

1. 序論

我が国の橋梁は経年劣化による腐食損傷が多く報告されている。一般的に、腐食減厚への対策として再塗装を行うが、腐食減厚が進行している場合、鋼板をボルトにより添接する当板ボルト補修や部材の交換等が行われることが多い。しかし、これらの補修は、母材への孔明けや現場での溶接、重機等の設備が必要になるなど施工が容易ではなく、経済的にも負担となる。また、腐食減厚が激しい場合、腐食面の不陸により当板接合を用いる高力ボルトの摩擦係数が確保できなくなる。以上のことから、効率的かつ合理的な補修方法の提案が求められている。

本研究では、図 1.1 に示す実橋梁腐食分布を基に腐食損傷を再現した試験体を作製し、腐食による腹板の減厚及び破断がせん断強度特性に及ぼす影響の検討を行った。また、補修方法の要求性能として、せん断強度が健全相当まで回復し、更に耐荷力以降でも急激に耐荷力の低下がないこととし、数種類の補修材を選定し、せん断耐荷力実験を行い、せん断耐荷力、せん断屈服強度、地震等の大きな外力に対するダクティリティについて評価を行った。

2. 実験方法

2.1 試験パラメータ

本研究では、腐食損傷を模擬した試験体 9 体、補修試験体 9 体、全 18 体のせん断耐荷力実験を行った。

2.1.1 損傷モデル

実橋梁腐食分布は、図 1.1 に示すように、水平補剛材上部腹板や下フランジ近傍腹板に著しい減厚が生じている¹⁾²⁾。腐食損傷を模擬した試験体を図 2.1 に示す。試験体は、上下フランジ及び垂直補剛材で囲まれた腹板(500mm×500mm)を着目パネルとした。損傷のない試験体(N)を健全とし、腐食により水平補剛材上部腹板の破断損傷を模擬した試験体を上部欠損(DU)、腐食により下フランジ近傍腹板の破断損傷を模擬した試験体を下端欠損(DL)とした。

2.1.2 補修モデル

本研究では、補修材料の選定として、次の要求性能を満たす材料の選定を行った。①腐食耐久性②補修の容易性③施工性。以上を満たす補修材として、本研究では薄鋼板 2.3mm(以下 ST)・高強度炭素繊維(以下 CF)を選定した。ST は、メッキとナイロン紛体塗装で腐食耐久性を満たすものと考えた。表 2.1 に、補修材の材料特性を示す。図 2.2 に、上部欠損(DU)及び下端欠損(DL)に対して補修を行った試験体を示す。以下に各試験体の詳細を示す。

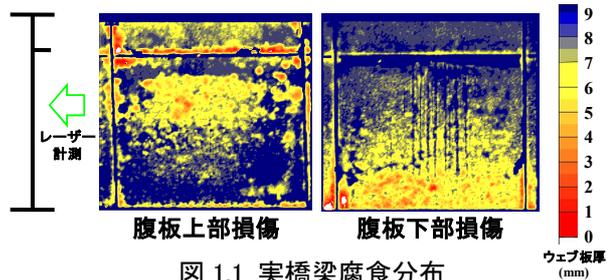


図 1.1 実橋梁腐食分布

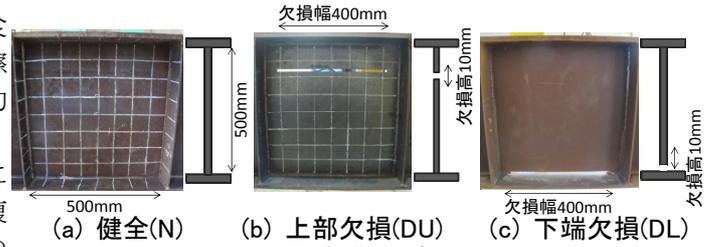


図 2.1 損傷モデル

表 2.1 補修材材料特性

項目	鋼	高強度炭素繊維
弾性係数	$2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	$2.45 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
密度	7.8 g/cm^3	1.8 g/cm^3
引張強度	400 N/mm^2	3400 N/mm^2

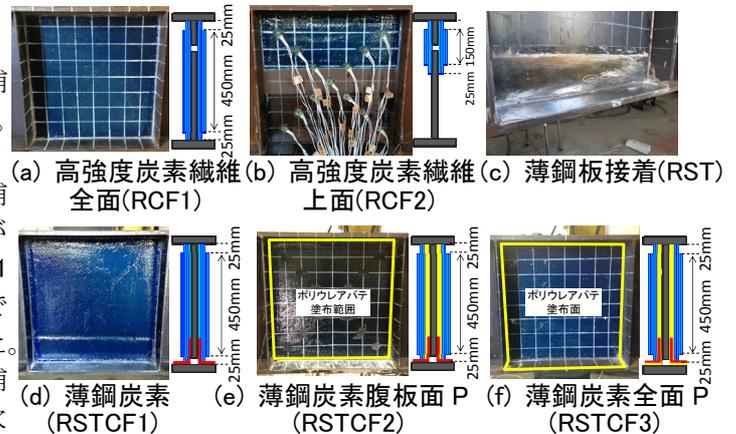


図 2.2 補修モデル

表 2.2 接着材材料特性⁵⁾

項目	アクリル系接着剤	エポキシ系接着剤	ポリウレアパテ
弾性係数	1000 N/mm^2	1000 N/mm^2 以上	68 N/mm^2
引張強度	1 N/mm^2 以上	45 N/mm^2	11 N/mm^2

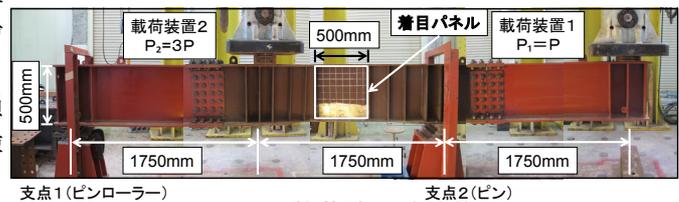


図 2.3 載荷時試験状態

- (a) 上部欠損(DU)に CF をエポキシ系接着剤で腹板全面に接着した試験体(RCF1)である。
- (b) 上部欠損(DU)に CF を腹板上面にエポキシ系接着剤で接着した試験体(RCF2)である。
- (c) 下端欠損(DL)に ST をアクリル系接着剤で下フランジ及び腹板面に接着した試験体(RST)である。
- (d) 下端欠損(DL)に ST をアクリル系接着剤で接着後、腹板面に CF をエポキシ系接着剤で接着した試験体(RSTCF2)である。
- (e) 下端欠損(DL)に ST をアクリル系接着剤で接着後、腹板面にポリウレアパテを塗布し、CF をエポキシ系接着剤で接着した試験体(RSTCF2)である。
- (f) 下端欠損(DL)に ST をポリウレアパテで接着後、腹板全面にポリウレアパテを塗布し、CF をエポキシ系接着剤で接着した試験体(RSTCF3)である。
- (g) 比較として、下端欠損(DL)に当板ボルト補修を行った試験体(RHB)を作製した。

ここで、CF の接着方法は、1 層目はせん断引張方向に、2 層目は 45° 角度を付けせん断圧縮方向に接着し、同様に 3,4 層目は交互に接着し片面 4 層とした³⁾。表 2.2 に、接着剤の材料特性を示す。ポリウレアパテは、弾性係数が低く補修材の剥離を防止する効果がある。また、本実験では腹板 4.5mm と 3.2mm の試験体を作製し、実験を行った。

2.2 実験方法

図 2.3 に、本実験の荷重時試験状態を示す。2 点荷重・2 点支持することにより着目パネルにせん断力を与え、実橋での桁端部の断面力状態をできるだけ再現した。計測は、着目パネルのせん断座屈面外変位を捉えるため、変位計を設置した。また、せん断座屈時に生じる腹板表裏のひずみ分岐挙動を捉えるため、3 軸ゲージを張付けた。図 2.4 及び図 2.5 に、変位計とひずみゲージ設置位置を示す。

3. 実験結果

3.1 せん断力と鉛直変位関係

図 3.1 に、実験で得られたせん断力と鉛直変位関係を示す。縦軸のせん断力は着目パネルに作用するせん断力、横軸の鉛直変位は荷重装置 2 の鉛直変位である。また、本研究ではせん断耐力は着目パネルに作用する最大せん断力と定義した。

○腹板 4.5mm 上部損傷補修モデル

図 3.1 の(a)より、上部欠損(w4.5/DU)は健全(w4.5/N)と比較してせん断耐力が 26%低下した。これに対し、CF を腹板全面に接着した試験体(w4.5/RCF1)は、上部欠損(w4.5/DU)と比較してせん断耐力が 170%回復し、CF を腹板上面に接着した試験体(w4.5/RCF2)は 142%回復した。w4.5/RCF1, w4.5/RCF2 共に、健全相当の耐力回復が見られたが、最大せん断力後補修材の剥離により、せん断耐力が著しく低下した。

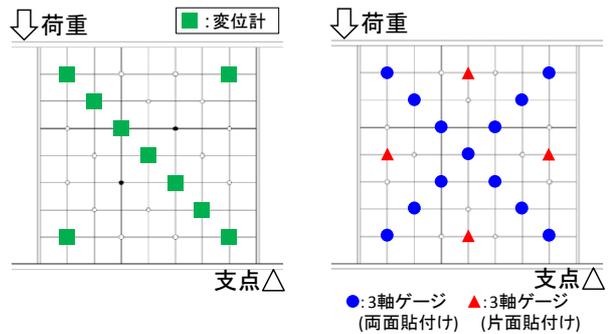
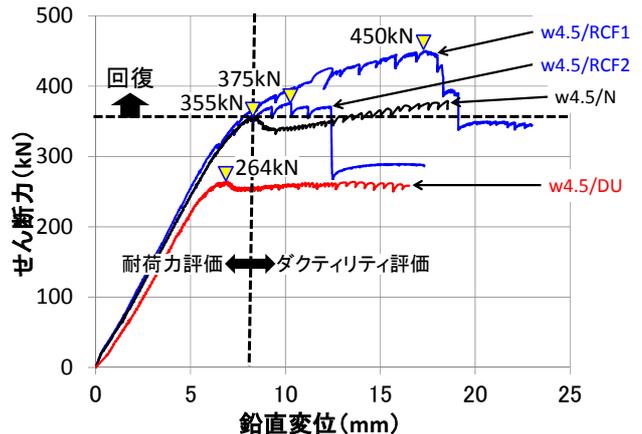
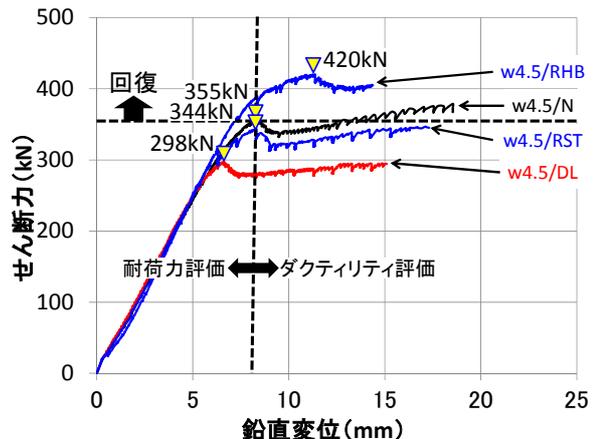


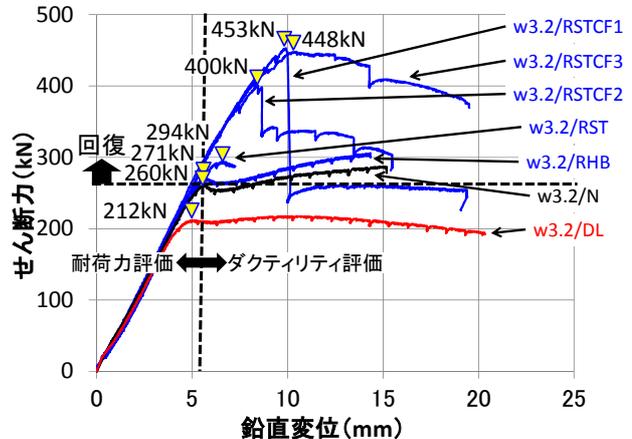
図 2.4 変位計設置位置 図 2.5 ひずみゲージ設置位置



(a) 腹板 4.5mm 上部損傷補修モデル



(b) 腹板 4.5mm 下部損傷補修モデル



(c) 腹板 3.2mm 下部損傷補修モデル

図 3.1 せん断力-鉛直変位関係

○腹板 4.5mm 下部損傷補修モデル

図 3.1 の(b)より、下端欠損(w4.5/DL)は健全(w4.5/N)と比較してせん断耐荷力が 16%低下した。これに対し、当板ボルト補修 (w4.5/RHB)は、下端欠損 (w4.5/DL)と比較してせん断耐荷力が 141%回復し、ST を接着した試験体(w4.5/RST)は 115%回復した。w4.5/RHB, w4.5/RST 共に、健全相当の耐荷力回復が見られた。w4.5/RHB は、最大せん断力後のせん断耐荷力の増大が確認できた。w4.5/RST は、終局時に補修材が剥離し、せん断耐荷力の低下を確認した。

○腹板 3.2mm 下部損傷補修モデル

図 3.1 の(c)より、下端欠損(w3.2/DL)は健全(w3.2/N)と比較してせん断耐荷力が 18%低下した。これに対し、当板ボルト補修 (w3.2/RHB)は、下端欠損 (w3.2/DL)と比較してせん断耐荷力が 128%回復し、ST を接着した試験体(w3.2/ST)は 128%、ST と CF を接着した試験体(w3.2/RSTCF1)は 214%、腹板面にポリウレタを塗布した試験体(w3.2/RSTCF2)は 189%、全面にポリウレタを塗布した試験体(w3.2/RSTCF3)は 211%回復した。各補修モデルは、健全相当の耐荷力回復が見られた。w3.2/RST, w3.2/RSTCF1, w3.2/RSTCF2 は、最大せん断力後補修材の剥離により、せん断耐荷力が著しく低下したが、w3.2/RSTCF3 は徐々に補修材が剥離し、せん断耐荷力も徐々に低下する特徴を示した。

3.2 せん断座屈強度曲線

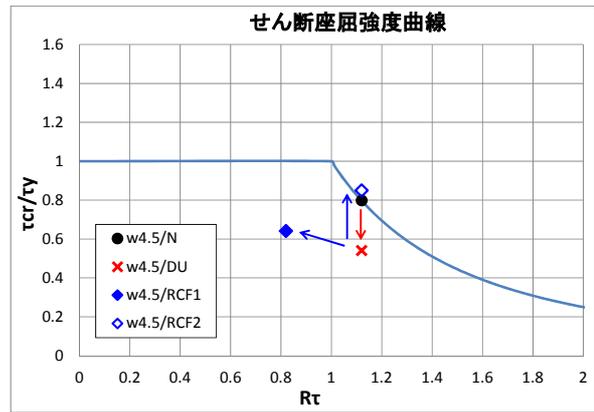
図 3.2 に、各試験体のせん断座屈強度をプロットしたせん断座屈強度曲線を示す。縦軸の τ_{cr}/τ_y は、各試験体のせん断座屈強度を降伏せん断応力で除し無次元化した。横軸は、事前に算出した各試験体の幅厚比パラメータ R_t である。本研究では、腹板の面外変位と腹板表裏の主ひずみの分岐挙動から、腹板が急激に面外に変位するせん断力をせん断座屈強度とした。また、補修モデルの幅厚比パラメータ R_t は、CF 一層当たりの厚さを鋼換算し、母材板厚に足すことで算出した。当板ボルト(RHB), 薄鋼板接着(RST)モデルは、補修材より上部腹板を一パネル(500mm×400mm)とし、幅厚比パラメータ R_t を算出した⁴⁾。

○腹板上部損傷補修モデル

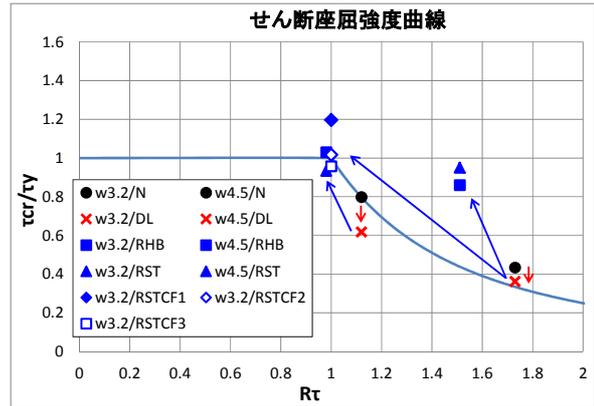
図 3.2 の(a)より、CF を腹板全面に接着した試験体 (w4.5/RCF1)は、幅厚比 0.82, $\tau_{cr}/\tau_y=0.64$ となった。w4.5/RCF1 は、幅厚比によるせん断座屈強度の回復が小さく、補修材の剥離がせん断座屈強度の回復を抑制していると考えられる。

○腹板下部損傷補修モデル

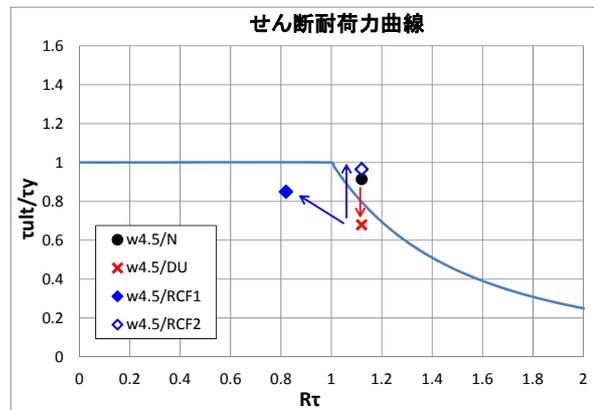
図 3.2 の(b)より、ST を接着した試験体(w3.2/RST)は、幅厚比 1.51, $\tau_{cr}/\tau_y=0.95$ となった。w3.2/RST は、幅厚比によるせん断座屈強度の回復以上にせん断座屈強度が回復したことから、薄鋼板接着補修は、せん断座屈強度に対して補修効果が高いと考えられる。



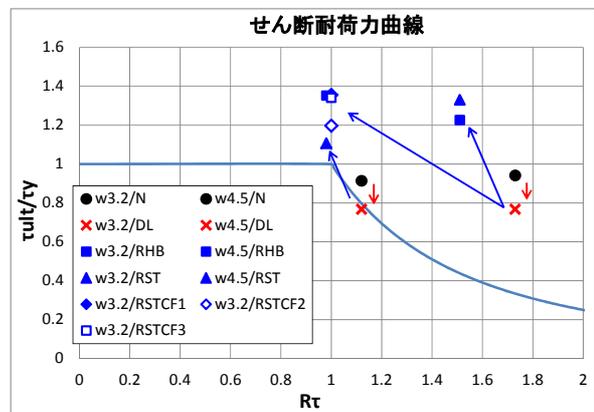
(a) 上部損傷補修モデル



(b) 下部損傷補修モデル
図 3.2 せん断座屈強度曲線



(a) 上部損傷補修モデル



(b) 下部損傷補修モデル
図 3.3 せん断耐荷力曲線

3.3 せん断耐荷力曲線

図 3.3 に、実験で得られた各試験体のせん断耐荷力をプロットしたせん断耐荷力曲線を示す。縦軸の τ_{ult}/τ_y は、各試験体のせん断耐荷力を降伏せん断応力で除し無次元化した。横軸は、事前に算出した各試験体の幅厚比パラメータ R_r である。

○腹板上部損傷補修モデル

図 3.3 の(a)より、CF を腹板全面に接着した試験体 (w4.5/RCF1) は、幅厚比 0.82, $\tau_{ult}/\tau_y=0.85$ となった。w4.5/RCF1 は、幅厚比によるせん断耐荷力の回復が小さく、補修材の剥離がせん断耐荷力の回復を抑制していると考えられる。

○腹板下部損傷補修モデル

図 3.3 の(b)より、ST を接着した試験体 (w3.2/RST) は、幅厚比 1.51, $\tau_{cr}/\tau_y=1.33$ となった。w3.2/RST は、幅厚比によるせん断耐荷力の回復以上にせん断座屈強度が回復したことから、薄鋼板接着補修は、せん断耐荷力に対しても補修効果が高いと考えられる。

3.4 破壊特性

○損傷モデル破壊形態

図 3.4 に、損傷モデルの破壊形態を示す。図中のグラフは、縦軸に腹板高さ、横軸に各腹板高さに設置した変位計の面外変位を着目パネルに作用するせん断力毎に描いたものである。図 3.4 より、上部欠損 (w4.5/DU) は、破断箇所より下のパネルで面外に変位しており、張力場形成は腹板中央より下方に形成していることが分かる。下端欠損 (w3.2/DL) は、腹板下方の面外変位を大きくしており、張力場形成は腹板中央より上方で形成していることが分かる。

○補修モデル破壊形態

図 3.5 に、補修モデルの破壊形態を示す。図 3.5 の(a)より、上部欠損 (w4.5/DU) に対し CF を腹板全面に接着した試験体 (w4.5/RCF1) は、腹板中央が徐々に小さく面外に変位しており、張力場形成は腹板中央で形成を確認した。最大せん断力後は CF が張力場アンカー部から急激に剥離した。図 3.5 の(b)より、下端欠損 (w3.2/DL) に対し当板ボルト補修を行った試験体 (w3.2/RHB) は、腹板全体の面外変位が小さく、せん断力が大きくなると腹板中央近傍が徐々に面外に変位しており、張力場形成位置は、当板よりも上方のパネルで形成を確認した。図 3.5 の(c)より、ポリウレアパテを全面塗布した試験体 (w3.2/RSTCF3) は、最大せん断力に達するまで腹板全体の面外変位は小さいことが確認できる。破壊形態より、張力場アンカー部で剥離が見られるが、面外変位より張力場形成は腹板中央で形成されていることが分かる。

参考文献

- 1) 下里哲弘, 玉城喜章, 有住康則, 丸山直人, 矢吹哲哉, 小野秀一: 腐食劣化した鋼 I 桁のせん断耐荷力実験(その 1), 土木学会第 66 回年次学術講演会, I-523, pp.1045-1046, 平成 23 年 9 月

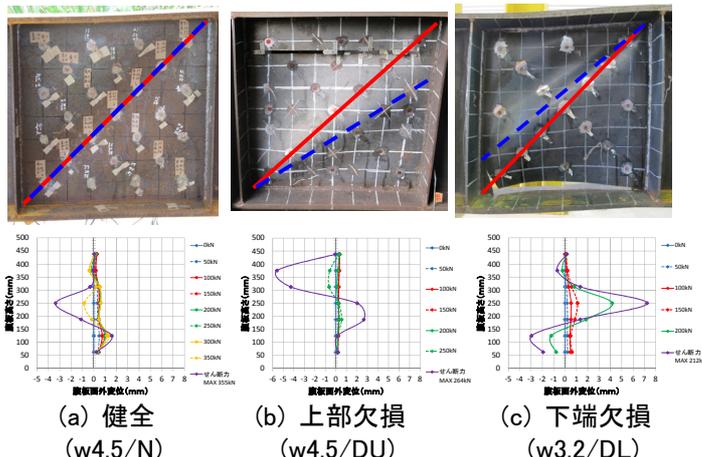


図 3.4 損傷モデルの破壊形態

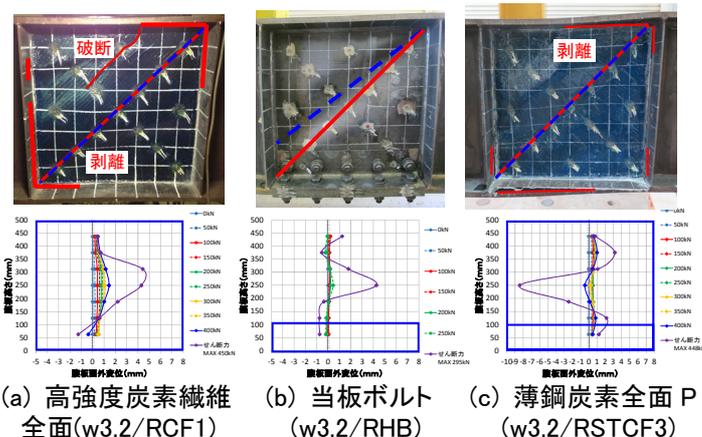


図 3.5 補修モデルの破壊形態

4. 結論

以下に本研究で得られた結論をまとめる。

- (1) 腹板上部の破断損傷モデルは、健全と比較して張力場が腹板中央より下方に形成する特性を示し、腹板下部の破断損傷モデルは、張力場が腹板中央より上方に形成する特性を示し、両者ともせん断耐荷力及びせん断座屈強度が低下した。
- (2) 下部補修モデルでは、薄鋼板及び腹板面にポリウレアを塗布した試験体 (w3.2/RSTCF3) は、健全相当までせん断耐荷力及びせん断座屈強度の回復が見られ、ダクティリティを有していた。
- (3) 上部補修モデルでは、健全相当までせん断耐荷力の回復が確認できた試験体はあったが、せん断座屈強度の回復及びダクティリティを有する補修工法はなく、更なる補修工法の検討を続ける必要がある。

- 2) 玉城喜章, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉, 小野秀一: 腐食劣化した鋼 I 桁のせん断耐荷力実験(その 2), 土木学会第 66 回年次学術講演会, I-524, pp.1047-1048, 平成 23 年 9 月
- 3) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宣央, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣, 鋼桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究, 構造工学論文集 Vol.58A
- 4) 土木学会: 座屈設計ガイドライン(2005 年度版), 2005.10.
- 5) 新日鉄住金マテリアルズ株式会社コンポジット社試験成績書