断面欠損した鋼桁端部の CFRP 接着による補強効果の解析的検討

三井住友建設　正会員　○トゥワーン ニャムバヤル　　首都大学東京大学院　学生員　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

本研究は，VaRTM（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）成形技術を用いて，FRP 部材の成形と接着を同時に行うことで，短工期で鋼部材の補修・補強を行う工法の開発を目的としたものである（**図-1**）．ここでは，損傷事例の多い，鋼桁端部のウェブ下端の断面欠損に対する補強について，CFRP 部材による耐力の向上効果[1)]を解析的に検討した．

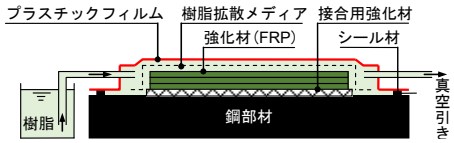


図-1　鋼部材への VaRTM 成形・接着の概念図

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と試験体の諸元を示す．試験体は，アスペクト比 1.0，支間長 1,700mm の I 形断面桁であり，単純支持の 3 点曲げ載荷とした．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（板厚 12mm）の欠損率は 50%，ウェブの欠損率は 100%とした．

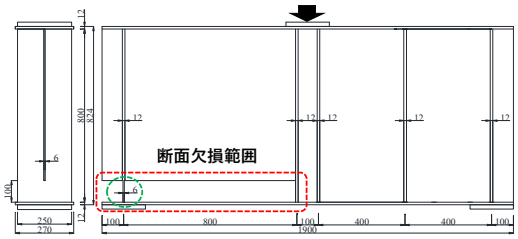
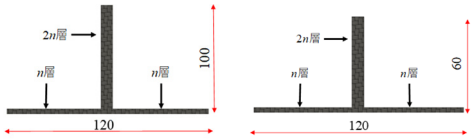


図-2　桁試験体（補強前）と断面欠損部の概略図

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，ウェブで 317.5MPa，上下フランジ，垂直補剛材で 280.5MPa であった．数値解析には，汎用有限要素解析プログラム Marc 2018 を適用し，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（無補修）モデルとした．さらに，この試験体での補強の目標値（限界値）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．

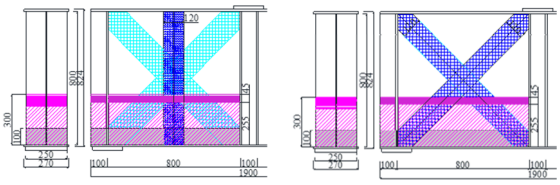


(a) 補強 CFP_SH90　　(b) 補強 CFP_SH±45

図-3　プリフォームアングル材の形状パラメータ

表-1　プリフォームアングル材の諸元

補強方法	補強範囲		CFRPの配向方向			接着剤の要素モデル
	長さ	幅	垂直方向	引張方向	圧縮方向	
補強CFP_SH90N10	800	120	●	–	–	ばね要素
補強CFP_SH±45N10	1130	120	–	●	●	ばね要素



(a) 補強 CFP_SH90　　(b) 補強 CFP_SH±45

図-4　PF 材の配置と補強モデル

4. CFRP 部材の配置と補強のモデル化

本研究では，欠損モデルに CFRP を適切に配置することで，参照モデルと同等の耐力に向上させる最適な補強方法を検討する．既往の研究[1)]より，断面欠損部に不陸修正材を充填し，高強度タイプの CF シートを垂直方向にウェブに 10 層，垂直補剛材に 15 層を配置して補修すれば，健全モデル（1330.1kN）の耐力まで，回復（1339.5kN）することが示されているため，それを基本として，補強設計を行うこととした．補強モデルは，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，**図-3**，**図-4**，**表-1** に示すように，2 種類のプリフォームアングル材（PF 材）の設置を検討した．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/mm^2，弾性係数 440kN/mm^2）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．

図-4(a)に，補強 CFP_SH90 モデルを示す．ウェブパネルの±45°方向に CF シートを部分的に配置し，それに加えてプリフォームアングル（PF）材（幅 120×高さ 100×長さ 800mm，**図-3(a)**）を背合わせに，ウェブ中心に垂直に配置した．PF 材は，積層数を 1～20 層までパラメトリックに検討した．

キーワード：鋼桁端部，断面欠損，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)

© Japan Society of Civil Engineers

図-4(b)に，補強CFP_SH±45モデルを示す．PF材（幅120×高さ60×長さ1130mm，図-3(b)）を±45°方向に設置した．PF材は，積層数を1～20層までパラメトリックに検討した．このとき，欠損部は不陸修正ではなく，中弾性タイプのCFシートを積層（15層）配置した．

5．検討結果と考察

図-5に，CFシート量と補強効果の関係を示す．CFシート量は，PFアングル材に適用したCFシート量を示している．両補強モデルでは，積層数を1～20層までパラメトリックに検討し，健全モデルに対する最大荷重の増加率を補強効果とした．図より，両補強モデルにおいて，PF材の積層数が，10層から補強効果が一定値となることがわかる．補強効果は，補強CFP_SH90モデルでは約25%，補強CFP_SH±45モデルでは約35%で一定となった．補強CFP_SH±45モデルでは，参照モデルの補強効果31.1%を上回っており，十分な補強効果が得られることがわかる．一方，補強CFP_SH90モデルでは，参照モデルの補強効果よりも，若干，小さくなった．これらの結果から，PF材の積層数を10層として，試験体を作製し，載荷実験により検証が行われた[1)]．

図-6に，補強CFP_SH±45N10モデルの最大荷重時の変形図を示す．PF材の積層数は，補強効果が一定となった，10層を示している．解析結果（図-6(a)）より，CFRPを配置していない，垂直補剛材で補強された，ウェブ側でせん断座屈が生じていることがわかる．図-6(b)の実験結果では，変形量が小さいが，同様に，ウェブのせん断座屈が生じ，同じ破壊形式であった．

図-7に，補強CFP_SH90N10モデルの最大荷重時の変形図を示す．PF材の積層数は，同様に，補強効果が一定となった，10層を示している．解析結果（図-7(a)）は，前述の補強CFP_SH±45N10モデルと同じせん断座屈であったが，図-7(b)の実験結果では，垂直補剛材のウェブ側ではせん断座屈は生じず，破壊形式は，支点近傍でのはく離とCFRPの破壊であった[1)]．

図-8に，荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す．補強CFP_SH±45N10モデルでは，実験・解析ともに参照モデルとほぼ同程度まで耐荷力が向上していることがわかる．一方，補強CFP_SH90N10モデルでは，実験・解析ともに，参照モデルをやや下回った．後者の破壊形式は，はく離とCFRPの破壊であり，挙動は実験と解析で同じであった．

表-2に，最大荷重と健全モデルに対する補強効果の比較を示す．健全モデルの実験値の最大荷重P_{0emax}（赤字）に対する，各モデルの最大荷重の比を補強効果として示している．解析と実験でよい一致を示すことから，解析のモデル化と評価は妥当であると判断された．

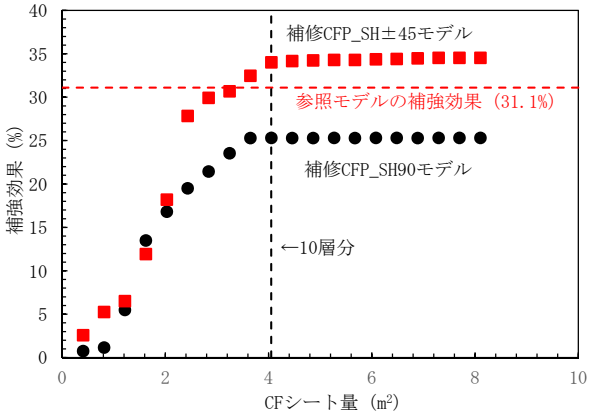
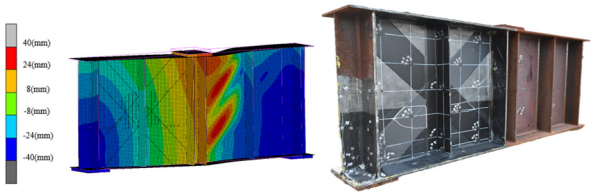
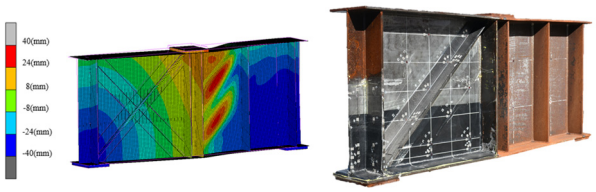


図-5　CFシート量と補強効果の関係



(a) 解析(P_{max}=1670.5kN)　(b) 実験(P_{max}=1642.6kN)

図-6　補強CFP_SH90N10モデルの最大荷重時の変形図



(a) 解析(P_{max}=1779.6kN)　(b) 実験(P_{max}=1781.9kN)

図-7　補強CFP_SH±45N10モデルの最大荷重時の変形図

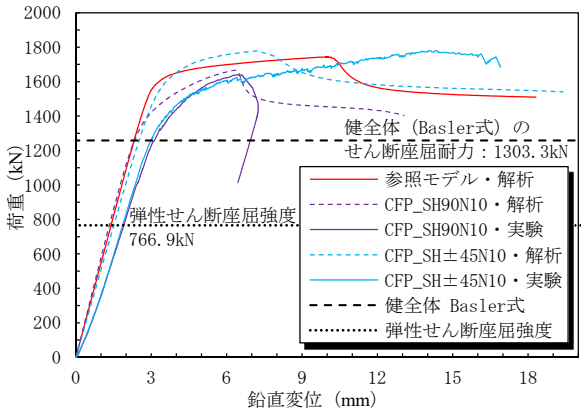


図-8　荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

表-2　最大荷重と健全モデルに対する補強効果の比較

モデル	ウェブパネル		最大荷重(kN)		P_{max}/P_{0emax}	
	±45°	90°	実験	解析	実験	解析
健全（P_{0max}）	—	—	1330.1	1419.1	1.000	1.067
欠損	—	—	860.5	913.1	0.647	0.686
参照	—	—	—	1743.9	—	1.311
CFP_SH90N10	5/5層	10層	1642.6	1670.5	1.235	1.256
CFP_SH±45N10	10層	—	1781.9	1779.6	1.340	1.338

6．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，補強も十分に可能であること，圧縮・引張側に相互にPF材を配置する補強方法が効果的であることが確かめられた．

参考文献

1) トゥワーンニャムバヤル，タイウィサル，中村一史，松井孝洋：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，土木学会，第7回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，9pages，2018.11

© Japan Society of Civil Engineers