

降伏応力近い初期応力作用下で CFRP 接着補修した腐食鋼板の引張耐荷力

広島大学大学院 正会員 ○福田 洋顕
広島大学大学院 正会員 藤井 堅

1. はじめに

近年、経年劣化した社会インフラ構造物の維持補修について、構造物の性能を維持するだけでなく、より安く、短く、簡易に行えることが求められている。腐食した鋼構造物に対する補修法として、炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP）を接着樹脂により接着する CFRP 接着補修工法がある。この工法は研究が盛んに行われており¹⁾、近年では実構造物の部材への補修も行われてきている²⁾。実構造物に CFRP 接着補修を行う際には、構造物の自重等により部材に初期応力が生じており、一般にはジャッキアップ等により応力を除去して補修が行われる。ところが、初期応力の除去は施工が大掛かりであり、工期、費用が増大するという問題点がある。もし、初期応力を除去せずに補修を行った場合でも、除去した場合と同等あるいはそれ以上の強度が保障されるならば、初期応力の除去は不必要となり、工期や費用が削減できる。

そこで本研究では、腐食した鋼板に対して、降伏応力近い初期応力作用下で CFRP 接着補修を行った場合、

無応力状態で補修を行う場合と比べて耐荷力の低下が生じるかを明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

表-1 に実験条件の一覧を示す。

図-1 に示す、長さ 1000mm、幅 100mm、板厚 8.7mm の鋼板（鋼種 SS400）に腐食を模擬した欠損区間を設け、CFRP ストランドシート接着補修を施し、引張試験を行った。

腐食を模擬した欠損は、図-2 に示すとおり、欠損区間を一定の板厚に欠損させるフラット腐食と、実際の腐食状態に近い凸凹腐食³⁾の 2 種類とした。なお、腐食部の最小断面積は健全部の 31%とした。図-3 (a) に補修に用いた CFRP ストランドシート（弾性係数:706GPa）を、(b) に補修後の供試体を示す。ここで、CFRP の積層枚数は、CFRP の鋼換算断面積が欠損した鋼の断面積と等しくなるよう決定した。

表-1 に示すとおり、健全、無補修、初期応力 0、 $0.75\sigma_y$ 、 $0.95\sigma_y$ で補修を行う条件を設定した。ここで、初期応力は、欠損部の最小断面積位置に生じる応力

表-1 実験条件

供試体名	腐食状況	欠損長さ [mm]	補修 or 無補修	初期応力（補修時の欠損部最小断面積位置での応力）
健全	健全	-	-	-
F - 50 - 無補修	フラット腐食	50	無補修	-
F - 50 - 補修 - 0			補修	0
F - 50 - 補修 - $0.95\sigma_y$				$0.95\sigma_y$
F - 300 - 無補修		300	無補修	-
F - 300 - 補修 - 0			補修	0
F - 300 - 補修 - $0.95\sigma_y$				$0.95\sigma_y$
D - 50 - 無補修	凸凹腐食	50	無補修	-
D - 50 - 補修 - 0			補修	0
D - 50 - 補修 - $0.75\sigma_y$				$0.75\sigma_y$
D - 50 - 補修 - $0.95\sigma_y$				$0.95\sigma_y$

キーワード 腐食引張部材, CFRP 接着補修, 初期・残留応力, 引張耐荷力

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科 社会基盤環境工学専攻

T E L 082-424-7819

を差す。また、 $\sigma_y=235\text{MPa}$ とした。初期応力 0 の供試体は無応力状態で補修を行った後、引張試験機（500kN アクチュエータ）によって変位制御の引張試験を行った。一方、初期応力 $0.75\sigma_y$, $0.95\sigma_y$ の供試体は、無補修状態で引張試験機により初期応力を荷重制御で導入し、その状態で補修を行った。その後、一定の荷重を維持し、接着樹脂が十分に強度発現した後に変位制御による引張試験を行った。

3. 実験結果

3. 1 耐荷力の評価

各供試体の耐荷力は、荷重-伸び関係の傾きが線形関係でなくなり、極大となる位置の荷重と定義した。例として、図-4 に、フラット腐食-欠損長さ 300mm の場合の耐荷力の定義を示す。

健全な供試体の耐荷力に対する各供試体の耐荷力を図-5 に示す。図-5 から、無補修の場合は健全な場合に比べ耐荷力が3~4割まで低下していることがわかる。これに対し、補修を行った場合は初期応力の有無や大小に関係なく健全な場合と同程度の耐荷力となったことがわかる。

3. 2 破壊プロセス

補修を行った供試体が、健全な供試体と同等の耐荷力となった理由を、破壊プロセスにより考察する。健全な供試体の耐荷力は鋼の降伏強度で決まる。そのため、補修供試体は、健全部が降伏するまで CFRP のはく離等、補修部の破壊が生じなければ、健全な供試体と同等の耐荷性能まで回復したといえる。以下、今回の実験で破壊した供試体がどのような破壊プロセスとなったか示す。

フラット腐食-欠損長 50mm 供試体の荷重-伸び関係を図-6 に、鋼に生じたひずみを図-7 に示す。図-7 において、荷重 120kN 時のひずみをみると、初期応力 $0.95\sigma_y$ の供試体は荷重 60kN まで無補修状態で引っ張ったため、初期応力 0 の供試体よりも欠損部のひずみが大きく、降伏ひずみに達していることがわかる。ここで、図-6 において、初期応力 $0.95\sigma_y$ 供試体の荷重-伸び関係は、荷重 120kN で欠損部の鋼が降伏した後も線形関係を保ったままとなった。このことから、欠損部の鋼が降伏しても部材の伸び剛性が

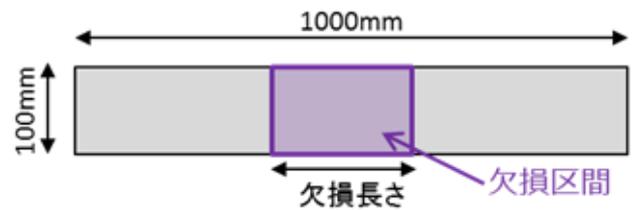
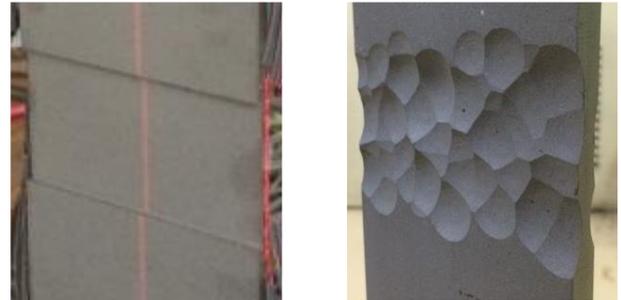
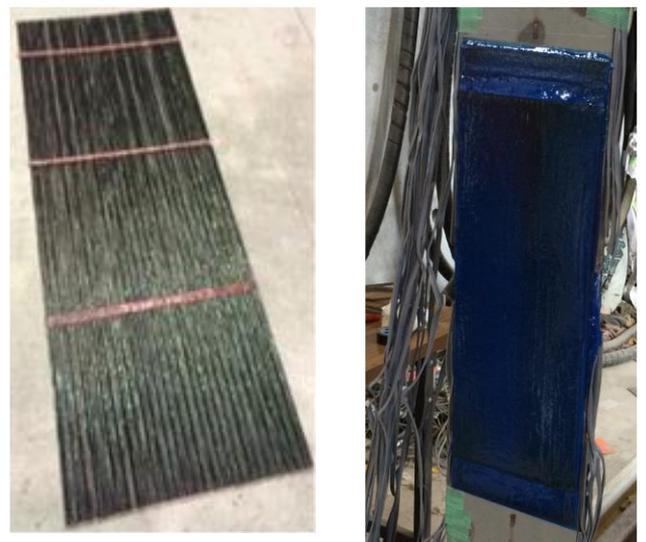


図-1 鋼板の寸法と欠損の範囲



a) フラット腐食 b) 凸凹腐食

図-2 腐食の形態



a) CFRP ストランドシート b) 補修後の供試体

図-3 補修の様子

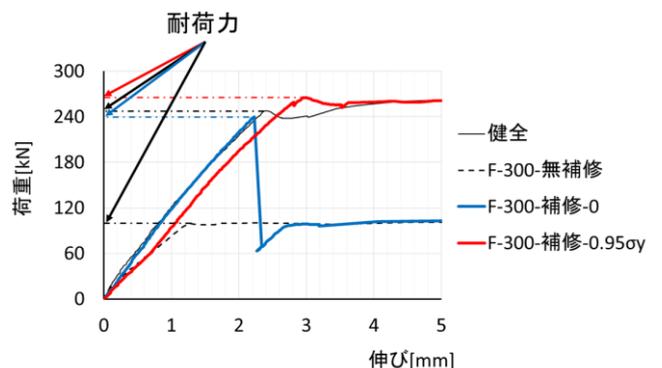
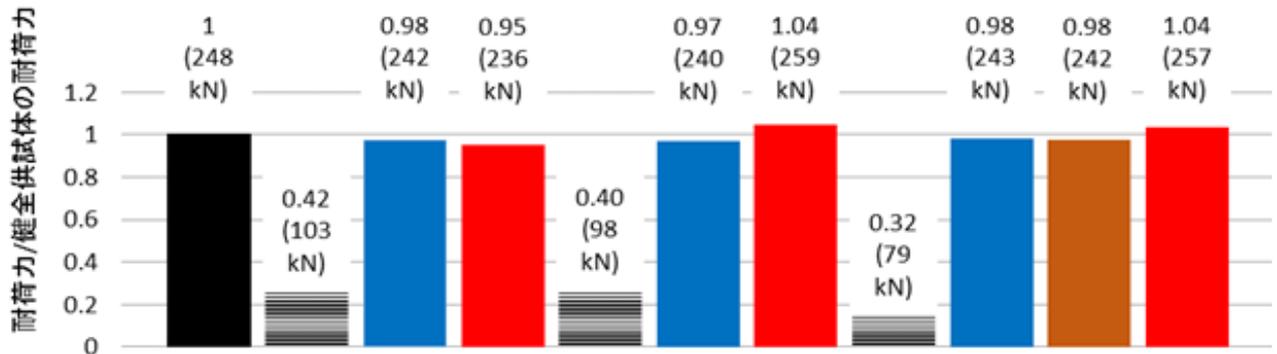


図-4 耐荷力の定義



初期応力	0	0	0	0.95 σ_y	0	0	0.95 σ_y	0	0	0.75 σ_y	0.95 σ_y
補修 or 無補修	-	無補修	補修		無補修	補修		無補修	補修		
欠損長 [mm]	-	50			300			50			
欠損状況	健全	フラット腐食					凸凹腐食				

図-5 各供試体の耐荷力

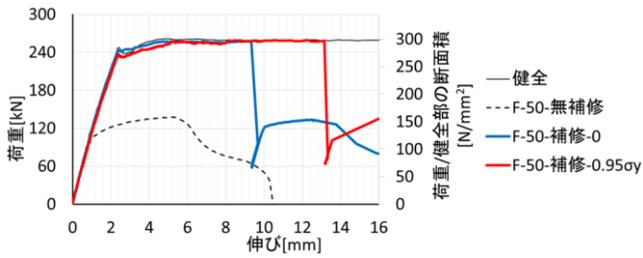


図-6 フラット腐食-欠損長 50mm の荷重-伸び図

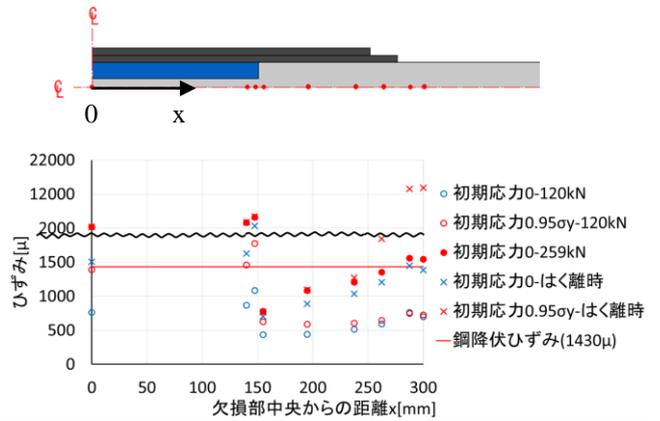


図-9 フラット腐食-欠損長 300mm のひずみ

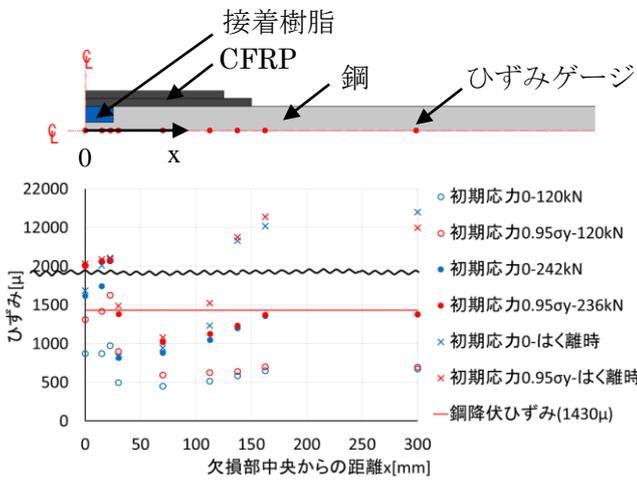


図-7 フラット腐食-欠損長 50mm のひずみ

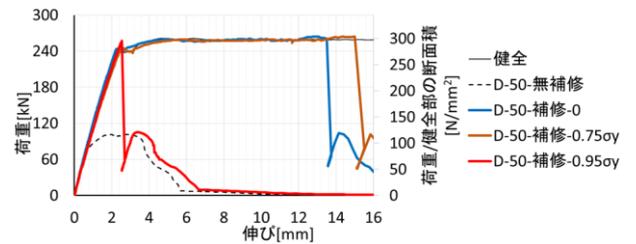


図-10 凸凹腐食-欠損長 50mm の荷重-伸び図

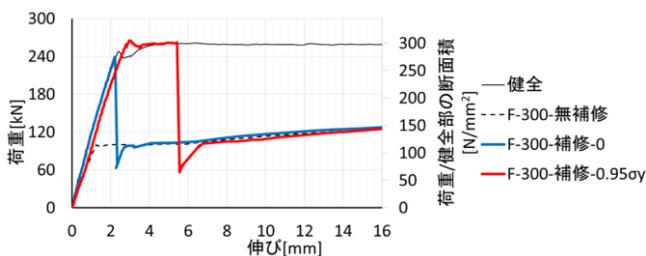


図-8 フラット腐食-欠損長 300mm の荷重-伸び図

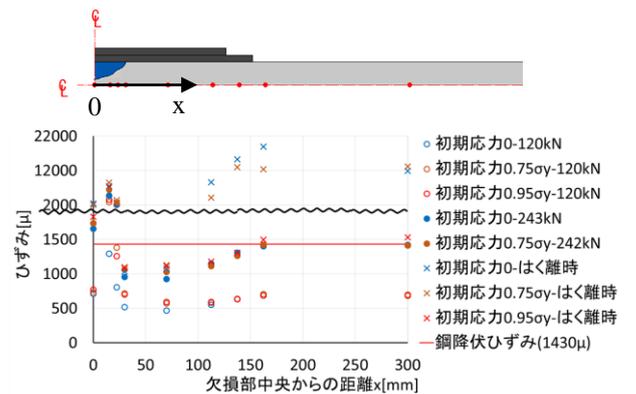


図-11 凸凹腐食-欠損長 50mm のひずみ

低下しなかったことがわかる。

その後、荷重 240kN 付近で、補修供試体の荷重-伸び関係の傾きが大きく低下し、大きく伸びた後、一気に荷重が低下した。これは、CFRP が鋼からはく離したことによるものである。図-7 において荷重 240kN 付近と、はく離時の鋼のひずみをみると、荷重 240kN 付近で健全部の鋼のひずみが降伏ひずみに達し、CFRP がはく離するまで大きく増加していることがわかる。このことから、荷重 240kN 付近で荷重-伸び関係の傾きが大きく低下したのは、健全部の鋼が降伏したためといえる。よって、フラット腐食-欠損長 50mm の供試体は、健全部の鋼が降伏した後に CFRP のはく離が生じるパターンの破壊プロセスであったことがわかる。

フラット腐食-欠損長 300mm 供試体、凸凹腐食-欠損長 50mm 供試体の荷重-伸び関係をそれぞれ図-8, 10 に、鋼に生じたひずみを図-9, 11 に示す。これらの供試体においても、フラット腐食-欠損長 50mm の供試体と同様、健全部の鋼が降伏した後に CFRP のはく離が生じるパターンとなった。また、欠損部の鋼が降伏しても部材の伸び剛性が低下しないことも確認できた。

4. まとめ

腐食部の最小断面積位置において降伏応力 (235MPa) の 75%と、95%の初期引張応力が生じた状態で補修した鋼板と、無応力状態で補修した鋼板の引張試験を行った。なお、腐食部の最小断面積は健全部の 31%とした。

引張試験の結果、補修した供試体は全て、初期応力の有無に関わらず、CFRP がはく離する前に健全部が降伏した。よって、補修した供試体の耐荷力は健全な供試体同様、鋼の降伏強度で決まるため、健全な供試体と同等の耐荷力となった。また、欠損部の鋼が降伏しても、部材の伸び剛性は低下しなかった。

今後、欠損の大きさや初期応力の大きさ等がどのような条件であっても、健全な供試体と同等の耐荷力が得られるかどうかを確認する必要がある。

参考文献

1) 例えば、石川敏之、北根安雄：断面欠損を有する鋼板の接着補修に必要な CFRP 板の長さおよび板厚

の決定方法、応用力学論文集、Vol.13, pp.911-920, 2010.8.

2) 杉浦江、小林朗、稲葉尚文、本間淳史、大垣賀津雄、長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案、土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.106-118, 2009.

3) 土木学会 鋼構造委員会：鋼構造シリーズ 23 腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法、2014.8.