

炭素繊維シートによる鋼管の座屈耐力向上に関する検討

日本鉄塔工業(株) 正会員 ○伊藤 佑樹 ドニ スプラプト 非会員 本田 誠
東レ(株) 正会員 松井 孝洋 非会員 宮川 裕司 藤田 憲治

1. はじめに

軽量、高強度、高耐久性を有する CF(炭素繊維)シートを用いた補強方法として CFRP 接着工法が設計施工指針(案)で体系化されている。しかしながら、被補強部材はコンクリートや形鋼を対象としており、鋼管に対する記載はあまり見られない。

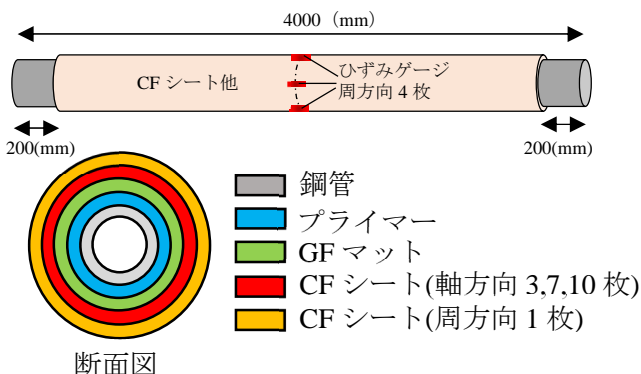
送電用鉄塔では支柱材や腹材などの鋼管部材において、高経年化に伴う腐食が顕在化しており、その補修・補強方法として CFRP 接着工法が幾つか検討されている²⁾³⁾。これらにより鋼管に対しても CFRP 接着工法の補強・補修効果が確認されてはいるものの、まだ研究事例が少なく基礎的なデータが少ないと考えられる。そこで本研究では、長柱域の鋼管に対する CFRP 接着工法の基礎的な補強効果の把握を目的として座屈実験を実施した。

2. 座屈実験

2.1 供試体

長柱域の鋼管(φ60.5×2.3-L4000mm-λ195)に対し、東レ(株)が開発した VaRTM(Vacuum assisted Resin Transfer Molding)工法にて、CASE1~4(表1)の積層枚数の軸方向 CF シート(繊維方向を鋼管軸方向に配置)を接着した。なお、鋼管との接着性及び CF シートの表面保護の観点から、軸方向 CF シート以外にプライマー、GF マット、周方向 CF シート(繊維方向を鋼管周方向に配置)を図1に示す順番で配置した。表2に各材料の物性値を示すが、GF マット、CF シートの物性値は、含浸樹脂(エポキシ系)の厚みを考慮するた

め、複合則を用いて算出した値を示している。



断面図

図1 供試体イメージ図

表2 物性値

材料	厚み	縦弾性率	降伏点
	mm	GPa	MPa
鋼材(STK400)	2.30	206.0	340
プライマー(E258R)	0.20	5.6	-
GFマット(CSM300)	0.50	8.6	-
CFシート(UM46-40P)	軸方向	0.52	158.8
	周方向	0.52	10.5

2.2 実験方法

両端に2軸球座を設置した300ton長柱試験機にて圧縮载荷を行った(図2)。

载荷荷重と軸方向変位、供試体中央部のひずみをそれぞれ計測した。



図2 実験方法

表1 供試体諸元

CASE	軸方向 CF シート 積層 枚数	被補強部材						実験				理論値			
		鋼管サイズ 外径×厚み	長さ L	縦弾 性率 E _s	降伏点 σ _y	細長比 λ	細長比 パラメータ $\left(= \frac{\lambda_c \lambda}{\pi \times \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}} \right)$	供試 体数	伸び剛性 $\left(= \frac{EA}{\varepsilon} \right)$	座屈荷重 P _{cr(実)}	伸び剛性 EA	補正前 座屈荷重 P _{cr(理)} $\left(= \frac{\pi^2 EI}{L^2} \right)$	補正後		座屈荷重 $\left(= \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \right)$
													有効座屈長 係数β	有効 座屈長 L _k	
		枚	mm	mm	GPa	MPa		体	kN×10 ⁻⁶	kN	kN×10 ⁻⁶	kN	$\left(= \sqrt{\frac{P_{cr(理)CASE1}}{P_{cr(実)CASE1}}} \right)$	mm	kN
1	0	φ60.5×2.3 (STK400)	4000	206	340	195	2.52	3	0.084	29.47	0.087	22.60	0.88	3520	29.20
2	3							0.140	63.89	0.138	39.94	51.57			
3	7							0.234	100.99	0.207	64.30	83.03			
4	10							0.292	88.77	0.264	86.48	111.68			

キーワード 炭素繊維シート, CFRP 接着工法, 鋼管, 座屈

連絡先 〒808-0023 福岡県北九州市若松区北浜1-7-1 TEL 093-751-5313

2.3 実験結果

各 CASE とも 3 体の実験を行ったが、3 体とも同傾向であったため、図 3 には各 CASE で代表 1 体の荷重とひずみの関係を示す。なお、ひずみは周方向(図 1)の 4 枚の平均値とした。全 CASE で弾性範囲内では荷重とひずみが線形関係となる。また、軸方向 CF シートの積層枚数が多い CASE4 よりも枚数が少ない CASE3 の方が座屈荷重は大きくなった。実験後に実施した断面観察において、CASE4 の供試体で GF マットの接着層(含浸樹脂部)にクラックが確認された(図 4)ことから、積層枚数の増加が接着層へ影響を与えたものと推測される。

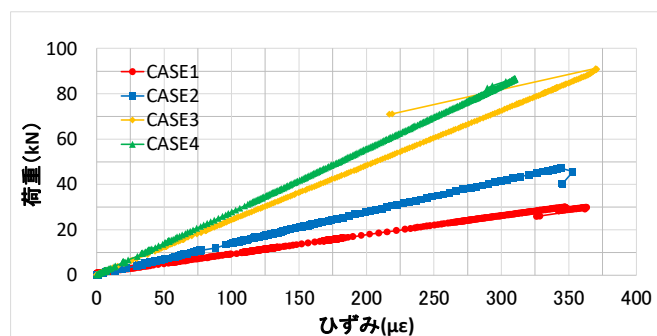


図 3 荷重-ひずみ曲線(各 CASE 代表 1 体)



図 4 GF マット接着層のクラック(CASE4)

3. 理論値との比較

設計施工指針(案)¹⁾に則り、鋼管と CF シートが一体化したと仮定して、複合則(1)、(2)及びオイラーの公式(3)から EA と P_{cr} の理論値を算出した。

なお、実験で使用した球座が完全なピン支持を再現できておらず、無補強の CASE1 においても実験と理論値で乖離があったため、CASE1 の座屈荷重を基に座屈長 L を補正し有効座屈長 L_k (3520mm) とした。

$$EA = E_S A_S + E_P A_P + E_G A_G + E_{C0^\circ} A_{C0^\circ} + E_{C90^\circ} A_{C90^\circ} \quad (1)$$

$$E_{(S+P+G+C0^\circ+C90^\circ)} = \frac{EA}{A_S + A_P + A_G + A_{C0^\circ} + A_{C90^\circ}} \quad (2)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_{(S+P+G+C0^\circ+C90^\circ)} I_{(SPGC0^\circ C90^\circ)}}{L_k^2} \quad (3)$$

E, A : 複合材料としての等価な縦弾性率及び断面積

E_S, A_S : 鋼管の縦弾性率及び断面積

E_P, A_P : プライマーの縦弾性率及び断面積

E_G, A_G : GF マットの縦弾性率及び断面積

$E_{C0^\circ}, A_{C0^\circ}$: 軸方向 CF シートの縦弾性率及び断面積

$E_{C90^\circ}, A_{C90^\circ}$: 周方向 CF シートの縦弾性率及び断面積

$E_{(S+P+G+C0^\circ+C90^\circ)}$: 換算縦弾性率

$I_{(SPGC0^\circ C90^\circ)}$: 合成断面の断面二次モーメント

L_k : 球座の不具合を考慮した有効座屈長

表 1 に示す実験の EA, P_{cr} (各 CASE 3 体の平均値)、理論値の EA, P_{cr} を用いた荷重-ひずみ曲線を図 5 に示す。全 CASE で伸び剛性 EA は実験と理論値でおよそ一致する。座屈荷重 P_{cr} は、CASE4 のみ実験が理論値よりも低くなる。前章で述べた通り、CASE4 では接着層でのクラックにより、想定する補強効果が得られなかったと推測する。

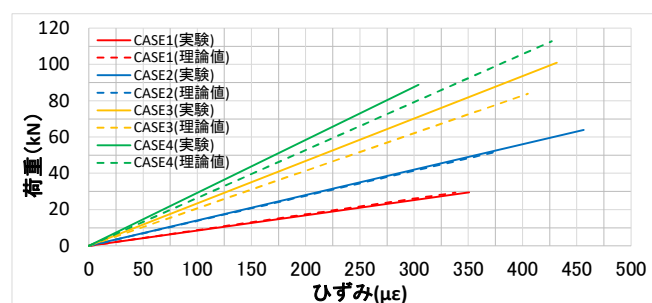


図 5 荷重-ひずみ曲線(実験, 理論値)

4. まとめ

- ・長柱域の鋼管に対して CFRP 接着工法にて補強した供試体で座屈実験を実施した。その結果、一部を除き伸び剛性及び座屈荷重が理論値とおおよそ一致し、弾性範囲内では設計施工指針(案)¹⁾が妥当であると確認できた。

- ・積層数の増加により、GF マットの接着層(含浸樹脂部)にクラックが見られ、想定する補強効果を得られないことが分かった。

- ・今後は、接着層での剥離やクラックなどを再現した詳細な解析を実施し、積層数と補強効果についての定量的評価について検討する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会: 複合構造シリーズ 09, FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案), 2014
- 2) 松井孝洋, 松本幸大, 古賀惟彬, 服部明生, 山口信之, 山田勝: 断面欠損を有する鋼管部材の CFRP による補修効果, 鋼構造論文集, 第 21 巻, 第 83 号, 2014.9
- 3) 松井孝洋, 大園智章, 山崎智之, 高野修一, 松本幸大: 腐食劣化した送電鉄塔鋼管に対する VaRTM 工法を用いた CFRP 補修技術の検討, 日本建築学会, 構造工学論文集, Vol.67B, 2021.3