

## 鋼桁の CFRP 補強において温度応力が過積載荷重に重畳した時の疲労寿命

京橋メンテック(株) 正会員 ○並木 宏徳 レールテック(株) 正会員 松本 健太郎  
 大鉄工業(株) 正会員 山口 善彰 大鉄工業(株) 正会員 鳥山 正吾  
 明星大学 正会員 鈴木 博之

## 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック複合材料(以下 CFRP と呼ぶ)は線膨張係数が鋼と比較するとゼロに近く、鋼部材を接着補強した場合には気温変化による温度応力が発生する。著者らは鋼部材軸方向補強におけ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、作用応力に対して補強する場合に現場で簡単に補強 CFRP の必要断面積を決定可能とすることができた。

しかし近年橋梁の老朽化に伴い、作用応力の繰返しによる疲労強度不足に対して補強する必要が高まっている。鋼構造物の疲労寿命については、 $\Delta \sigma^m N_f = C_0$  の関係が一般に用いられる。ここで  $\Delta \sigma$  は作用応力範囲、 $N_f$  は疲労寿命、 $C_0$  は定数であり、垂直応力については  $m=3$  が成立するとされている。この関係と修正マイナー則を用いて温度応力が疲労寿命にどのような影響を与えるかについて、すでに著者らは活荷重が一定とみなしうる使用条件においては温度応力の繰返しが活荷重に重畳して作用しても、被補強部材の疲労寿命の低下は僅かであることを見出している<sup>2)</sup>。

表 I. 気温変動量の評価

しかし実際の橋梁に作用する荷重は一定ではなく、過積載荷重が橋桁の疲労寿命に大きい影響を与えることが小塩などの研究<sup>3)</sup>により明らかにされている。温度応力が規定の活荷重に重畳される場合と、大きな過積載荷重に重畳される場合とでは疲労損傷度の大きさが異なる。本報告では過積載荷重が作用する場合、温度応力が被補強鋼部材の疲労損傷度に及ぼす影響を試算し、CFRP 補強を実際の橋梁に適用した場合の疲労被害について検討した。

## 2. 年間気温変化の評価

CFRP 補強された鋼部材の年間温度変化を疲労寿命の評価に用いるための定量化を試みる。

一日の気温変化は最高気温と最低気温の間をおおむねサイン波のように 1 サイクルの波として変動することが多い。そこで、一日の最高、最低気温の間を連続した波とみなして 2012 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までをレインフロー法により計算した結果が表 1. の左表である。この表は構造物に作用する温度応力だけによる疲労被害を計算するに適した表であるが、実際の構造物に主として作用するのは温度応力ではなく、むしろ活荷重による応力である。温度応力と活荷重応力がどのように重畳するかを一義的に決めることはできないが、右表は活荷重との重畳を考慮するため一日、一か月間、一年間の気温変化量をそれぞれ一サイクルとして期間別に頻度をカウントしたものである。この表を用いることによっ

| 気温変動(℃) | 頻度  |
|---------|-----|
| 1       | 2   |
| 2       | 10  |
| 3       | 23  |
| 4       | 26  |
| 5       | 42  |
| 6       | 65  |
| 7       | 64  |
| 8       | 51  |
| 9       | 30  |
| 10      | 19  |
| 11      | 9   |
| 12      | 4   |
| 13      | 8   |
| 14      | 6   |
| 15      | 3   |
| 16      | 1   |
| 17      |     |
| 18      | 1   |
| 37      | 1   |
| 計       | 365 |

| 気温変動(℃) | 日較差の頻度 | 月較差の頻度 | 年較差の頻度 |
|---------|--------|--------|--------|
| 1       | 1      |        |        |
| 2       | 5      |        |        |
| 3       | 15     |        |        |
| 4       | 30     |        |        |
| 5       | 36     |        |        |
| 6       | 62     |        |        |
| 7       | 73     |        |        |
| 8       | 74     |        |        |
| 9       | 32     |        |        |
| 10      | 17     |        |        |
| 11      | 10     |        |        |
| 12      | 8      | 1      |        |
| 13      | 2      | 1      |        |
| 14      |        |        |        |
| 15      |        | 2      |        |
| 16      | 1      | 2      |        |
| 17      |        | 2      |        |
| 18      |        | 2      |        |
| 19      |        | 1      |        |
| 20      |        |        |        |
| 21      |        | 1      |        |
| 37      |        |        | 1      |
| 計       | 366    | 12     | 1      |

キーワード CFRP 補強、温度応力、気温変動、疲労被害、過積載

連絡先 〒536-0022 大阪市城東区鳴野西 2 丁目 2-21 京橋メンテック(株) TEL 06-6961-6173

て、それぞれの期間で最大の活荷重との重畳を考慮することができる。なお両者の三乗平均を計算すると、レインフロー法によるものは  $7.95^{\circ}\text{C}$ 、個別気温変化によるものは  $8.89^{\circ}\text{C}$  となっており、安全側の評価を得るために以下の議論では後者の期間別カウント法を用いる。

一方、道路橋示方書では鋼桁の温度変化を平均気温  $20^{\circ}\text{C}$  の場合  $-10^{\circ}\text{C}$  から  $50^{\circ}\text{C}$  まで  $60^{\circ}\text{C}$  の温度変化を考慮するように定めている。これは鋼桁の温度変化が気温変化より大きいことを考慮したものである。以下の検討において、気温変化のパターンと鋼桁の温度変化のパターンとがほぼ一致すると考えて、鋼桁の温度変化量は表 1. の気温差の  $60/37=1.62$  倍として計算することとする。

## 2. CFRP 補強された鋼桁の温度応力と疲労損傷度

鋼桁を CFRP で軸方向補強した場合、 $\alpha$  を鋼桁の線膨張係数、 $\Delta T$  を温度変化量とした時、CFRP 補強された鋼桁に発生する温度応力  $\sigma_T$  は  $\sigma_T = \lambda \alpha \Delta T E_s / (1 + \lambda)$  で示される<sup>1)</sup>。ここで、CFRP の等価断面面積比  $\lambda = A_c E_c / A_s E_s$ 、 $A_s$  および  $A_c$  は鋼桁および CFRP の断面積、 $E_s$  および  $E_c$  は CFRP および鋼の弾性係数である。

レンジペア法では温度応力による疲労被害への影響は、考える期間に作用する活荷重による応力変動の波の内、極大となる波に温度応力が重畳する場合に疲労被害が最大となる。極大応力範囲は道路橋の場合過積載荷重により発生するものと推定され、小塩等は、全大型車両の 1~2 割の過積載車両によって疲労損傷度の 2 分の 1 が生じるとしている<sup>3)</sup>。

過積載荷重は一定の分布を持つと推定されるが、温度応力の分布との重畳の計算が煩雑になるので、極大荷重が一定として疲労被害を試算する。CFRP の等価断面面積が  $\lambda=0.5$  で、鋼桁の疲労強度等級を D 等級または G 等級の場合について、活荷重の極大荷重による極大応力範囲が  $\sigma_e=100\text{N/mm}^2$  又は  $50\text{N/mm}^2$  から、その 4 倍の  $400\text{N/mm}^2$  又は  $200\text{N/mm}^2$  の応力範囲まで変動させて、疲労損傷度を計算した結果を図 1. に示す。破線は極大荷重による疲労損傷度、一点鎖線は極大荷重に温度応力が重畳した時の疲労損傷度である。全疲労損傷度は両者の差だけ増大し、実線で示すように、極大荷重が大となるほど全疲労損傷度も増大する。極大荷重は無制限に増大することは無く、小塩等の結果を援用して極大荷重による疲労損傷度の最大値が 0.5 とすると、全疲労損傷度は、1.040(D 等級)、1.082(G 等級)となることが示された。

## 3. まとめ

東京都における気温変化パターンを温度応力に換算する方法について検討し、レインフロー法と期間別カウント法とで比較し、後者を安全側の評価として採用した。

実際の橋梁においては過積載荷重が作用するが、これに期間別カウント法の気温変化パターンが重畳した場合の疲労損傷度を計算し、実際の CFRP 補強部材において最も厳しい条件に近いと考えられる、CFRP 等価断面面積比  $\lambda=0.5$  で補強し、温度変化が最大  $60^{\circ}\text{C}$  に達する場合においても疲労損傷度の増加は、D 等級の鋼桁で 4.0%、G 等級の鋼桁で 8.2%に留まることを明らかにした。

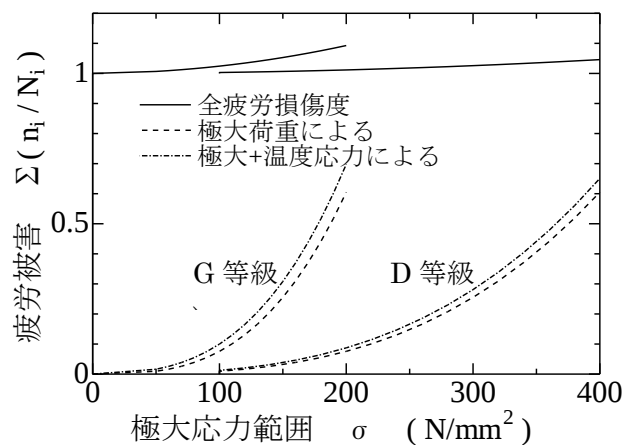


図 1. 過積載荷重による疲労被害( $\lambda=0.5$ )

## 参考文献

- 1) 神菌卓海他：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) 岡本陽介他：鋼部材を CFRP 補強することによる疲労寿命に及ぼす気温変化の影響  
土木学会 65 回年次学術講演会，pp865-866，2010 年 9 月
- 3) 小塩達也他：BWIM による大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価、構造工学論文集、pp. 1055-1062, Vol. 48A (2002 年 3 月)