

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○河津 公太  
大阪大学大学院工学研究科 正会員 大倉 一郎

1. はじめに

近年、橋梁などの鋼構造物を補修・補強する場合、炭素繊維強化樹脂板（以後、CFRP 板と呼ぶ）が用いられるようになってきた。これまで、CFRP 板による鋼板補強に関する研究は数多く報告されているが<sup>1)</sup>、腐食による断面欠損を有する鋼板に対して、CFRP 板による補強に関する研究はあまり報告されていない<sup>2)</sup>。本研究は、従来の微分方程式<sup>1)</sup>を解くことによって与えられる値をはるかに超えるせん断応力が断面欠損部近傍に生じることを示す。

2. 理論式

図-1 に示すように、CFRP 板が上下に対称に接着された、断面欠損を有する鋼板に引張応力  $\sigma_{sn}$  が作用している。断面欠損部の接着剤の厚さは健全部のそれに比較して大きいので、断面欠損部の鋼板から CFRP 板に伝達される力は小さいと仮定して、断面欠損部の接着剤の存在を無視する。この様なモデルに対して、文献 1) で定式化された微分方程式を解くことにより、次の諸式が与えられる。

$$\sigma_{sd} = \frac{t_s}{t_{sd}} (\xi + A_1) \sigma_{sn} \quad (1)$$

$$\sigma_s = [\xi + A_1 \cosh\{c(x-l_d)\} + A_2 \sinh\{c(x-l_d)\}] \sigma_{sn} \quad (2)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{t_c}{2t_s} \sigma_{sn} \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{t_s}{2t_c} [1 - \xi - A_1 \cosh\{c(x-l_d)\} - A_2 \sinh\{c(x-l_d)\}] \sigma_{sn} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{ct_s}{2} [A_1 \sinh\{c(x-l_d)\} + A_2 \cosh\{c(x-l_d)\}] \sigma_{sn} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{1}{\cosh(cl_s) - cl_d \xi \left( \frac{t_s}{t_{sd}} - 1 \right) \tanh(cl_s)}$$

$$A_2 = \frac{1}{1 - \xi + cl_d \left( \frac{t_s}{t_{sd}} + \frac{\xi}{1 - \xi} \right) \tanh(cl_s)}$$

$$A_2 = \frac{1 - \xi}{\sinh(cl_s)} - \frac{A_1}{\tanh(cl_s)}$$

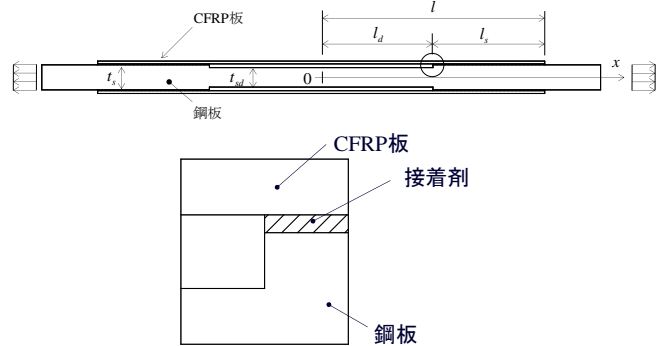


図-1 引張応力を受ける CFRP 板接着鋼板

$$c = \lambda \sqrt{\frac{2}{1 - \xi}}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{G_g}{E_s h t_s}}, \quad \xi = \frac{E_s t_s}{2E_c t_c + E_s t_s}$$

ここに、 $\sigma_s$  : 健全部の鋼板応力、 $\sigma_{sd}$  : 断面欠損部の鋼板応力、 $\sigma_c$  : 健全部の CFRP 板に生じる応力、 $\sigma_{cd}$  : 断面欠損部の CFRP 板に生じる応力、 $\tau$  : 接着剤に生じるせん断応力、 $E_s$  : 鋼板のヤング率、 $t_s$  : 健全部の鋼板の板厚、 $t_{sd}$  : 断面欠損部の鋼板の板厚、 $E_c$  : CFRP 板のヤング率、 $t_c$  : CFRP 板の板厚、 $G_g$  : 接着剤のせん断弾性係数、 $h$  : 接着剤の厚さ。

3. FEM 解析

CFRP 板が接着された、断面欠損を有する鋼板の応力を、汎用有限要素解析プログラム DIANA によって調べる。  $t_s=9\text{mm}$ 、 $t_{sd}=4.5\text{mm}$ 、 $l_d=l_s=40\text{mm}$  とし、材料定数を表-1 に示す。鋼板と接着剤に対して 4 節点平面応力要素、CFRP 板に対して 2 節点トラス

表-1 材料定数

|                 |           |      |
|-----------------|-----------|------|
| 鋼板              | 板厚(mm)    | 9    |
|                 | ヤング率(GPa) | 200  |
|                 | ポアソン比     | 0.3  |
| CFRP板           | 板厚(mm)    | 1    |
|                 | ヤング率(GPa) | 165  |
| 接着剤<br>(エポキシ樹脂) | 厚さ(mm)    | 0.32 |
|                 | ヤング率(GPa) | 3.2  |
|                 | ポアソン比     | 0.35 |

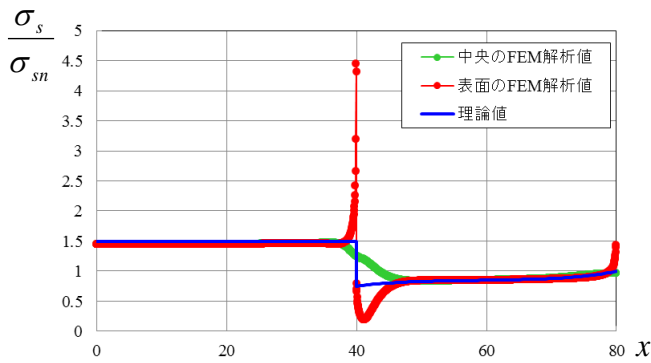


図-3  $\sigma_s/\sigma_{sn}$  分布

要素を使用する．接着剤部分の要素の大きさは  $0.04\text{mm} \times 0.04\text{mm}$  である．

#### 4. 理論値と FEM 解析値との比較

$\sigma_s/\sigma_{sn}$  に関して理論値 [式(1)と(2)] と FEM 解析値との比較を図-3 に示す．断面欠損部において，FEM 解析値の鋼板表面の応力が理論値と大きく異なっている．

$\sigma_c/\sigma_{sn}$  に関して理論値 [式(3)と(4)] と FEM 解析値との比較を図-4 に示す．断面欠損部近傍の健全部において，理論値と FEM 解析値は少し異なるが，これを除けば，理論値は FEM 解析値に合っている．

$\tau/\sigma_{sn}$  に関して理論値 [式(5)] と FEM 解析値との比較を図-5 に示す．FEM 解析値は，鋼板との界面の位置の接着剤に生じるせん断応力である．断面欠損部近傍の接着剤の FEM 解析値は理論値と比較してかなり高い．すなわち，理論値は，断面欠損部近傍のせん断応力を正しく評価していない．

断面欠損部近傍の接着剤に生じるせん断応力  $\tau/\sigma_{sn}$  分布を図-6 に示す．同図には，鋼板との界面，中央面，CFRP 板との界面の位置の接着剤に生じる FEM 解析値ならびに理論値 [式(5)] が与えられている．断面欠損部から約  $0.5\text{mm}$  離れると，各位置のせん断応力は等しくなるが，約  $0.5\text{mm}$  以内では，断面欠損部に向かって，中央面と CFRP 板との界面の位置のせん断応力は低下に転じるが，鋼板との界面の位置のせん断応力は増加を続ける．有限要素の大きさをさらに小さくすれば，鋼板との界面の応力はさらに増加することが予想される．この様に，断面欠損部では，従来の微分方程式を解くことによって与えられるせん断応力では評価されない，大きなせん断応力が生じる．

#### 5. 結論

従来の微分方程式を解くことによって与えられる理論値は，断面欠損部近傍を除いて，FEM 解析値に一致する．しかし，断面欠損部から約  $0.5\text{mm}$  以内の接着剤に生じるせん断応力に関しては，微分方程式

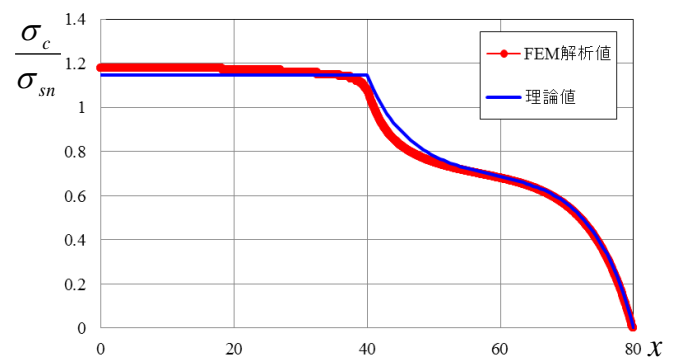


図-4  $\sigma_c/\sigma_{sn}$  分布

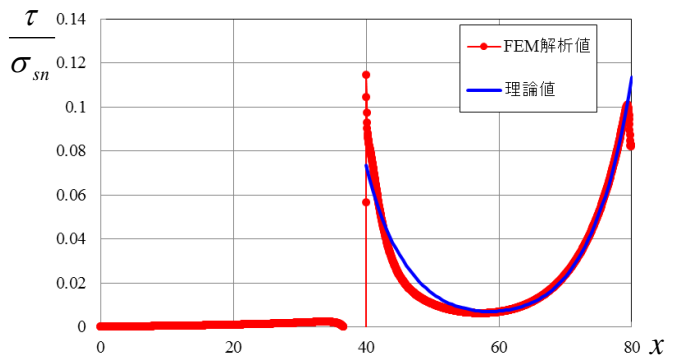


図-5  $\tau/\sigma_{sn}$  分布

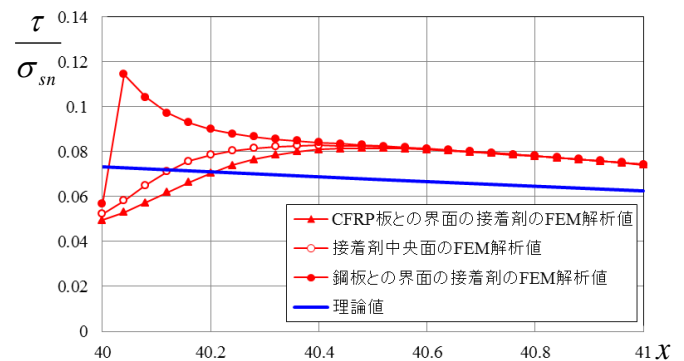


図-6 断面欠損部近傍の  $\tau/\sigma_{sn}$  分布

から得られる値をはるかに超えるせん断応力が発生する．

#### 参考文献

- 1) 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松下泰三：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．
- 2) 石川敏之，北根安雄：断面欠損を有する鋼板の接着補修に必要な CFRP 板の長さおよび板厚の決定方法，応用力学論文集，Vol.13，pp.911-920，2010．