

FRP 材の非接着補剛による 鋼板の圧縮挙動改善の検討

山本 梨乃¹・松本 幸大²

¹ 豊橋技術科学大学大学院生 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: yamamoto.rino.ya@tut.jp

² 正会員 豊橋技術科学大学 電子工学先端融合研究所
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: matsumoto.yukihiro.lp@tut.jp

大規模地震や腐食によって薄肉鋼板で構成される鋼構造部材に局部座屈などの損傷が発生する事例が報告されており、近年では耐食性に優れる FRP が厳しい環境下での補強・補修で用いられつつある。多くの研究は FRP を接着することによる補強であるが、本研究では鋼材との界面に接着を行わない FRP 非接着補剛を用いた圧縮耐力向上法を提案する。非接着補剛は初期剛性の変化が小さく、脆性的な耐力低下が発生しない補強方法である。本研究は片側を固定、片側を一方向ピンとした支持条件での T 形断面部材を対象に、FRP 溝形補剛材を用いて局部座屈発生を遅延させ圧縮耐力を上昇させる手法を有限要素解析および実験を行い検討した。その結果、補剛により変形を拘束することができ、それにより塑性後も耐力が低下せず、最大圧縮耐力が向上することを明らかにした。

Key Words: *unbonded, steel plate, VaRTM, compressive strength, buckling*

1. 研究背景・目的

我が国では、温暖で湿度の高い気象条件であることから鋼構造物にとって厳しい環境である。冬季には路面凍結温度となる地域も多くあり、凍結防止剤として塩化物が塗布されていることも腐食を進行させる要因となっている。鋼橋では塗装等で被膜し外気と遮断することで腐食を防いでいるが、その防食被膜が損傷した際、鋼材の腐食が進行し、板厚が減少する。支承の存在から閉鎖的な環境となっていることや伸縮装置の損傷による凍結防止剤の漏水によって、橋桁端部は腐食が発生しやすい部分となる。橋桁端部の中でも、垂直補剛材下部は、腐食による損傷の事例が多くみられるといった調査結果もある¹⁾。橋桁端部は支承からの反力を受ける箇所であり鉛直補剛材は軸方向力を多く受けているため、垂直補剛材の損傷により局部座屈の発生が懸念される。実際に腐食した部材が地震の影響で局部座屈する事例²⁾や、2016年に発生した熊本地震では、橋桁端部の垂直補剛材において局部座屈の発生が見られる³⁾。このような背景を受け、橋桁端部に腐食が発生した際の残存耐力の評価法や

補修法などの研究開発が多く行われている⁴⁾⁵⁾。減肉した鋼部材に対する補修方法には、高力ボルトを用いた鋼板当て板補修⁶⁾や腐食部に CFRP を接着する補修⁷⁾などが挙げられる。

FRP は、耐食性に優れており厳しい環境条件下である沿岸部での利用が進んでいる⁸⁾。また、高強度、高剛性で軽量であるため、構造物の重量増加を最小限にとどめ、下部や基礎構造の負担増加が少なく、施工時の可搬性に優れていることから、安定した足場の確保が難しい橋梁の補強・補修分野での実績も多い。

FRP での補強・補修は FRP を接着するものが主であるが、本研究では、接着を行わない補強方法を用いて、局部座屈を起こす可能性がある開断面部材を対象に、圧縮荷重作用下の座屈耐力を向上させる補強法の検討を行う。腐食が発生した垂直補剛材への適用を想定し、片側を固定、片側を一方向ピンとした支持条件で、スチフナのような三辺固定の部材に対して FRP 溝形補剛材による座屈補剛を行い、圧縮耐力向上効果を有限要素解析及び実験により分析する。

2. 補剛法の概要

(1) 非接着補強

FRP を用いた補強法は接着で行うものがほとんどで、非接着で行う事例は少ない。接着をすることの利点として、接着層によって効率よく面的に応力が伝達できることが挙げられるが、表面処理が必要なことや、大変形時に接着層が剥離破壊し補強効果を喪失する問題点もある。今回提案する非接着補強は、接着補強より積層数は増えるが、軽量であることの利点は維持したまま、接着補強の問題点を解決できる。加えて補強対象部材の初期剛性の変化がほとんど生じないことから1次設計の結果に影響を与えないことや、大変形時においても急激な耐力低下が発生しないため構造の不安定現象である座屈を防止するために有効な接合方法である。非接着補強法の概要を図-1に示す。既往の研究^{9,10)}では、等辺山形鋼や鋼板を対象にFRP溝形補剛材を用いた座屈補剛法の検討が行われている。これらの研究では、補剛により補剛材内での塑性ヒンジの発生が抑制され、結果として圧縮耐力の向上が見られ、座屈発生後の耐力低下も軽減されることが明らかになっている。

(2) FRP 補剛材の成形法

今回用いる非接着補強法は接着補強法と比較して積層数が増えるため、ハンドレイアップ成形法よりも効率よく一括で成形でき、施工者の技能による性能のばらつきがないため、安定して繊維含有率の高い補剛材が成形できる真空樹脂含浸成形法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM 法）が適している。また、非接着補強法は接着しないため、補剛材の寸法精度が重要となり、特に補強対象部材との間隙は補強効果に大きく影響する。そのため、補強対象部材や同じ形の型を用いて、その形に添って成形できるという利点も VaRTM 法の利点の1つである。

VaRTM 法は、図-2(a)のように繊維シートや副資材を積層し、真空吸引後、粘度の低い液体樹脂を注入し含浸させる（図-2(b)）。樹脂が硬化した後、脱型し使用するサイズに切断する。

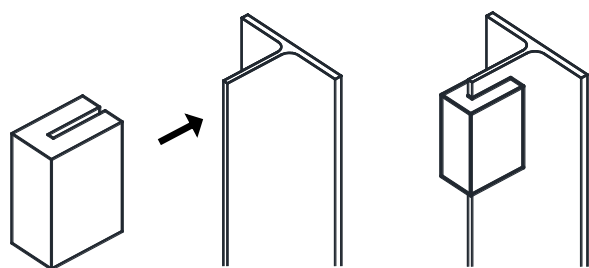
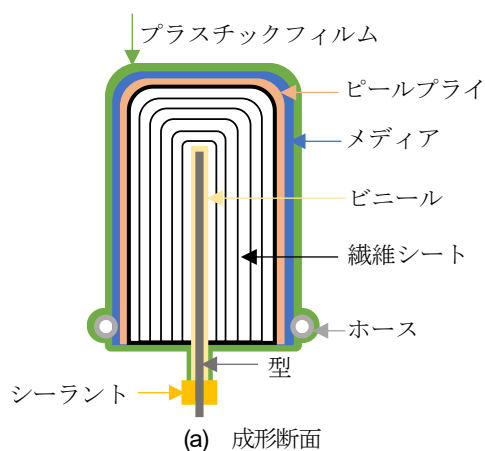


図-1 補剛方法の概要

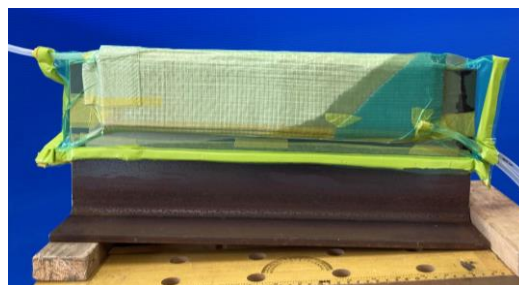
3. 実験と解析

(1) 実験方法

本試験ではT形断面部材（以下、被補剛材）に対しての圧縮試験とし、局部座屈をFRPによって補剛することを想定した試験体形状とした。試験時の様子を図-3に示す。試験体上端にナイフエッジを用いて片側一方向ピン支持とした。被補剛材はH形鋼のウェブを軸方向に切断し両端に PL16 鋼板を隅肉溶接し作成した。使用する H 形鋼は、SN400B, 300×150×6.5×9.0, YP=402MPa である。図-4に無補強試験体、補強試験体の概観を示す。便宜上、切断前のH形鋼のウェブ、フランジに相当する面を継続してウェブ、フランジと呼称する。



(a) 成形断面



(b) 成形時の様子

図-2 成形法

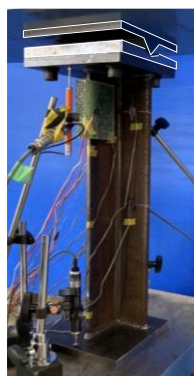


図-3 試験時の様子



(a) 無補強



(b) 補強

図-4 試験体概形

補剛材は2章で成形したものを図-5(a)の寸法に切断したものを使用する。積層構成は[0/90]₃₂で、実際に使用した補剛材を図-5(b)に示す。使用した繊維と樹脂の物性値を表-1に、複合則と積層板理論により算出した補剛材の材料特性を表-2に示す。座標軸は積層方向をz軸、繊維方向をx、y軸とする。補剛材は被補剛材上端から20~120mmの範囲を補剛する。図-6にひずみゲージ・変位計・荷重点位置を示す。s.g①は補剛材中心高さ位置のCT形に切断した際の切断面に、②、③は補剛材上のZ軸方向、④、⑤はX軸方向に取り付けた。載荷点は中立軸位置からウェブ側に30mmの位置とした。

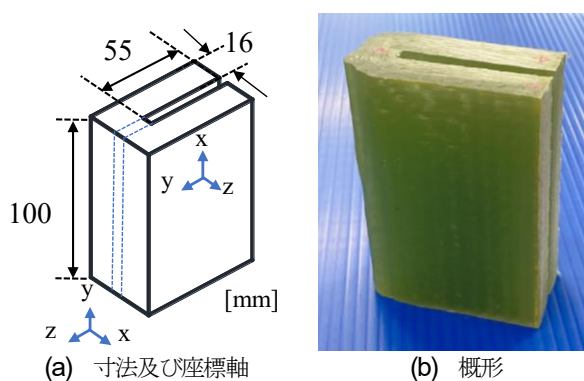


図-5 補剛材

表-1 使用材料の物性値

	ヤング 係数 [GPa]	せん断 弾性係数 [GPa]	ポアソン 比	体積 含有率 [%]
繊維	72.6	27.92	0.30	59
樹脂	1.285	0.44	0.46	41

表-2 補剛材材料特性

ヤング係数[GPa]	$E_x = E_y = 24.6$, $E_z = 2.65$
せん断弾性係数[MPa]	$G_{xy} = 920$ ¹⁾ , $G_{yz} = G_{zx} = 911$

(2) 解析概要

解析では前節の条件に加え、被補剛材には初期不整として予め中心部を全長の500分の1である1mm変形させている(図-7)。また図-7の赤い面である反力床と被補剛材下端プレート、ウェブ上部表面と補剛材内部には摩擦を考慮する接触条件を導入した。補剛材は非接着で補剛するため図-8の赤い線のように補剛材上端と被補剛材ウェブ上端を梁要素で結合し不安定となることを防いでいる。用いた梁要素は断面積が152.7mm²で、弾性率は200GPaである。メッシュは、被補剛鋼材は4面体2次要素、補剛材は6面体2次要素である。また、材料および幾何学的非線形性を考慮した解析を行った。

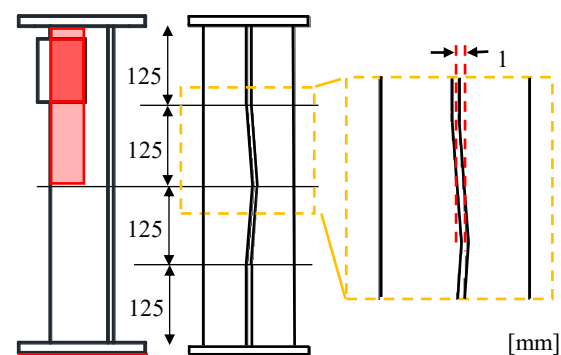


図-7 接触判定と初期不整

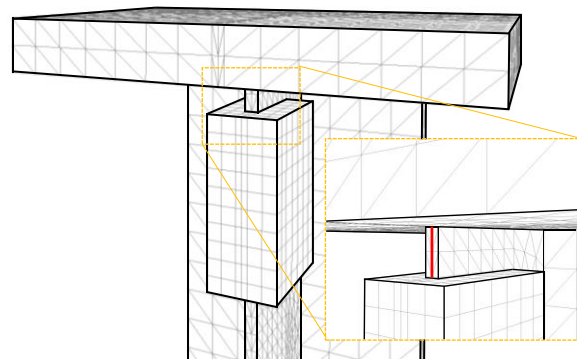


図-8 補剛材支持方法

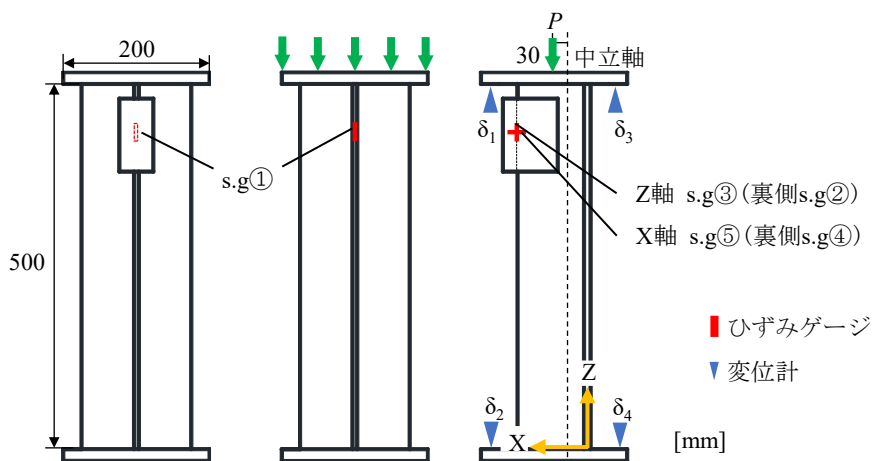


図-6 寸法及びひずみゲージ・変位計・荷重点位置

(3) 結果

図-9に変形形状を示す。補剛材によって座屈位置が変化している。また解析結果から実験結果と同様な変形が得られた。表-3に補強効果を示す。最大耐力は約17%向上し、最大耐力時の変位は3mm以上大きくなっていることから、図-9に示す補剛材が座屈を拘束し、座屈位置が変化したことによって変形性能が向上したと考えられる。

図-10に荷重－変位関係を示す。図中に示す理論値は(1)式から得た値である。

$$\frac{P}{A} = E\varepsilon = \frac{E\delta}{L} \quad (1)$$

ここで、 P ：荷重、 A ：断面積（1998mm²）、 E ：鋼材の弾性係数、 ε ：ひずみ、 $\delta=1/4(\delta_1+\delta_2+\delta_3+\delta_4)$ ：変位、 L ：部材長（500mm）である。

図-10より軸剛性は理論値と概ね一致した。2章で述べたように非接着補強の利点である弾性域において剛性変化がほとんど生じないことが確認できる。また補強することによって最大耐力を到達した後、急激な耐力低下が発生していないことが分かる。解析でも同様な結果が得られた。表-4に荷重－変位関係から得た、最大荷重の20%と50%の点で求めた傾きを示す。補強と無補強の値を比べて、差は2～7%程度であり、補強が初期剛性に影響を与えていないことが分かる。また解析も同様で、実験結果とも差はなかった。

図-11にsg①の荷重－ひずみ関係を示す。図中に示す

理論値は(2)式から得た値である。

$$\frac{P}{A} + \frac{Pe}{Z} = E\varepsilon \quad (2)$$

ここで、 e ：偏心距離（30mm）、 Z ：断面係数（17659mm³）である。

図-11より弾性域の挙動は理論値と概ね一致しており、図-10と同様に剛性の変化がほとんど生じないことが分かる。局部座屈位置の変化を踏まえると、無補強の場合、被補剛材が降伏してすぐに最大耐力を迎えるが、補強すると座屈が拘束されるため、降伏しても耐力は緩やかに伸び続けていることが確認できる。

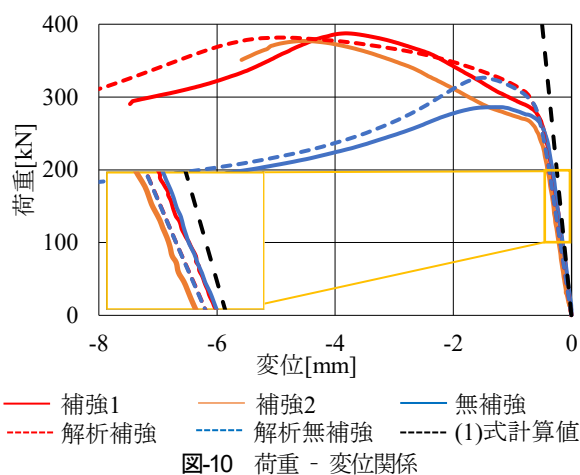


図-10 荷重－変位関係

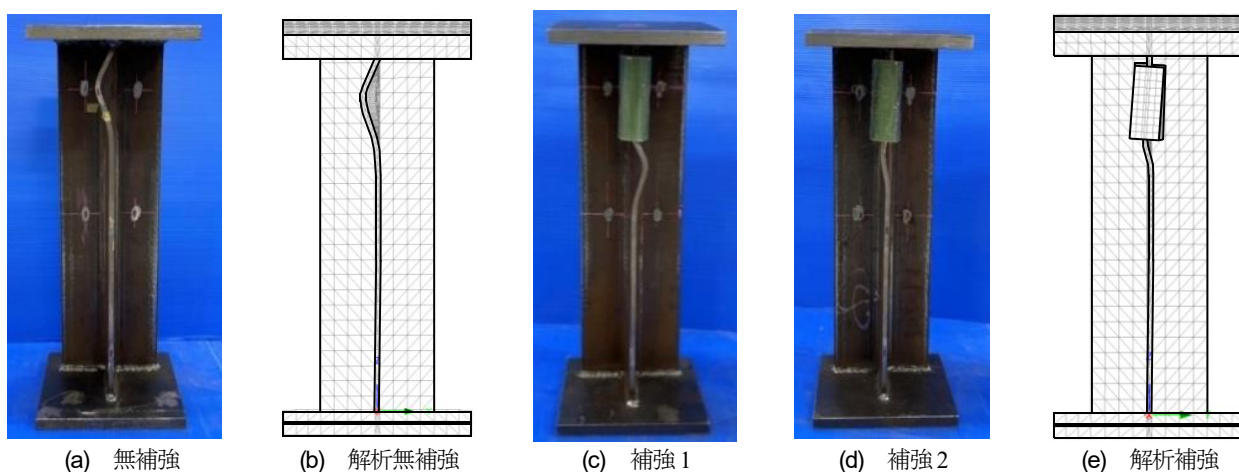


図-9 変形形状

表-3 補強効果

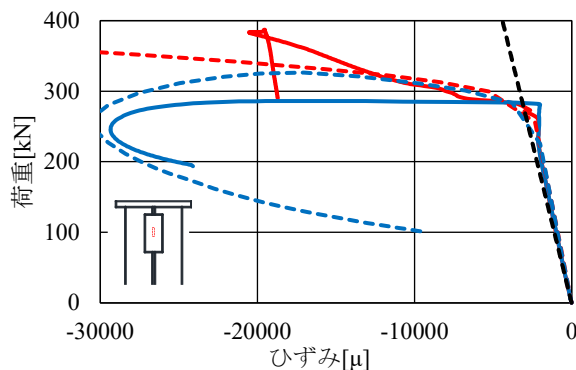
		最大耐力 [kN]	解析/実験	最大耐力時 の変位[mm]	解析/実験
無補強	実験	286.16	-	-1.29	-
	解析	326.46	1.14	-1.44	1.12
補強	実験 1	387.42	-	-3.81	-
	実験 2	377.06	-	-4.53	-
	解析	381.75	1.00	-4.82	1.15

表4 荷重－変位関係から算出した傾き

	無補強	補強1	補強2	無補強/補強
実験	-573.6	-535.6	-560.0	1.07, 1.02
解析	-530.1	-532.3		1.00

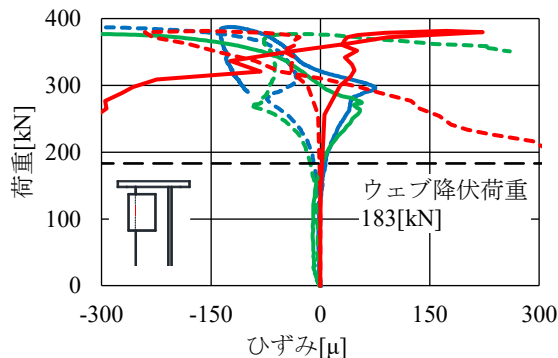
図-12 は補剛材上 Z 軸方向の荷重－ひずみ関係である。ウェブ降伏荷重を超えてから、圧縮側と引張側にひずみが増大していることから、被補剛材の座屈変形を拘束し、補剛材も被補剛材の座屈変形に沿ってわずかに全体が変形していると考えられる。

図-13 は補剛材上 X 軸方向の荷重－ひずみ関係である。sg④、⑤のどちらのひずみも圧縮側に大きくなっているため、溝形補剛材を開くような力が働いていると考えられる。図-14 の実験と解析の被補剛材座屈後の補剛材を見ると、解析では補剛材が広がっている様子が確認できるが、実験で使用した補剛材では損傷なく、開きも確認できなかった。解析で補剛材の材料特性を、図-5 の点線で区切られたように要素座標系を分割したため、補剛材の X 軸先端角部が精密に再現できていないことや、補剛材を直角でモデル化したことで図-15 からわかるように、内側角部に応力集中が発生していることが要因と考える。



— 補強1 — 無補強 --- 解析補強
--- 解析無補強 --- (2)式計算値

図-11 荷重－ひずみ関係 (sg①)



— ④-補強1 --- ⑤-補強1 — ④-補強2
--- ⑤-補強2 — ④-解析 --- ⑤-解析

図-12 荷重－ひずみ関係 (sg②, ③)

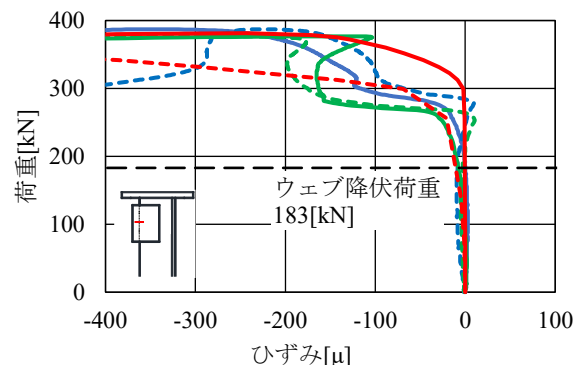
不安定状態を防ぐために取り付けた梁要素は剛性の高いものを用いたが、図-15 のように解析結果では梁要素の接合部には応力集中は見られないため、影響は小さいと考える。

4. 結論

本研究では、FRP 材により非接着補剛された鋼板の圧縮挙動の分析を目的とし、有限要素解析及び解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 被補剛材の形状に合った補剛材で補剛することにより、変形を拘束できることを示した。
- (2) 座屈位置が変化することで、塑性後も耐力が下がり変形性能を向上させることができるとともに、最大耐力も向上することを明らかにした。

接触条件などの解析条件を導入することで、実験結果と同様の結果が得られる解析モデルの構築ができたことから、今後、パラメトリック解析などを通して、耐力評価法や設計法などの構築を進めていく。



— ②-補強1 --- ③-補強1 — ②-補強2
--- ③-補強2 — ②-解析 --- ③-解析

図-13 荷重－ひずみ関係 (sg④, ⑤)

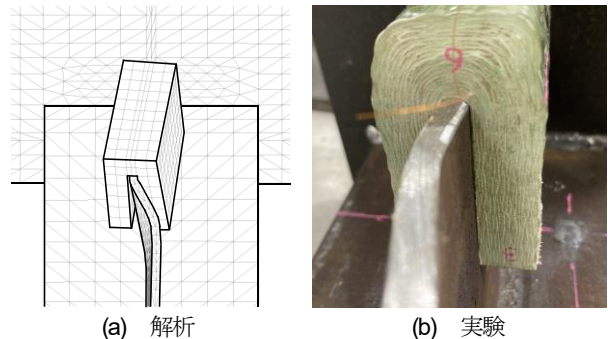


図-14 被補剛材降伏後の補剛材

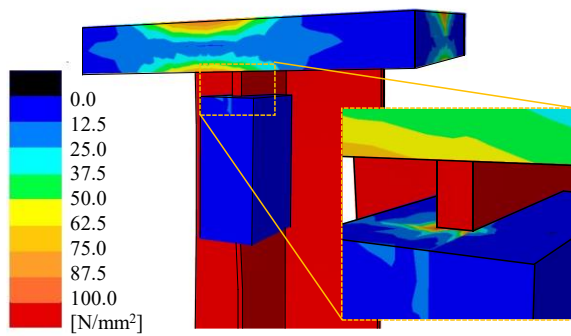


図-15 最大耐力時の補剛材応力分布

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20K04788 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：鋼道路橋の局所腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料，Vol.294，2006. 1.
- 2) 国土技術政策総合研究所：道路構造物管理実務者研修（橋梁初級 I）道路橋の定期点検に関するテキスト，2015. 3.
- 3) 日本橋梁建設協会：熊本地震橋梁被害報告書，2016. 10.
- 4) 山口栄輝，赤木利彰：腐食した鋼 I 桁の支点部耐力に関する考察，構造工学論文集 Vol.59A，pp80-90，2013. 3
- 5) 浅尾 尚之，藤井 堅：支承部周辺に腐食損傷を有する鋼製プレートガーダー鉄道橋の残存耐力および補強法の評価，鋼構造論文集，Vol.25，No.100，pp15-28，2018. 12.
- 6) 丹波寛夫，橋本国太郎，田中大介，杉浦邦征：腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.60A，pp.94-104，2014.
- 7) 杉浦江，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，長井正嗣，小林朗：炭素繊維シートを用いた腐食による鋼部材断面欠損部の補修効果に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp.548-554，2008.
- 8) 土木学会：複合構造シリーズ 04 FRP 歩道橋設計・施工指針（案），2011.
- 9) Fengky Satria Yoresta, Phan Viet Nhut, Daiki Nakamoto, Yukihiro Matsumoto : Experimental Investigation on the Buckling Capacity of Angle Steel Strengthened at Both Legs using a VaRTM-Processed Unbonded CFRP Laminates, Polymers, Vol.13, Issue 13, 17 pages, 2021. 7.
- 10) 中本大暉，三枝玄希，松本幸大：非接着 FRP 材による鋼板の座屈補剛法，日本建築学会 技術報告集，Vol. 28, No. 69, pp.691-696, 2022. 6.
- 11) Nhut Phan Viet, Fengky Satria Yoresta, Yasuo Kitane, Kunitaro Hashimoto and Yukihiro Matsumoto: On the Strengthening of Pultruded GFRP Connections using Glass Fiber Sheets: A study on the influence of the bolt diameter, Applied Composite Materials, Vol. 29, issue 2, pp.651-681, 2021.11.

(Received August 26, 2022)

STUDY ON IMPROVEMENT OF THE COMPRESSIVE PERFORMANCE OF STEEL PLATE USING UNBONDED FRP

Rino YAMAMOTO and Yukihiro MATSUMOTO

The local buckling of steel structural elements of thin plate due to the large earthquakes have been reported. Recently, FRPs which have excellent corrosion resistance and weight-strength ratio have been used for strengthening and/or repair for existing structures. Many studies use the adhesive bonding method to apply FRP strengthener. However, this study proposes the strength method without adhesive bonding, namely unbonded strengthening method, between the steel and FRP surface to improve the compressive strength. This method can provide a neglectable small change in the initial stiffness and avoid brittle failure behavior. In this study, we investigated the compressive behavior of T-shaped steel column under axial compression through the finite element analyses and experiments. The results show that the unbonded FRP stiffener can restrain the buckling deformation and increase the compressive capacity. Moreover, it was shown that the unbonded FRP can also improve the load decreasing behavior after reaching the maximum load.