

プレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板の理論解析

名古屋大学 正会員 ○石川 敏之

1. はじめに

疲労き裂を跨いで CFRP 板を接着する補修に関する研究が多数行われている¹⁾。野阪らは、疲労き裂の開口を抑制するために、プレテンションされた CFRP 板を鋼板に接着し、接着剤が硬化した後に CFRP 板のプレテンションを開放することによって、鋼板にプレストレスを導入する方法を提案している²⁾。この工法では、き裂を閉じる方向にプレストレスが導入されるので、小さな剛性の CFRP 板の接着によって疲労き裂の開口を抑制することができる。しかし、プレストレスの導入によって、CFRP 板の付着端から CFRP 板がはく離するときの作用荷重が、プレストレスが導入されていない場合よりも小さくなる²⁾。また、疲労き裂の縁を起点として CFRP 板がはく離する場合がある。本研究では、CFRP 板接着によって疲労き裂にプレストレスを導入する補修法の基礎的な研究として、図-1 に示すプレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板のはく離挙動の理論解析を行い、CFRP 板がはく離するときの作用応力を最大にするプレテンションひずみを明らかにする。

2. プレストレスされた CFRP 板接着・切断鋼板の力学特性

プレテンションが導入された CFRP 板が切断鋼板の上下面に接着され、CFRP 板と鋼板が完全に接着された後に CFRP 板へ導入されていたプレテンションを開放してプレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板に対して、鋼板応力 σ_s に関する 2 階の基礎微分方程式が次式で与えられる。

$$d^2\sigma_s/dx^2 - c^2\sigma_s = -c^2\sigma_{sn} + c^2(1-\xi_0)E_s\varepsilon_{pre} \quad (1), \quad c = \sqrt{2G_e/[h(1-\xi_0)E_s t_s]} \quad (2), \quad \xi_0 = 1/[1+2E_c t_c/(E_s t_s)] \quad (3)$$
ここに、 G_e ：接着剤のせん断弾性係数、 h ：接着剤の片面厚さ、 t_s 、 t_c ：それぞれ鋼板の板厚および CFRP 板の片面厚さ、 E_s 、 E_c ：それぞれ鋼板および CFRP 板のヤング率、 σ_{sn} ：CFRP 板が接着されていない範囲の鋼板に作用する応力、 ε_{pre} ：CFRP 板に導入されたプレテンションひずみ。ただし、CFRP 板の幅と鋼板の幅は同じである。

(1) 鋼板の切断縁が閉口している場合

鋼板に応力 σ_{sn} が作用しても、プレストレスの導入によって鋼板の切断縁が開口しない場合、図-1 を参照して、 $x=0$ の位置で、鋼板応力が連続する条件($d\sigma_s/dx=0$)および $x=l$ の位置で、 $\sigma_s = \sigma_{sn}$ となる条件に対して式(1)を解くことにより、プレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板に生じる応力 σ_s および接着剤に生じるせん断応力 τ がそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_s = \left\{ \xi_0 + (1-\xi_0) \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} \right\} \sigma_{sn} - (1-\xi_0) E_s \varepsilon_{pre} \left\{ 1 - \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cl)} \right\} \quad (4)$$

$$\tau = ct_s \frac{1-\xi_0}{2} \frac{\sinh(cx)}{\cosh(cl)} (\sigma_{sn} + E_s \varepsilon_{pre}) \quad (5)$$

ここに、 l ：CFRP 板の付着半長さ(図-1 参照)。

CFRP 板に生じる応力 σ_c は次式で与えられる。

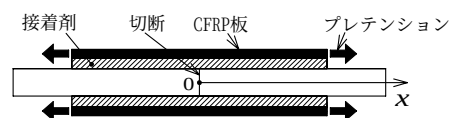
$$\sigma_c = (\sigma_{sn} - \sigma_s) t_s / (2t_c) \quad (6)$$

鋼板の切断縁が閉口している条件は、 $x=0$ において $\sigma_s \leq 0$ である。CFRP 板の接着長さが長い場合、鋼板の切断縁が閉口している場合の作用応力 σ_{sn} は次式で与えられる。

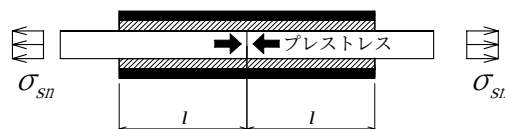
$$\sigma_{sn} \leq (1-\xi) E_s \varepsilon_{pre} / \xi_0 = 2E_c t_c \varepsilon_{pre} / t_s \quad (7)$$

(2) 鋼板の切断縁が開口している場合

鋼板の切断縁が開口している場合、鋼板の切断縁では鋼板応力が伝達されない。したがって、図-1 を参照して、 $x=0$ 、 l の位置でそれぞれ、 $\sigma_s = 0$ 、 σ_{sn} になる条件に対して式(1)を解くことにより、鋼板の切断縁が開口している場合の鋼板に生じる応力 σ_s および接着剤に生じるせん断応力 τ がそれぞれ次式で与えられる。



(a) プレテンションされた CFRP 板の接着



(b) プレテンションの解放による切断鋼板へのプレストレスの導入

図-1 プレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板

キーワード CFRP 板, 切断鋼板, プレストレス, はく離せん断応力

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 C1-2(651) TEL 052-789-4514 FAX 052-789-1674

$$\sigma_s = \left[\left\{ \frac{1-\xi_0}{\sinh(cl)} + \frac{\xi_0}{\tanh(cl)} \right\} \sinh(cx) - \xi_0 \cosh(cx) + \xi_0 \right] \sigma_{sn} + \left[\left\{ \frac{1}{\sinh(cl)} - \frac{1}{\tanh(cl)} \right\} \sinh(cx) - \cosh(cx) + 1 \right] (1-\xi_0) E_s \varepsilon_{pre} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{ct_s}{2} \left[\left\{ \frac{1-\xi_0}{\sinh(cl)} + \frac{\xi_0}{\tanh(cl)} \right\} \cosh(cx) - \xi_0 \sinh(cx) \right] \sigma_{sn} + \left[\left\{ \frac{1}{\sinh(cl)} - \frac{1}{\tanh(cl)} \right\} \cosh(cx) + \sinh(cx) \right] (1-\xi_0) E_s \varepsilon_{pre} \quad (9)$$

(3) プレストレスされた CFRP 板接着・切断鋼板の σ_s , σ_c および τ の分布

$E_s=200\text{GPa}$, $E_c=290\text{GPa}$, $G_e=0.83\text{GPa}$, $t_s=19\text{mm}$, $t_c=2\text{mm}$, $h=0.5\text{mm}$, $\varepsilon_{pre}=637\mu$, $l=150\text{mm}$ に対して, プレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板に生じる応力 σ_s , CFRP 板に生じる応力 σ_c および接着剤に生じるせん断応力 τ を図-2, 3 に示す. この条件では, 式(7)から算出されるように, 作用応力 σ_{sn} が 38.9MPa より高くなると, 鋼板の切断縁が開く. したがって, 図には, 鋼板の切断縁が閉口している CFRP 板のプレテンションひずみを開放した直後の状態 ($\sigma_{sn}=0$) および鋼板の切断縁が開口している状態 ($\sigma_{sn}=50\text{MPa}$) に対する応力分布が示されている. 図-2 から, $\sigma_{sn}=0$ の場合, σ_s および σ_c は, それぞれ圧縮および引張応力であることが分かる. $\sigma_{sn}=50\text{MPa}$ の場合, 鋼板の切断縁が開口しているため, 切断縁 ($x=0$) で σ_s は 0 になり, 切断縁近傍で CFRP 板が負担する断面力が増えるので σ_c が増加している. 図-3 から, せん断応力 τ は, 鋼板の切断縁が開くまでは, CFRP 板の付着端 ($x=150\text{mm}$) のみが高くなっているが, 鋼板の切断縁が開くと鋼板の切断縁 ($x=0$) の τ も上昇する. CFRP 板の付着端 ($x=l$) に生じるせん断応力 τ_e は, CFRP 板の付着半長さ l が長くなると, 鋼板の切断縁の開閉口に関わらず次式に収束する.

$$\tau_e = ct_s(1-\xi_0)(\sigma_{sn} + E_s \varepsilon_{pre})/2 \quad (10)$$

一方, l が長くなると, 鋼板の切断縁 ($x=0$) に生じるせん断応力 τ_d は次式に収束する.

$$\tau_d = ct_s \{ \xi_0 \sigma_{sn} - (1-\xi_0) E_s \varepsilon_{pre} \} / 2 \quad (\sigma_{sn} > (1-\xi_0) E_s \varepsilon_{pre} / \xi_0) \quad (11)$$

3. CFRP 板のはく離が防止される σ_{sn} と $E_c t_c / (E_s t_s)$ の範囲

CFRP 板のはく離は, τ_e あるいは τ_d によって引き起こされる³⁾. CFRP 板の付着端および鋼板の切断縁において, CFRP 板のはく離に対する抵抗強度 T が互いに等しいと仮定してプレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板のはく離挙動を解明する. 先に述べた条件と $T=30\text{MPa}$ に対して, $\tau_e \leq T$ および $\tau_d \leq T$ を満足する σ_{sn} と $E_c t_c / (E_s t_s)$ の領域を図-4 に示す. 図の斜線の範囲が, プレストレスが導入された CFRP 板接着・切断鋼板から CFRP 板のはく離挙動が防止される σ_{sn} と $E_c t_c / (E_s t_s)$ の領域である. $\tau_e = T$ と $\tau_d = T$ の曲線の交点 A で作用応力 σ_{sn} が最大になる. したがって, CFRP 板がはく離するときの作用応力 σ_{sn} を最大にするプレテンションひずみ ε_{pre} が, 式(10)の右辺と式(11)の右辺を等値し, 整理して次式で与えられる.

$$\varepsilon_{pre} = 2(2\xi_0 - 1)T / \{ cE_s t_s (1-\xi_0) \} \quad (12)$$

参考文献

- 1) 例えば, 鈴木博之, 永崎央陽, 遠藤勇一, 池田圭一: き裂を有する材の炭素繊維強化樹脂板による補強, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp.683-688, 2000.
- 2) 上田耕太郎, 野阪克義: 炭素繊維強化樹脂板を用いた鋼板亀裂補修法に関する基礎的研究, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, I-263, pp.521-522, 2007.
- 3) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp.239-249, 2001.

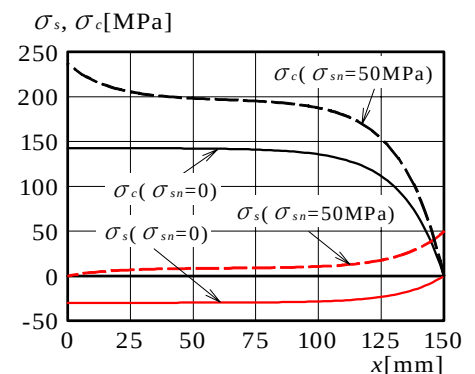


図-2 σ_s および σ_c の分布

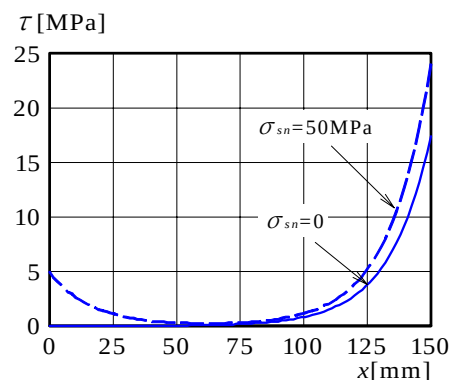


図-3 τ の分布

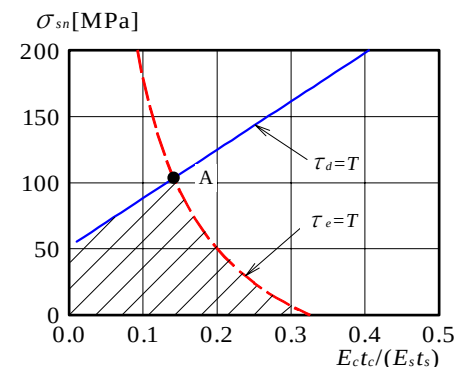


図-4 CFRP 板のはく離を防止する σ_{sn} と $E_c t_c / (E_s t_s)$ の領域