

断面欠損した鋼桁端柱部材の CFRP 板と 低弾性接着剤による性能回復

今井 貴也¹・中村 一史²・平野 秀一³・増井 隆⁴・上條 崇⁵・
政門 哲夫⁶・鈴木 啓之⁷・中川 健太⁸

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: imai-takaya@ed.tmu.ac.jp

²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

³正会員 首都高速道路株式会社 保全・交通部 点検・補修推進室 保全技術課 課長代理
(〒100-8930 京都千代田区霞が関1-4-1)
E-mail: s.hirano711@shutoko.jp

⁴正会員 一般財団法人首都高速道路技術センター 技術研究所 第一研究開発室長
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11)
E-mail: t.masui@tecmex.or.jp

⁵正会員 一般財団法人首都高速道路技術センター 技術研究所 第一研究開発室 室長代理
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11)
E-mail: t.kamijyo@tecmex.or.jp

⁶正会員 日本エンジニアリング株式会社 構造技術部 部長 (〒231-0023 横浜市中区山下町209番地)
E-mail: masakado-tetsuo@nek-eng.co.jp

⁷正会員 株式会社ダイクレ 技術本部 課長 (〒136-0071 東京都江東区亀戸2-18-10)
E-mail: h-suzuki@daikure.co.jp

⁸正会員 株式会社ITWパフォーマンスポリマーズ&フルイズジャパン Transportation Japan セールスリ
ーダー (〒564-0053 大阪府吹田市江の木町30-32)
E-mail: knakagawa@itwppfjapan.com

CFRP板を用いた鋼桁端の断面欠損部の接着補修において、不陸修正を兼ねた、低弾性で粘度が高い接着剤を適用する場合、接着剤の厚さと内部の空隙による接着不良が課題となる。本研究では、接着不良のモデル化と接着接合部の荷重伝達の特性を、ばね要素を用いて解析的に検討するとともに、そのモデル化を適用して、接着剤の厚さと接着不良が断面欠損した鋼桁端部の性能回復に及ぼす影響を把握することを目的とした。さらに、接着不良の有無をパラメータとした載荷実験を行い、その妥当性を検証した。検討の結果、接着剤の厚さと接着不良が桁端柱部材の圧縮耐力の回復に及ぼす影響は比較的小さく、接着施工の管理水準内であれば、それらの影響はほとんどないことが確かめられた。

Key Words : CFRP strips, structural adhesive, repair, steel members with section loss

1. はじめに

鋼桁端部の断面欠損は、橋梁の耐力の低下に繋がるため、残存耐力について実験的、解析的に検討した研究がこれまでも数多く行われている¹⁾。断面欠損に対する補修・補強工法として、一般に、高力ボルト接合による

当て板工法²⁾が適用されるが、簡便で短工期となる工法があれば有用である。

本研究では、軽量で、現場でのハンドリングに優れる炭素繊維強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastic; CFRP) 板接着^{3, 4)}による補修工法の開発を目的とした。接着剤には、メチルメタクリレート系構造用接着剤 (PLEXUS

MA530, ITWパフォーマンスポリマーズ&フルイズジャパン社製)を用いた。この接着剤は、粘度が高く、柔軟性があり、可使時間が短いことから、不陸修正が不要であること、はく離しにくいこと、急速施工が可能となることなどの特徴を有するが、一方で、接着層が厚くなり、接着剤に空隙(ポイド)が生じる可能性も高くなる。したがって、接着剤の厚さ、ポイドによる接着不良の影響を検討する必要がある。

既往の論文⁹⁾では、接着不良によるCFRP板の接着端部のはく離に着目した検討はあるものの、ポイドによる接着不良が、接着剤に生じる応力分布や補修後の性能回復に及ぼす影響については十分に検討されていない。

本研究では、まず、断面欠損を生じた鋼桁端部のCFRP板接着による性能回復を実験的に検討した。さらに、接着不良(ポイド)のモデル化の妥当性を解析的に検証するとともに、接着不良の有無が鋼桁端部の耐力に及ぼす影響を実験的、解析的に検討した。

2. 検討対象と断面欠損のモデル化

一般的な鋼桁橋の桁端部を想定して、I形断面の小型試験体を対象とする。図-1に、桁端柱部材のモデル化を、表-1に、試験体の寸法をそれぞれ示す。支点上の鉛直荷重に対する桁端柱部材としての耐力に着目するため、載荷板を介して上下方向に荷重を載荷するものとしてモデル化した。

断面欠損は、垂直補剛材、ウェブの下端100mmの範囲とし、フランジの腐食は考慮しなかった。断面欠損範囲は、実橋の損傷データ分析結果に基づいて決定した。垂直補剛材、ウェブの厚さの欠損率を、下端で75%、上端で0%(健全)とし、テーパ状の直線勾配でモデル化した。試験体については、予め鋼板を機械加工により、テーパ状の断面欠損とした。

表-2に、鋼材(SM400)の材料特性を示す。降伏強度、引張強度、伸びはミルシートによる値である。弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s は、鋼材の一般的な値として、200GPa、0.3をそれぞれ仮定した。

載荷実験は、4体について実施した。すなわち、断面欠損のないモデルを「健全」、断面欠損があり、補修を行わないモデルを「無補修」、断面欠損に対してCFRP板を接着して補修するモデルで、接着不良がない場合とある場合を、それぞれ「補修不良なし」、「補修不良あり」とした。

試験体の各部位の最大初期たわみ(面外たわみ)の実測値は、ウェブ、垂直補剛材ともに最大で1.0mmであった。ウェブ高さ800mmに対して1/800程度であり、道路橋示方書の製作精度(1/250)を満足していた。

3. 立体CFRP板と補修方法

(1) CFRP積層の補修設計

補修の方針として、最大欠損部(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、補修の考え方は、「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」⁶⁾の次式によるものとした。

$$A_{st} \leq A_{cf,s} \quad (1)$$

$$A_{cf,s} = t_{cf,s} \cdot B_{cf} \quad (2)$$

$$t_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_s} \cdot t_{cf} \cdot n \quad (3)$$

$$t_{cf,svf} = \frac{t_{cf,s}}{V_f} \quad (4)$$

ここで、

A_{st} : 鋼部材の補修・補強必要断面積 (mm²)

$A_{cf,s}$: CFシートの鋼換算断面積 (mm²)

繊維体積含有率 V_f は、既往の研究⁷⁾から50%とし、繊維の配向は鉛直方向とした。表-3に、本研究で用いたCFシ

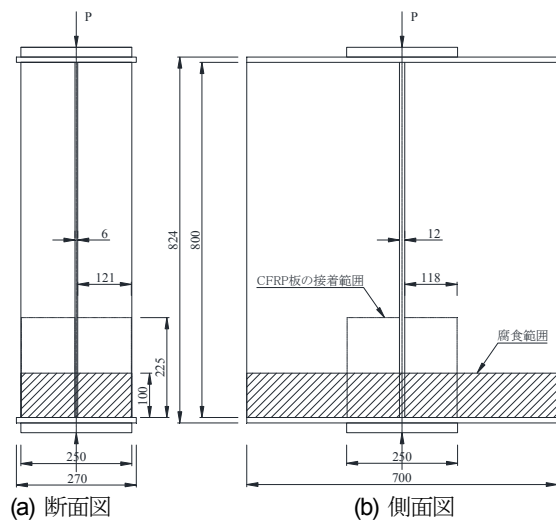


図-1 桁端柱部材のモデル化(単位: mm)

表-1 試験体の寸法

桁長 L (mm)	700
フランジ幅 b_f (mm)	270
フランジ厚 t_f (mm)	12
腹板高さ h_w (mm)	800
腹板厚さ 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 鋼材(SM400)の材料特性

項目	ウェブ	垂直補剛材
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	291	288
引張強度 σ_u (N/mm ²)	431	429
伸び δ (%)	30	31

ートの材料特性を示す。弾性係数と引張強度に優れる中弾性タイプを選定した。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。表-4に、CFシート必要量の計算結果を示す。まず、表-4より、ウェブ、垂直補剛材の断面欠損率75%の部位に対して、CFシートの鋼換算厚さは、それぞれ、6.88mm、12.41mmであった。また、表-4の括弧内の値は、5章に示す解析において用いた値である。積層数の相違は、CFRP板の材料試験に基づいた弾性係数がやや小さく評価され、剛性を等価にするため、実験では、CFシートの数量を多くしたことによるものである。図-1に、CFRP板による補修範囲を併記している。

図-2に、作製した立体CFRP板を示す。立体CFRP板は、CFシートを積層して、VaRTM成形により作製した。CFRP板には、高さに対して1/100程度の面外方向への初期たわみがあった。設計時の寸法は、225×120×125mmであったが、実験に用いたCFRP板の寸法は、高さは同じで、ウェブで118mm、垂直補剛材で121mmあった。解析においては、設計時の寸法で検討している。表-5に、接着剤の材料物性値を示す。

(2) 試験体の補修方法

図-3に、CFRP板接着における補修方法を示す。作業工程は、下地処理、プライマ塗布、CFRP板への接着剤塗布、CFRP板の貼り付け、養生の手順であり、各工程の概要を以下に示す。

a) 下地処理

試験体の表面は、黒皮の状態であり、腐食範囲は切削加工のため、鋼材の素地状態となっている。現場施工を想定して、屋外暴露により腐食範囲を赤錆状態とした。下地処理には、ブラスト面形成動力工具、ディスクサンダ、軸付き砥石を用いて錆や黒皮などを除去した(図-3(a), (b), (c))。その後、アセトンを用いて表面を清掃

し、油分や汚れのない状態とした(図-3(d), (f))。

また、溶接部の余盛などの突起を削り取ると溶接部に悪影響を及ぼす恐れがあるため、表面を切削しないように留意した(図-3(c))。CFRP板の表面は、研磨紙を用いて目荒しを行った(図-3(e))。

b) プライマ塗布

下地処理後、鋼材表面の錆防止とCFRP板との接着性を向上させるために、プライマーを塗布した(図-3(g))。プライマの塗布は、鋼材表面に錆の発生や汚れがないように、下地処理後、速やかに行った。

c) CFRP板への接着剤塗布

接着剤は、CFRP板全面にエアージェットを用いてライン塗布した(図-3(h))。塗布は、ウェブ面、垂直補剛材面、下フランジ面に順に実施し、最後にそれぞれの面の境に塗布する(図-3(i))。

d) CFRP板の接着、固定

接着剤を塗布したCFRP板を断面欠損した桁端部に接着する。設計した接着層の厚さ(3mm)まで手で強く押し付け(図-3(j))、はみ出した接着剤を拭き取る。さらに、クランプで下フランジに固定する(図-3(k))。

e) 養生

接着は屋外で実施したが、冬季(12℃)であったため、加温養生を行った(図-3(l))。養生条件は、約25℃、12時間とした。

(3) 接着層厚さと接着条件

設計した接着層厚さは3mmであったが、完成した補修試験体では、接着層厚さの差が大きかった。接着層厚さの実測値(両側の平均値)は、断面欠損のない一般部については、ウェブ側で3.5~5.9mm、垂直補剛材側で4.6~8.6mmであった。断面欠損部については、最大で約13mmの厚さとなった。

CFRP板の接着に用いた接着剤は、低弾性、高粘度の

表-3 CFシート(中弾性タイプ)の材料特性

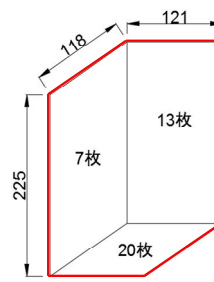
弾性係数 E_f (N/mm ²)	440,000
引張強度 σ_f (N/mm ²)	24,000
シート厚さ t_f (mm)	0.217
繊維重量 (g/m ²)	400

表-4 CFシート必要量の計算結果

項目	ウェブ	垂直補剛材
鋼材の健全部の厚さ t_0 (mm)	6.0	12.0
鋼材の腐食部の残存厚さ t (mm)	1.5	3.0
鋼材の必要厚さ t_d (mm)	4.5	9.0
断面欠損率 r (t/t_0)	0.75	0.75
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)	440	440
繊維体積含有率 V_f	0.50	0.50
CFシートの設計厚さ t_f (mm)	0.217	0.217
CFシートの積層数 n	14 (10)	26 (20)
CFシートの鋼換算厚さ t_{fs} (mm)	6.68 (4.77)	12.41 (9.55)



(a) CFRP板の外観



(b) 積層数と寸法

図-2 立体CFRP板(単位: mm)

表-5 接着剤の材料物性値

引張弾性係数 (N/mm ²)	759
引張強度 (N/mm ²)	18.1
引張せん断接着強さ (N/mm ²)	9.9
可使時間 (min)	30

性質があることから、前述したように、接着層内部にボイドが発生する恐れがあり、耐荷力の性能回復にも影響があるかどうか検討する必要があった。ここでは、接着条件を変えた2つのケースにより実験を行った。表-6に、接着条件を示す。不良なしのケースは、通常の施工で、できるだけ不良が生じないように接着したケースある。一方、不良ありのケースは、CFRP板の設置位置のずれや間違えなどによるCFRP板の貼り直しを想定して、接着剤中に大量の空隙が生じることを意図したケースである。図-4に、不良ありのケースにおける接着面の状態を示す。

4. 断面欠損した桁端柱部材の性能回復の実験的検討

(1) 実験方法とセットアップ

図-5に、実験のセットアップ図、図-6に、セットアップ状況を示す。試験体の下面にソールプレート(250×250mm)を、上面に載荷板(250×250mm)を設置した。横倒れを防止するために、試験体の両端部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-5に示したように、荷重はジャッキ下端のロードセルにより、鉛直変位は上面の載荷板の4箇所に設置した変



(a) ディスクサンダによるケレン



(b) プラスト面形成動力工具によるケレン



(c) 軸付き砥石によるケレン



(d) ケレン完了状況



(e) CFRP板表面の目荒らし



(f) アセトンによる脱脂・清掃



(g) プライマの塗布



(h) エアーガンによるライン塗布



(i) CFRP板への塗布の状況



(j) CFRP板の接着



(k) クランプ固定



(l) 加温養生

図-3 CFRP板接着による補修方法

位計により計測した。鉛直変位は4箇所での平均値とした。

図-7に、ひずみゲージの位置を示す。ウェブの下端より15mm, 50mm, 110mmの位置に、ウェブ、垂直補剛材の各位置にひずみゲージを設置した。なお、図を略したが、裏面にも同様にひずみゲージを設置した。さらに、図-7に併記したように、高さ中心位置で両端から100mmの位置のウェブの面外変位を2箇所（HD1, HD2）で計測した。

表-6 鋼桁への接着条件

ケース	接着条件
不良なし	可能な限り不良が生じないように接着する。
不良あり	不良なしと同じ方法で接着した後、一旦取り外し、再度、接着する。



図-4 不良ありのケースにおける接着面の状態

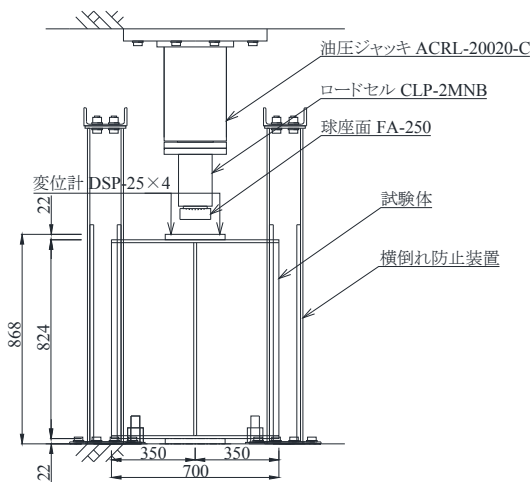


図-5 実験のセットアップ図 (単位: mm)



(a) 正面 (b) 側面

図-6 セットアップ状況

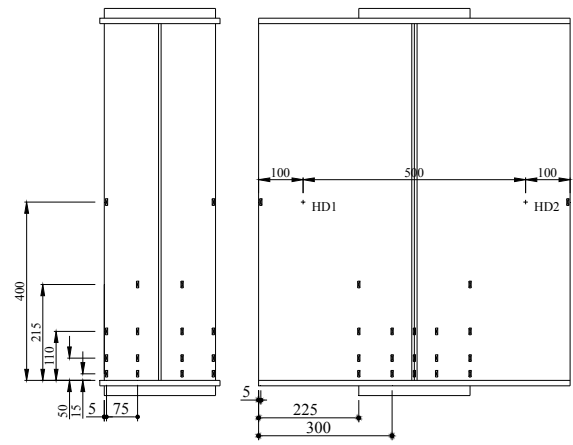
(2) 検討結果と考察

a) 荷重-変位関係と性能回復

図-8に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を、表-7に各モデルの最大荷重をそれぞれ示す。図-8に併記した解析結果は、5章で詳しく述べるが、目標とした接着層厚さ3mmで、補修不良あり・なしのケースである。

まず、無補修モデルの耐荷力は、健全モデルと比べ、24%低下した。これは、ウェブと垂直補剛材の断面欠損部の最小厚さが、それぞれ、1.5mm, 3mmと薄いため、早い段階で降伏し、局所的に座屈したためである。

一方、CFRP板を接着接合した補修不良なしモデルでは、健全モデルと比べて、柱部材としての最大荷重は、1.6%高くなり、健全の耐荷力レベルまで十分に回復していることがわかる。また、補修不良ありモデルでも、健全モデルと比べ、柱部材としての最大荷重は0.3%高くな



(a) 側面図 (b) 正面図

図-7 ひずみゲージの設置位置 (単位: mm)

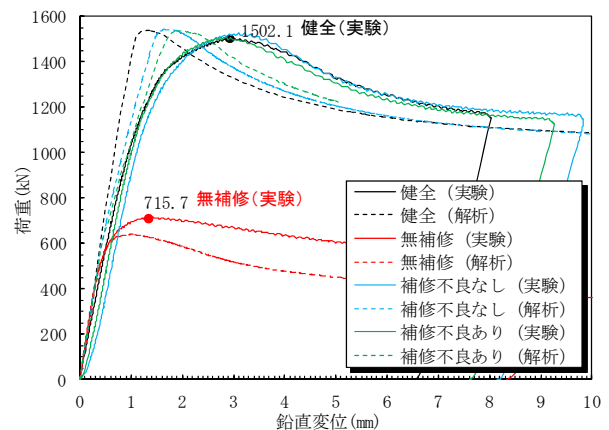


図-8 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

表-7 各モデルの最大荷重と補修効果

試験体の種類	最大荷重 (kN)	健全に対する比率
健全	1502.1	1.000
無補修	715.7	0.476
補修不良なし	1525.4	1.016
補修不良あり	1506.7	1.003

り、初期性能まで十分に回復していることがわかる。

b) 垂直補剛材ひずみと変形

図-9に、荷重と垂直補剛材の軸ひずみの関係を示す。軸ひずみは、垂直補剛材の下端から15mmの高さのひずみゲージの値を示している。図より、無補修モデルでは、荷重が小さい段階（約500kN）から大きな軸ひずみが発生していることがわかる。健全モデルが約900kNで降伏ひずみに達して、ひずみが増大するのに対して、補修不良なしモデルでは、塑性化後もひずみの増大が抑制され、健全モデルよりひずみが大幅に抑制されていることがわかる。一方、補修不良ありモデルでは、荷重が小さい段階からひずみの挙動が乱れており、ひずみが大きくなる傾向が見られるものの、最大荷重に至るまで軸ひずみは概ね抑制されることがわかる。以上より、CFRP板を接着接合することによって、軸ひずみの増加が抑制されることが確認された。

c) 座屈変形

図-10に、試験体の座屈変形を示す。無補修モデルでは、垂直補剛材の下端に局部座屈が生じていることがわかる。健全モデル、補修不良なしモデル、補修不良ありモデルでは、垂直補剛材の高さ中心付近が面外方向に変形する座屈が生じることがわかる。なお、健全モデル、補修不良なしモデル、補修不良ありモデルの順に、最大の面外変形が生じる位置が、若干上側になった。以上か

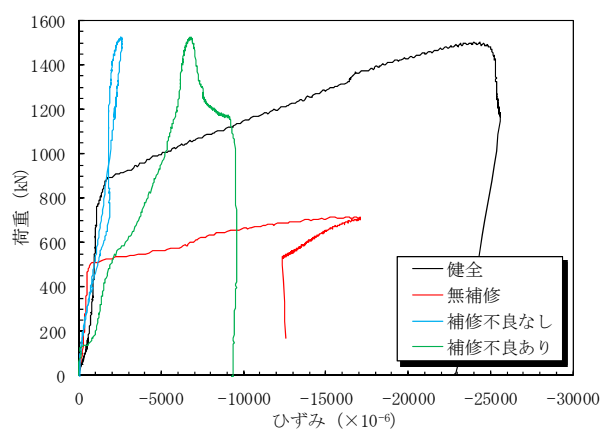


図-9 荷重と垂直補剛材の軸ひずみの関係



(a) 無補修 (b) 健全 (c) 補修不良なし (d) 補修不良あり

図-10 載荷後における試験体の座屈変形

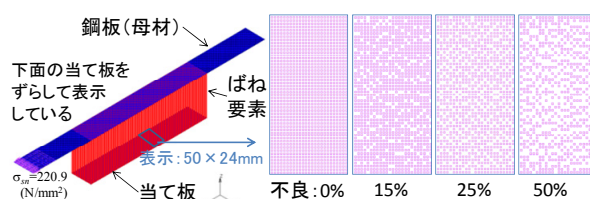
ら、CFRP板の接着接合により、断面欠損部の局部座屈を抑制する効果があることが確かめられた。

5. 断面欠損した桁端柱部材の性能回復の解析的検討

(1) ボイドによる接着不良のモデル化の検討

構造試験体において、相対的に寸法、剛性の小さい、接着剤の影響を適切に評価するために、接着剤をばね要素でモデル化し、接着不良については、ばねを除去することで検討することとした。モデル化の妥当性を、ソリッド要素による解析結果と比較することで検証する。図-11に、鋼当て板が接着された鋼板の解析モデルと接着不良を、表-8に、当て板試験体の寸法を、表-9に、鋼板、接着剤の材料物性値をそれぞれ示す。鋼板はシェル要素、接着剤はばね要素でモデル化した。比較のために、全てをソリッド要素でモデル化した解析モデルを作成した。接着剤の不良は、ボイドを想定し、平均的に分布するものと仮定して、ばね要素、ソリッド要素を除去することでパラメトリック（不良率：0、15、25、50%）に検討した。要素サイズは1×1mmである。引張荷重は95kN（公称引張応力 $\sigma_{cr}=220.9\text{N/mm}^2$ ）とした。

解析結果の一部として、図-12に、接着剤に生じる応力分布を示す。接着剤の弾性係数が小さいため、作用に対して、接着剤に生じる応力は全体として小さい。ソリッド要素では、空隙の部位で、応力分布に乱れが生じるものの、応力分布の傾向は、シェル要素とばね要素でモデル化した場合と同じであることがわかる。また、不良率が大きくなると、せん断応力が高くなるが、垂直応力



(a) 当て板試験体のモデル (b) 平均的な接着不良と面積率

図-11 当て板が接着された鋼板の解析モデルと接着不良

表-8 当て板試験体の寸法

	鋼板 (母材)	鋼当て板	接着剤
長さ L (mm)	600	300	300
幅 B (mm)	50	50	50
厚さ H (mm)	8.6	8.6	1.0

表-9 鋼板、接着剤の材料物性値

項目	鋼板 (SM490Y)	接着剤 (MA530)
弾性係数 E (N/mm ²)	195,000	759
ポアソン比 ν	0.3	0.34

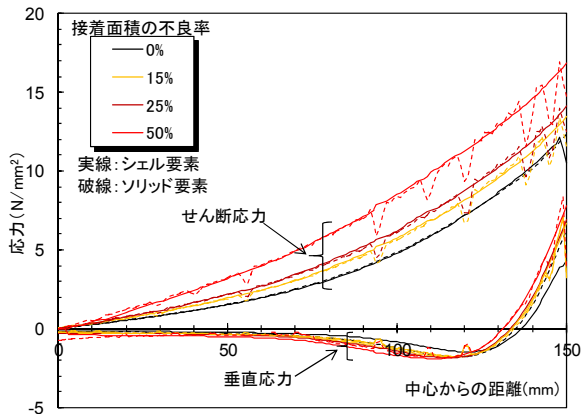


図-12 接着剤に生じる応力分布

への不良率の影響は小さいことがわかる。

以上のことから、接着不良は、シェル要素とばね要素を用いたモデルにおいて、ばね要素を除去することで概ね評価できることが確かめられた。

(2) 解析方法と接着不良のモデル化

支点近傍にテーパ状の欠損を有する鋼桁端柱部材の試験体を対象に、断面欠損したウェブ、垂直補剛材をシェル要素でモデル化し、試験体と同程度の初期たわみを設定して、桁端柱部材としての圧縮耐力の性能回復を解析的に検討した。鋼桁端柱部材の試験体の寸法、鋼部材の材料特性は、表-1、表-2に示した通りである。CFRP板は直交異方性を考慮したシェル要素、接着剤はばね要素を用いてモデル化した。ウェブと垂直補剛材の断面欠損部およびCFRP板の接着範囲の要素サイズは5mm×5mmとし、それ以外では10mm×10mmとした。図-13に、補修試験体の解析モデルを示す。ばね要素を表示するために、CFRP板をずらして表示している。

補修モデルにおける接着不良については、接着接合において、平均的にボイドが生じると仮定したモデル（平均接着モデル）で検討する。この接着不良は、節点からばね要素を領域ごとに50%除去することで、分担面積を考慮してモデル化した。図-13(c)に、接着不良のモデル化を示す。表-10に、解析の検討シリーズを示す。試験体の補修では、目標値よりも接着層が厚くなったことから、断面欠損のない一般部において、補修不良なしモデルでは、目標とした接着層厚さ3mmに加え、1, 2, 5, 10, 15mmについて検討した。また、補修不良ありモデルでは、接着層厚さ3mmに加え、1, 2, 10mmについて検討した。なお、テーパ状の断面欠損部では、下端ほど接着層が厚くなるが、解析においても断面欠損部の接着層の厚さに応じてばね定数を設定している。

(3) 検討結果と考察

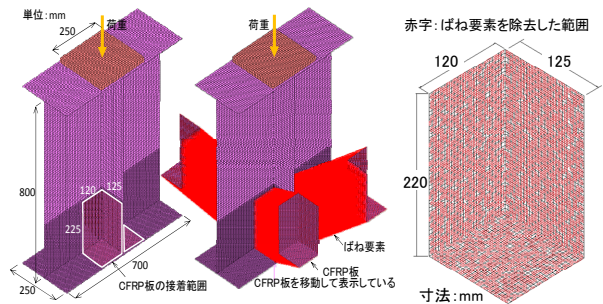
図-8、図-14に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。まず、図-8より、接着層厚さ3mmの補修モデル

は、接着不良の有無に関わらず、健全の初期性能まで耐荷力が回復されること、また、解析結果と実験結果はよい一致を示すことがわかる。なお、最大荷重時の変位は、実験結果に比べ、解析結果では小さく評価された。これは解析では溶接残留応力が考慮されていないためと考えられる。図-14より、接着層が厚くなるほど、最大荷重が低下し、鉛直変位が増加する傾向になることがわかる。

図-15に、全ての解析シリーズでの接着層厚さと最大荷重の関係を、図-16に、接着層厚さと最大荷重時の鉛直変位の関係を、図-17に、接着厚さと垂直補剛材コバ面の下端15mmでの降伏ひずみ時 ($\epsilon_y=1372 \times 10^{-6}$) の荷重の関係を示す。

図-15より、無補修モデルでは、実験結果と同様に、最大荷重が他の検討シリーズより低いこと、また、健全、補修不良なしモデル、補修不良ありモデルでは、最大荷重の値がほぼ等しく接着層厚さの変化、接着不良の有無によって最大荷重に大きく変化がないことがわかる。

図-16より、接着層厚さが厚くなるほど、最大荷重時



(a) 全体モデル (b)CFRP板とばね要素 (c)接着不良のモデル化
図-13 解析における補修モデル (単位: mm)

表-10 解析の検討シリーズ

検討モデル	接着層厚さ (mm)					
	健全	—				
無補修	—					
補修不良なし	1	2	3	5	10	15
補修不良あり	1	2	3	—	10	—

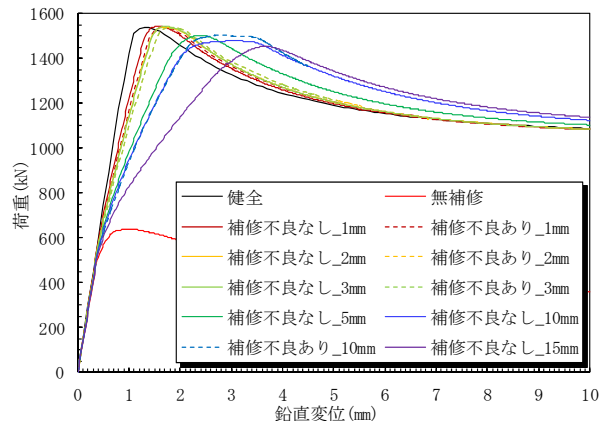


図-14 解析による荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

の鉛直変位も大きくなるのがわかる。接着層が厚くなっても耐力は回復するが、変形が大きくなることに留意が必要であるといえる。接着層が厚くなると、CFRP板への荷重の伝達の効率が低下し、変形が増加すると考えられる。

図-17より、垂直補剛材のコバ面の下端15mmでの降伏ひずみ時の鉛直荷重は、健全モデルのみ、他のモデルと異なり、2倍以上の値であった。CFRP板接着による補修

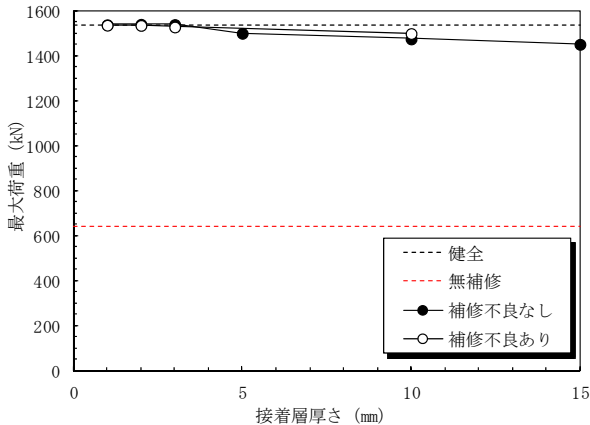


図-15 接着厚さと最大荷重の関係

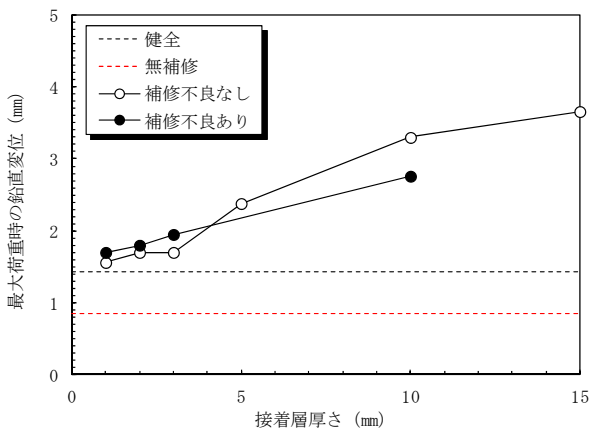


図-16 接着層厚さと最大荷重時の鉛直変位の関係

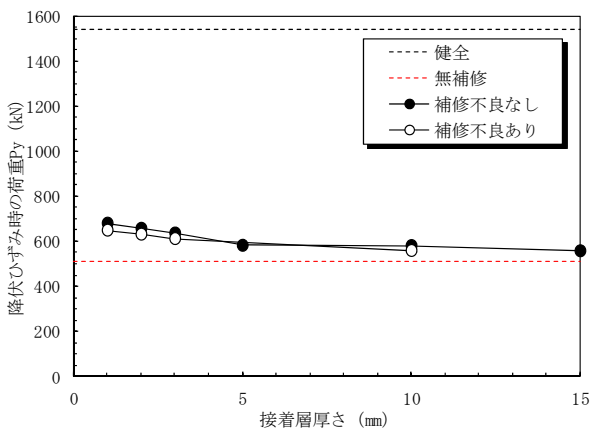


図-17 接着層厚さと垂直補剛材の降伏ひずみ時の鉛直荷重の関係

では、断面欠損部におけるひずみは、健全レベルまで、回復できないことがわかる。ただし、断面欠損部のひずみが降伏に達しても座屈することなくひずみが増大するが、これは、断面欠損した垂直補剛材が、CFRP板によって座屈変形が抑制される効果によるものと考えられた。なお、同じ厚さの接着層における補修不良の有無の比較では、補修不良なしの場合の方が性能が低下する傾向が見られたが、その差異は僅かであり、接着不良による影響よりも接着層の厚さの影響が大きいといえた。

6. まとめ

本研究では、鋼鈹桁橋の桁端腐食部を対象に、立体CFRP板を低弾性高粘度の接着剤を用いて接着することで、桁端柱部材の耐荷力の回復について、実験的、解析的検討を行った。その結果、以下のことがいえた。

- (1) 最大欠損率75%の断面欠損に対して、CFRP板を接着接合した、補修モデルにおいて、健全モデルと同等の耐力が得られたことから、性能回復の効果が十分にあることが確かめられた。
- (2) CFRP板が接着された断面欠損部は、健全モデルの半分程度の荷重で降伏するが、降伏後も座屈することなく、最大荷重まで線形的にひずみが増大し、耐力が回復することがわかった。これは、断面欠損した鋼部材がCFRP板によって座屈変形が抑制される効果によるものと考えられた。
- (3) 接着不良（ボイド）が桁端柱部材の耐力の回復に及ぼす影響は比較的小さく、接着施工の管理水準内（厚さ10mm以下、不良率50%以下）であれば、接着不良の影響は無視できることが確かめられた。

以上のことから、鋼鈹桁橋の桁端腐食部のように、狭隘な環境下で、立体的な形状に対しても、予め成形されたCFRP板を接着接合することで、短工期で効果的な補修が可能であるといえた。今後、補修工法の合理化と設計法の確立に向けて、検討を継続する予定である。

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：腐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，pp.94-104，2014.3
- 3) 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.
- 4) 複合構造委員会編：FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術，複合構造レポート 09，土木学会，2013.

- 5) T. J. Stratford and J. F. Chen: Designing for tapers and defects in FRP-strengthened metallic structures, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), International Institute for FRP in Construction, pp.445-450, 2005.
- 6) (株)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
- 7) 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

REHABILITATION OF COLUMN MEMBER OF STEEL GIRDER END WITH CROSS SECTIONAL LOSS USING CFRP STRIPS AND LOW ELASTIC ADHESIVE

Takaya IMAI, Hitoshi NAKAMURA, Shuichi HIRANO, Takashi KAMIJO, Takashi MASUI, Tetsuo MASAKADO, Hiroyuki SUZUKI and Kenta NAKAGAWA

This paper deals with a repair method for the steel girder end with section loss by externally bonded CFRP strips. In case of applying structural adhesive with low elasticity and high viscosity, there are some problems of defects (internal void) and thickness in adhesive. In this study, the modeling of defects and interfacial stress in adhesive were analyzed using spring model, and the influence of defects and thickness in adhesive on the rehabilitation of steel girder end with section loss was investigated experimentally and analytically. The result shows that the influence of defects and thickness in adhesive on the recovery of compressive strength of steel girder end is relatively small.