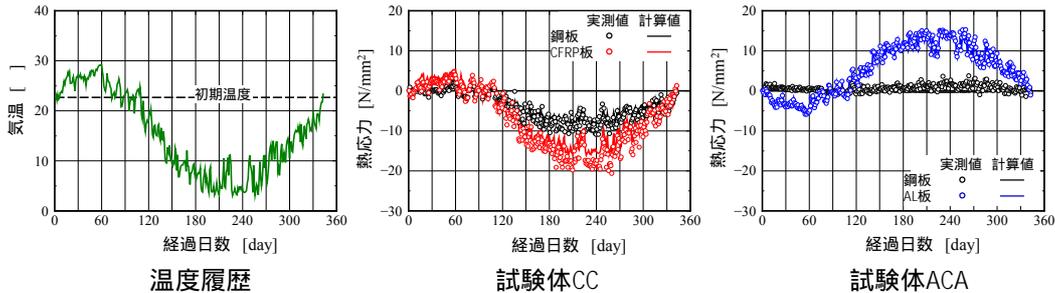


図 - 6 長期暴露試験

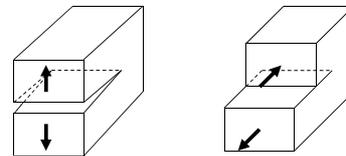
め、実測した温度は最高 29.2 °C、最低 3.1 °C であった。

暴露開始時を基準として、実測した試験体 CC と試験体 ACA の試験体中央の熱応力を図 - 6 に示す。この図には、温度履歴を用いて式(2)、(3)から計算される熱応力も実線で示している。図 - 6 から、CFRP 板を 2 枚接着した試験体 CC では、鋼板と CFRP 板に熱応力が生じていることがわかる。また、その計算値と実測値に若干の差が見られるものの、長期暴露における熱応力が計算で評価できていると考えられる。また、鋼板の熱応力をほぼ 0 となるように CFRP 板とアルミニウム合金板を接着した試験体 ACA では、暴露期間中、鋼板の熱応力はほとんど生じなかった。さらに、アルミニウム合金板の熱応力は、式(3)を用いて評価できていることがわかる。以上より、本研究で提案した、CFRP 板とアルミニウム合金板を接着することによって構造部材に生じる熱応力を低減する効果が、暴露試験によっても確認できた。

### (3) CFRP 板のはく離評価

CFRP 板を接着した鋼板では、温度変化あるいは荷重の作用を受けて、CFRP 板の端部近傍の接着剤に高いせん断応力と垂直応力が生じ、それらによって、CFRP 板がはく離すると考えられている。海外では、接着剤に生じるせん断応力と垂直応力を用いた評価法が提案されている。しかし、日本では、鋼部材の CFRP 板接着補修・補強に対して、CFRP 板のはく離の評価の基準が整備されていない。そこで、CFRP 板のはく離に対する評価方法として、エネルギー解放率に着目した評価、接着剤の主応力に着目した評価を行った。その中で、CFRP 板の端部の接着剤に生じる応力の簡易推定法や数値計算による評価手法を提案した(雑誌論文)。

本研究では、エネルギー解放率に着目した



モード I      モード II

図 - 7 はく離モード

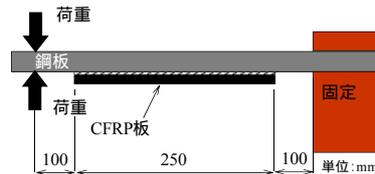


図 - 8 片持ち曲げ試験

評価として、次式のモード別エネルギー解放率  $G_I$ 、 $G_{II}$  (図 - 7 参照) の計算式を与えた。

$$G_I = \begin{cases} \frac{h}{2E_e} \sigma_{ye}^2 & (\sigma_{ye} \geq 0) \\ 0 & (\sigma_{ye} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$G_{II} = \frac{h}{2G_e} \tau_e^2 \quad (5)$$

ここに、 $h$ 、 $E_e$  および  $G_e$  は、それぞれ接着剤の厚さ、ヤング係数およびせん断弾性係数、 $\sigma_{ye}$ 、 $\tau_e$  は、それぞれ接着剤の端部近傍に生じる最大の垂直応力とせん断応力。

接着剤の主応力  $\sigma_p$  は次式で与えられる。

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \quad (6)$$

図 - 8 に示すように、CFRP 板を接着した鋼板を片持ち状態とし、自由側に荷重を載荷し、CFRP 板のはく離試験を行った。荷重は、CFRP 板が曲げの圧縮応力側になるように載荷した場合と、曲げの引張応力側になるよう

に載荷した場合の2種類とし、接着剤に生じる垂直方向の応力の符号を変化させた試験を行った。

CFRP板がはく離した際の、CFRP板端の曲げモーメントを用いて接着剤端に生じるせん断応力 $\tau_c$ と垂直応力 $\sigma_{yc}$ を算定した。CFRP板のはく離時の接着剤に生じるせん断応力 $\tau_c$ と垂直応力 $\sigma_{yc}$ の関係を図-9に示す。この図には、試験結果から最小二乗法で推定したエネルギー解放率 $G(=G_I+G_{II})$ の値、最大主応力 $\sigma_p$ の値を示している。すなわち、試験結果から推定した各評価手法の抵抗値を示している。また図には、同様にして試験結果から推定した接着剤の最大せん断応力、クーロンの破壊基準、ミーゼス応力、 $Y_e$ の破壊基準の推定値も示している。図-9から、CFRP板が曲げの圧縮応力側、引張応力側のどちらのはく離に対しても評価できる手法は、クーロンの破壊基準、最大主応力であることがわかる。また、エネルギー解放率はCFRP板が曲げの圧縮応力側の場合には安全に評価できる手法になっている。クーロンの破壊基準を用いる場合、接着剤の内部摩擦角と粘着力を決定する必要があるため、実用上は、最大主応力を用いた評価あるいはエネルギー解放率を用いた評価を行うのが良いと考えられる。さらに、それらの評価には本研究の成果の雑誌論文<sup>1)</sup>に示した温度変化や様々な荷重の作用によって接着剤端に生じるせん断応力と垂直応力が利用できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

石川敏之, 富田貴大, 服部篤史, 河野広隆, 長尾隆史, 小林 朗: CFRP板が片面に接着された鋼部材に生じる熱応力の低減, 土木学会論文集 A2(応用力学) Vol.68, No.2(応用力学論文集 Vol.15), pp.I\_703-714, 2012. 査読あり

[http://dx.doi.org/10.2208/jscejam.68.I\\_703](http://dx.doi.org/10.2208/jscejam.68.I_703)  
清水 優, 大倉慎也, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: 鋼部材に接着された当て板のはく離によるエネルギー解放率, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69, No.2(応用力学論文集 Vol.16), pp.I\_701-I\_710, 2013. 査読あり

[http://dx.doi.org/10.2208/jscejam.69.I\\_701](http://dx.doi.org/10.2208/jscejam.69.I_701)  
Ishikawa, T., Hattori, A., Kawano, H., Nagao, T. and Kobayashi, A.: Reduction technique of thermal stress induced in steel plate strengthened with CFRP plates, 9th German-Japan Bridge Symposium, pp.159-160 on Book, Paper No.4A-05 on CD, 2012. 査読なし

Ishikawa, T., Nagao, T., Kobayashi, A., Shimizu, M., Hattori, A. and Kawano, H.: Reduction of thermal stress induced in steel plate strengthened by bonding CFRP plate on one side, Asia-Pacific Conference on

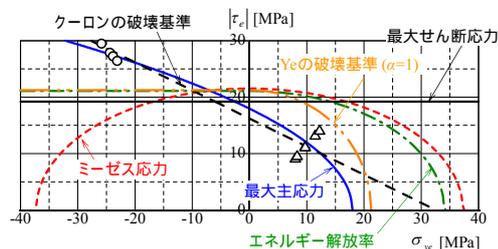


図-9 CFRP板のはく離評価

FRP in Structures, APFIS, Melbourne, Paper No.8, 2013. 査読あり

Shimizu, M., Ishikawa, T., Hattori, A. and Kawano, H.: Simple equations of shear and normal stresses at the ends of CFRP plate bonded onto steel member, Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS, Melbourne, Paper No.17, 2013. 査読あり

〔学会発表〕(計 2件)

石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 富田貴大, 長尾隆史, 小林 朗: CFRP板が片面に接着された鋼板に生じる熱応力の低減効果, 土木学会第67回年次学術講演会概要集共通セッション, 第67巻, CS3-014, pp.27-28, 2012.

清水 優, 大倉慎也, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: 鋼部材に接着された当て板のはく離に対するモード別エネルギー解放率の提案, 土木学会第68回年次学術講演会概要集 第1部 第68巻 I-353, pp.705-706, 2013.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

河野 広隆 (KAWANO HIROTAKA)

京都大学・経営管理研究部・教授

研究者番号: 80344018

(2)研究分担者

石川 敏之 (ISHIKAWA TOSHIYUKI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00423202

(3)連携研究者

なし