CFRP接着鋼板における定着長不足が補強効果 に与える影響

秀熊 佑哉¹·石川 敏之²

¹正会員 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 (〒104-0061 東京都中央区銀座七丁目16番3号) E-mail:hidekuma.3ae.yuya@nsmat.nssmc.com

²正会員 関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35) E-mail:t-ishi@kansai-u.ac.jp

鋼構造物の補修・補強工法として、CFRPを樹脂で接着する工法が適用され始めている.一般的に、 CFRP接着工法では、鋼とCFRPが合成断面として挙動することを前提として設計するため、補強対象区間 の両側にCFRPへ荷重を伝達するための定着長が必要となる.必要な定着長は、CFRP層の剛性、接着層の 厚さおよびせん断弾性係数などにより異なり、低弾性の接着樹脂では必要定着長が長くなるケースもある. また、鋼橋の腐食は狭隘部や複雑な形状の箇所に発生することが多く、補強対象区間の両側に必要な定着 長を確保することは困難な場合もある.本研究では、鋼板とCFRPが合成断面となるの必要定着長が確保 できない場合に着目し、短い定着長でCFRPを鋼板に接着した試験体の引張試験を行い、短い定着長が補 強効果に与える影響を検討した.また、実験値と理論値を比較し、理論式から定着長が不足している場合 の補強量の決定方法について提案する.

Key Words : steel, CFRP, bond length, strengthening effect

1. はじめに

近年,鋼構造物の補修・補強工法として,炭素繊維補 強材(以下CFRP)を樹脂で接着する工法が適用され始 めている¹⁾⁻⁴.鋼材の補修・補強工法としては,当て板 を高力ボルトで添接する工法が一般的であるが,CFRP 接着工法は,CFRPが軽量で高強度・高弾性,耐食性に も優れることから鋼材の腐食補修に対して効果的である と考えられる.

一方で、CFRP接着工法では、文献4)に示されている ように、鋼とCFRPが合成断面として挙動することを前 提として設計する.そのため、補強対象区間の両側に CFRPへ荷重を伝達するのに十分な定着長が必要となる. 鋼とCFRPが合成断面となるために必要な定着長は、鋼 材とCFRP層の剛性、接着層の厚さおよびせん断弾性係 数に依存するが、接着樹脂が低弾性の場合は、必要定着 長が長くなるケースもある.また、鋼橋の腐食は桁端部 などの狭隘部、補剛材やガセットプレートが取り付けら れた複雑な形状の箇所に発生することが多く、補強対象 区間の両側に鋼とCFRPの合成断面となるための必要定 着長を確保することが困難な場合がある.

そこで本研究では、鋼とCFRPが合成断面となるため

に必要な定着長が確保できない場合に着目し、定着長が 不足している場合のCFRPの補強量の決定方法について 提案する.また、短い定着長でCFRPを鋼板に接着した 試験体の引張試験を行い、実験結果から提案方法の妥当 性を検証した.

2. 定着が短い場合の補強効果

図-1に示す鋼板の両面に対象にCFRPが接着されたモデルにおいて、文献5)、6)では、鋼とCFRPが合成断面となるための必要定着長hは次式で与えられている.



$$l_n \ge \frac{1}{c} \cosh^{-1} \left(\frac{2}{\eta - 1} \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \right) \tag{1}$$

ここに,

$$c = \sqrt{\frac{b_f G_e}{h_e} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{E_s A_s}}$$
(2)

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + (2E_f A_f)/(E_s A_s)}$$
(3)

$$G_e = \frac{E_e}{2(1+\nu_e)} \tag{4}$$

ln	: 合成断面となるために必要な定着長
E_s , A_s	: 鋼材の弾性係数と断面積
E _f , A _f	: CFRPの弾性係数と断面積
17	: 鋼材応力の収束度(ここでは1.01)
bf	: CFRPの幅
Ge, he	: 接着樹脂のせん断弾性係数と厚さ
Ee, ve	: 接着樹脂の弾性係数とポアソン比





(b) *l < l_n*の場合





図-3 複数層の検討モデル

収束度 η が合成断面の値と完全に一致する η =1とする ためには、hが無限大となるため、文献4)、6)では、 η = 1.01とし鋼とCFRPの合成断面になるのに必要な定着長を 計算することを提案している.定着長がh以上 ($l \ge h$) の場合は、図-2 (a)に示すようにCFRPの接着の中央で 鋼板とCFRPのひずみが合成断面として計算したひずみ と一致するような補強効果が得られる.しかし、定着長 が短い場合 (l < h)は、図-2 (b)に示すようにCFRPの 接着の中央においても、鋼板のひずみは合成断面として 計算したひずみまで低下せず、CFRPが十分に荷重を負 担していないため、設計通りの補強効果が得られない.

定着長が短い場合のCFRP接着部の中央の鋼板のひず みは、合成断面として計算したひずみと収束度ηを用い て計算できるため、本研究では、ある任意の定着長*l*に おいて、そのときの収束度ηを補強効果なに乗ずること で、定着長が足りない場合の補強効果を算出する. 図-1 に示すモデルに対して、収束度ηは、文献6)から次式で 与えられている.

$$\eta = 1 + \frac{2}{\cosh(cl)} \frac{E_f A_f}{E_s A_s} \tag{5}$$

ここに,

1

:任意の定着長(*l< l*_)

式(1)、(5)は、図-1に示すような単層のCFRPが貼付け られた場合に適用可能であるが、実際の補修では多層積 層されることが多いため、本研究では、複数層積層され た場合も対象とする.多層の場合の収束値は文献7)によ り提案されているが、本研究では、簡易的な設計法を目 指すため、文献4)に提案されている図-3に示すような、 全層分の接着樹脂を1層目の接着層に集約する方法にて 式(5)を適用し、収束度ηを計算する.

多層積層する場合,端部をずらして積層することでは く離し難くなることが知られているが^{33,9},本研究では, 接着範囲が限られている場合を想定しているため,接着 長の長くなる端部ずらしは行わず,多層の場合も全層同 じ定着長で貼付けることとする.

他方,低弾性かつ高伸度な特性を有するポリウレパテ を使用することにより,はく離防止効果が期待できるこ とが知られている^{& 9}. ポリウレアパテを使用する場合 は、パテが低弾性であるため、鋼とCFRPが合成断面と なるために必要な定着長が非常に長くなる場合があり、 本研究で提案する手法が有効であると考えるため、ポリ ウレパテがある場合についても合わせて検討を行う.

3. 実験概要

(1) 材料

実験および計算に用いた各材料の物性を表-1~3に示

す.鋼材には一般構造用圧延鋼材SS400を使用し、CFRP には、文献9)に鋼材補強用の標準とされている高弾性型 炭素繊維シート300目付けを用いた.

樹脂材料は、ポリウレア無し仕様では、エポキシプラ イマーと含浸接着樹脂、ポリウレア有り仕様では、ウレ タンプライマー、ポリウレア、含浸接着樹脂をそれぞれ 用いた.詳細な施工手順や樹脂の塗布量などは次節で述 べる.

(2) 施工手順

ポリウレア無し有りのそれぞれの施工手順を以下に示 す.それぞれ,鋼材表面のケレン後,プライマーを塗布 し,ポリウレア有りのみポリウレアを塗布した後, CFRPを接着し,施工後にCFRPが貼付けられた鋼板の総 厚をノギスにて測定している.

a) ポリウレア無しの場合

表-1 鋼材の材料定数

鋼種	弹性率 Es (GPa)	降伏点(MPa)	寸法b×t×l(mm)
SS400	200	341	25×6×600

表-2 炭素繊維補強材の材料定数

出去繊維シート	弾性率	貼付幅	設計厚
次来神政ホモン	Ef (GPa)	$b_f(\text{mm})$	t_{cf} (mm)
高弹性300目付(FTS-C8-30)	684	23	0.143

	表-3 格	樹脂材料の材料定数			
樹脂	弾性率	ポアソン比	備考		
	E_e (MPa)	νe			
FP-N9	2821	0.4	エポキシプライマー		
FP-E9P	2821	0.4	含浸接着樹脂		
FP-UL1	-*	-*	ウレタンプライマー		
FU-Z	58.3	0.49	ポリウレアパテ		

※溶剤系のため測定不可

ケレン(2種ケレン相当)→エポキシプライマー塗布 (塗布量:150 g/m²)→12時間以上1週間以内養生→ CFRP貼付(塗布量:600 g/m²)×必要積層数分連続施工 →試験まで1週間以上養生.

b) ポリウレア有りの場合

ケレン(2種ケレン相当)→ウレタンプライマー塗布 (塗布量:150 g/m²)→3時間以上1週間以内養生→ポリ ウレアパテ塗布(塗布量:1000 g/m²)→12時間以上1週 間以内養生→CFRP貼付(塗布量:600 g/m²)×必要積層 数分連続施工→試験まで1週間以上養生.

(3) 引張試験

試験体の両端の無補強部を試験機のチャックに挟み, インストロン型万能試験機にて,2mm/minの速度で一軸 単調引張試験を実施した.試験中,荷重,鉛直変位,鋼 材無補強部,鋼材およびCFRP中央の軸方向ひずみをそ れぞれ測定した.

4. 試験結果と考察

(1) 試験体の接着層厚

試験体一覧および実測した各施工工程での実測厚を表 -4に示す.各試験体の定着長は,試験体中央でも鋼と CFRPの合成断面とならない長さとしている.これらの 実測板厚より,各試験体の収束度の計算に必要な接着層 厚heを求める.ポリウレア無しの場合は次式により与え られる.

$$h_e = \frac{t_p - t_s}{2} + \frac{t_c - t_p}{2} - nt_{cf} \tag{6}$$

ー ここに,

tp, *tc* : プライマー塗布後, CFRP施工後の実測厚

表-4 試験体一覧と各層の板厚

	CFRP 積層数定着長実測板厚 (mm)						接着層厚※	
試験体	ポリウレア	п	l	ケレン後	プライマー	ポリウレア	CFRP	he
		(層)	(mm)	ts	塗布後 6	塗布後 tu	貼付後 tc	(mm)
E25-2		2	25	5.70	6.39	-	9.23	1.479
E25-4		4	25	5.71	6.14	-	11.22	2.183
E25-6	4m . 1	6	25	5.72	6.15	-	12.78	2.672
E40-3	無 し	3	40	5.71	6.36	-	10.82	2.126
E40-4		4	40	5.73	6.11	_	11.13	2.128
E40-5		6	40	5.74	6.11	-	11.87	2.207
P50-3		3	50	5.72	5.76	7.48	12.18	0.860
P50-5		5	50	5.70	5.74	7.50	14.41	0.880
P100-3	<u></u> 有り	3	100	5.70	5.74	7.44	12.36	0.850
P100-4		4	100	5.68	5.72	7.43	13.64	0.855
P150-2		2	150	5.69	5.73	7.40	11.93	0.835
P200-3		3	200	5.70	5.74	7.40	12.51	0.830

※ポリウレア有りの接着層厚は、ポリウレアのみの塗布厚としている.

討驗休	接着層厚	鋼の断面積	FRP の断面積	Ên		27	n Éo	実験値との誤差
#\07.1 1	n _e mm	mm2	mm2	ς <i>υ</i>	C	1/	1/ 50	<i>≿ 美願恤∕ ≿ 計算値 1</i> / ⊊ 0 %
E25-2	1.479	142.5	6.58	0.760	0.068	1.112	0.845	3.62
E25-4	2.183	142.8	13.16	0.613	0.044	1.379	0.846	16.95
E25-6	2.672	143.0	19.73	0.514	0.035	1.666	0.857	22.60
E40-3	2.126	142.8	9.87	0.679	0.049	1.132	0.768	4.30
E40-4	2.128	143.3	13.16	0.614	0.044	1.207	0.741	12.60
E40-5	2.207	143.5	19.73	0.515	0.039	1.381	0.711	10.51
P50-3	0.860	143.0	9.87	0.679	0.077	1.020	0.693	3.75
P50-5	0.880	142.5	16.45	0.559	0.065	1.062	0.593	6.97
P100-3	0.850	142.5	9.87	0.679	0.077	1.000	0.679	6.65
P100-4	0.855	142.0	13.16	0.612	0.070	1.001	0.613	6.35
P150-2	0.835	142.3	6.58	0.760	0.090	1.000	0.760	0.86
P200-3	0.830	142.5	9.87	0.679	0.078	1.000	0.679	2.77

表-5 補強効果と実験値との比較

*t*_d : CFRPの設計厚(炭素繊維のみの厚さ)

n : CFRPの積層数

ポリウレア有りの場合は、ポリウレアの弾性係数が含 浸接着樹脂のおよそ50分の1と小さく、応力伝達への影 響度はポリウレアのみの影響が十分大きいため、ポリウ レアのみの厚さを接着層厚heとする.よって、以下の式 により与えられる.

$$h_e = \frac{t_u - t_p}{2} \tag{7}$$

ここに,

tu :ポリウレア塗布後の実測厚

(2) 収束度を考慮した補強効果

図-4,5にポリウレア無し有りそれぞれの,各定着長*l* でのCFRPの積層数と鋼材応力の収束度ηを考慮した補強 効果ηなの関係を示す.プライマーの厚さ,ポリウレア の厚さ,1層当りの含浸接着樹脂の厚さは,表-4の実測 値から平均して求めた.

ポリウレア有りの図-5では,接着層厚がCFRPの積層 数によらず一定のため,積層数が増えるほど補強効果が 得られる結果となっている.

一方で、ポリウレア無しの図-4では、積層数が増加す るとある点で極小値をとり、その後、補強効果が低下す る.これは、今回の検討モデルでは、1層目に全層の含 浸接着樹脂の厚さを集約しているため、積層数増加によ る補強効果の増大よりも、1層目に集約している接着層 heが厚くなることによる収束度ηの悪化(ηの値の増加)の 影響の方が大きくなったためであると考えられる.

今回の検討モデルでは、補強効果が低下する極小値は、 およそ、定着長1が鋼とCFRPが合成断面となるのに必要 定着長4の40%程度であり、それ以上のCFRP積層による 補強は補強効率が著しく悪くなる.

(3) 実験値との比較

引張試験から得られた鋼材中央のひずみと、収束度を 考慮した補強効果から計算された鋼材中央ひずみを比較 する.収束度を考慮した鋼材中央ひずみは無補強鋼材ひ ずみの計算値に*取*を乗することにより与えられる.

図-6,7に、E404(ポリウレア無し、CFRP4層、定着 長*l*=40mm)とP100-4(ポリウレア有り、CFRP4層、定着 長*l*=100mm)に対して、実験値と計算値の作用応力とひ ずみの関係を示す.同図において、鋼材中央ひずみの実 験値は橙のプロットで示され、合成断面の理論値は黒の 破線、収束度ηを考慮した理論値を赤の破線で示してい る.E40-4,P100-4ともに実験値は、合成断面の理論値 な。収束度ηを考慮した理論値がの間にあり、提案して いる手法(ηζ)により、安全側に補強効果が評価できてい る.それぞれ実験値と束度を考慮した理論値との誤差は、 E40-4で12.6%、P100-4で6.35%とポリウレア無しの場合 の方が誤差が大きいことがわかる.

全ての試験体にたいして実験値と収束度ηを考慮した 理論値ηѽとの比較の一覧表を表-5に示す.ηѽと実験値 との誤差は、ポリウレア無しで3.62%~22.60%で、ポリ ウレア有りで0.86%~6.97%と、ポリウレア有りの方が 実験値と理論値が良く一致している.また、同じ条件で 積層数の違いに着目してみると、積層数が多くなるほど 誤差が大きくなっていることがわかる.これは、先に述 べたように、ポリウレア無しでは、全接着層の樹脂を糸 つの接着層としていることに起因しており、積層数が多 くなると含浸接着樹脂の影響が無視できなくなっている ためであると考えられる.









図-7 応力と各ひずみの関係 (P100-4)

そこで, 誤差の大きなポリウレア無しの場合について, 接着層厚さの補正を行う. 文献10)では、鋼板にCFRP板 を接着剤で貼付けたモデルに対して、CFRP板のマ



図-8 含浸接着樹脂厚を1/3とした場合の 応力と各ひずみの関係(E40-4)

表-6 含浸接着樹脂厚を 1/3 とした場合の 補強効果と実験値との比較

試験体	he'	с'	η'	η'ζο	誤差 %
E25.2	0.722	0.007	1.056	0.802	1.62
E23-2	0.725	0.097	1.050	0.002	-1.02
E25-4	0.871	0.069	1.216	0.746	3.09
E25-6	1.034	0.057	1.431	0.736	5.14
E40-3	0.925	0.074	1.049	0.712	-2.84
E40-4	0.836	0.071	1.074	0.659	-0.39
E40-5	0.859	0.062	1.155	0.595	-7.76

トリックス樹脂の影響を考慮した接着厚が提案されてい る. CFRP板内のマトリックス樹脂成分の厚さの1/3をマ トリックス樹脂と接着剤のせん断剛性比を乗じて接着厚 に加算することで、マトリックス樹脂のせん断変形を考 慮できるとしている.

本研究では、接着層をプライマー、マトリックス樹脂 を含浸樹脂として、文献10)と同様の手法で接着層厚の 補正を行う.本研究では、プライマーと含浸接着樹脂の せん断剛性は同じであるため、補正後の接着層厚he'は次 式で与えられる.

$$h_{e}' = \frac{t_{p} - t_{s}}{2} + \frac{1}{3} \left(\frac{t_{c} - t_{p}}{2} - nt_{cf} \right) \quad (8)$$

補正後の接着層厚he'を用いた収束度n'を用いて算出し た鋼材ひずみと実験値の比較を図-8に示す. 同図におい て、鋼材中央の実験値と理論値がほぼ一致していること がわかる.また、表-6にポリウレア無し試験体全てを同 様に補正した接着層厚he'を用いて計算した理論値と実 験値の比較を示す. H25-4, H25-6ではそれぞれ, 6.09%, 9.98 %の誤差はあるものの、全体的に誤差が大幅に改善 されており,実験値と理論値がほぼ一致していることが わかる.

5. まとめ

定着長が短く、CFRP中央で鋼材とCFRPが合成断面と ならない場合に対して、 収束度を考慮した評価方法を提 案し、実験結果と比較した.本研究から得られた知見を 以下に示す.

- ポリウレアパテ無しの場合では、各層の含浸接着 樹脂を1層目に集約し、プライマーに加算して計算 した収束度を、補強効果に乗ずることにより安全 側に鋼材のひずみが評価可能である。
- 2) 上記において、積層数が多くなると、収束度を考慮した鋼材のひずみと、試験で得られたひずみの 誤差が大きくなるため、含浸接着樹脂の総厚の1/3 をプライマーに加算して計算した収束度を補強効 果に乗ずることにより実験値と理論値が概ね一致 した。
- 3) ポリウレアパテ有りの場合では、ポリウレアパテ と含浸接着樹脂の剛性が大きく異なるため、ポリ ウレアパテの厚さのみを接着層として計算した収 束度を、補強効果に乗ずることにより実験値と理 論値が概ね一致した.

参考文献

- 板垣,渡邉,鈴木:炭素繊維強化樹脂板(カーボン 板)による鋼橋補強の事例,第8回鋼構造の補修・ 補強技術報告論文集,pp.49-54,2002.
- 2) 玉井,高松,服部,灰谷,櫻庭:炭素繊維プレート による化学プラント架構小ばり補剛の施工例,鋼構 造年次論文報告集,第13巻,pp.545-552,2005.

- 杉浦,小林,稲葉,本間,大垣,長井: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.
- 土木学会: FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案),土木学会 複合構造シリーズ 09, 2018.
- 石川,大倉,西田,横田,斉藤:CFRP 板付着端近傍 への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の 低減,構造工学論文集,vol.54A,pp.842-849,2008.
- 石川,大倉:複数の段差を有する CFRP 板接着鋼板 の各 CFRP の必要接着長さと最適剛性,土木学会論 文集 A, Vol.66, No.2, pp.368-377, 2010.
- 宮下,長井:一軸引張りを受ける多層の CFRP が積 層された鋼板の応力解析,土木学会論文集 A, vol.66, No.2, pp.378-392, 2010.
- 若林,宮下,奥山,秀熊,小林,小出,堀本,長井:高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案,土木学会論文集 F4, vol.71, No.1, pp.44-63, 2015.
- 9) (株)高速道路総合技術研究所:炭素繊維シートに よる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュ アル, 2013.
- 白井,北根,石川,伊藤:軸力が作用する CFRP 接 着補修鋼板に対する CFRP 板のせん断変形を考慮し た理論解析,構造工学論文集,vol.61A,pp.798-807, 2015.

EFFECT OF SHORTAGE BOND LENGTH OF CFRP BONDED STEEL PLATE ON STRENGTHENING EFFECT

Yuya HIDEKUMA and Toshiyuki ISHIKAWA

As a repair and strengthening method for steel structures, a method of bonding CFRP with resin has begun to be applied. Generally, in the CFRP bonding method, since the steel and the CFRP are designed on the premise of behaving as a complete composite in section, bonding lengths for transmitting loads to the CFRP are required on both sides. In some cases, the required bonding length becomes longer due to the rigidity of the CFRP layer, the thickness and the shear modulus of elasticity of the adhesive layer. In addition, corrosion of steel bridges often occurs in narrow parts and complicated shapes parts, and in some cases, it is difficult to secure required bonding lengths on both sides of the section to be reinforced.

In this research, the authors focused on the case where the required bonding lengths cannot be obtained to be a complete composite in section, the tensile tests were conducted on the test specimens in which CFRP was adhered to a steel plate with a shorter bond length, and the influence on reinforcing effect was investigated. In addition, the experimental value compared with the theoretical value and proposed method of determining the reinforcement amount when the bond length is insufficient.