

炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と剥離せん断応力

三菱重工業(株) 正会員 福井唯夫
大阪大学大学院 正会員 大倉一郎

1. はじめに

コンクリート構造物の補修・補強に炭素繊維シートが適用された事例は既にあるが、鋼構造物の補修・補強に炭素繊維シートが適用された事例は著者等が知る限りではない。

本研究ではこれまでに、炭素繊維シートが付着された鋼板の引張り試験と疲労試験を実施し、炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と鋼板の疲労寿命改善効果を明らかにした¹⁾。今回は炭素繊維シートが付着された鋼板に対する有限要素解析より、鋼板応力の低下率と付着長さの関係および炭素繊維シートの剥離を支配するせん断応力を明らかにする。

2. 有限要素解析

解析モデルを図-1に示す。鋼板が連続している場合と中央で切断されている場合に対して応力解析を行なった。解析モデルは2次元弾性体で、1/4が解析対象である。要素分割を図-2に示す。エポキシ樹脂中に炭素繊維シートを1層ずつ等間隔に分散させた。炭素繊維シート付着端近傍と鋼板の切断縁近傍は要素を細かく分割した。鋼板とエポキシ樹脂には4節点平面応力要素、炭素繊維シートには2次元トラス要素を用いた。

鋼板応力について、解析結果と試験結果の比較を図-3に示す。解析結果と試験結果の分布傾向は一致しており、解析結果は試験結果のうちの平均値に近い値を示している。

3. 鋼板応力の低下率と付着長さの関係

連続している鋼板において、弾性域の炭素繊維シートによる鋼板応力の低下率 α は次式で与えられる。

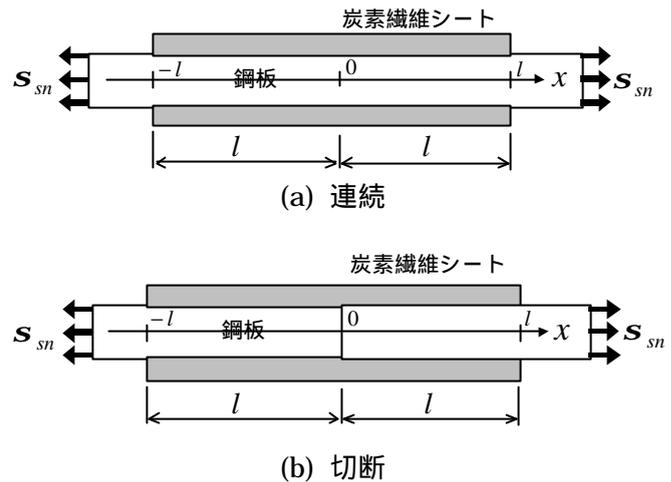


図-1 解析モデル

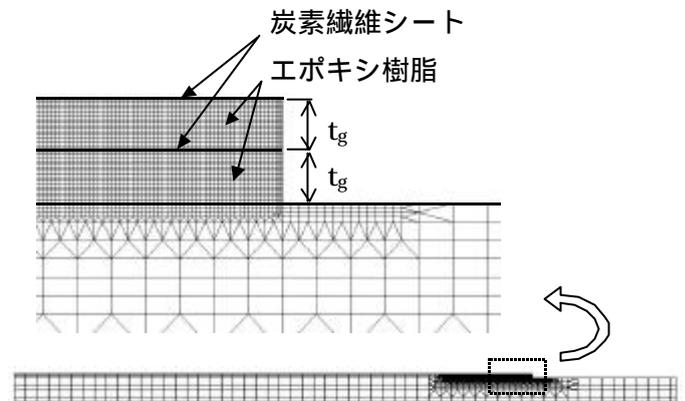
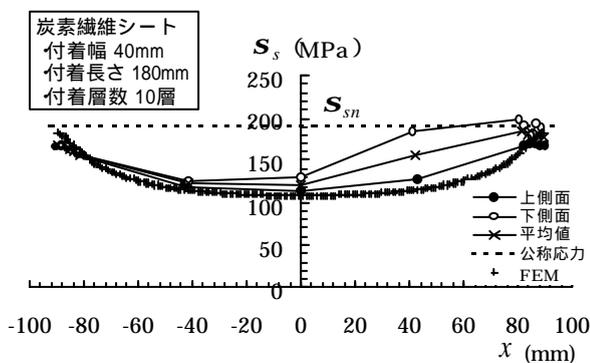
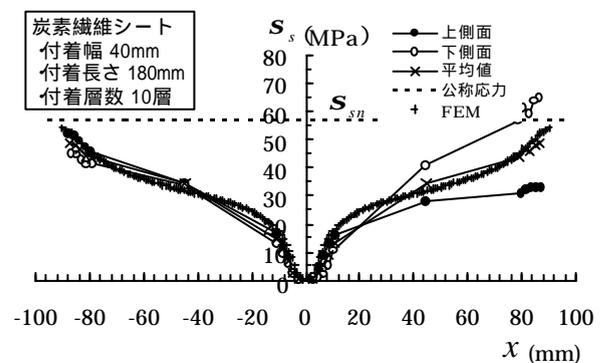


図-2 要素分割〔連続〕



(a) 連続



(b) 切断

図-3 鋼板の応力分布

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{s}_{s0}}{\mathbf{s}_{sn}} = \mathbf{x}_0 + \frac{1 - \mathbf{x}_0}{\cosh cl} \quad (1)$$

$$\text{ここに } \mathbf{x}_0 = E_s t_s / (2E_c t_c + E_s t_s) \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\frac{G_g}{E_s}} \sqrt{\frac{2}{1 - \mathbf{x}_0}} \frac{1}{\sqrt{h t_s}} \quad (3)$$

$$h = (0.3m + 0.7) t_g \quad (4)$$

であり、 \mathbf{s}_{s0} = 炭素繊維シート付着区間中央の鋼板応力； \mathbf{s}_{sn} = 鋼板の公称応力； E_s 、 E_c = それぞれ鋼板と炭素繊維シートのヤング率； t_s = 鋼板の厚さ； t_c = 鋼板の片面の炭素繊維シートの全厚（ $= m t_{c0}$ ）； m = 炭素繊維シートの層数； t_{c0} = 炭素繊維シート 1 層の換算厚さ； G_g = エポキシ樹脂のせん断弾性係数； h = エポキシ樹脂の等価厚さ； t_g = 炭素繊維シート間のエポキシ樹脂の厚さ。

接着継手の微分方程式の解を有限要素解析の結果で補正することによりエポキシ樹脂の等価厚さ h は与えられる。 \mathbf{x}_0 は炭素繊維シートと鋼板が完全合成されていると仮定した場合の鋼板応力の低下率である。

鋼板応力の低下率 \mathbf{x} と炭素繊維シートの付着半長さ l の関係を図 - 4 に示す。図には試験結果も示してある。式(1)が与える低下率と試験結果の分布傾向は一致しており、 l が増加するに従って \mathbf{x} は \mathbf{x}_0 に漸近する。

4. 剥離せん断応力

鋼板が連続している場合と切断されている場合について、エポキシ樹脂と鋼板の界面に生じるせん断応力 t と垂直応力 s_y の解析結果を図 - 5 に示す。鋼板が連続の場合は炭素繊維シート付着端の少し内側、切断されている場合は鋼板の切断縁の少し内側でそれぞれ t が最大値をとる。引張り試験で炭素繊維シートが剥離したときのせん断応力の最大値 t_{max} と炭素繊維シートの付着半長さ l の関係を図 - 6 に示す。鋼板が連続の場合と切断の場合の各場合で、 t_{max} は炭素繊維シートの付着層数によらず同じである。

しかし切断の t_{max} は連続のそれよりかなり大きい。図 - 5 に示すように、連続では炭素繊維シート付着端の近傍の s_y が引張りであるが、切断では鋼板切断縁の近傍の s_y が圧縮である。したがって、 s_y が引張りであるか圧縮であるかの違いによって、 t_{max} の値が異なるを考える。

以上より、 t_{max} は炭素繊維シートの剥離を支配するパラメータであるが、炭素繊維シート付着端と鋼板の切断縁とでは t_{max} の値が異なることに注意しなければならない。

6. まとめ

- ・ 鋼板応力の低下率 \mathbf{x} は式(1)で与えられる。
- ・ 炭素繊維シートの剥離は t_{max} によって支配され、その値は鋼板が連続と切断で異なる。

参考文献

1) 大倉一郎, 福井唯夫, 松上泰三: 炭素繊維シートの鋼板疲労亀裂補修への適用, 第 29 回 FRP シンポジウム講演論文集, pp. 133-136, 日本材料学会, 2000.

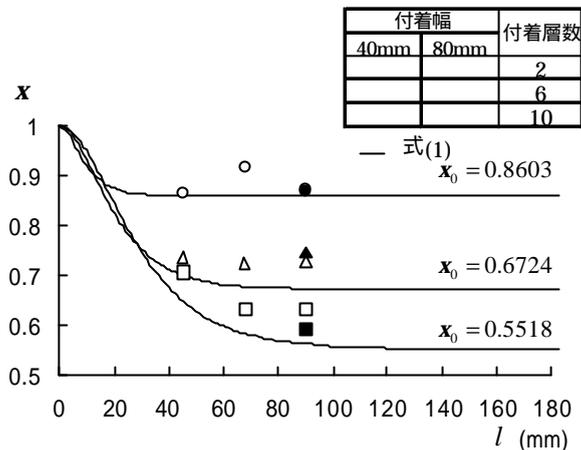
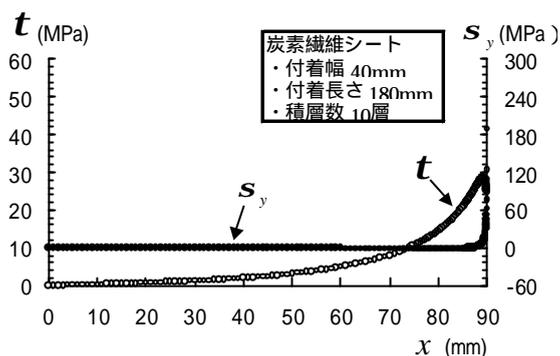
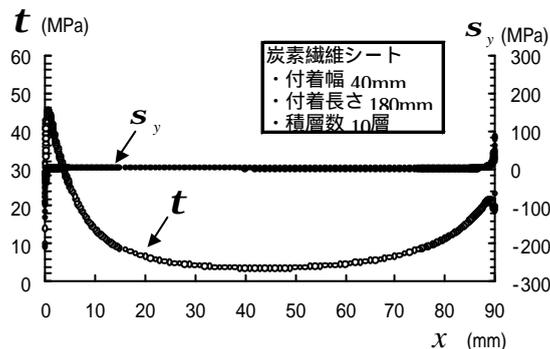


図 - 4 \mathbf{x} と l の関係



(a) 連続



(b) 切断

図 - 5 界面上のせん断応力と垂直応力

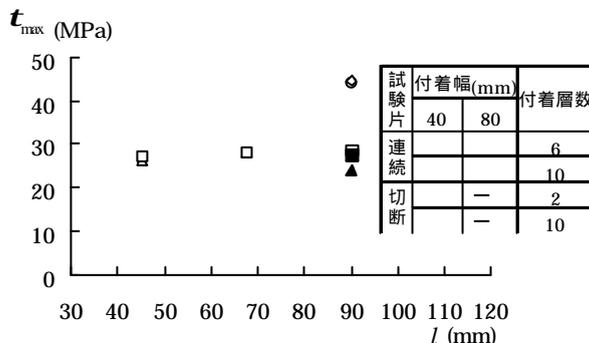


図 - 6 t_{max} と l の関係