

京橋メンテック(株) 正会員 ○神菌 卓海  
 京橋メンテック(株) 正会員 並木 宏徳  
 明星大学 正会員 鈴木 博之

## 1. はじめに

鋼桁の補強に CFRP を用いた場合、CFRP の線膨張係数は鋼材のそれに比し工学的にゼロと見なし得るほど小さいので気温の変化に伴い大きな温度応力が発生することが知られている。著者らは既に引張り圧縮荷重を受ける部材について、被補強鋼部材と補強 CFRP 部材の断面積を用いて発生する温度応力の大きさを容易に計算できる式を提案<sup>1)</sup>している。

本報告では鋼単純桁を曲げ補強する際の温度応力計算式を提案し、作用荷重により発生する応力と温度応力との間の関係を定式化した。これらの提案式を用いることによって複雑な計算をすることなく現場で温度応力を計算することができるので、CFRP 補強の導入が促進されることが期待される。

## 2. CFRP 補強時の補強効果と温度応力

曲げ荷重が卓越する単純梁の引張り応力を受ける下フランジを CFRP で補強する場合の模式図を図 1 に示す。CFRP は鋼材に比べて引張り強度が大であるので、このモデルのように引張り側フランジの補強に用いられるケースが多く、本邦において最初に CFRP 板補強された鋼橋である桜の目橋<sup>2)</sup>もこの形式であった。

### CFRP補強による温度応力

CFRP を鋼桁下フランジに接着補強した後、 $\Delta T(<0)$ だけ気温が変化した時の温度応力を求める。温度変化による鋼桁のひずみは $\alpha$ を鋼の線膨張係数として拘束が無ければ $\varepsilon_T = \alpha \Delta T$ となる。ところが CFRP は伸縮しないので拘束力 $P(>0)$ が発生する。CFRP の厚さは鋼桁高さに比して無視できるほど薄い仮定のもとで CFRP に発生する応力 $\Delta \sigma_c$ と鋼桁下端に発生する応力 $\Delta \sigma_T$ は次式で示される。

ここで、 $A$ 、 $I$  は鋼桁の断面積および断面二次モーメント、 $P$  は CFRP と鋼桁下端の接触面に発生する拘束力、 $E_c$ 、 $E_s$  は CFRP および鋼の弾性係数、 $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_s$  は拘束力 $P$ により CFRP および鋼桁下端に発生するひずみ、 $y_t$  は鋼桁中立軸から下端までの距離である。

$$\Delta \sigma_c = E_c \varepsilon_c = -P / A_c, \quad \varepsilon_c = -P / A_c E_c,$$

$$\Delta \sigma_T = E_s \varepsilon_s = P / A + M y_t / I = (I + A y_t^2) P / AI, \quad \varepsilon_s = (I + A y_t^2) P / AI E_s \quad (1)$$

発生するひずみは小さいので、剥離やズレが発生していない時に CFRP に発生する拘束力によるひずみと、鋼部材に発生する温度変化によるひずみと拘束力によるひずみの代数和が等しいと置くことができ、

$$\varepsilon_T + \varepsilon_s = \varepsilon_c \quad (2)$$

2)に1)を代入して、CFRP の鋼桁に対する等価断面積比を $\phi = A_c E_c / A E_s$ と置くと、 $P$ および $\Delta \sigma_T$ は次式で示される。

$$P = -\phi A I \alpha \Delta T E_s / \{ \phi (I + A y_t^2) + I \}$$

$$\Delta \sigma_T = -\phi (I + A y_t^2) \alpha \Delta T E_s / \{ (\phi + 1) I + \phi A y_t^2 \} \quad (3)$$

### CFRP補強前後の作用荷重による応力と応力低減量

作用荷重による曲げモーメント $M$ が作用する時、補強前と補強後の鋼桁下端に作用する応力は次式で示される。

$$\sigma_b = M y_t / I, \quad \sigma_{bR} = M y_{tR} / I_R \quad (4)$$

ここで、添え字 $R$ は補強後の値である。 $A_c' = A E_c / E_s$ とおくと、簡単な計算により $y_{tR}$ 、 $I_R$ は、

Takumi KAMIZONO, Hironori NAMIKI, Hiroyuki SUZUKI

kamizono@kyobashi.net

$y_{tR} = A y_t / (A + A_c')$ ,  $I_R = I + A A_c' y_t^2 / (A + A_c')$  となり, これを(4)に代入して次式が得られる.

$$\sigma_{bR} = M y_t / \{ (1 + \phi) I + \phi A y_t^2 \}, \quad \Delta \sigma_{bR} = \sigma_b - \sigma_{bR} = \phi (I + A y_t^2) \sigma_b / \{ (1 + \phi) I + \phi A y_t^2 \} \quad (5)$$

### CFRP補強効果と温度応力との関係

温度変化により発生する拘束力と作用荷重による曲げモーメントがそれぞれ鋼桁に及ぼす影響は異なるが, 同様な形式で示すことができることが判ったので,  $\Gamma = \phi (I + A y_t^2) / \{ (1 + \phi) I + \phi A y_t^2 \}$  と置くと, (3),(5)式は次の簡単な式で示すことができ, 更にその比は $\Gamma$ を含まない形となり桁の形状寸法に依存しない.

$$\Delta \sigma_T = -\Gamma \alpha \Delta T E_s, \quad \Delta \sigma_{bR} = \Gamma \sigma_b, \quad \Delta \sigma_T / \Delta \sigma_{bR} = \alpha \Delta T E_s / \sigma_b \quad (6)$$

$\Gamma$ はCFRP補強された断面諸元から簡単に計算できるので, 現場において補強効果および温度応力を考慮して補強CFRPの断面積を決定することが可能となる.

### 鋼桁断面が対称断面の時

補強される鋼桁の断面が対称断面の時について検討する. 対称断面の断面積と断面二次モーメントを係数 $\beta$ を用いて  $I = \beta A h^2 / 8,$   $A = 8 I / \beta h^2,$   $y_t = h / 2$  で示すと,

$$\Gamma = \phi (\beta + 2) / \{ \phi (\beta + 2) + \beta \} \quad (7)$$

となり, 断面積や断面二次モーメントの絶対値を含まない簡単な式で表すことができる.  $\beta$ は図2に示すように, 2/3 から 2 の間の値を取り, 橋桁断面では $\beta=1$ に近い値を取る. この関係を用いて, 補強CFRPの断面積と $\Delta \sigma_T,$   $\Delta \sigma_{bR}$  および両者の和  $\Sigma \Delta \sigma = \Delta \sigma_{bR} + \Delta \sigma_T$  の関係を $\Delta T = -20^\circ\text{C}$ のときについて計算した例を図3に示す. (6)式から予想されるように $\phi, \beta$ の値によらず, 本例では補強効果の0.48倍が温度応力によって失われる結果となっている. こうしたチャートを作用応力 $\sigma_b$ と予想される温度変化 $\Delta T$ について作成しておく, 現場で容易に補強に必要なCFRP断面積を求めることができる.

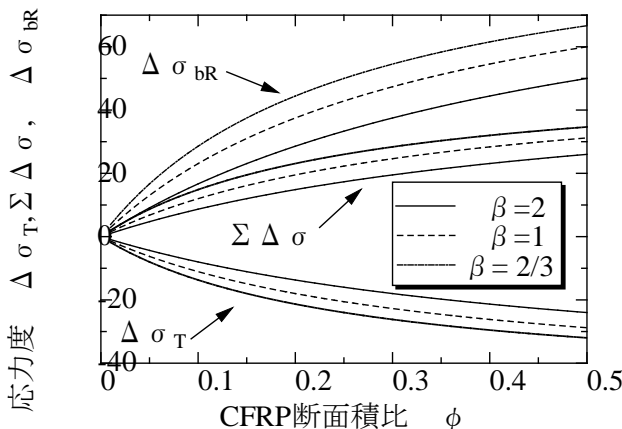


図3 CFRP補強時の温度応力と補強効果  
( $\Delta T = -20^\circ\text{C}$ )

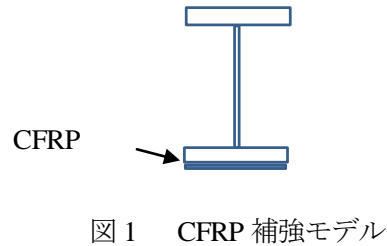


図1 CFRP補強モデル



図2 対称断面と $\beta$ 値

### 3. まとめ

鋼桁をCFRP補強しようとする時, 現場では複雑な計算をすることなく補強効果および温度応力を評価できる方法が求められている. 本報告では曲げ荷重を受ける部材をCFRP補強する場合に, 温度応力および作用荷重による応力の変動を計算する簡便式を提案するとともに, チャートを利用することによって, 補強に必要なCFRP断面積を求めることができることを示した.

### 参考文献

- 1) 神薮卓海他: CFRP補強された引張り鋼部材の温度変化の影響, 土木学会 65 回年次学術講演会, pp861-862, 2010年9月
- 2) 板垣和也他: 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回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集 pp.49-54, 2002.6