

腐食した鋼桁端部に対するせん断耐荷力の回復メカニズムに関する研究

設計工学講座 高橋 鴻

1.はじめに

我が国の鋼橋の多くは高度経済成長期に建設されその大半が供用から約 50 年以上経過しており、腐食による経年劣化が問題視されている。特に桁端部は他の部位に比べ腐食の進行が激しく、崩落の主因ともなる事が報告されている¹⁾。今後も腐食損傷事例の増加が予測されるため、効率的かつ合理的な補修による鋼橋の長寿命化が重要となる。

近年、炭素繊維シートを接着剤によって鋼部材の損傷部位に貼付ける補修方法の研究が数多くされており、せん断耐荷力を回復させるには炭素繊維シートの繊維軸方向を腹板に生じる主応力の引張方向と圧縮方向に交互に重ねて接着させる方法が用いられる。しかし、貼付方向毎の炭素繊維シートによる回復効果の役割は明確にされているとは言い難く、せん断耐荷力の回復メカニズムの解明にまでは至っていないのが現状である。

本研究では、腐食した鋼桁端部に対して炭素繊維シート及び当て板ボルト法を併用した補修方法について、回復メカニズムの検証を目的とする。

2.試験方法

炭素繊維シートと当て板ボルト法による鋼桁のせん断耐荷力回復効果のメカニズムを検証するため、主として炭素繊維シートの貼付方向及び積層数に着目してせん断耐荷力試験を行った。

2.1 载荷方法

せん断耐荷力試験の载荷状況を図 1 に示す。この試験は、2 点载荷及び 2 点支持、中央の着目パネルで曲げが小さく、せん断力が卓越する桁端部の断面力をできるだけ再現した試験装置を用いた。载荷試験は変位制御により行い、2 本の 1000kN 油圧载荷機を用いて行った。

2.2 補修材料

本試験では終局せん断耐荷力に到達した後で、接着剤の弱点である端部の剥離が生じにくい低弾性タイプの炭素繊維シートを採用した²⁾。炭素繊維シートを図 2 に示す。また、材料定数を表 1 に示す。

2.3 試験体概要

本試験では、鋼 I 桁橋の実腐食分析データを参考に³⁾、下フランジ溶接部付近破断及び腹板の減肉を腐食損傷モデルとした。健全時の腹板板厚を 4.5mm とし、一様減肉時の腹板板厚を 3.2mm とした。下部腐食は、腹板と下フランジ境界部を破断させ、さらに重度な腐食状況を再現するため、腹板と垂直補剛材の境界部を下から 75mm 切り上げた。腐食試験体を図 3(a)に示す。これらの腐食形態に対し、下部腐食には当て板ボルト、腹板の同様減肉には炭素繊維

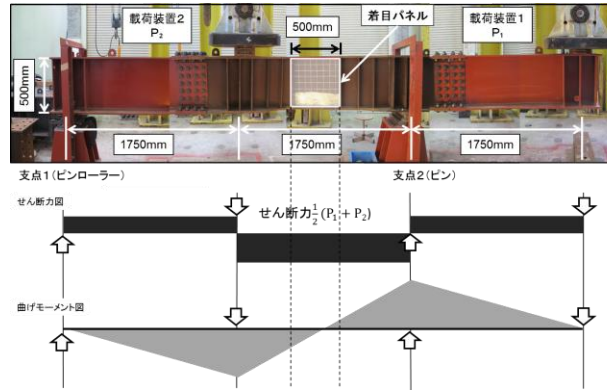


図 1. せん断耐荷力試験载荷状況

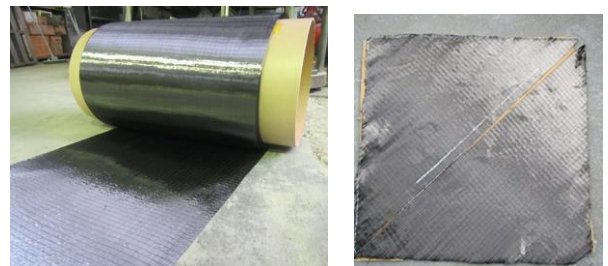


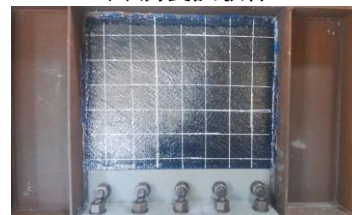
図 2. 炭素繊維シート

表 1. 炭素繊維シートの材料定数

弾性係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	設計厚さ (mm)	繊維目付量 (g/m ²)
2.45×10^5	3400	0.167	300



(a) 腐食試験体



(b) 補修を施した試験体

図 3. せん断耐荷力試験体着目腹板

シートによる補修を行った。補修試験体を図 3(b)に示す。

2.4 試験パラメータ

試験パラメータを表 2 に示す。表には各試験体の腹板板厚、腹板の降伏値、各貼り付け方向毎の積層

数をそれぞれ併記している。当て板ボルト補修を施した試験体に、炭素繊維シートの貼付方向及び積層数を変化させてせん断耐荷力試験を行った。交差4層及び引張4層は、総積層数が等しいため、貼付方向が回復効果に及ぼす影響の検討を行う。また、交差8層及び引張4層は引張方向の積層数が等しいため、圧縮方向に接着させた炭素繊維シートの影響の検討を行った。

2.5 施工方法

まず、腹板の炭素繊維シート接着面に、2種ケレンを施す。次に、溶剤系プライマーを鋼材に塗布し、さらに、剥離防止に効果のあるポリウレタ系パテ材²⁾を塗布する。その後、接着剤を用いて炭素繊維シートを接着させる。以上の方法により炭素繊維シートは接着を行った。その後、当て板を高力ボルトにより接合させた。また、炭素繊維シートを重ねて接着する際は、剥離の防止として2層毎に端部をずらして接着を行った。各層での接着範囲を図4に示す。

2.6 計測項目

ひずみの計測位置及び面外変位の計測位置例を図5に示す。図内の○印は腹板片面のひずみを計測した位置、●印は腹板両面のひずみを計測した位置及び面外変形の計測位置である。ひずみゲージは主ひずみや相当ひずみを算出するため3軸ゲージを使用し、炭素繊維シート表面のひずみを計測した。腹板面の表裏で計測した8箇所のひずみと同位置で計測した面外変形から、せん断座屈の判定を行った。

3. 試験結果

本章では、試験結果から炭素繊維シートによるせん断耐荷力の回復効果と回復メカニズムの検討を行った。ここで、せん断耐荷力 V_{ult} は、せん断座屈強度 V_{cr} 、斜め張力場での抵抗強度の後座屈強度 V_t 、上下フランジと垂直補剛材で囲まれたフレーム強度 V_f から以下の式(1)で表せられる³⁾。

$$V_{ult} = V_{cr} + V_t + V_f \quad (1)$$

このうち、フレーム強度 V_f は一般的に小さな値であるため、本研究ではせん断耐荷力をせん断座屈強度 V_{cr} と後座屈強度 V_t に着目し、各貼付方向及び積層数の回復メカニズムについて考察を行った。

3.1 せん断力-鉛直変位関係

図6に各試験から得られたせん断力と鉛直変位の関係を示す。鉛直変位は荷重機2の直下変位を使用した。剛性が急激に低下した点をせん断耐荷力 V_{ult} とし、図に▽印で併記している。この結果から、どの試験体でも炭素繊維シートによってせん断耐荷力が上昇したことがわかる。当て板+交差8層と当て板+引張4層を比較すると、当て板+交差8層の回復効果が大きい。引張方向及び圧縮方向のどちら

表2. せん断耐荷力試験パラメータ

試験体名	健全	当て板ボルト	当て板+交差4層	当て板+交差8層	当て板+引張4層
腹板板厚	4.5	3.2	3.2	3.2	3.2
腹板の降伏値	310	330	330	337	330
片面辺りの総積層数	-	-	4層	8層	4層
引張方向の積層数	-	-	2層	4層	4層
圧縮方向の積層数	-	-	2層	4層	0層

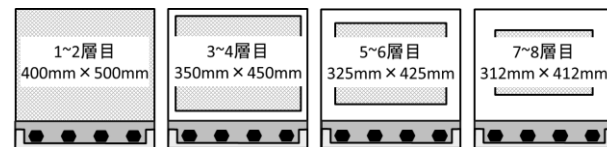


図4. 炭素繊維シート各層の接着範囲

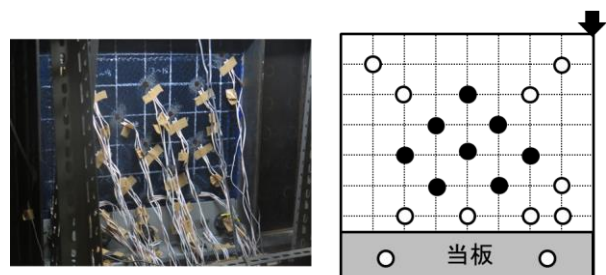


図5. 計測位置

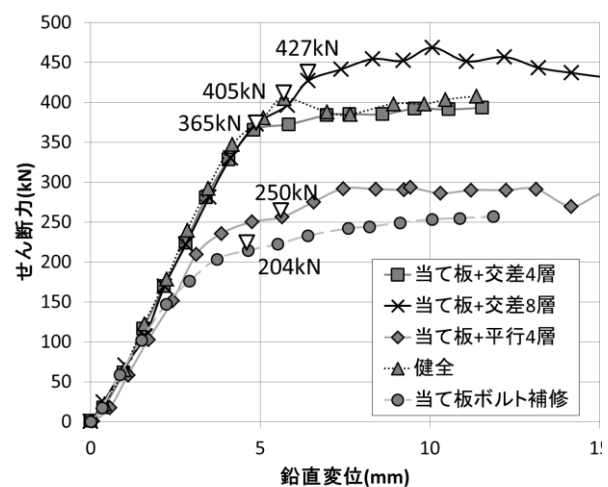


図6. せん断力-鉛直変位関係

もせん断耐荷力 V_{ult} の回復効果に寄与することがわかる。また、当て板+交差4層と当て板+引張4層を比較すると、当て板+交差4層の回復効果が大きい。炭素繊維シートの貼付方向はせん断耐荷力 V_{ult} の回復効果に影響を与える事が示唆された。

3.2 せん断座屈強度の回復効果

せん断座屈強度 V_{cr} は、腹板表裏の最小主ひずみが荷重中に分岐した後、面外変形の2乗の剛性が変化した点で生じたと判定した³⁾。図7に健全モデル、当て板+交差4層、当て板+引張4層のせん断座

屈の判定に用いた図、計測位置及び試験後の腹板を示す。図8に各試験体のせん断座屈強度と後座屈強度の関係を示す。図8より、当て板+引張4層が最もせん断座屈強度 V_{cr} が低いことから、炭素繊維シートによってせん断座屈強度を上昇させる効果が示された。また、当て板+交差8層と当て板+引張4層を比較すると、当て板+交差8層のせん断座屈強度 V_{cr} が2倍以上高い値を示した。このことから、引張方向よりも圧縮方向に接着させた炭素繊維シートによるせん断座屈強度の回復効果が大きいと考えられる。

3.3 せん断耐荷力の回復効果

3.1 から、貼付方向がせん断耐荷力の回復効果に影響を与える事が唆された。この回復効果の差異に関して、腹板の面外変形及び腹板面の塑性域分布に基づき考察を行った。

腹板面の面外変形挙動を表す図として、せん断力と腹板中央の面外変形関係を図9に示す。図には各

せん断耐荷力 V_{ult} 時の面外変形を▽印で併記している。この結果から、当て板+引張4層はせん断力が200kN程度で面外変形が急激に増大していることがわかる。一方、当て板+交差4層では、せん断力が350kN程度で面外変形が急激に増大しており、貼付方向によって、面外変形の抑制効果が異なる傾向が示された。これは面外変形が抑制されることにより、腹板面に生じる曲げひずみが低減され、せん断耐荷力 V_{ult} の回復効果に寄与したと考えられる。

各試験体において塑性ひずみが生じた際の塑性域分布を図10に示し、表3に塑性ひずみ発生時のせん断力を示す。塑性域の判定は、腹板面に貼り付けた3軸ゲージのひずみから相当ひずみを算出することで行った。図内の●印が塑性域に至った箇所である。この結果から、引張4層、交差4層、交差8層の順で塑性域に達しており、接着方向が塑性ひずみ発生抑制効果に影響を与えることが示された。さらに、交差8層及び引張4層を比較すると、交差8層はせ

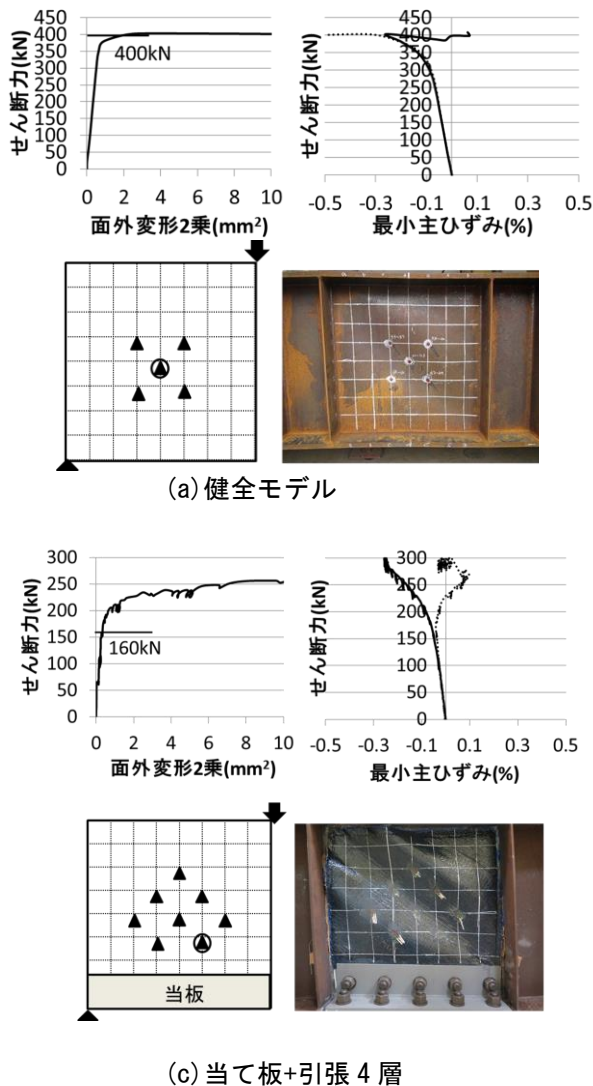


図7. せん断座屈判定図

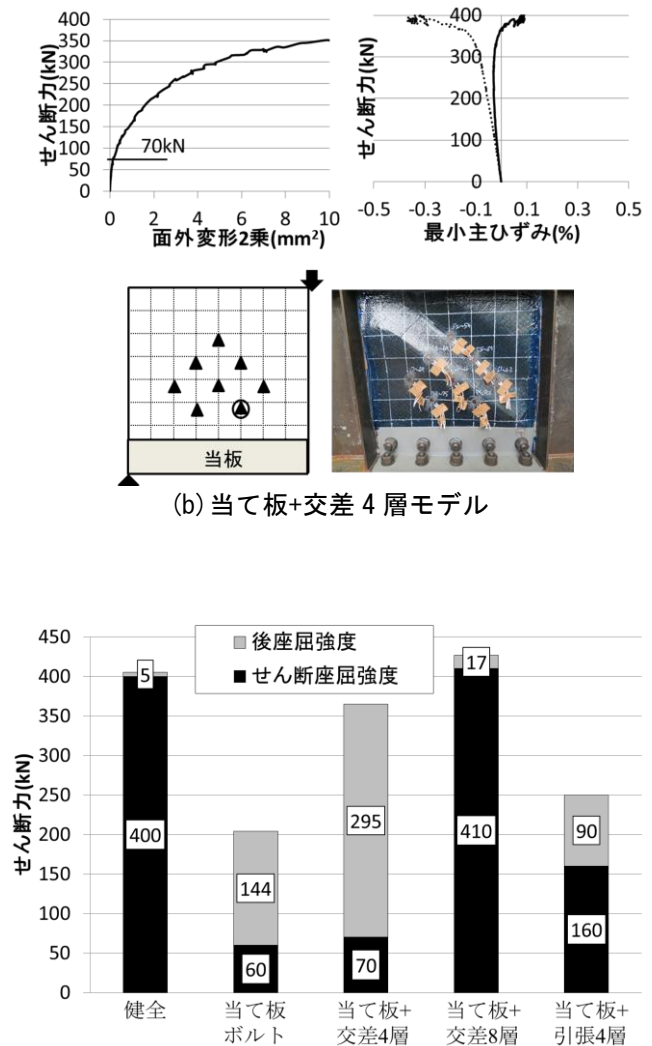


図8. せん断座屈強度及び後座屈強度関係

せん断耐力に到達する直前まで塑性域に達していないことが伺え、圧縮方向の炭素繊維シートは塑性ひずみの発生を抑制させる効果が高い事が示唆される。図 11 にせん断耐力 V_{ult} 時の塑性域分布を示す。このせん断耐力時の塑性域分布を比較すると、引張 4 層は腹板全体にまで塑性域分布の範囲が広がっており、交差 4 層及び交差 8 層は腹板面全体には塑性域分布の範囲が広がっていない事がわかる。塑性ひずみ発生抑制効果及び塑性域分布の範囲の広がり、せん断耐力回復効果の差異に影響を与えたと考えられる。

4. 結論

本研究では、腐食した鋼橋桁端部の補修として炭素繊維シート及び当て板ボルトの併用補修に関し、炭素繊維シートによるせん断耐力の回復メカニズムの解明を目的にせん断耐力試験を行った。得られた知見を以下に示す。

1. 引張方向及び圧縮方向どちらの接着方向の炭素繊維シートもせん断耐力を上昇させる効果がある。
2. 炭素繊維シートにより、せん断座屈強度を上昇させる効果があり、引張方向よりも圧縮方向の炭素繊維シートがその効果が高いと考えられる。
3. 面外変形の抑制効果は、炭素繊維シートの貼付方向によって異なる傾向が示された。面外変形が抑制されることで腹板面に生じる曲げひずみが低減されるため、せん断耐力の回復効果に寄与したと考えられる。
4. 塑性ひずみ発生抑制効果及び塑性域分布範囲の広がり、炭素繊維シートの貼付方向によって異なる。また、この効果は引張方向に比べ圧縮方向の炭素繊維シートが高いと考えられる。

本研究により、各貼付方向の炭素繊維シートはそれぞれせん断耐力の回復に寄与し、貼付方向がせん断耐力の回復効果に影響を与える事が示された。今後は各貼付方向の炭素繊維シートの回復効果を定量的に評価出来るようにし、接着方向毎の必要積層数や積層方法を明らかにすることで効率的な補修方法を確立する予定である。

5. 参考文献

- 1) 下里哲弘ほか：腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程、橋梁と基礎、Vol.43、pp.55-60、2009.11.
- 2) 下里哲弘ほか：腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する基礎的研究、構造工学論文集 Vol.62A、pp559-570、2016.3
- 3) 下里哲弘ほか：実腐食減圧分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する

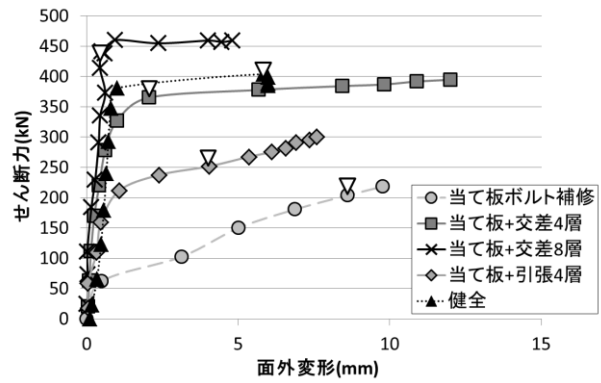


図 9. せん断力-腹板中央面外変形関係

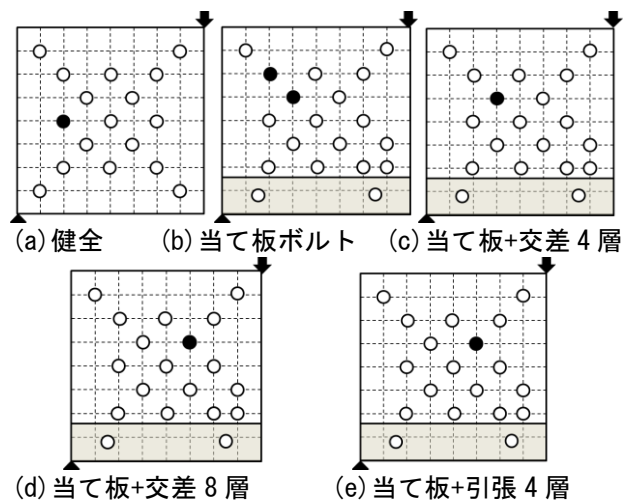


図 10. 塑性ひずみ発生時の塑性域分布

表 3. 塑性ひずみ発生時せん断力

	健全モデル	当て板ボルト補修モデル	当て板+交差4層補修モデル	当て板+交差8層補修モデル	当て板+引張4層補修モデル
塑性ひずみ発生時せん断力(kN)	326	115	331	372	182

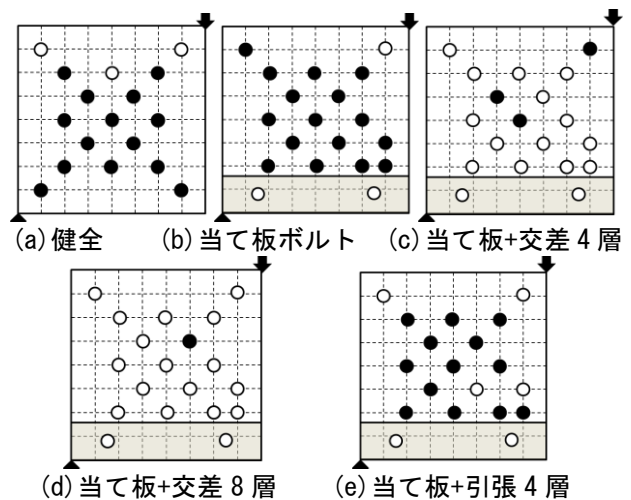


図 11. せん断耐力時の塑性域分布

実験的研究、土木学会論文集 A1、Vol.70、No.3、359-376、2014.