

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

ニヤムバヤル トウワン¹・タイ ウィサル²・
中村 一史³・松井 孝洋⁴

¹学生会員 首都大学東京 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: tuvaan-nyambayar@ed.tmu.ac.jp

²学生会員 首都大学東京 大学院 博士後期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: thay-visal@ed.tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

⁴正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部コンポジット技術第1課
(〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

本研究では、腐食損傷事例の多い鋼鈑桁橋の桁端部に着目して、ウェブ・垂直補剛材の下端が断面欠損したケースを対象に、VaRTM技術を応用して含浸・接着されたCFRPによる耐力の回復と向上について、実験的、解析的に検討した。断面欠損は、桁高800mmの鋼I形断面のウェブ・垂直補剛材の下端100mmの範囲とし、欠損率は、ウェブで100%、垂直補剛材で50%とした。欠損のない健全体までの耐力の回復（補修）の検討では、CFシートを断面欠損した範囲に配置した。耐力の向上（補強）について、ウェブ面へのCFシートの部分配置、立体的なCFRP部材の配置を検討した。CFシートの積層数、配置の方向をパラメータとした、FEM解析によりCFRPの配置をパラメトリックに検討して、4つの最適な配置を選定し、3点曲げ載荷実験によりその妥当性を確かめた。

Key Words : plate girder, repair and strengthening, VaRTM, CFRP, shear buckling

1. はじめに

鋼鈑桁橋の桁端部における腐食に伴う断面欠損は、橋梁の耐力低下に直結するため、その残存耐力や性能回復に関する解析的、実験的な研究が数多く行われている¹⁾。

鋼部材の断面欠損に対する補修・補強の方法には、一般に、当て板工法²⁾が適用されるが、軽量で、耐腐食性に優れる炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic; CFRP）接工法も同等の効果が確認され³⁾、鋼構造物の補修・補強に適用されている⁴⁾。

しかしながら、剛性が高く、施工性に優れるCFRP板は帯板であるため、平滑ではない不連続部への接着接合には適用できない場合がある。炭素繊維シート（以下、CFシートとよぶ）は、柔軟性があるため、不連続部にも適用できることから、桁端部へのCFシート接着の適

用^{5)~9)}が検証され、設計・施工マニュアル⁹⁾も整備されている。ただし、CFシートは薄いため、積層数が増大すると現場作業の効率が悪くなる場合がある。

このような課題に対して、真空含浸工法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding; VaRTM）の成形技術¹⁰⁾を応用すれば、一度にCFシートの積層接着が可能で、短工期で施工ができること、それにより断面欠損した鋼部材の補修・補強が可能であることが先行研究^{11) 12)}で示されている。

そこで本研究は、先行研究¹²⁾を踏まえ、鋼鈑桁橋の桁端部により厳しい断面欠損を与えた場合について、その耐力の回復および向上を目的として、VaRTM技術を応用して含浸・接着されたCFRP部材の適切な配置とその適用性を解析的、実験的に検討した。

2. 検討対象と断面欠損のモデル化

(1) 試験体と断面欠損

図-1に、検討対象のI形断面桁モデルを示す。鋼桁橋の端部を対象とするため、検討モデルは、既往の研究を参考に、アスペクト比1.0、支間長1,700mmのI形断面桁であり、3点曲げ载荷とした。腐食による断面欠損は、垂直補剛材、ウェブの下端100mmの範囲とし、フランジの断面欠損は考慮していない。欠損部の形状は、垂直補剛材（ $t_f=12\text{mm}$ ）、ウェブ（ $t_w=6\text{mm}$ ）の厚さに対する欠損率を、下端で100%、上端で0%（欠損なし）とし、高さ100mmの範囲で直線の欠損形状とした。表-1に、鋼材（SM400）の材料特性を示す。

(2) 検討方法とモデル化

数値解析では、汎用有限要素解析プログラムMarc 2013による弾塑性有限変位解析を行った。垂直補剛材、ウェブの下端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、3点曲げ载荷の解析・実験により検討した。さらに、この断面寸法における補強後の最大荷重を把握することを目的として、両ウェブに垂直補剛材を設置したモデル（参照モデル）を作成し、解析により検討した。

実験条件については、5章の载荷実験によるCFRPの配置の妥当性の検証で詳しく述べる。

解析モデルでは、ウェブ、フランジ、垂直補剛材をシェル要素で、载荷板、ソールプレートを実体要素で、接着層をばね要素でモデル化した。断面欠損の範囲の要素サイズは、10mmとした。初期たわみはウェブの高さ方向に対して面外方向に1/1000とした。図-2に、無補修モデル、健全体モデル、参照モデルの解析モデルをそれぞれ示す。

(3) 検討結果と考察

検討結果の一部として、図-3に、荷重と载荷点直下の鉛直変位の関係を、表-2に、各モデルにおける最大荷重を、さらに、図-4、5、6に、無補修モデル、健全体モデル、参照モデルの破壊形式をそれぞれ示す。

これらの図表より、まず、無補修モデル、健全体モデルの実験・解析の結果を比較すると、それぞれのモデルにおいて、最大荷重、鉛直変位挙動は、両者でよい一致を示すことがわかる。

図-4より、健全体モデルの場合、破壊形式も実験結果と解析結果と同様であり、ウェブのせん断座屈であった。

図-5より、無補修モデルの場合、破壊形式は50%の断面欠損を与えた垂直補剛材の局部座屈であること、健全体モデルに比べると最大荷重が約35%低下することが確かめられた。

一方、参照モデルでは、図-6より、破壊形式はウェブのせん断座屈であること、健全体モデルの解析結果に対して、約20%せん断座屈耐力が上昇することがわかる。したがって、この断面寸法では、このせん断座屈耐力が補強した場合の上限値となると予測された。

3. 性能回復を目的とした断面欠損部へのCFRPの配置に関する解析的検討

(1) CFRPの必要量の算定と検討パラメータ

性能回復を目的とした補修では、一般に、断面欠損した鋼部材と等価な剛性を追加することで検討が行われる。

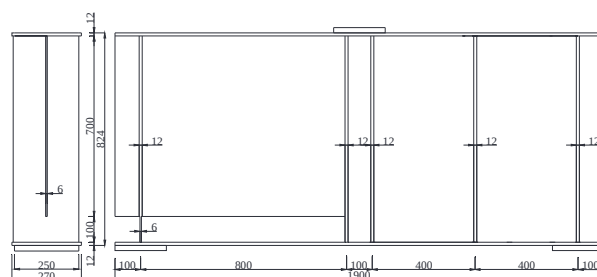
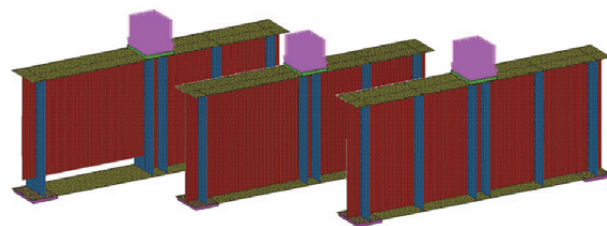


図-1 検討対象のI形断面桁（無補修モデル）



(a) 無補修モデル (b) 健全体モデル (c) 参照モデル
図-2 解析モデル

表-1 鋼材（SM400）の材料特性

項目	ウェブ	垂直補剛材・フランジ
弾性係数 E_s (N/mm ²)	208,400	206,300
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	317.5	286.5
引張強度 σ_u (N/mm ²)	463.8	421.1

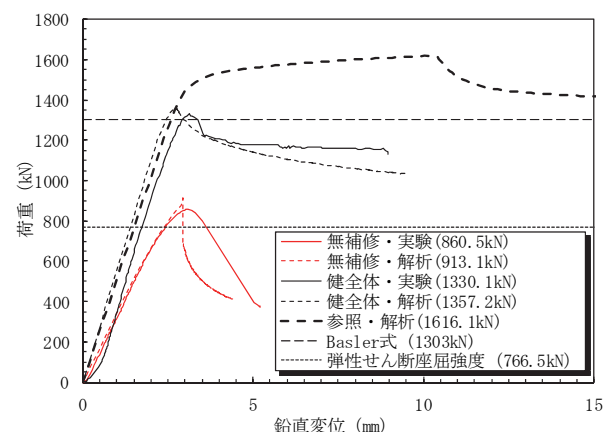


図-3 荷重と载荷点直下の鉛直変位の関係

ここでは、これの補修の考え方を基本とし、より合理的な補修量を検討するために、基本となる数量の1/3、2/3としたケースについて、解析的に検討することとした。

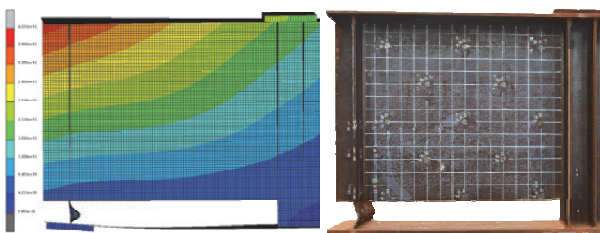
検討に用いた、炭素繊維シート（高強度タイプ）の材料特性を表-2に示す。これらの値のうち、弾性係数は平均値、引張強度は材料メーカーによる特性値である。また、表-3に、樹脂材料の材料特性を示す。断面欠損部には、不陸修正材を塗布して、断面欠損した凹部を平滑にすることとした。

表-4に、ウェブ、垂直補剛材の断面欠損量と等価な剛性のCFRPの必要量を示す。表より、断面欠損量は両者で6mmであり、高強度タイプのCFシートの必要量は片面当たり15層であった。

表-5に、補修の検討パラメータと最大荷重を示す。検討パラメータは、鋼換算で試算された基本モデル（CFR4）に加え、ウェブ、垂直補剛材の必要量（15層）の1/3（5層、CFR1）、2/3（10層、CFR2）としたケース、およびウェブ10層、垂直補剛材15層としたケース

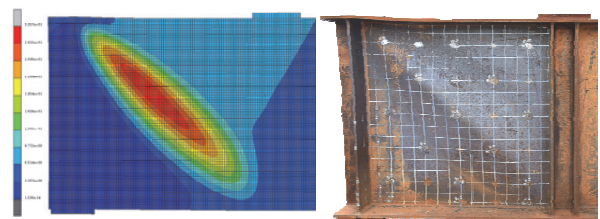
表-2 各モデルにおける最大荷重 (kN)

モデル	解析	実験	実験/解析
無補修モデル	913.1	860.5	0.942
健全体モデル	1357.2	1330.1	0.980
参照モデル	1616.1	-	-



(a) 解析結果 ($P_{\max}=913.1\text{kN}$) (b) 実験結果 ($P_{\max}=860.5\text{kN}$)

図-4 無補修モデルの破壊形式



(a) 解析結果 ($P_{\max}=1357.2\text{kN}$) (b) 実験結果 ($P_{\max}=1330.1\text{kN}$)

図-5 健全体モデルの破壊形式

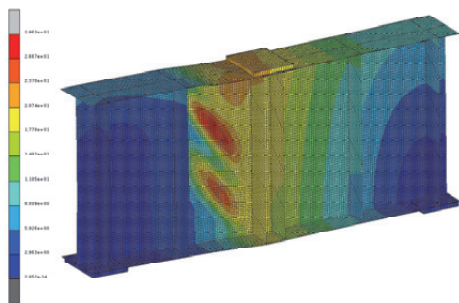


図-6 参照モデルの破壊形式 ($P_{\max}=1616.7\text{kN}$)

(CFR3) の合計4つの解析モデルを作成した。

図-7に、補修モデルにおけるCFシートの配置図を補修CFS3について示す。全ての検討ケースで、CFシートの方向は、垂直（90°）方向とし、高さは300mmと一定とした。CFシートの上端部には、5mmの段差を設けることとした。

解析においては、樹脂層をばね要素でモデル化¹²⁾して検討した。その他の解析条件は、2章で述べた通りである。

(2) 解析結果と考察

解析結果の一部として、図-8に、補修モデルにおける荷重と鉛直変位の関係を示す。図より、全ての検討ケースにおいて、最大荷重に至るまでの挙動は類似しており、補修CFS1以外は、概ね健全体と同程度まで最大荷重が回復すること、また、表-5より、積層数が増えるほど、わずかながら耐力も向上し、健全体と同程度まで最大荷重が回復することがわかる。ウェブが完全に欠損する

表-2 炭素繊維シート（高強度タイプ）の材料特性

弾性係数 E_f (N/mm ²)	245,000
引張強度 σ_f (N/mm ²)	35,000
シート厚さ t_f (mm)	0.167
繊維重量 (g/m ²)	300

表-3 樹脂材料の材料特性

項目	含浸接着樹脂 (AUP40)	不陸修正材 (AUF60)
弾性係数 (kN/mm ²)	3.43	7.61
圧縮強度 (N/mm ²)	117.7	99.3

表-4 CFシートの必要量の計算結果

項目	補剛材	ウェブ
鋼材の健全部の厚さ t_0 (mm)	12.0	6.0
鋼材の腐食部の残存厚さ t (mm)	6.0	0
鋼部材の必要厚さ t_d (mm)	6.0	6.0
断面欠損率 r (t/t_0)	0.5	1.00
鋼材の弾性係数 E_s (kN/mm ²)	200	200
CFシートの弾性係数 E_f (kN/mm ²)	245	245
繊維体積含有率 V_f	0.50	0.50
CFシート1層あたりの設計厚さ t_f (mm)	0.167	0.167
CFシートの積層数 n / 片面	15	15
CFシートの鋼換算厚さ t_{fs} (mm) / 片面	3.07	3.07
CFRPとしての厚さ t_{fsf} (mm) / 片面	6.13	6.13

表-5 補修の検討パラメータと最大荷重

モデル	ウェブ 90°	補剛材 90°	最大荷重		
			解析(kN)	実験(kN)	実験/解析
無補修	-	-	913.1	860.5	0.942
健全体	-	-	1357.2	1330.1	0.980
参照	-	-	1616.7	-	-
補修CFR1	5	5	1068.3	-	-
補修CFR2	10	10	1315.8	-	-
補修CFR3	10	15	1335.3	-	-
補修CFR4	15	15	1337.9	1339.5	1.001

ような厳しい条件でも断面欠損部の鋼部材と等価な剛性のCFシートを付与すれば、性能が回復することが確かめられた。補修CFR3と補修CFR4の最大荷重の差異は小さいことから、性能回復のための最小積層数としては、補修CFR3を選択するが、5章では、補修CFR4を実験的に検討することとした。なお、図を略したが、全てのケースで、破壊形式は、CFシートで補修を施した面のウェブのせん断座屈モードであり、図-5に示した健全体モデルと同じ破壊形式であった。

4. せん断座屈耐力の向上を目的とした断面欠損部へのCFRPの配置に関する解析的検討

(1) CFRPの配置と検討パラメータ

ここでは、前述の断面欠損を与えたモデル（無補修モデル）に対して、せん断座屈耐力の向上を目的として、CFRPの適切な配置を解析的に検討する。3章の検討結果より、桁端において、ウェブ100%欠損、垂直補剛材50%欠損（無補修モデル）の場合、ウェブ10層、垂直補剛材15層が最小積層数として選択された。せん断座屈耐力の向上（補強）の検討では、桁端部にその積層構成のCFシートを配置した上で、ウェブ面に、CFシートの部分配置、立体的なプリフォームアングル材（以下、PF材とよぶ）の配置をパラメータとして解析的に検討する。PF材¹²⁾とは、CFシートを予め積層して所定の形状を保持

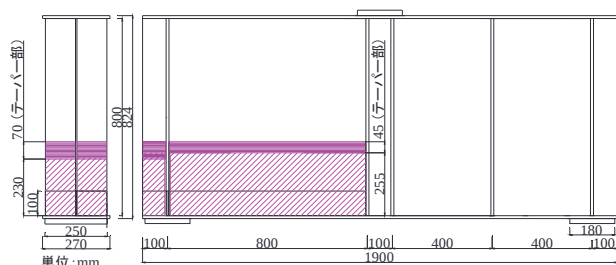


図-7 補修モデルにおけるCFシートの配置図（CFS3モデル）

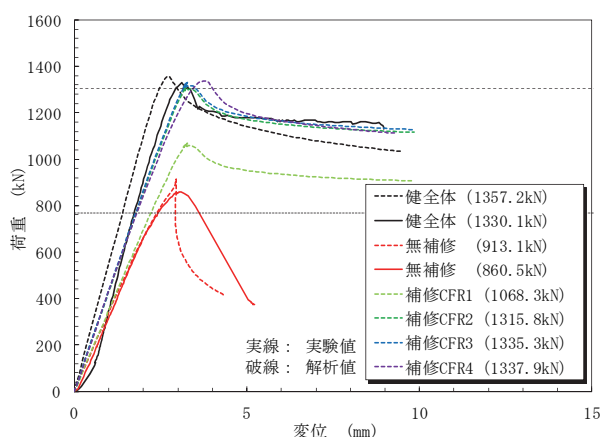


図-8 補修モデルにおける荷重と鉛直変位の関係

した中間機材である。CFシートには、表-6に示す、中弾性タイプを用い、繊維体積含有率を50%、繊維の配向はPF材の長手（0°）方向とした。PF材を背合わせにしたCT材を、ウェブ中心に垂直（90°）、あるいはウェブ面に±45°方向に配置する補強モデルを検討することとした。

表-7に、補強の検討パラメータと最大荷重を、図-9に、補強の解析モデルをそれぞれ示す。

まず、図-9(a)に示すように、CFシートの部分配置を検討するモデルとして、補強CFS1～補強CFS9を設定した。CFシートの寸法は、幅120×長さ1130mm（対角線）の一定とし、積層数（3, 5, 8層）、配向方向（引張方向（-45°）、圧縮方向（+45°）の組合せ）をパラメータとした。なお、CFシートの設置は、ウェブパネルの両面とした。部分配置のCFシートには、表-2の高強度タイプを適用した。

次に、図-9(b)に示すように、CFシートの部分配置に加え、ウェブパネルの中心に垂直（90°）方向にPF材の配置を検討するモデルとして、補強CFP1～補強CFP3を設定した。CFシートの部分配置は、有意な補強効果が確認された、5層のCFシートを±45°に配置するモデル（補強CFS6）を基本とし、垂直（90°）方向にPF材を設置し、その積層数（5, 10, 20層）をパラメータとして検討する。PF材の寸法は、幅120×高さ100×長さ800mmで一定とした。断面欠損部に配置したCFシート、部分配

表-6 炭素繊維シート（中弾性タイプ）の材料特性

弾性係数 E_f (N/mm ²)	440,000
引張強度 σ_f (N/mm ²)	24,000
シート厚さ t_f (mm)	0.217
繊維重量 (g/m ²)	400

表-7 補強の検討パラメータと最大荷重

モデル	ウェブパネル			最大荷重(kN)		
	-45°	+45°	90°	解析	実験	実験/解析
無補修	-	-	-	913.1	860.5	0.942
健全体	-	-	-	1357.2	1330.1	0.980
参照	-	-	-	1616.7	-	-
CFS1	SH3D	-	-	1402.2	-	-
CFS2	-	SH3D	-	1405.6	-	-
CFS3	SH3D	SH3D	-	1512.4	-	-
CFS4	SH5D	-	-	1506.3	-	-
CFS5	-	SH5D	-	1537.2	-	-
CFS6	SH5D	SH5D	-	1611.3	1570.5	0.975
CFS7	SH8D	-	-	1587.5	-	-
CFS8	-	SH8D	-	1593.2	-	-
CFS9	SH8D	SH8D	-	1680.8	-	-
CFP1	SH5D	SH5D	PF5D	1645.2	-	-
CFP2	SH5D	SH5D	PF10D	1670.5	1642.6	0.983
CFP3	SH5D	SH5D	PF20D	1683.1	-	-
CFP4	PF10D	-	-	1432.5	-	-
CFP5	-	PF10D	-	1680.5	-	-
CFP6	PF10S	PF10S	-	1779.6	1781.9	1.001

SHnD：幅120mmのCFシートn層をウェブ両面に配置

PFnDS：幅120×高さ100mmのn層PF材をウェブ両面/片面に配置

置のCFシートには、表-2の高強度タイプを、また、PF材には、表-6の中弾性タイプをそれぞれ適用した。

さらに、より効果的な補強対策として、図-9(c)に示すように、PF材（幅120×高さ100×長さ1130mm）を $\pm 45^\circ$ に設置するケース（補強CFP4～補強CFP6）を設定した。PF材の積層数は10層で一定とし、配置方向（ -45° 、 $+45^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ ）、配置面をパラメータとして検討する。断面欠損部に配置したCFシート、部分配置のCFシートには、表-2の高強度タイプを、また、PF材には、表-6の中弾性タイプをそれぞれ適用した。なお、補強CFP4～補強CFP6のモデルでは、断面欠損部には、不陸修正材ではなく、中弾性タイプのCFシートを積層（15層）配置することとした。

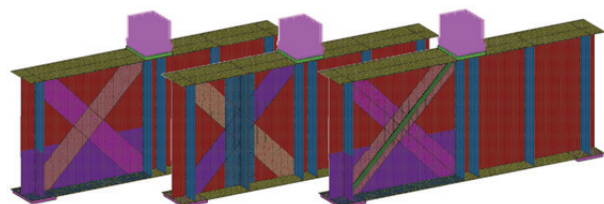
(2) 解析結果と考察

解析結果の一部として、表-7に、各検討パラメータの最大荷重を併記している。

まず、CFシートの部分配置を検討した、補強CFS1～補強CFS9について、CFシートの積層数に応じて、最大荷重が増加すること、CFシートは引張側（ -45° ）、圧縮側に（ $+45^\circ$ ）のどちらに配置しても最大荷重は向上するが、圧縮側に配置する方がより効果的であることがわかる。また、引張側と圧縮側（ $\pm 45^\circ$ ）に配置するとさらに荷重が増加することが確かめられた。このCFシートの部分配置の検討では、参照モデルと同等の性能回復が見込める最適なモデルとして、補強CFS6を選定する。なお、図を略したが、破壊形式は、図-5に示した健全体と同様に、補強側ウェブパネルのせん断座屈であった。

次に、CFシートの部分配置（補強CFS6）に加えて、PF材を垂直に配置した検討モデル（補強CFP1～補強CFP3）については、積層数の増加にしたがって、最大荷重も向上するが、破壊形式が、補強側ではないウェブ面のせん断座屈は、補強CFP2、補強CFP3であった。そこで、このケースの最適モデルとして補強CFP2を選定する。

さらに、CFシートの部分配置の代わりに、PF材の配置を検討したモデル（補強CFP4～補強CFP6）については、PF材を引張側（ -45° ）に配置するモデル（補強CFP4）よりも圧縮側（ $+45^\circ$ ）に配置するモデル（補強CFP5）の方が効果的であること、圧縮側に両面に配置するモデル（補強CFP5）よりも圧縮側、引張側に片面



(a) CFS1～CFS9 (b) CFP1～CFP3 (c) CFP4～CFP6
図-9 補強の解析モデル

ずつ配置するモデル（補強CFP6）の方がさらに効果的であることがわかる。最適なPF材の配置については、補強CFP6を選択する。

5. 載荷実験によるCFRPの配置の妥当性の検証

(1) CFRPの配置と補修・補強方法

3章、4章の解析的な検討結果を踏まえ、ここでは、それらのCFRPの配置の妥当性を載荷実験により検証する。性能回復（補修）については、補修CFR3モデル、せん断座屈耐力の向上（補強）については、補強CFS6モデル、補強CFP2モデル、補強CFP6モデルをそれぞれ選択し、合計4体の試験体を作製し、検証する。表-8に、実験パラメータを示す。

図-10に、断面欠損部の補修の状況を、図-11に、補強モデルにおけるPF材の設置の状況をそれぞれ示す。作業手順については、文献12)と同様である。なお、補強モデル（CFP2、CFP6）については、断面欠損部へのCFシートの接着・硬化後に、PF材の設置を行った。

(2) 実験のセットアップと載荷条件

図-12に、実験のセットアップ状況を示す。試験体の下フランジ下面の支点部にソールプレート（150×250mm）を、上フランジ上面に載荷板（150×250mm）を設置した。横倒れを防止するために、試験体に横倒れ防止装置を配置した。鉛直荷重の載荷には、油圧ジャッキ（最大荷重2,000kN、最大ストローク200mm）を用いた。図-13に、ひずみゲージ、変位計の設置位置を示す。ウェブ、垂直補剛材に1軸ゲージを、ウェブの主応力分布

表-8 実験パラメータ

モデル	ウェブ	補剛材	ウェブパネル		
	90°	90°	-45°	+45°	90°
補修CFR4	15+0+15	15+0+15	-	-	-
補強CFS6	10+0+10	15+0+15	SH5D	SH5D	-
補強CFP2	10+0+10	15+0+15	SH5D	SH5D	PF10D
補強CFP6	10+15+10	15+15+15	PF10S	PF10S	-

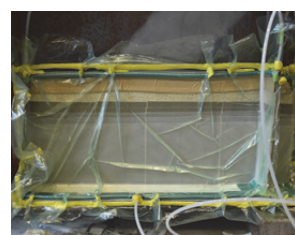
ウェブ、補剛材：積層数、片面+欠損部+片面で表示

SHnD：幅120mmのCFシートn層をウェブ両面に配置

PFnDS：幅120×高さ100mmのn層PF材をウェブ両面/片面に配置



(a) 欠損部への不陸修正材の充填



(b) VaRTM成形の状況

図-10 断面欠損部の補修の状況

を把握するために、3軸ゲージを設置した。なお、裏面にも同様に、ひずみゲージを設置した。

(3) 検討結果と考察

解析結果の一部として、図-14に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。図中にBasler式によるせん断耐力の推定値を併記した。

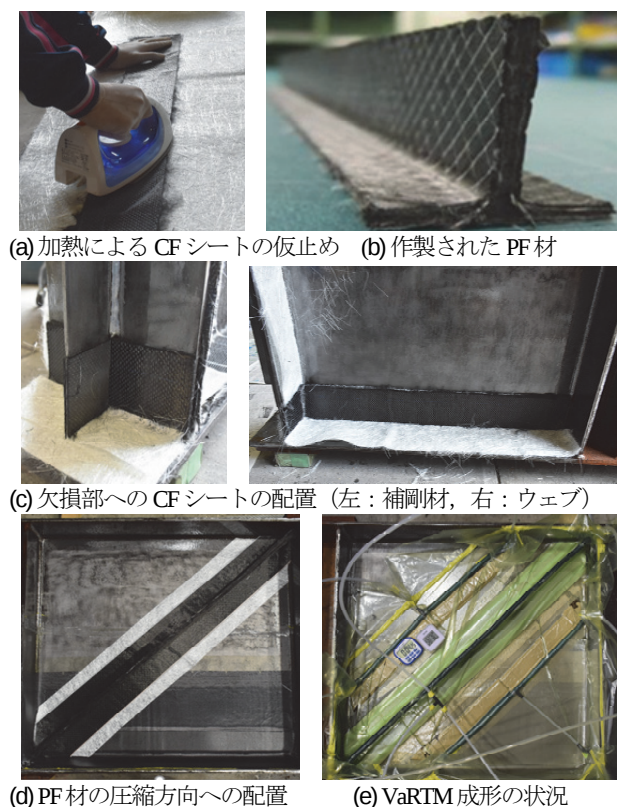


図-11 補強モデルにおけるPF材の設置の状況

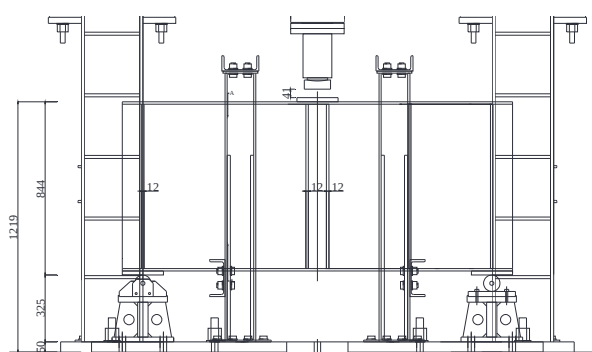


図-12 実験のセットアップ図 (単位: mm)

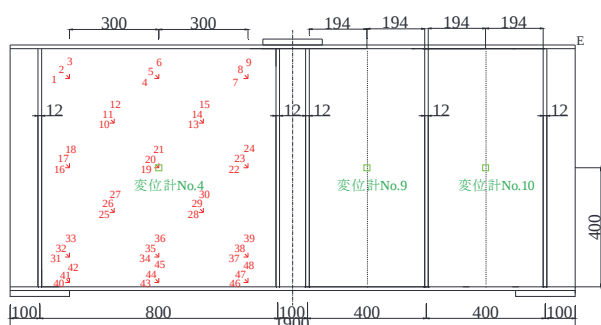


図-13 ひずみゲージ、変位計の設置位置 (単位: mm)

図-14より、補修CFR4については、健全体と同程度まで最大荷重が回復していること、実験結果と解析結果でよい一致を示すことがわかる。

補強CFS6については、実験結果は、解析結果よりも若干、最大荷重が小さく、変位も大きくなることわかる。これは、後述するように、最大荷重に至る途中で、ウェブ断面欠損部の不陸修正とウェブの境界において、はく離が生じたためであり、解析では、はく離は考慮されていない。

補強CFP2については、補強CFS6よりも最大荷重が増加すること、最大荷重の実験値、解析値は両者でよい一致を示すことがわかるが、補強CFS6と同様の箇所で、最大荷重時にはく離が生じ、耐力が低下した。

補強CFP6については、補強の試験体において最大荷重が最も大きくなり、その実験値、解析値は両者でよい一致を示すことがわかるが、変位は、実験結果の方が解析結果よりも大きくなった。

図-15に、荷重とウェブの面外変位の関係を示す。まず、CFRPを設置したウェブの面外変位の図-15(a)より、健全体と補修CFR4については、ほぼ同様の変形挙動を示し、ウェブに座屈が生じたことがわかる。補強CFS6では、面外変位が抑えられていたが、荷重が1300kNあたりから急激に増加し、ウェブに座屈が生じた。補強CFP2では、最大荷重まで面外変位が抑制されていること、補強CFP6では、荷重が1600kNを超えたあたりから変位が増加することがわかる。

CFRPを設置していないウェブ側の面外変位の図-15(b)より、補強CFP2では、面外変位が生じていないこと、補強CFP6では、図-13に示した変位計No.9で最大荷重近傍から変位が増大することがわかる。したがって、補強CFP2では、破壊形式はウェブのせん断座屈ではなく、後述するように、CFRPの破壊であった。また、補強CFP6では、着目していない方のウェブのせん断座屈であるといえた。

図-16に、荷重とはく離が生じた箇所近傍のひずみの

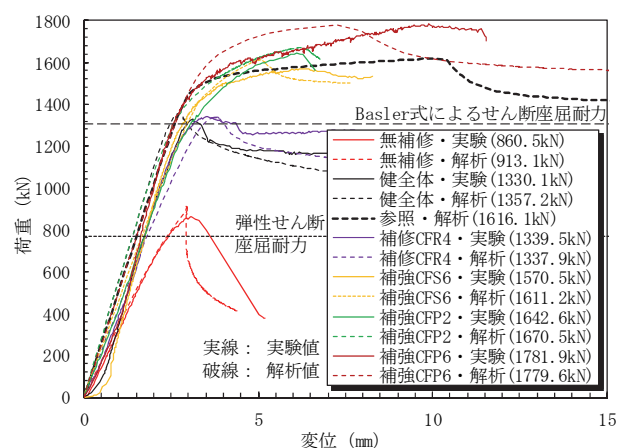
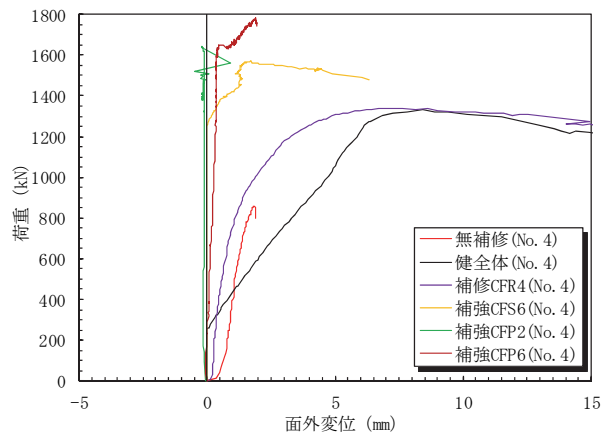
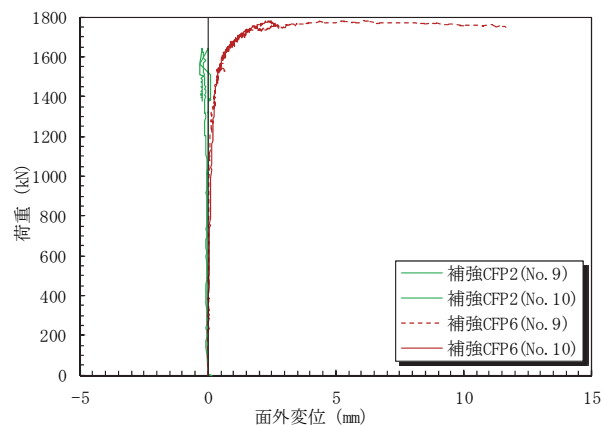


図-14 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

関係を示す。はく離は、図-13に示したゲージNo.40近傍で生じた。ひずみが急激に変化している箇所ではく離が生じたと判断し、×で示している。なお、補修CFR4では、ウェブのせん断座屈が先行し、はく離は生じなかった。図より、補強CFS6、補強CFP6では、それぞれ1454.1kN、1530.1kNではく離が生じた後も荷重は増加することがわかる。一方、補強CFP2では、最大荷重(1642.6kN)近くの1640.0kNではく離が生じ、荷重が低下することがわかる。補強CFP2では、不陸修正材と鋼



(a) CFRPを設置したウェブ



(b) CFRPを設置していないウェブ

図-15 荷重とウェブの面外変位の関係

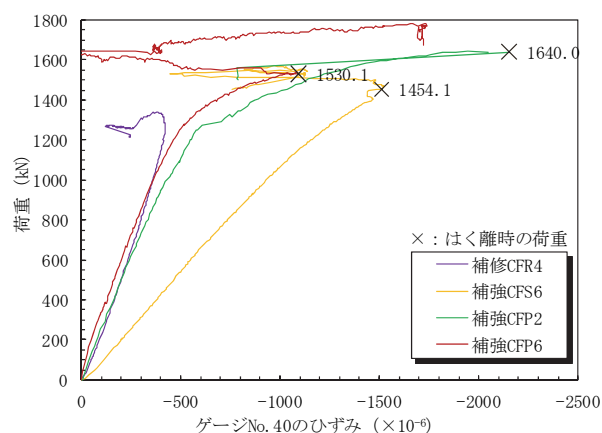


図-16 荷重とはく離が生じた箇所近傍のひずみの関係

部材の間の不陸修正材が破壊し、はく離したと考えられ、不陸修正材の破壊、はく離が耐力に支配的であるといえた。

図-17に、補修モデル、図-18に、補強モデルの最大荷重近傍の変形を、解析結果と実験結果について、それぞれ示す。なお、解析結果は最大荷重時の面外変形のコンタ図を、実験結果は、載荷実験の後、除荷した状態を示している。

これらの図より、全てのケースで、実験結果、解析結果で変形モード、破壊形式が同じであること、また、補修CFR4、補強CFS6の破壊形式は、ウェブのせん断座屈であることがわかる。

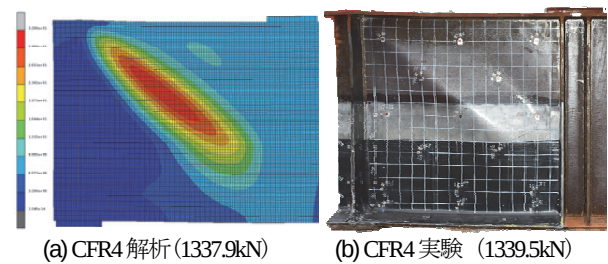


図-17 補修モデルにおける最大荷重近傍の変形

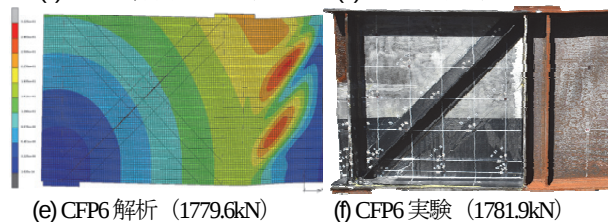
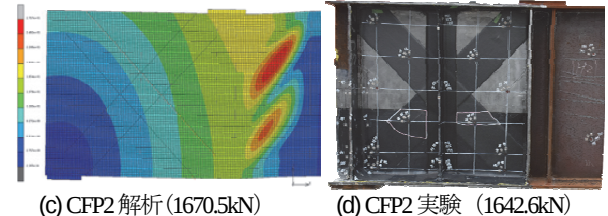
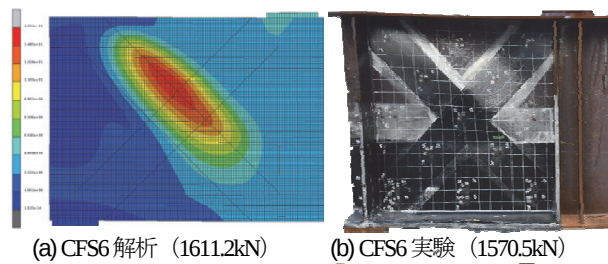


図-18 補強モデルにおける最大荷重近傍の変形

表-9 最大荷重の比較

モデル	解析 (kN)	実験 (kN)	実験/解析	健全体に対する荷重倍率
無補修	913.1	860.5	0.942	0.647
健全体	1357.2	1330.1	0.980	1.000
参照	1616.7	-	-	1.215
補修CFR4	1337.9	1339.5	1.001	1.007
補強CFS6	1611.3	1570.5	0.975	1.181
補強CFP2	1670.5	1642.6	0.983	1.235
補強CFP6	1779.6	1781.9	1.001	1.340

表-9に、最大荷重の比較を示す。表より、実験結果と解析結果の比較から両者でよい一致を示すことがわかる。特に、補修・補強の解析ケースでは、実験結果の最大荷重に対して3%以内で予測できることが確かめられた。

補強効果については、健全体の最大荷重に対して、 $\pm 45^\circ$ 方向へのCFシートの部分配置した補強CFR4では18%、補強CFR4の配置にさらに垂直（ 90° ）方向にPF材を配置した補強CFP2では23%、それぞれ向上できることがわかった。ただし、補強CFP2の破壊形式は、不陸修正材と鋼部材の境界部であったことから、この方法ではこれ以上の最大荷重の向上は難しいと考えられた。

不陸修正材の代わりにCFシートを充填した上で、 -45° （引張）、 $+45^\circ$ （圧縮）方向に片面ずつ相互にPF材を配置した補強CFP6では、最大荷重が34%向上することがわかった。ただし、このケースでは、CFRPを配置していない方のウェブが先行して座屈することから実際の最大荷重はさらに高いと考えられる。なお、補強CFP6では、最大荷重に至る前に部分的にはく離が生じたが、せん断座屈耐力への影響が小さかった。

6. まとめ

本研究では、鋼鈑桁橋の桁端の断面欠損部（欠損率：ウェブ100%、垂直補剛材50%）を対象に、VaRTM技術を応用して含浸・接着したCFRP部材による耐力の回復および向上について、解析的、実験的な検討を行った。その結果、以下のことがいえた。

- (1) 耐力の回復を検討した結果、ウェブ、垂直補剛材の断面欠損量と等価な剛性のCFシートを積層接着すれば、健全体と同程度までせん断耐力が回復すること、また、CFシートの必要量は、ウェブに対しては断面欠損量と等価な剛性の2/3までとしても耐力が回復する可能性があることが確かめられた。
- (2) 耐力の向上を検討した結果、 $\pm 45^\circ$ 方向へのCFシートの部分配置、それに加え、垂直（ 90° ）方向にPF材を配置すれば、最大荷重をそれぞれ18%、23%向上できることがわかったが、断面欠損部の不陸修正材の破壊、はく離が耐力に支配的となり、それ以上のせん断座屈耐力の向上は見込めないといえた。
- (3) 断面欠損部にCFシートを充填した上で、ウェブ面の表裏にそれぞれ -45° （引張）、 $+45^\circ$ （圧縮）方向にPF材を配置した場合、最大荷重は34%以上高くなることを確かめられた。また、部分的なはく離が先行したが、せん断座屈耐力に及ぼす影響は小さいといえた。

以上のことから、VaRTM技術を応用して含浸・接着したCFRP部材を適用すれば、鋼鈑桁橋の桁端の断面欠損部を補修・補強できるといえた。なお、不陸修正材の破壊、CFRPのはく離が生じたが、今後、それらの予測と対策について検討したい。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料，第294号，2006.1
- 2) 丹波寛夫，橋本国太郎，田中大介，杉浦邦征：食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.60A，pp94-104，2014.3
- 3) 複合構造委員会編：先進複合材料の社会基盤施設への適用，複合構造レポート01，土木学会，2007.
- 4) 複合構造委員会編：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート05，土木学会，2012.
- 5) 奥山雄介，宮下剛，緒方辰男，藤野和雄，大垣賀津雄，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP 接着鋼板の一軸圧縮試験，土木学会，構造工学論文集，Vol.57A，pp.735-746，2011.3
- 6) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：鋼橋桁端部腹板の腐食に対するCFRP を用いた補修工法の実験的研究，土木学会，構造工学論文集，Vol.58A，pp.710-720，2012.3
- 7) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，小林朗，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：腹板をCFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と耐力評価法，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.3，pp.635-654，2012.11
- 8) 奥山雄介，宮下剛，長井正嗣，若林大，小出宜央，秀熊佑哉，小林朗，堀本歴：炭素繊維を用いた支点部垂直補剛材の腐食部補修法に関する実験的研究，第30回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，pp.60-63，2012.10
- 9) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル，2013.10
- 10) 近藤富士夫，松井孝洋：他分野におけるCFRP 大型構造物成形に関する最近の話題，土木学会，第4回FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.23-26，2012.
- 11) 小林洸貴，近藤諒翼，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：真空含浸工法を応用したCFRP 接着による鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.73，No.5，pp.II_20-II_31，2017.5
- 12) 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，pp.II_44-II_55，2018.5

REPAIR AND STRENGTHENING OF STEEL GIRDER END WITH SECTION LOSS USING CFRP MEMBERS BONDED BY VARTM TECHNIQUE

Tuvaan NYAMBAYAR, Visal THAY, Hitoshi NAKAMURA and Takahiro MATSUI

This paper deals with repair and strengthening of steel girder end with section loss using CFRP members bonded by VaRTM technique. The section loss is 100mm of the lower end of web and vertical stiffener in the steel girder with the depth of 800 mm and section loss ratio is 100% in the web, 50% in the vertical stiffener, respectively. In the case of repair, CF sheets were placed in the area of section loss. In the case of strengthening, the partial CF sheets and three-dimensional CFRP members were placed in the web planel. The number of laminated CF sheets and the direction of arrangement were used as parameters. The arrangement of CFRP was parametrically examined by FE analysis and four optimal arrangements were selected. Moreover, three point bending load tests were conducted to confirm their validity.