

# VaRTM 成形で接着された CFRP 部材による断面欠損した桁端柱部材の性能回復について

首都大学東京大学院 学生員 ○松山晃大・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

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、鋼構造物の補修・補強に適用されている。本研究は、旅客機の構造要素や、風力発電設備のブレード等の大型FRP構造物の製造方法の一つで、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の開発を目的としたものである。断面欠損した桁端柱部材を対象に、CFRP部材による耐力の性能回復について実験的な検討を行った。また、多積層の場合、施工を効率化するために、予め炭素繊維（以下、CFとよぶ）シートを工場で束ねたプリフォーム（以下、PFとよぶ）材の適用と、施工時のセットボルトとの干渉の回避を試みた。

## 2. 桁端柱部材のモデル化と実験方法

### 2.1 試験体と実験装置

支点上の鉛直反力が作用する柱部材の耐荷力に注目するため、鉛直方向に荷重を載荷することとした。図-1に、桁端柱部材のモデル化とセットアップを示す。腐食損傷のモデル化として、ウェブ垂直補剛材の断面欠損の組合せを、50-50%、50-100%の2ケースとした。断面欠損の範囲は、垂直補剛材、ウェブの下端から100mm（ハッチング部）とした。なお、ひずみゲージは、ウェブ・垂直補剛材の下端部から15, 20, 50, 110, 274mmの位置にそれぞれ配置している。図-1(d)に、セットアップ図を示す。載荷には油圧ジャッキ（荷重容量2,000kN，最大ストローク200mm）を使用した。

### 2.2 補修設計と施工方法

補修の方針として、鋼部材の欠損厚さからCFRPの弾性係数を考慮した等価な剛性を付与することとして、必要厚さを算出した。CFシートは高強度タイプ（シートの厚さ0.167mm，引張強度3.4kN/mm<sup>2</sup>，弾性係数245kN/mm<sup>2</sup>）を用い、繊維体積含有率を50%とした。図-2に、補修方法を示す。表-1に示すように、片側あたり、50%欠損で4.9mm，100%欠損で9.8mmのCFRPをVaRTM成形によって接着することとした。

さらに、PF材を用いた補修では、CFシートは中弾性タイプ（シートの厚さ0.217mm，引張強度2.4kN/mm<sup>2</sup>，弾性係数440kN/mm<sup>2</sup>）を用いた。PF材の積層数は9層とした。これは9層を基本に機械加工で束ねることを想定しているためである。欠損部は、平面状のPF材を充填することで補修に必要な数量となるが、はく離防止のため、最外層にPFアングル材を配置している。

補修範囲は、既設のガセット等を考慮して、高さ方向に300mmとした。また、高さ方向の上端の応力緩和のために、50%欠損では10mm，100%欠損では5mmの段差をそれぞれ設

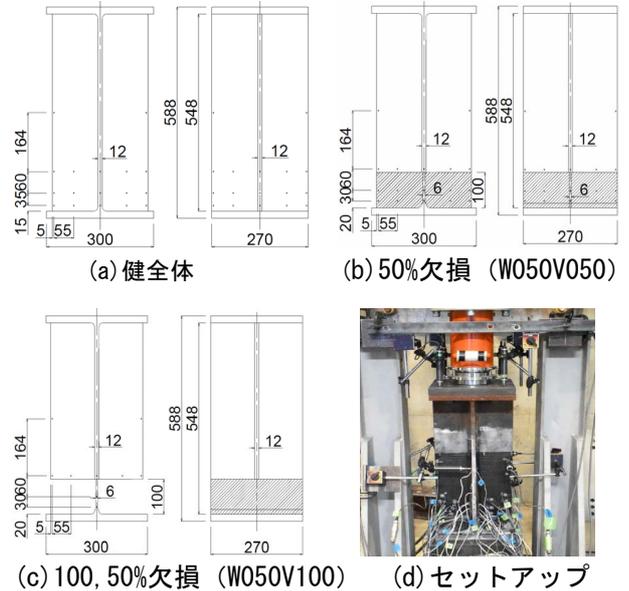


図-1 桁端柱部材のモデル化とセットアップ

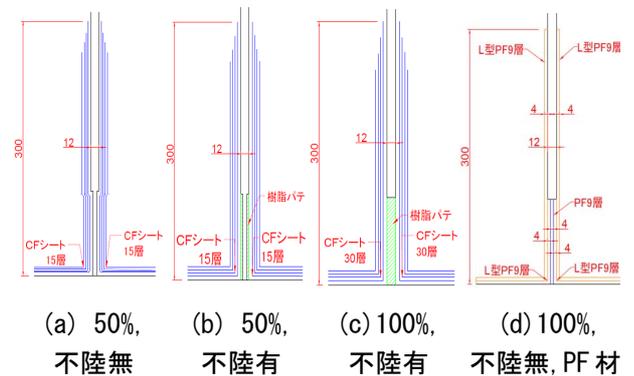


図-2 補修方法

表-1 鋼換算補修における炭素繊維量

項目	単位	50%欠損	100%欠損
鋼材の健全部の厚さ	mm	12.0	12.0
鋼部材の必要厚さ	mm	6.0	12.0
CFシートの積層数	ply	30	60
繊維体積含有率	%	50	50
CFRPの実際の厚さ	mm	9.8	19.6



図-3 補修の状況

キーワード CFRP, 真空含浸, 桁端腐食, 補修

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

け、テーパー状とした。補修工程は、下地処理、プライマー塗布、不陸修正、炭素繊維シートの仮止め、副資材の設置、真空含浸の手順である。図-3に、代表的な補修の状況を示す。施工時にはCFシートがセットボルトと干渉しないように切欠きを設けた。また、含浸時にボルトが樹脂で固着しないように、ボルトを養生した。表-2に、実験パラメータを示す。

3. 実験結果と考察

図-5に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。無補修のW050V050とW050V100の耐力は、健全体と比べ、それぞれ46%、75%低下した。これは、ウェブと垂直補剛材の欠損部で、早い段階で降伏し、局部座屈が生じたためである。

一方、不陸修正を施して補修したW050V050REでは、健全体モデルに比べて、柱部材としての最大荷重は1%高くなり、剛性も初期性能まで十分に回復していること、また、不陸修正なしで補修したW050V050RNでは、剛性、耐力ともに初期性能まで回復しないことがわかる。さらに、不陸修正を施して補修したW050V100REでは、W050V050RNと同様に、十分に回復しなかった。W050V050RNでは、不陸修正がないため、欠損部でCFRPに局部的な曲がりが生じて、弱点となったこと、W050V100REでは、不陸修正されたが、100%欠損部は樹脂充填のみであり、荷重伝達が不十分であったことが要因と考えられる。これに対して100%欠損部にPF材を充填して補修したW050V100PNでは、最大荷重が健全体と同レベルまで回復していることがわかる。

図-6、図-7に、荷重とウェブあるいは補剛材の下端から50mm位置の軸ひずみの関係をそれぞれ示す。W050V050RE、W050V100PNでは、ひずみは、最大荷重付近までウェブ、補剛材ともに直線的に増加し、最終的に健全体よりも軸ひずみが抑制されることがわかる。W050V100REにおいても、ひずみは最大荷重付近までほぼ直線的に増加し、健全体よりも抑制されるものの、最大荷重付近で急激に不安定となり破壊している。一方、W050V050RNでは、同様にひずみは抑制されるものの、1300kN付近からひずみが増加し、耐力が低下した。

図-8に、試験体の座屈変形を示す。健全体は全断面の塑性後に、上部に局部座屈が生じた。すべての補修モデルでは、欠損部で、CFRPではく離が生じ、局部座屈が生じた。

4. まとめ

以上のことから、50%欠損では不陸修正を施した上で鋼換算したCFRPによる補修で、また、100%欠損では欠損部をCFRPで充填した補修で、耐力が回復することが確かめられた。さらに、セットボルトを回避した補修、両面で60層の多積層の場合の補修が可能であること、また、PF材を利用すれば効率的な施工が可能であることを確認した。

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) 小林洗貴, 近藤諒翼, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: VaRTM成形を応用したCFRPによる鋼桁端腐食部の補修, 第6回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.138-146, 2016.11

表-2 実験パラメータと最大荷重

モデル名	状態	不陸修正	最大荷重 $P_{max}$ (kN)	健全体に対する割合(%)
W000V000	健全	—	2097.2	1.000
W050V050	無補修	—	1135.6	0.541
W050V100		—	533.8	0.255
W050V050RE		有	2126.5	1.014
W050V050RN	補修	無	1670.0	0.796
W050V100RE		有	1845.9	0.880
W050V100PN		無	2117.8	1.010

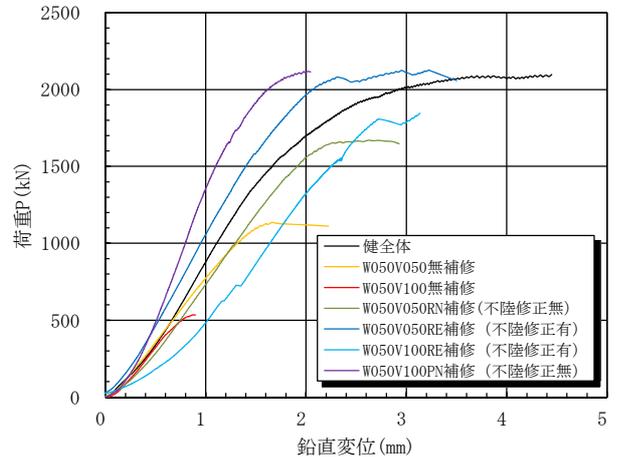


図-5 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

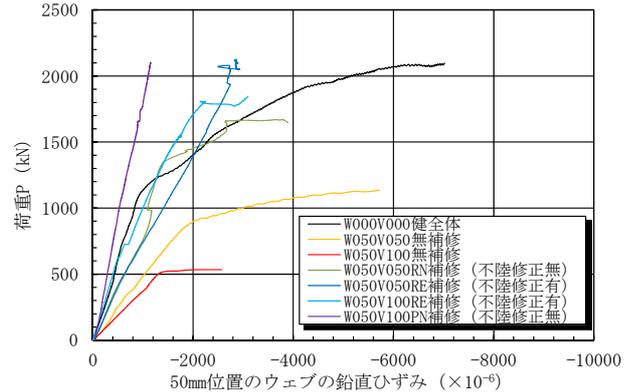


図-6 荷重と軸ひずみの関係 (ウェブ 50mm)

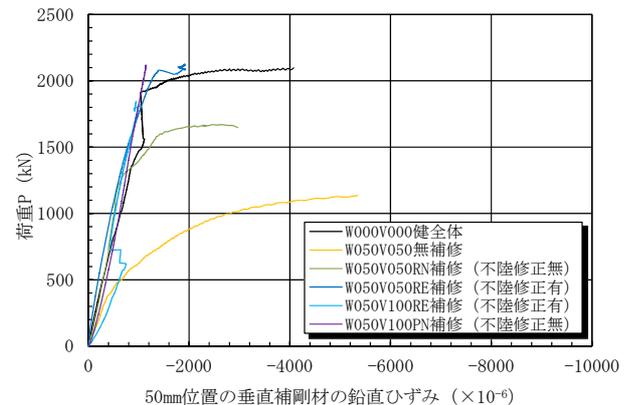


図-7 荷重と軸ひずみの関係 (補剛材 50mm)



(a) 健全体 (b) W050V050 (c) W050V050RE (d) W050V050RN

図-8 試験体の座屈変形