

## 鋼製円管に対する炭素繊維シート接着補強に関する実験的検討

長野工業高等専門学校 学生員 ○畑山 成幸  
 長野工業高等専門学校 正会員 奥山 雄介  
 長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛  
 日鉄ケミカル&マテリアル 正会員 秀熊 佑哉  
 ものつくり大学 正会員 大垣賀津雄

### 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といった鋼製円管が用いられる。これらの多くは、建設後 50 年が経過し、経年劣化による腐食減肉が多数確認されている。これらの損傷を受けた部材は、部材の置き換えや溶接等による当て板が用いられている。しかし、石油精製等のプラント設備では、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。このような中で、鋼管の強度特性に関する研究も実施されている<sup>2)3)</sup>がより効率的な工法については検討されていない。

そこで、鋼製橋脚等の土木構造物に用いられる炭素繊維シートに着目する。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、施工が容易で短期間で施工できると言ったメリットがある。本研究では、鋼製円管に対する補修・補強材料として、炭素繊維シートの適用性を検討する。ここではまず、炭素繊維シートによる補強効果を確認するための圧縮試験を実施し、次いで損傷を有する鋼管での補修効果確認試験を実施する。本稿では、炭素繊維シートによる補強効果について検討した長柱の一軸圧縮試験結果について述べる。

### 2. 試験概要

本研究では、構造用鋼管 STK400 (降伏応力 358 MPa) を使用した。長さは 2,750, 1,850, 950 mm の 3 ケースで、公称外径および板厚はそれぞれ 89.1 mm, 2.6 mm である。この鋼管に対して、炭素繊維シートで補強を実施する。(a) 補強量, (b) 補強範囲, (c) 周巻の有無をパラメータとして試験体を作製し、それぞれ単純支持条件で圧縮試験を実施する。試験ケースを表-1 に示す。

表-1 試験ケース一覧

| 試験体名称      | 試験体長 L [mm] | 補強量 | 補強範囲 | 周巻の有無 |
|------------|-------------|-----|------|-------|
| U90-N      | 2,750       | -   | -    | -     |
| U90-R1/2   |             | 1 層 | L/2  | -     |
| U90-R1/2H  |             |     |      | ○     |
| U90-R3/4   |             |     | 3L/4 | -     |
| U90-R3/4H  |             | ○   |      |       |
| U90-R4/4   |             | L   | -    |       |
| U90-RR1/2H |             | 2 層 | L/2  | ○     |
| U90-RR3/4H | 3L/4        |     | ○    |       |
| U60-N      | 1,850       | -   | -    | -     |
| U60-RR3/4H |             | 2 層 | 3L/4 | ○     |
| U60-RR4/4H |             |     | L    | ○     |
| U30-N      | 950         | -   | -    | -     |
| U30-RR3/4H |             | 2 層 | 3L/4 | ○     |
| U30-RR4/4H |             |     | L    | ○     |



図-1 試験状況 (U30 シリーズ)

次に補強材料について説明する。使用した炭素繊維シートは、高弾性型の炭素繊維ストランドシートと高強度型炭素繊維シートである。炭素繊維ストランドシートは、高弾性型炭素繊維シートの 3 倍の補強効率を有しているシートである<sup>4)</sup>。これを鋼管の軸方向に貼り付けて補強効果を確認する。高強度型炭素繊維シートは、面外方向のじん性増加およびストランドシートの剥離防止のために鋼管の周方向に

表-2 試験結果一覧

| 試験体名称      | 最大荷重 [kN] | N に対する強度比 | 破壊形状      |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| 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-R4/4   | 178.8     | 1.300     | 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    |
| U60-N      | 233.7     | 1.000     | 中央部で座屈    |
| U60-RR3/4H | 279.1     | 1.194     | 全塑性       |
| U60-RR4/4H | 282.5     | 1.209     | 全塑性       |
| U30-N      | 268.3     | 1.000     | 全塑性⇒中央で座屈 |
| U30-RR3/4H | 285.7     | 1.065     | 全塑性       |
| U30-RR4/4H | 285.5     | 1.064     | 全塑性       |

貼り付ける。貼り付け方法は高速道路総合技術研究所のマニュアル<sup>5)</sup>に準じた施工方法を用いた。

試験状況を図-1に示す。ここでは、鋼材面、炭素繊維シート表面の軸方向ひずみを計測し、上・下部で鉛直変位、試験体中央で面外変形を計測している。

### 3. 試験結果および考察

表-2に試験で得られた最大荷重を示す。これより、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。

まず、周巻の影響について検討した U90-R1/2H および U90-R3/4H では、周巻をしていない U90-R1/2 や U90-R3/4 と比較して、最大荷重が増加していることが確認できる。このことから、周方向に高強度型炭素繊維シートを貼り付けることで、より補強効果が向上すると言える。また、シートの貼り付け範囲については、試験体長さの 3/4 の範囲に貼り付けたケースの方が、補強効果が高くなることを確認した。

次に、炭素繊維シートの積層数および貼り付け範囲について検討した、U90-RR1/2H と U90-RR3/4H では、U90-RR1/2H では補強量が増加したことにより、座屈の発生箇所がシート端部の鋼材部となってしまったのに対し、U90-RR3/4H では試験体中央部で座屈が生じる形状となった。そのため、U90-RR3/4Hの方が炭素繊維ストランドシートによる補強効果を発揮できたものと考えられる。

細長比を変化させた U60 シリーズでは、無補強時

には試験体中央部での全体座屈が生じていたのに対し、補強後はいずれも鋼材の降伏荷重まで変状が起きることはなかった。この結果からも補強範囲は試験体長さの 3/4 で十分な補強効果が得られると言える。同様に U30 シリーズでは、無補強時には全塑性後、試験体中央部での全体座屈と局部座屈の連成座屈の発生が確認できたが、補強後はいずれの試験体も降伏荷重を超えても変状が起きることはなかった。

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。

### 4. まとめ

本研究では、腐食損傷を生じた鋼管に対する補修工法として、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 程度の範囲で貼り付けることで、十分な効果を確認できることを示した。今後、試験結果の詳細な分析と補強のみならず、補修対策についても検討を進める予定である。

### 参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋補修補強事例集 (2012 年度版), 丸善出版, 2012.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 秀熊佑哉, 小林朗, 長井正嗣, 宮下剛, 和久井譲：FRP シート接着による鋼部材の補修に関する研究, 土木学会第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.91-96, 2009.
- 5) 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.