高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着 による鋼桁補修設計法の提案

若林 大¹・宮下 剛²・奥山 雄介³・秀熊 佑哉⁴・
小林 朗⁵・小出 宜央⁶・堀本 歴⁷・長井 正嗣⁸

¹正会員 (株)高速道路総合技術研究所 橋梁研究室 (〒194-0035 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail: d.wakabayashi.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

³正会員 長野工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒381-8550 長野市徳間716)
E-mail: y_okuyama@nagano-nct.ac.jp

⁴正会員 新日鉄住金マテリアルズ(株) コンポジット社 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)
E-mail: y-hidekuma@nck.nsmat.co.jp

⁵正会員 新日鉄住金マテリアルズ(株) コンポジット社 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)
E-mail: a-kobayashi@nck.nsmat.co.jp

⁶正会員 川崎重工業(株) マーケティング本部 (〒105-8315 港区海岸1-14-5)
E-mail: koide_n@khi.co.jp

⁷正会員 倉敷紡績(株) 技術研究所 (〒572-0823 大阪府寝屋川市下木田町14-5)
E-mail: Wataru_Horimoto@kurabo.co.jp

⁸正会員 長岡技術科学大学 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: nagaimasatsugu@gmail.com

鋼構造物の腐食は、局所的な漏水などの影響により部分的に生じることが多い。特に伸縮装置からの漏水に起因する鋼桁端部の腐食が顕著であることが知られているが、他にも排水装置や床版ひび割れからの漏水、凍結防止剤の飛散などの影響により鋼構造物の各部で腐食が生じている。従来、CFRPを用いた鋼構造物の腐食補修工法は、高応力下や座屈変形時の剥離が懸念されていたため、その適用条件が限定的であり、様々な腐食形態に対して対応が困難となるケースが多かった。そこで著者らは、CFRPの剥離抑制対策として低弾性かつ高伸度のパテ材を接着層に塗布する仕様を用い、各種鋼部材の特性に応じた補修量算定法や構造細目を提案した。本稿では、これらの新たな補修設計法を示すとともに、実験・解析を通じてその妥当性を検証した結果について報告する。

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), steel girder bridge, corrosion, buckling, repair design method

1. はじめに

近年、道路構造物の維持管理の重要性が広く認識されてきた一方で、これに要する費用面の制約から、より一層効率的な取組みや技術開発が期待されている。鋼構造物の維持管理の分野では、平成2年のスパイクタイヤの廃止に伴う大量の凍結防止剤散布の影響で、腐食事例が全国各地で増加しており、疲労損傷とならんで腐食が鋼構造物の変状要因の多くを占めている。

鋼構造物の腐食は、凍結防止剤の飛散や局所的な漏水の影響により部分的に生じることが多い。特に伸縮装置からの漏水に起因する局所的な腐食が顕著であり、近年では鋼桁端部付近のみを対象とした塗替え塗装の事例が増加している。他にも排水装置や床版ひび割れからの局所的な漏水の影響を受ける部位、凍結防止剤の飛散を集中的に受ける部位など、鋼構造物の各部で腐食が生じている。これらの腐食は、鋼部材の断面欠損に至るまで進行している事例も多く確認されており、この場合には断

図-1 鋼板を用いた腐食部の補修事例

面性能回復のための補修が必要となる。

断面性能の回復を図る方法は、鋼材を用いた部材交換や断面欠損部への当て板(図-1)が一般的とされているが、腐食事例数と比較して対策事例数は少なく、特に断面欠損量が軽微な段階での対策事例は極めて少ない。この主な要因は、鋼材を用いた対策の場合、補修範囲が局部的であっても一定の架設機材が必要となるのに加え、品質管理のための専門技術者や施工に橋梁特殊工が必要となり、補修費が著しく割高になるためと考えられる。

このような現状から、鋼構造物の腐食対策として、大掛かりな設備や特殊技能を必要とせず、小規模な対策でも補修費が割高とならない簡易な工法の開発が強く望まれている。これに対応するため、著者らは、鋼桁端部を含めた鋼構造物の腐食対策として、軽量な炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRPと記す)を用いた補修・補強工法(以下、CFRP接着工法と記す)の開発を進めてきた^{1)~4)}。

本稿では、主に鋼桁の腐食補修を対象として、各種部材にCFRP接着工法を適用するために提案した新たな設計法を示すとともに、実験や解析によりその妥当性を検証した結果について述べる。

2. 本研究の着眼点と概要

(1) CFRP接着工法の現状と課題

周知のとおり、コンクリート構造物の補修・補強分野におけるCFRP接着工法の適用は、耐震補強をはじめとして既に一般的な工法として確立されているが、鋼構造物への適用事例は少ない。その要因は、高応力下や座屈による大変形時において、接着層の付着切れなどによりCFRPが剥離する場合があります。鋼構造物の補修に適用できる条件が限定的なためと考えられる。

実際に鋼構造物へのCFRP接着工法の適用を検討した

図-2 終局時の座屈状況

事例は多数報告されている^{5)~10)}が、それらの研究では、主にトラス弦材などの軸力部材や鋼桁フランジなどの曲げによる垂直応力を受ける部材に対する応力改善が対象とされており、座屈による大変形時にもCFRPを追従させ、終局強度を改善することは意図されていない。一方、腐食事例の多い鋼桁端部では、終局時に腹板のせん断座屈(図-2(a))や、支点上補剛材及び周辺の腹板において断面欠損に伴う局部座屈の先行(図-2(b))が懸念されるため、座屈変形時におけるCFRPの剥離抑制が必要となる。さらに引張部材においても、終局時には鋼材応力が降伏点付近に達する場合もあるため、高応力下での剥離抑制が同様に必要となる。

(2) これまでの研究成果

CFRP接着工法を鋼構造物の一般的な補修・補強技術として確立するためには、CFRPの剥離抑制対策が必須であると考え、著者らの研究グループでは、実構造物への適用性に関する検討に先立ち、基礎研究として文献1)において各種繊維シートや接着層の構成をパラメータとした繊維シート接着鋼板の一軸圧縮試験を多数実施し、座屈時の剥離特性や座屈強度の改善効果を検討した。その結果、鋼板に接着する繊維シートの曲げ剛性に比例して座屈強度の改善を図れることが実証され、比較した中で弾性係数が最大であった高弾性型炭素繊維シートの補

強効率が最もよいことが示された。さらに引張剛性が高い繊維シートを鋼板に接着した場合、低弾性で伸び性能の高いポリウレタ樹脂製のパテ材(以下、高伸度弾性パテ材と記す)を接着層に挿入することが、CFRPの剥離抑制に有効であることを見出した。この結果より、以降の検討では高弾性型炭素繊維シートを用い、図-3に示すように接着層に高伸度弾性パテ材を挿入した仕様(以下、本工法と記す)を対象として検討を進めている。

次に文献2)~4)において、実橋の約1/2スケールの縮小桁を複数製作し、腹板下端の腐食を模擬した試験体によるせん断座屈試験を実施することにより、CFRPを用いた腹板の補修・補強方法を検討した。ここでは、鋼桁腹板へのCFRPの貼付け方法として、腐食領域近傍に部分的にCFRPを貼付けて強度回復を図る「部分貼り工法」(図-4(a))と腹板全面にCFRPを貼り付けてせん断強度を増加させる「全面貼り工法」(図-4(b))を提案し、それぞれの補修・補強効果を実験で実証している。さらに、前者についてはCFRP補修量の算定法を、後者についてはCFRP接着後のせん断強度評価法を示している。

図-3 本工法の接着層に塗布する高伸度弾性パテ材

図-4 腹板の補修補強方法

(3) 本研究の流れ

ここまでの研究成果を受け、本稿では、剥離抑制効果を有する本工法の特性を活用し、各種鋼部材に対する実用的な補修・補強設計法を提案することを目指す。具体的には、以下の手順で議論を進める。

- 1) 本工法の適用対象とする各種鋼部材を、応力状態や構造詳細などを考慮して分類するとともに、適用条件を明確にする。(3章)
- 2) 本工法で標準とする接着断面の構成手順、使用材料及び共通となる設計の考え方を示す。(4章)
- 3) 軸方向力又は曲げによる垂直応力を受け、かつ十分な定着長を確保できる部材を対象として、高伸度弾性パテ材を用いた本工法の設計法を、一軸引張試験及び数値解析の結果より導く。さらに、繰返し引張載荷試験により本工法の疲労耐久性を検証した結果について示す。(5章)
- 4) 上記設計法が適用できない特殊部に対する適用方法の1つとして、支点反力を受ける部材を対象とした補修設計法を提案するとともに、その妥当性を検証した結果について示す。(6章)
- 5) せん断力を受ける鋼桁腹板を対象とした補修・補強設計法を示し、実物大スケールの試験体を用いたせん断座屈試験により実用性を検証した結果について示す。(7章)

3. 適用対象部材と設計法の分類

(1) 適用部材の分類

一般に鋼橋を構成する各部材は、軸方向力を受ける部材、曲げによる垂直応力を受ける部材及びせん断力を受ける部材に大別される。本工法では、これらの部材全てを適用対象と考え、部材の応力度改善に加え、終局時に座屈変形が生じる部材や降伏点付近の高応力が生じる部材の終局強度改善を目的としている。一方、部材ごとに主応力の方向や構造詳細などが異なるため、これらに対して一律に実用的な設計法や構造細目を与えるのは難し

表-1 本工法の適用対象部材の分類

部材	応力状態	対象部位の例(橋梁)
軸方向力及び曲げによる垂直応力を受ける部材	引張 圧縮	鋼桁のフランジ(主桁・横桁・縦桁等)、対傾構、横構、トラス弦材、アーチリブ
支点反力 ^{※1} を受ける部材	圧縮	鋼桁の支点上補剛材 ^{※2} 及び腹板
せん断力を受ける部材	せん断	鋼桁の端部腹板 ^{※3}

※1 軸方向力を受ける部材であるが、本稿では別の設計法を示している

※2 他の水平・垂直補剛材にも準用可

※3 他の腹板にも準用可

い。このため、本工法の適用対象とする部材を表-1に示すとおりに区分して、それぞれの部材に適した設計法について検討した。

鋼桁橋における本工法の適用部材の区分例を図-5に示す。ここに示すように、設計法の区分にあたっては、特に鋼桁端部付近の腐食補修に対処することを念頭に置きつつ、極力汎用性のある設計法となるように配慮している。なお、表-1の区分は、鋼桁を中心として記述しているが、同様の構造特性を持つ鋼構造物の各種部材に対しても準用可能と考えられる。

(2) 適用可否の判定

高応力下や座屈変形時においてCFRPの剥離を抑制できる本工法では、ボルトの腐食対策や定着長が確保できないような複雑な形状の部位への対策を除き、あらゆる鋼部材に適用可能と考えられる。本稿では、表-1に示した部材を対象にそれらの設計法を述べるが、2方向の軸方向力を受ける部材や、鋼桁の中間支点部における腹板のような比較的大きな曲げによる垂直応力とせん断力を同時に受ける部材など、主応力の方向を個別に検討する必要がある部材については、接着する炭素繊維シートの繊維方向やその組合せ方法などについて別途十分な検討

図-5 鋼I桁橋における本工法の適用部材の例

図-6 本工法が適用可能な腐食事例

図-7 ボルトの腐食(本工法の適用不可)

図-8 疲労き裂の例(本工法の検討対象外)

が必要となる。また、複雑な継手形状の部位に生じることが多い疲労き裂対策は、本稿の検討対象外としている。本工法の一般的な適用判定の例を以下に示す。

a) 本工法が適用可能で有利なケース

- 1) 腐食状況として、比較的軽微な断面欠損が点在している場合(塗替え塗装時の前処理に特に適する)
- 2) 腐食箇所が桁端部や排水管漏水箇所などの局所的な場合(図-6)

b) 本工法が適用不可又は不利なケース

- 1) 設計上必要な炭素繊維シートの積層数が次章に示す適用範囲を超えるような重大な断面欠損が生じている場合
- 2) ボルト部が腐食している場合(図-7)や、腐食部が複雑な形状で炭素繊維シートの定着長が確保できない場合
- 3) 疲労き裂が生じている部位(図-8)

4. 設計・施工及び材料に関する一般事項

(1) 接着断面の標準構成と施工手順

本工法で標準とする各層の構成を図-9に、施工手順を以下に示す。

- 1) 対象とする鋼部材表面の塗料や錆をブラストやディスクサンダーなどにより除去し、有機溶剤を用いて表面を清掃する。
- 2) 表面の清掃後、速やかにプライマーを塗布する。
- 3) 腐食による断面欠損箇所や孔食部などの不陸は、不陸修正材により平坦に仕上げる。
- 4) 高伸度弾性パテ材用プライマーを塗布する。
- 5) 高伸度弾性パテ材を塗布する。
- 6) 炭素繊維シートを含浸・接着樹脂により必要層数貼付ける。

図-9 本工法の接着断面の標準構成

- 7) 引き続き炭素繊維シートの保護層としてアラミド繊維シートを貼付ける。
- 8) 最後に仕上げ塗装を行う。

(2) 使用材料

本工法に使用する材料のうち、次章以降に示す各種設計法の前提条件として特に重要となる炭素繊維シート及び高伸度弾性パテ材の規格を以下に示す。

a) 炭素繊維シート

炭素繊維シートの品質規格は表-2による。本工法では、前述の基礎研究の結果¹⁾に基づき、弾性係数の規格値は、現在流通している高弾性型炭素繊維シートのうち最大である640GPa以上としている。炭素繊維シート1層あたりの設計厚さ及び断面積は、炭素繊維シートの繊維重量、炭素繊維の密度を用いて次式で示される。

$$t_{cf} = w / \rho \quad (1a)$$

$$t_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_s} \cdot t_{cf} \quad (1b)$$

$$A_{cf,s} = B_{cf} \cdot t_{cf,s} \quad (1c)$$

ここに、 t_{cf} は炭素繊維シート1層あたりの設計厚さ(mm)、 $t_{cf,s}$ は炭素繊維シートの鋼換算厚さ(mm)、 w は炭素繊維シートの繊維目付量(g/m²)、 ρ は炭素繊維の密度(kg/m³)、 E_s は鋼材の弾性係数(GPa)、 E_{cf} は炭素繊維シートの弾性係数(GPa)、 $A_{cf,s}$ は炭素繊維シートの鋼換算断面積(mm²)、 B_{cf} は炭素繊維シートの幅(mm)である。

高弾性型炭素繊維を用いた炭素繊維シート(弾性係数 $E_{cf}=640\text{GPa}$ 、繊維目付量 $w=300\text{g/m}^2$ 、密度 $\rho=2.1\times 10^3\text{kg/m}^3$)の1層あたりの設計厚さは $t_{cf}=0.143\text{mm}$ 、鋼換算厚さは $t_{cf,s}=0.457\text{mm}$ となる。

b) 高伸度弾性パテ材

高伸度弾性パテ材は、主材に芳香族アミンを用い、硬

表-2 炭素繊維シートの品質規格

項目	規格値	試験法
引張弾性係数	640GPa以上	JIS A 1191
引張強度	1,900MPa以上	JIS A 1191
繊維目付量	300g/m ² 以上	JIS K 7071
炭素繊維の密度	2.1×10 ³ kg/m ³	JIS R 7603

表-3 高伸度弾性パテ材の品質規格

項目	規格値	試験法
引張強度	8MPa以上	JIS K 7161
引張弾性係数	55N/mm ² 以上,75N/mm ² 未満	JIS K 7161
伸び	300%以上,500%未満	JIS K 7161
ガラス転移点温度	-15℃以下	JIS K 7121

化材にイソシアネートプレポリマーを使用する2液性(2液混合型)のポリウレタ樹脂とし、CFRPが鋼板から剥離することなく所要の補修・補強効果を発揮するために、鋼板とCFRPを接合するもので、品質規格は表-3による。

ここで、設定した規格値に対し、高伸度弾性パテ材の引張弾性係数が大きいと、鋼板が局部座屈を生じて面外変形しようとする時にCFRPが変形に十分追従することができない。一方、引張弾性係数が小さいと、CFRPを鋼板の変形に追従させることができるがCFRPの接着効果が十分に得られない。また、引張最大荷重時伸びが小さいと、局部座屈により鋼板が大きく変形した際に高伸度弾性パテ材が破断しCFRPが剥離するようになり、一方、引張最大荷重時伸びが大きいと、その引張弾性係数との共存が困難である。以上を考慮して材料規格値を設定している。

(3) 補修・補強設計における共通事項

次章以降に示す部材ごとの設計法に共通する一般事項を以下に示す。

- 1) 炭素繊維シートの繊維の方向は、鋼材表面に発生する主応力の方向を基本とする。
- 2) 高伸度弾性パテ材の設計厚さは0.8mmとし、施工時の管理値は0～+10%とする。
- 3) 炭素繊維シートの適用最大積層数は片面1方向あたり20層とする。
- 4) 補修・補強対策の設計に用いる荷重は、既設鋼断面に対してCFRP接着前死荷重、鋼とCFRPとの合成断面に対して活荷重及びCFRP接着後に作用する死荷重を考慮する。
- 5) CFRP接着量は、腐食による鋼部材の欠損断面相当量以上でかつ、4)の荷重条件で算定した鋼材応力度が許容応力度以下となるように決定する。

5. 軸方向力及び曲げによる垂直応力を受ける部材の設計法に関する検討

(1) 従来の設計法と高伸度弾性パテ材使用時の課題

CFRP接着工法では、一般に炭素繊維シートの鋼換算断面積 $A_{cf,s}$ が補修又は補強に必要な鋼材の断面積と同等以上になるように、下式により炭素繊維シートの積層数を決定することとされている¹⁾。

$$A_{sl} \leq A_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times B_{cf} \times n \quad (2)$$

ここに、 A_{sl} は鋼材の補修・補強必要断面積 (mm^2)、 n は炭素繊維シートの積層数である。

しかし、高伸度弾性パテ材を鋼材と炭素繊維シートの間に挿入することにより、鋼板からの炭素繊維シートの剥離を防止できる一方で、鋼板から炭素繊維シートへの応力伝達に遅れが生じ、結果として、高伸度弾性パテ材を挿入しない場合と比較して、鋼板に生じるひずみが大きくなる。このことを模式的に示したのが図-10である。従来は、CFRPの最大積層数や、CFRP定着位置における鋼材応力度を制限することにより、設計上の剥離防止対策を行っていたが¹⁰⁾、CFRPの剥離を意識した設計法は、接着剤の剥離強度のばらつきが非常に大きいため、適用範囲を安全側に限定せざるを得なく、また終局強度の回復や増加には対応できないといった課題があった。

(2) 新たな設計法の提案

高伸度弾性パテ材挿入に伴う応力伝達の遅れに対応するため、式(2)を応用した以下の設計式を提案する。

$$A_{sl} \leq c_n A_{cf,s} = c_n \times \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times B_{cf} \times n \quad (3)$$

ここで、 c_n は高伸度弾性パテ材の影響による補正係数(以下、応力低減係数という)であり、次のように考える。

あるひずみ ε が生じた場合を考えると、各断面が受け持つ荷重は次のように定義できる(図-11参照)。

図-10 CFRP 接着鋼板の応力-ひずみ関係(概念図)

1) 鋼板単体

$$P_s = E_s \times A_s \times \varepsilon \quad (4a)$$

2) 高伸度弾性パテ材を用いない場合(完全合成断面)

$$P = E_s \times (A_s + A_{cf,s}) \times \varepsilon \quad (4b)$$

3) 高伸度弾性パテ材を用い、応力伝達の遅れの影響を考慮する場合(本工法)

$$P = E_s \times (A_s + A_{cfp,s}) \times \varepsilon \quad (4c)$$

ここで、 $A_{cfp,s}$ は高伸度弾性パテ材の影響を含む炭素繊維シートの鋼換算断面積である。

次に、高伸度弾性パテ材の挿入による炭素繊維シートが寄与する剛性の変化率として、応力低減係数 c_n を以下のとおり定義する。

$$c_n \equiv \frac{E_s A_{cfp,s}}{E_s A_{cf,s}} \quad (5)$$

このとき、

$$A_{cfp,s} = c_n A_{cf,s} \quad (6)$$

となるので、高伸度弾性パテ材を挿入した合成断面の鋼換算断面積は、完全合成断面の鋼換算断面積に応力低減係数 c_n を乗じたものとなる。すなわち、高伸度弾性パテ材の挿入によって炭素繊維シートへの荷重伝達が抑制され、みかけ上の炭素繊維シートの鋼換算断面積が減少することに相当する。

次に、図-12に示すような一軸引張を受ける CFRP 接着鋼板モデルに対し、次節に述べる一軸引張試験及び数値解析の結果から、着目点での CFRP 接着による鋼板応力の低減率や応力低減係数 c_n を算定する方法を示す。

図-11 荷重-ひずみ関係(高伸度弾性パテ材の影響)

図-12 一軸引張を受けるCFRP接着鋼板の検討モデル

式(4c)に式(6)を代入して c_n について解くと,

$$c_n = \frac{P/\varepsilon - E_s A_s}{E_s A_{cf,s}} \quad (7)$$

となる. ここで, P/ε は一軸引張試験において, 着目点(鋼板コバ面)に貼付けたひずみゲージの $P-\varepsilon$ 関係曲線から求まる剛性(直線の傾き)に相当する. よって, 式(7)より実験値から c_n を算定できる.

次に, 文献 12) に示される数値解析手法を用いて, 一軸引張を受ける CFRP 接着鋼板の応力解析を行い, 応力低減係数 c_n を計算するために以下を定義する. なお, 応力解析では, 炭素繊維シートの第 1 層目を高伸度弾性パテ材の物性に置き換えることで, 本工法の特性を再現している¹³⁾.

$$\xi_0 \equiv \frac{E_s A_s}{E_s (A_s + A_{cf,s})} \quad (8)$$

ξ_0 は, 鋼板と CFRP 接着鋼板(完全合成断面とした場合)の剛性比を与える. 次に, 数値解析結果より以下を算出する.

$$\xi \equiv \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{sn}} \quad (9)$$

ここで, σ_{s0} は CFRP 接着鋼板の着目点の鋼材応力を, σ_{sn} は試験片に作用する荷重 P を鋼板の断面積 A_s で除した値(P/A_s)(以下, 外部応力と記す)を表す. つまり, ξ は CFRP 接着による鋼板の応力低減率を表す. ξ は CFRP の定着長が十分に長くなると, ξ_0 に収束する¹²⁾. いま, CFRP 接着鋼板の着目点のひずみを ε_{s0} とすると, 式(9)は次のようになる.

$$\xi = \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{sn}} = \frac{E_s \varepsilon_{s0}}{\sigma_{sn}} \quad (10a)$$

$$\therefore \sigma_{sn} = \frac{E_s}{\xi} \varepsilon_{s0} \quad \text{or} \quad P = \frac{E_s A_s}{\xi} \varepsilon_{s0} \quad (10b)$$

式(10b)により, 実験結果と数値計算結果の $P-\varepsilon$ 関係曲線を比較することが可能となる. また, 式(7)より, 数値解析で算出される応力低減係数 c_n は次のようになる.

$$c_n = \frac{P/\varepsilon - E_s A_s}{E_s A_{cf,s}} = \frac{E_s A_s / \xi - E_s A_s}{E_s (A_s + A_{cf,s}) - E_s A_s} \quad (11a)$$

$$= \frac{E_s A_s (1/\xi - 1)}{E_s (A_s + A_{cf,s}) - E_s A_s} \quad (11b)$$

次節以降では, 実験結果から式(7)を用いて求まる c_n の値と解析結果から式(11b)を用いて求まる c_n の値とを比較分析したうえで, c_n の設計用値を提案する.

(3) CFRP接着鋼板の一軸引張試験

a) 試験目的と概要

高伸度弾性パテ材を接着層に挿入したことによる炭素

繊維シートへの荷重伝達状況を確認するために, 平鋼板(60×9×750 or 1,000 or 1,500 mm)に炭素繊維シートを接着した試験片を用いて一軸引張試験を実施した.

試験片形状は図-12に示したモデルであり, ここでは, 炭素繊維シートの積層数, 着目点から炭素繊維シート最外層の端部までの距離(以下, 定着長と記す)及び炭素繊維シート接着端部における各層間の端部間の距離(以下, ずらし量と記す)をパラメータとして試験を実施し, 炭素繊維シートへの荷重伝達率の変化の状況を分析するとともに, 実験結果と数値解析結果との比較を行う.

b) 試験ケース

試験ケースは表-4に示すとおりとした. 表-4における試験片記号については, 「T (A)-(B)-(C)」と標記し, A: 積層数, B: 定着長, C: ずらし量とした. 例を挙げると, 「T5-100-25」は片面あたりの積層数が5層, 定着長100mm, ずらし量25mmとなる.

c) 試験片の作製方法と材料物性

試験片の作製手順を以下に説明する. まず, 鋼板の炭素繊維シート接着面をケレンする. 次いで, アセトンで脱脂後, ケレン部に高伸度弾性パテ材用プライマーを塗布する. プライマーが乾燥した後, 高伸度弾性パテ材を塗布し, 養生後に炭素繊維シートを含浸・接着樹脂を用いて所定の積層数貼付ける.

図-13に試験片の炭素繊維シート貼付け後の断面構成を示す. また, 本試験で用いた鋼板, 炭素繊維シート, 樹脂材料の物性値を表-5に示す.

表-4 一軸引張試験ケース

試験片 記号	炭素繊維シート			鋼板長	試験 片数
	積層数	定着長	ずらし量		
T1-100	1	100mm	-	750mm	2
T1-200		200mm	-		2
T5-100-0	5	100mm	0mm	1,000mm	3
T5-100-10			10mm		3
T5-100-25			25mm		3
T5-200-10		200mm	10mm		2
T5-200-25			25mm		3
T10-100-0	10	100mm	0mm	1,500mm	1
T10-100-10			10mm		1
T10-100-25			25mm		1
T10-200-10		200mm	10mm		5
T10-200-25			25mm		5
T15-100-0	15	100mm	0mm	1,500mm	1
T15-100-10			10mm		1
T15-100-25			25mm		1
T15-200-10		200mm	10mm		1
T15-200-25			25mm		3
T20-200-25	20	200mm	25mm		3

図-13 一軸引張試験片の断面構成

表-5 一軸引張試験に用いた各種材料物性値

(a) 鋼材(SS400)			(b) 炭素繊維シート		
降伏応力	MPa	317	弾性係数	GPa	701
弾性係数	GPa	200	目付量	g/m ²	300
ポアソン比	-	0.3	厚さ	mm	0.143

(c) 含浸・接着樹脂			(d) 高伸度弾性バテ材		
弾性係数	MPa	2,533	弾性係数	MPa	68
塗布量	kg/m ²	0.60	塗布量	kg/m ²	1.00
質量密度	kg/m ³	1.16×10 ³	質量密度	kg/m ³	1.25×10 ³
厚さ	mm	0.517	厚さ	mm	0.800

※ 高伸度弾性バテ材用プライマーの塗布量0.15kg/m²

図-14 試験片の様子

図-15 試験状況

図-16 ひずみゲージ貼付け位置の例(5層)

d) 試験方法とひずみ測定位置

試験は、リレー式万能試験機(載荷容量1,000kN)を用いて実施した。試験では、鋼板コバ面及び炭素繊維シート上にひずみゲージを貼り付けひずみを測定した。試験時には、試験片が一樣に引っ張られていることを確認するため、無補強部鋼材に貼り付けたひずみゲージの値を確認しながら試験片をセットし、降伏荷重近傍まで載荷を行った。製作した試験片の様子を図-14に、試験実施状況を図-15に、ひずみゲージの貼り付け位置の例を図-16に示す。

e) 試験結果

試験結果として、試験片中央部における鋼板コバ面及び炭素繊維シート上のひずみ ε と外部応力 σ_m との関係について、代表的なケースを図-17に示す。ここでは、式(10b)より算出した鋼板コバ面における剛性の数値解析値もあわせて示している。

一軸引張試験の結果より確認された事項とその考察を以下に示す。

- 1) 定着長及びずらし量が増加するほど、炭素繊維シートへの荷重伝達率が向上する。なお、積層数の影響については、このデータのみで評価しにくいので、次節で詳細に分析する。

図-17 一軸引張試験結果 応力-ひずみ関係 (代表例)

- 2) 数値解析値と実験値との整合は良好であるが、鋼板応力が 150MPa~200MPa 付近から、数値解析値と比較して実験値における鋼板の剛性が低下し始める。これは、高伸度弾性バテ材が部分的に軟化した影響と考えられる。ただし、全 41 試験片において鋼材の降伏点まで CFRP の剥離は生じていないことから、高応力下における剥離防止機能は十分である。

(4) 応力低減係数 c_n の分析と設計用値の提案

a) 各種パラメータと応力低減係数 c_n の関係

ここでは、前々節で定義した応力低減係数 c_n の変化の状況について分析する。なお、各ひずみ計測点における鋼板や CFRP 上のひずみ分布についても、著者らは詳細な分析を実施したが¹³⁾、本稿では着目点における応力低減係数 c_n の分析結果について述べることにする。

表-6 試験結果と数値解析結果の比較

積層数 (片側)	定着長 mm	ずらし 量 mm	応力比 σ/σ_{sy}		剛性比 $\frac{E_c}{E_s}$	応力低減係数 c_n	
			実験値 ※1※2	解析値 ※3		実験値 ※1※2	解析値 ※3
1	100	-	0.914	0.933	0.900	0.845	0.648
	200	-	0.905	0.906		0.946	0.937
5	100	0	0.858	0.886	0.642	0.298	0.231
		10	0.807	0.825		0.429	0.382
		25	0.766	0.760		0.549	0.566
	200	10	0.729	0.719		0.672	0.702
		25	0.693	0.690		0.803	0.807
10	100	0	0.848	0.878	0.473	0.161	0.125
		10	0.722	0.717		0.345	0.355
		25	0.612	0.591		0.570	0.621
	200	10	0.601	0.593		0.598	0.617
		25	0.554	0.529		0.732	0.799
15	100	0	0.858	0.876	0.374	0.099	0.085
		10	0.628	0.621		0.354	0.365
		25	0.480	0.470		0.649	0.675
	200	10	0.524	0.503		0.544	0.592
		25	0.427	0.422		0.803	0.816
20	200	25	0.366	0.350	0.310	0.777	0.835

※1 実験値は、外部応力 150MPa 付近の値

※2 実験値は、同ケースでのばらつきが小さいため平均値のみ表示

※3 物性値は表-5の値を使用

(a) 定着長 100mm・ずらし量 10mm

(b) 定着長 200mm・ずらし量 10mm

(c) 定着長 200mm・ずらし量 25mm

図-18 積層数 n と応力低減係数 c_n の関係

まず一軸引張試験の結果より、CFRP 接着効果による着目点での鋼板の応力低減率 σ/σ_{sy} を算定する。次いで数値解析結果から式(9)を用いて応力比 σ/σ_{sy} を算定する。さらに、試験結果及び数値解析結果それぞれから求められる応力低減係数 c_n を式(7)及び式(11b)を用いて算定する。これらの結果をまとめたものを表-6 に示す。

ここで、試験結果より計算される応力低減係数 c_n の値は、厳密には外部応力のレベルによって異なるが、ここでは実橋での活荷重応力の最大レベルと考えられる 150MPa 付近の値 (SM570 材の許容応力度 255MPa に対して活荷重比率約 6 割を想定) で代表させている。

次に、炭素繊維シートの積層数 n と応力低減係数 c_n の関係を整理した結果を、定着長及びずらし量のパラメータごとに図-18 に示す。

以上の分析結果より、応力低減係数 c_n の特性について以下の事項が確認できる。

- 1) 一軸引張試験の結果と数値計算結果より算定した応力低減係数 c_n の値はよく一致する。
- 2) 定着長の影響は極めて大きく、定着長を 200mm 確保することで応力低減係数 c_n が大きく向上する。
- 3) ずらし量の影響も比較的大きく、特に積層数 n が大きい場合には、ずらし量 25mm 確保することで応力低減係数 c_n の値は良好となる。
- 4) 積層数 n の影響は、積層数が小さい段階では比較的敏感に反応するが、5~15 層程度のいずれかで極小値を与え、その後積層数 n が増加しても応力低減係数 c_n の値はほとんど変化しない。

以上より、設計に用いる構造細目の標準値は、図-19 に示すように定着長 200mm、ずらし量 25mm とし、これを前提とした応力低減係数 c_n の値を次項で算定する。

図-19 構造細目の標準値

b) 応力低減係数 c_n の設計用値

前項での分析により、数値解析値と実験値との整合が確認できたことから、応力低減係数 c_n は、表-7 に示す条件で、数値解析より算定することとした。ここで、高伸度弾性パテ材の厚さは、設計厚さ 0.8mm に対し、前述した施工誤差の上限値である+10%(0.88mm)と設定した。これは、各種材料物性値や施工厚さを変化させて行ったパラメトリック数値解析の結果、高伸度弾性パテ材が厚くなると応力低減係数 c_n の値が低下することが確認されたためである。また、鋼板厚の影響もわずかながら認められ、鋼板が厚いほど応力低減係数 c_n の値が低下する傾向があったため、安全側の設定として 60mm とした。

数値解析より算定した積層数 n ごとの応力低減係数 c_n の値と設計用に設定した応力低減係数 c_n を表-8 に示す。ここで、設計に用いる応力低減係数 c_n の値は、積層数 6 層以上で大きな変化が見られないことから、煩雑さを避けるために一定値とした。

(5) 段差部での定着方法に関する検討

a) 検討の目的

実橋での腐食は、図-20 に示すように添接板周辺に生じるケースも見られる。このような箇所に対して本工法を適用するためには、ボルト部の凹凸や添接板とフランジの境界面を平滑にするために、不陸修正材を厚めに塗布する必要がある。そこで、不陸修正材を厚くした試験

表-7 応力低減係数 c_n 算出時の数値解析の条件

材料	項目	設定値	摘要
鋼板	ヤング係数	200 GPa	設計値
	厚さ	60 mm	
	幅	60 mm	
炭素繊維シート	ヤング係数	640 GPa	設計値
	厚さ	0.143 mm	設計値
含浸・接着樹脂	ヤング係数	2,533 MPa	実測値
	ポアソン比	0.4	-
	厚さ	0.517 mm	計算値
高伸度弾性パテ材	ヤング係数	68 MPa	実測値
	ポアソン比	0.49	-
	厚さ	0.88 mm	設計値+10%

表-8 応力低減係数 c_n の数値解析結果と設計用値

数値解析結果		設計用値	
積層数 n	応力低減係数 c_n	積層数 n	応力低減係数 c_n
1	0.932	1	0.93
2	0.863	2	0.86
3	0.821	3	0.82
4	0.795	4	0.79
5	0.778	5	0.77
6	0.767	6-20	0.74
7	0.759		
8	0.754		
9	0.750		
10	0.748		
15	0.746		
20	0.751		

片を用いて一軸引張試験を実施した。試験方法は、前々節で述べた一軸引張試験と同様である。

b) 試験ケース

本試験では不陸修正材厚さを 15mm とし、不陸修正材上で CFRP を定着するケースと、不陸修正材の端部にテーパを設けて鋼板に定着するケースについて、3 片ずつ試験を実施している。ここで、不陸修正材の圧縮弾性係数は、2,806MPa であり、いずれの試験片も不陸修正材の塗布範囲には、不陸修正材と CFRP の接着界面のみに高伸度弾性パテ材を塗布している。試験片の形状を図-21 に示す。

c) 試験結果と考察

表-9 に試験結果の一覧を示す。なお、本試験は不陸修正材を厚塗りした場合の剥離の有無に着目した試験であるため、試験結果に対する応力-ひずみ関係等の分析は省略するが、鋼材の応力低減効果は不陸修正材を用いないケースと同等であり、CFRP への荷重伝達効率の低下は認められなかった。

本試験結果より、不陸修正材を厚くしテーパを設けなかったケースでは、鋼材の降伏前に剥離する結果となった。また、剥離が生じたときの荷重は各試験片で大き

図-20 添接板付近の腐食状況

図-21 不陸修正材を厚塗りした試験片

表-9 不陸修正材を厚塗りしたケースの試験結果

試験片記号	端部処理	剥離荷重
15-1	なし	40kN 付近で剥離
15-2		115kN 付近で剥離
15-3		90kN 付近で剥離
15T-1	テーパあり	鋼材の降伏まで剥離なし
15T-2		
15T-3		

※ 降伏荷重171kN(降伏応力317MPa)

くばらっている。このため、このような接着形状は現場で使用できない。

一方、炭素繊維シート接着端部にテーパー(1:10 の傾斜) を設けたケースでは、いずれも鋼材の降伏荷重まではく離することはなかった。したがって、フランジの添接部付近など、不陸修正材が厚くなるような箇所に本工法を適用する場合は、炭素繊維シート接着端部にテーパーを設けて、所定の定着長を確保する必要がある。

(6) 疲労耐久性の検証

a) 検証方法と目的

CFRP 接着鋼板では、特に鋼板と CFRP との接着層の疲労耐久性が懸念される。そこで、本工法の疲労特性を把握するため、CFRP 接着鋼板に繰返し引張荷重を与える疲労試験を実施した。

b) 試験片と試験ケース

疲労試験は、平鋼板 (90×9×800 mm) に炭素繊維シートを1層又は3層接着した試験片を製作して実施した。試験片寸法とひずみ測定位置を図-22 に示す。また、疲労試験に用いた各種材料諸元は、前述の一軸引張試験と同様で表-5 に示すとおりである。

疲労試験の応力範囲(最大応力-最小応力)は、150 MPa、200 MPa、250 MPa の3 ケース(いずれも応力比 0.05)とし、繰返し回数は400 万回を標準値とした。本試験は高伸度弾性パテ材を挿入したケース(以下、パテありと記す)を中心に実施し、比較用に1 ケース高伸度弾性パテ材を挿入しないケース(以下、パテなしと記す)を実施している。

c) 試験方法

疲労試験は、油圧サーボコントロール式疲労試験機を用いて実施した。試験機の仕様は、最大荷重±300kN、最大振幅±30mm であり、本試験では繰返し载荷の周波数15Hz、制御波形は正弦波とした。

計測は、疲労試験中の CFRP 上のひずみ変化から、剥離を判定することとし、繰返し速度に応じたサンプリング周期(2kHz)で、1 万回に1 回、1 秒間の動ひずみ計測

(a) 1層貼りタイプ (b) 3層貼りタイプ
図-22 CFRP接着鋼板の一軸引張試験における計測点

を行った。ひずみ変化の確認方法は、集録した波形データの最大値から最小値を減算した値(ひずみの振幅値)を監視する方法にて実施した。

d) 試験結果と考察

試験結果一覧を表-10 に示す。応力範囲 250 MPa の条件で行なった試験片はいずれも400 万回到達前にCFRP 接着していない鋼板部が破断し、疲労試験終了となった。また、応力範囲 200 MPa のケースのうち、2-1 のみ750 万回まで試験を継続したが、剥離は生じなかった。一方、パテなし試験片 5-1 においては150 MPa の条件で400 万回の疲労試験を実施した後に200 MPa の条件に変更し、試験体 5-2 として再度疲労試験を行った。全13 片のうち、剥離が検出されたのはパテなしの1 片だけであった。

図-23 にひずみ振幅の経時変化の例を示す。図-23(a)はパテありのケースのうち、1 層貼りの代表例である。こ

表-10 疲労試験結果

試験片名	応力範囲 (N/mm ²)	試験体	繰返し回数	試験体状況 (剥離状況)
1-1	150	両面1層 (パテあり)	400 万回	変状なし
1-2	150		400 万回	変状なし
1-3	150		400 万回	変状なし
2-1	200		750 万回	変状なし
2-2	200		400 万回	変状なし
2-3	200		400 万回	変状なし
3-1	250		206 万回	鋼材が破断
3-2	250	両面3層 (パテあり)	212 万回	鋼材が破断
3-3	250		296 万回	鋼材が破断
4-1	200		400 万回	変状なし
4-2	250		191 万回	鋼材が破断
4-3	200	両面1層 (パテなし)	400 万回	変状なし
5-1	150		400 万回	変状なし
5-2*	200		400 万回	約40 万回で剥離を検出

※ 5-1 と同じ試験体

(a) パテあり1層貼りタイプの代表例(試験片2-1)

(b) パテなし1層貼りタイプ(試験片5-2)

図-23 ひずみ振幅の経時変化

の結果より、シート端部のひずみ振幅が繰返し载荷後早期に約2割低下していることが確認されたが、その他の測定箇所では試験終了まで有意なひずみ振幅の変化は見られなかった。この傾向はパテありの全試験片ではほぼ同様であり、3層貼りのケースでは、1層目のシート端部で同様にひずみ振幅が低下する現象が確認されている。しかし、いずれの試験片も剥離は生じていない。

図-23(b)はパテナしのケースの結果である。この結果より、シート端部から徐々に中心部に向かって剥離が進行していることが確認できる。

以上より、本工法におけるCFRPの剥離に対する疲労強度は、母材であるSS400材の疲労強度より高いことが確認された。よって、設計において剥離に対する疲労の影響は考慮しなくてよいと考えられる。また、比較用に実施したパテナしのケースでは、パテありのケースより接着層の疲労強度が低くなっている。このことから、CFRPと鋼板の間に塗布した高伸度弾性パテ材は、疲労による剥離対策としても有効であることが確認された。

6. 支点反力を受ける部材の設計法に関する検討

(1) 設計法の提案

a) 検討の背景

支点反力を受ける部材は、力学的には軸方向力(圧縮力)を受ける部材である。しかし鋼桁の端支点部では、図-6に示したように支点上の垂直補剛材や近傍の腹板において、その下端部に腐食が生じる事例が多い。このため、5章で提案した設計法を適用する前提となる定着長を確保できない。そこで、支点部下端のような部位を1つの特殊部と考え、別の設計法を検討した。

b) 設計法のコンセプト

支点反力は、支点上垂直補剛材と近傍の腹板(片側あたり板厚の12倍の範囲)からなる十字断面(以下、支点上十字柱と記す)で抵抗する¹⁴⁾。この設計は、図-24に示す計算モデルで照査され、新設橋では全体座屈や局部座屈

が生じないように断面が構成される。しかし、支点上十字柱の一部が腐食して断面欠損が生じると、図-2(b)に示したように局部座屈が先行する終局モードとなり、耐力が急激に低下する。

支点反力を受ける部材に対しては、本工法を適用することでこの強度低下を回復させることに主眼を置く。すなわち、断面欠損に伴う局部的な応力超過の回復を厳密に追い求めるのではなく、CFRP接着により鋼板の曲げ剛性を回復させ、局部座屈の先行を防止することで強度回復を図ることを目的とする。このため、5章で検討した荷重伝達効率の影響評価に用いる応力低減係数 c_n は、支点反力を受ける部材の設計では考慮しない。また、ここで述べる設計法は、水平・垂直補剛材のような曲げ剛性を確保するように設計される部材にも適用できる。

c) CFRPの接着方法

炭素繊維シートの繊維の方向は、鉛直方向とする。これは、座屈強度が板の曲げ剛性に比例することから、荷重の作用方向に対し欠損断面に相当する量の補修を行うことで、強度回復が期待できるためである。

次に、支点上十字柱の下端部にCFRPを接着する方法として、図-25に示す2種類を提案する。図-25(a)は、支点上十字柱と下フランジとの接合部を不陸修正用パテ材を用いてR50mmの形状に成形し、下フランジへCFRPを定着することで、下フランジに力を伝達させることを

図-24 支点反力を受ける部材の計算モデル

図-25 支点上十字柱へのCFRP貼付け方法

図-26 CFRPを下フランジへ定着する場合の課題

図-27 支点上十字柱の圧縮試験体形状

表-11 支点上十字柱の圧縮試験ケース

試験体 番号	断面 欠損量	片面当た りの必要 補修量	補修方法	
			片面当た り積層数	定着の 有無
GC1	[欠損高さ] 100mm(16.6%)	補剛材: 8.8層 腹板: 4.4層	補: - 腹: -	-
GC2	[残存板厚]		補:13層 腹: -	無
GC3	補剛材: 8mm(50.0%)		補: - 腹:13層	-
GC4	腹板: 5mm(55.5%)		補9層 腹4層	有

表-12 支点上十字柱に用いた各種材料物性値

(a) 炭素繊維シート			(b) 不陸修正材		
弾性係数	GPa	701	弾性係数	MPa	1,735
目付量	g/m ²	300	塗布量	欠損量相当	
厚さ	mm	0.143	質量密度	g/m ³	1.55
(c) 含浸・接着樹脂			(d) 高伸度弾性パテ材		
弾性係数	MPa	2,533	弾性係数	MPa	66
塗布量	kg/m ²	0.60	塗布量	kg/m ²	1.00
質量密度	kg/m ³	1.16×10 ³	質量密度	kg/m ³	1.25×10 ³
厚さ	mm	0.517	厚さ	mm	0.800

※ 高伸度弾性パテ材用プライマーの塗布量0.15kg/m²

意図したものである。しかし、この方法を腹板と垂直補剛材それぞれに適用すると、図-26に示すように両者のCFRPが干渉し、腹板と垂直補剛材の交点付近にCFRPを接着できない。そこで、図-25(b)に示すように下フランジへの定着を行わない方法をあわせて提案している。

d) 補修量の算定方法

補修量は、支点上十字柱の合計補修必要断面積を確保するように、下式により算定する。

$$A_{sl,c} \leq A_{cf,s,s} + A_{cf,s,w} \quad (12)$$

ここに、 $A_{sl,c}$ は支点上十字柱の合計補修必要断面積、 $A_{cf,s,s}$ は支点上補剛材に接着する炭素繊維シートの鋼換算断面積、 $A_{cf,s,w}$ は支点上補剛材の中心から腹板厚の12倍の範囲の腹板に接着する炭素繊維シートの鋼換算断面積である。なお、炭素繊維シートの鋼換算断面積の計算法は式(1a)~(1c)に準じる。

ここで、式(12)はCFRPの鋼換算断面積で補修量を算定しているため、曲げ剛性の回復を厳密には評価していない。しかし、本工法ではCFRPを断面欠損部よりも中立軸から遠い位置に接着するため、健全時と等価な断面積を確保することで、曲げ剛性も同等以上となる。このため、設計の簡便さを考慮して鋼換算断面積で補修量を算定することとしている。

また、式(12)では、支点上十字柱の断面の合計で、必要断面を確保することとしている。これは、断面欠損に伴う補修を行う場合、各鋼材面の断面欠損量に応じて補修量を割付けるのが望ましいが、現地条件により厳密な割付けが困難となる場合があることに配慮したものである。

(2) 圧縮試験による設計法の検証

前節で示した設計法の妥当性を検証するために、桁モデル試験体を用いて支点上十字柱の圧縮試験を行った。

a) 試験体と試験ケース

試験体の形状を図-27に示す。試験体に用いた鋼種はSS400で、降伏応力は材料試験結果より腹板で271MPa、フランジと補剛材で276MPaである。本試験では、1体の鋼桁において2か所で圧縮試験を実施する。そのため、両者の試験に影響が出ないようにするため支間長を1,200mmとした。また、全体座屈が生じない範囲で炭素繊維シート積層枚数を多くできるように、桁高を600mmと設定した。

試験体の腹板と支点上補剛材には、下端から高さ100mmの範囲に50%程度の断面欠損を与えた。これは、鋼桁端部で事例の多い腐食形状を模擬したものである。

試験ケースは以下の4ケースとした。

- 1) 無補修のケース
- 2) 補剛材のみにCFRP接着するケース(補修方法A)
- 3) 腹板のみにCFRP接着するケース(補修方法B)
- 4) 補剛材と腹板のそれぞれに各部の断面欠損量相当のCFRPを接着するケース(補修方法C)

ここで、補修方法AはCFRPを下フランジに定着しない接着方法、補修方法BはCFRPを下フランジに定着する接着方法を採用し、補修方法Cについては両者の接着方法を組合せており、必要合計補修量は補修方法A~C全てにおいて式(12)より算定している。これらをまとめて試験ケースを表-11に示す。また、本試験で用いた各種補修材料の物性を表-12に示す。

図-28 CFRP の貼付け形状

図-29 CFRP 接着後の外観

b) CFRP 接着方法と形状

CFRP の接着方法は、一軸引張試験と同様であるが、プライマー塗布後に断面欠損部の不陸修正用パテ材を用いて不陸修正を行っている。また、補修方法 B と C では、腹板と下フランジとの接合部を同様の不陸修正材を用いて R50mm の形状に成形したうえで CFRP を接着している。各ケースの CFRP 貼付け形状を図-28 に、CFRP 接着後の外観を図-29 に示す。

c) 試験方法

試験は、載荷容量 2,000kN のアクチュエータを用いて実施した。試験では、試験体をセットした後、弾性範囲内での予備載荷を 2, 3 回繰り返す、終局荷重まで荷重を漸増させた。試験の様子を図-30 に示す。

d) 試験結果とその評価

試験結果を評価するに先立ち、目標とした強度回復が得られていることを確認するために、シェル要素を用いた弾塑性有限要素解析により、最大荷重の予測値を算定した。解析モデルを図-31 に示す。なお、使用したプログラムは DIANA9.4.4、節点数は 20,215 節点、鋼材の材料モデルは完全弾塑性体であり、載荷板を除き 8 節点 2 次アイソパラメトリック曲面シェル要素、載荷板は 20 節点 2 次アイソパラメトリックソリッド要素としている。境界条件は、載荷点直下の支持点をピン支持とし、もう一方の支持点を固定支持とした。荷重条件は、強制変位を載荷板中央部材軸直角方向に線分布で与えた。初期たわみは、座屈固有値解析から得られる 1 次座屈モード形を採用し、ウェブ面外方向に対する変形の最大値が 0.1mm となるように振幅を調整した。これは、製作した試験体の実測結果に基づく。

解析ケースは、試験体と同様の断面欠損を設けた無補修状態のケースと、補修方法 C における CFRP 接着範囲の鋼板板厚を健全時と同様としたケースの 2 種類とした。つまり、後者が CFRP 接着による補修後の最大荷重の目標値である。

図-30 圧縮試験の様子

図-31 解析モデル

試験結果を解析結果とあわせて図-32 に示す。この結果より以下の事項が確認でき、前節で提案した設計法の妥当性が検証された。

- 1) 各面の断面欠損量に応じて CFRP 補修量を割付ける補修方法 C の強度回復効果が最もよい。
- 2) 腹板又は補剛材に CFRP をまとめて貼付ける補修方法 A, B の強度回復効果は補修方法 C よりやや劣るが、いずれも目標値に対して十分な強度回復効果を得られる。
- 3) 補修方法 A, B の結果より、下フランジへの定着の有無にかかわらず、所用の強度回復効果を得られる。
- 4) CFRP 補修試験体では、いずれも最大荷重到達までに CFRP の剥離は生じず、安定した補修効果が発揮された。

図-32 圧縮試験結果 荷重-変位関係

7. せん断力を受ける部材の設計法に関する検討

(1) CFRP接着方法の分類

これまでに著者らは、CFRP 接着による鋼桁のせん断強度回復または増加を目的とした研究^{2)~4)}を進めてきており、前述のとおり「部分貼り工法」と「全面貼り工法」を提案している。

ここで、「部分貼り工法」は、腹板下端部が腐食してせん断強度の低下が生じた場合の強度回復を主たる目的とするのに対し、「全面貼り工法」は、腹板の断面が厚く断面欠損量が多い場合や、荷重増に伴う補強が必要となる場合などを対象として、腹板全体のせん断強度を向上させることを目的としている。

本稿では、まず「部分貼り工法」と「全面貼り工法」それぞれの設計法を整理して示す。

次いで実物大スケールの桁試験体を用いたせん断座屈試験により、両工法の実橋での適用性を検証した結果について示す。

(2) 部分貼り工法の設計法

a) CFRPの接着方法

部分貼り工法の構造細目を図-33に示す。炭素繊維シートの繊維方向は下フランジに対して $\pm 45^\circ$ の方向に交互に接着する。これは、最大・最小主応力の方向に繊維方向を一致させることにより、効果的な補修が期待できるためである。なお、アスペクト比の違いにより、主応力の方向は変化するが、その影響は軽微なことが確認されているため²⁾、実務での簡便さに配慮して、一律 $\pm 45^\circ$ の方向としている。また、CFRP 接着上端部のずらし量は、繊維軸方向に25mm以上とすることを意図して、 $10\text{mm}(2 \times 10 \times \sqrt{2} \approx 28\text{mm})$ としている。

次に下側のCFRP 接着端は、不陸修正用パテ材を用いてR50mmの形状に成形し、下フランジへCFRPを定着

図-33 部分貼り工法の構造細目

することとしている。これは、斜め張力場の方向に作用する引張応力に対し、CFRPを有効に機能させることを意図したものである。なお、腹板の腐食領域によってはせん断強度がほとんど低下しない場合もあるが⁴⁾、本稿では安全側に配慮して支点上補剛材から支間側に1つ目の垂直補剛材までを標準的なCFRP 接着範囲と考える。

b) 補修量の算定方法

補修量は、最大欠損板厚に相当するCFRPの厚さを確保するように、下式により算定する。

$$t_{sl,w} \leq t_{cf,s,w} \quad (13)$$

ここに、 $t_{sl,w}$ は腹板下端の最大欠損板厚(mm)、 $t_{cf,s,w}$ は腹板に接着する一方向あたりの炭素繊維シートの鋼換算厚さ(mm)である。なお、炭素繊維シートの鋼換算厚さの計算法は式(1a)~(1b)に準じる。

ここでは、他の部材の設計と異なり、必要補修量を最大欠損板厚で評価している。これは、せん断強度に寄与する断面を一律に評価するのが困難なため、安全側に配慮したものである。

(3) 全面貼り工法の設計法

a) 全面貼り工法の特徴と留意事項

全面貼り工法のCFRP 接着範囲は、図-4(b)に示したように腹板パネル全面とし、フランジへのCFRPの定着は行わない。

腹板パネル全面にCFRPを接着すると、腐食領域近傍に部分的にCFRPを貼付ける方法より積層数を減らせ、効率的・経済的に補修できる場合がある。ただし、断面欠損に対する補修を行う場合、補修量を決定するためには部分的な断面欠損に伴うせん断強度の低下率を弾塑性有限要素解析などの手法により算定し、目標とするせん断強度の増加率をあらかじめ把握しておく必要がある。

一方、荷重増に伴うせん断強度の補強を目的とする場合には、CFRPを腹板パネル全面に接着した状態のせん断強度を算定し、目標とするせん断強度以上であること

を照査することにより、補強量が算定できる。

b) 補修・補強量の算定方法

一般に、鋼桁のせん断強度は、以下に示す Basler 式¹⁵⁾で評価され、新設橋の腹板の設計に採用される例も多い。この理由は、式の形式が簡易でその適用が容易であることに加え、数多くの実験に対してせん断強度が精度良く評価されているためである¹⁶⁾。

$$\frac{Q_u^0}{Q_y} = \frac{\tau_{cr}^0}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 - \tau_{cr}^0/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (14)$$

ここで、 Q_u^0 は鋼桁腹板のせん断強度、 Q_y は鋼桁腹板の降伏せん断強度(=断面積 $A_w \times \tau_y$)、 τ_{cr}^0 は鋼単体のせん断弾性座屈応力、 τ_y は鋼材のせん断降伏応力(= $\sigma_y/\sqrt{3}$)、 σ_y は鋼材の降伏応力、 α は腹板のアスペクト比(=幅 b /高さ h)である。

式(14)は、右辺第 1 項が弾性座屈による項で、第 2 項が後座屈応力による項である。また、せん断弾性座屈応力は、以下で算定できる¹⁷⁾。

$$\tau_{cr}^0 = \begin{cases} \tau_e^0 & (\tau_e^0 \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_e^0 \cdot \tau_y} & (\tau_e^0 > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (15a)$$

$$\tau_e^0 = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1 - \nu_s^2)} \left(\frac{t_s}{h} \right)^2 \quad (15b)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (15c)$$

ここで、 E_s は鋼材の弾性係数、 ν_s は鋼材のポアソン比、 t_s は腹板厚である。

次に、CFRP を腹板パネル全面に接着した腹板のせん断強度を算定する方法を示す。まず、せん断弾性座屈応力 τ_{cr}^{s+cf} は、式(15a)~(15c)を次のように変形して簡易的に算定することができる²⁾。

$$\tau_{cr}^{s+cf} = \begin{cases} \tau_e^{s+cf} & (\tau_e^{s+cf} \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_e^{s+cf} \cdot \tau_y} & (\tau_e^{s+cf} > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (16a)$$

$$\tau_e^{s+cf} = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1 - \nu_s^2)} \left(\frac{t_{s+cf}}{h} \right)^2 \quad (16b)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (16c)$$

$$t_{s+cf} = t_s + \frac{E_L}{E_s} \times t_c \times n \times 2 \quad (16d)$$

ここで、 τ_{cr}^{s+cf} は CFRP 接着後のせん断弾性座屈応力、 E_L は CFRP の弾性主方向の弾性係数、 t_c は CFRP の 1 層あたりの厚さ、 n は腹板片側あたりの CFRP 合計積層枚数(= $n_t + n_c$)、 n_t は引張側の CFRP 積層枚数、 n_c は圧縮側の CFRP 積層枚数($n_t = n_c$)である。なお、ここでいう CFRP の諸元は、炭素繊維シートと含浸・接着樹脂の複合材とし

図-34 計算法の違いによるせん断強度の比較結果²⁾

ての値を指す。また、 τ_y は、CFRP 接着前の鋼断面の値を指す。

さらに、文献 2)の検討結果に基づき、CFRP を腹板パネル全面に接着したときのせん断強度は、式(16a)~(16d)により計算されるせん断弾性座屈応力 τ_{cr}^{s+cf} を用いて、式(14)を次のように変形して算定する。

$$\frac{Q_u^{s+cf}}{Q_y} = c_1 \times \left\{ \frac{\tau_{cr}^{s+cf}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 - \tau_{cr}^{s+cf}/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \left(1 + \frac{E_L \cdot t_c}{E_s \cdot t_s} \times n \right) \right\} \quad (17)$$

ここで、 Q_u^{s+cf} は CFRP 接着後の腹板のせん断強度、 c_1 は CFRP 接着鋼板のせん断弾性座屈応力 τ_{cr}^{s+cf} を式(16a)~(16d)を用いて算定する場合の補正係数で、0.9 とする。CFRP 接着鋼板のせん断弾性座屈応力は、数値計算により厳密に計算すると実用上かなり煩雑となる。このため、 τ_{cr}^{s+cf} を式(16a)~(16d)により簡易的に計算した場合(簡易法)と数値計算により厳密に計算した場合(厳密法)のそれぞれの手法で求められるせん断強度について、CFRP 積層数、腹板厚、腹板高、アスペクト比をパラメータとして比較検討した結果(図-34)²⁾より、補正係数 0.9 を設定した。なお、ここでいう Q_y 、 τ_y は、CFRP 接着前の鋼断面の値を指す。

また、腹板の引張側と圧縮側に交互に $\pm 45^\circ$ で同数の炭素繊維シートを貼付け、かつ腹板の両面に同数貼付けることが、式(17)の適用条件である。CFRP 積層数は、式(14)と式(17)により計算した CFRP 接着によるせん断強度増加率 Q_u^{s+cf}/Q_u^0 が、補修・補強後に必要となるせん断強度の増加率以上となるように決定すればよい。

以上の評価式に用いる複合材としての CFRP1 層あたりの厚さ t_c (mm)及び CFRP の弾性主方向の弾性係数 E_L (GPa)は、式(18a)~(18c)及び式(19)で算定できる。

$$t_c = t_{cf} + t_m \quad (18a)$$

$$t_{cf} = M_{cf}/\rho_{cf} \quad (18b)$$

$$t_m = M_m/\rho_m \quad (18c)$$

$$E_L = V_f E_{cf} + (1 - V_f) E_m \quad (19)$$

ここで、 t_f は炭素繊維シート 1 層の厚さ(mm)、 t_m は含浸・接着樹脂の厚さ(mm)、 M_f は炭素繊維シート目付量(g/m^2)、 M_m は含浸・接着樹脂の塗布量(g/m^2)、 ρ_f は炭素繊維の密度(kg/m^3)、 ρ_m は含浸・接着樹脂の密度(kg/m^3)、 V_f は炭素繊維含有率($=t_f/t_m$)、 E_f は炭素繊維シートの弾性係数(GPa)、 E_m は含浸・接着樹脂の弾性係数(GPa)である。

(4) 実物大せん断座屈試験による設計法の検証

本工法の開発にあたり、これまでに実施してきたせん断座屈試験^{2,4)}は、全て実物の約1/2スケールの試験体を用いている。そこで、本工法の実用化を図るための最終確認として、実物大スケールの桁試験体を用いたせん断座屈試験を実施した。

a) 試験体と試験ケース

試験体に使用した鋼桁の諸元は、アスペクト比 1.0、桁長 7.8m、腹板高さ 1.3m、腹板厚 8mm であり、比較的小規模ではあるが、実物大スケールとした。また、鋼種は SS400 で、降伏応力は材料試験結果より腹板で 292MPa、フランジと補剛材で 268MPa である。

試験ケースは、腐食のない健全モデル(G1)、腐食を模擬した無補修モデル(G2)、同様の腐食損傷を与え CFRP

補修したモデル 2 ケース(G3, G4)の全 4 ケースとした。試験ケースを表-18 に示す。ここで、鋼桁の腐食損傷を模擬する形状は、図-1 に示したような桁端部の腹板下端が完全に腐食した状況を想定し、下端 100mm の範囲に完全断面欠損(貫通孔)を与えた。製作した試験体の寸法を図-35 に示す。また、補修に用いた各種材料諸元は支点上十字柱の圧縮試験と同じである(表-12)。

b) 補修形状と補修量

補修モデルの 2 ケースは、部分貼り工法モデル(G3)、及び全面貼り工法モデル(G4)とした(図-36)。各試験ケースの外観を図-37 に示す。CFRP の接着方法は、前々節及び前節に示した方法としている。

表-13 及び図-36 に示した各補修量(積層数)の決定方法は、以下のとおりである。

1) 部分貼り工法モデル(G3)は、式(13)により補修量を

表-13 せん断座屈試験ケース

試験体 番号	断面欠損 の有無	補修方法	補修方法	
			積層数*	シート総面積
G1	無	-	-	-
G2	有	補修なし	-	-
G3	有	部分貼り	9層	15.50m ²
G4	有	全面貼り	2層	13.52m ²

※片面・片方向あたり

図-36 補修モデルのCFRP貼付け方法

図-37 せん断座屈試験体の各ケースの外観

決定している。今回の実験モデルでは、片面あたりの断面欠損量が4mmであり、補修必要層数は8.8層となるため、9層とした。

2) 全面貼り工法モデル(G4)は、前節に示した手法により CFRP 接着後のせん断強度増加率を算定し、片面あたり2層とした。計算結果を表-14に示す。今回の実験モデルでは、CFRP 接着によるせん断強度増加率の計算値は23.6%であり、後述する試験結果から求めたせん断強度増加率の目標値19.1%(G1/G2)を上回る積層数を確保している。ここで、腹板下端に貫通孔を有するモデルのせん断強度の算出に際しては、腹板の対角線方向の上下端部で斜め張力場のアンカー作用が発揮されればよいと考え、貫通孔を控除した腹板高さのアスペクト比(1,300/1,200=1.08)を用いてせん断強度を算定している。

c) 試験方法

本試験の载荷装置及び载荷方法は、支点上十字柱の圧縮試験と同様である。試験状況を図-38に示す。

d) 実験結果と考察

実験結果を表-15及び図-39に示す。この結果より、部分貼り工法、全面貼り工法のいずれも、断面欠損により低下したせん断強度が健全時をやや上回る程度まで回復し、補修効果を得られることが確認できる。また、それぞれの補修量算定法はやや安全側の評価を与え、実橋に適用するうえで妥当と考えられる。

さらに、図-39中には曲げとせん断変形を考慮して計算した健全モデル(G1)のたわみ勾配の理論値(梁理論)をあわせて示しているが、部分貼り補修では、この勾配も健全時まで回復していることがわかる。これは、CFRPを下フランジへ定着した効果で斜め張力場の角度が45°方向に回復したことによると考えられる。

なお、G4モデルの荷重-変位曲線の段差は、局部的に炭素繊維シートが破断した際に生じたものであるが、その後再び強度増加を示していることがわかる。

G2及びG3モデルの試験終了後の状態を図-40に示す。

表-14 G4モデルのG2に対する強度増加率の計算値

項目	記号	物性値又は計算値	摘要
CFRP(複合材)の諸元			
1層あたり厚さ	t_c	0.660 mm	式(18a)
炭素繊維含有率	V_f	0.216	$=t_g/t_c$
弾性係数(繊維方向)	E_L	154 GPa	式(19)
鋼桁の諸元			
腹板厚	t_w	8 mm	設計値
腹板高さ	h	1200 mm	貫通孔考慮
アスペクト比	α	1.08	貫通孔考慮
弾性係数	E_s	200 GPa	設計値
ポアソン比	ν_s	0.3	設計値
降伏応力	σ_y	292 MPa	実測値
せん断降伏応力	τ_y	169 MPa	$=\sigma_y/\sqrt{3}$
鋼桁単体			
せん断座屈係数	k_s	8.75	式(15c)
せん断弾性座屈応力	τ_{cr}^0	70 MPa	式(15a-15b)
Q_u^0/Q_y		0.759	式(14)
CFRP接着後			
片面合計積層数	n	4枚	$=n_t+n_c$
鋼換算合計腹板厚	t_{s+cf}	16.1 mm	式(16d)
せん断弾性座屈応力	τ_{cr}^{+cf}	196 MPa	式(16a-16b)
Q_u^{+cf}/Q_y		0.939	式(17)
せん断強度増加率(G4/G2)		+23.6%	Q_u^{+cf}/Q_u^0

※ 補修材の物性値は表-12の値を使用

表-15 せん断座屈試験結果

試験体番号	断面欠損の有無	補修方法	最大荷重(kN)	強度比率	
				対G1	対G2
G1	無	-	1,389	-	+19.1%
G2	有	補修なし	1,166	-16.1%	-
G3	有	部分貼り	1,479	+6.5%	+26.8%
G4	有	全面貼り	1,473	+6.0%	+26.3%

図-38 せん断座屈試験の状況

図-39 せん断座屈試験結果 荷重-変位関係

(a) G2(欠損モデル)

(b) G3(部分貼り工法モデル)

図40 試験終了後の変形状態

8. まとめ

本研究では、剥離抑制効果を有する高伸度弾性パテ材を接着層に挿入した本工法の特性を活用し、腐食事例の多い鋼桁端部を含む各種鋼部材に適用できる実用的な補修・補強設計法を提案した。本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- 1) CFRP 接着鋼板の一軸引張試験を実施した結果、接着層に塗布した高伸度弾性パテ材の影響で、鋼板への荷重伝達効率が減少することが確認された。荷重伝達効率は、CFRP の定着長や積層数によって変化するが、試験及び数値解析によりその変化の傾向を把握した。その結果、着目点からの定着長を 200mm、CFRP 各層の端部ずらし量を 25mm 確保することで、実用上問題ないレベルに抑えられることを確認した。
- 2) 高伸度弾性パテ材の挿入により荷重伝達効率が減少する影響は、一軸引張試験及び数値解析の結果から算定した応力低減係数 c_n を炭素繊維シートの鋼換算断面積に乘じることにより、設計において適切に考慮することが可能となる。この提案した新たな設計手法を用いることにより、実務において容易に補修・補強設計が可能と考えられる。
- 3) CFRP 接着鋼板の繰返し引張載荷試験を実施した結果、懸念された接着層の剥離が生じる前に CFRP 接着範囲外の鋼材が破断する事象が確認された。この結果から、本工法の接着層は繰返し引張荷重に対して十分な疲労耐久性を有するため、設計において接着層の疲労の影響は考慮しなくてよいと考えられる。また、高伸度弾性パテ材を挿入しないケースとの比較結果より、接着層の疲労耐久性向上に高伸度弾性パテ材が寄与することもあわせて確認した。
- 4) 定着長の確保が困難な支点部下端の腐食に対しては、支点上十字柱の欠損断面積に相当する量の CFRP を繊維方向を鉛直方向として接着することで、断面欠

図41 実橋への適用事例(腹板への部分貼り工法)

損が生じた部材の曲げ剛性を回復させる簡易な設計手法を提案した。その妥当性を確認するために、桁試験体を用いた支点部の圧縮試験を実施した結果、断面欠損により低下した支点部の耐荷力を設計で期待したとおりに回復できることを実証した。

- 5) せん断力を受ける部材に対しては、腹板の最大欠損板厚に相当する量の CFRP を腐食部近傍に貼付ける「部分貼り工法」と、腹板パネル全面に CFRP を貼付けてせん断強度の増加を図る「全面貼り工法」について、これまでの研究成果²⁴⁾に基づきそれぞれの具体的な設計手法を整理して示した。さらにこれらの設計手法の妥当性を検証するため、実物大スケールの桁を製作し、腹板下端部に完全断面欠損(貫通孔)を与えた試験体を用いてせん断座屈試験を実施した。その結果、いずれの CFRP 貼付け手法も設計上の想定をやや上回る十分なせん断強度の回復効果を得ることが実証され、実橋に適用するうえで妥当な設計法であることを確認した。

最後に本研究の成果は、東・中・西日本高速道路(株)の技術基準¹⁸⁾に鋼構造物の補修・補強技術の1つとして取り入れられ、現地での適用がはじまっている(図41)。今後、本工法が各地で活用されることにより、効率的な補修が進められ、既設鋼構造物の健全化につながることを期待したい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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強度評価法, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.3, pp.635-654, 2012.
- 3) 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: 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.
- 4) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 土木学会構造工学論文集, Vol.60A, 2014.
- 5) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.239-249, 2001.
- 6) 伊藤久継, 野坂克義, 鈴川研二, 伊藤満: CFRP 板補強鋼桁の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.52A, pp.813-820, 2006.
- 7) 松村政秀, 北田俊行, 久部修弘: 高弾性 CFRP 板を I 形断面鋼桁に貼付する補強効果に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.54A, pp.834-841, 2008.
- 8) 石川敏之, 大倉一郎, 西田貴裕, 横田季彦, 斎藤誠: CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減, 土木学会構造工学論文集, Vol.54A, pp.842-849, 2008.
- 9) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008.
- 10) 杉浦江, 小林朗, 稲葉尚文, 本間淳史, 大垣賀津雄, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シート接着による補修技術に関する設計・施工法の提案, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.106-118, 2009.
- 11) 土木学会複合構造委員会: 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, 2012.
- 12) 宮下剛, 長井正嗣: 一軸引張を受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No.2, pp.378-392, 2010.
- 13) 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を挿入した炭素繊維シート接着鋼板の一軸引張試験, 第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム概要集, pp.123-132, 2014.
- 14) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 丸善, 2012.
- 15) Basler, K.: Strength of plate girders in shear, *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, pp. 151-197, 1961.
- 16) 西村宣男, 玉田和也, 小野潔: 鋼桁橋を対象とした強度設計の性能規定化, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.87-96, 2007.
- 17) 中井博, 北田俊行: 鋼橋設計の基礎, 共立出版, 1992.
- 18) 東・中・西日本高速道路(株): 設計要領第二集〔橋梁保全編〕, 2013.7.

(2014. 2. 25 受付)

REPAIR METHOD FOR STEEL GIRDER BY BONDING CARBON FIBER SHEET USING HIGH ELONGATION ELASTIC PUTTY

Dai WAKABAYASHI, Takeshi MIYASHITA, Yusuke OKUYAMA,
Yuya HIDEKUMA, Akira KOBAYASHI, Norio KOIDE, Wataru HORIMOTO
and Masatsugu NAGAI

In general, steel structures have been corroded locally due to water leakage and so on. In particular, although it is obvious that corrosion at steel girder ends results from water leakage through expansion joints, water leakage from drainage system or cracks in a slab and scattering of de-icing salts also corrode members in steel structures. Application of repair method using CFRP sheet to corroded steel structures have been limited so far since delamination under high stress level or buckling deformation is concerned. As a result, there have been a lot of cases to be difficult to adopt this method for various kind of corrosions. Therefore, we propose a new design method corresponding to the characteristics of steel members and structural details. Herein, low elastic modulus and high elongation putty layer is inserted between the steel member and the first CFRP layer to prevent delamination of CFRP sheet. This paper describes a new repair method and its validation through experiments and analyses.