CFRP 部材による断面欠損した桁端柱部材のモデル化と性能回復に関する解析的検討

首都大学東京大学院 学生員〇松山晃大・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

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¹⁾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解析的な検討を行った.また、断面欠損 部の不陸修正の有無、CFシートを束ねて積層したプリフォーム (PF)材の適用性の検討を行った.

2. 桁端柱部材と腐食による断面欠損のモデル化

支点上の鉛直反力が作用する柱部材の耐荷力に着目するため, 鉛直方向に荷重を載荷する.図-2に,桁端柱部材のモデル化と 補修範囲を示す.腐食損傷のモデル化として,ウェブー垂直補 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.表-1に,検討モデルの諸元を示す.

解析モデルについては、ウェブ、垂直補剛材、上下フランジ、 CFRPをシェル要素で、ソールプレートをソリッド要素で、鋼部 材とCFRPの間の接着層をばね要素でモデル化した.また、要素 分割は10mm×10mmとして、ウェブ・垂直補剛材の高さ方向に 対して1/100の初期たわみ(正弦半波、最大0.548mm)を考慮 した.鋼種はSS400とし、材料試験から降伏強度はウェブで341 N/mm²、垂直補剛材で323N/mm²、上下フランジで300N/mm²と した.鋼材の材料構成則は、降伏後の勾配をE_s/100としたバイ リニアモデルとした.境界条件として、ソールプレート(300× 270mm)に相当する節点を鉛直方向に拘束した.数値解析には、 汎用有限要素解析プログラムMarc2013による変位増分法を適 用して、弾塑性有限変位解析を行った.

3. CFRP による補修方法とモデル化

補修モデルでは、炭素繊維(CF)シート積層(不陸修正の有 無での差異)、PF材による4ケースを検討する.CFシート積層に は、高強度タイプ(シート厚さ0.167mm,弾性係数245kN/mm²) を用い、PF材には、中弾性タイプ(シート厚さ0.217mm,弾性 係数440kN/mm²)を用いた.ともに繊維体積含有率を50%、繊 維の配向は鉛直方向とした.断面欠損部(50%,100%)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.そ の結果、表-2より、片側あたりのCFRPの厚さは、50%欠損で 4.9mm、100%欠損で9.8mmとなった.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.なお、材料試験



表-1 検討モデルの諸元

桁長 L (mm)	300
フランジ幅 b _f (mm)	270
フランジ厚 t _f (mm)	20
ウェブ高さ h_w (mm)	548
ウェブ厚さ t_w (mm)	12
ウェブ欠損部厚さ t_w (mm)	6
垂直補剛材幅 b_s (mm)	130
垂直補剛材厚さ t_s (mm)	12
垂直補剛材欠損部厚さ t _s (mm)	6

表-2 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



キーワード CFRP, 真空含浸, 断面欠損, 桁端柱部材, モデル化, 性能回復 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 から不陸修正材の弾性係数は7.61kN/mm²,接着層厚は実測値 から0.4mmとし、弾性係数は12.3kN/mm²としている。鉛直と 水平のせん断方向では接着剤のせん断弾性係数 G_e ,法線方向 では弾性係数 E_e を用いて,式(1)より,それぞればね定数を求 めた.CFRPは硬化後の弾性係数を用いて直交異方性を考慮し た.

$$\begin{cases} k_h = G_e A/h \\ k_v = E_e A/h \end{cases}$$
(1)

ここで、A:各要素の分担面積(mm²)、h:接着層厚(mm)4. 解析結果と考察

図-4 に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を、表-3 に、 各モデルの最大荷重をそれぞれ示す.実験値は先行研究の結 果¹⁾を引用している.

最大荷重については、補修モデルの解析値は、全てのケース で健全体を上回り、ほぼ同じ結果となった.また、W000V000、 W050V050、W050V100、W050V050RE、W050V100PNでは、実 験値と解析値の差異は 5%以下となり、よい一致を示した.し かし、W050V050RNでは 23%、W050V100REでは 15%の差異 を生じた.これは、実験時にW050V050RNとW050V100REは、 早い段階で CFRP の接合部ではく離が生じ、実験値は最大荷重 が小さくなったのに対し、解析では、CFRP のはく離が考慮さ れていないことが要因である.また、荷重一変位関係の傾き(剛 性)については、解析値は実験値に比べて若干高くなった.こ れは、解析では残留応力を考慮していないためと考えられる.

図-5 に、最大荷重時の変形モードを示す. 解析結果のコン タ図は Mises 応力である. 解析結果の変形モードは、実験結 果と同様の傾向を示すことがわかる. しかしながら、モード の変化点など、細かい点で差異もみられた. これは、境界条 件、接合部のはく離などが十分に再現できていないことが要 因として考えられる. なお、図を略したが、W050V050RE 以 外の補修モデルの解析結果は、図-5(d)とほぼ同じであった.

図-6 に、荷重と垂直補剛材の軸ひずみの関係を示す. 欠損 部のひずみは、W000V000、W050V050、W050V050RE, W050V100PN では、比較的精度がよく再現されていること, W050V050RN では、途中までは再現できているが 1300kN 付 近から実験と解析の差異が大きくなることがわかる. 差異の 要因は、実験時に生じた接合部の CFRP のはく離である.

5. まとめ

以上のことから、断面欠損部を鋼換算による CFRP の補修 により耐荷力が回復する傾向が解析的にも確かめられた. 今 後は CFRP のはく離まで考慮したモデル作成する予定である. 参考文献

 松山晃大,佐藤潤,タイウィサル,中村一史,松本幸大,松井 孝洋,越智寛: VaRTM 成形を応用した CFRP 部材による圧縮 力を受ける鋼部材の補修・補強に関する研究,土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.5, 2018.(印刷中)

表-3 各モデルの最大荷重

モデル名	状態	不陸	実験値	解析值	実験値/解
		修正	$P_{emax}(kN)$	$P_{amax}(kN)$	析値 (%)
W000V000	健全	_	2097.2	2164.5	0.97
W050V050	無補	_	1135.6	1096.2	1.04
W050V100	修	—	533.8	546.1	0.98
W050V050RE		有	2126.5	2175.1	0.98
W050V050RN	補修	無	1670.0	2176.4	0.77
W050V100RE		有	1845.9	2176.9	0.85
W050V100PN		無	2117.8	2174.5	0.97



図-4 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係



