

(24) VaRTM成形法を応用した鋼部材の 補修・補強工法に関する実験的検討

近藤 諒翼¹・中村 一史²・松井 孝洋³・松本 幸大⁴

¹学生会員 首都大学東京 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 首都大学東京 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部 (〒455-8502 愛知県名古屋市中区大江町9番の1)
E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学 准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

近年、機械分野では、旅客機の多くの構造要素や風力発電設備のブレードやなど、大型のFRP構造物の製造に真空樹脂含浸工法（VaRTM）とよばれる成形法が適用されている。本研究は、VaRTM成形法を応用して、構造用FRPと既設鋼構造物を一体化させて、補修・補強する工法を開発することを目的としたものであり、その成形方法と接合方法に関する基礎的な研究を行った。はじめに、VaRTM成形された炭素繊維とガラス繊維からなるハイブリッドFRP（以下、HFRPとよぶ）板の圧縮・引張特性を、クーパーン試験片により検討した。その結果、HFRP板は、引抜成形材に相当する高い品質を有していることがわかった。次に、鋼板にHFRP板をVaRTM成形法により接合し、その接合強度を片持ちりの曲げ試験によって検討した。その結果、破壊荷重のばらつきは大きいものの、接合部の強度は、概ね高く、一体成形・接合によって有意な補強効果が期待できることが確かめられた。

Key Words : VaRTM, hybrid composite FRP, steel member, repair and strengthening, bonded joint

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、耐久性に優れる繊維強化プラスチック（FRP）が、都市インフラの再生あるいは再構築のための革新的な構造材料として注目されている¹⁾。特に、炭素繊維を強化材とするCFRPは、高弾性・高強度であること、軽量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る²⁾。しかしながら、CFRP板は、帯板であるため、部材間の不陸、連結構造、溶接接合部のような平滑ではない不連続部における接合には適用できない場合がある。炭素繊維シートは、このような不陸面にも適用できるが、薄いため、積層数が増大すると作業効率が悪くなる。したがって、作業に制約を受けやすい現場施工に適用できる、合理的な接合方法の開発が求められている。

そこで本研究では、近年、機械分野で旅客機の多くの構造要素や、風力発電設備のブレード等、大型のFRP構造物の製造方法である真空含浸工法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下VaRTMと呼ぶ）と呼ばれる成形技術³⁾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、まず、基礎的な研究として、VaRTM成形されたFRPの材料特性、FRPと鋼材の接着接合の強度について、実験的な検討を行った。

2. VaRTM成形による鋼構造物の補修・補強の提案

(1) FRP接着による鋼部材の補修・補強の現状

繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastic; FRP）は、前述したように、鋼に比べ比重が約1/5と軽量で、環境作用に対する耐久性にも優れ、特に、炭素繊維（Carbon

Fiber) を強化材とするCFRPは、高弾性・高強度であること、現場でのハンドリングに優れることから、鋼構造物の補修、補強に適用されている²⁾。例えば、設計荷重の変更、床版拡幅等に対する鋼桁の補強^{4a)}、腐食等により断面欠損した鋼部材の性能回復^{4b)}に、CFRP接着工法が適用されている。

一般に、CFRP接着工法で使用される材料は、シート状または帯板のCFRPであり、帯板を積層した場合でも最大板厚は約10mmである。鋼構造物の補修・補強では、主に、剛性を向上させて、発生応力を低減することが要求されることから、高剛性のCFRPを平面的に接着する方法は、必ずしも効率的とはいえない。

さらに、前述したように、FRPと鋼部材の部材同士の接合では、その接合方法が極めて重要である。例えば、部材間の不陸、連結構造、溶接接合部など、平滑ではない箇所における接合は、一般的な当て板による機械接合や接着接合では十分に対応できない。したがって、このような制約を受ける現場施工でも、十分に対応可能な接合方法の開発が求められる。

(2) VaRTM成形技術の概要と補修・補強への応用

近年、機械分野では、大型のFRP構造物の製造方法に、VaRTM成形³⁾が採用されている。これは、強化材をプラスチックフィルム等で封入し、真空吸引によって液状樹脂を注入・含浸して硬化させて、FRPを成形する技術である(図-1)。その特徴は、大掛かりな設備が不要で、大型構造物の一体成形が容易であること、繊維含有率が高く、高品質なFRPを成形できることである。

鋼構造物の補修・補強に、この成形技術を応用し、形状を柔軟に変えられる強化材を、現場で鋼部材にVaRTM成形・接合することができれば、FRPと鋼部材の接合の課題を合理的に解決することができる。海外では、既設コンクリート構造物の補修・補強にVaRTM成形が試験的に適用され、工費削減が可能であることが示されている⁸⁾。しかしながら、この事例は、VaRTM成形で炭素繊維シートを平面的に施工した検討であり、著者らの知る限り、国内外において、VaRTM技術を用いてFRP部材を鋼構造物に成形・接合した事例は見当たらない。

一方、土木構造物FRPとしては、VaRTM成形技術を用いて、炭素繊維とガラス繊維からなる、ハイブリッドFRP桁が製作された事例がある。曲げ耐力や桁の連結方法が検討され、構造部材として十分に適用可能であることが示されている⁹⁾。

既設鋼構造物の補修・補強は、構造物の性能回復や機能の向上を目的として実施されるが、現場作業の効率化も求められている。CFRP接着工法はそれらの要求にも貢献しているが、本研究では、VaRTM成形法を応用することで、さらに、効率化、合理化を図ることを提案す

る。具体的には、炭素繊維、ガラス繊維からなる強化繊維基材を束ねた半製品を施工現場に持ち込み、VaRTM成形技術で、強化繊維基材に樹脂を含浸・硬化することで、FRPと既設鋼構造物を一体化させる工法である。この工法の特徴は、平面的な広がりを持つFRPだけでなく、立体的なFRPの構築が可能となるため、必要かつ最適な剛性を構造物に付与することができる。その一例として、図-2に、桁端腐食部にVaRTM成形されたFRP部材の適用イメージを示す。図に示すように、適切な剛性を持つ補剛材を既設の鋼部材に構築することが可能となる。VaRTM技術を応用した成形・接着方法が確立できれば、効率的かつ合理的な鋼部材の補修・補強工法として、様々な部位への適用が可能になると考えられる。

3. VaRTM成形されたFRPの材料特性の検討

(1) 試験片の設計・製作と実験方法

FRP部材の成形と鋼部材への接合を現場で同時に達成するためのVaRTM技術の開発に向けて、補修・補強に用いられるエポキシ樹脂を用いて、VaRTM成形が可能かどうかについて、また、VaRTM成形された補強用FRPの材料特性を明らかにすることとした。ここでは、基礎的な研究として、VaRTM成形によって補強用FRPを製作し、その材料特性を実験的に検討した。

ガラス繊維(GF)、炭素繊維(CF)と配向方向を組合せてた補強用FRPとして、ハイブリッドFRP板を検討対象とした。表-1に、その積層構成を示す。設計時の換算弾性率を60GPa、炭素繊維比率を約40%として、GFクロス、マットの積層を調整しながら、厚さを、5.0、7.0、9.3mmとした。マトリックス樹脂は、現場で作業でき、

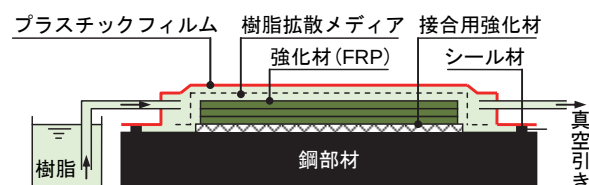


図-1 VaRTM成形の概念図

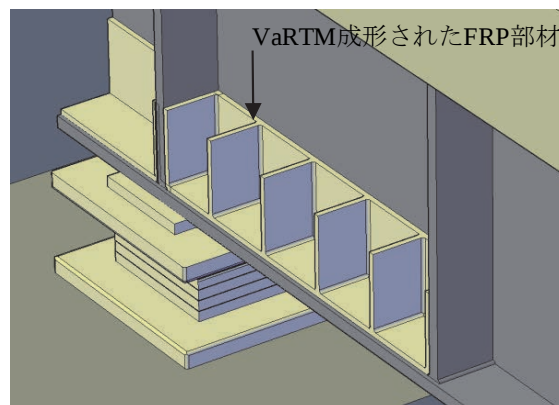


図-2 桁端腐食部にVaRTM成形したFRP部材の適用イメージ

かつ現場環境で硬化することを考慮して、コンクリート補強で使用されている、樹脂粘度が低い、2液性常温硬化型プライマー（AUP40）を用いた。図-3に、VaRTM成形によるハイブリッドFRP板の成形状況を示す。HFRP板は、設計厚さごとに、700×700mmの大きさと製作した。

引張、圧縮特性を検討するために、HFRP板からクーボ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)）¹⁰⁾に準拠し、万能試験機（容量：1,000kN）を用いて実施した。載荷速度は2.0mm/minとした。図-4に、引張試験の試験片を示す。引張試験片は、つかみ位置でのFRPの破壊を防ぐため、HFRP板を鋼管に入れ、膨張剤（パワープライスター）を充填して、樹脂定着を行った。膨張剤の養生条件は、25℃～35℃で12時間とした。

圧縮試験は、JIS K 7018（繊維強化プラスチック積層板の面内圧縮特性の求め方）に準拠し、精密万能試験機（容量：100kN）を用いて実施した。載荷速度は0.5mm/minとした。図-5に、圧縮試験の試験片を示す。試験片には、両端にタブ（厚さ2mmのCFRP板）をエポキシ樹脂接着剤で接着した。

表-1 ハイブリッドFRP板の積層構成

設計板厚 t_f (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°) GR: ガラス繊維 (0°) (GM/CF/GR45/CF/GR/CF) ₃
7.0	38.1	57.2	(GM/CF/GR45/CF/GR/CF/GR45/CF) ₂ -GR
9.3	39.2	59.8	(GM/CF/GR45/CF/GR/CF/GR/CF/GR45/CF/GR) ₂ -CF

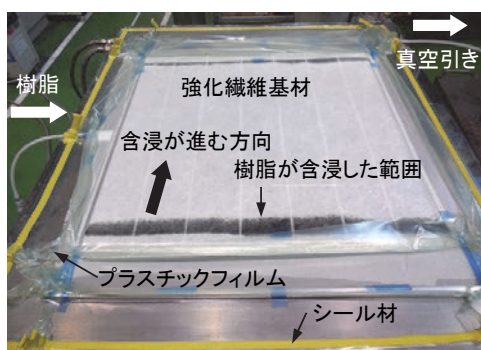


図-3 VaRTM技術によるハイブリッドFRP板の成形状況

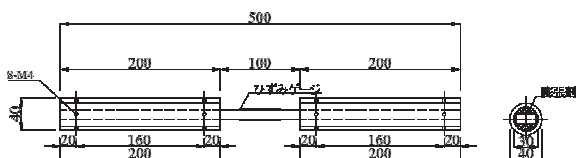


図-4 引張試験に用いた試験片

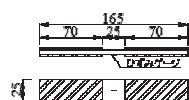


図-5 圧縮試験に用いた試験片

評価対象は、引張・圧縮に対する弾性係数と強度、軸方向ポアソン比であり、荷重とひずみは、データロガーを用いて計測した。ひずみゲージは、試験片の中央部の表裏に1軸あるいは2軸ゲージ（ゲージ長3mm）をそれぞれ設置した。ポアソン比は、各板厚の試験片のうち、2つの試験片に、2軸ゲージを表裏に設置して計測した。試験片は各板厚で5体用意した。圧縮試験、引張試験のセットアップ状況を図-6、図-7に示す。

(2) 引張試験結果と考察

引張試験結果の一部として、図-8に、板厚7mmの引張応力と軸方向ひずみの関係を示す。図中には、引張弾性係数とポアソン比の評価範囲および表裏に設置したひずみゲージの値とその平均値を示している。図より、軸方向ひずみは、破断まではほぼ線形挙動であり、表裏のひずみの値にも両方で差がほとんどない。引張強度は、約1400N/mm²であった。引張試験による破壊は、図-10に示すように、多くの試験片で試験片中央部で生じたが、板厚が大きくなると、引張耐力も大きくなり、破断前に端部から引抜けが生じた試験片があった。このため、板厚9.3mmの試験片で評価に有効なデータは、4体であった。

(3) 圧縮試験結果と考察

圧縮試験結果の一部として、図-9に、板厚5mmにおける圧縮応力と軸方向ひずみの関係を示す。図より、軸方向ひずみは、破断まではほぼ線形挙動であり、表裏のひず



図-6 引張試験のセットアップ図

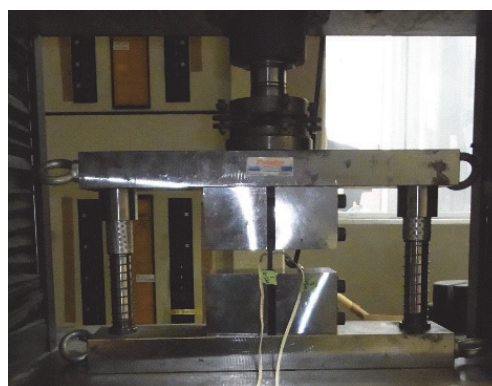


図-7 圧縮試験のセットアップ図

みの値が $3,000 \times 10^6$ 付近から両者に差異が生じたが、僅かであった。圧縮試験による破壊は、図-11に示すよう

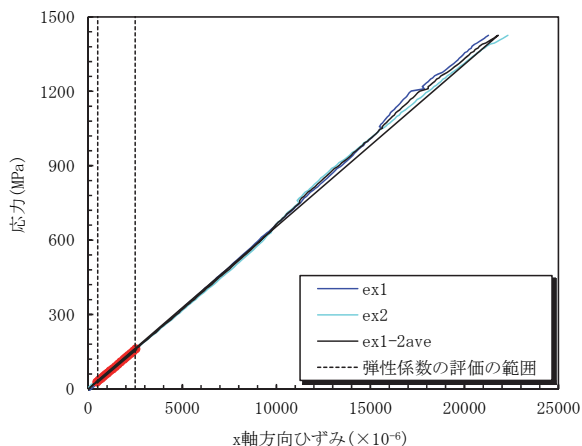


図-8 応力とひずみの関係 (引張試験)

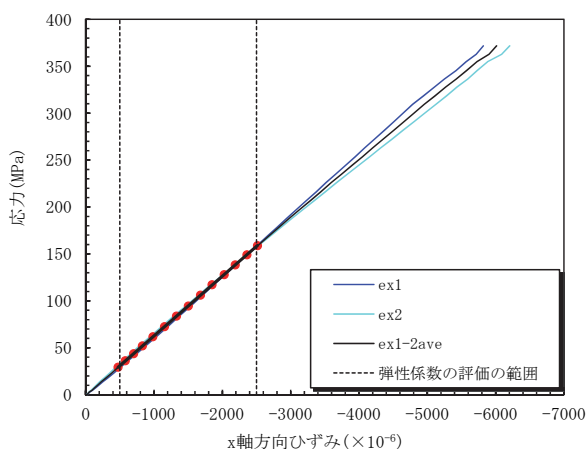


図-9 応力とひずみの関係 (圧縮試験)

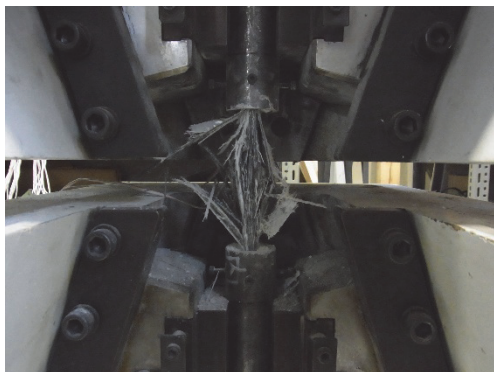


図-10 引張試験の破壊状況

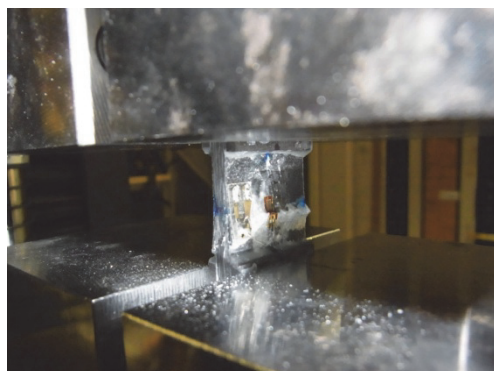


図-11 圧縮試験の破壊状況

に、評価点間で生じたが、つかみ部に近い箇所で破壊するケースが多かった。

(4) VaRTM成形されたFRPの材料特性

表-2、表-3に、引張特性と圧縮特性をそれぞれ示す。

引張強度、引張弾性係数は、板厚が厚くなると若干低下したが、それぞれ約 1400 N/mm^2 、 60 GPa 以上となり、弾性係数は、表-1に示した設計値よりも若干高い値となった。変動係数は、板厚が厚くなるほど大きくなる傾向にあったが、引張強度で8.5%、弾性係数で6.4%となり、比較的小さい範囲であった。ポアソン比は、板厚に関わらずほぼ同じで、約0.30であった。

圧縮強度は、板厚が厚くなるほど大きくなる傾向が見られた。圧縮弾性係数は、板厚9.3mmのみで、若干小さかったが、設計値と同等以上であった。変動係数は、引張特性に比べて、小さい傾向を示し、ばらつきは小さいと判断された。なお、ポアソン比は、板厚に関わらずほ

表-2 引張特性

板厚(mm)		V _f (%)	評価数	引張強度(MPa)		弾性係数(GPa)		ポアソン比
設計値	実測値			平均値	変動係数	平均値	変動係数	
5.0	4.0	53.6	5	1400	0.067	66.3	0.013	0.30
7.0	5.8	54.2	5	1419	0.041	64.6	0.052	0.31
9.3	8.5	50.8	4	1317	0.085	60.3	0.064	0.29

表-3 圧縮特性

板厚(mm)		V _f (%)	評価数	圧縮強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)		ポアソン比
設計値	実測値			平均値	変動係数	平均値	変動係数	
5.0	4.1	52.3	5	358.4	0.052	63.6	0.013	0.34
7.0	5.7	55.2	5	438.2	0.066	63.8	0.023	0.33
9.3	8.5	50.8	5	451.8	0.016	58.8	0.042	0.32

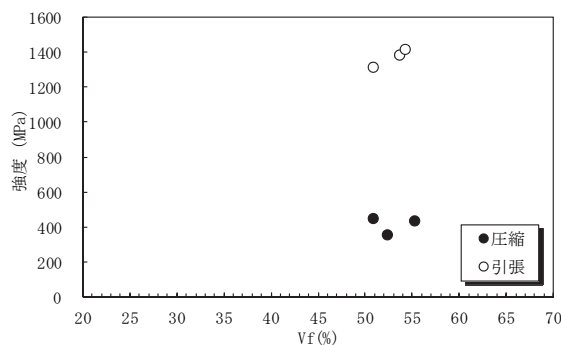


図-12 強度と繊維体積含有率 V_f の関係

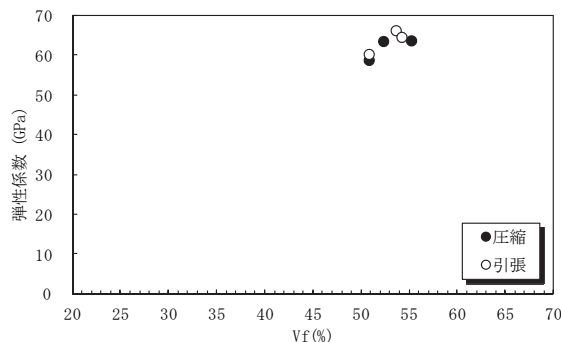


図-13 弾性係数と繊維体積含有率 V_f の関係

ば同じで、約0.33であった。

以上のことから、強度、弾性係数の変動係数は1～8.5%の範囲にあることから、VaRTM成形により作製されたHFRP板は、引抜成形に相当する品質¹¹⁾を有していることが確かめられた。

表-2、表-3には、試験片の板厚の実測値（平均値）と V_f （繊維体積含有率）を併記している。板厚は設計値よりも小さいこと、また、 V_f は、板厚が小さいほど大きいことがわかる。

図-12、図-13に、強度と V_f （繊維体積含有率）の関係、弾性係数と V_f （繊維体積含有率）の関係をそれぞれ示す。図より、強度と V_f には、相関関係が見られなかった。これは、強度は、樹脂量よりも繊維量に依存し、板厚に関わらず繊維の含有率が同じであれば、強度はほぼ同じであると考えられる。一方、図-13の弾性係数と V_f の関係からは相関関係がみられ、弾性係数は、 V_f が高くなるほど、高くなった。これは、設計厚よりも板厚が小さくなることで V_f が高くなり、必然的に弾性係数も高くなったことによるものである。検討した範囲では、 V_f は概ね50%程度であるといえた。

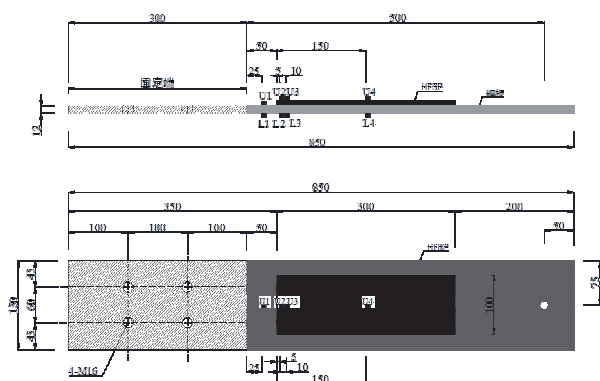


図-14 片持ちはりの曲げ試験に用いた試験体

表-4 鋼板（SM490Y）の材料特性値

降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	ポアソン比 ν_s	伸び δ (%)
427.3	549.6	211.0	0.28	38.7



図-15 VaRTM成形によるHFRP板の鋼板への含浸・接着の状況

4. VaRTM成形されたFRPと鋼部材の接着接合部の評価

(1) 試験片の製作と実験方法

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¹²⁾を参考に、片持ちはりの曲げ試験によって評価した。図-14、表-4に、片持ちはりの曲げ試験に用いた試験体、鋼板の材料物性値を示す。試験体は、鋼板（SM490Y、850×150×12mm、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_f ）をVaRTM成形したものであり、図-15に、VaRTM成形によるハイブリッドFRP板の鋼板への含浸・接着の状況を示す。試験体は、各板厚で5体用意した。図-16に、VaRTM成形されたHFRP板の端部の状況を示す。HFRP板の端部には、試験片ごとにばらつきがみられ、板厚が5mmと7mmの端部は、滑らかなテー



図-16 VaRTM成形されたHFRP板の端部の状況

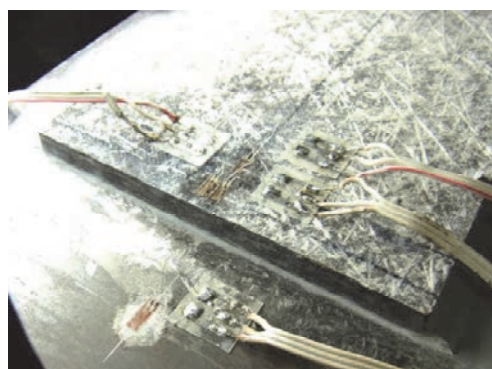


図-17 HFRP板を接着接合した接着端部の状況



図-18 片持ちはりの曲げ試験のセットアップ図

パー状であったが、9.3mmの端部は、垂直に近く、端面が荒れた状態のものも多かった。

さらに、VaRTM成形されたHFRPの接合強度との比較のために、鋼板に、予めVaRTM成形で製作されたHFRP板（300×100×9.3mm）をエポキシ樹脂接着剤（E258RW）を用いて接着接合した試験体（9.3eと呼ぶ）を4体用意した。表面処理は、鋼板ではブラスト処理、HFRP板ではサンドペーパーによる目荒しとした。接着層厚は、直径0.4mm球形の石英ガラスビーズを用いて0.4mmに管理し、て接着接合した。養生条件は、24時間、約40℃とした。HFRP板の端部は、図-17に示すように、端面が垂直になるように仕上げた。

曲げ載荷実験については、電気油圧サーボ式疲労試験機（容量：100kN）を使用して、変位制御（0.05mm/sec）で、HFRP板の端部のひずみが明確に変化するまで荷重を載荷した。図-18に、片持ちはりの曲げ試験のセットアップ図を示す。HFRP板の端部からの破壊と補強効果を検討するために、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。ひずみゲージ位置は、図-14に併記しているように、鋼板上面のゲージをU1～U4、鋼板下面のゲージをL1～L4とした。

(2) HFRP板接着による補強効果の検討

表-5に、接着中心部の鋼板のひずみ（L4）の低減率、破壊荷重、接着端部における接着層の主応力の比較を示す。ひずみの低減率の理論値は、表-2、表-3のHFRP板の圧縮・引張弾性係数の平均値、表-4の鋼板の弾性係数を用いて、完全合成と仮定した等価曲げ剛性を求め、ひずみゲージL4の位置における片持ちはりの曲げ応力により計算した。なお、板厚は、実測値に基づいたが、表-5に示したように、端部以外の板厚は、表-2、表-3のクーパーン試験片とほぼ同じであったが、やや大きかった。

表-5より、鋼板のひずみの低減率の実験値は、ほぼ理論値通りといえたが、板厚9.3mmでは、低減率は理論値よりわずかに大きくなり、低減効果が小さくなる傾向がみられた。これは、エポキシ樹脂接着剤で接着した試験体も同様であり、補強効果もほぼ同じであった。

(3) 破壊荷重の評価

図-19に、実験結果の一例として、試験体No.7-1について、荷重とU1～U4のひずみの関係を示す。U1は無補強部の鋼板のひずみである。また、U2、U3、U4は、HFRP板の端部から5、15、150mm位置におけるHFRP板上のひずみの値である。いずれも荷重の増加に対してほぼ直線に増加するが、U2～U4では、HFRP板の端部に近いほど、ひずみの値は小さい。これは、HFRP板の端部ほど、大きな曲げモーメントを受けるが、HFRP板のせん断変形により、荷重が十分に伝達されないためである。また、

U2、U3では、1.72kNでひずみが急激に低下することがわかる。HFRP板の端部付近に破壊が生じるとひずみが伝達されなくなり、小さくなると考えられることから、端部のひずみが最大となる時の最小荷重を、破壊荷重 P_{db} と定義した。No.7-1では、U2とU3の破壊荷重は同じであったが、破壊は端部から生じると考えられるため、全ての試験体のU2のひずみに着目して、破壊荷重を評価することとした。なお、U2で評価ができなかった試験体については、U3で評価を行った。

図-20に、全ての試験体における荷重とU2のひずみの関係を、表-5に、各試験体の破壊荷重の平均値と変動係数をそれぞれ示す。図より、VaRTM成形で接合した試験体では、板厚が小さいほどひずみが大きくなること、また、エポキシ樹脂接着剤で接着した試験体では、VaRTM成形で接合したものに比べて、ひずみの大きさがかなり小さいことがわかる。これは、被着体および接着層の厚さに依存するせん断変形によるためである。

図表より、破壊荷重は、VaRTM成形で接着した試験体では、板厚7mmが最も高く、5mmが最も小さくなり、全ての試験体で、片持ちはりの固定端側での降伏荷重以下で破壊することがわかる。また、エポキシ樹脂接着剤で接着した試験体では、破壊荷重が最も小さかった。これは、VaRTM成形では、製作の工程で端部形状がテーパ状になるため、端部の応力集中が緩和されるものと考えられる。破壊荷重の変動係数は、VaRTM成形では約30%で、エポキシ樹脂接着で20%であり、VaRTM成形の方がばらつきが大きかった。これは、成形段階で、HFRP板の端部処理を行っていないためであり、前述したとおり、端部の形状が異なることによるものである。VaRTM成形では、任意の形状に設定することが可能で、テーパ状の仕様にすることも容易である。

表-5には、破壊荷重時におけるHFRP板端部の接着層の主応力を併記している。接着層の主応力は、文献12)を参考に算出した。ここでは、接着層の厚さを0.4mm（一定値）とし、HFRP板の端部は全て垂直であると仮定している。主応力の変動係数は、破壊荷重のばらつき

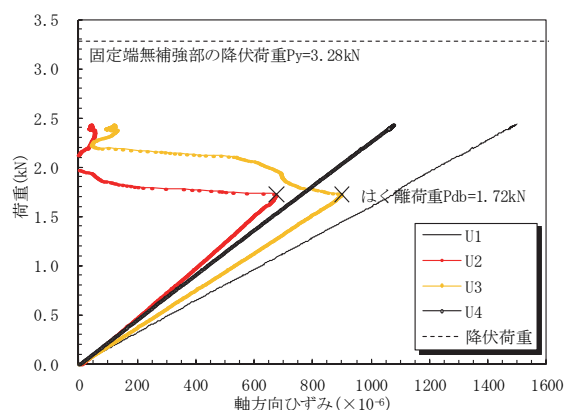


図-19 試験体 No.7-1 における荷重とひずみの関係

表-5 鋼板のひずみの低減率、破壊荷重、接着端部における接着層の主応力の比較

板厚 (mm)		試験体数	鋼板のひずみの低減率		破壊荷重		接着端部の接着層の主応力	
理論値	実測値		理論値	実験値	平均値 (kN)	変動係数	平均値 (MPa)	変動係数
5	4.9	5	0.77	0.75	1.52	0.33	125	0.34
7	6.0	5	0.68	0.67	2.21	0.26	187	0.26
9.3	9.2	5	0.48	0.53	1.76	0.31	151	0.31
9.3e	8.5	4	0.48	0.56	1.06	0.20	89	0.20

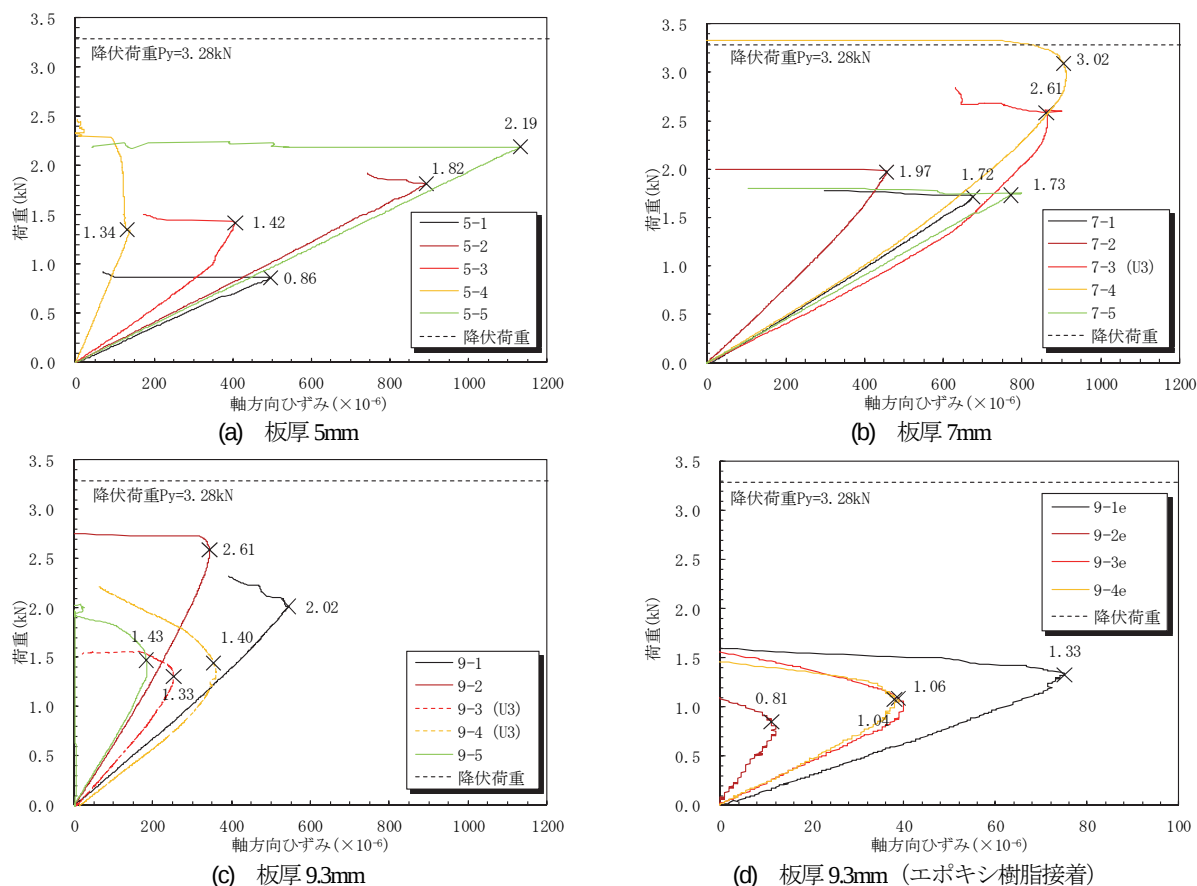


図-20 荷重とひずみの関係

に依存するため、破壊荷重と同じである。VaRTM成形における主応力は、エポキシ樹脂接着剤の主応力よりも、かなり高く算定された。ただし、VaRTM成形では、前述した通り、接着層の厚さ、端部の形状に仮定を設けており、表-5に示した主応力は、実際の応力とは異なると考えられる。ここでは、同じ条件でモデル化した場合の比較として示している。VaRTM成形における主応力は、破壊荷重の大きさに応じて変化しており、板厚7mmで最も高くなった。接着層の破壊基準に、主応力を適用することも提案されているが¹²⁾、本実験における検討の範囲では、板厚の相違による主応力の変動が大きく、接着層の主応力の評価方法をそのまま適用することは困難であると考えられる。また、破壊荷重は、HFRP板の端部のひずみの変化点から判断したが、破壊が生じている位置の特定や破壊形式については、外観による目視観察では、判定が困難であった。そこで、5章では、曲げ載荷実験後に、超音波探傷試験を実施して、内部の破壊の状況について検討することとした。また、内部の接着状態を確

認するために、非破壊検査後に、接着接合されている断面を切断して観察することとした。

5. 接着接合部の破壊の評価と接合断面の観察

(1) 超音波探傷試験の方法と試験体

前章で述べたように、HFRP板の端部におけるひずみの変化から破壊を想定したが、荷重の低下は明確ではなく、破壊形式も判別できなかった。そこで、破壊形式とその範囲を明らかにすることを目的として、非破壊検査で多用されている、超音波探傷法を適用して検討を行った。接着接合面が比較的大きいことから、幅方向に同時に検査できる、フェーズドアレイ超音波探傷装置（ZETEC社製TOPAZ32/128P）を適用した。検出可能な幅は90.75mmであり、フェーズドアレイ振動子は128チャンネル配置されている。8チャンネルの振動子グループを同時励振して、そのグループを幅方向にシフトすることで、0.75mm間隔で121チャンネル分（幅90.75mm）の

データを得ている。図-21に、超音波探傷試験の状況を示す。水槽に試験体を水没させて、超音波探傷試験を実施した。なお、超音波探傷試験における超音波の入射は、HFRP板側と鋼板側の両面で実施したが、HFRP板側から超音波を入射し、鋼板の裏側のエコー（底面エコー）を検出する方法によれば、破壊の推定で、超音波の波高値の変化が顕著であったため、以下では、その結果について述べる。

超音波探傷試験に用いた試験体は、No.7-1（HFRP板の厚7mm）であり、その荷重とひずみの関係は、図-19に示した通りである。図より、HFRP板の端部から35mmの位置のU3のひずみゲージにおいて、荷重1.72kNでひずみの低下がみられることから、少なくともこの位置までは破壊が進行していると予測され、荷重は最大で約2.5kNまで载荷している。

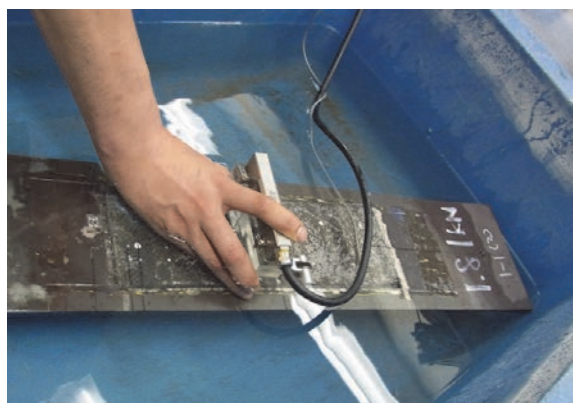
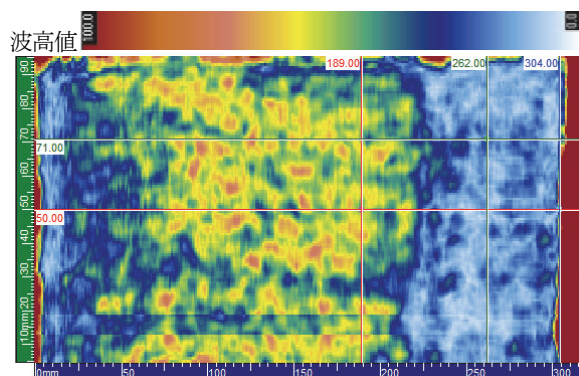
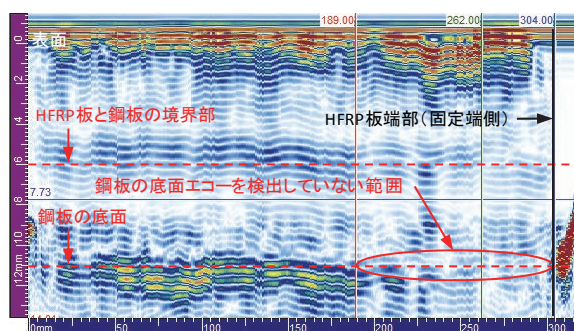


図-21 HFRP 板側からの超音波探傷試験の状況



(a) 平面（底面エコーを抽出した C スキャン画像）



(b) 厚さ方向 ((a)の赤線の B スキャン画像)

図-22 鋼板の底面エコーの波高値のコンタ図

(2) 超音波探傷試験による接着接合部の破壊の評価

図-22に、超音波探傷試験結果の一部として、HFRP板側からの探傷で、鋼板の底面エコーを検出した際の波高値のコンタ図を示す。図-22 (a)は、幅90.75mm、長さ300mmの範囲で得られた波高値（Cスキャン画像）を示しており、ほぼHFRP板（100×300mm）の接着範囲を示している。図より、载荷点側の左端から約220mm以上で、波高値が小さいことがわかる。この波高値の変化は、鋼板側（裏面）からの底面エコーにおいて、超音波が透過しない、あるいは透過しにくい領域を示している。一般に、破壊等によって内部組織が分断されると超音波が透過しにくくなり、波高値に変化が生じる。図-23 (a)においてもその変化が顕著に現れており、波高値の変化が生じている範囲において内部に破壊が生じていると判断された。実測では、長手方向の破壊の範囲は、右端から約82mmの範囲であった、前述したように、35mm位置に設置されたひずみゲージの位置においてもひずみの変化がみられ、この範囲まで破壊が生じていると予測されたが、超音波探傷試験によってさらに広い範囲で、破壊が生じていることがわかった。なお、異なる位置でのひずみの変化は、ほぼ同時に生じていることから、破壊は、固定端側のHFRP板の端部から急激に生じたと判断された。

一方、図-22 (b) は、(a)の赤線（垂直方向に50mmの位置）の位置での厚さ方向の超音波の波高値を示したもの（Bスキャン画像）である。図より、(a)で波高値の低下がみられた範囲において、厚さ方向で鋼板の底面エコーを検出していない範囲があることがわかる。これは、HFRP板と鋼板の境界部では波高値に変化が見られないが、破壊部分から先には超音波が透過しない、あるいは透過しにくいことによるものと判断された。したがって、この位置で破壊が生じていると判断され、破壊形式は、鋼板とHFRP板の界面はく離と推定された。なお、曲げ载荷実験中の目視観察からは、HFRP板の端部において、わずかな白濁が認められた程度であり、外観からは破壊範囲の検出や破壊形式の推定は困難であった。

(3) 断面の観察による接着状態

VaRTM成形されたHFRP板と鋼板の接合面を把握するために、試験体No.7-1をバンドソーで切断して、接着断面を観察した。バンドソーの切断面は、サンドペーパーを用いて、研磨している。切断面の観察には、マイクロスコープ（キーエンス製VHX-2000）を用いた。

図-23に、切断位置と撮影方向の概念図を、切断面の画像として、図-24に、HFRP板が接着された断面の状態をそれぞれ示す。

図-24 (a)より、HFRP板の端部付近では、特に端部処理は実施していないため、強化繊維基材が揃っていないが、VaRTM成形の製作過程で端部の形状は鋼板に擦り

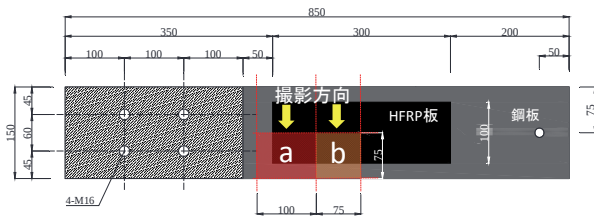
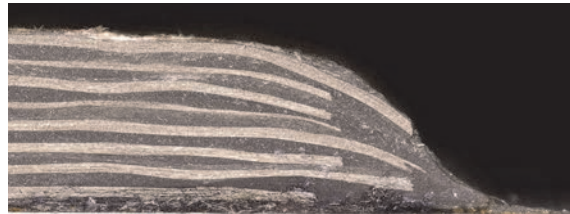
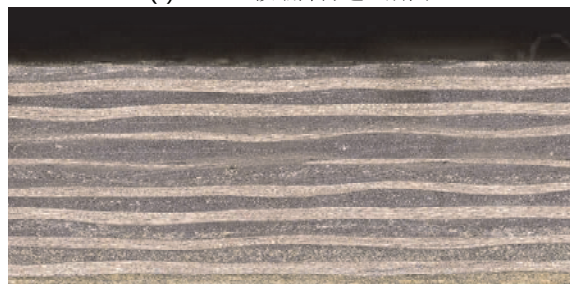


図-23 切断位置と撮影方向の概念図



鋼板 1000.00μm
(a) HFRP 板端部付近の断面



1000.00μm 鋼板
(b) 破壊が生じていない HFRP 板の断面
図-24 VaRTIM 成形で HFRP 板が接合された断面の状態

付き、丸みを帯びていることがわかる。また、鋼板との境界部においては、わずかにすき間が生じていることがわかる。このすき間は、鋼板に接しているガラスマット層との間で生じていることから、界面はく離であると判断され、前述の超音波探傷試験での結果と一致している。さらに、図-24 (b)より、破壊が生じていない HFRP 板の断面からは、明確な接着層は確認されず、鋼板と接触しているのは、ガラスマット層であることがわかる。その厚さは、画像計測によれば、約0.3mmであった。したがって、今後は、ガラスマットを含むFRP層の強度を議論する必要があるといえた。

6. まとめ

本研究では、VaRTIM成形されたFRPの材料特性、FRPと鋼材の接着接合部の強度を明らかにすることを目的として、実験的な検討を行った。その結果、次のことがいえた。

- (1) VaRTIM成形により製作されたHFRP板は、強度、弾性係数の変動係数が1～8.5%の範囲であることから、

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。

- (2) VaRTIM成形により製作されたHFRP板の板厚は、理論値よりも小さくなる傾向であること、繊維体積含有率 V_f は、検討した範囲では、板厚に関わらず約50%であり、安定して高いことがわかった。
- (3) 鋼板にHFRP板をVaRTIM成形により接合して、その接合強度を片持ちはりの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。
- (4) VaRTIM成形によりHFRP板が接合された鋼板の被着体の中心部では、理論値通りに鋼板のひずみが低減され、完全な合成断面として補強されることが確かめられた。
- (5) VaRTIM成形によりHFRP板が接合された鋼板の曲げによる破壊形式は、HFRP板と鋼板の界面はく離であること、エポキシ樹脂接着剤で接合した場合と比べて、破壊は急激に進展することがわかった。
- (6) VaRTIM成形によりHFRP板が接合された鋼板の断面観察からは、HFRP板と鋼板との境界部に、明確な接着層はなく、ガラスマットに樹脂が含浸した薄いGFRP層であることがわかった。

謝辞：超音波探傷試験では、株式会社テクノ電子 松園真一氏ならびにZetec, Inc.にご協力をいただいた。曲げ載荷実験では、首都大学東京学部生の小林洸貴氏にご協力をいただいた。ここに記して謝意を評します。

参考文献

- 1) 複合構造委員会編：先進複合材料の社会基盤施設への適用，複合構造レポート 01，土木学会，2007。
- 2) 複合構造委員会編：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート 05，土木学会，2012。
- 3) 近藤富士夫，松井孝洋：他分野における CFRP 大型構造物成形に関する最近の話題，土木学会，第 4 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.23-26，2012。
- 4) 板垣一也，渡邊憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第 8 回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集，日本鋼構造協会，pp.49-54，2002.6
- 5) 村上英樹，安森浩，小林朗，立石晶洋：鋼部材に対する炭素繊維プレートをを用いた緊張力導入に関する実験的研究，プレストレスコンクリート技術協会，第 15 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.359-362，2006.11
- 6) 杉浦 江，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，長井正嗣，小林 朗：炭素繊維シートを用いた鋼部材補修法に関する一検討，土木学会，第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム，No.56，6 pages (CD-ROM)，2007.11
- 7) 秀熊佑哉，小林朗，長井正嗣，宮下剛，和久井穰：FRP シート接着による鋼部材の補修に関する研究，第 3 回 FRP

複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.91-94, 2009.7

- 8) N. Uddin, et al.: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) for External Strengthening of Structures, *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering*, A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, pp.77-114, 2013.
- 9) 中村大希, 中村一史, 柳沼謙一, 松井孝洋: ハイブリッド FRP 歩道橋の主桁-横桁連結構造の合理化に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 69 回全国大

会, CS3-034, pp.67-68, 2014.9

- 10) コンクリート委員会編: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリ 88, pp.337-341, 土木学会, 1996.9
- 11) 複合構造委員会編: 土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ, 複合構造レポート 11, 土木学会, 2014.11
- 12) 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.

EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR AND STRENGTHENING OF STEEL MEMBERS USING VARTM TECHNOLOGY

Ryosuke KONDO, Hitoshi NAKAMURA, Takahiro MATSUI
and Yukihiro MATSUMOTO

The objective in this study is to develop a repair and strengthening method of existing steel members by Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) technology. First, coupon specimens of hybrid FRP plates were fabricated using VaRTM and were tested in order to investigate fundamental material properties. Next, in order to study repair effect and bonding strength, the steel plates bonded the hybrid FRP plates using VaRTM were tested under bending load. The results show the quality of material properties of hybrid FRP plates are high and equivalent to a pultruded material. Although the bonding strength varied widely, the bonding strength was high in general. Therefore, the significant repair effect by the VaRTM technology was confirmed.