

立命館大学理工学部 学生員 ○前川 仁

立命館大学理工学部 正会員 野阪 克義

1. はじめに

鋼構造物の補修・補強材料として、炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastic 以下 CFRP)が注目されており、プレストレス力を導入した CFRP 板を接着し、鋼材に圧縮応力を導入する工法がより大きな補強効果をもたらすとして提案されている。しかしながら、未だ確立した工法でなく、あまり採用に至っていないのが現状である。本研究では、基礎的データを得ることを目的として、亀裂を有した鋼 I 形桁に対する CFRP 板接着補強法およびプレストレス CFRP 板接着補強法の補強効果を有限要素解析により比較・検討した。

2. 解析概要

2.1. 解析モデル

解析モデル概要図を図-1、モデル寸法を表-1、材料特性を表-2 に示す。鋼 I 形桁は二軸対称とし、形状および荷重状態の対称性を考慮し、全体の 1/4 をモデル化した。各モデルのウェブ中央から亀裂中央までの距離 e_c を変化させた。荷重形式は 2 点荷重とし、荷重位置と支点は中立軸上に設置、等曲げ区間のウェブ下端から $h_w/6$ での応力が 100N/mm^2 になるように荷重した。プレストレス導入補強は、CFRP 板に初期荷重として 50N/mm^2 、 100N/mm^2 の引張応力を導入し接着することで、ウェブに圧縮応力を導入する。亀裂を再現するためにサーフェイスを用いたモデルを考案した。解析モデルとは別にサーフェイスを亀裂部に密着するように設置し、鋼桁モデルとサーフェイスとの間に接触条件を設定することで、プレストレス力が作用した圧縮時には亀裂部に干渉し、荷重時の引張応力には干渉しないようにした。

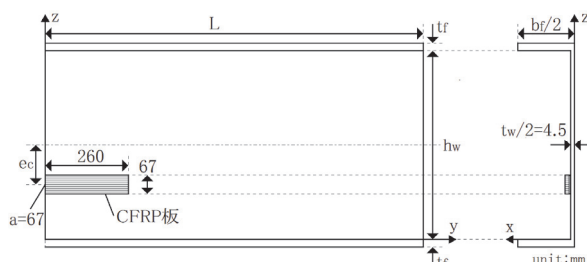


図-1 解析モデル概要図

表-1 解析モデル寸法

モデル長 L (mm)	ウェブ高 h _w (mm)	ウェブ厚 t _w (mm)	フランジ幅 b _f (mm)	フランジ厚 t _f (mm)
1800	450	9	150	12
1800	900	9	200	12
5400	1800	9	700	18

表-2 材料特性

	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
鋼材	206,000	0.3
接着剤	1,500	0.4
CFRP	280,000	0.3

2.2. 応力拡大係数

各モデルの補強効果を比べる指標として応力拡大係数を用いる。応力拡大係数は、亀裂端部からの距離 x と距離に対し垂直な応力 σ_y の関係式(1)と、図-2 のように解析結果から得られる亀裂部付近の応力分布から求めた累乗近似式(2)とを比較することで算出した。

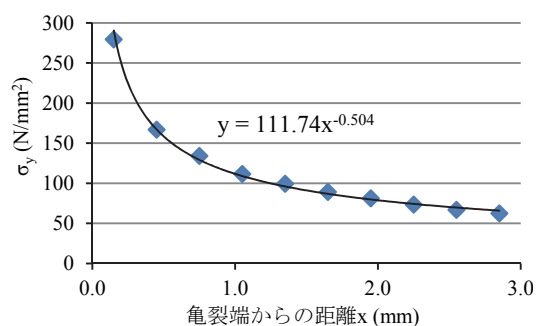
$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} x^{-0.5} \quad (1)$$

$$\sigma_y = 111.74x^{-0.504} \quad (2)$$

ここで式(1)と式(2)を同じと仮定すると、

$$\frac{K_{an}}{\sqrt{2\pi}} = 111.74 \quad (3)$$

となり、 K_{an} を求めることができる。以上の方法でウェブ

図-2 K_{an} 算出用グラフ (900-200-120 モデル)

厚方向に分割した要素毎の K_{an} を求め、平均したものをそのモデルの解析値とする。また、式(2)では、 x の指数が -0.5 になっていないが、本検討では係数の部分にのみ着目することとした。

3. 解析結果および考察

横軸に e_c/h_w ，縦軸に補強効果を取り整理したグラフを図-3，4に示す。補強効果とは，補強後の応力拡大係数を補強前の応力拡大係数で割った値である。図-4中のA，Bは 50 N/mm^2 ， 100 N/mm^2 のプレストレスを導入した時に与えられる圧縮応力と，载荷による引張応力と相殺され作用応力が 0 N/mm^2 になる位置，Cはウェブ下端から $h_w/6$ の位置を示す。

各補強時の $e_c/h_w = 0$ に関しては，亀裂，接着層，CFRP板に圧縮と引張が同時に作用しているため他のモデルとは状況が異なり同様に評価するのが困難であるが， K_{an} の算出には同じ方法を用いた。

図-3より，補強効果は e_c/h_w の値に関わらず $0.46 \sim 0.50$ とほぼ一定の値を示している。つまりCFRP板接着補強法に関しては，切欠き位置や鋼桁のサイズと関係なく補強効果は一定であることが分かる。

ここで，補強効果について考察する。応力拡大係数 K の理論値は式(4)，(5)とされている。

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a/2} \quad (4)$$

$$F = (1 - 0.025\xi^2 + 0.06\xi^4)\sqrt{\sec(\pi\xi/2)} \quad (5)$$

ここで， $\xi = a/2h_w$

式(4)において K が減少する場合， F または σ ，あるいは両方の値が減少した，の3パターンが考えられる。補強前後で F の式が変化しないと仮定すると，全てのモデルにおいて $F \cong 1$ となり，補強前後で変化しないことになる。 σ については，亀裂下端部の応力値 σ と K が比例関係であることが確認できた。このため， K の減少は σ の減少が原因だと推測できる。

図-4より，プレストレス力により，縦軸の値が減少，すなわち補強効果が上がったが，亀裂位置によって割合が異なった。これは，プレストレス力による σ の減少が一定値なのに対し，ウェブの応力分布はウェブ下端に近づくにつれ大きくなっていることが原因だと思われる。図-4中の線A，Bに着目すると， $e_c/h_w = 0$ を除いて $e_c/h_w < A$ ，Bにおいて K が算出できなかったことから， $e_c/h_w < A$ ，Bでは亀裂部に圧縮応力が作用し，亀裂が開口しない状態であるため，補強効果としては十分ではないかと考える。

図-5には，プレストレス力の有無による亀裂下端部の応力差（減少）の平均値を減少平均応力 σ_D として示す。図より，モデルサイズ毎に導入したプレストレス力と減少平均応力 σ_D との関係式は次のようになった。

$$(h_w - b_f) = (450-150)\text{モデル} \quad \sigma_D = 0.30P_s \quad (6)$$

$$= (900-200)\text{モデル} \quad \sigma_D = 0.28P_s \quad (7)$$

$$= (1800-700)\text{モデル} \quad \sigma_D = 0.26P_s \quad (8)$$

4. おわりに

本研究成果より，プレストレスCFRP板接着補強法はCFRP板接着補強法より補強効果が上がったが，ウェブ位置によって変化することが分かった。また，導入プレストレス力と減少応力との関係式を求めたが，モデルサイズによって異なったため，これらを考慮して理論式を検討する必要がある。

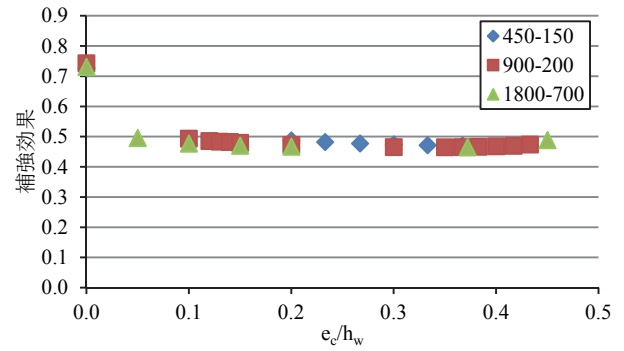


図-3 CFRP 板接着補強時の補強効果

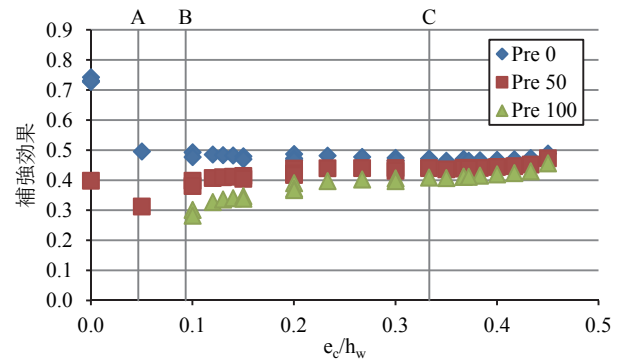


図-4 プレストレス CFRP 板接着補強時の補強効果

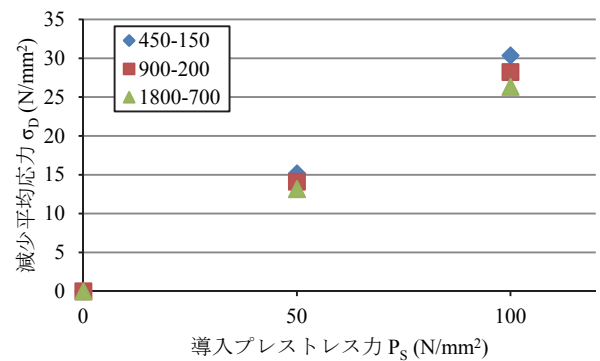


図-5 導入プレストレス力-減少平均応力関係