

(38)トラス橋ガセットプレート腐食部のCFRPによる補修工法に関する実験的研究

原田 拓也¹・大垣 賀津雄²・宮下 剛³・
奥山 雄介⁴・秀熊 佑哉⁵

¹正会員 高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）
E-mail: t.harada.ab@ri-nexco.co.jp

²正会員 ものつくり大学 建設学科（〒361-0038 埼玉県行田市前谷333）
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1）
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 長野工業高等専門学校 環境都市工学科（〒381-8550 長野県長野市徳間716）
E-mail: y_okuyama@nagano-nct.ac.jp

⁵正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部（〒103-0027 東京都中央区日本橋1丁目13-1）
E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

近年、腐食による鋼トラス橋の損傷が問題となっている。腐食の多い部位としては、下弦材および下弦材と斜材等を接合するガセットプレートである。このうち、特にガセットプレート部の損傷は、トラス橋では落橋につながる可能性があり、早期に補修する必要がある。ガセットプレートの腐食は、主に下弦材の上フランジとの交差部の内側で発生しており、狭隘な部位である。このような腐食による鋼板の補修では、部材の交換や当て板によるものが一般的であるが、重機の使用や足場上の作業となるため時間とコストを要する。本研究では、下弦材の上フランジとの交差部が腐食した格点ガセットプレート部の強度を改善させるために、軽量かつ作業性の良い材料である炭素繊維シートを貼付け、その効果を載荷実験により確認した。

Key Words : CFRP sheet, truss bridge, gusset plate connection, repair method

1. はじめに

東、中、西日本高速道路株式会社の管理する高速道路橋は、経過年数の増大、車両の大型化、凍結防止剤の累積散布量の増大から健全度の低下が見られる。特に高度経済成長時代の鋼橋はプレートガーダーが主流であるが、比較的支間長が長くなると上路トラス橋を採用していた。これらのトラス橋では上弦材に床版を固定しており、その床版や床組みを点検するため検査通路は上方に設置されていたりなど、限定された通路しか確保されていないことから、通常下弦材側の細部についての点検は容易ではない。

近年、近接目視点検において、下弦材格点部のガセットプレート内側溶接部の腐食、および下弦材角溶接部の腐食が多数報告されてきている。これらの原因は上弦材

に比べて雨水などが吹き込みやすい部位であること、斜材などに比べて滞水しやすい部位であることなどである。

このような部位での腐食対策としては、一般的には当て板による補修工法が考えられるが、トラス橋の下弦材は箱型の断面であるため、特殊なボルトが必要であり、



図-1 ガセットプレート腐食事例（ガセット内側）

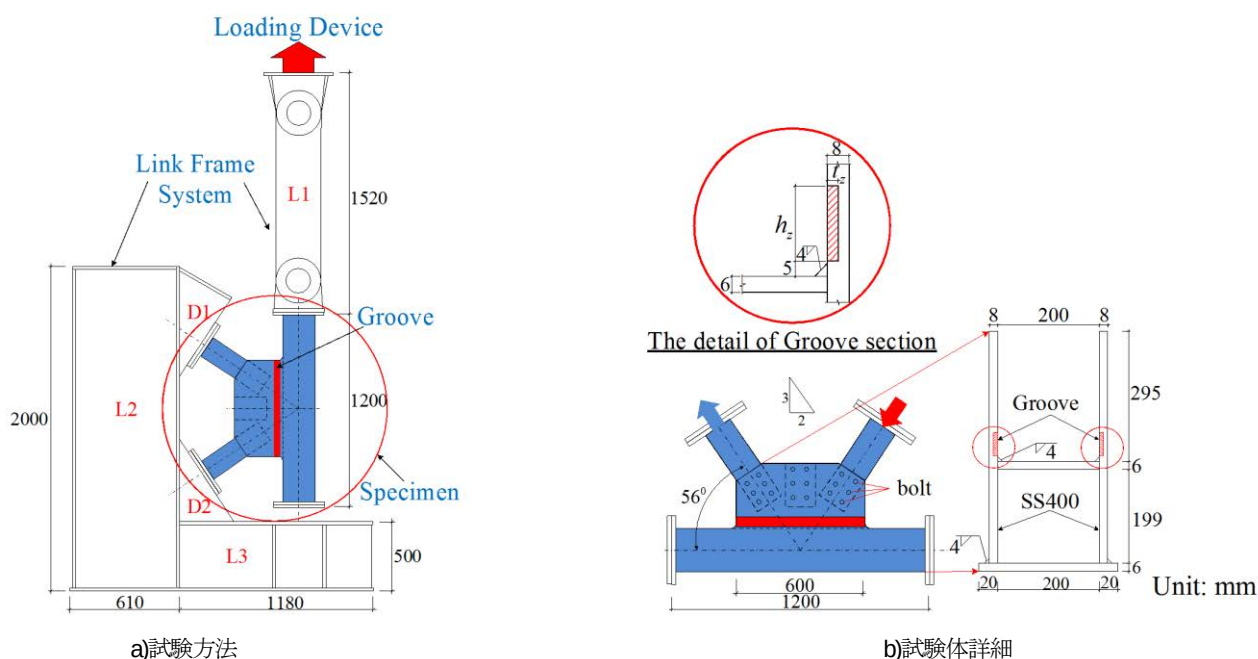


図-2 試験概要図

孔明け等の加工も伴うことになる。

このほか、高速道路会社では構造物の補修・補強材料として、炭素繊維シート（以下、CFRP シートという）がある。CFRP シートは鋼材に比べ、高弾性・高強度、軽量であり、腐食しないといった材料特性を有している。また、含浸・接着樹脂を用いて CFRP シートを接着することで、大掛かりな施工機械や特殊技能が不要であり、鋼材への溶接による熱影響やボルト孔の欠損もない。

過去の研究において、CFRP シートの適用部材として、軸方向力を受ける部材、支点反力を受ける部材、せん断力を受ける部材に対する補修・補強工法の設計施工マニュアル¹⁾をまとめている。しかしながら、トラス橋ガセットプレート部の腐食に対する補修工法については、定着長が確保出来ない形状であり、主応力方向も単純ではないため対象外としている。

本検討では、補修・補強材料として、炭素繊維シートの適用範囲拡大を目指し、下弦材格点部のガセットプレート内側溶接部近傍の腐食に対して CFRP シートによる補修が適用できるかを確認する。そのために、トラス橋の格点部を模擬した試験体に CFRP シートを接着して耐力試験を実施した。

2. 試験概要

(1) 試験方法

本検討では、実験装置の最大荷重の関係もあり図-2に a)示すように、リンクフレームを設けた載荷方法で実験を行うものとし、試験体の大きさは実橋の1/2サイズの模型とした。そして、腐食を模擬した断面欠損をガセットプレートと下弦材上フランジを接合する箇所に溝部（以下ザグリと呼ぶ）を切除することにより表現した。載荷実験は、載荷終了後に供試体のみを交換し、載荷治具は、その後の実験にも用いるものとした。

また、ガセットの圧縮側の軸力が加わる側の下弦材上フランジ溶接を欠損（ガセット中央から斜材圧縮側の溶接を欠損）させた試験体についても、補修前後の耐力を確認した。

(2) 試験体

a) 試験体

格点ガセットプレート部の腐食損傷が確認された実トラス橋の形状を元に決定しており、約1/2の寸法である。下弦材部分の腹板とガセットプレートは、板一枚で一体型として構成している。ガセットプレートの部材長さ、幅、およびガセットプレートの厚さは、それぞれ1200mm、216mm、および8mmである。また、腐食による断面欠損は、ガセットプレートと下弦材上フランジを接合する箇所の高さ $h_z=25\text{mm}$ 、幅 $t_z=4\text{mm}$ のザグリ設けた。フレームと試験体の接合は高力ボルトにより行っている。各試験体の詳細を表-1に示す。

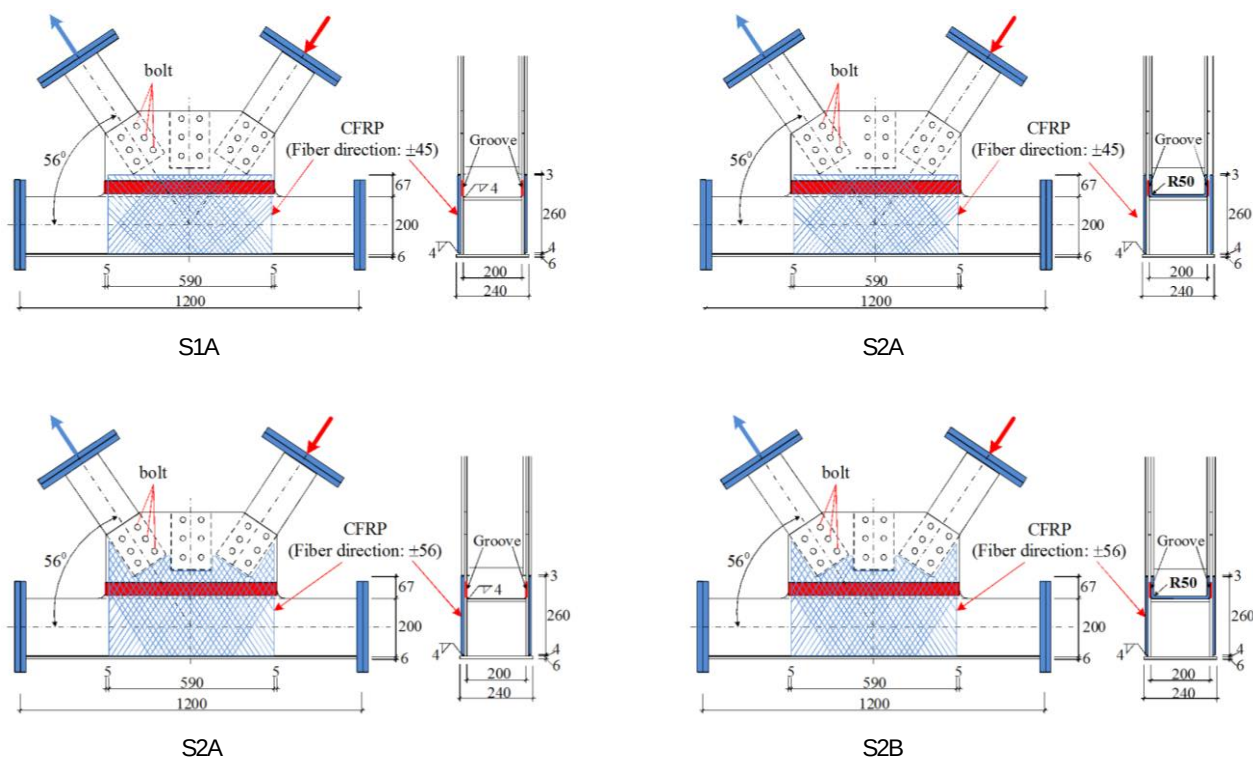


図-3 シート貼付図

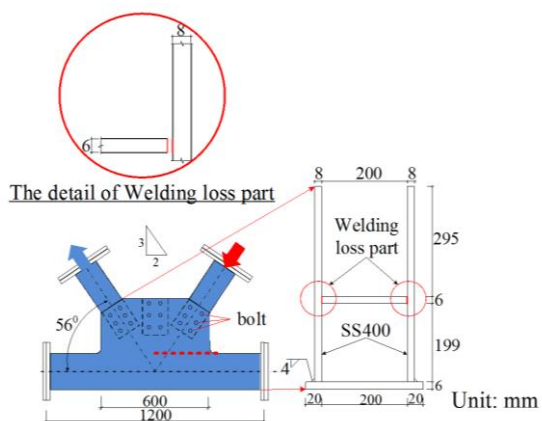


図-4 W試験体詳細図

表-1 試験体パターン

試験体	腐食模擬	CFRP 貼付け範囲	CFRP 貼付け面	CFRP 積層数
N	腐食なし	-	-	-
S	腐食あり (ザグリ)	-	-	-
S1A		矩形貼付け	外側	外側9
S2A			両側	内側4+ 外側5
S1B		斜材下 可能範囲貼付	外側	外側9
S2B			両側	内側4+ 外側5
W	腐食あり	-	-	-
W1A	(溶接欠損)	矩形貼付け	外側	外側9

b) CFRPシートと接着方法

本検討ではマニュアル¹⁾で弾性係数640GPa以上の高弾性型の一方向繊維シートにより、効率よく補強効果を得ることとしおり、高弾性型の一方向繊維シートを用いた。CFRPシートの材料特性を表-2に示す。また、CFRPシートと鋼材との接着端部で生じるせん断応力へのはく離防止の観点から、CFRPシートと鋼材との接着界面に高伸度弾性パテ材を挿入した。

表-2 CFRPシートの材料特性

CFRPシート	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	繊維目付 け量(g/m ²)
高弾性型	640	2430	300

CFRPシートの接着は以下の工程で実施した。

- ① CFRPシートの接着面をディスクサンダーでケレン
- ② 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
- ③ 高伸度弾性パテ材を塗布し、1日養生
- ④ 含侵・接着樹脂材を塗布
- ⑤ CFRPシートをセットして、ローラーで脱泡
- ⑥ 含侵・接着樹脂材を塗布
- ⑦ ④～⑥を必要枚数分繰返し

CFRPシートの積層枚数は、CFRPシートの設計厚を換算して、CFRPシートと鋼材が完全合成と仮定した場合の必要板厚からCFRPシートの積層枚数を決定した。CFRPシート1枚の鋼換算板厚は式(1)から算出される。

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

ここに、 $t_{cf,s}$ ：CFRPシート1枚の鋼換算板厚、 E_{cf} ：CFRPシートの弾性係数、 E_s ：鋼材の弾性係数、 w ：炭素繊維の繊維目付量、 ρ ：炭素繊維の密度である。本検討で用いたCFRPシートは $t_{cf,s}=0.458\text{mm}$ となる。

試験体の種類は、CFRPによる補強なしの試験体(N,S)とCFRPでガセットの外面からのみ補強した試験体(S1), ガセットの外面・内面の両側から補強した試験体(S2)とした。また、シートの貼付け範囲をCFRPを矩形での貼付け可能範囲で補強したもの(S1A,S2A)については、繊維の方向を $\pm 45^\circ$ でそれぞれの方角に必要積層数を貼り付けている。斜材下のガセット自由端部まで補強したもの(S1B,S2B)については、繊維の方向をそれぞれ2方向の斜材軸方向($\pm 56^\circ$)に必要積層数の炭素繊維シートを貼付け実施した。

さらに圧縮斜材下について腐食により溶接が欠損したケースについても、補強前後の耐力試験を実施した。



図-6 荷重試験状況

3. 試験結果

各試験体の最大斜材軸力とザグリ部近傍の降伏および座屈の発生時の軸力の試験結果は表-3の通りである。無補修の試験体においては、ザグリ部での局部座屈が発生しているが、CFRPで補修することにより、ザグリ部での局部座屈を抑えることができた。また、溶接欠損を模擬した試験体(W,W1A)については、無補修試験体においても溶接欠損による荷重の低下が5%程度であり、ガセット中心から圧縮側のみの欠損では、耐力に与える影響が小さい結果であった。よって、以下断面欠損を模擬したSシリーズについて主に考察する。

表-3 試験結果

試験体	最大斜材軸力 kN	ザグリ部降伏 kN	ザグリ部局部座屈 kN	ガセット斜材下座屈 kN
N	1634	1043	—	1150
S	1274	378	720	950
S1A	1448	540	—	1100
S2A	1348	790	—	1100
S1B	1314	323	—	1200
S2B	1386	612	—	1200
W	1547	—	—	1200
W1A	1571	—	—	1200



a) 試験体 S1A,S2A,W1A の CFRP 貼付け範囲



b) 試験体 S1B,S2B の CFRP 貼付け範囲

図-5 CFRPシートの貼付け範囲

(1) 耐力力と補修効果

試験体の最大荷重低下率は、式(2)のように断面欠損のあるケースのフレーム斜材軸力と、断面欠損の無い場合の軸力との差である。一方改善率は式(3)に示すように、補修された試験体と補修されていない試験体との間の2つの斜材軸力の差として評価した。

最大荷重低下率：

$$R_1(\%) = \frac{P_{\max} - P_{\max}^0}{P_{\max}^0} \quad (2)$$

$P_{\max}$ ：最大荷重時の斜材軸力。

$P_{\max}^0$ ：健全なケース N における最大斜材軸力

最大荷重改善率：

$$R_2(\%) = \frac{P'_{\max} - P_{\max}}{P_{\max}} \quad (3)$$

$P'_{\max}$ ：補修された試験体の最大斜材軸力

$P_{\max}$ ：断面欠損のある補修されていない試験体の最大斜材軸力

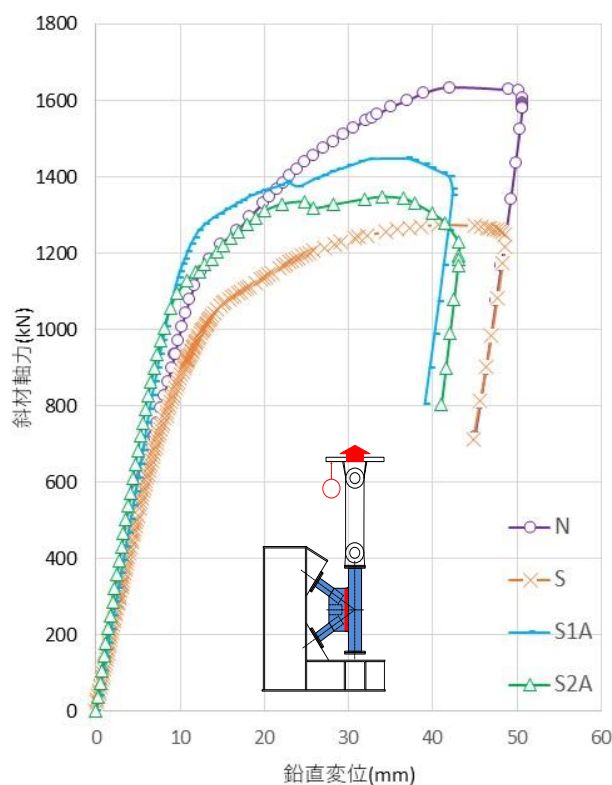
表-4 に示す結果から、補修されていない供試体 S の耐力力は、健全な供試体 N より 22.0%低下している。補修工法での最大荷重はの改善率は、3.1%~13.6%であった。最も改善率が大きかったのは S1A であったが、シートの剥離した荷重は S2B と同程度であり、その後の荷重が大きく伸びた。

表-4 最大軸力改善率

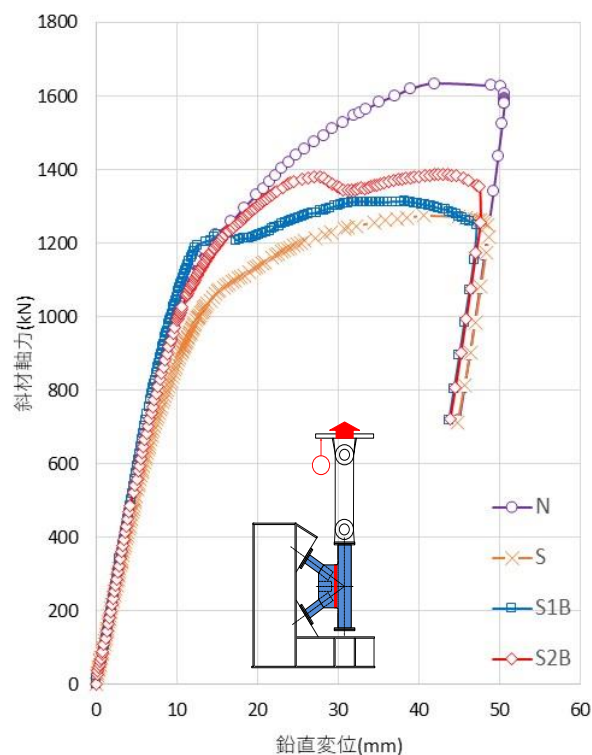
試験体	最大荷重低下率 R1 (%)	最大荷重改善率 R2 (%)
N	-	-
S	-22.0	-
S1A	-	13.6
S2A	-	5.8
S1B	-	3.1
S2B	-	8.8

(2) 荷重と鉛直変位関係

リンクフレームの鉛直変位と斜材軸力の関係を図-7.に示す。腐食を模擬した S シリーズの初期剛性は補修前後でほとんど変化しなかった。矩形にシートを貼り付けた S1A,S2A は斜材下の座屈は斜材下全面にシートを貼り付けた S1B,S2B より斜材下の座屈発生荷重は小さかったが、最大荷重は逆に大きい結果であったが、変位は健全である N と同等レベルまで荷重が低下しなかった。



a) A シリーズ



b) B シリーズ

図-7 斜材軸力-鉛直変位の関係

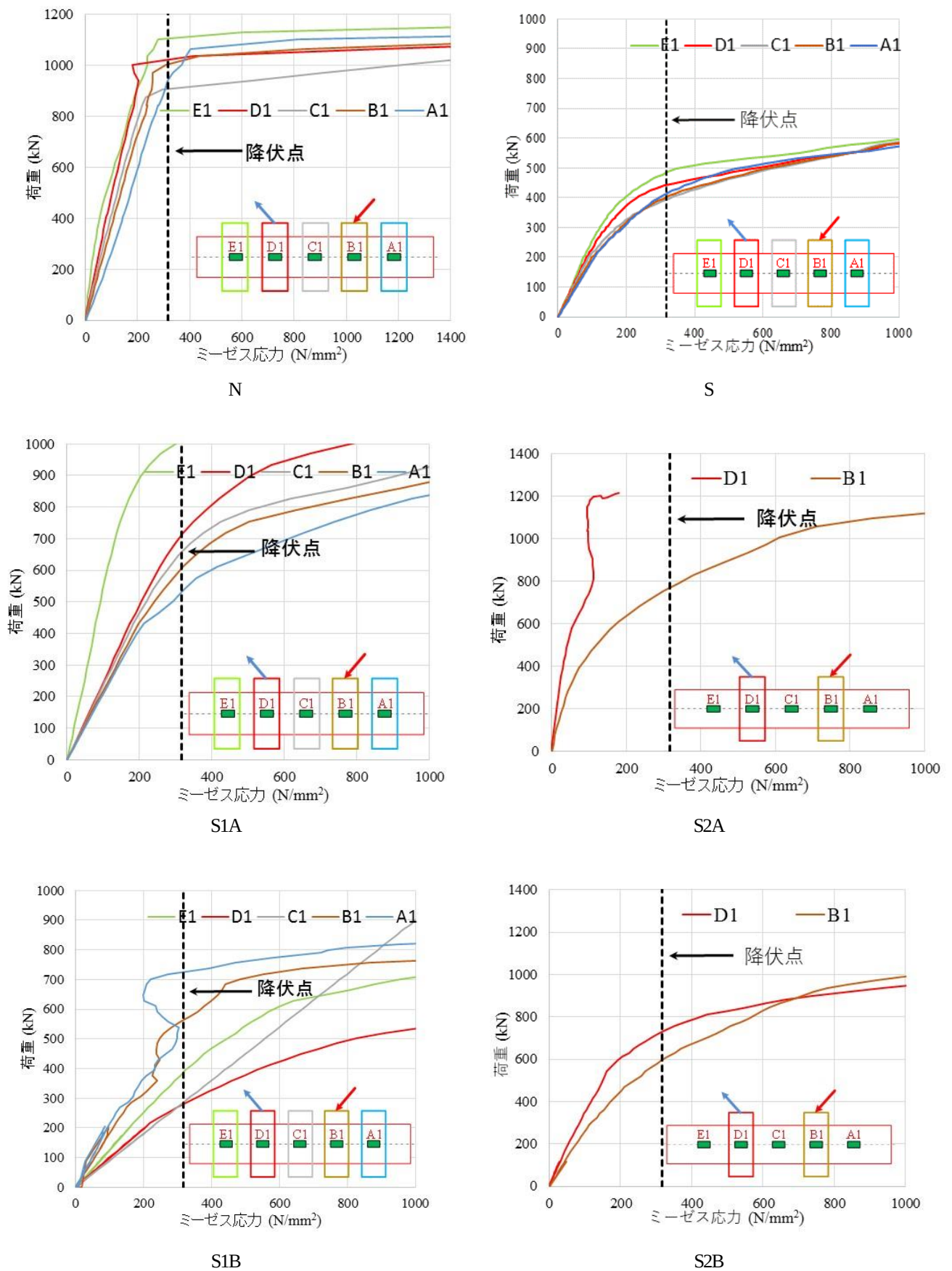


図-8 荷重－ミーゼス応力の関係

(3) ガセットプレート(鋼)の主応力

ザグリ部分の主応力の大きさと方向を調べる目的で、3軸ひずみゲージを貼付け、これらの主応力成分を、測定された三軸ひずみ値からロゼット分析により算出した主応力から計算したガセットプレート(鋼)の内面の荷重-ミーゼス応力関係を図-8に示す。ここで、降伏点に達する軸力を降伏点荷重と呼ぶ。健全試験体Nにおいて、ガセットプレートの内面の応力は、1110kNの荷重で完全に塑性化されることとなる。ザグリを設けて補修されていない試験体Sでは、ザグリ部分の降伏点荷重は378kNであった。外側補修におけるザグリ部の降伏点荷重は、S1Aで450kN、S1Bの場合は323kNであり、平均的には補強効果が見られるものの、大きな改善効果は得られていない。一方、両側から補修した試験体では、S1Aで790kN、S1Bの場合は612kNであり、無補修供試体Sより61.9%以上降伏荷重を増加することがわかる。

外側からのみの補修工法は、板厚が欠損していない面にCFRPを貼り付け、偏心曲げモーメントが大きいので、補強効果が小さかったと考えられる。また、シートの積層数が両側補修工法と比較して倍となることから、補修効率が低下していることも要因と思われる。

一方、両側補修工法では、断面欠損部の偏心曲げモーメントを改善することができたため、降伏点荷重が改善できたと考えられる。

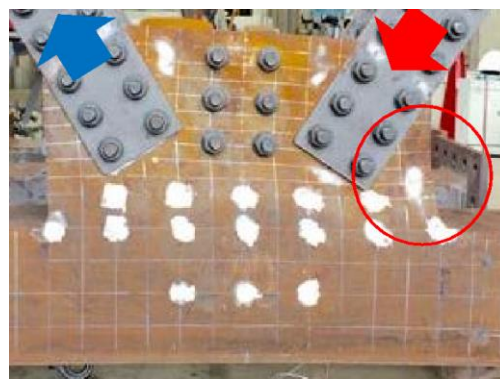
シートの貼り付け範囲に着目すると、斜材軸中心線上の圧縮応力は矩形貼付け(以下Aタイプ)の方が、斜材下まで貼付け(以下Bタイプ)より荷重に対して小さい結果となっていたが、ガセットのザグリ部全体の発生応力は、Bタイプの方がバラツキが小さい。また、表-3で示したとおりAタイプでは、Bタイプより小さい荷重でザグリ部以外の箇所でも局部座屈が発生している。

(4) 試験体の破壊の状況

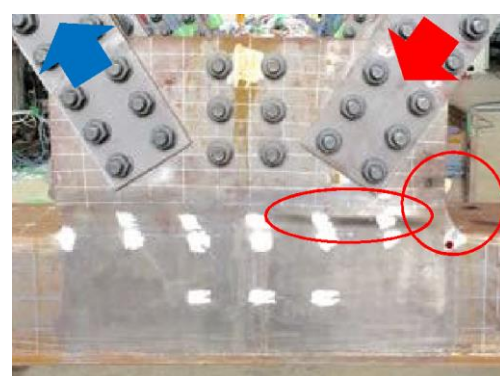
図-9は各試験体の載荷試験後の状態である。健全であるN試験体は、斜材下のガセット(赤丸部)の自由端部で座屈が発生しており、図-10で示した軸力と鉛直変位の関係も、勾配が急激に変化している。一方、腐食を模擬したS試験体は斜材軸の下側で、減肉部の局部座屈が先行して発生した。その後、斜材下自由端部の局部座屈とザグリ部のせん断座屈が生じている。

矩形にシートを貼り付けたS1A,S2A試験体は、いずれもザグリ部での降伏後、ガセットの自由端部で座屈変形が生じており、この変形に伴いCFRPシートとガセットプレートの剥離が生じて破壊に至った。

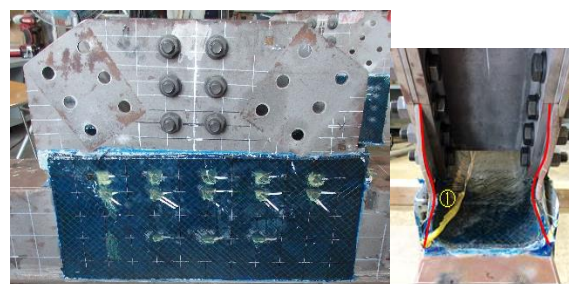
ガセットの自由端部まで補強したS1B,S2Bは、最終的にはCFRPシートの剥離が生じたものの、ガセットの座屈荷重が改善され、自由端部の変形も小さく抑えられた。



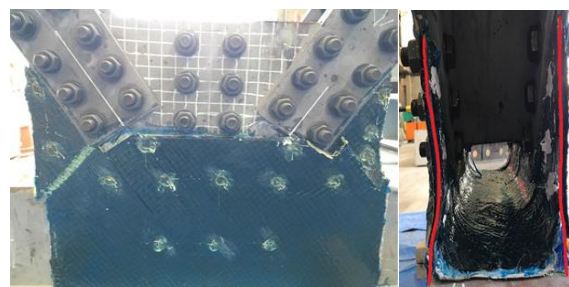
N



S



S2A



S2B

図-9 試験体の破壊状況

(5) 補強効果の評価

表-3はそれぞれの供試体のガセットプレートの破壊状態に達した時の斜材軸力と、ザグリ部での降伏点、ザグリ部での局部座屈、圧縮斜材下のガセットプレートの局部座屈を示している。同表に示した関係から、最大荷重発生前にガセットの座屈が発生しており、変位も増大してガセットとしての機能が大きく失われる。腐食したケースにおいてはザグリ部が座屈し、健全なものでは斜材下に局部座屈が発生している。自由端部を含めたCFRPシートによる補修を実施することにより、この座屈荷重は健全ケースまで改善されており、自由端部の変形はCFRPの剥離を促すことから、試験体のBタイプの補修範囲を適用した方がよい。

ザグリ部の降伏荷重をみると、両面補修であるS2の補強効果が大きいことがわかる。これは、弾性域での補強効果は、マニュアル¹⁾に記載している軸力部材と同様に、片側層数が増えるにしたがって補強効果が低減されるため、片側貼付け層数が少なくなる両面補強の効果の方が大きくなったと考えられる。図-10にザグリ部の斜材軸方向のひずみについて、Bタイプで補強した結果を示しており、この結果からも両面からシートを貼付けた工法(S2B)の方が補強効果が高いことがわかる。

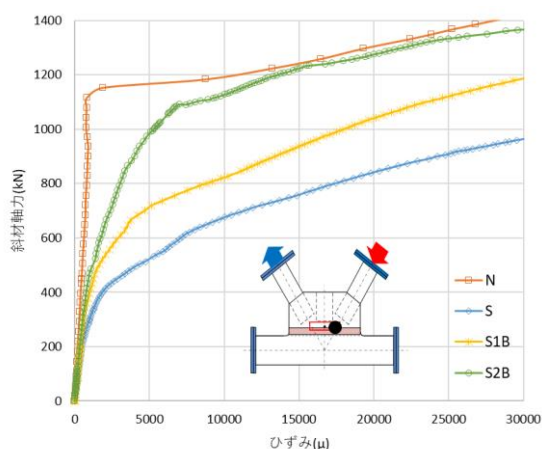


図-10 斜材軸方向のひずみ

また、当該補修箇所は定着長が十分確保できていないため、健全時と同等の補修効果を得るのが難しかったものと考えられる。今回の試験体の定着長は、付着部端部に対して100mm程度の定着しか確保されていない。この場合の低減係数を参考文献²⁾によって算出すると、5層で0.2程度であることから、鋼換算板厚1mm相当の補強をしたこととなり、降伏荷重の増加率とほぼ一致する。試験では低減係数を考慮しない剛性比での鋼換算板厚相当のCFRP補強をすることで、ガセットの変形が生じる座屈荷重を改善することが確認されたが、トラス橋におけるガセットは、橋梁全体としてもクリティカルとなる部

材であることから、その重要性を鑑みて、施工可能な定着長に対して低減係数を設けることによって、弾性域での補強効果も確実に確保することが望ましい。

なお、道路橋示方書³⁾で今回の形状で設計される斜材軸力を算出すると560kNであり、座屈荷重に対して十分に余裕があるものである。また、両面補修することでザグリ部についても降伏に至っていない。

4. まとめ

本研究では、腐食したガセットプレート接合部にCFRPシートを用いて、外側のみ接着する工法と腐食部分の偏心を少なくするため、両面から接着する工法の2つの補修工法について、その有効性を確認した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- ・ ガセットプレート接合部の腐食による初期剛性の大幅な低下とガセットプレートの面外変形の増大が確認された。
- ・ ガセットプレート接合部の腐食によって、ガセットプレート接合部の耐荷力の低下が明らかになった。
- ・ CFRPシートによる補修を行うことにより、初期剛性は損傷がないレベルまで回復した。さらに、腐食したガセットプレート接合部の面外変位を防止できることも確認した。
- ・ 斜材の自由端端部と垂直材端部までCFRPシートを貼り付けて補修することにより、圧縮斜材下のガセットプレート域における局部座屈変形を抑え、CFRPシートの剥離を抑制し座屈耐力が健全レベルまで回復した。
- ・ CFRPシートによる補強をすることにより、ガセットプレートの腐食部分の降伏点に至る荷重を増加させることができた。また、両面接着工法では、断面欠損部の偏心曲げモーメントを改善することができた。
- ・ 圧縮側ガセットプレートの溶接線が欠損した場合の耐荷力低下は5%程度と小さい結果であった。

今後これらの試験結果を踏まえて、ガセットのCFRPシート補修時の貼付け範囲、設計手法を検討するとともに、最終確認する予定である。その際、CFRPシートの定着長の考え方について再度整理を行い、十分な安全性を確保できるように検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 株式会社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.
- 2) 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用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.5，pp.II_23 - II_38，2015
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，pp.366-368，2012.

(Received August 30, 2019)

EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIR METHOD USING CFRP FOR CORRODED GUSSET PLATE CONNECTION IN TRUSS BRIDGE

Takuya HARADA, Kazuo OHGAKI, Takeshi MIYASHITA,
Yusuke OKUYAMA and Yuya HIDEKUMA

Recently, severe damage to gusset plate connection of steel truss bridges owing to corrosion has been widely reported. The attachment of stiffening plate and member replacement are some of traditional methods often applied to repair corroded structures. However, these repair works lack in workability because of heavy machinery and welding facilities. In order to overcome this problem, this study focused on investigating the effectiveness of repair method by using carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for the corroded gusset plate connection.

In this study, the remaining load-carrying capacity of a corroded gusset plate connection was evaluated by using loading test.