ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板の力学特性

大阪大学　正会員　○石川　敏之
大阪大学　学生員　小村　啓太
大阪大学　正会員　大倉　一郎

１．はじめに

近年，炭素繊維プレートが鋼構造物の補修・補強に用いられ始めている．この工法では，構造物に作用する応力状態によっては，炭素繊維プレートが鋼構造物からはく離する場合がある．著者らは，炭素繊維プレートの鋼板からのはく離の原因となる，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）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，ガラス繊維シート挿入･炭素繊維プレート接着連続鋼板の力学特性を明らかにした．さらにガラス繊維シートを挿入することにより，はく離せん断応力が低減することを示した[1)]．次に，この方法を，亀裂を跨いで炭素繊維プレートを接着する補修へ適用することを考えて，炭素繊維プレートを用いた亀裂補修の基本となる，**図－2** に示すガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板について，その力学特性を明らかにする．

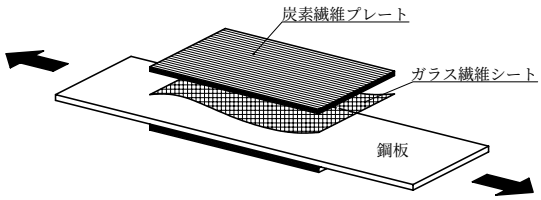

図-1　繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着工法

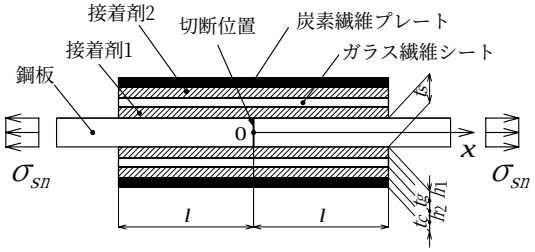

図-2　繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板

２．基礎微分方程式とその解

図－3 に示す微小長さ *dx* の力のつりあいから，次の 4 階微分方程式を得る．

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

ここに，$c=\sqrt{G_{e1}/h_1}\sqrt{2/(1-\xi)}\Big/\sqrt{E_s t_s}$，$r=\sqrt{(1-\xi)[\xi+F+(1-\xi+F)\xi/\{D(1-\xi)\}]/2F}$，$s=\left\{\xi(1-\xi)(1+F)/(DF)\right\}^{0.25}$，$\xi=E_s t_s/(E_s t_s+2E_c t_c)$，$F=2E_g t_g/(E_s t_s+2E_c t_c)$，$D=h_2 G_{e1}/(h_1 G_{e2})$，$t_s$，$t_c$，$t_g$：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 階微分方程式の解に対して，$x=0$ において $\sigma_s=0$ および炭素繊維プレートとガラス繊維シートのひずみの適合条件 $(\sigma_g/E_g=\sigma_c/E_c)$，$x=l$ において $\sigma_s=\sigma_{sn}$ および $\sigma_g=0$ となるように係数 A_1～A_4 を導出して，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 がそれぞれ次式で与えられる．

$$\sigma_s=\left\{A_1\cosh(\alpha cx)+A_2\sinh(\alpha cx)+A_3\cosh(\beta cx)+A_4\sinh(\beta cx)+\xi/(1+F)\right\}\sigma_{sn} \qquad (2)$$

$$\tau_1=\left\{A_1\alpha\sinh(\alpha cx)+A_2\alpha\cosh(\alpha cx)+A_3\beta\sinh(\beta cx)+A_4\beta\cosh(\beta cx)\right\}ct_s\sigma_{sn}/2 \qquad (3)$$

$$\tau_2=\left\{Y_\alpha A_1\alpha\sinh(\alpha cx)+Y_\alpha A_2\alpha\cosh(\alpha cx)+Y_\beta A_3\beta\sinh(\beta cx)+Y_\beta A_3\beta\cosh(\beta cx)\right\}ct_s\sigma_{sn}/2 \qquad (4)$$

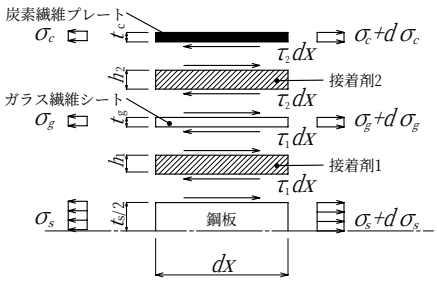

図-3　微小区間 *dx* の力のつりあい

ここに，$Y_\alpha=(\xi+F)\Big/\xi-F\alpha^2/\{(1-\xi)\xi\}$，$Y_\beta=(\xi+F)\Big/\xi-F\beta^2/\{(1-\xi)\xi\}$，$l$：炭素繊維プレートの付着半長さ，

$$A_1=\frac{-1}{\alpha^2-\beta^2}\left\{\frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi}-\frac{\xi}{F+1}\beta^2\right\} \qquad (5),$$

$$A_2=\frac{-1}{(\alpha^2-\beta^2)\sinh(\alpha cl)}\left[(1-\frac{\xi}{F+1})\beta^2-1+\xi-\left\{\frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi}-\frac{\xi}{F+1}\beta^2\right\}\cosh(\alpha cl)\right] \qquad (6)$$

キーワード：炭素繊維プレート，ガラス繊維シート，切断鋼板，はく離せん断応力，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

$$A_3=\frac{1}{\alpha^2-\beta^2}\left\{\frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi}-\frac{\xi}{F+1}\alpha^2\right\} \quad (7), \qquad A_4=\frac{1}{(\alpha^2-\beta^2)\sinh(\beta cl)}\left[(1-\frac{\xi}{F+1})\alpha^2-1+\xi-\left\{\frac{(1-\xi)\xi}{1+F-\xi}-\frac{\xi}{F+1}\alpha^2\right\}\cosh(\beta cl)\right] \quad (8)$$

３．はく離せん断応力

３．１　接着剤に生じるせん断応力

式(5)～(8)を式(3)と式(4)へ代入して，接着剤に生じるせん断応力τ_1およびτ_2が与えられる．ξ=0.5，F=0.05，D=1.0，cl=10に対する，$\tau_1/(ct_s\sigma_{sn})$－x/l関係および$\tau_2/(ct_s\sigma_{sn})$－x/l関係を**図－4** に示す．この図には，ガラス繊維シート未挿入の場合の接着剤に生じる$\tau/(ct_s\sigma_{sn})$－x/l関係[2)]も示されている．この図から分かるように，τ_1，τ_2ともに，鋼板が切断されている位置(x=0)と炭素繊維プレートの付着端($x=l$)の接着剤に大きなせん断応力が発生する．さらに，鋼板が切断されている位置ならびに炭素繊維プレートの付着端において，τ_1がτ_2よりも大きいことが分かる．炭素繊維プレートの付着長さが十分長い場合，炭素繊維プレート付着端のはく離せん断応力τ_{e1}とτ_{e2}は，連続鋼板において，炭素繊維プレート付着端の接着剤１と２に生じるはく離せん断応力[2)]とそれぞれ一致する．

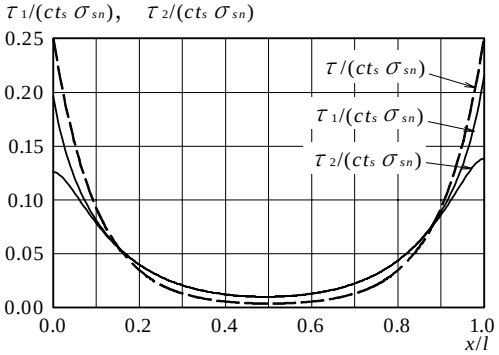

図-4　接着剤１と２に生じるせん断応力の分布

３．２　鋼板切断位置のはく離せん断応力

αclとβclの値が３以上になると，$\tanh(\alpha cl)\cong 1$，$\tanh(\beta cl)\cong 1$となり，鋼板切断位置の接着剤１と２に生じるせん断応力τ_{o1}とτ_{o2}は，それぞれ次式となる．

$$\tau_{o1}=\frac{ct_s\xi}{2\sqrt{2(r^2+s^2)}}\left(\frac{1}{1+F}s^2+\frac{1-\xi}{1+F-\xi}\right)\sigma_{sn} \quad (9)$$

$$\tau_{o2}=\frac{ct_s}{2\sqrt{2(r^2+s^2)}}\left\{\frac{F}{(1-\xi)(1+F)}s^4+\frac{F+\xi}{1+F}s^2-\frac{F}{1+F-\xi}\left(2r^2+s^2\right)+\frac{(F+\xi)(1-\xi)}{1+F-\xi}\right\}\sigma_{sn} \quad (10)$$

これらの式から，$\tau_{o1}/(ct_s\sigma_{sn})$および$\tau_{o1}/(ct_s\sigma_{sn})$が，無次元パラメータ$\xi$，$F$および$D$で表されることが分かる．$\xi$は鋼板と炭素繊維プレートの引張剛性の和に対する鋼板の引張剛性の比，Fは鋼板と炭素繊維プレートの引張剛性の和に対するガラス繊維シートの引張剛性の比，Dは接着剤１と２に関する無次元パラメータである．３．１節で述べたように，鋼板切断位置においてτ_{o1}はτ_{o2}よりも大きい．そこで，ガラス繊維シートの挿入がτ_{o1}に与える影響に着目して，ξ=0.5 の場合，式(9)から導かれる，$\tau_{o1}/(ct_s\sigma_{sn})$と$E_gt_g/(E_ct_c)$の関係を**図－5** に示す．この図には，ガラス繊維シート未挿入の場合の鋼板切断位置のはく離せん断応力τ_oの値も示している[2)]．**図－5** から，ガラス繊維シートを挿入することによりガラス繊維シート未挿入の場合よりもはく離せん断応力が低下することが分かる．挿入するガラス繊維シートの引張剛性が炭素繊維プレートの引張剛性と比べて非常に小さい場合，はく離せん断応力τ_{o1}は小さくなる．ガラス繊維シートの引張剛性が大きくなると，τ_{o1}の値は大きくなるが，極値を迎えた後，低下することが分かる．さらに，Dの値が大きくなるほど，τ_{o1}は小さくなる．

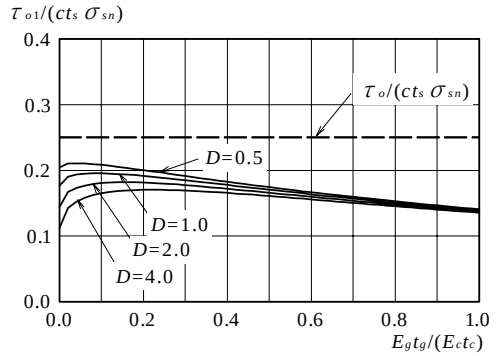

図-5　τ_{o1}と$E_gt_g/(E_ct_c)$の関係

４．まとめ

本研究では，ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板の力学特性を解明し，ガラス繊維シート挿入・炭素繊維プレート接着切断鋼板の鋼板切断位置のはく離せん断応力が，ガラス繊維シート未挿入の場合のはく離せん断応力よりも常に小さくなることを明らかにした．

参考文献

1)石川敏之，大倉一郎，喜多伸明：繊維シートが挿入された炭素繊維プレート接着鋼板の剥離せん断応力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1317-1326，2006.
2)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.689-696，2000.