

VaRTM 成形を応用した CFRP による鋼桁端腐食部の補修に関する検討

首都大学東京大学院 学生員○小林洸貴・近藤諒翼 首都大学東京 正会員 中村一史
豊橋技術科学大学 正会員 松本幸大 東レ 正会員 松井孝洋・越智寛

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、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、航空機の構造要素や、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 と鋼構造物を一体化させる補修工法を開発¹⁾することを目的としたものである。ここでは、鋼桁端腐食部を対象に、柱部材としての耐力の性能回復について実験的、解析的な検討を行った。

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、炭素繊維等の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、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。現場に適用する場合、FRP 成形と接着接合の施工を同時にできる利点があり、積層数が多い炭素繊維シート接着工法に比べて、工期を大幅に短縮できる利点がある。

3. 桁端柱部材と腐食による断面欠損のモデル化

鋼桁の支点近傍の腐食損傷を補修の対象として、図-2 に示すように桁高、ウェブ厚を縮小して部分的にモデル化する。支点上の鉛直反力が作用する柱部材の耐力に着目するため、鉛直方向に荷重を載荷することとした。ここでは、垂直補剛材、ウェブの下端の断面欠損が柱部材の耐力の低下に及ぼす影響を把握するとともに、断面欠損した柱部材の CFRP 接着による性能の回復について、検討を行った。

腐食による断面欠損は、垂直補剛材、ウェブの下端 100mm の範囲 (図-2 のハッチング部) とし、フランジの腐食は考慮しない。腐食形状は、垂直補剛材、ウェブの厚さの欠損率を、下端で 75%、上端で 0%とした、テーパ状 (直線勾配) でモデル化した。

数値解析では、汎用有限要素解析プログラム Marc2013 を適用し、ソリッド要素を用いて、垂直補剛材、上下フランジ、ウェブは厚さ方向に 4 分割し、ウェブの高さ方向に対して、1/1000 の初期たわみ (正弦半波) を考慮した。なお、欠損部は厚さ方向に 2 分割でモデル化した。ソールプレートに相当する節点を鉛直方向に拘束するとともに、載荷板に等分布荷重を載荷して、弧長制御で解析を行った。

4. 炭素繊維シートの数量と VaRTM 成形による補修方法

補修の方針として、最大の断面欠損部 (75%) を、鋼の弾性係数で換算した等価な CFRP の剛性で補うこととした。炭素繊維シートには、中弾性タイプ (シート厚さ 0.163mm、引張強度 2.4kN/mm²、弾性係数 440kN/mm²) を用い、繊維体積含有率を 50%とした。その結果、表-1 に示すように、片側あたり、ウェブには厚さ 2mm、垂直補剛材には厚さ 4mm の CFRP を VaRTM 成形によって接着することとした。補修範囲は、欠損部の高さ 100mm に対して十分な定着長を確保するため、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、10mm のずれを設け、テーパ状とした。鋼板の素地調整はブラスト面形成動力工具を用いて行い、欠損部にエポキシ樹脂パテ材を充填して、表面を平坦に整えた。図-3 に、VaRTM 成形時の状況を示す。なお、予め FBG センサをウェブ、垂直補剛材に、それぞれ 1 箇所ずつ CFRP の 1

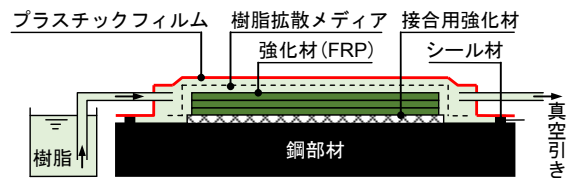


図-1 VaRTM 成形の概念図

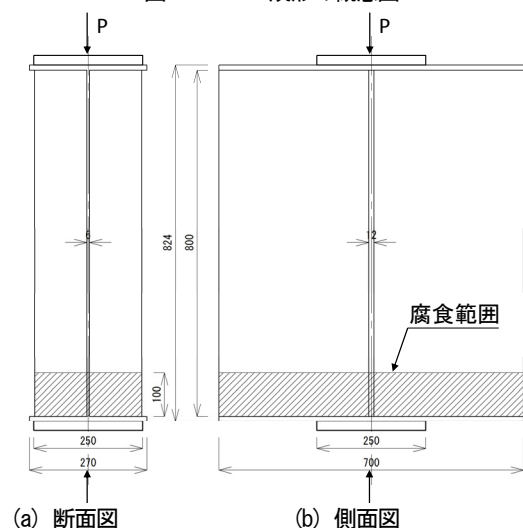


図-2 桁端柱部材のモデル化

表-1 鋼換算補修における炭素繊維量

項目	単位	垂直補剛材	ウェブ
鋼材健全部の厚さ	mm	12.0	6.0
鋼材腐食部の最小厚さ	mm	3.0	1.5
鋼部材の必要厚さ	mm	9.0	4.5
CF シートの積層数	ply	26	14
繊維体積含有率	%	50	50
CFRP の実際の厚さ	mm	8.18	4.09
解析時の CFRP の厚さ	mm	8.0	4.0

Key Words : 鋼桁端部, 断面欠損, 補修, VaRTM, 炭素繊維シート

連絡先: 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)

層目に埋め込み、一体化させて、CFRP の内部のひずみを計測した。

5. 検討結果と考察

図-4 に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。まず、無補修モデルの耐荷力は、健全体モデルと比べ、38.3%低下した。これはウェブと垂直補剛材の腐食部の最小厚さが、それぞれ 1.5mm, 3mm と薄いため、早い段階で降伏し、局所的に座屈したためである。また、健全体モデルの剛性は、無補修モデルに比べて低くなった。これは健全体モデルの初期たわみが最大で 5mm と大きかったことによるものと考えられた。

一方、補修モデルでは、健全体モデルに比べて、柱部材としての最大荷重は 3.9% 高くなり、初期性能まで十分に回復していることがわかる。また、補修モデルでは、剛性も健全体モデルより高くなることからわかる。

図-5 に、荷重とひずみの関係を示す。ひずみは、ウェブ、補剛材の同じ位置に設置された、ひずみゲージ、FBG センサによるひずみの値を示している。図より、荷重が 500kN 以下では全てのセンサで、ほぼ同じひずみの値であるが、それ以上の荷重では、垂直補剛材よりウェブのひずみの値が大きくなるものの、同じ位置においては、ひずみゲージ、FBG センサともに、ほぼ同じ値であることがわかる。したがって、CFRP 中に埋め込んだ FBG センサによってもひずみの評価が可能であることが確かめられた。

図-6 に、荷重と垂直補剛材の曲げひずみの関係を示す。曲げひずみは、下フランジからの距離に応じて、表裏のひずみゲージの差より算定している。図より、無補修モデルでは、荷重が小さい段階から、下フランジから 15, 50mm において、大きな曲げひずみが生じていること、また、110mm の位置では、曲げひずみが進行しないことから、局部的に座屈が生じていると考えられる。補修モデルは、健全体モデルに比べて、曲げひずみが抑えられており、十分な効果があるといえた。

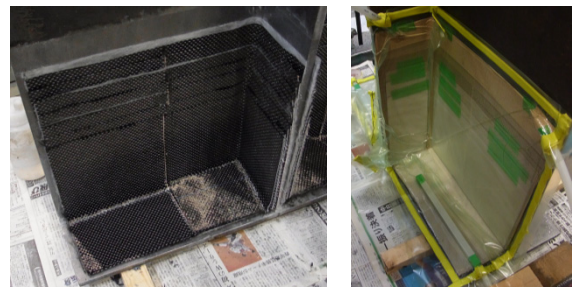
図-7 に、試験体の座屈変形を示す。無補修モデルでは、垂直補剛材の下端に局部座屈が、また、健全体、補修モデルでは、垂直補剛材の座屈が生じているが、補修モデルでは、最大の面外変形が生じる位置が、若干上側になることがわかる。なお、CFRP のはく離や破壊は生じなかった。

6. まとめ

以上のことから、鋼換算で補修した場合、健全体よりも高い剛性が得られること、また、耐力も十分に回復することから、VaRTM 成形による CFRP 補修は十分な効果があるといえる。また、予め埋め込んだ FBG センサを用いて、ひずみの計測が可能であることも確かめられた。今後は、炭素繊維の量を減らして、より合理的な補修方法を検討する予定である。

本研究は、平成 27 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) 近藤諒翼, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大: 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, 土木学会, 第 11 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.192-201, 2015.11



(a) 炭素繊維シートの配置 (b) 真空引きの状態
図-3 VaRTM 成形時の状況

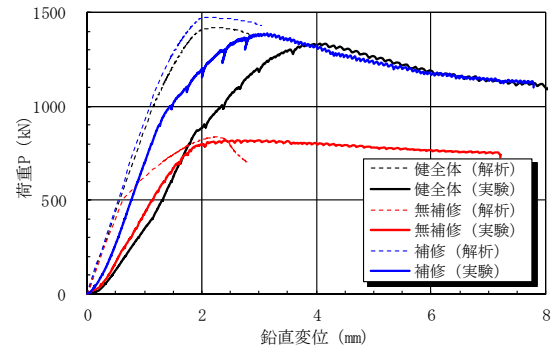


図-4 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

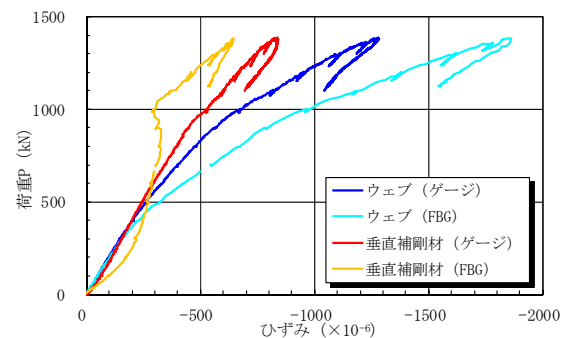


図-5 補修モデルにおける荷重とひずみの関係

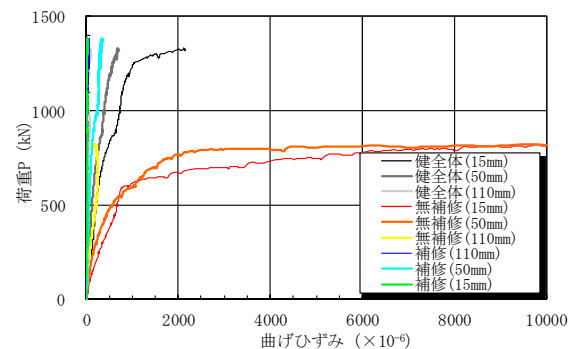
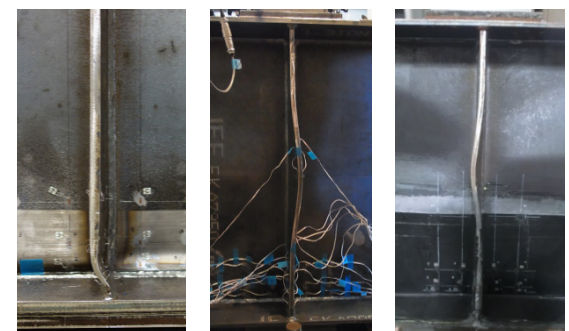


図-6 荷重と補剛材の曲げひずみの関係



(a) 無補修(下端) (b) 健全体 (c) 補修
図-7 試験体の座屈変形