

断面欠損した鋼桁端部の VaRTM 成形を用いた CFRP 接着による補修・補強

首都大学東京大学院 ニヤムバヤルトゥワーン・タイウィサル・小林洗貴 (研究当時)

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

本研究は、VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) とよばれる機械分野の成形技術を用いて FRP 部材の成形と鋼部材への接着を同時に行うことで、短工期で FRP 部材を鋼部材に施工する技術 (図-1) の開発を目的としたものである。ここでは、腐食損傷事例の多い鋼桁橋の桁端腐食部のウェブ下端が欠損した場合の補修・補強を対象に、CFRP 部材による耐力の回復と向上を実験的、解析的に検討した。

2. 鋼桁端部と腐食による断面欠損のモデル化

図-2 に、桁試験体と腐食による断面欠損を考慮する範囲を、また、表-1 に、試験体の諸元をそれぞれ示す。鋼桁橋の端部を解析対象として、アスペクト比を 1.0 とし、支間長 1700mm の 3 点曲げ載荷試験を想定している。

断面欠損部は、図-2 に示すように、垂直補剛材、ウェブの下端 100mm の範囲とし、フランジには欠損を考慮していない。断面欠損部の形態は一定の減肉あるいは完全欠損とし、垂直補剛材の欠損率は厚さ 12mm に対して 50%，ウェブの欠損率は 100%とした。

3. 解析モデルと解析方法

試験体の解析モデルでは、垂直補剛材、ウェブ、フランジはシェル要素で、ソールプレート、載荷板はソリッド要素で、接着層は等価な剛性を有するばね要素で、それぞれモデル化した。要素サイズは 10×10mm とした。初期たわみは、ウェブの高さ方向に対して最大 1/1000 (最大 0.8mm) とし、面外方向に正弦半波形状を導入した。鋼種は SM400 であり、材料試験から降伏強度は、腹板で 317.5MPa、上下フランジ、端垂直補剛材で 280.5MPa であった。数値解析では、汎用有限要素解析プログラム Marc2013 による弾塑性有限変位解析を行った。基本モデルとして、断面欠損がないモデル、あるモデルをそれぞれ、健全モデル、欠損モデルとした。さらに、この試験体での補強の目標値を検討するために、健全モデルで、両側のウェブの中心に垂直補剛材を有する参照モデルを作成した。

4. CFRP 部材の配置と補修・補強のモデル化

本研究では、欠損モデルに CFRP を適切に配置することで、健全モデルと同等の耐力に回復させる補修、および参照モデルと同等の耐力に向上させる補強を検討する。

まず、補修モデルでは、高強度タイプの炭素繊維 (CF) シートを欠損部に部分的に積層接着することとした (図-3(a))。積層数は、断面欠損分と等価な鉛直方向の軸剛性とした。その結果、垂直補剛材、ウェブの欠損部ともに、片側あたり 15 層 (両側 30 層) となった。この妥当性は積層数をパラメータ (4 ケース) として検討した。

さらに、補強モデルでは、ウェブのせん断座屈耐力を向上させることを目的として、2 種類の CFRP 部材の補強ケースを基本とした。すなわち、ウェブパネルの ±45° 方向に CF シートを部分的に配置する CFS 補強モデル (図-3(b)) と、それに加えてプリフォームアングル (PF) 材を背合わせにした CT 材を、ウェブ中心に垂直に配置する CFP 補強モデル (図-3(c)) を検討した。断面欠損部の CF シートの数量の低減と、ウェブパネルに配置する CFRP の最適化を

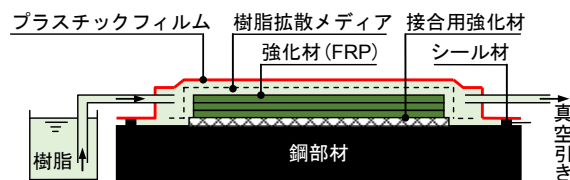


図-1 鋼部材への VaRTM 成形・接着の概念図

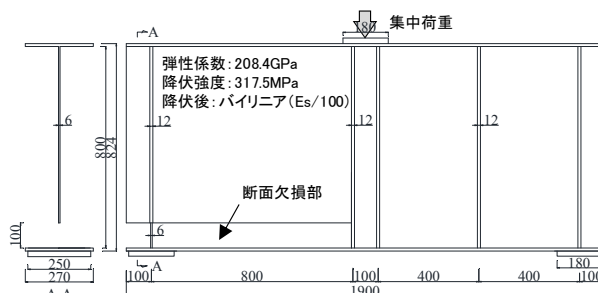
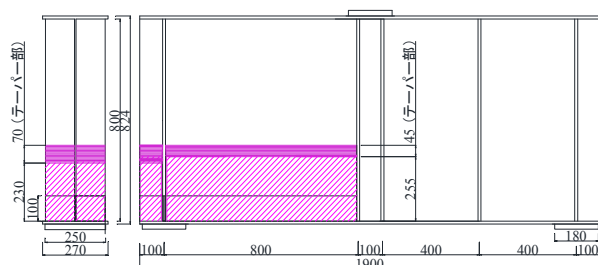


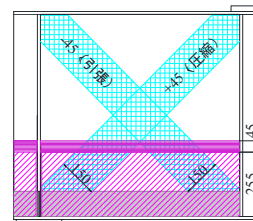
図-2 桁試験体と断面欠損部

表-1 試験体の諸元

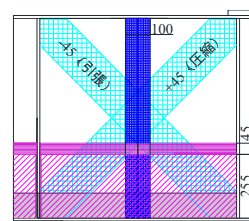
部位	記号	単位	値
桁長	L	mm	1900
フランジ幅	b_f	mm	270
フランジ厚	t_f	mm	12
アスペクト比	h_w/L	—	1.0
ウェブ高さ	h_w	mm	800
ウェブ厚さ	t_w	mm	6
端垂直補剛材幅	b_s	mm	120
端垂直補剛材厚さ	t_s	mm	12



(a) 補修モデル



(b) CFS 補強モデル



(c) CFP 補強モデル

図-3 補修・補強モデルにおける CFRP の配置

Key Words : 鋼桁端部, 断面欠損, 補修・補強, 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)

図るため、それらをパラメータとして解析的に検討した。なお、PF 材とは、CF シートを予め積層して所定の形状を保持した中間機材である。CF シートには、中弾性タイプ（シート厚さ 0.217mm、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（90°）方向、±45°方向とした。表-2 に、検討パラメータと最大荷重を示す。

5. 真空含浸による CFRP の接着方法

一例として、図-4 に、CFP 補強モデルの作製状況を示す。はじめに、CF シート、PF 材を配置した後、吸引のために副資材を設置し、プラスチックフィルムで覆って、密閉させる。真空吸引しながら樹脂を含浸させた。CFRP の成形・接着は、部分的な分割でも、片面一括（図-4）でも行うことができた。

6. 検討結果と考察

表-2 に、検討結果の一部として、全ての検討ケースの最大荷重を併記している。表より、補修モデルの検討では、鋼換算で等価な CF シート数に相当する 15 層が妥当であるといえた。15 層以下では、垂直補剛材で座屈が生じた。CFS 補強モデルでは、欠損部の CF シート数をウェブ 10 層、垂直補剛材 15 層で固定して、ウェブパネルの配置と積層数をパラメトリックに検討した。そこで、最大荷重が十分確保できる CFS6 のケースを選定した。CFP 補修モデルでは、CFS6 のモデルに、PF 材を設置したモデルであり、十分な耐力が確保されていることがわかる。

補修、CFS 補強、CFP 補強モデルに、健全、欠損を加え、5 ケールについて、載荷実験を行った。検討結果の一部として、図-5 に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。図より、健全と欠損で、若干、最大荷重に差異が見られるものの、実験と解析でよい一致を示すことがわかる。表-2 より、解析では、実験による最大荷重を、6%以下の精度で予測できることがわかる。

図-6 に、荷重とウェブ中心の面外方向変位の関係を示す。図より、CFS 補強、CFP 補強のモデルでは、健全モデルよりもウェブの面外変位が抑制されること、特に、垂直補剛材を配置した CFP 補強のモデルでは、最大荷重まで、ほとんど変位が生じていないことが確かめられた。

図-7 に、CFP 補強モデルの桁端の破壊状況を示す。CFP 補強モデルでは、面内・面外の変形が効果的に抑制されたが、図-7 に示すように、桁端から CFRP の破壊が生じた。最大荷重は、参照モデルと同程度まで耐力が向上したが、CFRP の破壊が先行したため、垂直補剛材で補強されたウェブ側でのせん断座屈は生じなかった。

7. まとめ

以上のことから、桁端ウェブパネルに 100%の欠損が生じた場合でも CFRP 部材の適切な配置により、性能回復だけでなく、補強も十分に可能であることが確かめられた。今後は、桁端の破壊のメカニズムとはく離の挙動を検討するとともに、より効果的な補強方法の開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 小林洸貴, 近藤諒翼, 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 部材による鋼桁端部の補強に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.5, 2018. (印刷中)

表-2 検討パラメータと最大荷重

モデル	ウェブ 90°	V-Stiff 90°	ウェブパネル			最大荷重		
			-45°	+45°	90°PF	解析(kN)	実験(kN)	解析/実験
健全	-	-	-	-	-	1419.1	1330.1	0.941
欠損	-	-	-	-	-	913.1	860.5	0.942
参照	-	-	-	-	-	1616.7	-	-
補修1	5層	5層	-	-	-	1068.3	-	-
補修2	10層	10層	-	-	-	1315.8	-	-
補修3	10層	15層	-	-	-	1335.3	-	-
補修4	15層	15層	-	-	-	1337.9	1339.5	0.954
CFS1	10層	15層	3層	-	-	1402.2	-	-
CFS2	10層	15層	-	3層	-	1405.6	-	-
CFS3	10層	15層	3層	3層	-	1512.4	-	-
CFS4	10層	15層	5層	-	-	1506.3	-	-
CFS5	10層	15層	-	5層	-	1537.2	-	-
CFS6	10層	15層	5層	5層	-	1611.3	1570.5	0.975
CFS7	10層	15層	8層	-	-	1587.5	-	-
CFS8	10層	15層	-	8層	-	1593.2	-	-
CFS9	10層	15層	8層	8層	-	1680.8	-	-
CFP	10層	15層	5層	5層	120×100mm	1670.5	1642.6	0.983

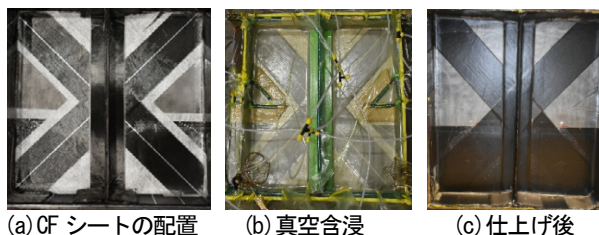


図-4 CFP 補強モデルの作製状況

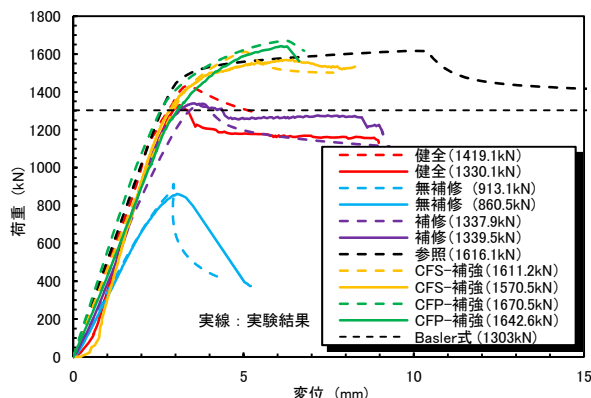


図-5 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

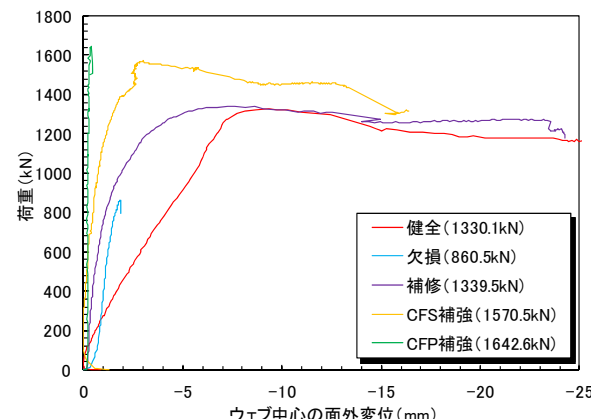


図-6 荷重とウェブ中心の面外方向変位の関係

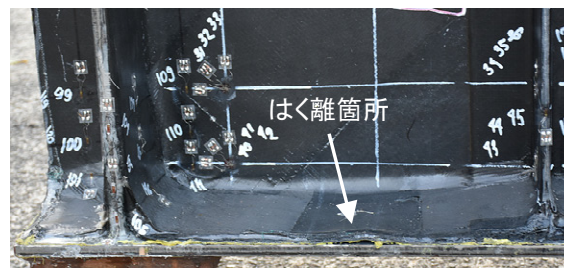


図-7 CFP 補強モデルの桁端の破壊状況