

現場 VaRTM 成形法による鋼部材の補修・補強工法に関する基礎的研究

首都大学東京大学院 学生員○近藤諒翼 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

社会基盤構造物の効率的な維持管理が求められている中で、軽量で、耐久性にも優れる繊維強化プラスチック (FRP) は、都市の再生と社会基盤施設の再構築のための革新的構造材料として注目されている。特に、炭素繊維を強化材とする CFRP は、高弾性・高強度で、現場でのハンドリングに優れることから、CFRP 接着による鋼構造物の補修・補強に適用されはじめています。しかし、既存の CFRP はシートまたは成形板であるため、効率的な補強、部材間の不陸、連結・接合部等の不連続面における接合で課題を有している場合があります。既設鋼構造物の補修・補強に適した、合理的でかつ現場施工が可能な工法の開発が求められる。そこで、本研究では、航空機や大型風力発電機のブレード等で採用される VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) と呼ばれる成形技術を用いて、FRP と既設鋼構造物を一体化させる工法を開発することを目的としている。ここでは、基礎的な研究として、VaRTM 成形された FRP の材料特性、FRP と鋼材の接着接合部の強度について検討した。

2. VaRTM 成形技術の特徴

図-1 に、VaRTM 成形の概念図を示す。これは、真空含浸工法とも呼ばれ、強化材をプラスチックフィルムで封入し、真空吸引した後、液状の樹脂を注入・含浸して硬化させ、FRP を成形する技術である。その特徴は、特殊設備が不要で、大型構造物の一体成形が容易であり、ハンドレイアップ成形法に比べ繊維含有率が高く、高品質な FRP を成形できることである。

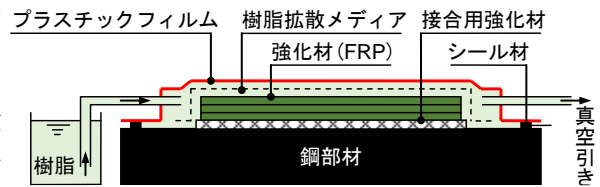


図-1 VaRTM 成形の概念図

3. VaRTM 成形された FRP の材料特性の検討

ハイブリッド FRP (以下、HFRP と呼ぶ) 板は、炭素繊維比率 40%、弾性率 60GPa を目標値とし、板厚をパラメータに設計した。表-1 に、積層構成を示す。マトリックス樹脂には、コンクリート補強で用いられる低粘度のエポキシ樹脂 (AUP40) を使用した。これらの HFRP 板を VaRTM 成形によって作製した。

表-1 ハイブリッド FRP 板の積層構成

設計板厚 (mm)	CF 比率 (%)	換算弾性係数 (GPa)	積層構成
5.0	40.1	59.1	GM : ガラスマット (ランダム) CF : 炭素繊維 (0°) GR45 : ガラス繊維 (±45°) (GM/CF/GR45/CF/GR/CF) _n
7.0	38.1	57.2	(GM/CF/GR45/CF/GR/CF/GR45/CF) _n -GR
9.3	39.2	59.8	(GM/CF/GR45/CF/GR/CF/GR/CF/GR45/CF/GR) _n -CF

まず、引張、圧縮特性を検討するために、HFRP 板からクーポン試験片を採取して、材料試験を行った。引張試験は、土木学会規準 (連続繊維補強材の試験方法 (案)) に、圧縮試験は、JIS K 7018 にそれぞれ準拠して行った。試験片の中央部の裏表に 1 軸ゲージを設置した。各板厚につき 2 体については、2 軸ゲージを用いてポアソン比を計測した。弾性係数とポアソン比は、軸方向ひずみが 500~2500 × 10⁻⁶ の範囲で評価した。

表-2 引張試験結果

板厚 (mm)	板厚の減少率 (%)	評価数	引張強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)		ポアソン比	
			平均値	変動係数	平均値	変動係数		
5.0	4.0	20	5	1400	0.067	66.3	0.013	0.30
7.0	5.8	17.1	5	1419	0.041	64.6	0.052	0.31
9.3	8.5	8.6	4	1317	0.085	60.3	0.064	0.29

表-3 圧縮試験結果

板厚 (mm)	板厚の減少率 (%)	評価数	圧縮強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)		ポアソン比	
			平均値	変動係数	平均値	変動係数		
5.0	4.1	18.0	5	358.4	0.052	63.6	0.013	0.34
7.0	5.7	18.6	5	438.2	0.066	63.8	0.023	0.33
9.3	8.5	8.6	5	451.8	0.016	58.8	0.042	0.32

表-2、表-3 に、引張試験、圧縮試験結果をそれぞれ示す。全ての試験片で、弾性係数の実験値は、理論値よりも高くなること、また、圧縮と引張で、両者が同等となる結果が得られた。また、板厚の実測値は設計値よりも小さくなった。その板厚の減少率は板厚が小さいほど大きくなり、弾性係数も高くなった。これは板厚が小さいほど、繊維含有率が高くなることを意味しており、補強効率の向上が期待できると考えられる。強度については、引張側で高く、圧縮側で低くなり、変動係数は、引張試験時の 9.3mm で、8% となり最も高くなった。これは 1 体の引張強度が著しく低いためであった。それ以外では、強度、弾性係数の変動係数は 1~6% の範囲であり、VaRTM 成形による HFRP 板は、引抜成形に相当する品質を有していることが確かめられた。

4. FRP と鋼部材の接着接合部の評価

鋼板に HFRP 板を VaRTM 成形により接合し、鋼板と HFRP 板の接合強度を、既往の研究を参考にして、片持ちはりの曲げ試験によって評価した。図-2 に、片持ちはりの曲げ試験のセットアップ図を示す。鋼板

Key Words : VaRTM, ハイブリッド FRP, 鋼部材, 補修・補強, 接着接合
連絡先 : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線 (4564)

(SM490Y 降伏強度 482MPa, 1,100×150×12mm, ディスクグラインダーによる表面処理)に, 表-1 に示した HFRP 板 (100×300× t_p) を VaRTM 成形した. 試験体は各板厚で 3 体用意した. VaRTM 成形された HFRP の端部は, ややテーパ状となり, ばらつきがみられたが, 一般部の板厚は, クーポン試験片と類似であった. 固定端側の HFRP 板端部からの破壊と補強効果を検討するために, 図中に示すように HFRP 板の端部付近と中央部の上下面にひずみゲージを設置した. 荷重は変位制御 (0.05mm/sec) で載荷した.

実験結果の一例として, 図-3 に, 荷重と HFRP 板のひずみ関係を示す. 板厚 5mm では, U2 と U3 において, 荷重が 1.415kN でひずみが急激に低下した. この時点で, HFRP 板の端部からの部分的な破壊と判断され, 破壊形式は, 目視観察から鋼と HFRP 板の界面はく離と考えられた. 一方, 板厚 7mm では, 荷重の増加とともに, U2 と U3 のひずみは緩やかに低下した. ここでは, 最大ひずみを接合部の部分的な破壊と判定し, この時の荷重は 3.016kN であった. 破壊形式は, 目視観察より層間はく離と考えられた. なお, 板厚 5mm の試験体では界面はく離が, また, 板厚 7mm, 9.3mm の試験体では層間はく離が多く見られ, 板厚が厚くなると層間はく離に移行するといえた. 図-4 に, 全ての試験体における荷重とひずみ (U2) の関係を示す. 板厚が薄いほど, ひずみが大きくなる傾向がみられるが, ばらつきが大きい結果となった. これは, VaRTM 成形時に, 端部の形状や厚さを管理していないためである. 表-4 に, 接着中心部の鋼板のひずみの低減率, 破壊荷重, 破壊荷重時における端部の接着剤の主応力をそれぞれ示す. 接着剤の主応力の算定では, ここでは, 接着層の厚さを 0.1mm と仮定している. 破壊荷重, 主応力は, 変動係数が高くなり, 大きくばらつくこと, また, 板厚 5mm の場合で最も低くなるのがわかった. これらは, 前述したように, HFRP 板端部の形状, 厚さが異なることによるものである. しかしながら, 主応力の値は大きく, 接合強度は高いといえた. さらに, 接着中心部の鋼板のひずみ (L4) の低減率は, ほぼ理論通りといえたが, 板厚が大きいほど, 低減率は理論値より大きくなる傾向がみられた.

5. まとめ

以上のことから, VaRTM 成形された HFRP 板の引張および圧縮特性を検討した結果, 変動係数が小さいことから, VaRTM 成形による部材は, 品質が高いことが確かめられた. また, 成形後の板厚の実測値は設計値よりも小さいため, 繊維含有率が高く, 補強効率の向上が期待できるといえた. さらに, 鋼板に HFRP 板を VaRTM 成形により接合し, 鋼板と HFRP 板の接合強度を曲げ試験によって検討した結果, 破壊荷重のばらつきは大きくなったものの, 接合部の強度は概ね高いことが確かめられた.

参考文献

1) M. Shimizu, T. Ishikawa, A. Hattori, H. Kawano: Failure criteria for debonding of patch plate bonded onto steel members subjected to bending, Journal of JSCE, Vol. 2, pp.310-322, 2014.

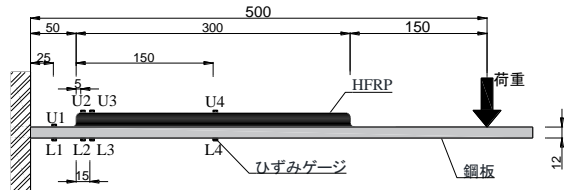
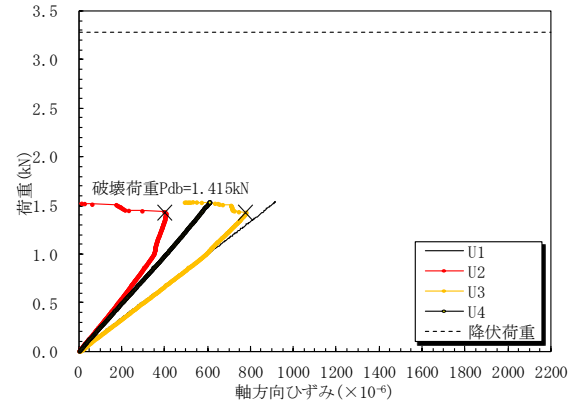
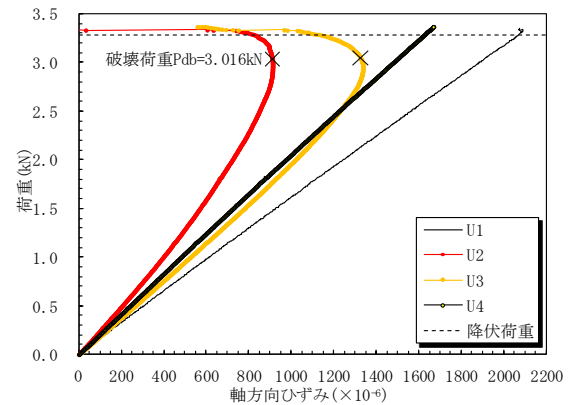


図-2 片持ちばりの曲げ試験のセットアップ図



(a) 板厚 5mm (試験体 No. 5-2)



(b) 板厚 7mm (試験体 No. 7-4)

図-3 荷重とひずみの関係

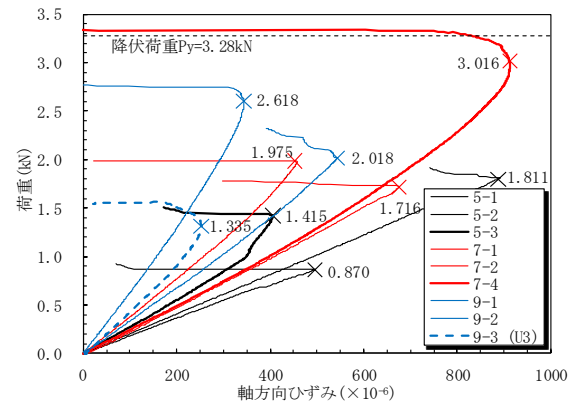


図-4 荷重とひずみ (U2) の関係

表-4 ひずみの低減率, 破壊荷重, 接着剤の主応力の比較

板厚 (mm)	試験体数	無補強に対するひずみ(L4)の低減率		破壊荷重 (kN)		接着端部の接着剤の主応力 (MPa)	
		理論値	実験値	平均値	変動係数	平均値	変動係数
5.0	3	0.80	0.82	1.37	0.35	228.9	0.36
7.0	3	0.70	0.72	2.24	0.31	388.6	0.31
9.3	3	0.50	0.59	1.99	0.33	346.5	0.33