

炭素繊維シート接着により補強された鋼製円管の耐荷力に関する実験的研究

日鉄ケミカル&マテリアル 正会員 ○秀熊佑哉, 西野晶弘
 長野工業高等専門学校 正会員 奥山雄介
 ものつくり大学 正会員 大垣賀津雄
 長岡技術科学大学 正会員 宮下剛
 ツカサテック 垣尾道夫, 浦添元気

1. はじめに

製鉄・石油精製等の製造業におけるプラント設備では、鉄塔支持型煙突や鉄塔支持型フレスタックなどの鉄塔には、鋼製円管が用いられている。これらの多くは、建設後 50 年が経過し、現行の耐震基準を満たしていない構造物や、経年劣化により腐食劣化している部材が多数確認されている^{1,2)}。これらの部材は、部材の置き換えや溶接やボルトによる当て板添接による補修・補強が用いられている。しかし、プラント設備では、可燃ガスへ引火する危険性や、溶接熱による熱ひずみの発生、部材添接による死荷重の増加など問題点が多い。

そこで、土木構造物で用いられている炭素繊維シート接着工法に着目する³⁾。炭素繊維シートは、部材へ直接シートを貼り付けるのみであるため、火気を使用せず、施工が容易で短期間で施工できるといったメリットがある。本研究では、炭素繊維シート接着による補強効果を確認するため、炭素繊維シート接着鋼製円管の圧縮試験を実施した。

2. 試験概要

鋼製円管としては、構造用鋼管 STK400（降伏応力 358 MPa、降伏荷重 254kN）を使用した。長さは全体座屈が先行する 2,750mm（細長比 90）とし、外径および板厚はそれぞれ 89.13mm、2.61mm（実測値の平均）であった。この鋼管に対して、炭素繊維シートで補強を実施する。補強量、補強範囲、周巻の有無をパラメータとして試験体を作製し、それぞれ両端単純支持で一軸圧縮試験を実施する。試験ケースを表-1 に示す。

炭素繊維シートは、高弾性型炭素繊維ストランドシート（目付 600g/m²、弾性係数 720GPa、引張強度 3,020MPa）と高強度型炭素繊維シート（目付 300g/m²、弾性係数 252GPa、引張強度 4,516MPa）である。鋼管表面を二重ケレン後に、エポキシ樹脂を使用してストランドシートを鋼管の軸方向に、炭素繊維シートを周方向に貼り付けた。

試験状況および試験治具を図-1 に示す。鋼材・炭素繊維シート表面の軸方向ひずみを計測し、鉛直荷重、鉛直変位を計測した。

表-1 試験体一覧

試験体名称	試験体長 L [mm]	補強量	補強範囲 (管中央)	周巻きの有無
U90-N	2,750	-	-	-
U90-R1/2		1層	L/2	-
U90-R1/2H			3L/4	○
U90-R3/4			L/2	-
U90-R3/4H			3L/4	○
U90-RR1/2H		2層	L/2	○
U90-RR3/4H			3L/4	○



図-1 試験状況（左）試験治具（右）

3. 結果と考察

(1) 周巻きの影響

表-2 に試験より得られた各試験体の最大荷重を示す。また、図-2 に各試験体の降伏荷重で無次元化した荷重と鉛直変位の関係を示す。これらの結果より、いずれもシートを貼り付けることで最大荷重が増加していることが確認できる。また、炭素繊維シートにて周巻きを行った U90-R1/2H および U90-R3/4H では、周巻きを行っていない U90-R1/2 や U90-R3/4 と比較して、初期剛性に変化はないが、最大荷重が 10%程度増加していることが確認できる。周巻きシートの拘束効果により、断面変形が抑えら

キーワード 炭素繊維シート、鉄塔、鋼製円管、座屈、補強

連絡先 〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 TEL03-6859-3441

れ FRP と鋼材が一体化し、最大荷重が向上したと考えられる。

(2) 補強量と貼付け範囲の影響

補強量を1層から2層に増加させることで、最大荷重は、10%程度向上した。無補強から1層補強した場合は50%以上向上していることを考えると、2層補強の向上率は低い結果となった。これは、全体座屈位置の違いと鋼材の降伏荷重に達したことが原因と考えられる。

補強範囲1/2の場合は、補強量を1層から2層に増加させたことで、中央のみの剛性が上がり、図-3の○印に座屈位置を示すように、シート端部である鋼管の1/4点で座屈が発生した。そのため最大荷重の増加率が小さくなったと考えられる。また、補強範囲3/4では1層、2層共に鋼管の中央で座屈が発生したが、降伏荷重である254kNに達したため、鋼管が塑性化し最大荷重に達したと考えられる。

以上の結果から、炭素繊維ストランドシートで補強を行う場合には、試験体長さの3/4の範囲にシートを貼り付け、その上に高強度型炭素繊維シートを周方向に貼り付けることで効率的な補強が可能となることを示した。

(3) オイラー座屈荷重との比較

図-2に無補強および1層補強した場合のオイラー座屈荷重を示す。ここで、補強後の計算値は、軸方向のみの炭素繊維の剛性を鋼の剛性に換算し、断面積に足し合わせることで計算している。無補強の実験値とオイラーの座屈荷重を比較すると、計算値に対して実験値は0.79と21%低い結果となった。これは初期不整が原因と考えられる。また、1層補強の場合は、周巻き無しで計算値に対して実験値は0.86、周巻き有りは計算値に対して実験値は0.96と周巻き有りの場合はオイラー座屈荷重と近い結果となった。

著者らはこれまで炭素繊維シートで補強された鋼板の一軸圧縮試験に対して、補強後の座屈荷重が、炭素繊維の剛性分を断面積に足し合わせたオイラー座屈の計算値と一致するとの結果を示してきた⁴⁾。鋼管の場合においても同様に評価可能である可能性が示されたが、実構造物では局部座屈との連成座屈である場合が多く留意する必要がある。

4. まとめ

本研究では、鋼管の座屈耐荷力向上目的として、炭素繊維シート接着工法の適用性を検討した。ここでは、炭素繊維ストランドシートを軸方向に貼り付け、重ねて高強度型炭素繊維シートを周方向に巻き付けることで十分な補強効果が得られることを確認した。また、貼付範囲については、対象とする部材の3/4の範囲で貼り付ける

表-2 各試験体の最大荷重と破壊形態

試験体名称	最大荷重 [kN]	Nに対する強度比	破壊形態
U90-N	137.5	1.000	中央部で座屈
U90-R1/2	190.6	1.386	中央部で座屈
U90-R1/2H	210.4	1.530	中央部で座屈
U90-R3/4	215.7	1.569	中央部で座屈
U90-R3/4H	240.1	1.746	中央部で座屈
U90-RR1/2H	240.2	1.747	シート端部で座屈
U90-RR3/4H	261.2	1.900	中央部で座屈

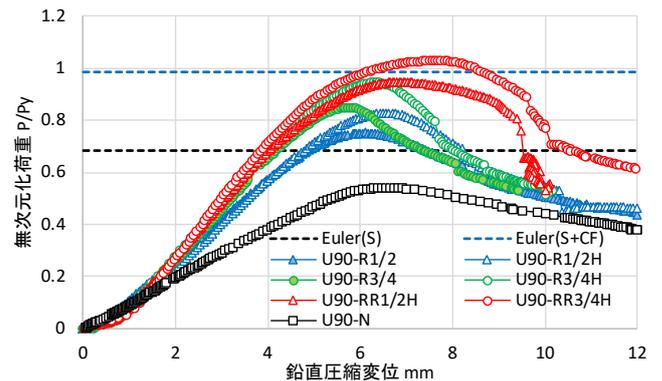


図-2 各試験体の荷重と変位の関係

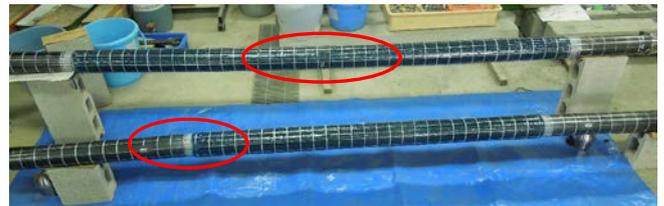


図-3 座屈状況 上：U90-RR3/4H, 下：U90-RR1/2H

ことで、十分な効果を確認できることを示した。

今後は、全体座屈のみではなく、局部座屈も考慮した連成座屈の耐荷力の評価方法の確立を目指し、実験および解析による検討を行い、実構造物に対する設計手法の確立を目指す。

参考文献

- 1) 西村宣夫, 村上茂之, 竹内修治, 遊田昌樹: 孔あき鋼管部材の座屈強度に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第3巻, 第10号, pp. 29-38, 1996.
- 2) 西村宣男, 竹内修治, 村上茂之, 竹下主義, 軸屋一美, 伏見義仁: 断面に欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性, 鋼構造論文集, 第6巻, 第21号, pp. 55-66, 1999.
- 3) 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.
- 4) 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, pp. 735-746, 2011