

CFRP 部材による鋼桁端腐食部の補修方法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○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、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。CFRP を適用する場合、炭素繊維シートあるいは成形板の接着であるため、剛性の向上が求められる鋼部材の補修・補強では積層数が増加し、必ずしも合理的とはいえない場合がある。近年、VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) と呼ばれる成形技術を用いて、航空機の構造部材や大型風力発電設備のブレード等が製作されている。この工法では、任意形状の大型 FRP 構造物を高品質に製造することが可能であり、例えば、図-1 に示すように、FRP 部材の成形と鋼部材への接着を同時に行うことで、短時間で FRP 部材を鋼部材に施工することも考えられる。本研究は、鋼構造物と FRP 部材を短工期で一体化させる工法を開発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、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。

2. 桁端部と腐食による断面欠損のモデル化

図-2 に、鋼桁のモデル化と腐食を考慮する範囲を、また、表-1 に、検討モデルの諸元をそれぞれ示す。鋼桁の端部の腐食を対象とするため、アスペクト比を 0.42 とし、支間長 1,700mm の 3 点曲げ載荷を想定している。実験により補修効果を検討するために、桁高、ウェブ厚等を縮小して部分的にモデル化することとし、本研究では、数値解析により、追加する CFRP の配置や剛性をパラメトリックに検討することとした。

腐食による断面欠損のモデル化については、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ていない。断面欠損部の形状は、垂直補剛材、ウェブの厚さに対する欠損率を、下端で 75%、上端で 0% (健全) とし、高さ 100mm の範囲で直線勾配 (テーパ状) とした。垂直補剛材、ウェブの下端近傍の断面欠損を考慮したモデル (無補修モデル)、および、断面欠損がないモデル (健全体モデル) の曲げ耐力を比較することで、耐力の低下と性能回復の指標を解析的に把握することとした。

解析モデルについては、垂直補剛材、上下フランジ、ウェブは厚さ方向に 4 分割して、ソリッド要素でモデル化した。また、ウェブの高さ方向に対して 1/1000 の初期たわみ (正弦半波、最大 0.8mm) を考慮した。鋼種は SM400 とし、材料試験から降伏強度は、腹板で 303.6MPa、上下フランジと補剛材で 297.1MPa とした。数値解析には、汎用有限要素解析プログラム Marc2013 による弧長増分法を適用して、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、(1) 炭素繊維 (CF) シート積層 (鋼換算モデル)、(2) CFRP 補剛材 (補剛材モデル) による 2 ケースを検討する。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%、繊維の配向は鉛直方向とした。以下に、各補修モデルを示す。

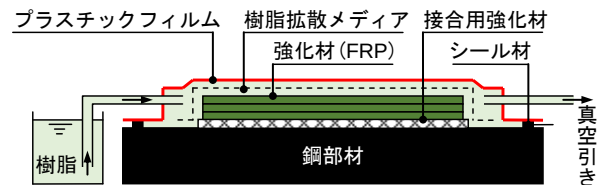


図-1 鋼部材への VaRTM 成形・接着の概念図

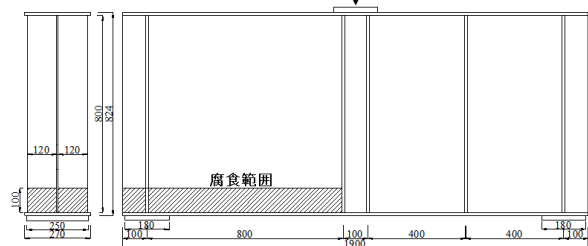


図-2 鋼桁のモデル化と腐食を考慮する範囲

表-1 検討モデルの諸元

部位	記号	単位	値
桁長	L	mm	1900
フランジ幅	b_f	mm	270
フランジ厚	t_f	mm	12
アスペクト比	h_w/L	—	0.42
ウェブ高さ	h_w	mm	800
ウェブ厚さ	t_w	mm	6
垂直補剛材幅	b_s	mm	120
垂直補剛材厚さ	t_s	mm	12

表-2 補修モデルにおける炭素繊維量

項目	単位	(1) 鋼換算		(2) 補剛材	
		垂直補剛材	ウェブ	垂直補剛材	ウェブ
鋼材健全部の厚さ	mm	12.0	6.0	12.0	6.0
鋼材腐食部の残存厚さ	mm	3.0	1.5	3.0	1.5
鋼部材の必要厚さ	mm	9.0	4.5	9.0	4.5
CF シートの積層数	ply	26	14	14	6
繊維体積含有率	—	0.50	0.50	0.50	0.50
CFRP の実際の厚さ	mm	8.18	4.09	4.09	1.96
解析時の CFRP の厚さ	mm	8.0	4.0	4.0	2.0

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)

(1) CF シート積層による補修（鋼換算モデル）

この検討モデルでは、最大断面欠損部（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。その結果、表-2 より、片側あたりの CFRP の厚さは、ウェブで2mm、垂直補剛材で4mm となった。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、高さ方向で 300mm とし、長手方向では2 ケース設定した。図-3 (a)は腐食部全体に、図-3 (b)は支点部 94mm の範囲に、補修を施した解析モデルである。この2 ケースに加え、CFRP の軸剛性（厚さ）を 50%に低減したケースを合わせて、計 4 ケースとした。

(2) CFRP 補剛材による補修（補剛材モデル）

図-3 (c)に示すように、腐食部全体を鋼換算した CFRP の数量の 50%で補修することに加え、CFRP 補剛材（H150×B122×t4mm）を 6 箇所を設置するモデルを作成して検討する。

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、図-5 に荷重とウェブパネル中心の面外変位の関係を、表-3 に最大荷重の比較を、それぞれ示す。

最大荷重については、無補修モデルでは、健全体モデルに比べて 23%低下すること、腐食部の鋼換算モデルでは、健全体モデルに比べて1~4%高くなり、性能が回復することがわかる。また、支点部の鋼換算モデルでは、いずれも健全体モデルの最大荷重を上回らなかったが、健全体モデルの最大荷重の96%まで回復していることから、支点近傍での補修効果が大きいことがわかる。一方、CFRP 補剛材を設置したモデルの最大荷重は、健全体モデルよりも4%高くなり、性能が回復することがわかる。

荷重－変位関係からは、差異は小さいものの、腐食部全体を補修した場合、CFRP 補剛材を設置した場合では、健全体の剛性を上回ることもわかる。

図-6 に、最大荷重時の変形モードを示す。無補修では、局部座屈となるが、それ以外では、局部座屈は生じず、健全体と同じモードとなることがわかる。

表-3 に併記した CF シート面積の比較からは、腐食部の鋼換算 100%に対して、補剛材モデルでは、CF シート量を 24%低減することができ、合理的であるといえる。

5. まとめ

以上のことから、腐食部全体の鋼換算による補修、あるいは CFRP 補剛材の設置によって、耐荷力が十分に回復することが確かめられた。今後は、提案した補修方法の妥当性および VaRTM 成形による施工性を確認するために、実験的な検討を行う予定である。

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

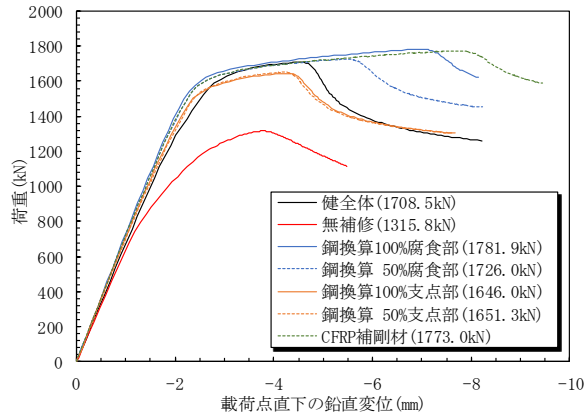
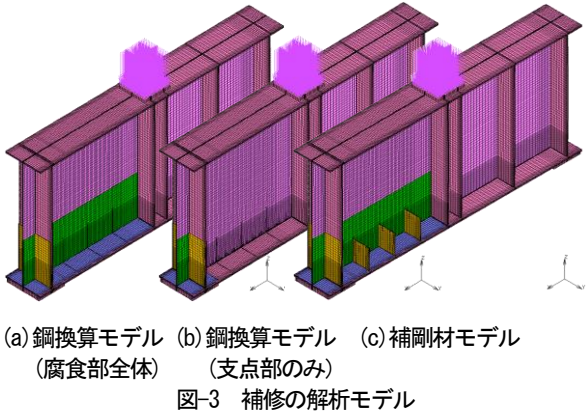


図-4 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

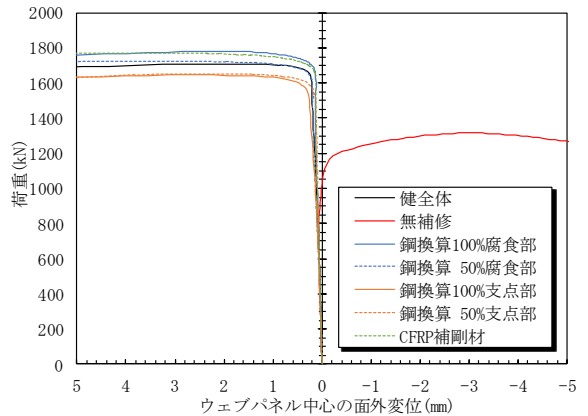


図-5 荷重とウェブパネル中心の面外変位の関係

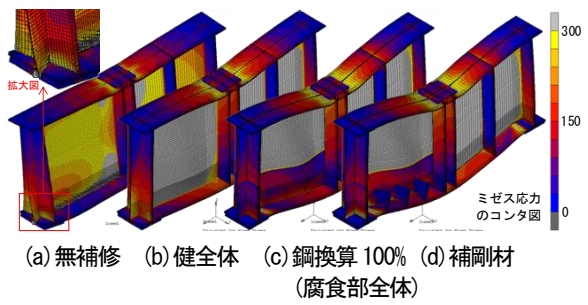


図-6 最大荷重時の変形モード（変形倍率：20 倍）

表-3 各解析モデルにおける比較

モデル名	鋼換算した CFRP の割合	最大荷重 P_{max} (kN)	P_{max}/P_{max} : 健全体	CFシート面積 (㎡)
健全体	—	1708.5	1.000	—
無補修	—	1315.8	0.770	—
鋼換算（腐食部）	100	1781.9	1.043	7.71
	50	1726.0	1.010	3.86
鋼換算（支点部）	100	1646.0	0.963	3.61
	50	1651.3	0.966	1.98
CFRP補剛材	50	1773.0	1.037	5.86