

腐食した鋼桁端部に対する引抜成形FRPアングル部材による補修方法の検討

北根 安雄¹・上山 裕太²・寺口 大輝³・松井 孝洋⁴・舘石 和雄⁵・
後藤 基浩⁶

¹正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 西日本旅客鉄道株式会社 近畿統括本部京都保線区京都保線管理室 (〒601-8411 京都府京都市南区西九条北ノ内町5-5)

E-mail: uechan.tantan@gmail.com

³学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

Email: teraguchi.daiki@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 東レ株式会社 ACM技術部産業・スポーツ技術室 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁵正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail: tateishi@civil.nagoya-u.ac.jp

¹正会員 福井県 産業労働部地域産業・技術振興課 (〒910-8580 福井市大手3丁目17-1)

E-mail: m-gotou-ou@pref.fukui.lg.jp

本研究では、腐食した鋼桁端部の補修として、ハイブリッドFRP引抜成形アングル部材を使用する補修方法を提案する。鋼桁端部を模擬した供試体に腐食減肉を想定した断面欠損を人工的に設け、ハイブリッドFRP引抜成形アングル部材を接着接合もしくは接着接合とボルト接合の併用接合によって供試体に接合した補修供試体に対して、支点上鉛直荷重に対する耐荷力実験を行うことで、提案した補修方法の鋼桁端部支点上の柱部材としての圧縮耐荷力に対する性能回復効果を実験的に明らかにした。

Key Words : steel girder end, repair, pultruded FRP angle section, bonded joint, corrosion

1. 研究の背景と目的

日本の鋼橋の多くは高度経済成長期に建設されており、建設から約 50 年経過したことで、腐食による老朽化が進んでいる¹⁾。腐食による減肉や断面欠損が生じた箇所には、重大な事故が発生する前に鋼橋の耐荷性能を保つ、もしくは回復するような対策をとる必要がある。従来、腐食した箇所の補修・補強を行う際には、鋼板当て板補修や鋼部材を用いた補強が一般的に行われてきた。ただし、鋼橋において腐食しやすい箇所は湿気が高く風通しの悪い狭隘な空間であることが多く、補修材料として重量の大きい鋼材を用いる場合には大型の重機が必要となることもあり、施工性において課題がある。また、補修材料として鋼材を用いる場合には、補修部材を含め

た補修箇所全体に防食塗装等の腐食対策を行い、それに加えて定期的な点検を長期的に継続し、腐食の再発防止に努める必要がある、維持管理の負担が大きいといえる。

そのような現状において近年、鋼材にかわる補修材料として FRP を用いた補修・補強が注目されている。FRP は強化繊維とマトリックス樹脂からなる複合材料であり、軽量性や耐食性に非常に優れている。そのため、鋼材に代わり、腐食環境下で使用する補修部材や取替部材の材料として、施工性、維持管理性の面から適しているといえる。しかし一方で、FRP は材料コストや製造コストが高いといった課題があり、構造物の補修部材としての適用を実現するためにはライフサイクルコストの削減を追求する必要がある。

本研究では、ハイブリッドFRP引抜成形アングル部材

を成形し、腐食した鋼橋の補修に適用することを試みた。ハイブリッドFRPとは、強化繊維に複数の繊維を使用することで、互いの繊維の特徴を生かし、短所を補うことができるため、材料コストを抑えつつ、より広範囲の材料特性を実現することを可能としたFRPである。

FRPにおいて鋼材と同等の弾性係数を求めるためには、通常、強化繊維に炭素繊維が使用されるが、炭素繊維を使用したFRP(CFRP)は高価であること、また、引張強度と比較して圧縮強度や支圧強度が低い⁴⁾ため、引張だけでなく圧縮荷重が作用する場合や、部材の接合に支圧ボルト接合を用いる場合などでは、CFRPのもつ高い引張強度を有効利用できない現状がある。そこで、本研究では強化繊維にガラス繊維と炭素繊維を用いたハイブリッドFRP材料に着目し、伸び剛性には炭素繊維で、せん断剛性・強度および支圧強度の確保のためにはガラス繊維を配向して、上記の課題に対処した。また、将来的に大量生産可能な引抜成形部材とすることで、製造コストの軽減を図った。

そこで本研究では、腐食劣化が進行しやすい鋼桁端部の腐食に対するFRP部材での補修を想定し、鋼桁端部を模擬した供試体に腐食減肉を模擬した断面欠損を人工的に設け、ハイブリッドFRP引抜成形アングル部材を接着接合もしくは接着接合とボルト接合の併用接合によって供試体に接合した補修供試体に対して、支点上鉛直荷重に対する耐荷力実験を行い、その補修効果を明らかにすることを目的とする。

2. ハイブリッドFRP引抜成形アングル部材

(1) アングル部材断面と積層構成

本研究では、山形(アングル)断面のハイブリッドFRP引抜成形部材を用いる。FRPアングル材の断面寸法を図-1に示す。部材の成形には、将来的に大量生産することを想定し、量産性、経済性、断面形態、品質特性を考慮して引抜成形法を採用した。また、鋼材と同等の弾性係数を得るためには、強化繊維に通常は炭素繊維が使用されるが、炭素繊維を使用したFRP(CFRP)は、高価であること、また、引張強度と比較して圧縮強度や支圧強度が低い⁴⁾ため、引張だけでなく圧縮荷重が作用する場合や、部材の接合に支圧ボルト接合を用いる場合などでは、CFRPのもつ高い引張強度を有効利用できない現状がある。そこで、本研究では強化繊維にガラス繊維と炭素繊維を用いたハイブリッドFRP材料に着目し、軸方向の剛性および曲げ剛性には炭素繊維を、せん断剛性・せん断強度および支圧強度の確保のためにはガラス繊維を配向して、上記の課題に対処した。積層構成は、 $[(0)_{CF}+(45/90/-45)_{GF}]_8$ とした。

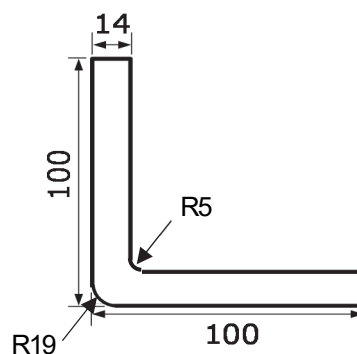


図-1 ハイブリッドFRPアングル部材断面寸法

(2) 材料特性

ハイブリッドFRPアングル材の材料特性を得ることを目的として、引張試験、圧縮試験、面内せん断試験、層間せん断試験、曲げ試験および支圧試験の6種類の材料試験を行った。

FRPの材料試験は、引張試験は土木学会基準JSCE-E531-2007に、圧縮試験はJIS K 7018に、曲げ試験はJIS K 7017に、面内せん断試験はASTM D 7078に、層間せん断試験はJIS K 7057に従って試験を行った。支圧試験はMottram⁵⁾によって提案された支圧試験方法に従った試験と、ピン接合法による試験の2種類の試験を行った⁴⁾。アングル材の材料試験から得られた各材料特性と変動係数を表-1に示す。各試験の弾性率と強度ともに変動係数は概ね5.0%以下で、ばらつきの小さい結果であった。

表-1 ハイブリッドFRPアングル材の材料試験結果

試験方法	弾性率		強度	
	平均値 (GPa)	変動 係数	平均値 (MPa)	変動 係数
軸方向引張	76.6	0.027	1353	0.048
軸方向圧縮	72.9	0.012	462	0.095
曲げ	82.7	0.014	676	0.046
面内せん断	7.68	0.023	142	0.017
層間せん断	2.58	0.079	35.3	0.041
支圧(Mottram)	—	—	310	0.097
支圧(ピン)	—	—	356	0.063

3. 腐食した鋼桁端部のFRP部材による補修

(1) 対象とする腐食形態

鋼桁端部の腐食形態は、過去の事例調査によるとさまざまな種類が存在する。文献6)の事例調査で得られた腐食形態の分類を図-2に示す。本研究では、図-2(d)に示す

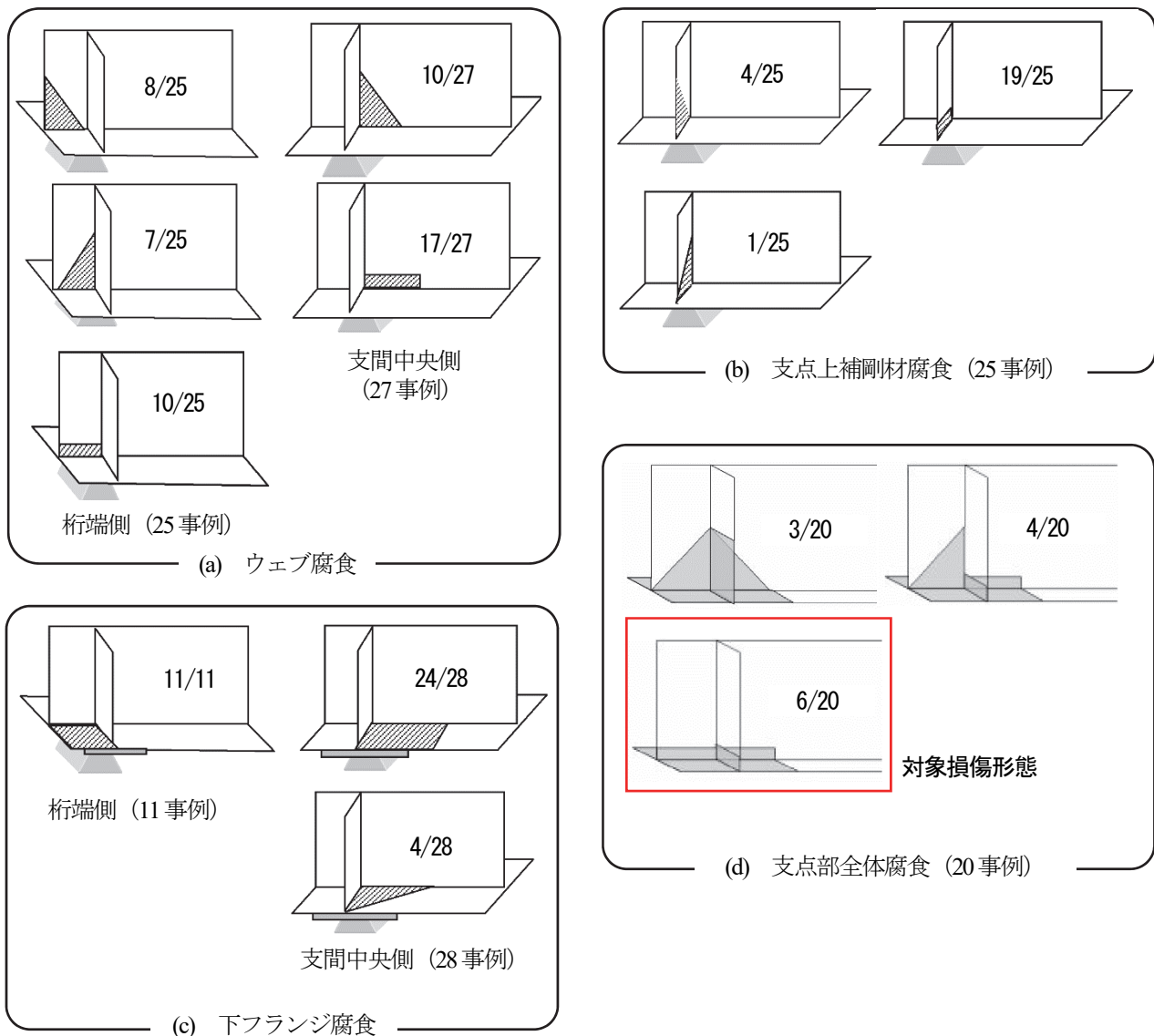


図-2 鋼桁端部の腐食形態⁹⁾

支点部全体腐食で最も事例数の多い桁端部下部全体の腐食形態を対象として、支点上鉛直荷重を受ける柱部材としての性能回復を試みた。

(2) 本研究の補修方法

本研究では、2.で示したハイブリッド FRP アングル材を用いた補修を検討した。図-3に示すように、ウェブおよび支点上補剛材にアングル材 4 本を接着接合により当てることにより、柱部材としての性能を回復することを提案する。

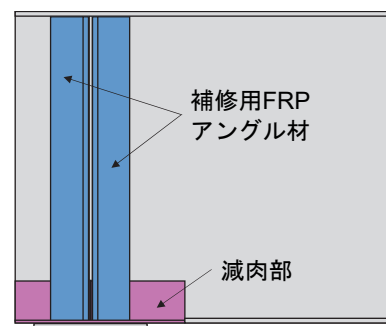


図-3 FRPアングル材を用いた鋼桁端部の補修方法

4. 補修した鋼桁端部供試体の圧縮実験

(1) 実験供試体

本研究では、腐食減肉した鋼桁端部の支点上鉛直荷重を受ける柱部材としての FRP アングル材を用いた補修に

対する補修効果について検討するため、供試体は非合成単純プレートガーダー橋の桁端部の一部のみを対象として、供試体を製作した。また、供試体は載荷装置の制限から実際の桁寸法の 2/3 スケールとしている。本研究で用いた健全供試体 GE0 の寸法を図-4 に示す。

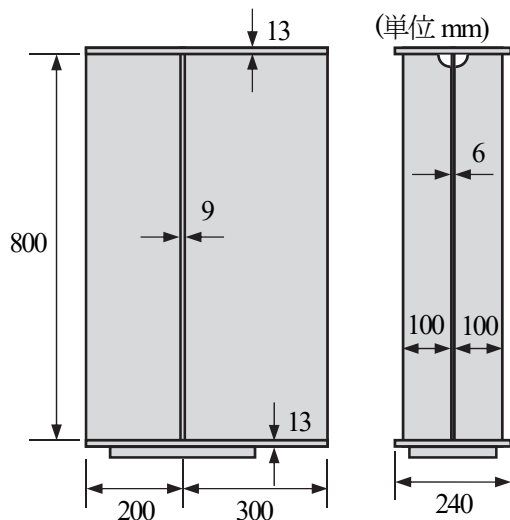


図4 健全供試体 (GE0) の寸法

また、桁端部の腐食としては、3.(1)で示したように、ウェブと支点上補剛材の下側領域および下フランジでの腐食を対象とし、図-5(a)に示すように、ウェブおよび補剛材の下から 100mm の高さ、下フランジ全面の領域を供試体の橋軸方向全長に、ウェブおよび補剛材は板の両面から、下フランジは上面から切削することで、板厚をもとの板厚の 1/2 まで減肉して、腐食による断面欠損を模擬し、減肉供試体 GE1 とした。

補修供試体には、FRP アングル材を支点上補剛材とウェブにウェブ高にわたって 4 本接着した供試体 GE2、GE2 と同様に FRP アングル材を 4 本接着し、アングル材の端部と中央に FRP ボルト (M16) を配置した供試体 GE3、短い FRP アングル材でウェブと支点上補剛材の下部のみ補修し、端部に FRP ボルトを配置した供試体 GE4 の 3 種類である。GE2～GE4 の供試体を図-5(b)～(d)に示す。

補剛材の減肉部は、片面から 2.25mm 切削されており、鋼材の減肉量と同じ剛性を補うためには、FRP アングル材の圧縮弾性率が 72.9GPa であることから、6.17mm 厚の FRP アングル材と同じ材料が必要になる。本研究の FRP アングル材の板厚は 14mm であるため、単純に板厚のみで換算するのであれば、2 倍以上の厚さの部材で補修を行っていることになる。

供試体に使用した鋼材の鋼種は SM400A であり、供試体のフランジ、ウェブ、垂直補剛材にあたる、厚さ 6mm、13mm、9mm の各鋼材の引張試験から得られた引張弾性率、降伏応力 (6mm 厚のウェブについては 0.2% オフセット耐力) と引張強度の平均値と変動係数を表-2 に示す。

接着剤には 2 液性エポキシ樹脂接着剤を使用した。また FRP ボルトは、ガラス繊維とエポキシ樹脂からなる

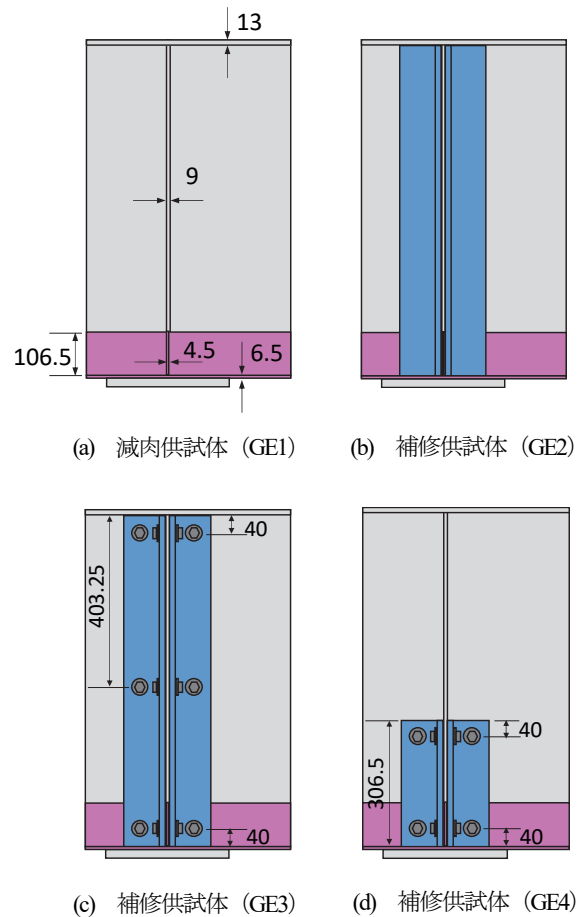


図-5 腐食供試体および補修供試体

表-2 使用鋼材の材料試験結果

部位	板厚 (mm)	弾性率 (GPa)	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)
フランジ	13	204.6 (0.009)	324.1 (0.049)	455.4 (0.012)
ウェブ	6	198.8 (0.026)	296.1 (0.027)	435.6 (0.009)
補剛材	9	205.0 (0.035)	320.2 (0.004)	449.9 (0.002)

※ () は変動係数を示す

FRP であり、アングル材を接着して固定するための養生時のクランプ力を与えるためと、荷重載荷時に接着剥離を抑制する目的で配置した。M16 の FRP ボルトの引張破断荷重、せん断破壊荷重、破断トルクのカatalog値は、それぞれ、23.5kN、24.5kN、73.5N・m である。

(2) 実験方法

実験では、図-6 の矢印のように、圧縮荷重を載荷し、柱部材としての耐荷力を実験的に明らかにする。また、図-6 には、実験での鉛直変位とひずみの測定箇所を示す。載荷中の横倒れを防止するため、図-7 に示すように横倒れ防止治具を用いて、上フランジは 4 箇所横方向に支

持して、鉛直方向に載荷した。

(3) 実験結果

図-8に実験で得られた荷重－鉛直変位関係を示す。なおグラフの縦軸は健全供試体 GE0 の降伏荷重の理論値 ($P_{y0}=773\text{kN}$)，横軸は健全供試体 GE0 の降伏時の鉛直変位の理論値 ($d_{y0}=1.18\text{mm}$) で無次元化している。また、表-3には、各供試体のウェブの座屈開始時の荷重と実験で得られた最大荷重を示す。座屈開始時の荷重は、各供試体の座屈変形が大きくなる箇所でのウェブ表裏のひずみゲージの値から判断した。

健全供試体 GE0 では、486kN でウェブの一部が降伏ひずみに達したのち、511kN で図-9(a)に示すようなウェブと支点上補剛材でウェブ高さの中央を頂点とする十字断面のねじれ変形が見られた。座屈したのちは、変形が徐々に大きくなり、最大荷重 (975kN) に至る挙動を示

した。

減肉供試体 GE1 では、図-9(b)に示すようなウェブおよび補剛材の腐食部と健全部の境界から少し腐食領域側を座屈波形の頂点とした十字断面のねじれ座屈変形が生じた。補剛材のひずみ履歴から、68kN でねじれ座屈による曲げ変形が生じたと判断した。その後 153kN で補剛材の減肉部で降伏ひずみに達した。減肉供試体 GE1 の最大

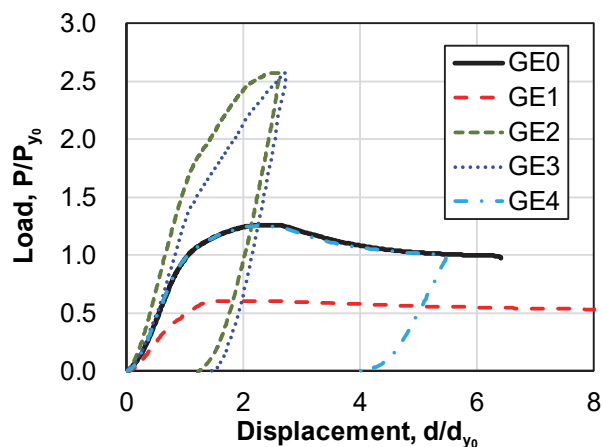


図-8 荷重－変位関係

表-3 座屈開始荷重と最大荷重

	座屈開始時の荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重/GE0の最大荷重
健全 GE0	511	975	1.00
減肉 GE1	68	468	0.48
補修 GE2	1347	1990*	2.04*
補修 GE3	1545	1989*	2.04*
補修 GE4	521	967	0.99

※載荷装置の最大載荷能力に達したため試験終了

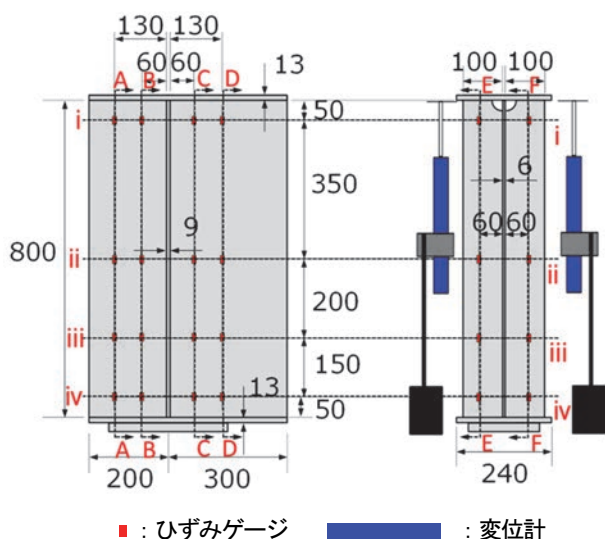


図-6 変位とひずみの測定箇所

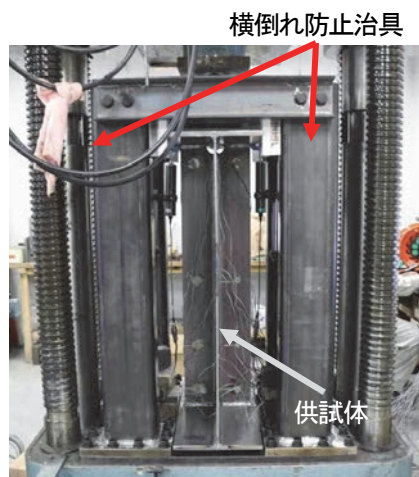
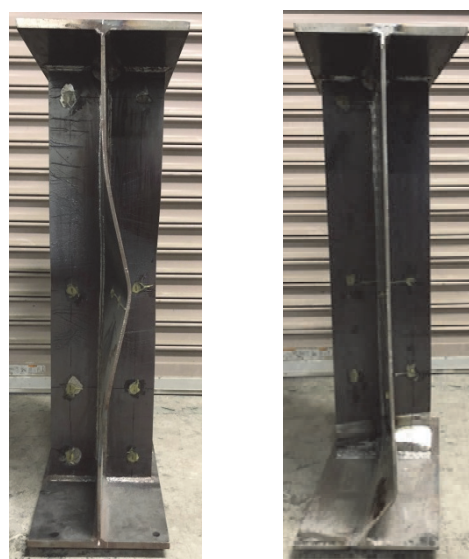


図-7 載荷実験の様子



(a) GE0

(b) GE1

図-9 GE0とGE1の実験後の外観

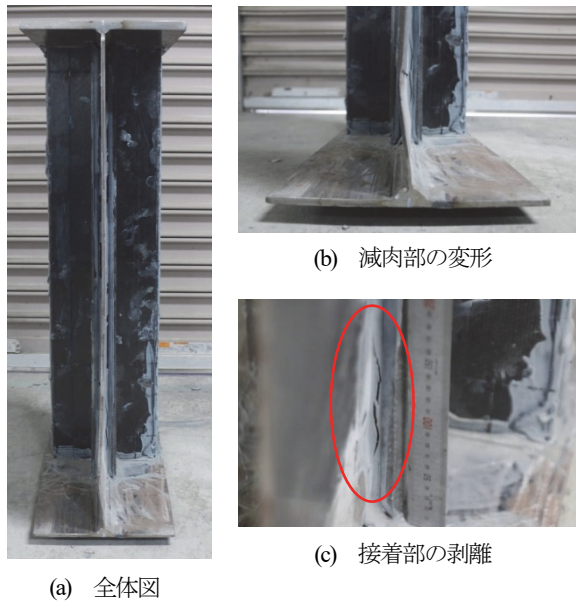


図-10 GE2の実験後の外観

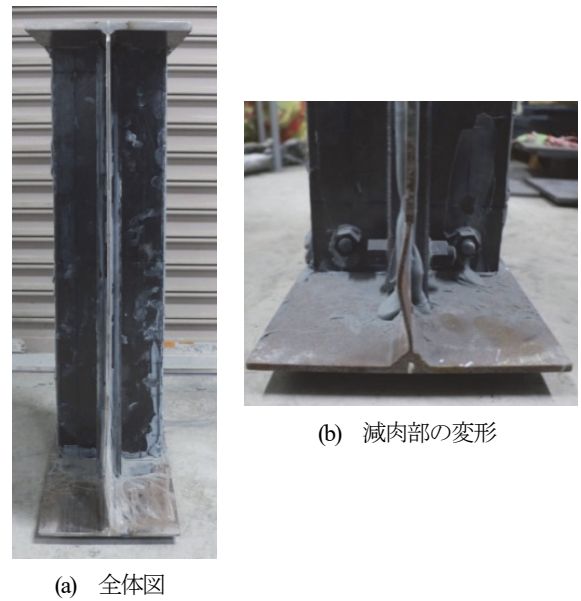


図-12 GE3の実験後の外観

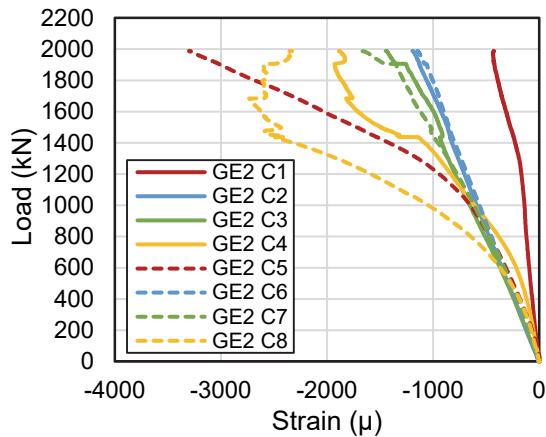


図-11 C列でのFRPアングル材のひずみ (GE2)

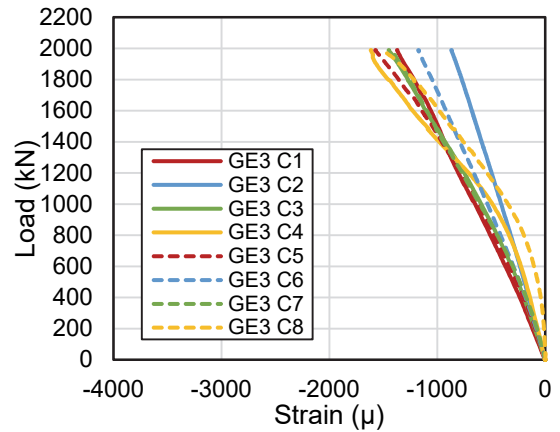


図-13 C列でのFRPアングル材のひずみ (GE3)

荷重は468kNであり、健全供試体GE0の48%まで低下した。

補修供試体GE2では、ウェブの座屈変形は図-10に示すように、減肉部のみに生じた。ただし、荷重が載荷装置の最大荷重(2,000kN)に達したため、供試体の耐力に至るまでに載荷を中止し除荷した。GE2の最大荷重は、健全供試体の最大荷重の2倍以上となることが明らかとなった。

また、669kNでウェブの減肉部で、はじめて降伏ひずみに達していた。FRPアングル材で補修することで、降伏荷重が減肉供試体GE1の4.3倍まで増加したことがわかる。

さらに、図-10(c)に示すように、実験後の外観観察で、アングル材の下端側の端部で接着の剥離(接着剤の凝集破壊)が見られた。C列(図-6参照)で取得したFRPアングル材のひずみと荷重の関係を図-11に示す。C1とC5

が図-6の高さ位置iでの表裏のひずみで、C4とC8が高さ位置ivでの表裏のひずみである。剥離が見られた箇所近くのひずみゲージ(C8)の値を見ると、1476kNでひずみが急激に小さくなっており、この時点で剥離が生じたことが推定できる。

接着とボルトを併用した補修供試体GE3の変形後の供試体の外観を図-12に示す。GE3はGE2とほぼ同じ挙動を示し、最大荷重も載荷装置の最大荷重(2,000kN)に達したが、荷重-変位関係がGE2よりも早く非線形性を示していた。ひずみゲージの値から、ウェブ減肉部のアングル材による補修のない部分で載荷直後から表裏のひずみの差が大きくなっていることが確認された。これは初期変形の影響により早い段階でウェブ減肉部に曲げ変形が生じたことを示唆している。その結果、ウェブ減肉部では354kNで最初に降伏ひずみに達した。

次に、図-13にウェブに接合したFRPアングル材上の

列Cのひずみと荷重の関係を示す。接着接合のみで補修を行ったGE2に比べて、アングル材端部におけるひずみ(C1, C4, C5, C8)がその他の位置のひずみに近く、高さ方向におけるひずみの分布が一様となっている。これは、接着のみではなく、FRP ボルトでボルト接合と併用したことで、接着端部における剥離強度が向上したことが考えられる。その結果として、GE2 で見られたような接着剥離は見られなかった。

GE2 と GE3 の結果から、ウェブ高さ全体にわたって FRP アングル材で補修を行った場合には、フランジから直接FRPアングル材へと応力が伝達するため、弾性域における応力伝達は、接着接合のみの場合と接着接合とボルト接合を併用した場合で差がないことが明らかになった。しかし、端部にFRP ボルトでクランプ力を付与することで、接着端部で接着剥離の発生を抑制できることが明らかになった。

短FRPアングル材とFRPボルトを用いて補修を行った補修供試体 GE4 の実験後の外観を図-14 に示す。短アングル材で補修を行ったことで、減肉供試体GE1で見られたような、減肉部でのねじれ座屈が抑制され、最終的な破壊モードはウェブ高さ中央よりも少し上の健全部で最も変形が大きくなるようなねじれ座屈であった。したがって、最終的な変形モードは健全供試体GE0と近くなっていることがわかる。図-8に示した荷重－変位関係でも、GE4はGE0とほぼ同じ挙動を示している。GE4の座屈開始時の荷重と最大荷重も健全供試体GE0と約2%の差であった。したがって、短FRPアングル材とFRPボルトを用いた補修により、健全供試体GE0と同程度まで耐荷性能を回復できることが明らかになった。



図-14 GE4の実験後の外観

6. 結論

本研究では、腐食した鋼桁端部の補修として、ハイブリッドFRP引抜成形アングル部材を接着して使用する方法を提案し、腐食を模擬して人工的に断面欠損を設けた鋼桁端部をハイブリッドFRPアングル材によって補修した供試体に対し、圧縮耐荷力実験を実施することで、その性能回復効果を明らかにした。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) ウェブと支点上補剛材の下部および下フランジを50%減肉した腐食供試体では、減肉部と健全部の境界から少し腐食領域側を座屈波形の頂点とした十字断面のねじれ座屈変形が生じた。また、降伏荷重は健全供試体の約1/3に、最大荷重は半分程度にまで低下した。
- 2) ウェブと補剛材を高さ全体にわたってFRPアングル材で補修した供試体においては、最大荷重は健全供試体の2倍以上にまで回復した。
- 3) 接着端部をFRPボルトでボルト接合してクランプ力を付与することで、端部での接着剥離の防止に効果的であることが明らかになった。
- 4) 短FRPアングル材とFRPボルトを用いた補修でも、最大荷重は健全供試体と同程度まで回復できることが明らかになった。

今後、FRP部材と鋼部材の荷重分担を定量的に明らかにして、本研究で提案した補修方法の補修設計方法を確認する必要がある。また、本研究で用いたFRPボルトの必要性および効果についても定量的に明らかにする必要がある。

謝辞：本研究は、地方創生推進交付金を受け、福井県が中心となって平成28年度に実施した研究プロジェクトの一部である。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, pp.299-311, 2001.
- 2) Vo Thanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析, 土木学会論文集, No.710, pp.141-151, 2002.
- 3) 土木学会 構造工学委員会：FRP 橋梁－技術とその展望－, 土木学会, 264p., 2004.
- 4) 上山裕太, 北根安雄, 松井孝洋, 近藤富士夫, 舘石和雄：ハイブリッドFRP積層体の支圧強度評価法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 5, 複合構造論文集, 第4巻, pp. II_74-II_83, 2017.
- 5) Mottram, J. T. and Zafari, B.: Pin-Bearing Strengths for Bolted Connections in Fibre-Reinforced Polymer Structures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers : Structures

- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：鋼道路橋の局

STUDY ON THE REPAIR METHOD FOR CORRODED STEEL GIRDER END BY USE OF PULTRUDED FRP ANGLE SECTIONS

Yasuo KITANE, Yuta UEYAMA, Daiki TERAGUCHI, Takahiro MATSUI, Kazuo
TATEISHI, and Motohiro GOTO

In this study, a repair method of corroded steel girder end by using pultruded hybrid FRP angle sections is proposed. To examine performance recovery by using the proposed repair method, steel girder end specimens with thickness reduced portions were repaired by bonding hybrid FRP angle sections with and without FRP bolts, and compression tests were performed on these specimens. Results showed that the compressive bearing capacity of repaired specimens were recovered to the level equal to or more than that of the intact steel girder end specimen.