

1 はじめに

劣化した橋梁構造を軽量の炭素繊維複合材料を用いて補強する試みは世界中で実施されている。しかしながら、橋梁構造を構成する鋼材と炭素繊維複合材料との結合において、鋼材は温度変化により伸縮するが、炭素繊維複合材料の多くは温度変化による伸縮量が極めて小さく、鋼部材と炭素繊維複合材料の間に温度応力が発生し、これが接着面の剥離を惹起し、あるいは補強効果を低減させてしまうことが指摘¹⁾されている。温度応力に関しては、著者等により簡単なモデル化による定量的な評価が試みられている²⁾が、実際の構造物においてモデル化が有効であるかどうかの確認はされていない。

そこで本研究では、軸方向荷重に対する補強を行う場合について、鋼材に炭素繊維複合板(以下 CFRP 板と呼ぶ)を接着した際の温度変化に対するひずみ性状を解明する。ここでは、鋼板に CFRP 板を両面に接着補強した試験体を用いて温度変化時の温度応力を計測し、簡単なモデルで計算した結果と比較を試みたので報告する。

2 実験方法

図-1 に試験体の寸法と形状を示す。試験体は幅 50mm、厚さ 9mm、長さ 300mm の鋼材表裏全面に、同幅同長の CFRP 板をエポキシ樹脂 (厚さ 1mm) で接着した。CFRP 板には、カボコンと炭素繊維を 3 層、6 層、9 層 (以下、3PLY、6PLY、9PLY と呼ぶ) と積層数を変えたもの計 4 種類を用いた。

写真-1 に、試験体の鋼材箇所のひずみゲージ貼付状況を示す。鋼板にはひずみゲージを貼付するために、鋼板軸方向中央を表裏それぞれ板厚 1.0mm ずつ削り、この部分にエポキシ樹脂を充填した。なお、実験に用いたひずみゲージは、温度補償タイプ (熱線膨張係 $11.7 \mu / ^\circ C$) でゲージ長 10mm の単軸ひずみを使用した。

ひずみ計測では、試験体を高温槽および冷凍庫の容器に入れ、容器内を室温 $\sim 50^\circ C$ \sim 室温 $\sim -20^\circ C$ \sim 室温と温度変化させてひずみを計測した。

表-1 に、試験体材料の弾性係数を示す。CFRP 板の弾性係数は製作会社の公表値である。4 種類の CFRP 板はいずれも炭素繊維が軸方向に配向されており、それらの幅方向の弾性係数は鋼と比べて極めて小さい。そのため、補強による拘束効果は軸方向のみと見做すことができる。

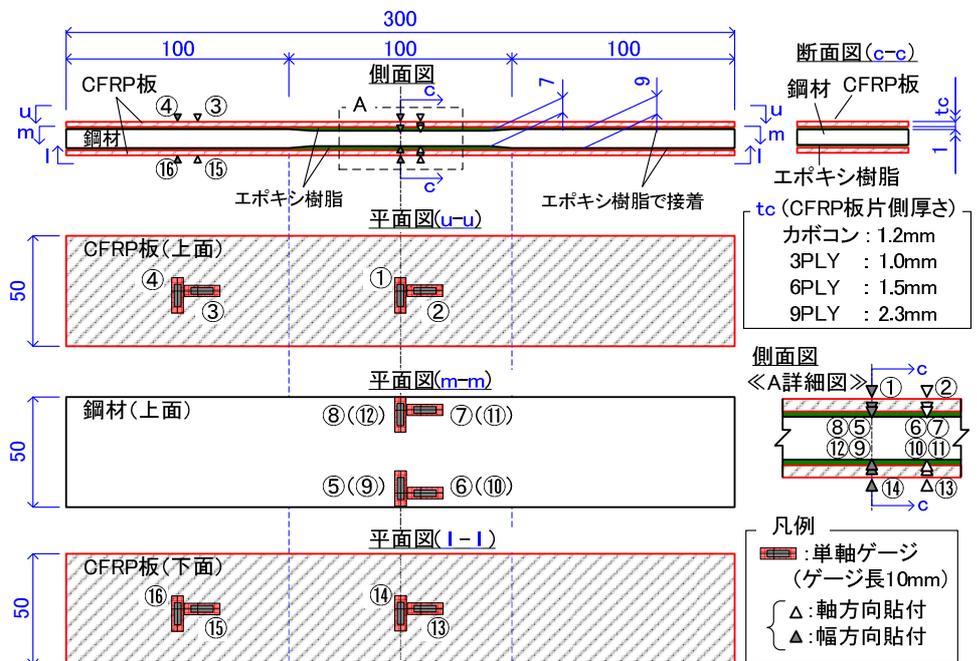


図-1 試験体の寸法と形状およびひずみゲージ貼付位置

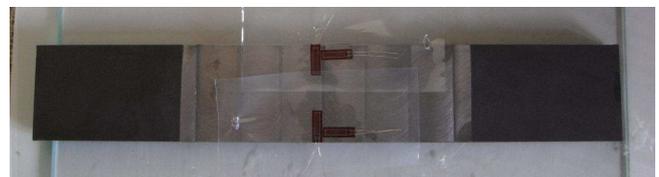


写真-1 鋼板のひずみゲージ貼付状況

表-1 材料の弾性係数 ($\times 10^3 N/mm^2$)

鋼材	CFRP 板			
	カボコン	3PLY	6PLY	9PLY
206	152	103	114	112

3 実験結果

3.1 各材料の線膨張係数

試験体の実測に先立ち、まず温度変化時の各材料のひずみを実測し線膨張係数を求めた。表-2 に、各材料の線膨張係数算出結果を示す。9PLY に関しては、繊維方向の線膨張係数は鋼材の軸方向の約 9.5% ($=1.17/12.3$) となっている。繊維直角方向は繊維方向に比べて高く、エポキシ樹脂の線膨張係数に近い値となっていると考えられる。

3.2 試験体のひずみ変化

図-3 に 3PLY 試験体の温度とひずみ変化の関係を示し、表-3 に全試験体の 70°C の温度変化時 (-20°C~50°C) のひずみ実測値を示す。

図-3 において、3PLY 試験体では温度履歴の始めと終わりの室温状態時のひずみが同一値にならずズレが生じている。他試験体でも同様であり、これは計測機のドリフト等の実験誤差や接着部分のせん断変形などと推測される。このズレは大きな値ではないことから、この実測値の -20°C から 50°C のひずみ差を 70°C の温度変化により発生したひずみと定義した。

3.4 実験値と理論計算値の比較

ここでは、CFRP 板を鋼板に接着した軸方向補強の計算モデルを考える。計算モデルでは、鋼板と CFRP 板が接着面により完全に結合され、両板の厚さおよび幅方向のひずみが一定と仮定する。このモデルが温度変化を受けた場合のひずみと鋼材に発生する温度応力を次式に示す。

CFRP 板補強前の鋼板の温度変化によるひずみが $\epsilon_1 = \alpha T$ の時、(T : 鋼板の温度変化量, α : 鋼板の線膨張係数, E_c, A_c : CFRP 板の弾性係数および断面積, E_s, A_s : 鋼板の弾性係数および弾性断面積)

$$\lambda = \frac{E_c A_c}{E_s A_s} \text{ と置くと、複合構造体のひずみは } \epsilon_2 = \frac{\epsilon_1}{1 + \lambda}, \text{ 鋼材の温度応力は } \sigma_T = \frac{\lambda}{1 + \lambda} E_s \epsilon_1 \text{ となる。}$$

表-3 に、70°C 温度変化した時の複合構造体のひずみ ϵ_2 の計算値を示す。実測値と計算値はほぼ一致し、上式で仮定した計算モデルがほぼ成立していると示される。詳細に見ると、実測値は 6PLY 試験体以外では CFRP 板が鋼材よりもやや小さい値である。また、CFRP 板の断面積が大きくなると、複合構造体のひずみ変化が小さくなる傾向がある。

表-3 に、参考として鋼材に生じる温度応力の計算値も記載する。70°C の温度変化により 9PLY 試験体のように大きな温度応力が生じることは、補強効果を評価する際に留意すべきである。

4 おわりに

本研究で得られた主な結論は以下のとおり。

- (1) 鋼板を CFRP 板で補強した際の温度応力を簡易なモデルを仮定し計算した結果と、実際の複合構造体を -20°C から 50°C まで変化させた際のひずみ変化と比較すると、両者が良い一致を示すことを明らかにした。
- (2) CFRP 板の断面積が増加すると、温度変化による複合構造体のひずみ変化量が減少する傾向がある。

参考文献：1) ICE design and practice guide, "FRP composites - life extension and strengthening of metallic structures", Thomas telford, 2001

2) 並木宏徳他, CFRP 補強された引張り鋼部材の温度変化の影響, 第 65 回年土木学会年次学術講演会, I-431, 2010.

表-2 使用材料の線膨張係数 ($\mu/^\circ\text{C}$)

	鋼材	カボコン	9PLY
軸方向 (繊維方向)	12.3	2.04	1.17
幅方向 (繊維直角方向)	12.7	32.2	40.0

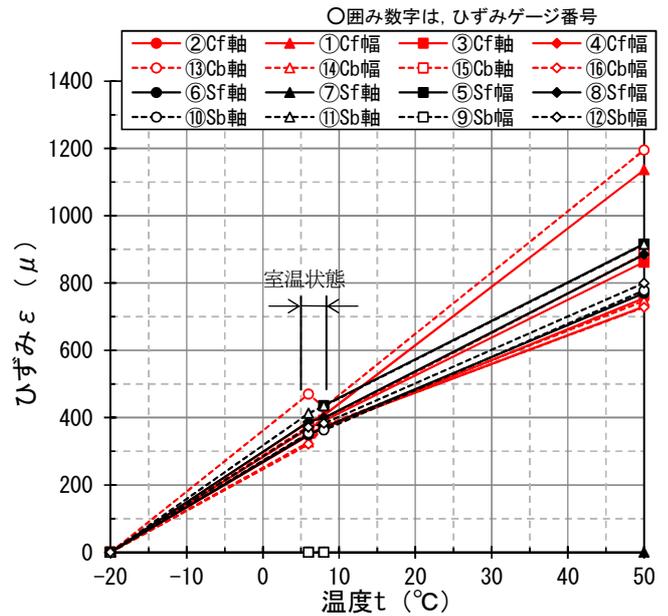


図-2 3PLY 試験体の温度変化とひずみ変化の関係

表-3 各試験体の実測値および理論計算値との比較

試験体	CFRP 板厚 (mm)	λ	実測値 ϵ (μ)		計算値 ϵ_2 (μ)	実測値/計算値 (%)		鋼材 温度応力 σ (N/mm^2)
			CFRP	鋼材		CFRP	鋼材	
3PLY	1.0	0.143	751	808	778	96.5	103.9	22.9
カボコン	1.2	0.186	725	810	749	96.7	108.1	28.8
6PLY	1.5	0.237	804	740	719	111.8	103.0	35.1
9PLY	2.3	0.357	681	757	655	104.0	115.5	48.2