

炭素繊維シート接着工法における最大積層数に関する実験的検討

An experimental study on the maximum number of layers in the bonding method of carbon fiber sheet

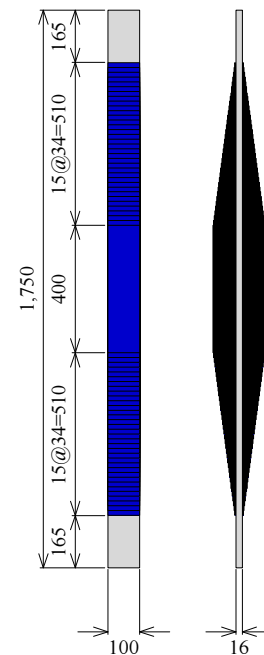
長野工業高等専門学校	○正会員	奥山 雄介 (Yusuke OKUYAMA)
長岡技術科学大学	正会員	宮下 剛 (Takeshi MIYASHITA)
新日鉄住金マテリアルズ	正会員	秀熊 佑哉 (Yuya HIDEKUMA)
新日鉄住金マテリアルズ	正会員	小林 朗 (Akira KOBAYASHI)
高速度道路総合技術研究所	正会員	広瀬 剛 (Takeshi HIROSE)
ものづくり大学	正会員	大垣 賀津雄 (Kazuo OHGAKI)

1. 序 論

我が国で用いられている鋼構造物の多くは高度経済成長期に建設されたものであり、供用年数の経過に伴い、腐食や疲労等による劣化が顕在化している。腐食損傷が伴う箇所では、板厚減少での部材の座屈等による性能低下、疲労箇所では、繰り返し荷重による亀裂損傷などが挙げられる。そのため、鋼構造物の補修・補強対策が重視されており、対策工法の一つとして炭素繊維シートを用いた補修工法がある。これまでの鋼構造物に対する炭素繊維シート補修に関する研究では、断面の軸方向応力や垂直応力に対する補強を対象としてきた¹⁾。加えて、腹板の座屈変形に対する補強効果を検証する実験も行われてきた。これらの研究成果を基に、設計・施工マニュアル²⁾が規定されている。

現行マニュアルでは、板厚 9 mm の鋼板の両面に炭素繊維シートを最大で 20 層 (鋼材厚 9 mm 相当) 積層して引張試験および圧縮試験を実施し、シートが剥離せず、鋼と炭素繊維シートの合成断面として挙動すること、軸方向応力および座屈変形での補強効果を発揮することを確認している^{3)~6)}。これより、炭素繊維シート接着工法の最大積層数は高弾性型炭素繊維、300 g/m² 目付けタイプで 20 層と規定されており、20 層以上の積層が必要な補修時には別途実験等で適用性の検証を必要としている。ただし、実際の鋼構造物では腐食による断面欠損量が多く、現行マニュアルの最大積層数 20 層では対応できない場合も多い。

そこで、本研究では、炭素繊維シート接着工法における最大積層数に関する検討を行う。具体的には、実構造物で、16 mm 相当までの減肉を対象とできるように、実験ならびに解析検討を行う。実験検討では、設計・施工マニュアルの改訂に向けて、平鋼板の両面に炭素繊維シートを接着添付し、一軸引張試験と一軸圧縮試験を実施して、強度、ひずみ分布、破壊状況等を確認する。解析検討では、数値計算手法を用いて、応力低減係数を中心に検討を行う。さらに、補強後の長期耐久性向上を目的として、鋼材面に有機ジンクリッチ系塗料を塗布してから補強したケースについても検討する。ここでは、紙面の都合上、引張試験および数値解析結果について報告する。



(a) 引張試験

図-1 試験体形状

2. 実験概要

2.1 実験概要

本研究で使用する試験体は、板厚 16 mm、幅 100 mm、長さ 1,750 mm の平鋼板 (鋼種 SS400) を用いる。この鋼板の両面に、炭素繊維シートを積層する。使用する炭素繊維シートは、繊維目付量 300 g/m²、弾性率 640 kN/mm² の高弾性型炭素繊維を用いた一方向繊維であり、繊維方向を鋼材の長手方向に合わせ、片面あたり 35 層積層する。定着長¹⁾ならびに端部ずらし量¹⁾は、それぞれ 200 mm、15 mm とした。鋼板と炭素繊維シートの間には、高伸度弾性パテ材³⁾ (以下、パテ材と呼ぶ) を挿入する。試験体寸法および炭素繊維シート貼付位置について図-1 に示す。

また、本研究では、補修・補強後の長期耐久性向上を意図として、鋼材面にプラスト後に有機ジンクリッチ系塗料を塗布するケースについても検討する。試験ケースとして、有機ジンクリッチ系塗料の有無で 2 ケースを設

表-1 試験ケース

試験体名称	作用力 方向	補強 の有無	有機ジンク の有無
A	1	あり	あり
	2		
	3		
B	1	あり	なし
	2		
	3		
N _T	-	なし	

ける。試験ケースを表-1 に示す。なお、ジンクリッジ系塗料を塗布した場合についても、塗料を塗布した後にパテ材を挿入し、炭素繊維シートを積層している。

2.2 試験方法

試験では、載荷容量 1,000 kN のリレー式万能試験機を用いて載荷を行う。鋼材の両端部 100 mm を保持部としチャックに固定し引張試験を実施した。ここでは、鋼材表面、コバ面および炭素繊維シート表面のひずみを計測する。荷重-ひずみ関係の線形性が保たれる範囲では荷重制御とし、その後は変位制御により載荷を行った。

3. 試験結果と考察

3.1 荷重-ひずみ関係

ここでは、炭素繊維シートあるいは接着樹脂に変状が生じた点を終局荷重と考えて整理する。各ケースの荷重-ひずみ関係を図-2、図-3 に示す。

ここで、図中の理論値については、以下のように計算を行っている⁹⁾。

$$\text{鋼板単体: } P = E_S A_S \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{合成断面: } P = E_S (A_S + A_{CF,S}) \varepsilon \quad (2)$$

$$\text{合成断面・補正: } P = E_S (A_S + c_n A_{CF,S}) \varepsilon \quad (3)$$

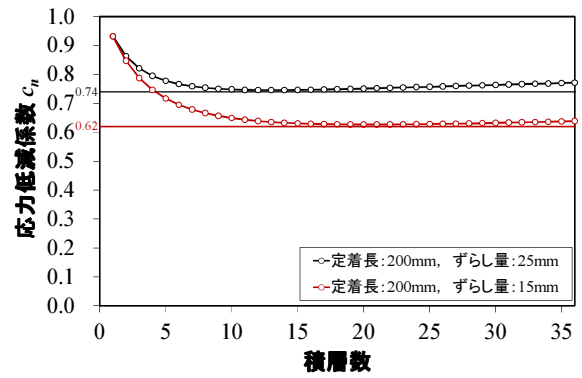
ここで、 P は荷重、 E_S は鋼材の弾性係数、 A_S は鋼板の断面積、 ε はひずみ、 $A_{CF,S}$ は鋼換算した炭素繊維シートの断面積、 c_n は応力低減係数である。 c_n は文献 5 の数値計算手法を用いて次のように計算される。

$$c_n = (1/\xi - 1)/(1/\xi_0 - 1) \quad (4)$$

ここで、 ξ は鋼板に作用する外力を A_S で除した応力に対する炭素繊維シート接着鋼板中央コバ面の応力の比、つまり応力低減率を表し、数値計算手法から算出される。また、

$$\xi_0 = E_S A_S / E_S (A_S + A_{CF,S}) \quad (5)$$

であり、鋼板と炭素繊維シート接着鋼板の剛性比を与える。 ξ は炭素繊維シートの定着長が十分に長くなると、 ξ_0 に収束する。本研究では、炭素繊維シートの弾性係数

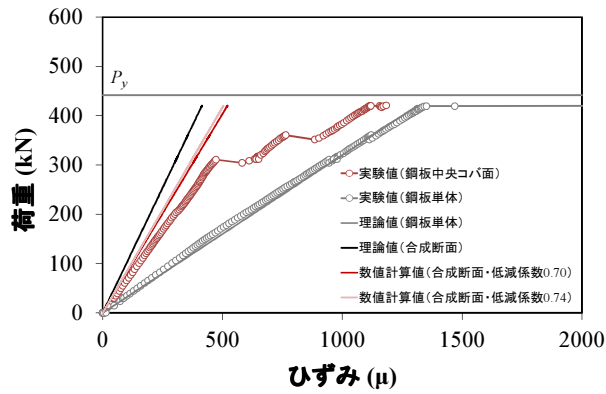
図-4 積層数と応力低減係数 c_n の関係表-2 応力低減係数 c_n の数値解析結果

積層数	応力低減係数 数値解析結果	
	端部ずらし 25 mm	端部ずらし 15mm
1	0.932 (0.93)	0.932 (0.93)
2	0.863 (0.86)	0.847 (0.84)
3	0.821 (0.82)	0.788 (0.78)
4	0.795 (0.79)	0.746 (0.74)
5	0.778 (0.77)	0.717 (0.71)
6	0.767 (0.74)	0.695 (0.62)
7	0.759 (0.74)	0.679 (0.62)
8	0.754 (0.74)	0.666 (0.62)
9	0.750 (0.74)	0.657 (0.62)
10	0.748 (0.74)	0.649 (0.62)
15	0.746 (0.74)	0.631 (0.62)
20	0.751 (0.74)	0.627 (0.62)
25	0.757 (0.74)	0.628 (0.62)
30	0.764 (0.74)	0.632 (0.62)
35	0.770 (0.74)	0.637 (0.62)

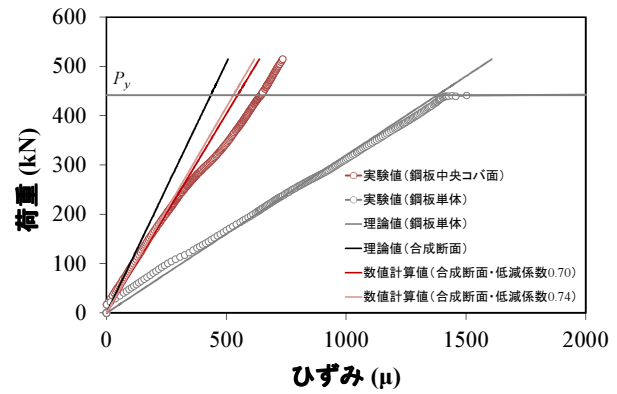
()内の数値は設計値(案)である

を試験値である 694 kN/mm² とし、定着長ならびに端部ずらし量は 200 mm と 15 mm、パテ材ならびに接着材の物性値や厚さは文献 5 と同様にして $c_n = 0.701$ を得た。

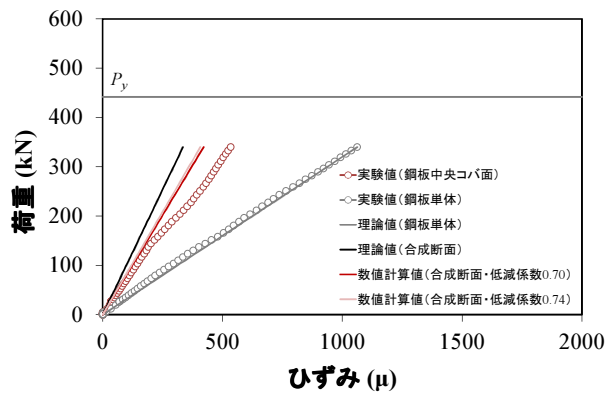
実験値のひずみの評価点は、鋼板中央のコバ面とシートを添付しない鋼板表面である。使用した鋼板の降伏点は 276 N/mm² であり、降伏荷重 P_y は 442 kN である。図-2 に示す有機ジンクありのケースでは、鋼板の降伏荷重に達する前に炭素繊維シートの剥離が生じる結果となった。その時の荷重の平均値は 369 kN であった。一方、図-3 に示す有機ジンクなしのケースでは、鋼板の降伏荷重を超えたのちにパテ材に亀裂が生じ終局を迎えた。この時の荷重の平均値は 507 kN であった。また、いずれのケースから、実験値と数値計算値には、有機ジンクの有無にもとづく相違が確認される。



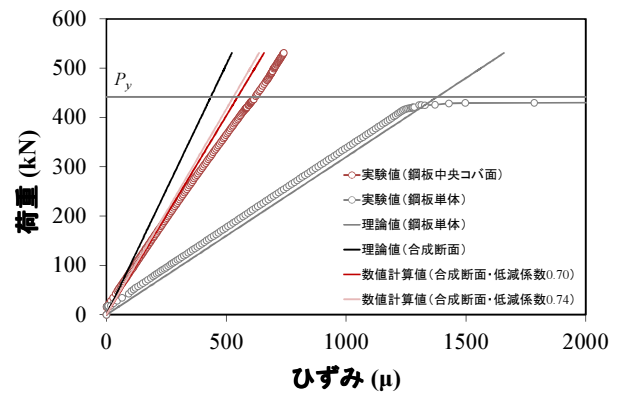
(a) A1



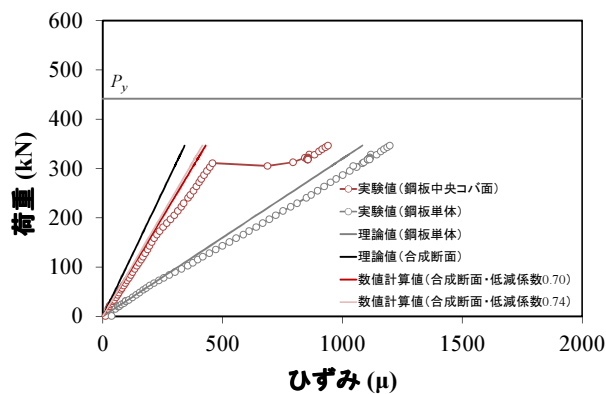
(b) B1



(b) A2

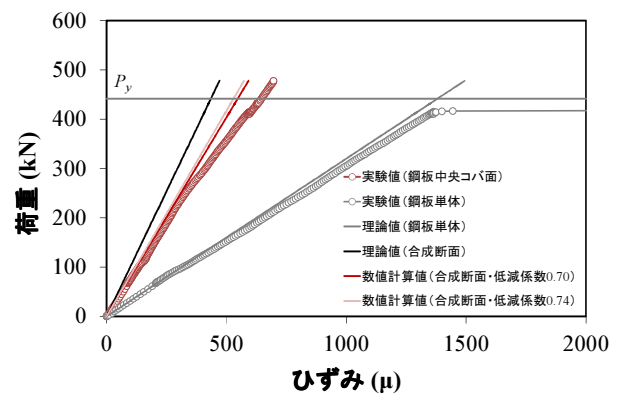


(b) B2



(c) A3

図-3 荷重-ひずみ関係 (有機ジンクあり)



(c) B3

図-4 荷重-ひずみ関係 (有機ジンクなし)

3.2 応力低減係数

図-4 は、積層数と端部ずらし量をパラメータとした積層数と応力低減係数の関係を示したものである。炭素繊維シートの定着長は 200 mm、端部ずらし量を 25 mm と 15 mm の 2 パターンとし、数値計算におけるその他のパラメータの設定は、文献 6 と同様とした。

図-4 において、端部ずらし量が 25 mm の結果は、現行の設計・施工マニュアルで用いられているものである。一方、端部ずらし量を 15 mm とすると、鋼板から炭素繊維シートへの応力伝達の距離が短くなることから、 c_n が小さくなる。

応力低減係数の設計用値は数値解析結果の小数点 3 桁以降を切り捨てたものであり、現行の端部ずらし量 25

mm で積層数が 6 層から 20 層となる場合は、設計の便を考慮して、応力低減係数は一定値の 0.74 としている。この場合に、積層数を 25 層から 35 層まで増加させても数値計算から得られる応力低減係数は減少しないことから、6 層から 35 層で 0.74 にしても良いと考えられる。同様の方針で、端部ずらし量を 15 mm とする場合について検討すると、表-2 のように設計値が与えられる。

4. 結 論

本研究では、鋼構造物に対する炭素繊維シート接着工法における最大積層数に関する検討を行った。具体的に

は、平鋼板の両面に 35 層ずつ積層した試験片を製作し、一軸引張試験と一軸圧縮試験を実施した。ここでは、補強後の長期耐久性向上を目的として、鋼材面に有機ジンクリッチ系塗料を塗布してから補強したケースについても検討した。両試験では、炭素繊維シートの定着長を 200 mm、端部ずらし量を 15 mm としており、現行の設計・施工マニュアルと比較して、端部ずらし量が 25 mm から小さく設定された。これは、炭素繊維シートの積層数が増大すると、シート全体の長さが長くなり、施工時に制約を受ける場面が想定されたことによる。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 有機ジンクを用いる場合の終局荷重は降伏荷重の 83 %であり、炭素繊維シート端部から剥離が発生した。一方、有機ジンクを用いない場合の終局荷重は鋼材の降伏荷重の 114 %であり、降伏点に対する補強効果が確認できた。よって、補強効果の観点からは、有機ジンクを用いない方がよいと言える。
- 現行の設計・施工マニュアルと比較して、端部ずらし量を小さく設定したため、応力低減係数の見直しを行った。その結果、現行どおりに定着長を 200 mm、端部ずらし量を 25 mm とする場合は、炭素繊維シートの限界積層数を 20 層から 35 層と増加しても、20 層から 35 層の範囲では現行の最小値である 0.74 のままでよく、定着長を 200 mm、端部ずらし量を 15 mm とする場合は、炭素繊維シートの積層数が 1 層から 5 層の範囲では 0.93 から 0.71 の範囲で積層数に応じて変化させ、6 層から 35 層の範囲では、最小値の 0.62 とするのがよいと考えられる。

【参考文献】

- 1) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津男, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008.
- 2) 高速道路総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル, 2013.
- 3) 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験, 構造工学論文集 Vol.57A, 10-10, pp.735-746, 2011.
- 4) 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.5, pp.23-38, 2015.
- 5) 宮下剛, 長井正嗣: 一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.378-392, 2010.
- 6) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.1, pp.44-63, 2015.
- 7) 菊池新平, 大垣賀津雄, 栗原大輔, 秀熊佑哉, 小林朗, 宮下剛, 奥山雄介: 柱部材の CFRP による全体座屈強度向上に関する実験的研究, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2017 年 9 月 (発表予定) .
- 8) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編, 丸善株式会社, 2012.3.