

# ポリウレアパテの弾性係数の違いが CFRP接着鋼板の応力伝達に与える影響

西野 晶広<sup>1</sup>・秀熊 佑哉<sup>2</sup>・宮下 剛<sup>3</sup>・奥山 雄介<sup>4</sup>  
大垣 賀津雄<sup>5</sup>・小森 篤也<sup>6</sup>

<sup>1</sup>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7-16-3)  
E-mail: nishino.65t.akihiro@nsmat.nssmc.com

<sup>2</sup>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7-16-3)  
E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nsmat.nssmc.com

<sup>3</sup>正会員 長岡技術科学大学 准教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)  
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 長野工業高等専門学校 准教授 環境都市工学科 (〒381-8550 長野県長野市徳間716)  
E-mail: y\_okuyama@nagano-nct.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 ものつくり大学 教授 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)  
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

<sup>6</sup>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7-16-3)  
E-mail: komori.8fs.atsuya@nsmat.nssmc.com

近年、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。また、鋼をCFRP接着にて補修・補強する場合、低弾性・高伸度な特性を有するポリウレアパテを緩衝層として使用することで、CFRPの剥離を抑制できることが知られている。しかし、低弾性なポリウレアパテを使用することで、鋼とCFRPとが合成断面となるために必要な接着長が長くなり、現場への適用が困難となる場合がある。

そこで本研究では、弾性係数の異なるポリウレアパテを使用したCFRP接着鋼板を用いた引張試験にて、応力伝達、補強効果、剥離特性について検討を行った。また、理論値との比較も行い、ポリウレアパテの物性の最適化を試みた。

**Key Words :** CFRP, poly-urea putty, steel plate, stress transfer, debonding,

## 1. 背景

橋梁をはじめとする鋼構造物の補修・補強工法として、鋼材にCFRP（炭素繊維強化プラスチック）を接着する手法がある<sup>1)</sup>。CFRPは弾性係数が高く強靱な材料であるが、延性においては鋼材をはじめとする金属には遠く及ばない。このためCFRPと鋼材を直接接着してもCFRPは鋼材の変位に追従することができず、降伏や座屈が起こった際に剥離や破断を起こしてしまう恐れがある。これを防ぐために文献1)では、鋼材とCFRPの間に緩衝層として低弾性・高伸度のポリウレアパテを用いることを標準としている。

CFRP補強鋼材の応力伝達についてはこれまで多く研究されており<sup>2-4)</sup>、鋼材に生じる応力の理論式<sup>5)</sup>は実験結

果や有限要素解析とよく一致することが知られている。これらの理論では、鋼材やCFRP、樹脂の剛性から鋼材に生じる応力を決定することができ、設計において大きな役割を果たしている。

現在、設計要領では、ポリウレアの品質規格として引張弾性係数55N/mm<sup>2</sup>以上75N/mm<sup>2</sup>未満と定められている。しかしながら、ポリウレアの弾性係数の違いが補強効果に及ぼす影響についての実験的な検討は十分に行われていない。そこで本研究では、ひずみ緩衝層として弾性係数の異なるポリウレアを用いた鋼材の引張試験を行い、その応力分布を実験値と比較した。さらにポリウレアの弾性係数の違いが補強効果や剥離特性に与える影響について検討を行った。

## 2. ポリウレアの弾性係数に関する検討

文献1)では鋼材補強に用いられる高伸度弾性パテとして、主剤にイソシアネート、硬化剤に芳香族アミンを主成分とする1:3（重量比）の2液混合型ポリウレア樹脂が標準として定められている。本研究ではまず、このポリウレアについて任意の弾性係数を得るための検討を行った。ポリウレアの弾性係数を変化させる方法としては、既往の研究で効果が確かめられている標準型のポリウレア樹脂主剤に加え、硬質型ポリウレア樹脂主剤を用い、それぞれ硬化剤との配合比を変更するという方法をとった。

### (1) 試験方法

ポリウレアの主剤と硬化剤を異なる配合比で配合し硬化させた樹脂板から、JIS K 7139のA1タイプの試験片を切り出した。この試験体に対し10kNのロードセルを用いてJIS K 7161に従い単軸引張試験を行った。試験速度は5mm/minとした。またひずみの取得には伸び計を用いた。

また、力学的挙動に大きな影響を持つガラス転移点 ( $T_g$ ) についてもJIS K 7121に従い示差走査熱量計 (DSC) を用いて計測した。

### (2) 検討結果

ポリウレアの引張試験結果を表-1に示す。さらに主剤・硬化剤の割合と弾性係数の関係を図-1に示す。この結果から、主剤の割合が硬化剤に比べて高いと、硬化後の樹脂は弾性係数が高くなり、破断時の伸びは小さくなることが示される。また主剤の割合が高い場合に発生す

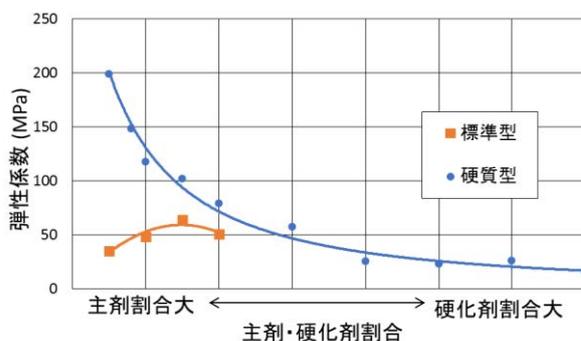


図-1 ポリウレアの配合比と弾性係数の関係

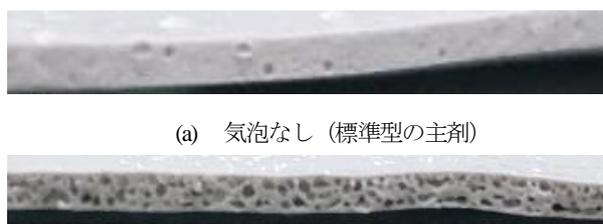


図-2 発生した気泡の様子

る現象として硬化中の発泡があった。発泡の有無の様子を図-2に示す。このような発泡は実際の施工上は当然存在しないことが望ましいが、本研究では補強効果への影響をポリウレアの弾性係数の違いという観点に焦点を絞って検討するため、試験体作成時に樹脂内で気泡が発生してもよいものとした。気泡が補強効果などに対して与える影響については別途考察を行うものとする。

主剤の種類による結果を比較すると、硬質型よりも標準型の主剤を用いた方が、弾性係数が同程度でも破断時

表-1 ポリウレアの引張試験結果

主剤	硬化剤	主剤割合	弾性係数 (MPa)	伸び (mm)	$T_g$ (°C)	発泡
標準型	標準型	大	35.0	188.3	-17.52	多い
		↓	48.3	435.3	-13.52	少ない
			63.5	442.9	-15.44	なし
		小	50.5	271.0	-18.57	なし
硬質型	標準型	大	199.0	5.6	-16.5	非常に多い
			148.2	12.9	-18.8	非常に多い
			117.3	16.2	-21.0	非常に多い
			102.0	27.4	-20.1	多い
			79.0	34.0	-21.8	多い
			57.1	72.3	-18.4	多い
			25.0	108.1	-17.5	多い
			22.8	162.4	-21.7	少ない
			25.5	150.6	-17.2	なし
			15.4	242.8	-20.8	なし

の伸びが大きくなる、また硬化時に発泡しにくくなる  
ことが明らかになった。

硬質型の主剤を用いた試験片の荷重—変位曲線を図-3  
に示す。弾性係数について、検討結果のうち最も高かつ  
たものは199.0MPaだった。しかしながらこの試験片の伸  
びは5.6mm (7.4%) となり、ぜい性的な破壊を示した。  
一方、弾性係数148.2MPaと測定された試験片では伸び  
12.9mm (17.2%) となり、一般的な鋼材と同程度の延性  
を示した。以上のことから、次章の鋼材補強試験では、  
ポリウレアの弾性係数50-150MPaの範囲で試験を行うこ  
ととした。

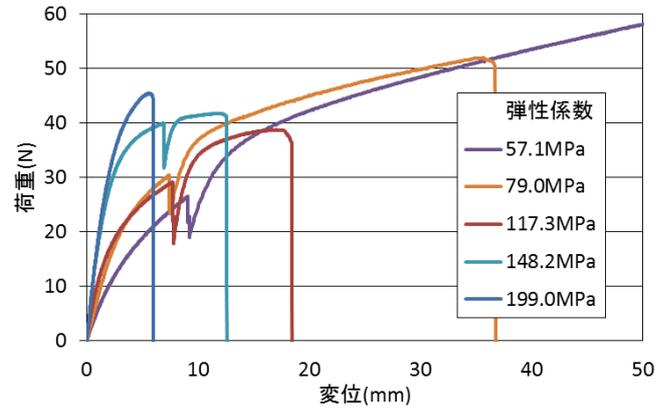


図-3 硬質型ポリウレアの荷重—変位曲線

### 3. 鋼材補強試験の概要

前章で行った検討結果を用いて緩衝層であるポリウレ  
アの弾性係数を操作し、補強効果への影響を調べるため  
の試験を行った。

#### (1) 材料

鋼材SS400を高弾性型炭素繊維シートで補強した試験  
体を作製した。鋼材とポリウレアの間にはポリウレア用  
ウレタンプライマーを用いた。また炭素繊維シートの含  
浸接着には耐熱型エポキシ樹脂を用いた。試験体に使わ  
れた鋼材、炭素繊維シート、樹脂類の物性を表-2に示す。

表-2 試験体材料の物性

(a) 鋼材		(b) 炭素繊維シート	
グレード	SS400	グレード	高弾性型
弾性係数(GPa)	200	弾性係数(GPa)	684
降伏点(MPa)	341	強度(MPa)	2817
厚み(mm)	5.65	厚み(mm)	0.143
幅(mm)	25.0	幅(mm)	25.0
長さ(mm)	600	長さ(mm)	400
(c) 樹脂			
種類	プライマー	ポリウレア	含浸樹脂
グレード	ポリウレア用	標準型/硬質型	耐熱型
弾性係数(MPa)	-※	50-150	2757
塗布量(g/m <sup>2</sup> )	150	600-1020	800

※溶剤系のため測定不可

#### (2) 試験体形状および試験方法

試験体の形状およびひずみゲージ貼付位置を図-4  
に示す。炭素繊維シートによる補強は、どの試験片も一層  
とした。

ポリウレアは主剤の種類および主剤と硬化剤の配合比  
を変化させることで弾性係数を操作した。ポリウレアの  
弾性係数を変化させた試験体の一覧を表-3に示す。こ  
の表において、塗布量は硬化後のポリウレアの厚みが

表-3 試験体一覧

No.	主剤	硬化剤	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	弾性係数 (MPa)	塗り厚 (mm)
1	標準型	標準型	1020	50	0.93
2			1000	60	1.16
3	720		80	1.07	
4	680		100	1.08	
5	610		120	0.87	
6	600		150	0.78	

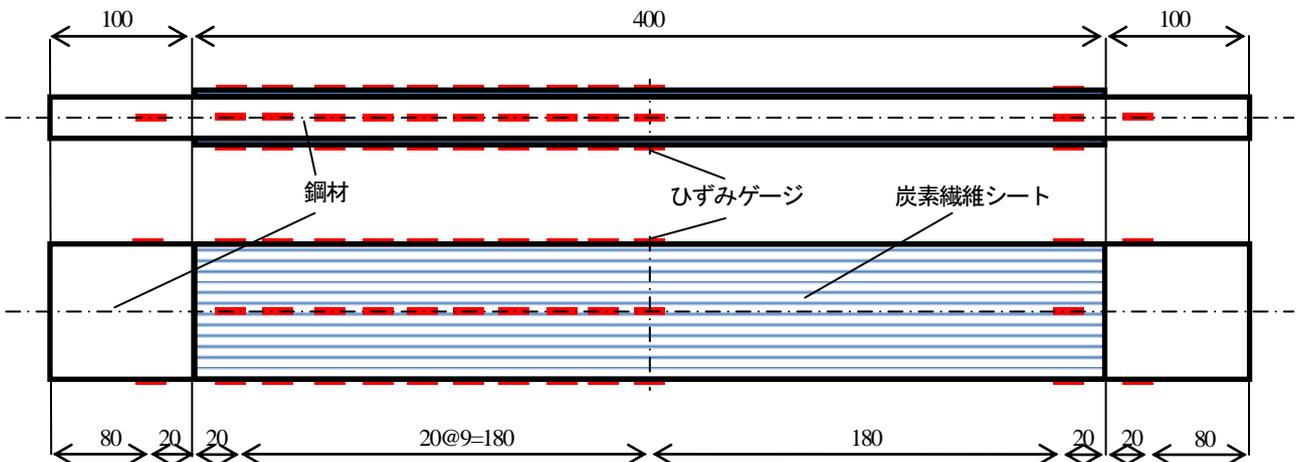


図-4 試験体概要 (単位 : mm)

0.8mm となるよう定めている。また、施工時に測定したポリウレア塗布前後の試験体の厚みから求めた実際のポリウレアの塗り厚を同表に示す。

これらの試験体に対し、単軸引張試験を行った。載荷容量100kNのロードセルを用い、変位制御によって試験速度を2mm /minと定めた。試験終了は長さ600mmの鋼材の塑性変形が十分に進む条件として、変位10mmに至るまでとした。

### (3) 施工工程

試験体の施工は次のとおりに行った。

ディスクサンダーによって鋼材のシート接着部に2種ケレンを行い錆を落とした後、ポリウレア用プライマーを塗布する。プライマー乾燥後、ポリウレアを塗布し一晚養生する。ポリウレア乾燥後、エポキシ樹脂によって炭素繊維シートの含浸、接着を行う。その後、試験実施まで常温で7日間養生する。

さらに、含浸樹脂の硬化後ひずみゲージの貼付を行った。ひずみゲージ貼付後、引張試験機にセットした状態の写真を図-5に示す。



図-5 引張試験状況

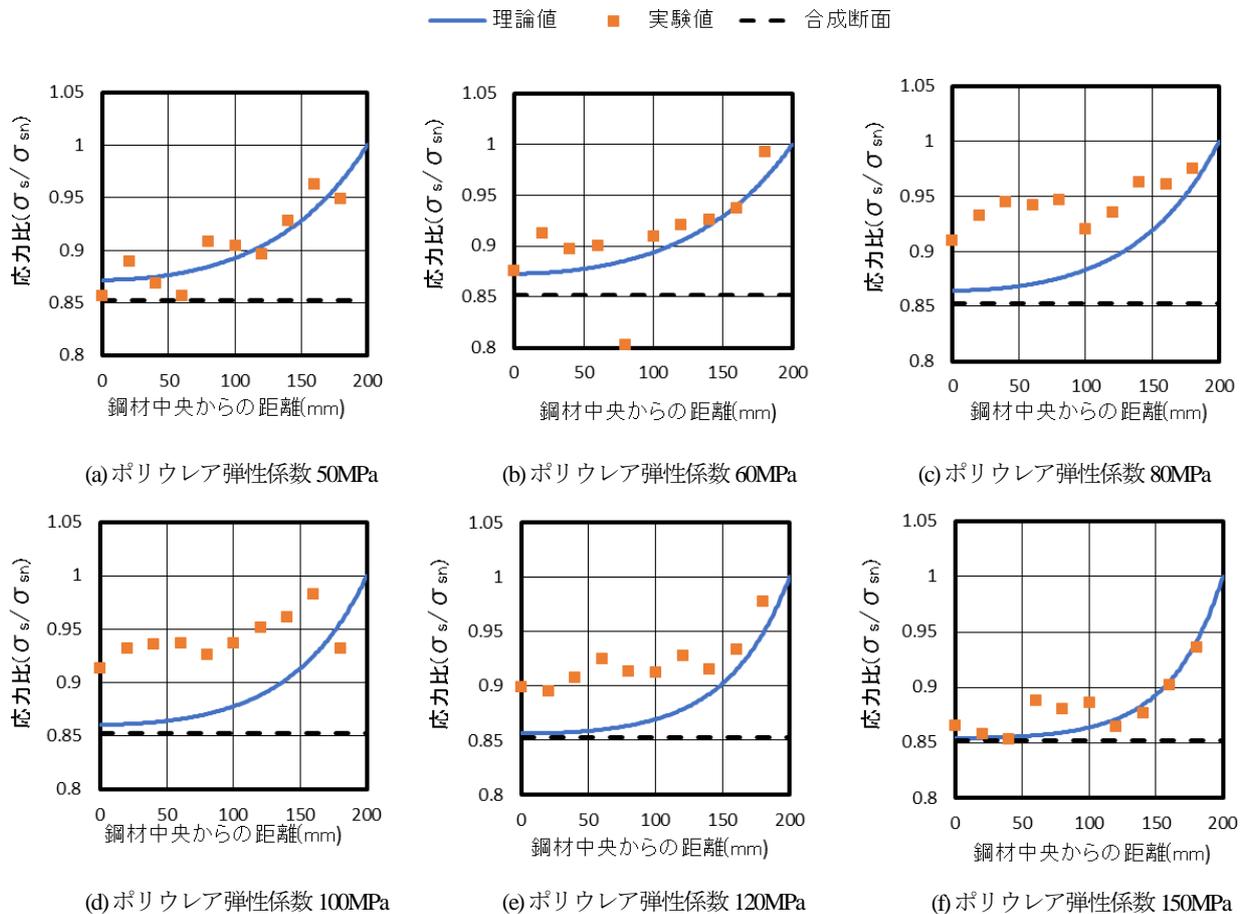


図-6 単軸引張時の鋼材の応力分布

## 4. 実験結果

### (1) 応力分布

引張応力100MPa付近となった時点の鋼材の応力比（各部分の鋼材応力を、炭素繊維シートが接着されていない位置の鋼材に生じる応力で除したもの）の実験値を、次に示す式<sup>2)</sup>から得られる理論値と並べて図-6に示す。

炭素繊維シートが上下に対称に接着された鋼板に生じる応力は

$$\sigma_s = \left\{ \xi + \frac{(1-\xi)\cosh(cx)}{\cosh(cl)} \right\} \sigma_{sn} \quad (1)$$

ここで、

$$\xi = \frac{1}{1+2E_c t_c / (E_s t_s)} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\frac{G_g}{h}} \sqrt{\frac{2}{1-\xi}} \frac{1}{\sqrt{E_s t_s}} \quad (3)$$

$E_s, t_s$  : 鋼板の弾性係数と板厚

$E_c, t_c$  : 炭素繊維シートの弾性係数と板厚

$G_g, h$  : 接着剤のせん断弾性係数と厚さ

$l$  : 炭素繊維シートの付着半長さ

$x$  : 炭素繊維シートの付着中央からの距離

$\sigma_{sn}$  : 炭素繊維シートが接着されていない位置の鋼板に生じる応力

上式において、接着剤として考慮した樹脂はポリウレアのみで、含浸樹脂は考慮していない。さらにせん断弾性係数についてはポリウレアのポアソン比を0.49として算出した。

図-6の点線の値は、CFRPが鋼材と完全な合成断面であると仮定した場合の値である。炭素繊維シートによって補強された鋼材に生じる応力が合成断面の仮定における値に近いほど効果的に補強されていることになる。

理論値から計算される結果からは、ポリウレアの弾性係数が高いほど、鋼材に生じる応力は広い範囲で合成断面の値に近づき、効果的に補強できることがわかる。一方、実験の結果からは、ポリウレアの弾性係数が高いと補強効果が上がるという傾向はある程度見られるものの、特に弾性係数80MPa以上の場合、部分的に理論値から大きく補強効果が下がっている。この原因の一つとして、比較的高弾性のポリウレアは施工時の粘度が高く、塗り厚を均一にするのが困難だった点が考えられる。

### (2) 力学特性

実験における荷重—変位曲線を図-7に示す。各試験体の荷重曲線において、荷重や塑性域へ遷移する時のひずみの値に目立った変化はなく、ポリウレアの弾性係数は

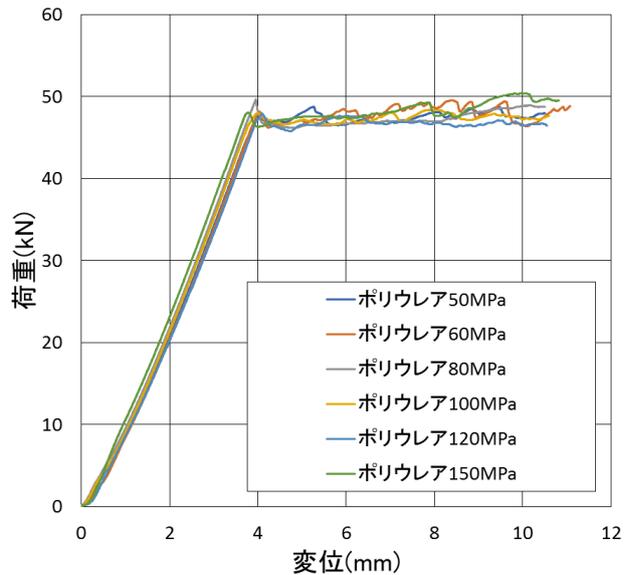


図-7 ポリウレアの弾性係数による荷重—変位関係

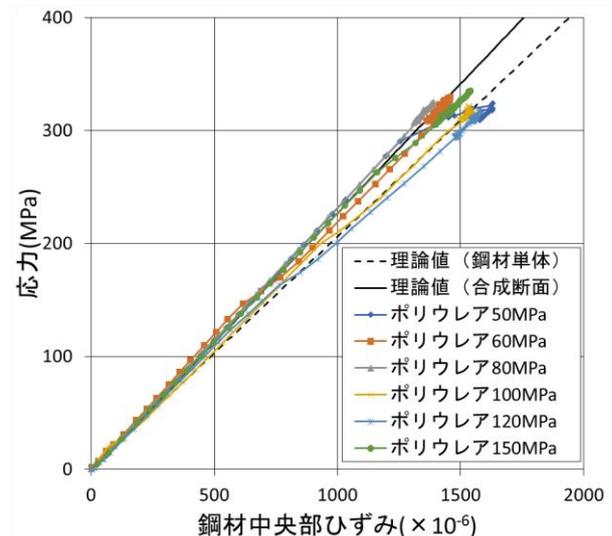


図-8 ポリウレアの弾性係数による応力—ひずみ関係

補強された鋼材全体の力学的挙動の傾向には影響を与えないといえる。

一方で、図-8に示す応力—ひずみ関係から、鋼材中央部においては応力伝達に影響を与えることが確認される。

### (3) 剥離様式

CFRPのひずみを鋼材応力と関連付けたグラフを図-9に示す。この図において、CFRPの剥離が起こるとひずみの値が低下する。

引張変位10mmまでの変形において、剥離が確認された応力と変位を表-4に示す。ポリウレアの弾性係数が100MPa以上の試験体において剥離が確認された。剥離が起こった試験体に関しては、いずれも鋼材の弾性域において、ポリウレアとCFRP層の間で剥離が確認された。

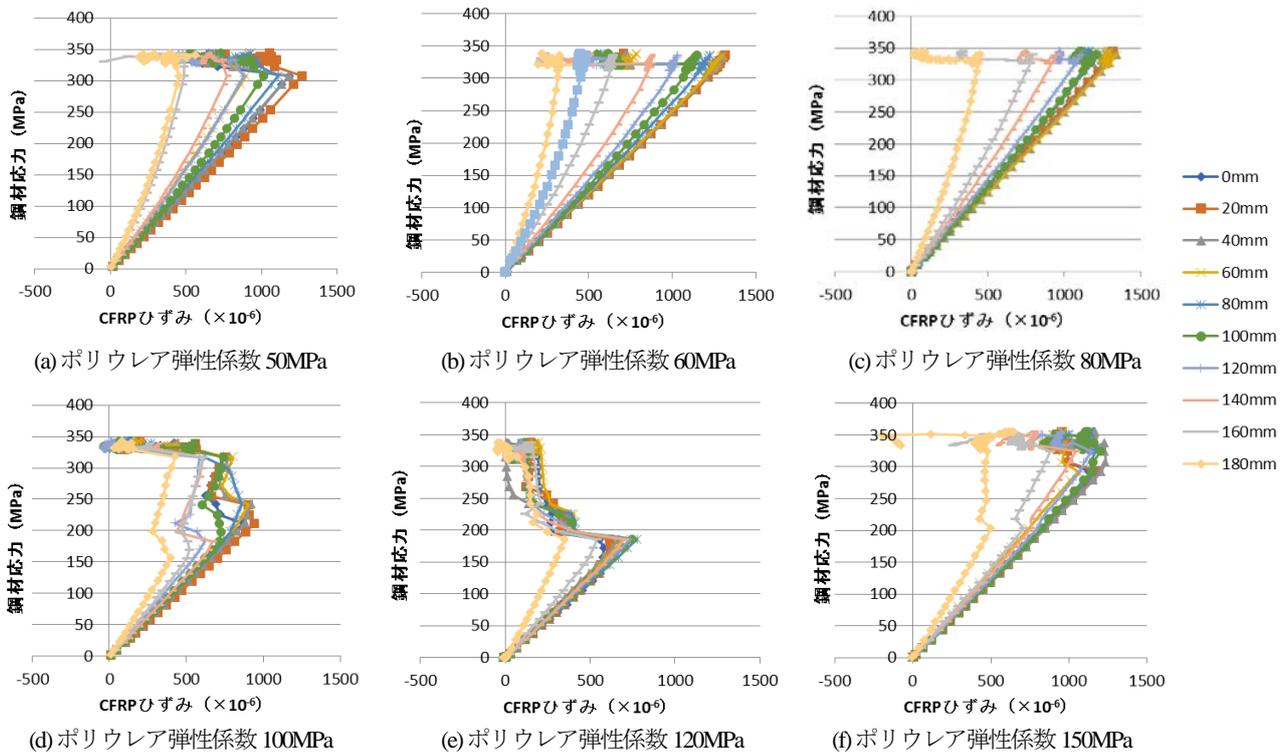


図-9 鋼材応力とCFRPのひずみの関係 (右凡例は鋼材中央からの距離)

表-4 ポリウレアの剥離特性

特性項目	ポリウレア弾性係数					
	50MPa	60MPa	80MPa	100MPa	120MPa	150MPa
剥離応力(MPa)	-	-	-	156.4	185.6	203.8
剥離時変位(mm)	-	-	-	2.08	2.50	2.44
備考	剥離なし	剥離なし	剥離なし			

表-5 ポリウレアの弾性係数による影響

検討項目	ポリウレア弾性係数					
	50MPa	60MPa	80MPa	100MPa	120MPa	150MPa
補強効果	△	△	○	○	◎	◎
剥離特性	○	○	○	×	×	×
発泡	○	○	△	△	×	×
施工性	○	○	△	△	×	×
ガラス転移点	○	○	○	○	○	○

## 5. 考察

実験結果から、補強効果・剥離特性・施工性・剥離特性の各検討項目について、ポリウレアの弾性係数がどのような影響をもたらすかについて考察を行った。これらをまとめたものを表-5に示す。

### (1) 補強効果

鋼材の応力分布の結果から、ポリウレアの弾性係数が一番高い 150MPa のときに最も優れた補強効果が得られた。理論値からもポリウレアの弾性係数が高いほど補強

効果が大きいことがわかるが、実験においては、ポリウレアの弾性係数が高い場合に補強効果が安定せず、理論値から大きく外れる試験体があった。このため安定して高い補強効果を得るには、ポリウレアの弾性係数を上げるだけでなく剥離特性や発泡などの他の要因を改善する必要があると考えられる。

### (2) 剥離特性

ポリウレアの弾性係数が高いほど、変形の早期に剥離する傾向が明らかになった。鋼材の補強においてはCFRP が剥離してしまうと応力伝達に支障をきたすため、

鋼材の弾性域内での剥離が生じない目安として、弾性係数 80MPa 以下のポリウレアを用いる必要があるという結果が得られた。

### (3) 施工性

弾性係数の高いポリウレアは硬化前の状態で粘度が高いため、粘度の低いものに比べて表面に凹凸ができやすく、施工性は悪かった。このため塗り厚も安定せず、補強効果や剥離特性に悪影響を及ぼすことが懸念される。

### (4) 発泡

実験の結果、弾性係数 80MPa 以上のポリウレアでは発泡を生じた。現状では弾性係数の高いポリウレアは硬化時に発泡を生じ樹脂の厚みが増してしまうため、既定の厚みで塗るためには体積の増加率を考慮したうえで塗布量を定める必要がある。

また発泡が生じることにより塗布厚が均一でなくなってしまうため、補強効果や剥離特性が安定しないという実験結果につながった可能性がある。

### (5) ガラス転移点

ポリウレア弾性係数 50-150MPa の範囲では、 $T_g$  は $-15^{\circ}\text{C}$ 以下と十分低く、気温による力学的挙動への影響は小さいと考えられる。ただし、弾性係数が高いほど  $T_g$  も高くなるため、今回検討した範囲以上に高い弾性係数の樹脂を用いた場合には  $T_g$  が上昇する。このような場合、気温が  $T_g$  より高くなった際に施工や補強効果へ影響する可能性がある。

## 6. 結論

本研究ではCFRPによる鋼材補強においてひずみ緩衝層のポリウレアの弾性係数の違いが与える影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- ① 主剤の種類や配合比を変化させることで弾性係数 20-200MPa程度のポリウレアを作製した。このとき、弾性係数が高いポリウレアは発泡しやすいことが確認された。また $T_g$  は概ね $-15^{\circ}\text{C}$ 以下となった。
- ② 弾性係数50-150MPaのポリウレアを用いてCFRP補強鋼材を作製し、引張試験を行った。鋼材の補強効果については弾性係数が高いポリウレアを使うほど優れているが、同時に発泡や剥離が起きやすくなるため結果は安定しない。
- ③ ポリウレアの弾性係数が比較的高い場合にポリウレアとCFRPの剥離が発生した。弾性係数80MPa以下では鋼材の弾性域での剥離は起こらなかった。弾性係数が高いほど補強効果は高くなるが、発泡や施工性などを合わせて考えると、80MPaまでが有効な応力伝達を期待できるポリウレアの弾性係数と考えられる。

## 参考文献

- 1) (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.
- 2) 石川敏之, 大倉一郎：複数の段差を有する CFRP 板接着鋼板の各 CFRP 板の接着長さ最適剛性, 土木学会論文集 A, Vol.66, pp.368-377, 2010.
- 3) 石川敏之, 大倉一郎, 西田貴裕, 横田季彦, 斉藤誠：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.
- 4) 石川敏之, 大倉一郎, 小村啓太：CFRP 板の端部に段差を設けることによるはく離荷重上昇の理論解析, Vol.65 pp.362-367, 2009.
- 5) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.239-249, 2001.

## EFFECT OF ELASTIC MODULUS OF POLY-UREA PUTTY OF CFRP BONDED STEEL PLATE ON STRESS TRANSFER

Akihiro NISHINO, Yuya HIDEKUMA, Takeshi MIYASHITA, Yusuke OKUYAMA, Kazuo OHGAKI and Atsuya KOMORI

CFRP is often used to repair the steel structures. When bonding the CFRP to steel members, poly-urea putty is applied to transfer stress from steel to CFRP. In this research, the effect of elastic modulus of poly-urea putty on the characteristics of CFRP bonded steel plate is examined.

The results showed that poly-urea putty with higher elasticity can transfer stress more effectively. However, the foaming is also confirmed in higher elastic putty, which causes unstable results of tensile test. Debonding, workability and glass transfer temperature of poly-urea putty are also examined, and it is concluded that elastic modulus up to 80MPa can transfer the stress most effectively.