

CFRP 板接着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減

名古屋大学 正会員 石川敏之, 大阪大学 正会員 大倉一郎, 学生員 西田貴裕
日本国土開発 正会員 横田季彦, 日鉄コンポジット 正会員 斉藤誠

1. 序論

現在, 鋼構造部材の補修・補強へ, 炭素繊維強化樹脂板(以下, CFRP 板と呼ぶ)が適用され始めている. CFRP 板による鋼構造部材の補修・補強では, CFRP 板付着端の接着剤に高いせん断応力すなわち, はく離せん断応力が生じるため, 作用荷重の大きさによっては CFRP 板がはく離する場合がある. したがって CFRP 板のはく離を防止するためにはく離せん断応力の低減が望まれる.

はく離せん断応力を低減させる方法の一つとして, CFRP 板付着端近傍に低弾性の接着剤を用いる方法がある. 本研究では, CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板に対して, 鋼板の応力と接着剤に生じるせん断応力を明らかにする. さらに, CFRP 板接着鋼板の引張試験を行い, CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が使用されることによりはく離せん断応力が低減されることを示す.

2. 鋼板応力と接着剤に生じるせん断応力

2 種類の接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板の側面を図-1 に示す. CFRP 板と鋼板は引張力のみを伝え, 接着剤はせん断力のみを伝えたと仮定して, 微小区間の鋼板, CFRP 板および接着剤の力のつりあいから, 鋼板応力 σ_s に対する微分方程式が導出される¹⁾. $x=0$ において鋼板応力が対称となる条件, $x=l_1$ において, 鋼板に生じるひずみが連続する条件および接着剤に生じるせん断ひずみが連続する条件, さらに $x=l$ において, $\sigma_s = \sigma_{sn}$ となる条件に対して, 接着剤 1 および 2 の範囲の 2 つの微分方程式を解き, σ_s が次式で与えられる.

$$\sigma_s = \begin{cases} \{A_1 \cosh(c_1 x) + \xi_0\} \sigma_{sn} & (0 \leq x \leq l_1) \\ B_1 \sinh\{c_1 (x-l_1)\sqrt{n}\} + B_2 \cosh\{c_1 (x-l_1)\sqrt{n}\} + \xi_0 \} \sigma_{sn} & (l_1 \leq x \leq l) \end{cases} \quad (1)$$

接着剤に生じるせん断応力は次式で与えられる.

$$\tau = \begin{cases} \frac{c_1 t_s}{2} A_1 \sinh(c_1 x) \sigma_{sn} & (0 \leq x \leq l_1) \\ \frac{nc_1 t_s}{2} [B_1 \cosh\{c_1 (x-l_1)\sqrt{n}\} + B_2 \sinh\{c_1 (x-l_1)\sqrt{n}\}] \sigma_{sn} & (l_1 \leq x \leq l) \end{cases} \quad (2)$$

ここに, $A_1 = (1 - \xi_0) / [Z \cosh\{c_1 l(1 - \omega)\} \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})]$, $B_1 = [\sqrt{n}(1 - \xi_0) \tanh\{c_1 l(1 - \omega)\}] / [Z \cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})]$, $B_2 = (1 - \xi_0) / \{\cosh(c_1 l \omega \sqrt{n})\}$, $Z = \sqrt{n} \tanh\{c_1 l(1 - \omega)\} \tanh(c_1 l \omega \sqrt{n}) + 1$, $\omega = l_2 / l$, $n = G_{e2} / G_{e1}$, $c_1 = \sqrt{2G_{e1} / \{hE_s t_s (1 - \xi_0)\}}$, $\xi_0 = 1 / \{1 + 2E_c t_c / (E_s t_s)\}$, σ_s は鋼板に生じる応力, σ_{sn} は CFRP 板が接着されていない部分の鋼板に生じる応力, E_s , E_c はそれぞれ, 鋼板および CFRP 板のヤング係数, G_{e1} , G_{e2} はそれぞれ, 接着剤 1 と 2 のせん断弾性係数および, t_s , t_c , h , l_1 , l_2 , l は図-1 に示される寸法である.

$\xi_0 = 0.5$, $c_1 l = 5$, $n = 0.25$ に対して, 式(1)から計算される鋼板応力の分布を図-2 に示す. 縦軸は σ_s / σ_{sn} を示し, 横軸は x/l を示している. 接着剤 1 の部分の σ_s / σ_{sn} が実線で, 接着剤 2 の部分の σ_s / σ_{sn} が破線で示されている. 図の $\omega = 0$ は, 接着剤 1 によって CFRP 板が全面にわたって接着された場合の鋼板応力である. 図-2 から分かるように, 接着剤 1 よりも弾性係数が小さい接着剤 2 において, 接着剤 1 の範囲と比べて, 鋼板応力の低下が緩やかになる.

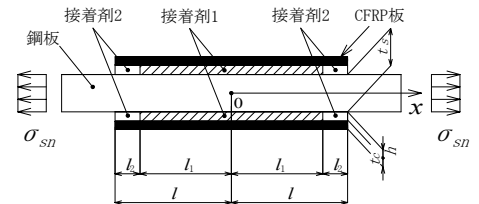


図-1 2 種類の接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板

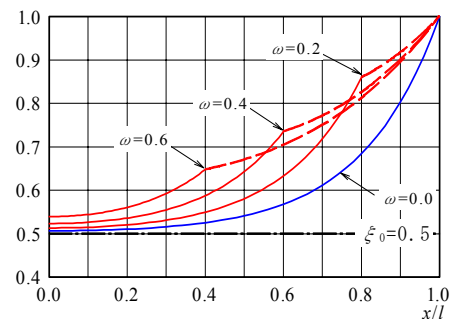


図-2 鋼板に生じる応力の分布

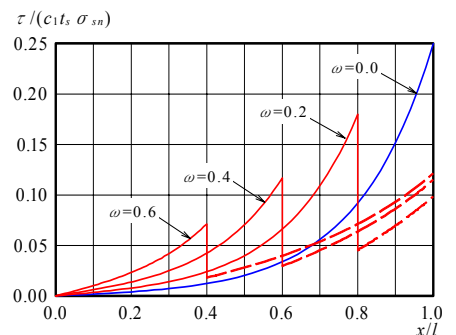


図-3 接着剤に生じるせん断応力の分布

表-1 t_a , t_s , t_c , h , $E_c t_c / (E_s t_s)$, ξ_0 , n , ω , $c_1 l$, 試験時の試験片温度および σ_{sn} の値

試験片		t_s [mm]	t_c [mm]	h [mm]	$\frac{E_c t_c}{E_s t_s}$	ξ_0	n	ω	$c_1 l$	試験片 温度[°C]	σ_{sn} [MPa]
CE	1	8.57	6.58	0.20	0.52	0.491	0.451	0.214	14.5	29.5	378.9 以上
	2	8.55	6.56	0.21	0.52	0.491	0.451	0.214	14.3	27.5	378.9 以上
C	1	8.58	6.56	0.20	0.52	0.492	—	0.000	14.7	28.6	225.5
	2	8.58	6.53	0.19	0.51	0.493	—	0.000	15.2	27.1	219.5

$\xi_0=0.5$, $c_1 l=5$, $n=0.25$ に対して, 式(2)から計算される接着剤に生じるせん断応力 τ の分布を図-3 に示す. 縦軸は, τ を $c_1 t_s \sigma_{sn}$ で除した値を示している. 接着剤 1 の部分の $\tau/(c_1 t_s \sigma_{sn})$ が実線で, 接着剤 2 の部分の $\tau/(c_1 t_s \sigma_{sn})$ が破線で示されている. 図の $\omega=0$ は, 接着剤 1 によって CFRP 板が全面にわたって接着された場合の接着剤に生じるせん断応力である. 図-3 から分かるように, 接着剤 1 のせん断応力は, 接着剤 1 と 2 の境界($x=l_1$)で最大となり, 接着剤 2 のせん断応力は, CFRP 板の付着端($x=l$)で最大となる.

3. CFRP 板接着鋼板の引張試験

試験片を図-4 に示す. 試験片 CE は, CFRP 板付着端近傍の接着剤 2 のせん断弾性係数が接着剤 1 のそれよりも小さい試験片である. 試験片 C は, 接着剤 1 によって CFRP 板が全面にわたって接着された鋼板である. 幅 50 mm の鋼板(SM490)の中央に, $\xi_0=0.5$ となるように, 幅 50 mm, 厚さ 2.07 mm の CFRP 板を 3 枚接着している. 鋼板のヤング係数は 209.3GPa, CFRP 板 1 枚のヤング係数は 147.3GPa, 接着剤 1 と 2 のせん断弾性係数はそれぞれ 0.993, 0.449GPa であった. 計測した t_a , t_s , t_c および h の値ならびに計算した $E_c t_c / (E_s t_s)$, ξ_0 , n , ω および $c_1 l$ の値を表-1 に示す.

4. 試験結果

試験片 CE, C それぞれ 2 体ずつ引張試験を行った. 試験片 CE-1, C-1 について, 載荷荷重を鋼板の断面積で除した値 σ_{sn} が 100MPa のときの鋼板応力 σ_s と鋼板中央からの距離 x の関係を図-5 に示す. 鋼板の両側面のひずみの平均値に鋼板のヤング係数を乗じて σ_s を計算した. 図には, 表-1 の値を用いて, 式(1)から計算される, 鋼板応力の分布も示されている. 図-5 から分かるように, $x=0$ mm において, σ_s はほぼ理論値まで低下しているが, CFRP 板付着端近傍において試験結果は式(1)から算出される応力分布から少し離れている. この原因は, 重ね貼りされた CFRP 板間の接着層のせん断遅れに起因するものと考えられる.

試験片 CE では, 鋼板の応力が降伏応力 $\sigma_Y (=378.9\text{MPa})$ に達した後 CFRP 板がはく離した. 試験片 C では, 鋼板の応力が σ_Y に達する前に CFRP 板がはく離した. はく離荷重を鋼板の断面積で除した値 σ_{sn} を表-1 に示す.

$\sigma_{sn}=100\text{MPa}$ に対して, 式(2)から計算される最大のせん断応力, すなわちはく離せん断応力は, 試験片 CE では $\tau_{CE} = 15.6\text{MPa}$ ($x=140$ mm), 試験片 C では $\tau_C = 22.8\text{MPa}$ ($x=140$ mm)である. したがって試験片 C に対する試験片 CE のはく離せん断応力の低減率は $\tau_{CE}/\tau_C = 0.68$ となる. すなわち試験片 CE のはく離荷重は試験片 C のはく離荷重の 1.47 倍になると予測される. しかし, 表-1 から, 試験片 C のはく離荷重に対する試験片 CE のはく離荷重の比は 1.6 倍以上である. このように, 試験結果は理論値のはく離荷重の比よりも高い. この違いは, 鋼板の応力分布の違いの場合と同様に, 重ね貼りされた CFRP 板間の接着層の存在に起因するものと考えられる.

5. 結論

本研究では, CFRP 板付着端近傍に低弾性接着剤が用いられた CFRP 板接着鋼板に対して, 鋼板の応力と接着剤に生じるせん断応力を明らかにした. そして, CFRP 板接着鋼板の引張試験を行い, CFRP 板付着端近傍へ低弾性接着剤が使用されることによって, はく離せん断応力が低減されることが引張試験により示された.

【参考文献】1)大倉ら: 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.

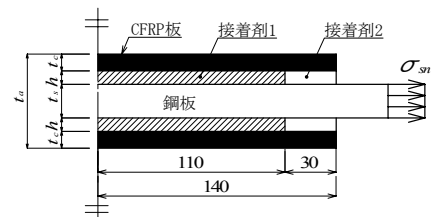


図-4 CFRP 板接着鋼板

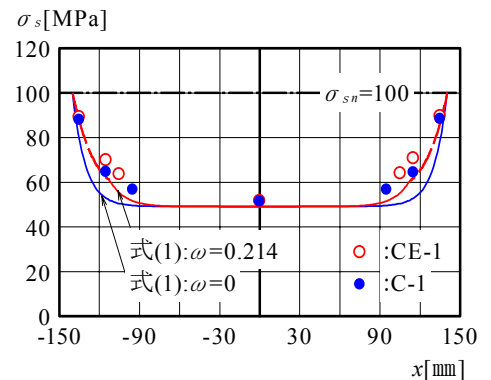


図-5 CFRP 板接着鋼板に生じる応力