# 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

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

<sup>1</sup>正会員 長岡技術科学大学准教授 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

<sup>2</sup>正会員 中日本高速道路株式会社 名古屋支社 豊田保全サービスセンター (〒470-1202愛知県豊田市渡刈町大屋敷57) E-mail: d.wakabayashi.aa@c-nexco.co.jp

<sup>3</sup>正会員 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 コンポジットカンパニー 社会資本材料事業部 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3番8号) E-mail:y-hidekuma@nck.nsmat.co.jp

4正会員 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 コンポジットカンパニー 社会資本材料事業部 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3番8号)

E-mail:a-kobayashi@nck.nsmat.co.jp

<sup>5</sup>正会員 川崎重工業株式会社 マーケティング本部 新市場開発部 (〒105-8315 東京都港区海岸1-14-5) E-mail:koide\_n@khi.co.jp

<sup>6</sup>正会員 倉敷紡績株式会社 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

<sup>7</sup>正会員 長岡技術科学大学名誉教授(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1) E-mail:nagaimasatsugu@gmail.com

本研究では、腐食損傷した鋼橋の軸方向力および曲げによる垂直応力を受ける部材を炭素繊維シートで 補修する工法において、高伸度弾性パテ材の使用を標準仕様とすることを検討する.ここで、パテ材を使 用しない場合と同様に鋼部材の応力低減を図ろうとすると、必要となる炭素繊維シートの定着長が長くな り過ぎる.このため、施工性や応力低減度などを総合的に判断して、定着長を200 mm,端部ずらし量を 25 mmとした上で、応力低減係数という係数を従来工法の設計式に新たに導入する.応力低減係数の決定 では、数値計算方法を援用してパテ材の厚さなど応力低減係数に影響しうる諸量をパラメータとしたパラ メトリック解析を実施する.そして、炭素繊維シートの積層数と応力低減係数の関係を把握した後、補修 設計で用いる応力低減係数を決定する.

Key Words : steel, corrosion, repair, Carbon Fiber Reinforced Polymer, tensile test

## 1. はじめに

## (1) 研究の背景

周知の通り,鋼橋の腐食損傷は,伸縮装置からの漏水 などに起因して,桁端部に発生することが多い<sup>例えば1,2</sup>. 桁端部の腐食損傷に対して,これまで,鋼板添接や部材 交換が行われている<sup>3</sup>.この中には,高力ボルトと接着 剤を用いて鋼板添接を行う工法も報告されている<sup>4</sup>.し かし、これらの工法では重機を使用する必要があること から施工性に優れない.結果として、腐食損傷に対する 補修が進んでいない状況にある.

そこで,著者らの研究グループは,施工性の向上と補 修の促進に向け,鋼橋桁端部の腐食損傷に対する新たな 補修工法として,炭素繊維シートを接着貼付する工法を 提案した<sup>5,0</sup>.本工法では,支点部まわりの補剛材やウ ェブといった母材の減肉によって局部座屈の発生が懸念 される部材も対象とする.炭素繊維シートの接着貼付に よって、部材の性能を初期状態まで回復させるためには、 局部座屈による大変形が発生しても、シートが変形に追 従して、はく離しないことが求められる.このため、本 工法は、軸方向力および曲げによる垂直応力を受ける部 材を対象とした従来の炭素繊維シート接着工法<sup>の</sup>とは、 引張弾性係数が55 MPa以上75 MPa未満で、引張最大荷 重時伸びが300%以上500%未満という規定を満たすポ リウレア系のパテ材(以下、高伸度弾性パテ材あるいは 単にパテ材と記す)を母材と炭素繊維シート間に挿入す る点が大きく異なる.この高伸度弾性パテ材を用いるこ とで、腐食減肉した桁端部ウェブパネルのせん断強度回 復や支点部の柱としての強度回復が可能となった<sup>5,6,8</sup>.

そこで、本研究では、文献7)の従来工法に対して、高 伸度弾性パテ材を標準仕様として適用することを考える. 母材と比較して弾性係数が小さいパテ材があることで、 これが緩衝材となり、炭素繊維シートのはく離を抑制す る効果が期待される.また、接着材の疲労耐久性の向上 に結び付くことも想定される.ただし、母材から炭素繊 維シートへの荷重伝達はパテ材を介して行われることか ら、従来工法と同様の応力低減効果を得るためには、炭 素繊維シートの定着長を十分長くする必要がある.

例えば、従来工法で炭素繊維シートの最大積層数であ る5層とする場合を考える. 最外層の炭素繊維シートの 定着長と炭素繊維シート端部のずらし量(以下、端部ず らし量と記す)は、標準仕様にもとづいて100mmと25 mm とする. このとき, 第3章で述べる炭素繊維シート 接着鋼板の一軸引張試験の諸元と文献 9), 10)で提案した 数値計算方法を用いると,鋼板中央部の応力低減率の理 論収束値は 0.6423 となり、数値計算結果は 0.6437 となる. 標準仕様で十分な応力低減効果が得られることが分かる. 一方, 高伸度弾性パテ材を用いた場合の計算方法は第2 章で述べるが、応力低減率の数値計算結果は0.7604とな る. そこで、パテ材を使用しない場合と同様の応力低減 率を達成するために必要となる定着長を計算すると約 600 mm となる. このとき, パテ材を使用しない場合の 炭素繊維シート最縁端距離が 400 mm であるのに対して, 定着長を 600 mm とすると炭素繊維シート最縁端距離は 1400 mm にも達する. これは、施工における制約条件と なり、工法の普及が妨げられる要因となる.

また,先にも述べたが,従来工法では,炭素繊維シートの最大積層数は5層とされている.このとき適用可能な最大腐食減肉量は,使用する炭素繊維シートの標準的な諸元が,厚さ0.143 mm,ヤング係数640 GPaであることから,0.143 mm×640 GPa/200 GPa×5 層 = 2.35 mmとなる.しかし,実橋では,この値を超える腐食減肉が発生している状況が多々ある<sup>10-4</sup>.このため,現場からのニーズとして,最大積層数の増加が求められている.高度経済

成長期に建設された鋼トラス橋の弦材などで使用されて いる鋼板厚は、9mm程度のものが多いことから、厳し い腐食状況として孔食を考えると、必要とされる炭素繊 維シートの積層数は20層となる。

## (2) 研究の目的

本研究では、文献7)で提案されている、腐食した鋼橋 の軸方向力および曲げによる垂直応力を受ける部材を炭 素繊維シートで補修する従来工法において、高伸度弾性 パテ材の使用を標準仕様とすることを目的とし、あわせ て最大積層数を 20 層とすること、シートの定着長や端 部ずらし量といった構造細目についても検討する.

ただし、パテ材を使用しない場合と同様の考え方で応 力低減を図ろうとすると、必要とされる炭素繊維シート の定着長が長くなり過ぎる.このため、施工性や応力低 減度などを総合的に判断して、定着長を 200 mm、端部 ずらし量を 25 mm とした上で、応力低減係数という係 数を従来工法の設計式に新たに導入する. これは、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 積が減少してしまうことから、この減少分を上回るよう にするための補正係数である. 応力低減係数の決定方法 は、第4章で詳しく述べるが、文献 9)、10)で提案した数 値計算方法を援用して、パテ材の厚さなど応力低減係数 に影響しうる諸量をパラメータとしたパラメトリック解 析を実施する. そして, 炭素繊維シートの積層数と応力 低減係数の関係を把握した上で、補修設計で用いる応力 低減係数を最終的に決定する.

## 2. 応力低減係数と数値計算手法

#### (1) 応力低減係数の導入

炭素繊維シート接着鋼板の一軸引張試験における鋼板 中央コバ面の荷重 Pとひずみ εの模式図を図-1 に示す. 図中の記号は、E<sub>s</sub>が鋼材のヤング係数、A<sub>s</sub>が鋼板の断面 積、A<sub>ds</sub>が鋼換算した炭素繊維シート全積層数の断面積 (ただし接着材は含まない)であり、鋼材のヤング係数 に対する炭素繊維シートのヤング係数の比に炭素繊維シ ート全積層数の断面積を乗じて算出する.A<sub>dps</sub>がパテ材 を含む鋼換算した炭素繊維シート全積層数の断面積(た だし接着材は含まない)である.

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る.これは、みかけ上のCFRP鋼換 算断面積が減少することに相当することから、以下の補 正係数cn(以下、応力低減係数と記す)を定義する.

$$A_{cfp,s} = c_n A_{cf,s} \tag{1}$$

式の詳細な導出は、文献 11)に譲るが、パテ材を用いた

際の P-ε 関係に式(1)を代入すると応力低減係数 cnが,

$$c_n = \frac{P/\varepsilon - E_s A_s}{E_s A_{cf,s}}$$
(2)

と得られる.ここで, P/c は CFRP 接着鋼板中央の鋼板 コバ面に貼り付けたひずみゲージの P-c 関係曲線から求 まる剛性である.式(2)を用いることによって,実験デ ータから応力低減係数を算出することが可能となる.ま た,高伸度弾性パテ材を用いる場合の補修設計法は, A<sub>d</sub> を断面欠損量として,下式となる<sup>11,12</sup>.

$$A_{sl} \le c_n A_{cf,s} \tag{3}$$

# (2) 数値計算手法

文献 9,10)で提案した数値計算手法とは,各層の応力 を状態変数とみなし,微小区間における力の釣合いから 連立微分方程式を再帰的に導出し,このとき構成される 行列の固有値解析を実施して応力の一般解を求める,準 解析的な手法である.一般解に含まれる未定係数は,ひ ずみの連続性条件と境界条件から決定される.本手法に より,炭素繊維シートの積層数に関わらず,有限要素法 で要求されるようなモデリングの労力をかけることなく, 部材軸方向の垂直応力とせん断応力分布を有限要素法と 同等の精度で容易に求められる.

ここでは、図-2に示すように、鋼板と接着材1層目の 間に高伸度弾性パテ材を挿入する.数値計算手法では, 接着層にはせん断応力のみが作用し、鋼板と炭素繊維シ ートに作用する垂直応力をせん断応力に変換して伝達す る役目を果たす.炭素繊維シートのエポキシ系接着材 (以下, 接着剤と記す)のヤング係数は, 鋼材と炭素繊 維シートのヤング係数よりも2オーダー小さいが、高伸 度弾性パテ材のヤング係数はさらに接着材のヤング係数 よりも2オーダー小さい.また,接着層の厚さは標準塗 布量から 0.5mm 程度となるのに対して、パテ材の標準 厚は0.8mmと接着層よりも厚い.よって、接着材1層目 と比較して、パテ材のせん断変形が卓越することから、 数値計算手法において, 接着層1層目にあたる部分をパ テ材の諸元を用いることとする. つまり, 接着層1層目 は考慮しない、この妥当性については、第3章で実施す る一軸引張試験の応力分布との比較を通じて検証する.

次いで、本数値計算手法から、式(2)の応力低減係数 を算出する方法について説明する.こちらも式の詳細な 導出は文献 11)に譲るが、炭素繊維シート接着鋼板中央 コバ面の P<sub>e</sub>関係は次式で表される.

$$P = \frac{E_s A_s}{\xi} \varepsilon \tag{4}$$

ここで、 そは鋼板に作用する外力を鋼板の断面積で除し



図-1 一軸引張を受ける高伸度弾性パテ材を用いた 炭素繊維シート接着鋼板の荷重-ひずみ関係



図-2 高伸度弾性パテ材を用いた炭素 繊維シート接着工法の断面構成

た応力(以下,外部応力と記す) $\sigma_{sn}$ に対する炭素繊維 シート接着鋼板中央コバ面の応力 $\sigma_{s0}$ の比,つまり応力 低減率を表す.  $\xi$ は数値計算手法から算出される.式(4) により,実験結果と数値計算結果の $P_{\varepsilon}$ 関係曲線の比較 が可能となる.また,数値計算手法から算出される応力 低減係数 $c_n$ は次のようになる.

$$c_n = \frac{1/\xi - 1}{1/\xi_0 - 1} \tag{5}$$

ここで,

$$\xi_0 = \frac{E_s A_s}{E_s \left(A_s + A_{cf,s}\right)} \tag{6}$$

であり、鋼板と炭素繊維シート接着鋼板の剛性比を与える. *3*: *4*:**CFRP**の定着長が十分に長くなるとなに収束する <sup>10</sup>.

#### 3. 炭素繊維シート接着鋼板の一軸引張試験

#### (1) 試験の概要

本研究では、幅60 mm,厚さ9 mm,長さ750 mm,1000 mm,1500 mmの平鋼板に、高伸度弾性パテ材を塗布し、

**表-1** 試験ケース

表-2	物性値
-----	-----

200 9 60 317 701 0.143 60 2533 0.60 1.16 0.517 0.4 68 1.00 1.25 0.800 0.49

	シート		端部				ヤング係数	GPa	
試験片名	積層数	定看長	ずらし量	試験片数		鋼板	厚さ	mm	
	(片側)	(mm)	(mm)			(SS400)	幅	mm	
T1 100		100		2	-		降伏応力1)	MPa	
T1-100	1	200		2		炭素	ヤング係数2)	GPa	
TI-200		200	0	2		繊維	厚さ <sup>3)</sup>	mm	
T5-100-0		100	0	3		シート	幅	mm	
15-100-10	-	100	10	3	-		ヤング係数 <sup>1)</sup>	MPa	
15-100-25	5	200	25	3	-	接着樹脂	塗布量		
15-200-10			10	3			質量密度1)	g/m <sup>3</sup>	
15-200-25			25	3	_		厚さ <sup>4)</sup>	mm	
T10-100-0			0	1	_		ポアソン比 <sup>1)</sup>	_	
T10-100-10	10	100	10	1			ヤング係数	MPa	
T10-100-25		200	25	1		高伸度	塗布量	kg/m <sup>2</sup>	
T10-200-10			10	5		弾性 パテ材	質量密度1)	g/m <sup>3</sup>	
T10-200-25			25	5			厚さ <sup>9</sup>	mm	
T15-100-0			0	1	_		ポアソン比 <sup>1)</sup>		
T15-100-10		100	10	1	_	1) 材料試験約	吉果		
T15-100-25	15		25	1		2)材料試験約	吉果(設計値:640	GPa)	
T15-200-10		200	10	1		3)設計値			
T15-200-25		200	25	3		4)0.60×1000/	$1.16/1000 = 0.517 \mathrm{m}$	n	
T20-200-25	20	200	25	3	$\int 1.00 \times 1000 / 1.25 / 1000 = 0.800 \mathrm{mm}$				
	500		237 187	90 60 30 0		90 187	237	500	
	1					1	1	1	



図-3 ひずみの計測点の一例

炭素繊維シートを接着貼付して試験片を作成した.そし て、載荷容量1000kNのリレー式万能試験機で一軸引張 試験を実施した.試験パラメータは、炭素繊維シートの 積層数、定着長、端部ずらし量である.試験ケースを表 -1に示す.また、試験で用いた材料の物性値を表-2に示 す.

計測項目はひずみとし、ゲージ長が1 mmあるいは3 mmのひずみゲージを用いる.ひずみの計測位置の一例を図-3に示す.ただし、試験片数が一体で、端部ずらし量が0 mmあるいは10 mmの試験片については、図-3に示すような密なひずみ計測を行っていない.はく離検知を目的として、計測断面を、鋼板中央、最外層炭素繊維シート端部、1層目炭素繊維シート端部と減じている.

# (2) 応力分布

図-4 に、試験片長手方向の垂直応力の分布を示す. 図中の横軸は試験片中央からの距離  $x \epsilon$ 、縦軸は外部応力  $\sigma_{sn}$ に対する垂直応力  $\sigma$  の比を表す. ここでは、 $\sigma_{sn}$ が 150MPa 付近となるときの結果を示している. この理由は、実橋での活荷重応力の最大レベル(SM570材の許容 応力度 255MPa に対して活荷重比率約 6割)を想定して いるためである.これ以降も, *σ*<sub>sn</sub>の代表値として 150MPaを採用する.

また,図中の○と△は、それぞれ鋼板コバ面と炭素繊 維シート上の実験値であり、左右コバ面、上下シート上 の平均値である.そして、計測されたひずみに、表-2 に示すヤング係数を乗じて応力を算出した.凡例の CFRPX (X=1,2,...,20)は、22で説明した数値計算方法 によって計算された X 層目の炭素繊維シートの垂直応 力分布を表す.黒色の実線は式(6)の & を示す.また, 表-3 に、応力低減率を応力低減係数とあわせ、各試験 ケースについて示す.

図-4 をみると,試験片の製作やひずみゲージの貼付, 試験片の設置などに起因して,炭素繊維シート上で実験 結果と解析結果の相違が散見されるものの,両者の傾向 は概ね一致している.一方,鋼板コバ面の応力分布は, 各試験ケースについて非常に良く一致している.また, 図-5 に,実験結果と数値計算結果の応力低減率 ξ<sup>α</sup>,縦軸が数値 計算結果の応力低減率 ξ<sup>α</sup>である.図中の点線は,ξ<sup>α</sup>に



図-4 垂直応力分布(外部応力 $\sigma_m = 150$ MPa)

対する *ξ<sup>cal</sup>*の±10 %の誤差を表す. マーカーを塗りつぶ しているものは定着長が 200 mm で端部ずらし量が 25 mm の試験片を示す. *ξ<sup>cal</sup>ζ<sup>acl</sup>*は, 0.955 から 1.035 の範囲 にあり,数値計算手法による鋼中央での応力低減率の算 出には問題がないと言える.よって, 2.2 で説明した数 値計算方法は妥当と判断する.

### (3) 応力・ひずみ関係

図-6に、各試験ケースの外部応力σ<sub>sn</sub>とひずみεの関係 曲線を示す.載荷は、鋼板の降伏荷重を少し超えた時点 で終了した.図中の「理論値(鋼板単体)」とは載荷荷 重を鋼板単体の剛性で除したもの、「理論値(合成断 面)」とは載荷荷重を鋼板と炭素繊維シートからなる合 成断面の剛性(ただし接着材は無視)で除したものであ る. 「数値計算値(合成断面・補正)」は、数値計算手 法から応力低減率を求め、式(4)を用いて計算される. 以下に、図-6から確認される事項を記す.

- ・ 鋼板の降伏応力 (= 317 MPa) に達しても、炭素繊 維シートやパテ材に、はく離が発生していない.これは、全ての試験片で同様であった.よって、高伸 度弾性パテ材を用いれば、炭素繊維シートの積層数 を20層としても、実橋で生じる活荷重応力の範囲内 (150 MPa以下)では、はく離は発生せず、その適 用性に問題がない.
- 数値計算結果(「数値計算値(合成断面・補 正)」)と実験結果は、全ての試験片で、外部応力 のsnが150 MPa付近まで良好に一致している.ただし、 150 MPaを超えると、パテ材の塑性化に起因して、 炭素繊維シート接着鋼板の剛性低下がみられる.し かし、これついても、実橋での活荷重応力の最大レ

シート	1 4 4 4 4 5 T	長 ずらし量 (mm)	応力低減率 <i>č</i>					剛性比 <sup> </sup>	応力低減係数 <i>c</i> <sub>n</sub>								
積層数 (片側)	定有長 (mm)		表 n) ずらし量 (mm) ま <sup>α</sup>				解析值	理論値	実験值 <sup>1)</sup> <i>c<sub>n</sub><sup>ex</sup></i>					解析值			
			1体目	2体目	3体目	4体目	5体目	平均值	ç		1体目	2体目	3体目	4体目	5体目	平均值	Cn
3	100	-	0.913	0.915		1	-	0,914	0.933	0.900	0,858	0.831	-	1		0.845	0.648
21.5	200	-	0.907	0.903	-	2	1	0.905	0,906		0.921	0.970	E.	2 <b>—</b> 3	E.	0,946	0.937
		0	0.847	0.856	0.870		_	0.858	0.886	0.642	0.325	0.301	0.269	<u> </u>	22	0,298	0.231
	100	10	0.820	0.790	0.811	1	-	0.807	0.825		0.393	0.476	0.419	Т	-	0.429	0.382
5		25	0,784	0.765	0.748		-	0.766	0,760		0.494	0.550	0.604	-	-	0.549	0.566
	200	10	0.757	0.748	0.683		-	0.729	0.719		0.576	0.607	0.832	::=::	177	0.672	0.702
	200	25	0.684	0.737	0.657			0.693	0,690		0.829	0.642	0.937	1 a.e. 1	100	0,803	0.807
	100	0	0.848		1			0.848	0.878		0.161	5 <b>-</b> 3	100	$\boldsymbol{x}_{i}^{1}=\boldsymbol{x}_{i}^{1}$	-	0.161	0.125
		10	0.722	-	-			0.722	0.717		0.345	$\gamma - \gamma$	-	(i+i)	-	0,345	0.355
10		25	0.612	-	-	2.	-	0.612	0.591	1 0.473	0.570		-			0.570	0.621
	200	10	0.634	0.581	0.604	0.581	0.604	0.601	0.593	593 529	0.518	0.648	0.589	0.648	0.589	0,598	0.617
	200	25	0.568	0.564	0,607	0.536	0.493	0.554	0.529		0,684	0,695	0.581	0.778	0.923	0.732	0,799
	100	0	0.858	340	-	1		0.858	0.876		0.099	100		200	1	0.099	0.085
		10	0.628			-	-	0.628	0.621	]	0.354	323	-	1 2 2 2		0.354	0.365
15		25	0.480	100		-	-	0.480	0.470	0.374	0.649		1	121		0.649	0.675
	200	10	0.524		_	-	-	0.524	0.503		0.544				-	0.544	0.592
	200	25	0.429	0.420	0.433	Ξ.	-	0.427	0.422		0.798	0.827	0.784		-	0.803	0.816
20	200	25	0.366	0.358	0.375	(= -	-	0.366	0.350	0.310	0.778	0.805	0.749	2.52	-	0.777	0.835

表-3 実験結果と数値計算結果の比較(応力低減率と応力低減係数)

1) osn =150 MPa 付近で評価

ベルを超えているので、実用上は問題がないと言える.

定着長と端部ずらし量が長くなるほど,図-6の実験 値(鋼板中央コバ面)が理論値(合成断面)に近づ くことから,炭素繊維シートへの応力伝達の効率が 向上することがわかる.また,図-7には、シート積 層数、定着長、端部ずらし量と剛性比気に対する応 力低減率の実験値ζ<sup>α</sup>の関係を示す.定着長を200 mm,端部ずらし量を25 mmとした際のζ<sup>α</sup>/ζは、シ ート積層数を5層,10層,15層,20層としたそれぞ れのケースに対して,1.079,1.171,1.142,1.181と なっている.

## (4) 応力低減係数

図-8 に,実験結果と数値計算結果の応力低減係数  $c_n$ の比較を  $\sigma_{sn} = 150$  MPa付近について示す. 横軸が実験結果の応力低減係数  $c_n \, \alpha$ ,縦軸が数値計算結果の応力低減係数  $c_n \, \alpha$ である. 図中の点線は, $c_n \, \alpha$ に対する  $c_n \, \alpha \sigma \sigma \pm 10\%$ の誤差を表す. マーカーを塗りつぶしているものは定着長が 200 mm で端部ずらし量が 25 mm の試験片を示す.

図-9 と図-10 に、炭素繊維シート積層数に着目して、 定着長が 100 mm と 200 mm の各試験片について図-8 を 整理した結果を示す.以下に、図-8~図-10 と表-3 から 確認される事項を記す.

図-8において、cn<sup>ey</sup> cn<sup>cd</sup>は0.916から1.304の範囲にある.この中で、定着長が100 mmで端部ずらし量が0



(横軸:実験結果,縦軸:数値計算結果)

mmの試験片は、 $c_n^{\alpha}/c_n^{\alpha d}$ が1.165から1.304の範囲にあるものの、定着長が200 mmで端部ずらし量が25 mmの試験片は、 $c_n^{\alpha}/c_n^{\alpha d}$ が0.916から0.995の範囲にあり、誤差が小さい.ここからも、高伸度弾性パテ材を用いる際の構造細目として、炭素繊維シートの定着長を200 mm、端部ずらし量を25 mmとすることは妥当と言える.

・図-9と図-10より、式(2)から実験結果を用いて算出 される応力低減係数と式(5)から数値計算結果を用い て算出される応力低減係数は、定着長が100 mmで 炭素繊維シートの積層数が1層となる場合の誤差が 若干大きいものの、各積層数について概ね一致して いる。



図-6 外部応力 *σ*<sub>sn</sub> - ひずみ ε 関係



図-10 炭素繊維シート積層数Nと応力低減係数cnの関係(定着長 200 mm)

#### 4. パラメトリック解析と補修設計での応力低減係数

#### (1) パラメトリック解析

ここでは、パテ材の厚さなど応力低減係数に影響しう る諸量をパラメータとしたパラメトリック解析を実施し て炭素繊維シートの積層数と応力低減係数の関係を把握 する.パラメータは、a)端部ずらし量と定着長、b)鋼 板厚、c)炭素繊維シートのヤング係数、d)炭素繊維シー トの厚さ、e)接着剤のヤング係数、f)接着材の厚さ、g) 高伸度弾性パテ材のヤング係数、h)高伸度弾性パテ材 の厚さとする.ただし、パラメトリック解析で用いる諸 元は、表-4の値を基本とし、各項目のパラメータのみを 変化させる.

## a) 端部ずらし量と定着長の影響

図-11(a), (b)に、定着長を100 mm、200 mmとしたそれ ぞれの場合について、端部ずらし量を0 mm、10 mm、25

表-4 パラメトリック解析の基本諸元

	ヤング係数	GPa	200	
鋼板	厚さ	mm	9	
	幅	mm	60	
	ヤング係数	GPa	640	
炭素繊維	厚さ	mm	0.143	
シート	定着長	mm	200	
	端部ずらし量	mm	25	
	ヤング係数	MPa	2533	
接着剤	ポアソン比		0.4	
	厚さ	mm	0.517	
	ヤング係数	MPa	68	
パテ材	ポアソン比	_	0.49	
	厚さ	mm	0.8	

mmと変化させ、応力低減係数cnを計算した結果を示す.

#### b) 鋼板厚の影響

図-11(c)に、鋼板厚を9 mm、12 mm、30 mm、60 mmと



図-11 応力低減係数 cnに関するパラメトリック解析結果

変化させて応力低減係数c<sub>n</sub>を計算した結果を示す.最大 板厚を60 mmとする理由は,既設橋における実績にもと づく.図より,鋼板厚が応力低減係数に与える影響は小 さいことが分かる.

## c) 炭素繊維シートのヤング係数の影響

図-11(d)に、炭素繊維シートのヤング係数を640 GPa, 701 GPaと変化させて応力低減係数c<sub>n</sub>を計算した結果を示 す.前者の値が設計値に、後者の値が実測値に対応し、 炭素繊維シートのヤング係数の変動が応力低減係数に与 える影響を把握することができる.図より、炭素繊維シ ートのヤング係数の変動が応力低減係数に与える影響は 小さいことが分かる.

## d) 炭素繊維シートの厚さの影響

図-11(e)に、炭素繊維シートの厚さを0.143 mm, 0.429 mmと変化させて応力低減係数cnを計算した結果を示す. 前者の値が設計値に、後者の値がストランド型炭素繊維 シートに対応する.図より、炭素繊維シートの厚さが応 力低減係数に与える影響は大きいことが分かる.このた め、ストランド型炭素繊維シートを用いる場合は、応力 低減係数に対する検討が別途必要である<sup>10</sup>.

#### e) 接着剤の厚さの影響

図-11(f)に, 接着材の厚さを0.517 mm, 1.034 mmと変化 させて応力低減係数c<sub>n</sub>を計算した結果を示す. 図より, 接着剤の厚さが応力低減係数に与える影響は小さいこと が分かる.

#### f) 高伸度弾性パテ材のヤング係数の影響

図-11(g)に,高伸度弾性パテ材のヤング係数を68 MPa, 340 MPaと変化させて応力低減係数*c*<sub>n</sub>を計算した結果を 示す

#### g) 高伸度弾性パテ材の厚さの影響

図-11(h)に,高伸度弾性パテ材の厚さを0.8 mm, 1.6 mmと変化させて応力低減係数*c*<sub>n</sub>を計算した結果を示す.

## (2) 補修設計での応力低減係数

前節の結果から,高伸度弾性パテ材が厚くなるほど応 力低減係数c<sub>n</sub>の値が低下すること,また鋼板厚の影響も 僅かながら見られることが確認された.このため,応力 低減係数の決定に当たっては,表-4の値を基本とし,高 伸度弾性パテ材の厚さは,設計厚さ0.8 mmに対して施工 誤差の上限値である+10 % (0.88 mm)と設定した.また, 鋼板厚も安全側の設定として60 mm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<sub>n</sub>と設計用に設 定した応力低減係数を表-5に示す.ここで,設計に用い る応力低減係数の値は,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.

本研究では、腐食損傷した鋼橋の軸方向力および曲げ による垂直応力を受ける部材を炭素繊維シートで補修す る工法において、高伸度弾性パテ材の使用を標準仕様と することを検討した. ここでは、定着長を 200 mm、端 部ずらし量を 25 mm とした上で、応力低減係数という 係数を従来工法の設計式に新たに導入した.応力低減係 数の決定では、数値計算方法を援用したパラメトリック 解析を実施して、炭素繊維シートの積層数と応力低減係 数の関係を把握した.そして、補修設計で用いる応力低 減係数を決定した.また、高伸度弾性パテ材を用いるこ とで炭素繊維シートの積層数を 20 層としても、鋼板の 降伏応力に達しても、炭素繊維シートやパテ材にはく離 は発生しなかった. 高伸度弾性パテ材を用いた際の疲労 耐久性については, 文献 11), 12)で述べられている. こ こでは、パテ材を使用することで高い疲労耐久性が得ら れることが確認されている.

## 参考文献

- 名取暢,西川和廣,村越潤,大野崇:鋼橋の腐食事 例調査とその分析,土木学会論文集,No.668/I-54, pp.299-311,2001.
- 玉越隆史,中洲啓太,石尾真理,武田達也,水津紀 陽:鋼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, No.294, 2006.
- 3) 名取暢,西川和廣,村越潤,大野崇:腐食部材の添 接板補強に関する研究,土木学会論文集,No.682/I-56, pp.207-224, 2001.
- 村越潤,田中良樹,船木孝仁:鋼橋桁端部の腐食対 策に関する研究,土木研究所資料,第4112号,2010.
- 5) 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,構造工学論文 集A, pp.710-720, Vol.58A, 2012.
- 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, Vol.68, No.3, pp.635-654, 2012.

#### 表-5 応力低減係数 cn

数值角	晖析結果	設計用				
積層数	応力低減	積層数	応力低減			
N	係数cn	N	係数cn			
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					
7	0.759					
8	0.754					
9	0.750	6~20	0.74			
10	0.748					
15	0.746					
20	0.751					

- 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.
- 奥山雄介,宮下剛,長井正嗣,若林大,小出宣央, 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調査発表会論文集, pp.60-63, 2012.
- 宮下剛,長井正嗣:一軸引張りを受ける多層の 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.
- 石川敏之,宮下剛,László Gergely VIGH:一軸引張 を受ける CFRP 板接着鋼板に生じる応力の高精度解 法,土木学会論文集 A1, Vol.69, No.1, pp.89-100, 2013.
- 若林大,宮下剛,奥山雄介,秀熊佑哉,小林朗,小 出宜央,堀本歴,長井正嗣:食した各種鋼部材に対 する CFRP を用いた新たな補修設計法の提案,土木 学会論文集 F4,投稿中.
- 12) 高速道路総合研究所:炭素繊維シートを用いた鋼構 造物の補修・補強工法設計施工マニュアル, 2013.

# UNIAXIAL TENSILE TEST OF STEEL PLATE BONDED CFRP SHEET THROUGH HIGH-ELONGATION AND LOW ELASTIC PUTTY

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

The objective of this study is to investigate the utilization of high-elongation and low elastic putty as standard specification in a repair method using CFRP sheet for crroded steel members subject to axial force or normal stress under bending. If it is aimed to reduce stress level in a steel member such as the case when the putty is not used, necessary bond length of CFRP sheet is too long. Therefore, considering workability and so on, a new stress reduction factor is introduced to conventional design. In order to decide the factor, parametric analysis is performed using a numerical calculation method proposed by first author. After comprehending the influence of parameters, the factor in the repair design is determined.