(70) 鋼トラス橋の下弦材腐食部に対するCFRP補修に関する研究

奥山 雄介¹・広瀬 剛²・宮下 剛³・秀熊 佑哉⁴・小林 朗⁵・大垣 賀津雄⁶

¹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

²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.hirose.ac@ri-nexco.co.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 新日鉄住金マテリアルズ コンポジットカンパニー (〒104-0061 東京都中央区銀座7丁目16-3) E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nsmat.nssmc.com

⁵正会員 新日鉄住金マテリアルズ コンポジットカンパニー (〒104-0061 東京都中央区銀座7丁目16-3) E-mail: kobayashi.hr7.akira@nsmat.nssmc.com

> ⁶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

鋼トラス橋では、下弦材のウェブと下フランジの溶接線に沿った腐食が発生することがある.このよう な損傷に対しては、アングル材をワンサイドボルトで添接する工法が用いられているが腐食範囲が広く、 すべての箇所に適用するには非合理的であり、より施工性に優れた工法の適用が望ましい.そこで、本研 究では、炭素繊維シート接着工法の適用について検討する.ここでは、トラス橋下弦材を模した箱型断面 の供試体に、腐食を模擬した断面欠損を与え、炭素繊維シートを貼り付ける.連続トラス橋の中間支点部 等を想定して、圧縮試験により補修効果を検討する.本試験により、炭素繊維シート接着工法を適用する ことで健全時の耐力まで概ね回復することを確認した.

Key Words: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), Steel truss bridge, Repair, Maintenance

1. はじめに

鋼トラス橋では、下弦材のウェブと下フランジの溶接 線に沿った腐食が発生することがある.このような損傷 に対しては、アングル材をワンサイドボルトで添接する 工法が用いられているが、腐食範囲が広く、すべての箇 所に適用するには非合理的であり、より施工性に優れた 工法の適用が望ましい.そこで、炭素繊維シート接着工 法の適用について検討する.本工法は、腐食損傷に対し ては高速道路総合技術研究所によりマニュアル化¹⁾され ている.しかしながら今回対象とする部位については言 及されておらず、本研究によりマニュアルの適用範囲の 拡大が期待できる.

一方,現行の道路橋示方書²⁾(以下,道示と示す)では,圧縮力を受ける板の基準耐荷力曲線は,以下の式で 規定されている.

$$\sigma_{cr} / \sigma_y = 1.0 \qquad (R \ge 0.7)$$

$$\sigma_{cr} / \sigma_y = 0.5 / R^2 \qquad (R < 0.7) \qquad (1)$$

ここで, *R* は幅厚比パラメータであり, 以下の式で与えられる.

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{y}}{E} \frac{12(1-v^{2})}{\pi^{2}k}}$$
(2)

ここで, *b* は板幅, *t* は板厚, σ_y は降伏応力, *E* は弾性 係数, *v* はポアソン比, *k* は座屈係数 (両端支持版では 4.0)である.

しかし、これらの基になった実験では、板の両側を隅 肉溶接した箱型断面や H 型断面が用いられており、本 研究で対象とするトラス橋の下弦材断面とは溶接形状が 異なり、片側だけの隅肉溶接となっていることが多い. そのため、固定条件が弱い可能性があり、耐荷力の確認

70-1



図-1 供試体寸法

表-1 試験ケース

試験体 番号	欠損部寸法		炭素繊維シート
	欠損高さ Bz	欠損板厚tz	積層数
N	-	-	-
A-1	15 mm	3.0mm (50%欠損)	-
A-2			7層
B-1	- 30 mm	4.5 mm (75%欠損)	-
B-2			10 層

が必要と考えられる.

そこで、本研究では、トラス橋下弦材を模した箱型断 面の供試体に、腐食を模擬した断面欠損を与え、圧縮試 験を実施する.これは、断面欠損を生じた箇所では、引 張破断よりも、局部座屈の発生による強度低下の影響の 方が大きいと考えられるため、連続トラス橋の中間支点 部付近をを想定している.ここでは、圧縮試験により補 修効果を検討した結果について報告する.

2. トラス橋下弦材供試体の圧縮試験

2.1 供試体概要

本研究で使用する供試体は, 鋼種 SS400(降伏応力 G,= 351 MPa), 断面寸法は 図-1 に示す通りである. 実橋の 1/2 サイズ程度とし, 腹板の外側に腐食を模擬した断面

表-2 材料諸元 (a) 樹脂材料

種類	塗布量 [kg/m ²]	弹性係数 [MPa]			
不陸修正材	欠損量相当	2,387			
高伸度弾性パテ材	1.00	61			
含浸接着樹脂	0.60	2,531			

(b) 炭素繊維シート

目付量	弾性係数	引張強度
[g/m ²]	[GPa]	[MPa]
305	684	2,817

欠損を与える.次に,試験ケースを **表-1** に基づいて説 明する.供試体は全5体とし,腐食の無い健全なモデル (N),腹板下端部(図-1のB部)の全幅に渡って高さ15 mm,板厚 1/2の断面欠損を与えたものを A シリーズ, 高さ30 mm,板厚の3/4の断面欠損を与えたものをBシ リーズとする.A,Bシリーズについては,それぞれ無補 修の供試体を A-1, B-1 とし,炭素繊維シートにより補修 した供試体を A-2, B-2 とする.

炭素繊維シートの貼付は、マニュアルに準拠した方法 で施工する.はじめに、エポキシ系パテ材を用いて断面 欠損部の不陸修を行う.次いで、鋼材からの剥離を防止 するために高伸度弾性パテ材を塗布し、炭素繊維シート を貼り付けている.使用材料の諸元を**表-2**に示す.炭



素繊維シートの貼り付け量(補修量)については、炭素繊 維シートの厚さを鋼換算し、欠損した板厚を補うように 決定している.その結果、Aシリーズでは7層、Bシリ ーズでは10層の炭素繊維シートを貼り付けている.な お、貼り付ける範囲については、下弦材の中央までとし た.炭素繊維シートによる補修範囲を図-2に示す.

2.2 試験方法

試験は、載荷容量 2,000 kNの万能試験機を用いて実施 する.本試験では、腹板の面外方向変位と各部材の軸方 向ひずみを計測する.計測位置は図-3 に示すとおりで ある.変位は腹板の下端から 50 mm,載荷面から 100 mm 間隔で設置した.載荷面から見て、右側の腹板を WR,左側の腹板を WL とし、番号は載荷面側から順に 1,2,3 とした.ひずみゲージは上フランジ、下フランジ、 腹板および欠損部中央断面に配置する.上フランジ表裏 面がそれぞれ UF, UF'、下フランジ表裏面をそれぞれ LF, LF'とし、溶接部から 100 mm,載荷面から 100 mm の間隔で配置する.右側の腹板の表裏面はそれぞれ WR, WR',左側の腹板の表裏面をそれぞれ WL,WL'とし、 下端から 100 mm,載荷面から 100 mm 間隔で配置する.

また、欠損部については、表裏面それぞれ WRC、



図-4 試験状況

WRC', WLC, WLC'とし, 試験体 A では下端から 7.5 mm, 試験体 B では下端から 15 mm, 載荷面から 100 mm 間隔で配置する. 図-4 に実際の試験状況を示す.

3. 試験結果および考察

3.1 最大荷重

試験により得られた最大荷重を表-3に示す. 健全な

表-3 最大荷重				
試験体 番号	最大荷重 [kN]	Nに対する 強度比		
Ν	1,388	1.000		
A-1	1,304	0.939		
A-2	1,351	0.973		
B-1	1,166	0.840		
B-2	1,364	0.983		





図-5 耐荷力曲線との比較

供試体であるNについてみると、最大荷重が1,388 kNとなった.これに対し、欠損を与えたA-1, B-1では、それぞれ1,304 kN、1,166 kNとなり、強度が低下していることが確認できる.Aシリーズでは、6.1%、Bシリーズでは、16.0%の低下がみられる.これらを炭素繊維シートで補修したA-2, B-2についてみると、それぞれ1,351 kN、1,364 kNと概ね健全時の強度まで回復していることが確認できる.

一方,式(1)を用いてNおよびA-1,B-1について耐荷力 を算出すると,それぞれ,1,640 kN(*R*=0.73),1,513 kN(*R* =0.76),1,183 kN(*R*=0.84)が得られる.ここで,A-1,B-2 の幅厚比パラメータRの算出においては,欠損部の板厚 を断面内で平均化した板厚として計算を行っている(A-1 では*t*=5.808 mm,B-1では*t*=5.255 mm となる).これよ り,B-2では実験値と計算値が概ね一致する結果となっ たが,NやA-1では,実験値との差が大きくなってしま った.図-5 には,基準耐荷力曲線との比較を示す.こ こでは,道示の基準耐荷力曲線に加え,福本³⁾,奈良⁴⁾ の提案式による耐荷力曲線も示す.これより,本試験で 得られた最大荷重は,道示の基準耐荷力曲線と比較する と大きな差が見られるが,福本,奈良らの式は実験値と 概ね一致することが分かる.

3.2 変形特性

各試験で得られた荷重-変位(鉛直変位)関係を図-6

に示す.●印が健全モデル,×印で示したものが欠損有, 補修なしのケース,○印が欠損有,補修有のケースを示 している.これより,欠損の有無によらずほぼ一定の傾 きとなっていることから,本試験で与えたような欠損で は,部材の剛性の低下は見られないことが確認できる. ここで,欠損有,補修有のA-2についてみると,B-2に比 ベ早い段階で荷重の低下が起きていることが確認できる. これは,炭素繊維シートが一部剥離してしまったためで あると考えられる.

3.3 破壊形状

試験終了時の供試体状況の一例を 図-7 に示す. 図に 示すように、欠損近傍で局部座屈が生じ、終局に至った ということが確認できる. 炭素繊維シートで補修したケ ースについては、欠損近傍での局部座屈は見られず、炭 素繊維シートの最大荷重まで剥離や破断は確認されなか った.

3.4 荷重-ひずみ関係

荷重-ひずみ関係を以下に示す.ここでは、紙面の都 合上、結果の一部のみを掲載する.図-8は、右側ウェ ブ内面のひずみ(WR')を示したものである.これより、 欠損を設けたA-1,B-1では、局所的に大きなひずみが発 生しており、座屈を生じていることが確認できる.これ に対し、炭素繊維シートで補修したA-2,B-2では、ひず みの大きさが健全時と同等レベルまで低下しており、補 修効果がみられる.

4.まとめ

本研究では、トラス橋下弦材の下フランジ近傍に生じ た腐食損傷に対する補修工法の検討として、炭素繊維シ ート接着工法の適用性を検証するための実験を行った. ここでは、トラス橋下弦材を模した箱型断面の供試体に、 腐食を模擬した断面欠損を与え、炭素繊維シートを貼り 付ける.対象とする損傷では、断面欠損によって、引張





(a) 腹板 (R-WEB.)

(b) 腹板 (L-WEB.)















図-8 荷重--ひずみ関係(計測位置: WR')

破断よりも、局部座屈の発生による強度低下の影響の方 が大きいと考えられるため、連続トラス橋の中間支点部 等を想定して、圧縮試験により補修効果を検討した.そ の結果得られた知見を以下に示す.

<u>A) 最大荷重</u>

試験により得られた最大荷重は、現行の道示の基準耐荷力曲線を用いると危険側の結果となってしまう.これは、幅厚比パラメータ*R が*0.7付近では、ばらつきが大きくなるためであると考えられる.これに対し、福本や奈良が提案する評価式を用いた場合、実験値と概ね一致することを確認した.

B) 補修効果

欠損高さ15 mm, 板厚12としたAシリーズでは, 健全 時に比べて6.1 %の耐力低下となり, 欠損高さ30 mm, 板 厚14としたBシリーズでは, 健全時に比べ17.0 %の耐力 低下となった. 炭素繊維シート接着工法の適用による補 修効果は, Aシリーズで3.6 %, Bシリーズで16.0 %とな り, 健全時の耐力まで概ね回復することを確認した.

C) 荷重-変位関係

荷重-変位関係においては、炭素繊維シートによる補 修を行うことで健全時に近い状態になることが確認され た.接着がはがれてしまった場合、補修能力の低下が確 認された.

<u>D)荷重-ひずみ関係</u>

荷重-ひずみ関係では、欠損を未補修の場合、欠損部

でひずみが大きくなり,局部座屈を生じていることを確認した.一方,炭素繊維シートによる補修をした供試体では,健全な供試体と概ね一致した挙動を示しており,炭素繊維シート接着工法の適用によってひずみが低減されることが確認された.

本試験で想定した損傷量であれば、部材の急激な耐力 低下を招くことはないものの、腐食の進展や強度不足を 補うためにも炭素繊維シート接着工法は有効な手法であ ると言える. 今後は、部材端部の局所的な変形を防止で きるような方法で実験的検討を継続して実施し、最適な 設計手法(積層数,貼り付け範囲)の検討や、溶接線が 失われた場合における強度低下などについて検討を進め る予定である.

参考文献

- 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.
- (公社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I共 通編 II鋼橋編, 2012.
- Yuhshi FUKUMOTO, Yoshito ITOH : Basic Compressive Strength of Steel Plates From Test Data, Proc. of JSCE, Structural Eng./ Earthquake Eng., No.344, pp.129-139, 1984.
- 奈良敬,津田真,福本唀士:面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度の評価法に関する研究,土木 学会論文集,No.392/I-9, pp.259-264, 1988.

A STUDY ON THE REPAIRING METHOD USING CFRP FOR CORRODED LOWER CHORD MEMBERS IN STEEL TRUSS BRIDGES

Yusuke OKUYAMA, Takeshi HIROSE, Takeshi MIYASHITA, Yuya HIDEKUMA, Akira KOBAYASHI and Kazuo OHGAKI

In a steel truss bridge, corrosion frequently occurs along the weld line of webs and a lower flange in a lower chord member. Usually, angle members have been attached by using one-side bolts for such damage. However, if corrosion spreads over widely, this method may be irrational from the view point of workability. Therefore, we focus on the CFRP bonding method. While workability of this method is superior to other methods, its repair effect was not clear near corroded weld zones.

The objective of this research is to obtain fundamental information to establish repair design for such damage. CFRP sheets were bonded on box-shaped specimens that imitated a lower chord member with corrosion in a steel truss bridge at intermediate supports, and compression test was conducted. As a result, it was confirmed that the CFRP bonding method made possible to recover the strength of specimens with damage up to one without damage.