CFRP接着鋼板の欠損端のテーパ形状および低 弾性パテが応力低減効果および剥離に及ぼす影 響

 秀熊
 佑哉¹・宮下
 剛²・Pham Ngoc Vinh³・濱
 達矢⁴・小林
 朗⁵

 ¹正会員
 新日鉄住金マテリアルズ株式会社(〒103-0024
 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

 E-mail: y-hidekuma@nck.nsmat.co.jp

 ²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

 ³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: s103305@stn.nagaokaut.ac.jp

 ⁴学生員
 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: s113296@stn.nagaokaut.ac.jp

 ⁵正会員
 新日鉄住金マテリアルズ株式会社(〒103-0024
 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

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

腐食鋼板の補修方法として、断面欠損分の引張剛性と同等以上の引張剛性のCFRPを接着し、性能を回 復させる補修方法が一般的に行われているが、このように補修された部位であっても、健全まで回復しな い場合が報告されている.著者らは、欠損部の残存率の逆数のCFRPを接着することで、健全と同等以上 まで回復させる簡易的な設計方法を提案してきた.しかし、積層数が多くなることや、欠損部からの剥離 が発生するなどの課題がある.そこで本研究では、欠損端にテーパを設けることや、鋼材とCFRPの間に 低弾性パテ層を設けることで、剥離発生応力を向上させることを目的とし、テーパ形状および低弾性パテ 層が欠損部の応力低減およびCFRPの剥離に及ぼす影響について実験およびFEAにより検討を行った.

Key Words : Steel structure, Corrosion, Repair, CFRP, Bonding

1. はじめに

断面欠損を有する鋼板の補修方法として,軸力を受ける部材の場合,断面欠損分の引張剛性と同等以上の引張 剛性の炭素繊維シートを接着し,欠損部の剛性を健全部 と同等以上まで回復させる補修方法が一般的に行われて いる¹⁾.しかし,このように補修された部位であっても, 健全部まで回復しない場合が報告されている^{2,3}.

そこで、著者らは、欠損部の残存率の逆数のCFRPを 接着することで、断面欠損部の引張剛性を健全部と同等 以上まで回復させる簡易的な設計方法を提案し、実験お よび数値計算手法によりその妥当性を検討してきた⁴. しかし、欠損量が多くなると、CFRPの必要積層枚数が

多くなってしまうことや、欠損部からの剥離が発生する などの課題がある.そこで、本研究では、欠損端にテー パを設けることで、応力低減効果の改善および剥離発生 応力を向上させることを目的とし、テーパ形状が欠損部 の応力低減およびCFRPの剥離に及ぼす影響について実験およびFEAにより検討を行った.

また、CFRPの剥離防止としては、文献5)のように、 低弾性のポリウレアパテを鋼材とCFRPの間に挿入する 方法があり、欠損の無い鋼板の引張試験においてその効 果が確認されている.そこで、両面にポリウレアパテを 介してCFRPを接着した断面欠損を有する鋼板の引張試 験を行い、ポリウレアパテがCFRPの剥離に及ぼす影響 についても実験およびFEAにより検討を行った.

2. 実験概要

(1) 材料

テーパ形状の影響および、ポリウレアパテの影響の検討に使用した鋼材、炭素繊維および樹脂材料の物性値を それぞれ表-1、表-2、表-3に示す.

鋼材はテーパ形状の影響の検討用にはSM570,ポリウ

鋼種	弾性率(GPa)	降伏点(MPa)	備考
SM570	200	540	テーパ検討用
SS400	200	317	ポリウレア検討用

表-2	炭素繊維補強材の物性	
衣-2	火 杀 秋 死 田 四 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1	

炭素繊維	弾性率(GPa)	強度(MPa)	設計厚(mm)
ストランドシート (FSS-HM900)	710	2960	0.429
シート(FTS-C8-30)	701	2875	0.143

表-3 樹脂材料の物性

樹脂	弾性率(MPa)	備考
FP-N9	3215	エポキシ用プライマー
FB-E9S	2533	ストランドシート用、欠損部充填用
FP-E9P	2757	炭素繊維シート用
FP-UL1	-*	ポリウレア用プライマー
FU-Z	68	ポリウレアパテ,伸び率400%以上

※溶剤系のため測定不可

No.	ポリウレア	欠損端の形状	検討方法
S2TN	—	直角	実験及び FEA
S2T3	_	テーパ 1:3	実験及び FEA
S2T5	_	テーパ 1:5	実験及び FEA
S2T10	_	テーパ 1:10	FEA
S2TC	_	R仕上げ R3mm	FEA
T6N	無	直角	実験及び FEA
T6P	有	直角	実験及びFEA

表-4 試験体一覧

レアの影響の検討用にはSS400をそれぞれ用いた. CFRP 補強材としては、炭素繊維ストランドシート(写真-1) と炭素繊維シート(写真-2)を用いた. それぞれのシー トの鋼材との弾性率比は3.5であり、弾性率比と設計厚 から、炭素繊維ストランドシートは1層あたり1.5mm、 炭素繊維シートは1層あたり0.5mmの鋼材に相当する.

樹脂は、炭素繊維ストランドシート接着および欠損部 充填用にエポキシ樹脂パテ材FB-E9Sを使用し、炭素繊 維シートの含浸接着用にはエポキシ樹脂FR-E9Pを使用 している.また、剥離防止用のポリウレアパテFU-Zは 表-2に示すように、低弾性高伸度な特性を有している. また、鋼材との間にはそれぞれエポキシプライマーFP-N9およびウレタンプライマーFP-UL1を塗布している. 詳細な施工工程は本章第3節に示す.

(2) 試験体

図-1,図-2に示すように、試験体には、中央の両面に 機械加工により長さ300mm,深さ3mmの断面欠損が導入 された、厚さ12mmおよび9mmの鋼板を用いている.欠 損部の残存率は、テーパ検討用の12mm鋼板が50%、ポ



写真-1 炭素繊維ストランドシート



写真-2 炭素繊維シート



写真-3 引張試験の様子

リウレア検討用の9mm鋼板が33.3%となっている.

炭素繊維シートまたは、炭素繊維ストランドシートは 欠損を覆うように両面に接着されている.欠損部は炭素 繊維ストランドシートの接着に用いたパテ状の樹脂によ り充填されている.シートの層数は、シートの引張剛性 が、欠損部の鋼材の引張剛性と同等以上となるように決 定される.鋼材幅とシート幅を同等とすると、鋼材3mm を補うシート層数はそれぞれ、炭素繊維ストランドシー ト2層、炭素繊維シート6層となる.また、各試験体のシ ートの定着長はそれぞれ150mm、200mmとした.試験は 写真-3に示すように、単純引張によりシートが完全に剥



図-2 ポリウレア検討用試験体

離または破断するまで載荷を行った.

試験体一覧をに表-4示す.Sシリーズはテーパ検討用, Tシリーズはポリウレア検討用としており,そのあとの 数字はストランドシートまたは炭素繊維シートの積層数 を示している.Sシリーズでは,テーパ無し(直角)か らテーパ1:3,1:5,1:10,R3mmについて実験または FEAにより検討を行った.Tシリーズでは,テーパの無 い試験体を用いて,ポリウレアパテの有無の影響につい て,実験とFEAにより検討を行った.

(3) 施工工程

テーパ検討用およびポリウレア検討用の試験体の施工工 程を以下に示す.

a) テーパ検討用

シート接着面をディスクサンダーにてケレンし, 錆を 除去したのち, エポキシプライマーFP-N9を塗布. 乾燥 後, ストランドシート用エポキシ樹脂FB-E9Sを用いて, 欠損部の充填とストランドシート接着を同時に行う.

b) ポリウレア検討用

シート接着面をディスクサンダーにてケレンし, 錆を 除去したのち, エポキシプライマーFP-N9を塗布. 欠損 部をストランドシート用エポキシ樹脂FB-E9Sを用いて, 健全部と平滑になるように成形. 乾燥後, ウレタンプラ イマーFP-UL1を塗布し, 更に乾燥後, ポリウレアパテ FU-Zを塗布する. ポリウレアの乾燥後, エポキシ樹脂 FR-E9Pを用いて炭素繊維シートを含浸・接着を行う.

(4) FEAの概要

FEAモデルは、試験体の対称性を考慮して1/4モデルと する.要素は、2次アイソパラメトリック三角形平面応 カ要素を使用した. CFRP部は接着樹脂(弾性係数: 2533MPa,厚さ:0.517mm,ポアソン比:0.4)とストラ ンドシートまたは炭素繊維シートを交互にモデル化して おり、欠損部は充填された接着樹脂をモデル化している. また、ポリウレアパテは、弾性係数:68MPa,塗布厚: 0.8mm,ポアソン比:0.49としている.FEAでは、実験 を行う5ケースに加えて、テーパ検討用に欠損端の形状 をテーパ1:10およびR3mmに仕上げた場合についても検 討を行った.

3. 結果と考察

(1) 補強効果

図-3、図-4に引張試験より得られたテーパ検討用の S2T3とS2T5の荷重-ひずみ線図を示す.同図において測 定点は,無補強部、シート定着部中央,欠損端部境界付 近の健全側および欠損側,欠損部の中央の鋼材部5点で あり,それぞれ両コバ面の測定値を平均化している.ま た,健全部理論値と欠損部理論値は,それぞれ健全部鋼 材または欠損部鋼材とシートとが完全合成断面として計 算した値である.同図より,両者ともシート定着部中央, 欠損端部境界付近の健全側および欠損部の中央では,理 論値と実験値が一致していることがわかる.しかし,欠 損端部の欠損側では,健全部よりひずみが大きくなって いることがわかる.これは,無補強のケースS2TNにつ いても同様であり,文献4)でも報告されている現象であ る.欠損端部に1:3,1:5のテーパ加工を施しても同様 の現象がおこることが確認された.

また、図-5にFEAによる各ケースの鋼材中央の応力比 (健全部鋼材応力 σ_{sn} で無次元化)分布を示す. 同図よ り、テーパ1:10、R3mmを含むすべてのケースにおい



て、欠損端での応力比が1.0を越えていることがわかる. これらの結果より、欠損端部の形状は、欠損端部の応力 低減には大きな影響を与えないことがわかる.欠損部全 域で応力度比を1.0以下にするためには、文献4)で提案さ れている、鋼材の残存率の逆数倍の剛性のシートを接着 する手法が有効である.

図-6, 図-7にポリウレア検討用のT6NとT6Pの荷重-ひず み線図を示す.ここで,図-7の欠損部補強理論値は,低





写真-4 シートの剥離 (S2TN)



写真-5 充填樹脂のひび割れ(T6P)

表-5 Sシリーズの剥離荷重

No.	剥離荷重(kN)	剥離時の健全部鋼 材応力 (MPa)
S2TN	148.1	205.7
S2T3	187.8	260.8
S2T5	194.4	270.0



図-8 FEAによる各ケースのせん断応力分布



図-9 FEAによる各ケースの厚さ方向の主応力分布

弾性であるポリウレアを挿入したことによる,せん断遅 れに起因する補強効果のロスを,文献5)で提案されてい る応力低減係数を用い計算した理論値である.同図より, 欠損部中央のひずみは,T6N,T6Pともに理論値とよく 一致していることがわかる.欠損端部の欠損側のひずみ に注目すると,T6Pの方が大きくなっていることがわか る.これはポリウレアパテによるせん断遅れが原因であ る.また,両試験体とも健全部の降伏荷重前に欠損端部 で降伏が生じているが,シートが剥離することなく,健 全部の鋼材が降伏に至っていることがわかる.

表-6 Tシリーズの終局荷重と破壊形態

No.	欠損端部	剥離·破断	破壞形態
	降伏荷重(kN)	荷重(kN)	
T6N	115.1	170.4	CFRP破断
T6P	111.7	174.1	CFRP剥離



(2) 破壊様式と終局荷重

テーパ検討用はすべてのケースにおいて、写真-4のよ うにシートが剥離し終局となった.表-5に各ケースの剥 離荷重を示す. 同表より, 欠損端部にテーパを設けるこ とによって、剥離荷重は向上していることがわかる. 1:3のテーパでは、25%程度、1:5のテーパでは30%程 度, テーパ無の場合と比べて剥離荷重が向上している. ここで、図-8、図-9にFEAによる1層目の接着樹脂に作用 するせん断応力と、 欠損端部の接着層の厚さ方向の主応 力分布を示す.図-8より欠損端部のせん断応力はテーパ により若干低減するものの,いずれもCFRP端部のせん 断応力より小さいことがわかる.図-9より、接着層の主 応力はテーパを設けることにより大幅に低減しているこ とがわかる.これらの結果より、欠損端部にテーパを設 けることにより, 接着面のせん断応力および接着樹脂に 発生する垂直応力が低減し、剥離耐力が向上したものと 考えられる.

ポリウレア検討用の両試験体とも,表-6に示す欠損部 端部の鋼材降伏後から,欠損端部付近の充填樹脂に厚さ 方向にひび割れが発生した. (写真-5) その後,シート が剥離せずに健全部鋼材の降伏に至ったが,降伏後も載 荷し続けた結果,表-6に示すように,ポリウレアパテ無 ではCFRPの破断が,ポリウレアパテ有ではCFRPの剥離 が発生した.

ポリウレアパテの有無による破壊形態の違いを明らか にするために、FEAによる検討を行った.図-10、図-11 に実験およびFEAによる各ケースの鋼材中央および CFRP表面の応力分布を示す.これらの図より、ポリウ レアパテ無のケースでは、実験結果、FEAともにCFRP の欠損端付近で応力が集中していることがわかる.これ により、CFRPの破断に至ったと考える.一方で、ポリ ウレアパテ有では、CFRPに応力集中が発生していない. これは、低弾性であるポリウレアパテにより応力集中が 緩和されたためと考える.また、図-12に一層目のCFRP のせん断応力分布を示す.この図より、パテ材を挿入す ることで、エポキシ樹脂のせん断応力比が著しく低減し、 欠損部のせん断応力集中を防止する効果があることがわ かった.

4. まとめ

急激な断面欠損を有する鋼板のCFRP接着補強におい て、欠損端にテーパを設けることや、鋼材とCFRPの間 に低弾性パテ層を設けることで、剥離発生応力を向上さ せることを目的とし、テーパ形状および低弾性パテ層が 欠損部の応力低減およびCFRPの剥離に及ぼす影響につ いて実験およびFEAにより検討を行った.得られた知見 を以下に示す.

(1) テーパ形状の影響

欠損端をテーパやR形状に整形しても、欠損部の応力 低減効果にはほとんど影響を与えないが、CFRPの剥離 荷重は、1:3のテーパ状に整形することで25%程度、 1:5のテーパで30%程度向上した.

(2) ポリウレアパテの影響

鋼材とCFRPの間に低弾性のポリウレアパテを挿入す ることにより、欠損端での応力集中が緩和され、CFRP の剥離・破断を防ぎ、CFRPの性能を最大限に活用する ことができる.

参考文献

- 杉浦、小林、稲葉、本間、大垣、長井: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.
- 立石,横田,岩波,加藤,小林,戴:水中施工の可 能な FRP を用いた港湾鋼構造物の補強実験,構造工 学論文集, Vol.56A, pp.644-655, 2010.
- 石川,北根:断面欠損を有する鋼板の接着補修に必要な CFRP 板の長さおよび板厚の決定方法,応用力 学論文集, Vol.13, pp.912-920, 2010.
- 4) 秀熊,小林,宮下,奥山,石川:断面欠損を有する 鋼板の炭素繊維ストランドシート接着による補修方 法,土木学会第68回年次学術講演会,I-340,2013.
- 5) (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.

EFFECTS OF LOW ELASTIC PUTTY AND TAPERED SHAPE OF MISSING END ON DEBONDING AND STRENGTHENING EFFECT IN CFRP BONDING STEEL PLATE

Yuya HIDEKUMA, Takeshi MIYASHITA, Pham NGOC VINH, Tatsuya HAMA and Akira KOBAYASHI

As a repairing method for corroded steel members, a method to bond the carbon fiber sheets with resin to the steel member had been developed. However, some papers reported that the debonding of CFRP occur from the defect part caused by stress concentration at the end of defect. Therefore, in this study, in or-

der to reduce the stress concentration at the end of defect, the effects of the shape of taper at end of defect and the effect of low elastic polyurea putty on the dedonding are considered. As the result, it is found that the taper at end of defect and the low elastic polyurea putty between steel and CFRP were effective in relieving stress concentration.