

板厚変化部を有する鋼製梁のCFRP耐震補強工法 に関する実験的研究

大島 佳月¹・大垣 賀津雄²・Ngoc Vinh PHAM³・酒造 敏廣⁴
秀熊 佑哉⁵・櫻井 俊太⁵

¹学生会員 ものづくり大学 建設学科（〒361-0038 埼玉県行田市前谷333）

²正会員 ものづくり大学 建設学科 教授（〒361-0038 埼玉県行田市前谷333）

³正会員 ものづくり大学 建設学科 特任講師（〒361-0038 埼玉県行田市前谷333）

⁴正会員 大同大学 名誉教授（〒669-2106 兵庫県丹波篠山市牛ヶ瀬179-1）

⁵正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社（〒103-0027 東京都中央区日本橋一丁目13番1号）

1. はじめに

鋼製の橋脚や長大橋の主塔、立体ラーメン橋やアーチ橋等の構造部材は、部材軸方向に材料強度や断面寸法を変化させた変断面構造が従来から多用されてきた。このような鋼変断面部材では、通常は溶接継手部などにおいて板厚変化させており、地震時の繰返し力の作用下で、耐荷力が小さい薄板部が塑性変形や局部座屈の起点となり、十分な耐震性能を発揮できなくなることが想定される。たとえば、板厚変化する変断面柱の断面変化点での塑性変形発生が、柱の崩壊メカニズムに重大な影響を及ぼして、耐震上好ましくない力学現象を引き起こすケースが指摘されている¹⁾²⁾。阪神・淡路大震災以前の基準に基づいて設計された鋼製部材では、レベル2地震動により、板厚変化部の近傍を起点とする損傷被害を受けるものと考えられる。

このような板厚変化部の補強工法として、溶接やボルトによる当て板を行うことが多いが、多数のボルト孔を開けることや溶接の熱影響を考えると改善の余地が多い。そのため、鋼構造の補強材料として、炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPと記す）を用いた耐震補強工法に関する研究が行われている³⁾⁷⁾。CFRPは軽量かつ耐久性に優れており、重機や騒音を伴わない施工が可能であり、施工後のメンテナンスも少ない。しかしながら、これまでの研究は、鋼管に対してCFRPシートを周巻きした補強が中心であり、箱形断面やその構成補剛板に対する実験的研究はほとんど実施されていない。また、塑性領域に及ぶ繰返し力下でのCFRP補強部材の弾塑性性状については、研究データも不足しているのが実情である。

ところで、腐食損傷部にCFRPシートを施工して耐力回復を図る研究⁸⁾⁹⁾によると、CFRPシートと鋼材の界面にポリウレアによる高伸度弾性パテ（以下、ポリウレアパテと呼ぶ）を設置すれば、塑性変形時にもCFRPシートが剥がれにくいことが確かめられ、設計・施工に関する基準が示されている¹⁰⁾¹¹⁾。筆者らは、文献12)において、ポリウレアパテを用いたCFRPシートで補強した鋼板の塑性変形性状に関する基礎的実験を実施し、ポリウレアパテの有効性を確認して、解析的な検討も加えている。

本研究は、鋼製梁の板厚変化部の表面にCFRPシートによる補強を行い、純曲げおよび曲げ・せん断载荷の条件で正負交番载荷実験を行って、CFRP耐震補強の効果を検討したものである。曲げと曲げ・せん断の2パターンの鋼製供試体（計8体）の実験を実施している。ポリウレアパテの有無やCFRPシートの種類をパラメータとして、CFRPによる補強効果を比較・考察して、耐震補強に対する設計データに資するものとする。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

本研究では、フランジ・プレートの板厚を変化させた鋼製梁の純曲げ载荷実験（以下、単に曲げ実験と記す）と曲げ・せん断载荷実験を行う。実験供試体の一般図を図-1に示す。供試体パラメータは表-1に示すとおりである。すなわち、補強の有無、シートの種類、およびポリウレアパテの有無をパラメータとし、各载荷ケースについて4体ずつ、計8体の供試体を製作した。

a. 補強の種類

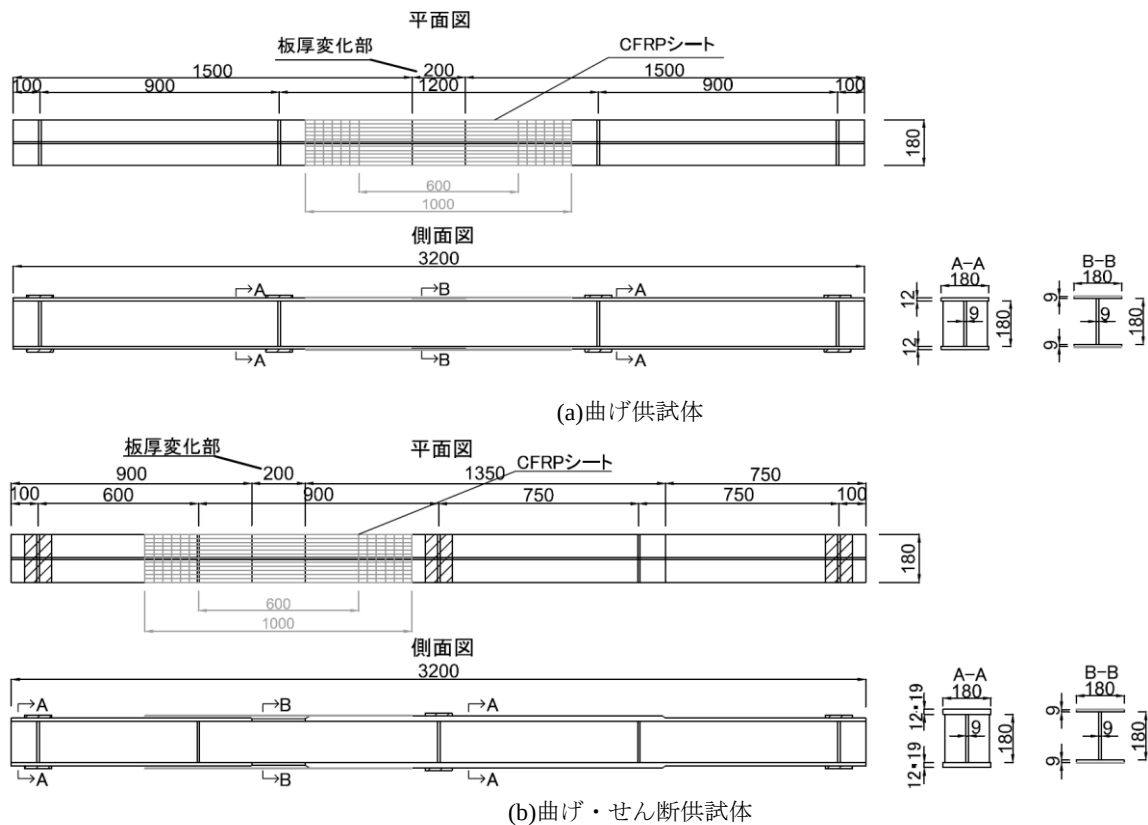


図-1 実験供試体の一般図

表-1 実験供試体の種類

実験供試体		ポリウレ アパテ	CFRP シート	シートの 積層数
曲げ	曲げせん断			
M1	MS1	なし	なし	—
M2	MS2	あり	高弾性	9
M3	MS3	なし	高弾性	7
M4	MS4	あり	中弾性	13

表-2 使用材料諸元

使用材料	弾性係数	降伏点	ポアソン比
鋼材(SS400)	$2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$	276 MPa	0.3
使用材料	弾性係数	引張強度	設計厚さ
高弾性CFRP	$6.54 \times 10^5 \text{ MPa}$	2485 MPa	0.143mm
中弾性CFRP	$4.27 \times 10^5 \text{ MPa}$	3925 MPa	0.165mm
エポキシ樹脂	2646 MPa	59 MPa	0.5 mm
ポリウレアパテ	67 MPa	10 MPa	0.8 mm

曲げ実験を行う供試体は、CFRPシート補強なしのM1と、ポリウレアパテの有りで高弾性CFRPシートで補強したM2、ポリウレアパテ無しで高弾性CFRPシートで補強したM3、ポリウレアパテ有りの中弾性のCFRPシートで補強したM4の4種類である。曲げ・せん断供試体のMS1~MS4も同様である。

b. 板厚変化部を有する供試体の特徴

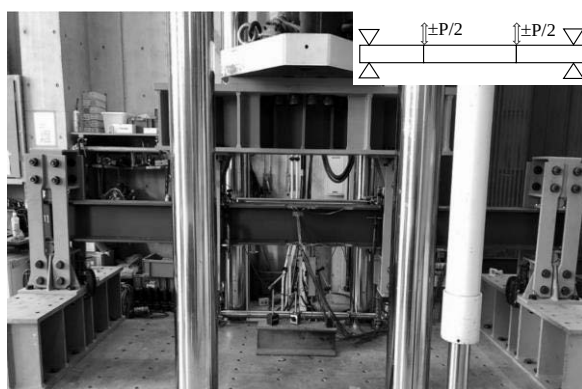
曲げ実験供試体：図-1(a)に示すように、梁中央部にフランジ・プレート厚を12mmから9mmに溶接で板継ぎさせた幅180mm×長さ200mmの板厚変化部を有しており、その板厚変化部の表面にCFRPによる補強を行うこととした。フランジ・プレート厚9mmの場合、その板厚変化部の幅厚比パラメータが $R=0.59$ となり、部材が局部座屈しにくい範囲としている。

曲げ・せん断実験供試体：桁端部のフランジ・プレート厚12mmを支点から800mmの位置で板厚9mm

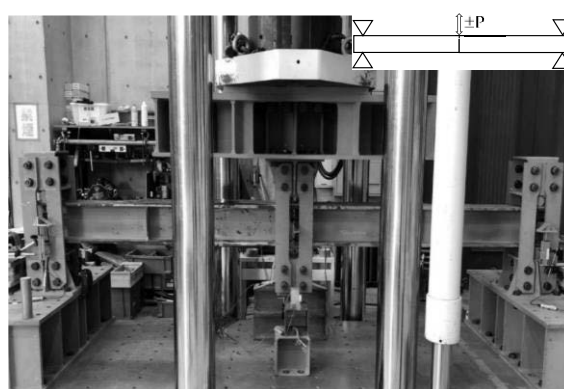
に板継ぎ変化させ、200mmの長さのところで板厚19mmにしている。そのため、曲げ・せん断載荷したときに、板厚減少部が最初に降伏するように設計している。曲げ実験供試体と同様に板厚変化部の表面にCFRPを貼付けて補強を行っている。

(2) 材料特性

実験に使用した材料の諸元を表-2に示す。鋼材はSS400材を使用した。CFRPシートには高弾性タイプと中弾性タイプを使用している。ここで、高弾性CFRPシートの場合、弾性係数が大きいため積層数も少なくできる特徴がある。一方、中弾性シートは弾性係数が低い引張強度が高く設計厚さも大きいため、座屈に対する補強効果などが期待できる。本文の実験供試体M3、MS3では、鋼材とCFRPの間に、弾性係数が小さく伸び性能が高いポリウレアパテ材を塗布し、CFRPシートはく離を抑制できるかどうか



(a) 曲げ载荷



(b) 曲げ・せん断载荷

写真-1 载荷状況

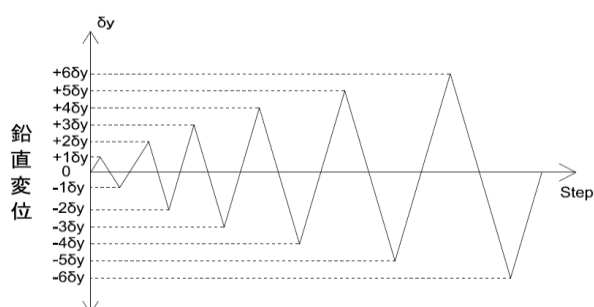


図-2 载荷パターン

かをパラメータとして加えている¹⁰⁾。

(3) CFRPシートの貼付け

実験供試体の板厚変化部における板厚差は3mmである。この箇所を補強するためのCFRPシートの積層枚数は、鋼材が減少した板厚分の必要枚数から決定した¹⁰⁾。

M3, MS3供試体：ポリウレアパテを用いずエポキシ樹脂で接着。完全合成として高弾性シートを7枚設置した。

M2, MS2供試体：ポリウレアパテを塗布し、補強効果の低減係数^{9),10)}を考慮して、高弾性シートの積層数を9枚とした。

M4, MS4供試体：中弾性シートでポリウレアパテを用いて、積層数を13枚とした。

CFRPシート補強の手順として、まず鋼材表面の錆や汚れをグラインダーで除去後、表面にアセトン塗布した布で清掃、脱脂を行いウレタンプライマーを塗布する。次にポリウレアパテ材を塗布する。このときに、塗布量を均一にするために、測りを使い重量を計測しながら塗布を行い、供試体ごとに塗布量のばらつきが起きないようにした。CFRPを貼付ける際は、含浸樹脂を塗布した後、CFRPシートを供試体軸方向に貼付け、さらに含浸樹脂の上塗りを行い、ローラーで含浸を行う。この作業をCFRP

の積層分繰り返す、最後に上塗りによって表面を仕上げる。また、シート端部のはく離を発生させないために、シート端部を20mm以上ずらしして貼付けていく施工を行っている¹⁰⁾。

(4) 载荷方法

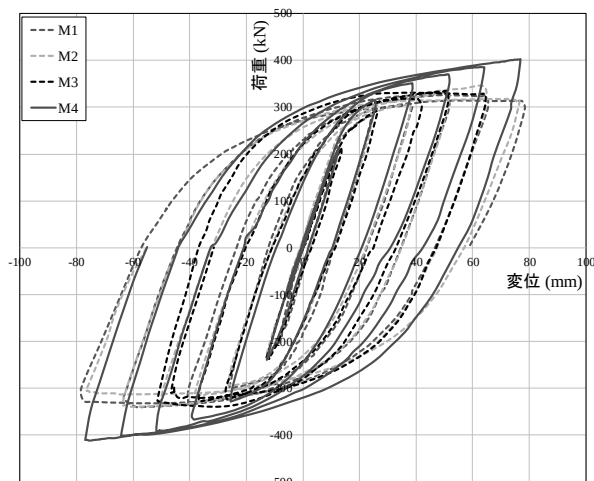
曲げ実験、曲げ・せん断実験は3,000kN万能試験機を使用して、写真-1に示すように実験供試体の上下フランジ・プレートを取り付け、支点および载荷点の上下フランジ・プレートをピン支持している。曲げ载荷は等曲げ区間1,200mmを設けた2点载荷の4点曲げとし、曲げ・せん断载荷は支間中央载荷の3点曲げとした。载荷点にはピンを設置して、回転と水平移動をある程度自由としている。

载荷方法は、図-2に示す载荷パターンのように、梁中央の鉛直変位 δ を漸増させた正負交番载荷とした。初等梁理論により梁中央の初期降伏変位 δ_y を求め、正曲げと負曲げにより $\pm 6\delta_y$ までの载荷パターンで実験を行った。曲げ実験供試体の計算結果は初期降伏変位 δ_y が11.2mm、初期降伏荷重 P_y が227kNであった。曲げ実験供試体では中央に板厚変化部があるので中央鉛直変位により载荷を行った。一方、曲げ・せん断供試体の板厚変化部中央の初期降伏変位 δ_y は10.4mm、初期降伏荷重 P_y が204kNである。

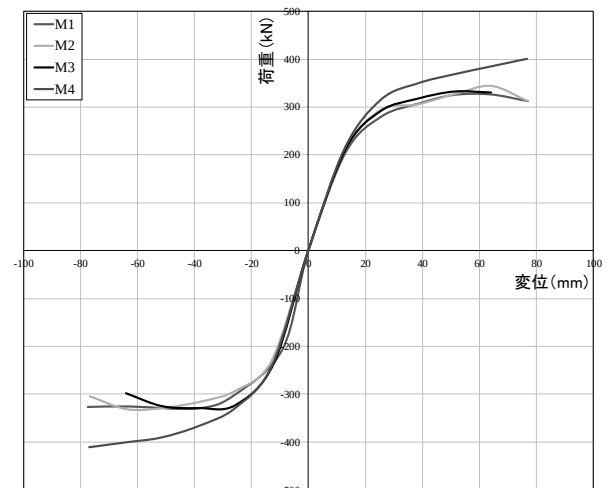
(5) ひずみ・変位の測定位置

载荷中のひずみの計測は供試体フランジ・プレートの表面、裏面、およびコバ面に1軸塑性ゲージを貼付けた。また、供試体の変位を測定するため、主要点に変位計を設置した。

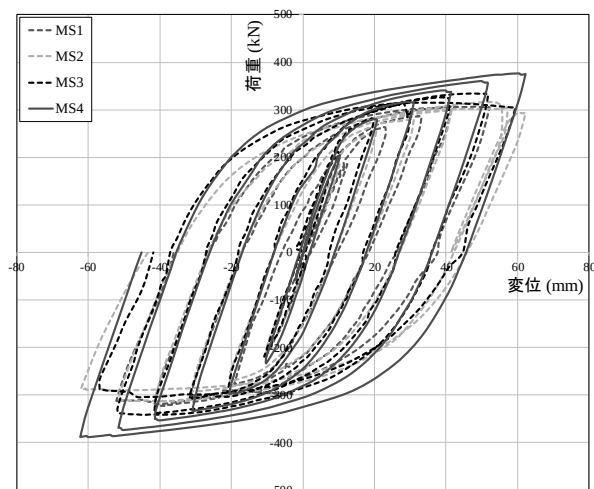
3. 実験結果と考察



(a) 曲げ載荷

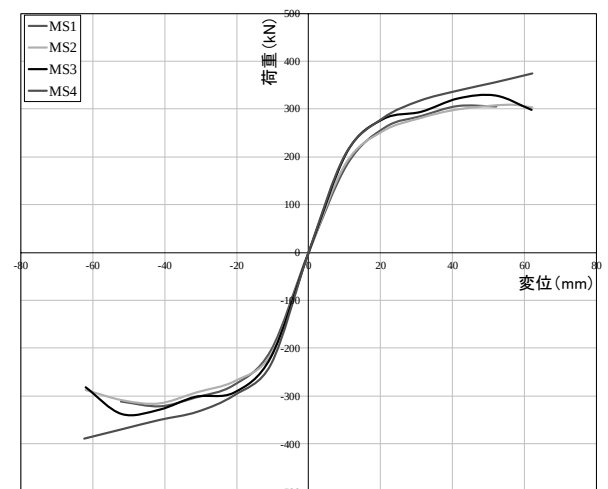


(a) 曲げ載荷



(b) 曲げ・せん断載荷

図-3 荷重と鉛直変位の関係



(b) 曲げ・せん断載荷

図-4 荷重と鉛直変位の履歴曲線の包絡線

(1) 荷重と変位の関係

実験結果から、鉛直荷重と鉛直変位の関係を図-3に示す。図-4には荷重と鉛直変位の履歴曲線のピーク包絡線を示す。

これらの図から、以下のことがわかる。

まず、M2~M4の補強した曲げ実験供試体では、M1の無補強供試体よりも剛性や耐荷力が上昇している。ポリウレアパテを使用しなかったM3は早期にCFRPシートが剥がれて局部座屈してしまい、M1と同じ線をたどっている。これより、ポリウレアパテを挿入しない場合は、塑性領域の繰り返しに対する耐震補強効果が低いと言える⁹⁾。ポリウレアパテを使用し、中弾性CFRPシートを用いた供試体M4では、 $6\delta_y$ まで剥がれずに正曲げ側、負曲げ側共に、耐荷力が終局段階の $6\delta_y$ まで上昇し続けている。高弾性CFRPシートのM2供試体ではシートのはく離は発生しなかったが、 $2\delta_y$ で上下のCFRPシートが破断してしまい、耐荷重が減少した。高弾性CFRPシートは中弾

性CFRPシートと比較して、引張強度が低いため圧縮や引張の繰り返し载荷によって破断したと考えられる。

曲げ・せん断実験において、高弾性シートを用いたMS2供試体は、 $3\delta_y$ でシートが破断し、M2供試体と同様な結果になった。また、供試体M4と同様に、MS4供試体の中弾性CFRPシートのポリウレアパテ有りの耐荷力は、明らかに引張側も圧縮側も $6\delta_y$ まで上昇し続けている。

以上のことから、フランジ・プレートの補強に対して、ポリウレアパテ有りの中弾性CFRPシートで補強したケースは、耐震補強効果が高いことがわかる。

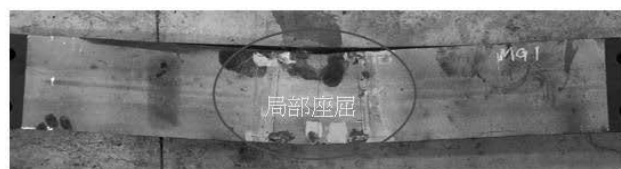
(2) 破壊モード

各実験の繰り返し正負交番载荷の各段階における載荷荷重値と供試体の破壊状況を表-3と载荷後供試体の状況を写真-2にまとめる。

各供試体の交番载荷段階における供試体の載荷荷

表-3 実験供試体の載荷と破壊状況

載荷パターン		M型供試体								MS型供試体							
		M1		M2		M3		M4		MS1		MS2		MS3		MS4	
		最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード	最大荷重	破壊モード
1	+ δ_y	205kN		206kN		213kN		214kN		185kN		185kN		211kN		206kN	
	- δ_y	205kN		232kN		236kN	下フランジのCFRP剥離	241kN		205kN		210kN		219kN	下フランジのCFRP剥離	226kN	
2	+2 δ_y	281kN		294kN	上フランジのCFRPが破断	292kN		316kN		262kN		253kN		280kN	上フランジのCFRP剥離	288kN	
	-2 δ_y	300kN		293kN	下フランジのCFRPが破断	323kN		329kN		278kN		268kN		293kN		307kN	
3	+3 δ_y	308kN		305kN		318kN		350kN		285kN		281kN	下フランジのCFRPが破断	295kN		326kN	
	-3 δ_y	330kN		314kN		329kN	上フランジのCFRPが破断	367kN		304kN		292kN	上フランジのCFRPが破断	302kN		341kN	
4	+4 δ_y	326kN		328kN		333kN		369kN		306kN		299kN		323kN		349kN	
	-4 δ_y	326kN		329kN		325kN	下フランジ座屈	391kN		322kN		315kN		329kN		364kN	
5	+5 δ_y	327kN	上フランジ座屈	343kN	上フランジ座屈	331kN	上フランジ座屈	385kN		305kN	上フランジ座屈	308kN	上フランジ座屈	329kN		361kN	
	-5 δ_y	327kN	下フランジ座屈	332kN	下フランジ座屈	298kN	横座屈	401kN		312kN	下フランジ座屈	309kN	下フランジ座屈	338kN	下フランジ座屈	387kN	
6	+6 δ_y	313kN	横座屈	313kN	横座屈			402kN			横座屈	292kN	横座屈	299kN	上フランジ座屈	374kN	
	-6 δ_y			305kN				411kN	破壊無し			286kN		282kN	横座屈	406kN	破壊無し



(a)M1



(b)M2



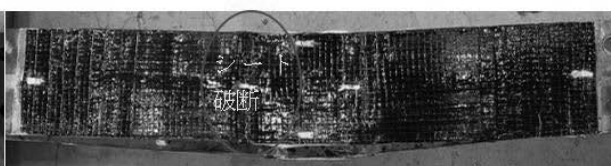
(c)M3



(d)M4



(e)MS1



(f)MS2



(g)MS3



(h)MS4

写真-2 載荷後実験供試体破壊状況

重値と破壊状況から、以下のことが考察できる。

まず、無補強のM1供試体の最大荷重は、正曲げ側で327kN(+5 δ_y)、負曲げ側で330kN(-6 δ_y)となり、塑性座屈が5 δ_y において上下フランジ・プレートで

共に生じている。M2供試体は高弾性CFRPシートにポリウレアパテを使用した供試体で、最大荷重は正曲げ側で343kN(+5 δ_y)、負曲げ側で332kN(-5 δ_y)となり、2 δ_y の段階でCFRPシートが断面変化溶接位置で

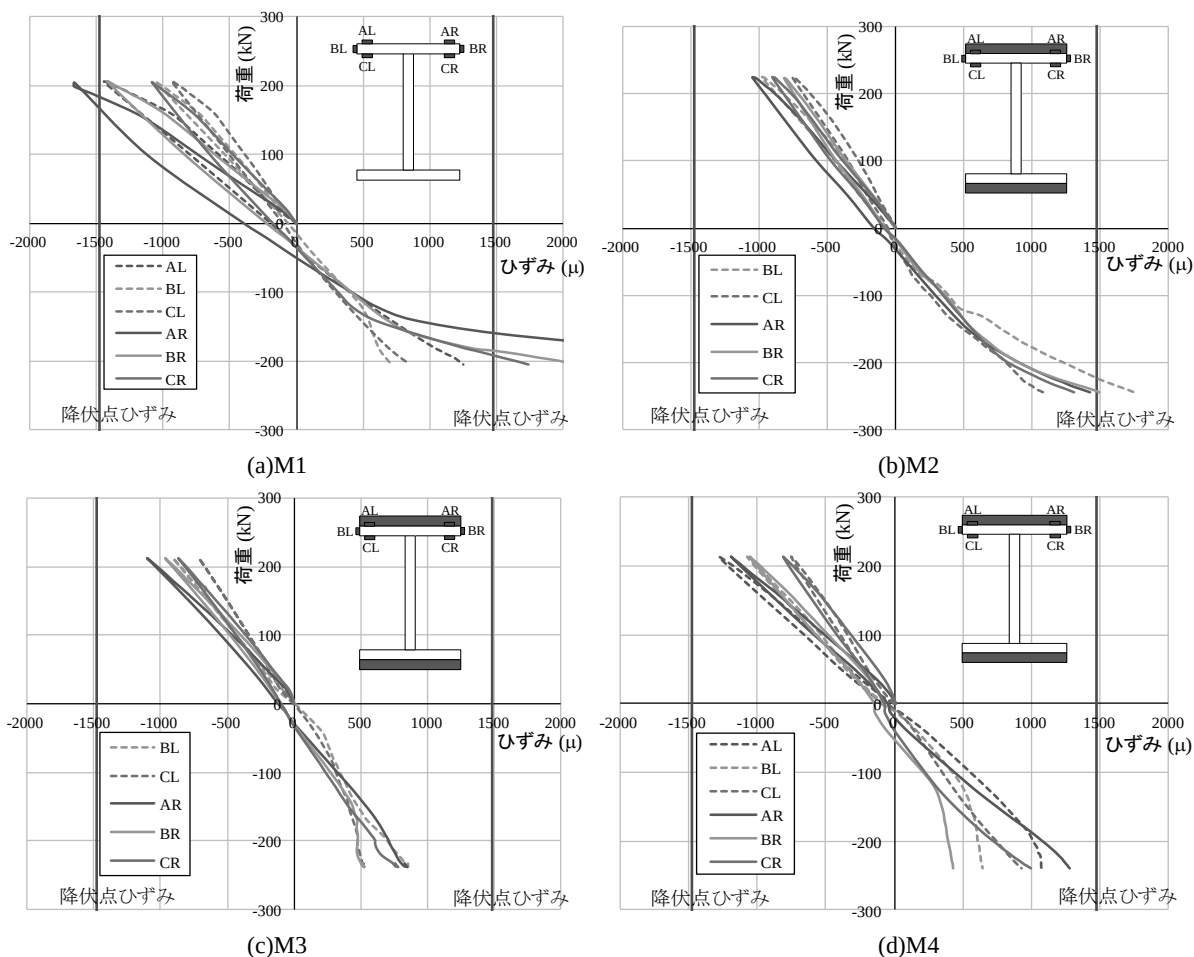


図-5 荷重とひずみの関係 ($\pm 1 \delta_y$)

破断している。これは、上述したように、高弾性CFRPシートの引張強度が低いためである。高弾性CFRPシートでポリウレアパテ無しのM3供試体の最大荷重は、正曲げ側で333kN(+4 δ_y)、負曲げ側で329kN(-3 δ_y)となり、1 δ_y で下フランジ・プレートのCFRPシートのはく離が発生している。

中弾性CFRPシートにポリウレアパテを使用したM4供試体の最大荷重は、正曲げ側で402kN(+6 δ_y)であり無補強のM1供試体の1.23倍、負曲げ側で411kN(-6 δ_y)でM1供試体の1.25倍に達しており、シートの破断やはく離が発生しなかった。中弾性CFRPシートは高弾性CFRPシートと比較して引張強度(3670MPa)が約150%高いため、破断が生じなかったと考えられる。

曲げ・せん断载荷の無補強MS1供試体の最大荷重は、正曲げ側最大荷重は306kN(+4 δ_y)、負曲げ側で322kN(-4 δ_y)となり、塑性座屈が5 δ_y で上下フランジ・プレートで共に起こっている。高弾性CFRPシートにポリウレアパテを使用したMS2供試体は、正曲げ側最大荷重が308kN(+5 δ_y)、負曲げ側最大荷重が315kN(-4 δ_y)となり、3 δ_y の段階でCFRPシートが破断している。

高弾性CFRPシートにポリウレアパテを使用していないMS3供試体は、正曲げ側最大荷重が329kN(+5 δ_y)、負曲げ側で328kN(-5 δ_y)となり、2 δ_y までに上下フランジ・プレートのCFRPシートのはく離が発生している。中弾性CFRPシートにポリウレアパテを使用したMS4供試体は、正曲げ側最大荷重が374kN(+6 δ_y)であり無補強のMS1供試体の1.22倍、負曲げ側で406kN(-6 δ_y)であり無補強のMS1供試体の1.26倍となり、シートの破断やはく離が発生しなかった。

(3) CFRP補強による応力低減効果と曲げ剛性の変化

変位 $\pm 1\delta_y$ の段階までの荷重とひずみの関係を図-5に示す。同図の赤線は正負の降伏ひずみの位置を示している。

無補強のM1供試体は+1 δ_y で一部が降伏点に達しているが、補強したM2~M4供試体は+1 δ_y で降伏点までは達しておらず、その補強効果を確認できる。また、ポリウレアパテを用いていないM3供試体のひずみは、CFRPシートと鋼材との合成効果が高く、CFRP表面と鋼材表面のひずみが小さくなっている。一方、ポリウレアパテを用いているM2, M4供試体で

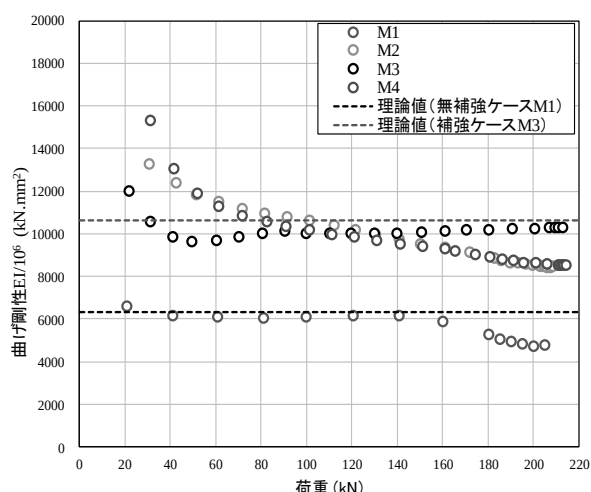


図-6 曲げ剛性と荷重の関係

は、鋼材とCFRP間の水平せん断変形による影響が現れており、ひずみに乱れが生じていることがわかる。この点は、今後FEAによる解析を通じて、さらに究明していく必要がある。

また、 $1\delta_y$ までの曲げ剛性と荷重の関係を図-6に示す。応力低減効果は上・下フランジ・プレートで応力発生の変位が似た傾向になったので、上フランジ・プレートの結果を示している。なお、曲げ剛性と荷重の関係は曲げ載荷実験の結果を示している。

曲げ剛性は上下フランジ・プレートの側面に貼り付けたひずみゲージから曲率 ϕ を求め、見かけ上の曲げ剛性 EI を求めた。これらは式(1)、(2)によって表すことができる。

$$EI = M / \phi \quad (1)$$

$$\phi = (\epsilon_u - \epsilon_l) / h \quad (2)$$

ここで、 ϕ は曲率、 ϵ_u 、 ϵ_l はそれぞれ上下フランジコバ面のひずみ、 h は供試体の上下のフランジ・プレートひずみゲージまでの高さ、 M は作用曲げモーメントである。

無補強の供試体M1は理論値にほぼ一致した直線の値を持ち、剛性がほぼ一定になっている。荷重180kNで少し剛性が低下しているのは、一部塑性化した影響である。一方、CFRPシートで補強したM2~M4供試体の剛性は、計算通りに約180%上昇しているが、荷重増加とともに低下している。ポリウレアパテがあるM2,M4供試体では弾性合成的な挙動を示し、ポリウレアパテ層での水平せん断変形が剛性に影響していることが考えられる。一方、ポリウレアパテを用いずエポキシ樹脂で一体化しているM3供試体は剛性低下が少なく、 $+1\delta_y$ までほぼ合成断面に近い剛性を有しているといえる。

4. まとめ

本研究は、板厚変化部があるフランジ・プレートを有する鋼製梁を用いて繰り返し曲げ実験と曲げ・せん断載荷実験を行い、CFRP補強による効果を確認したものである。本文で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) エポキシ樹脂で高弾性CFRPシートを接着した場合、降伏変位の約2倍までにシートのはく離が生じて、無補強の場合と同様な弾塑性挙動を呈した。
- 2) ポリウレアパテを用いて中弾性CFRPシートで補強すれば、降伏変位の6倍までシートのはく離や破断が生じず、耐荷力も上昇を続け、局部座屈の発生を抑えることができた。
- 3) ポリウレアパテを用いずにエポキシ樹脂でCFRPシートを接着した場合、弾性範囲では補強による合成断面としての剛性が確保できる。
- 4) 一方、ポリウレアパテを用いてCFRPシートを接着した場合、弾性範囲で曲げ剛性が増加するが、荷重の増加とともに剛性が若干低下する傾向があった。

今後、CFRP補強した構造部材についてポリウレアパテを含めて数値解析を行い、上記4)の弾性範囲における挙動を調べることで、および、軸圧縮力の作用下で繰り返し曲げが作用する変断面柱への適用について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 酒造敏廣：繰り返し水平力を受ける鋼変断面片持ち柱の弾塑性挙動に関する研究，土木学会論文集，No.446/I-19，pp.127-136，1992.4
- 2) 酒造敏廣：繰り返し水平力を受ける鋼変断面片持ち柱の破壊メカニズムの変動特性，土木学会論文集A1，Vol.73，No.4，pp.I_9-18，2017
- 3) 松村政秀，北田俊行，徳林宗孝，池田啓士，岡田崇：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.17-31，2004.
- 4) 渡辺貴之，石田圭吾，林和彦，山口隆裕，池田尚治：炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強，構造工学論文集，Vol.48A，pp.725-734，2002.
- 5) 小野紘一，杉浦邦征，三木亮二，小牧秀之，若原直樹：炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.225-230，2002.
- 6) 西野孝仁，古川哲也：円形鋼管柱材の局部座屈形成に対する炭素繊維シートの補剛効果，構造工学論文集，Vol.49B，pp.489-496，2003.

- 7) 土木研究センター：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），2002.
- 8) 奥山雄介，宮下剛，緒方辰男，藤野和雄，大垣賀津雄，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP 接着鋼板の一軸圧縮試験，構造工学論文集，Vol.57A，pp.735-746，2011
- 9) 若林大，宮下剛，奥山雄介，秀熊佑哉，小林明，小出宜央，堀本歴，長井正嗣：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. 1，44-63，2015.
- 10) 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.
- 11) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ09，2018.7
- 12) 下前照，大垣賀津雄，Ngoc Vinh PHAM，酒造 敏廣，秀熊 佑哉：鋼構造板厚変化部の CFRP 補強に関する基礎的実験と解析，土木学会，第8回FRP複合構造・橋梁シンポジウム論文集，2020.11