

腐食損傷した鋼板への部分補修における CFRP接着工法の適用性

横田 龍一¹・藤井 堅²・秀熊 佑哉³

¹学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail: m161485@hirosima-u.ac.jp

²フェロー会員 広島大学大学院教授 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail: ken214f@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 コンボジットカンパニー 開発本部

(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

E-mail: y-hidekuma@nck.nsmat.co.jp

近年、腐食損傷した鋼部材の補修・補強方法として、接着剤を用いてCFRPを接着する工法が注目されており、実現現場でも採用されている。CFRP接着工法では、損傷箇所全域にCFRP板を接着する工法が一般原則であるが、フランジ全体が腐食している沿岸橋梁などでは、減肉が著しい箇所に部分的な補修を施し延命化を図る工法も対応策の一つとして考えられる。本研究では、実験的手法により部分的に補修を施す工法の適用性を検討し、部分的な補修でも強度回復効果は得られることを示した。更に、グラインダーなどの電動工具を用いた素地調整では、完全な除錆を行うのは非常に困難であることから、素地調整が不完全なケースを想定した実験も行った。その結果、残存した錆の影響で耐荷力は減少したものの、剥離が生じていない範囲では母材ひずみ低減の効果は得られることがわかった。

Key Words : CFRP, corrosion, adhesive repairing, partial repairing, remained rust.

1. 序論

我が国では、高度経済成長期に整備された社会資本の経年劣化が社会的問題となっている。鋼構造物における経年劣化のうち、とくに問題となるのが鋼部材の腐食損傷であり、鋼橋の架け替え事例のうち、約半数は鋼部材の腐食損傷に起因するものである¹⁾。

軽度の腐食が生じている鋼部材の維持管理は、腐食箇所を洗浄して再塗装を施し、経過を観察する補修方法がとられるが、鋼部材の減肉が著しい場合はさらなる補修・補強が必要である。従来から、腐食損傷した鋼部材には、損傷部材の交換や、高力ボルトや溶接により当て板を添接する補修方法が用いられてきた²⁾。しかし、そうした工法は大掛かりなものになりやすく、応力伝達が不十分になる可能性があるなどといった問題点がある。そこで、これらの工法に代わる新たな補修・補強工法として、CFRPを損傷箇所に接着し、強度回復を図る手法が注目されており、実橋梁でも採用されている³⁾。

ところで、CFRPによる補修・補強では、CFRPに応力を伝達させるためには、腐食区間やその周囲の健全部にまでCFRPを接着する⁴⁾。しかし、広範囲にわたって腐食減肉が生じているようなケースでは、健全部を含めた腐食箇所全域に添接板を設置するの

は困難である。こうしたケースでは、特に腐食による減肉が著しい箇所のみを部分的に補修し、設計荷重を確保する補修方法も一つの対応策である。

また、腐食損傷した鋼部材に接着剤を用いた補修・補強を施す際に接着界面に錆が残存していると、接着不良箇所から添接板の剥離が進展し、強度回復効果が著しく損なわれることが懸念される。しかしながら、ブラスト法による第1種ケレンを施す場合、機材の搬入や粉塵の飛散防止処置などが必要となり、実現現場での処理は多くの労力を要す。一方で、電動工具による第2種ケレンでは、減肉が著しい箇所や狭隘部などの錆を完全に除去するのは難しい。

これらの観点から、本研究では腐食損傷した鋼部材への新たな補修設計工法の確立に向けた基礎的データの蓄積を目的とし、以下の項目について実験的に検討する。

1. 腐食箇所全域ではなく、減肉が著しい箇所を中心に部分的な補修を施した場合どの程度の強度回復効果が得られるか、補修長さを変化させることで接着範囲と強度回復効果の関係について考察する。
2. 腐食損傷箇所に錆が残存している場合、残存錆の影響によって強度回復効果がどの程度減少するのか、残存した錆の面積が補修面積に

占める割合を変化させることで、残存錆が強度回復効果におよぼす影響について考察する。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

CFRP接着工法の補修効果を把握するためには、腐食した鋼部材に種々の補修を施し、その強度回復効果について検討する方法が第一に考えられる。しかしながら、実際に腐食した鋼板を用いて実験を行う場合、腐食の程度や表面の凹凸の形状などは供試体によって異なるため、強度回復効果を定量的に評価するのは困難である。一方で、鋼部材に様な断面欠損を施した供試体を作製し、それに補修を施して行った実験もある⁵⁾が、実際に腐食した鋼材とは欠損の形状やパターンが異なるため、実現象の把握には必ずしも適していない。

そこで、本研究では藤井ら⁶⁾が提案した腐食表面生成モデルを参考にし、健全な鋼板をボールエンドミルで研削して疑似的に腐食を模擬した供試体を用いて載荷実験を行った。本モデルは、鋼板の腐食は空間的に自己相関を持って進展していること⁷⁾から、腐食減肉をアタック因子（飛来塩分や水分などに起因する腐食因子）による減肉で再現している。本モデルを適用することにより、同じ凹凸の疑似腐食表面を有する供試体に種々の補修を施すことで、強度回復効果の差異などを定量的に評価することが可能となる⁸⁾。

a) 供試体母材

本研究では、桁下の広い範囲に腐食が見られる鋼部材の再現を目的とし、中央400mmを腐食区間とした。腐食減肉を模擬するためのボールエンドミル研削のパラメータを表-1、供試体母材の概形を図-1、今回用いる腐食表面の減厚等高線を図-2、実際に作製した疑似腐食供試体を図-3、腐食区間400mmの断面平均板厚の分布を図-4に示す。各供試体の研削による減肉量はレーザー計測器を用いて測定しており、設計した減肉パターンと大差なく合致していたことを確認している。腐食区間の左端から219mmの断面平均板厚は8.78mmで最小となるため、この箇所を中心に補修を施す。

b) CFRP板

母材の腐食減肉を補修により補うために、CFRP板を両面に接着する。ここで、CFRP板の積層枚数は、剛性を健全な状態と一致させるため、式(1)に示すようにCFRP板の鋼換算厚さから決定する。表-2に示す材料特性から、CFRPの積層枚数は片面あたり4枚とした。

$$t_{cf, s} = \frac{E_{cf}}{E_s} t_{cf} \times 2n \geq t_0 - t_{smin} \quad (1)$$

$t_{cf, s}$: CFRPの鋼換算厚さ [mm]
 E_{cf} : CFRPの弾性係数 [kN/mm²]
 E_s : 母材の弾性係数 [kN/mm²]

表-1 腐食表面生成のパラメータ

ボールエンドミル半径 [mm]	研削深さ [mm]	劣化因子	
		個数	密度[個/cm ²]
25	1.5	219	0.29

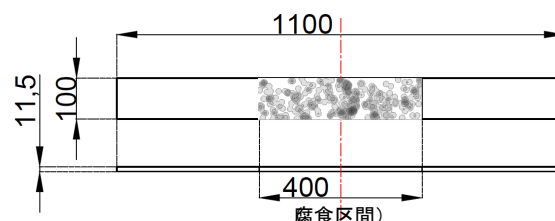


図-1 供試体概形

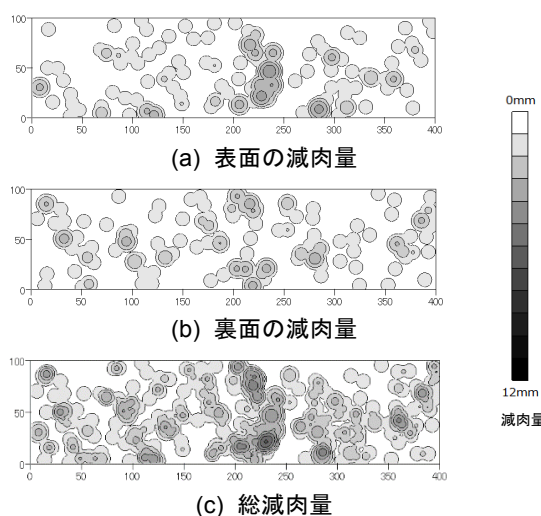


図-2 疑似腐食表面の板厚減肉量

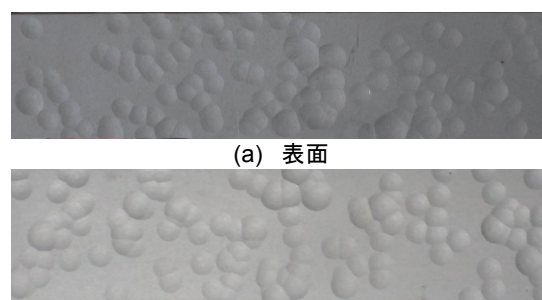


図-3 疑似腐食表面 (サンドブラスト処理後)

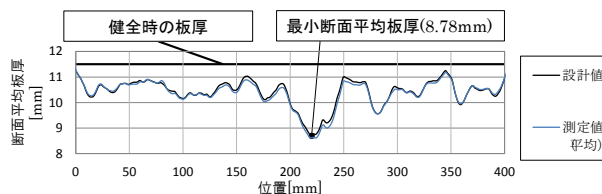


図-4 断面平均板厚の分布

表-2 母材及びCFRPの材料特性

	厚さ [mm]	降伏応力 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]
母材	11.5	296	441	205
CFRP	0.143		1900	640

t_{cf} : CFRP1枚あたりの厚さ [mm]
 n : 片面あたり CFRP 積層枚数
 t_{min} : 母材の最小平均板厚 [mm]
 t_0 : 母材の元板厚 [mm]

また、表-3 に、本研究で用いた接着剤の材料特性を示す。いずれの接着剤も主剤はエポキシ樹脂である。なお、CFRP と鋼材の弾性係数の違いにより生じる剪断力を低減するためには、高伸度弾性パテ材を塗布することで CFRP 板の追随性を高める工法が用いられる³⁾が、弾性範囲内での CFRP 板の挙動に着目するために、本研究では高伸度弾性パテ材は用いないこととした。

表-3 接着剤概要

	用途	圧縮剪断強さ [N/mm ²]	
		実験値	規定値
FP-E9	プライマー	18.2	
FB-E9S	不陸修正材	16.7	10
FR-E9P	含浸接着樹脂材	15.4	10

(2) 試験概要

1000kN 万能試験機を用いて静的引張試験を行い、供試体が破断するまで载荷した。試験速度は 0.5mm/min である。また、各供試体の母材の側面にひずみゲージを貼付し、ひずみ変化を把握した。

3. CFRP板の接着長さの検討

従来、CFRP板を腐食箇所とその周辺の健全部全域に接着する補修方法が一般原則となっている⁴⁾。しかしながら、広い範囲に腐食が生じている供試体について、腐食区間に接着された添接板が伝達する応力について議論した例は少ない。そこで、腐食区間のみにCFRPを接着した供試体を中心に、補修長さを変化させた供試体で実験を行い、その挙動について考察することとした。

(1) 強度回復効果及び破壊性状

試験結果を表-4に示す。表中、N1供試体は無補修状態の供試体である。また、接着長さは最内層のCFRPの長さ、定着長は最外層のCFRPの長さ、ずらし量は応力集中を軽減するために設ける積層ごとの端部のずらし量である。接着中心位置は腐食区間の

左端から219mmの最小断面積位置にすることとしたが、P4供試体は接着長さが腐食区間400mmより大きいため、200mmを中心にしてしている。

各供試体の荷重-ひずみ曲線を図-5, 6に示す。ここでいうひずみは、全体伸びを有効長さで除した値である。CFRPが剥離し、その強度回復効果の喪失後は、いずれの供試体もほぼ同じ挙動を示し、最小断面積位置で破断した(図-5, 7)。

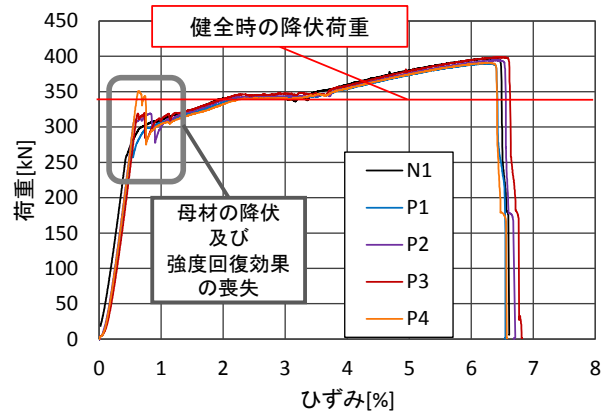


図-5 荷重-ひずみ曲線

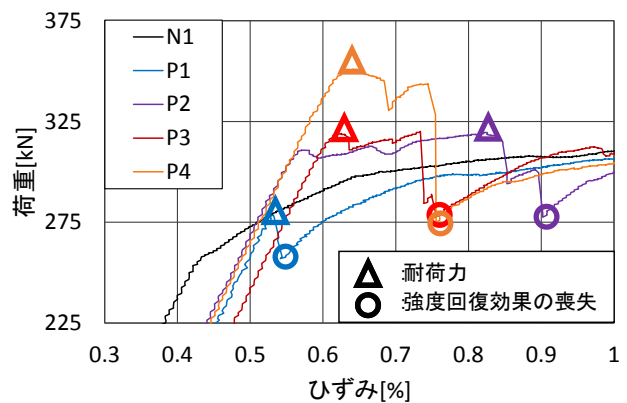


図-6 荷重-ひずみ曲線 (剥離の進展近傍)

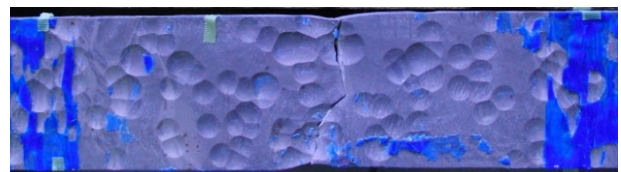


図-7 破断したP3供試体 (裏面)

表-4 供試体一覧 (接着面積変化)

供試体 名	CFRP 積層数	接着長さ [mm]	定着長 [mm]	ずらし量 [mm]	接着中心 位置[mm]	耐荷力		破壊性状
						荷重[kN]	低下率[%]	
(無腐食状態)						$\sigma_y A_o=340.4$		
N1	0					269.9	-21.6	
P1	4	100	100	0	219	278.6	-18	剥離
P2		200	50	25		319.5	-6.0	剥離及び CFRP 破断
P3		300	150	25		320.1	-5.8	剥離及び CFRP 破断, 層間剥離
P4		450	300	25	200	350.9	+3.3	剥離及び CFRP 破断

一方で、図-6から分かるように、CFRP板の剥離は段階的に進展するため、強度回復効果を喪失するまでの挙動や、強度回復効果を失う荷重も各供試体によって異なっている。そこで、CFRP板による強度回復効果が失われる前の最大荷重（図-6）をその供試体の耐荷力とし、表-4に示している。表-4から、無補修供試体と比較してもP1供試体はほとんど強度回復効果が得られていないことが分かる。これは腐食箇所の近傍にずらし量のないCFRP板を接着したため、早い段階で剥離が進展したことに起因している。

ところで、P2~4供試体では、破壊性状にCFRPの破断（図-8）や層間剥離（図-9）が含まれている。今回の実験ではずらし部分に腐食区間が含まれており、減肉量に対して十分なCFRP板の鋼換算厚さが確保されていない。そのため、とくに積層数が少ない接着端部では母材の降伏が先行し、母材の降伏に追従できなくなったCFRPに破断・剥離が生じたものと考えられる。しかしながら、接着端部の母材が降伏するまでは強度回復効果は維持されており、P2,3供試体はN1供試体に比べて耐荷力が約16ポイント増加している。更に、P4供試体は健全な状態を超える値にまで耐荷力が回復しており、本研究の条件下では、部分的な補修でも十分な強度回復効果は期待できることが分かる。

(2) 供試体の応力状態

図-10, 11に、各供試体の母材の軸ひずみ分布を示す。母材のひずみは、供試体の両側面にひずみゲージを貼付して得た値の平均を用いている。

図-10から分かるように、200kN載荷時（健全時の降伏荷重の58.5%）の最小断面積位置のひずみはN1供試体を除けばほぼ同じである。このことから、CFRP板に剥離や破断が生じることなく強度回復効果が維持されている状態であれば、母材のひずみを低減する効果は得られることが分かる。また、300kN載荷時（同88.1%）のN1,P1供試体（図-11）はCFRP板の強度回復効果が消失しているため、母材が広い範囲で降伏しているが、300kN載荷時のP2~4供試体のひずみは200kN載荷時と分布の形状に大きな差異はなく、最小断面積位置のひずみもほぼ等しい。

これらの結果から、今回の条件下では、CFRPを片面につき4枚積層し、接着端部のずらし量を確保すれば十分に部分的な強度回復効果が得られるといえる。そのため、次章では残存錆の割合を変化させた供試体に接着長さ200mm、定着長50mmの補修を施し、残存錆が強度回復効果に及ぼす影響について考察する。

4. 素地調整後の残存錆の影響

本研究では、素地調整後の残存錆は紙テープを供試体に貼り付けることで再現した。具体的には、素

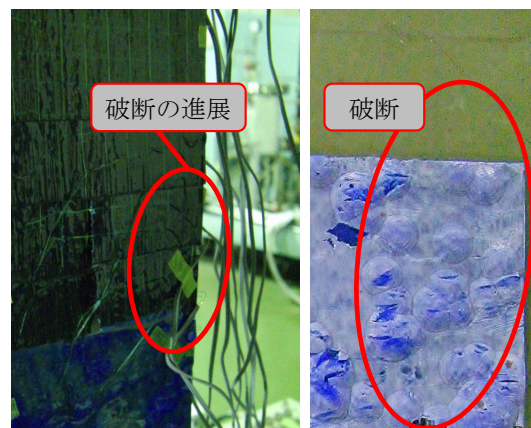


図-8 CFRPの破断（左：試験中供試体，右：試験後CFRP板、P2供試体表面）

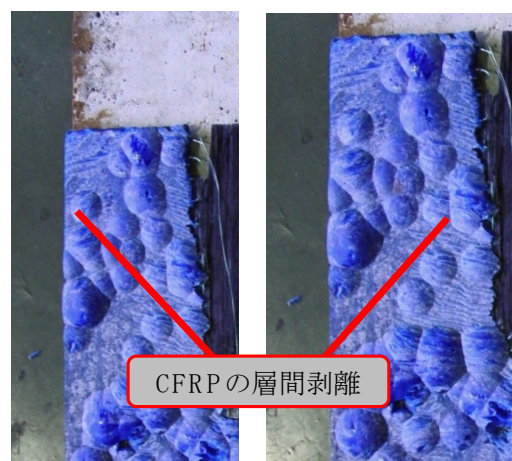


図-9 CFRPの層間剥離（左：試験後母材，右：試験後CFRP板、P3供試体表面）

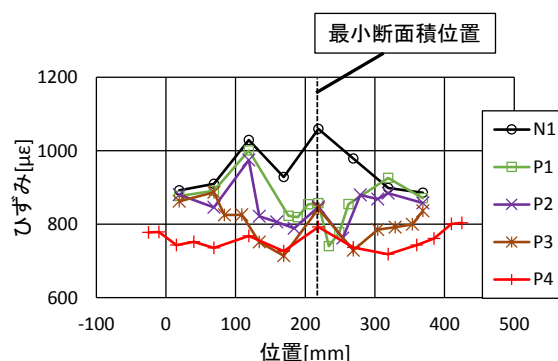


図-10 母材のひずみ分布（200kN載荷時）

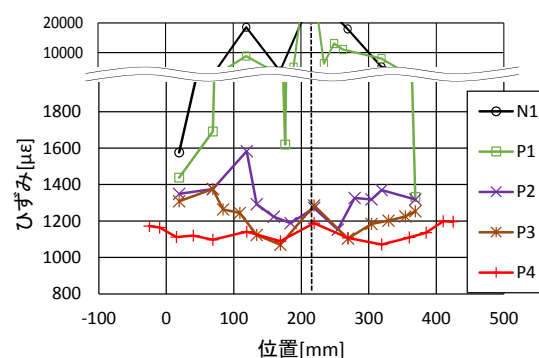


図-11 母材のひずみ分布（300kN載荷時）



図-12 紙テープによる残存錆の再現（P3-3供試体表面）

地調整後に紙テープを部分的に鋼材表面に貼付し（図-12），その後は通常の手順に従ってCFRP板を接着した．この紙テープを貼付する面積を変化させることで，素地調整後の残存錆が強度回復効果に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする．

(1) 強度回復効果及び破壊性状

試験結果を表-5に示す．表中，接着面積率は(2)式で定義し，ずらし部分を含めた接着箇所全域にわたって残存錆を模擬している．

$$P_{sp} = \frac{A_0 - A_c}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

P_{sp} : 接着面積率 [%]
 A_0 : 接着面積[mm²]
 A_c : 残存錆の表面積[mm²]

表-5の強度低下率に着目すると，残存錆の影響でP2-1~4供試体のいずれも強度回復効果が減少しているのが分かる．接着面積率が最も低いP2-1供試体の強度が最も小さくなっており，残存錆の影響を受けていることが分かる．

一方で，P2-4供試体は接着面積率が100%に近い供試体であるが，強度はP2-2,3供試体より低い．P2-4供試体はCFRP板のずらし部分の1層目と2層目の境目で，幅方向に縦断する特徴的なCFRP板の破断が生じている（図-13）．このような破壊性状は他の供試体で確認されておらず，主に図-14のように母材とCFRP間での界面剥離が発生していた．そのため，P2-4供試体の耐力力が素地調整レベルに反して低いのは，図-13のような破壊形態が原因であると推察される．なお，P2-1~3供試体でCFRP板の破断や層間剥離が生じなかったのは，残存錆の影響で

CFRP板が脆性的に剥離したために，破断や層間剥離が生じなかったためと考えられる．

ところで，残存錆の影響でいずれの供試体も耐力力は減少しているものの，P2-1~4供試体間での耐力力の差は約3ポイントであり，第3章で示した接着長

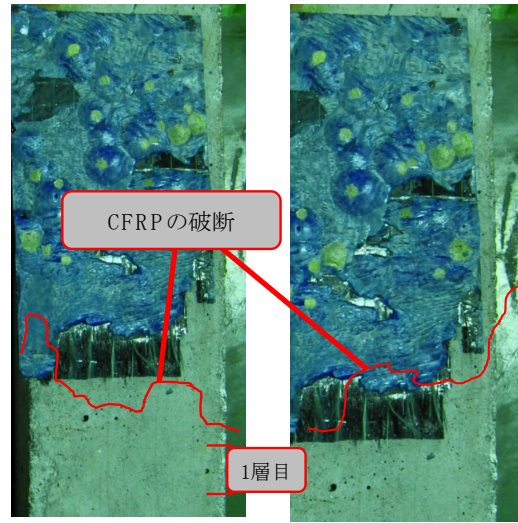


図-13 試験後のP2-4供試体（表面）

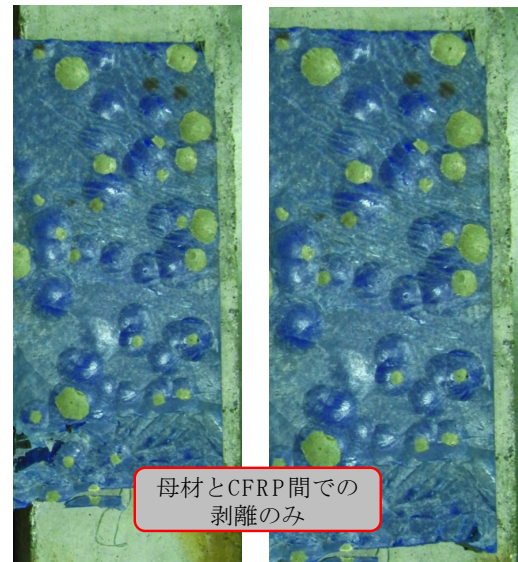


図-14 試験後のP2-3供試体（裏面）

表-5 供試体一覧（接着面積率変化）

	接着面積率 [%]	耐力力		破壊性状
		荷重[kN]	低下率[%]	
（無腐食状態）		$\sigma_y A_0 = 340.4$		
N1（無補修）		269.9	-21.6	
P2-1※	71.4	298.5	-12.3	剥離
P2-2※	80.2	309.3	-9.1	剥離
P2-3※	91.9	309.4	-9.1	剥離
P2-4※	95.4	301.1	-11.5	剥離及びCFRP破断
P2	100	319.5	-6.0	剥離及びCFRP破断

※ 接着長さ，定着長さなどの条件はP2供試体に同じ．

さと強度回復効果の関係とは異なり、接着面積率と強度回復効果には明らかな相関関係は見られなかった。これは、母材が降伏すると残存錆の影響で脆性的に剥離が進展するため、残存錆が接着面積に占める割合が低い場合でも脆性的な剥離が発生しうると考えられる。

(2) 供試体の応力状態

図-15, 16に各供試体の母材のひずみ分布を示す。200kN載荷時（健全部降伏荷重の58.5%）のひずみは、N1供試体を除きほぼ等しくなっていることが分かる。これは、錆が残存している箇所は荷重を伝達する能力が失われているものの、その周囲を通じて応力が伝達されるために全体的な挙動は変化しないためである。

300kN載荷時（同88.1%）では、P2-1供試体はすでにCFRP板が剥離し、広い範囲で母材が降伏しているのが分かる。しかし、その他の供試体のひずみ値はほぼ同じ値を示しており、200kN載荷時と比較しても応力状態に大きな変化は見受けられない。このことから、錆が残存している状態でも、CFRP板の持つ母材のひずみ低減の効果は、一応維持されることが分かる。

以上述べたように、CFRP板で接着補修を施す際に錆が残存していると、接着不良箇所から剥離が進展するために耐荷力は減少した。また、その耐荷力

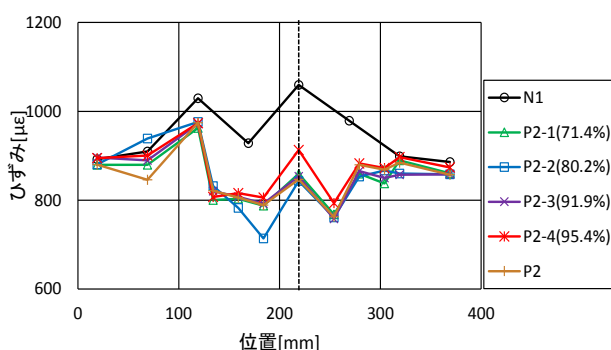


図-15 母材のひずみ分布（200kN載荷時）

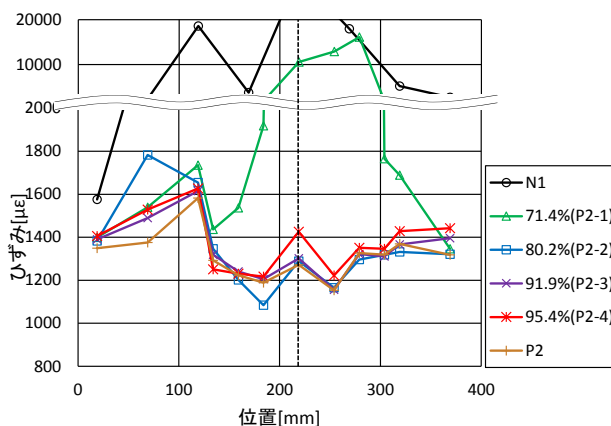


図-16 母材のひずみ分布（300kN載荷時）

の減少は破壊性状にも左右されるため、必ずしも接着面積率が高ければ耐荷力の減少量が小さくなるわけではないことが分かった。しかしながら、剥離が生じない範囲内であれば、接着面を介して応力をCFRP板に伝達し、母材の応力やひずみを低減する機能には大きな影響はないと判断できる。

5. 結論

本研究では、腐食損傷が見られる鋼部材にCFRPを貼付する補修・補強工法について、とくに部分的な補修を施す工法の適用性について検討するとともに、素地調整後の残存錆が強度回復効果に及ぼす影響についても調査した。その結果得られた知見を以下に示す。

1. 端部に十分なずらし幅を確保していれば、従来の工法より小さな範囲での補修であっても健全な状態に近い値にまで強度は回復した。更に、ずらし幅の最端部が健全であれば健全時を超える耐荷力を確保できた。
2. 接着箇所に錆が残存している場合、母材の降伏に伴い接着不能箇所から剥離が脆性的に進展するため、強度は減少する。しかしながら、母材のひずみを低減する効果はCFRP板が剥離・破断しなければ維持されていた。
3. 破壊性状には、母材と不陸修正材間での界面剥離に加え、CFRP板の層間剥離、繊維の破断が確認された。CFRP板の層間剥離や繊維の破断は主に接着端部から生じていたが、これはCFRP板のずらし幅部分では減肉量を補えるだけのCFRP積層数が確保されていないことに起因している。また、素地調整後の残存錆を模擬した供試体の破壊性状は主に母材と不陸修正材間での界面剥離であり、脆性的に剥離が進展した。
4. 腐食損傷箇所に部分的な補修を施す場合、接着端部のずらし部分で破断や層間剥離が生じることがあるため、ずらし部分の減肉量についても配慮する必要がある。

また、今後の課題としては、より減肉量の大きい腐食の場合についての検討などが挙げられる。また、残存錆の膨張や、残存錆の影響による耐久性の低下についても詳しく調査する必要がある。加えて、本研究では十分な供試体数での実験は行えておらず、破壊性状について十分に精査することもできなかった。そのため、実現場での施工方法に本提案を活かすためには更なる実験の蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁の架替に関する調査結果(IV)，2008。
- 2) 土木学会：腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能

- 回復設計法, 2014.
- 3) 土木学会：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, 2012.
 - 4) 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. 912-920, 2010.
 - 5) たとえば, 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：鋼橋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 A.
 - 6) 藤井堅, 海田辰将, 中村秀治, 有尾一郎：経年変化を考慮した腐食表面生成モデル, 構造工学論文集 A, Vol. 50, pp.657-665, 2004.
 - 7) 奥村誠, 藤井堅, 塚井誠人：空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化, 土木学会論文集, Vol.672, pp.109-116, 2001.
 - 8) 森下太陽, 藤井堅, 森田和也, 堀井久一, 中村秀治：腐食した鋼板の鋼板接着による性能回復, 構造工学論文集 A, Vol. 57, pp.747-755, 2011.

APPLICABILITY OF BONDING CFRP METHOD FOR PARTIAL REPAIR OF CORROSION DAMAGED STEEL PLATE

Ryuichi YOKOTA, Katashi Fujii and Yuya HIDEKUMA

In recent years, as a method of repairing a corroded steel member, method to bond CFRP using adhesive has been noticed. By the way, CFRP plate is usually bonded to all of corroded area in damaged members. However, in the coastal bridges which the entire flange is corroded, it is one of the counter-measure to bond CFRP plate to only the severely damaged parts. In this study, the applicability of the method for performing the partial repair was examined, and it was showed that repair effect can be obtained even with partial repairing. Additionally, the experiment with specimens which have remained rust in surface preparation was conducted, because it is difficult to remove the rust perfectly on steel in surface preparation. As a result, repair effect decreased by the influence of residual rust, however, the effect of reducing distortion of base steel was obtained.in the range of the load which peeling does not occur.