

VaRTM 成形で接着された CFRP 部材による鋼板の座屈補強に関する実験的研究

首都大学東京大学院 学生員○佐藤 潤・タイウィサル 首都大学東京 正会員 中村一史
東レ 正会員 松井孝洋 豊橋技術科学大学 正会員 松本幸大

1. はじめに

近年、インフラ鋼構造物の劣化、損傷に対して、適切な対策が求められており、今後、増大する補修・補強の需要に対応するためには、ボルトや溶接による当て板工法などの従来の手法に加え、迅速かつ柔軟に対応できる工法の開発が必要である。

本研究では、機能的な補修材料として注目されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を、FRP 成形技術の一つである VaRTM 成形を応用して鋼板に接着し、補強する方法の開発を目的として、座屈に対する補強効果を実験的に検討したものである。VaRTM とは Vacuum assisted Resin Transfer Molding（真空含浸工法）の略称であり、フィルム内部を真空状態として、真空の補助により内部の強化材に樹脂を含浸させる工法である。この手法は真空状態のフィルム内部に樹脂を流すため、作業環境がよいというメリットもある。

2. 実験方法と VaRTM による補強方法

実験は、鋼板（1200×150×9mm）を用いた両端ピン支持条件下での圧縮荷重実験によって行い、CFRP 接着による座屈の補強効果を確認した。図-1 に、試験体図を示す。ピン支持条件とするナイフエッジの治具を取り付けるため CF シートの接着範囲は 1000×150mm とし、座屈前に CFRP がはく離することを防止するため、CFRP 端部に各層で 5mm の段差長を設けた。

試験体の作製は、まず、鋼板表面をケレン後、表面にエポキシ樹脂を薄く塗布するプライマー処理および加温養生を行い、樹脂を硬化させる。次に、CF シートを積層して資材を配置し、プラスチックフィルムでバギングする。その後、写真-1 に示すように真空化し、エポキシ樹脂を含浸させて、加温養生を行うことで作製した。養生条件は 40℃で 24 時間とした。樹脂の含浸方向は、5 層試験体では長手方向、それ以外は幅方向とした。

使用した CF シートは高強度タイプ（UT70-30G）、鋼材は SS400 材である。表-1 に、材料物性値を示す。表-2 に、実験パラメータを示す。試験体は CF シート 5 層ごとに 20 層まで、無補強を含めて 5 体用意した。表中の定着長は、作用力が鋼部材から CFRP へ接着剤を介して伝達される区間²⁾である。

圧縮荷重実験では、支持条件を両端ピンとし、変位制御（1mm/min）で荷重を行った。一軸ひずみゲージを、図-2 のように表裏で対称となるように設置した。写真-2 に試験体セットアップ図を示す。

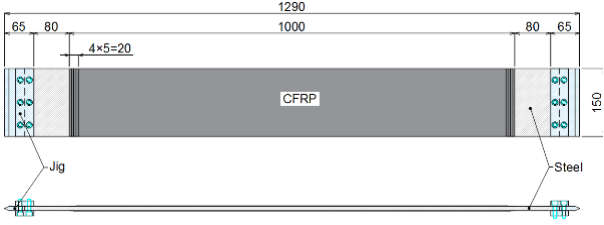


図-1 治具設置後の試験体の概略図



写真-1 VaRTM 工法による CFRP 接着の状況

表-1 材料物性値

	厚さ [mm]	弾性係数 [N/mm ²]	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
鋼板(SS400)	7.8	208,700	330.2	462.5
CF シート (UT70-30G)	0.167 (1ply)	245,000	-	3400

表-2 実験パラメータ

CF シートの 積層数 (ply)	片側のテーパー長さ (mm)	定着長 ²⁾ (mm)
0	0 (無補強)	0
5	5×4=20	35
10	5×9=45	71
15	5×14=70	106
20	5×19=95	131

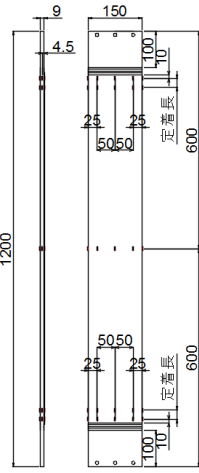


図-2 ゲージ位置

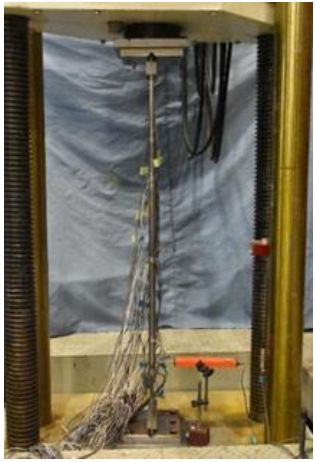


写真-2 セットアップ図

キーワード CFRP, 真空含浸, 座屈, 補強

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 都市環境学部 TEL 042-677-1111 (内) 4564

3. 検討結果と考察

図-3、表-3 に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係、座屈荷重の理論値、解析値、実験値をそれぞれ示す。座屈荷重の理論値は文献 1)に基づいて、CFRP の段差部分を無視することで簡易的に算出した。解析値は、汎用有限要素解析ソフトウェア Marc/Mentat 2013 を使用して、鋼板全長の 1/500 の正弦半波の初期たわみを考慮した平面応力問題で、弾塑性有限変位解析を行うことによって得られた値である。

図-3、表-3 より、実験値に対して最大で 11%の誤差が発生するが、最大荷重は CF シート 20 層までに対して、十分な精度で予測できることが確認できた。また、10 層以上の試験体で CFRP の端部からはく離が発生すること、また、図を略したが、積層数の増加とともに、はく離発生までの面外変形量が小さくなることがわかった。これは、CF シートの積層数が多くなると断面剛性が増加し、面外変形に対する抵抗が増加するためである。

図-4 は、荷重と 20 層試験体鋼板中央部におけるひずみの関係である。図より、実験では 60kN 付近から大きなひずみが発生しているのに対して、解析では初期の段階から実験値よりも大きなひずみを示していることがわかる。ひずみ挙動の差異については、今後、さらに検討の必要があるが、座屈荷重を比較した表-3 より、解析値と実験値との差は 10%以下に収まることがわかる。

最大荷重の到達後の挙動としては、積層数 10 層以上の試験体では、CFRP 端部からはく離が発生した。写真-3 に、10 層試験体の座屈後の変形を示す。はく離の発生後、CFRP の端部で、鋼板が局部的に折れ曲がるような形状であった。CFRP のはく離は、上下端の片側のみで発生し、はく離が発生した側で局部的な折れ曲がりが生じた。一方、解析では、はく離の影響を考慮していないが、最大荷重後に局部曲げが上下端の両側で生じたが、実験と同様の挙動を示した。

4. まとめ

本研究では、真空含浸工法を応用して、CFRP を鋼板に接着して作製した試験体の座屈に対する補強効果を実験的に検討した。その結果、CFRP は座屈するまではく離しないこと、また、CF シートを最大 20 層まで積層した試験体の座屈荷重は、10%以下の精度で予測できることが確かめられた。

本研究は、平成 28 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度の一部として行われた。

参考文献

1) 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 A, Vol.57A, pp.735-746, 2011.3

2) 土木学会複合構造委員会:FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 複合構造レポート 09, pp.218-232, 2013.11

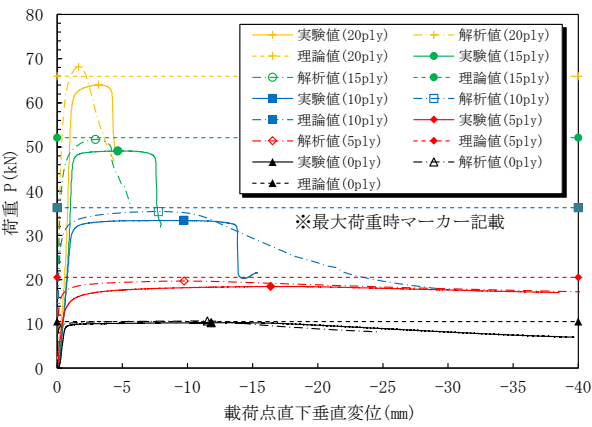


図-3 荷重-載荷点直下垂直変位関係

表-3 座屈荷重の理論値、解析値、実験値

積層数	理論値 P_{cr1} [kN]	解析値 P_{cr2} [kN]	実験値 P_{cr3} [kN]	P_{cr1}/P_{cr3}	P_{cr2}/P_{cr3}
0	10.53	10.52	10.28	1.02	1.02
5	20.51	19.69	18.47	1.11	1.07
10	36.30	35.41	33.38	1.09	1.06
15	52.12	51.72	49.19	1.06	1.05
20	65.99	68.12	64.10	1.03	1.06

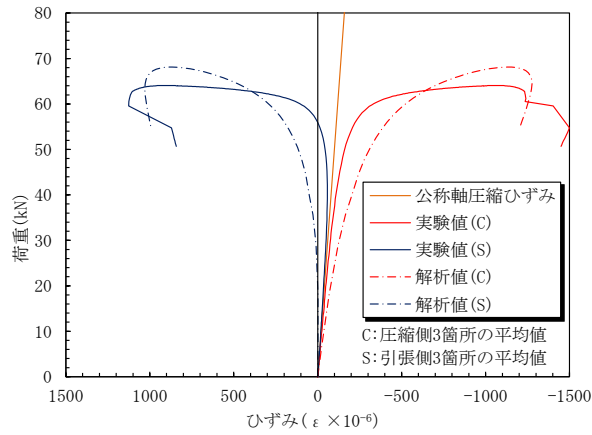


図-4 20 層試験体における鋼板中央ひずみ挙動



(a) CFRP 端部近傍の局部座屈 (b) 全体図
写真-3 10 層試験体の座屈後の変形