ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート付着鋼板の応力とはく離せん断応力

大阪大学大学院　正会員　○大倉一郎
関西電力㈱　正会員　喜多伸明
大阪大学大学院　正会員　石川敏之

1．はじめに

近年, 炭素繊維シートおよび炭素繊維プレートなどの繊維材料が, 新しい鋼構造物の補修・補強材として注目されている. 繊維材料による補修・補強は, 特別な機材や大掛かりな足場を必要としないため, 施工が簡易になる. しかし, 繊維材料を用いた補修・補強では, 部材から繊維材料がはく離する場合があるため, はく離を防止することが重要である. 部材からの繊維材料のはく離は, 繊維材料の付着端の接着剤に生じる高いせん断応力（以後, これをはく離せん断応力と呼ぶ）が原因である[1]. 著者らは, 炭素繊維プレート付着鋼板について, はく離せん断応力を低減させるために, **図-1** に示す鋼板と炭素繊維プレートとの間にガラス繊維シートを挿入する方法を考えた. 本論文では, ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート付着鋼板に生じる応力およびはく離せん断応力の特性を明らかにし, ガラス繊維シートを挿入することにより, はく離せん断応力を低下させることができることを示す.

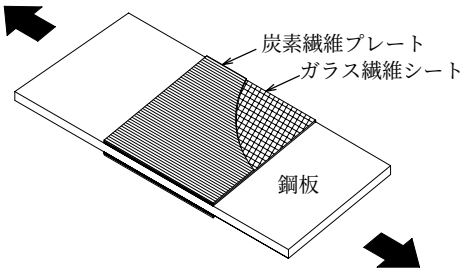

図-1　ガラス繊維シートの挿入

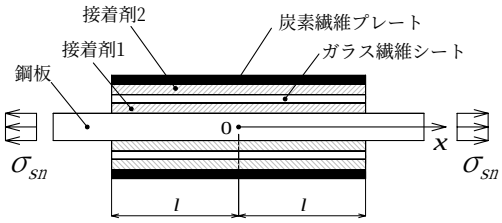

図-2　ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート付着鋼板

2．鋼板に生じる応力および接着剤に生じるせん断応力

図-2 に示す, 鋼板に引張応力 σ_{sn} が作用する, ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート付着鋼板に対して, **図-3** に示す微小長さ dx の力のつりあいから, 次の 4 階微分方程式が与えられる.

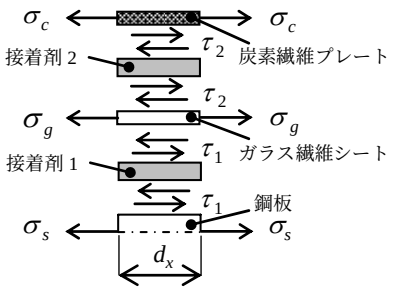

図-3　力のつりあい

$$\frac{d^4\sigma_s}{dx^4} - 2R^2\frac{d^2\sigma_s}{dx^2} + S^4\sigma_s = \frac{\xi_0 S^4}{1+F}\sigma_{sn} \qquad (1)$$

ここに, $R = c_1 r$, $S = c_1 s$, $s = \left\{\frac{\xi_0(1-\xi_0)(1+F)}{DF}\right\}^{0.25}$,

$c_1 = \sqrt{\frac{G_{e1}}{h_1}}\sqrt{\frac{2}{1-\xi_0}}\frac{1}{\sqrt{E_s t_s}}$, $\xi_0 = \frac{E_s t_s}{E_s t_s + 2E_c t_c}$, $D = \frac{h_2}{h_1}\frac{G_{e1}}{G_{e2}}$, $F = \frac{2E_g t_g}{E_s t_s + 2E_c t_c}$,

$r = \sqrt{\frac{1-\xi_0}{2F}\left[\xi_0 + F + \frac{(1-\xi_0+F)\xi_0}{D(1-\xi_0)}\right]}$, t_s, t_c, t_g：それぞれ鋼板の板厚, 炭素繊維プレートの片面の厚さとガラス繊維シートの片面の厚さ, σ_s, σ_c, σ_g：それぞれ, 鋼板, 炭素繊維プレートとガラス繊維シートに生じる応力, E_s, E_c, E_g：それぞれ, 鋼板, 炭素繊維プレートとガラス繊維シートのヤング率, x：炭素繊維プレート付着中心を原点とする載荷方向の位置, G_{e1}, G_{e2}：それぞれ, 接着剤 1 と 2 のせん断弾性係数, h_1, h_2：それぞれ, 接着剤 1 と 2 の片面厚さ.

式(1)の 4 階微分方程式の一般解に対して, $x = \pm l$ で, $\sigma_s = \sigma_{sn}$, $\sigma_g = \sigma_c = 0$ となる条件を満たす係数を算出して, 次式に示す鋼板に生じる応力 σ_s および接着剤 1 と 2 に生じるせん断応力 τ_1, τ_2 がそれぞれ与えられる.

$$\sigma_s = \left[A_1\cosh(\alpha c_1 x) + A_3\cosh(\beta c_1 x) + \frac{\xi_0}{1+F}\right]\sigma_{sn} \quad (3), \qquad \tau_1 = \frac{c_1 t_s}{2}\left[A_1\alpha\sinh(\alpha c_1 x) + A_3\beta\sinh(\beta c_1 x)\right]\sigma_{sn} \quad (4)$$

キーワード：炭素繊維プレート, ガラス繊維シート, 鋼板, はく離せん断応力, 補修, 接着剤
連絡先：〒565-0871　大阪府吹田市山田丘 2-1　TEL 06-6879-7620　FAX 06-6879-7621

$$\tau_2 = \frac{c_1 t_s}{2}\left[\left(\frac{\xi_0+F}{\xi_0} - \frac{F}{(1-\xi_0)\xi_0}\alpha^2\right)A_1\alpha\sinh(\alpha c_1 x) + \left(\frac{\xi_0+F}{\xi_0} - \frac{F}{(1-\xi_0)\xi_0}\beta^2\right)A_3\beta\sinh(\beta c_1 x)\right]\sigma_{sn} \quad (5)$$

ここに，l：炭素繊維プレートの付着半長さ，$A_1 = \dfrac{-1}{(\alpha^2-\beta^2)\cosh(\alpha c_1 l)}\left[(1-\dfrac{\xi_0}{F+1})\beta^2 - 1 + \xi_0\right]$，

$$A_3 = \frac{1}{(\alpha^2-\beta^2)\cosh(\beta c_1 l)}\left[(1-\frac{\xi_0}{F+1})\alpha^2 - 1 + \xi_0\right]$$

3．鋼板に生じる応力

鋼板に生じる応力は炭素繊維プレートの付着長さの中央の位置で最も低下する．この位置の鋼板に生じる応力の低下の度合いを示すパラメータとして，次の応力低下率ξを定義する．

$$\xi = \frac{\sigma_{s(x=0)}}{\sigma_{sn}} = A_1 + A_3 + \frac{\xi_0}{1+F} \quad (6)$$

ξと$c_1 l$の関係を**図-4**に示す．図には，参考文献 1)のガラス繊維シートが挿入されていないξも示している．$c_1 l$が小さい範囲では，ガラス繊維シートを挿入することにより，鋼板の応力は参考文献 1)の値まで低下しないが，$c_1 l$の値が 10 より大きくなれば，参考文献 1)の値まで，鋼板の応力が低下する．

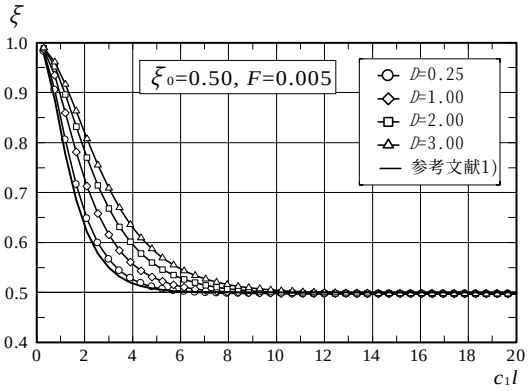

図-4　鋼板応力の低下率

4．接着剤 1 と 2 のはく離せん断応力

式(4)，(5)で$x = l$とおいて，はく離せん断応力が与えられる．$c_1 l$が 3 より大きいとき，$\tanh(c_1 l)$　1 であるので，はく離せん断応力はそれぞれ次式となる．

$$\tau_1 = \frac{c_1 t_s}{2\sqrt{2(r^2+s^2)}}\left[(1-\frac{\xi_0}{1+F})s^2 + 1 - \xi_0\right]\sigma_{sn} \quad (7)$$

$$\tau_2 = \frac{c_1 t_s}{2\xi_0\sqrt{2(r^2+s^2)}}\left[\frac{F}{1-\xi_0}\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)s^4 + \left(\xi_0+F\right)\left(1-\frac{\xi_0}{1+F}\right)s^2 - F\left(2r^2+s^2\right) + \left(\xi_0+F\right)\left(1-\xi_0\right)\right]\sigma_{sn} \quad (8)$$

τ_2/τ_1とξ_0の関係を**図-5**に示す．この図より，τ_2/τ_1の値が全て 1 未満であるため，τ_2はτ_1と比較して小さい．

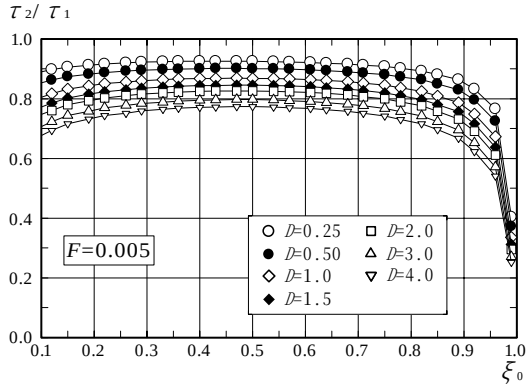

図-5　τ_2/τ_1とξ_0の関係

$\tau_1/(c_1 t_s)$とξ_0の関係を**図-6**に示す．この図には，参考文献 1)のガラス繊維シートが挿入されていない場合のはく離せん断応力の値も示している．**図-6** から分かるように，$\tau_1/(c_1 t_s)$は参考文献 1)の値よりも小さい．

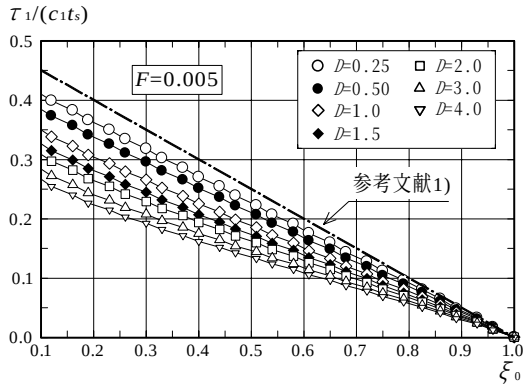

図-6　$\tau_1/(c_1 t_s)$とξ_0の関係

5．まとめ

ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート付着鋼板に生じる応力およびはく離せん断応力に関して，以下の結論を得た．

1) $c_1 l$の値が 10 より大きくなれば，ガラス繊維シートが挿入された炭素繊維プレート付着鋼板に生じる応力は，ガラス繊維シートが挿入されていない炭素繊維プレート付着鋼板に生じる応力まで低下する．
2) 鋼板と炭素繊維プレートの間にガラス繊維シートを挿入することにより，はく離せん断応力を低下させることができる．

参考文献 1)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.