

# 論文 炭素繊維シートと CFRP 定着体による部材接合部の曲げ補強に関する研究

加藤 貴久<sup>\*1</sup>・久部 修弘<sup>\*2</sup>・三井 宜之<sup>\*3</sup>・武田 浩二<sup>\*4</sup>

**要旨**：現在，炭素繊維シート補強において部材接合部の曲げ補強が必要な場合は，一般に鋼材とアンカーボルトによる定着体が用いられている。しかし，鋼材による定着体は炭素繊維シートに比べ耐久性や施工性に劣るという問題があった。本研究では，これらの問題点を解決する為に，全て CFRP で構成される炭素繊維シート用定着体を開発し，定着体要素試験及び部材試験によってその耐荷力性能を検証した。その結果，曲げが作用する部材接合部において，CFRP 定着体による定着方法は，鉄筋降伏レベルまで補強効果を有することが確認された。

**キーワード**：CFRP 定着体，炭素繊維，接合部，曲げ補強

## 1. はじめに

コンクリート部材の補強工法の一つとして，炭素繊維シート（以下 CFS）による補強工法が挙げられる。CFS は，軽量，高強度，高耐久性などの特徴を有する事から，柱部材の耐震補強，床版の疲労耐久性向上等，多くの適用実績を有している。

CFS を用いたコンクリート部材の曲げ補強への適用については，多数研究<sup>1)</sup> がなされており，設計施工指針<sup>2)</sup> などにもその適用方法について示されている。しかし，部材接合部等 CFS の定着長が十分確保できない場合（図-1）についての研究事例は少なく，そのほとんどが鋼制定着体<sup>3)</sup> によるものである。また，実際の施工でも鋼制定着体が多く使用されている。

本研究では，この鋼制定着体より耐久性があり，施工性に優れたオール CFRP 定着体（写真-1）を開発し，その適用性について検討を試みた。まず，コンクリートと炭素繊維ロッド（以下 CFRP ロッド）の付着試験によって，コンクリート躯体への定着性能について確認した。次に，CFRP 定着体の引張試験によって定着体の破

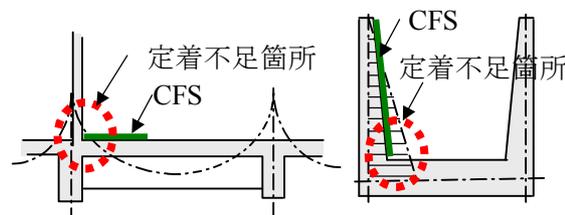


図-1 定着体必要部位例

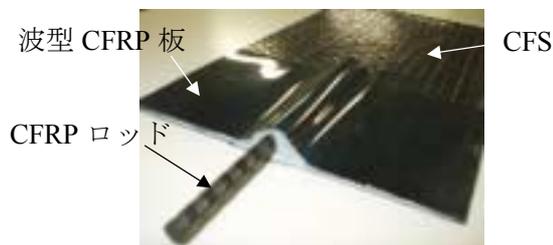


写真-1 CFRP 定着体

壊メカニズムを把握し，さらにコンクリート部材接合部の曲げ試験を行うことによって曲げモーメント作用下における本定着システムの妥当性について評価を行った。

## 2. 要素試験

### 2.1 コンクリートと CFRP ロッドの付着試験

#### (1) 試験方法

試験体は，1000×1000×200mm の無筋コンクリート平板にドリルを用いて穿孔を行い，CFRP

\*1 三菱化学産資（株） カーボン・アルミナ繊維事業部（正会員）

\*2 三菱化学産資（株） カーボン・アルミナ繊維事業部（正会員）

\*3 熊本大学 工学部環境システム工学科教授 工博（正会員）

\*4 熊本大学 工学部環境システム工学科助手 工博（正会員）

表-1 付着試験使用材料

コンクリート	圧縮強度 32.2Mpa
CFRP ロッド	外径 10.0mm 公称断面積 71.8mm <sup>2</sup> 引張強度 2550MPa 引張弾性率 147GPa
エポキシ樹脂パテの硬化物性 (CFRP ロッド定着用)	曲げ強度 50MPa 引張せん断強度 13MPa 圧縮強度 64MPa 圧縮弾性率 2400MPa

ロッドをエポキシ樹脂パテを用いて定着して製作した。表-1に付着試験使用材料を示す。载荷は、CFRP ロッド端部を鋼製スリーブで固定し、300kNセンターホールジャッキによって CFRP ロッドに引張力を与えた (図-2)。

(2) 試験結果

試験結果を図-3に示す。全ての試験体が付着破壊により最大耐力に至り、最大付着耐力は埋め込み長とほぼ線形相関関係にあることが確認された。

2.2 CFRP 定着体の引張試験

(1) CFRP 定着体設置方法

コンクリート入隅部への穿孔は、本工法用に開発した専用ドリルを用いてスラブ面から高さ10mm位置(スラブ面から孔中心までの距離)に穿孔し、CFRP ロッドを配置した。また、波型CFRP 板設置に用いる樹脂は、施工上、ある程度の粘性が必要とされるため、力学特性が含浸樹脂と同等以上である、エポキシ樹脂パテを用いた。

波型 CFRP 板設置は、CFS 面及び波型 CFRP 板凹部には、エポキシ樹脂パテを塗布した後に波型 CFRP 板を貼付する方法とした。

(2) 試験方法

表-2に波型 CFRP 板使用材料を示す。波型 CFRP 板を構成する CFS の積層繊維方向は、縦、横、斜め方向をそれぞれ組み合わせる事とした。波型 CFRP 板定着長さは、100、150、200mm の3ケースとし、定着長さ100mm のケースでは、波型CFRP 板にCFRP ロッドによる面外固定アンカー(埋込長30mm、アンカー頭はエポキシ樹脂製)を設置したものを製作した。表-3に試験

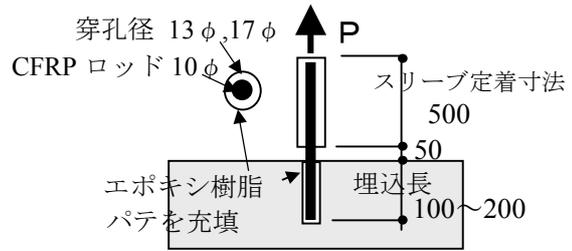


図-2 コンクリートとCFRP ロッドの付着試験体

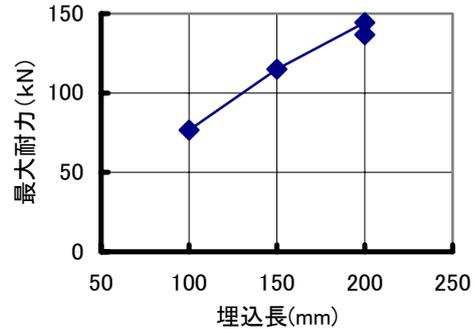


図-3 付着試験結果

体一覧を示す。引張試験は図-4に示す様に、反力壁を介した CFRP ロッド端部を鋼製スリーブ定着し、300kNセンターホールジャッキによって CFRP ロッドに引張力を与えることとした。反力壁のコンクリート強度は30MPaであった。

(3) 試験結果

表-3に最大耐力と破壊状況、図-5に試験体破壊状況の模式図を示す。面外固定を行っていない試験体は、概ね図-5に示すA部分のCFSとコンクリート間で最初に付着切れが発生し、その後B部分の付着切れが進展すると共にO点を支点として波型 CFRP 板が浮き上がり、最終的にはC部分に示すエポキシ樹脂パテと波型 CFRP 板間の付着切れが急速に進展し、破壊に至った。

波型 CFRP 板の積層構成による影響をみると、積層数が多くかつ斜め方向にも繊維を配したものが引張耐力が大きい傾向にあった。

CFRP ロッド面外固定アンカーを用いた試験体の場合は、波型 CFRP 板の浮き上がりは観察されず、波型 CFRP 板から CFRP ロッドが引抜けることによって最大耐力が決定した。

波型 CFRP 板を剛体と仮定し、O点まわりの曲げモーメントによる釣合い条件(図-6)から算出した見かけのコンクリート付着応力度と波型

CFRP 板定着長さの関係を図-7に示す。定着長  
長さが長くなるとコンクリート付着応力度  $\sigma_{ct}$   
が減少する傾向にあるが、面外固定アンカーを  
用いる事で付着耐力が改善される傾向が見られ  
た<sup>5)</sup>。

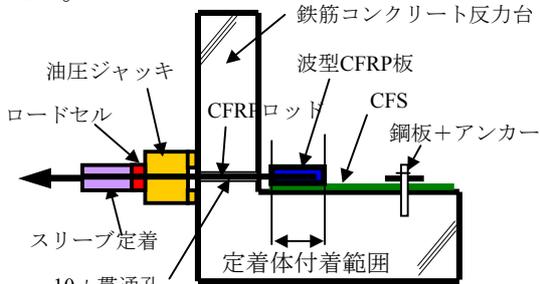


図-4 引張試験概要

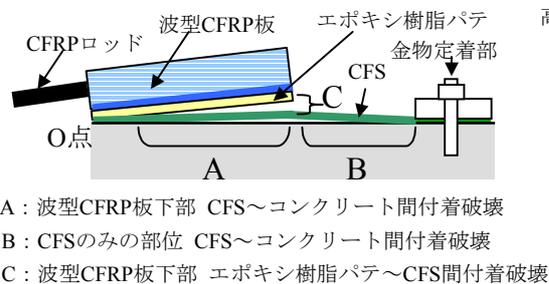
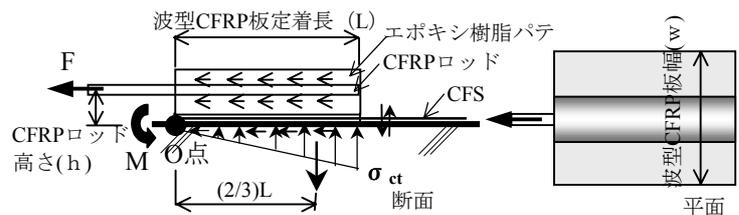


図-5 試験体破壊状況

表-2 波型 CFRP 板使用材料

CFRP ロッド	外径	8.0mm
	公称断面積	41.6mm <sup>2</sup>
	引張強度	2550MPa
引張弾性率	147GPa	
エポキシ樹脂パテ硬化物性	表-1 参照	
含浸接着樹脂	エポキシ樹脂(CFS 貼付用)	
CFS(高強度品)	目付量	300g/m <sup>2</sup>
	引張強度	3400MPa
	引張弾性率	230GPa



M : CFRP ロッド引張によってO点が発生する曲げモーメント

F : CFRP ロッド引張力  $\sigma_{ct}$  : コンクリートの付着応力度

O点廻りの曲げモーメント

$$M1=(L \times \sigma_{ct} \times w) \div 2 \times L \times 2/3 \quad \text{①}$$

$$M2=F \times h \quad \text{②}$$

$$\text{①, ②式より, } \sigma_{ct}=F \times h \times 2 \div [(L \cdot w) \times L \times 2/3]$$

図-6 定着部応力の仮定

表-3 面内引張試験体及び試験結果一覧

試験体 No	定着体幅 (mm)	CFRP 板 固定	定着体長 L(mm)	CFRP 板の炭素繊維積層構成			試験結果			
				0°	90°	45°	最大耐力(kN)	破壊状況(図-5 参照)		
No1	150	—	100	1層	1層	—	31.59	A→C		
No2		固定有		1層	1層	—	54.89	CFRP ロッド抜け→定着体凸部割れ		
No3		—		2層	2層	—	33.18	A→B→C		
No4		固定有		2層	2層	—	61.98	CFRP ロッド抜け		
No5		—		1層	1層	1層	39.98	A→B→C		
No6		—		—	150	2層	2層	—	61.61	A→B→C
No7		—		—	200	2層	2層	—	71.58	A→C

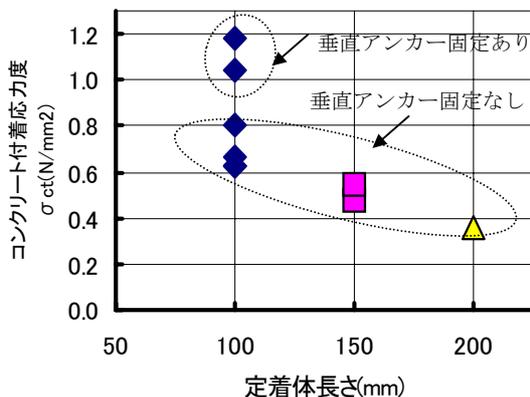


図-7 コンクリート付着応力度と定着長さ関係

### 3. 接合部曲げ試験

以上の要素試験結果を踏まえ、コンクリート  
構造物の接合部に曲げモーメントが作用した場  
合を想定した部材試験を行った。

#### 3.1 CFRP 定着体を用いた接合部曲げ試験

##### (1) 試験方法

曲げ試験体は、梁中心間距離 4000×6000mm、  
梁幅 300mm の建築物スラブを想定し、スラブ厚  
と配筋を決定した。図-8に試験体形状を示す。  
試験体種類は、図-9に示す様に、無補強(No1)、

CFS 貼付のみ補強 (No2) (端部定着なし), CFS + 鋼材による端部定着補強 (No3), CFS + CFRP 定着体 (No4) による端部定着補強試験体の 4 体とした。CFRP 定着体は, 前述の引張試験の結果より, 最も有効と考えられる積層構成 (CFS を 0° 1 層, 90° 1 層, 45° 1 層, 135° 1 層の計 4 層に積層) とした。CFS は, 要素試験と同様, 高強度品を用いる事とした。表-4 に接合部曲げ試験使用材料を示す。

No3, No4 試験体定着部アンカーは, 高弾性 CFS 2 層 (Tcf=65.2kN/150mm 幅) の終局荷重時引張力を上回るものとした。CFRP ロッド 10φ 終局荷重時引張力は, 146.4kN, アンカーボルト M20 終局荷重時引張力は, 72.2kN である。

No3 試験体の鋼材と CFS の付着長は, 鋼板と CFS の引張せん断試験<sup>6)</sup> から付着応力度 10N/mm<sup>2</sup> とし CFS の終局荷重時引張力を十分負担できる付着長さを確保するようにした (150mm 定着時 付着力 225kN/150mm 幅)。

載荷試験は, 図-10 に示す様にベース部分 4ヶ所に配した PC 鋼棒に軸力(100kN/本)を導入することによって固定し, アーム長 900mm の位置を油圧ジャッキにて加力した。実験では, 鉄筋ひずみが 200μ, 1000μ の時点で一旦除荷し, その後破壊に至るまで単調載荷を行った。また, 載荷時には同時に, 図-9, 図-10 に示す位置での変位及び引張鉄筋, コンクリート, 定着体, CFS のひずみを測定した。

表-4 接合部曲げ試験使用材料

コンクリート	圧縮強度 圧縮弾性率	42.9MPa 30.5GPa
CFRP ロッド	表-1 参照	
エポキシ樹脂パテ硬化物性	表-1 参照	
含浸接着樹脂	エポキシ樹脂(CFS 貼付用)	
鉄筋及びアンカーボルト	SD295A	
CFS (高弾性品)	目付量	300g/m <sup>2</sup>
	引張強度	1900MPa
	引張弾性率	640GPa

## (2) 試験結果

表-5 に各試験結果一覧を示す。無補強試験体 (No1), CFS 貼付けのみ試験体 (No2) では,

引張側コンクリート接合部に曲げひび割れが発生し, 引張鉄筋降伏後最大耐力に達した。

CFS 貼付けのみ試験体 (No2) は, 鉄筋降伏荷重は無補強とほぼ同等の荷重であったが, 鉄筋降伏後の試験体剛性が若干無補強のものより大きかった。これは接合部から 310mm 位置に貼付けた鉄筋及びコンクリートのひずみを比較しても明らかな様に (表-5), CFS の補強効果によってスラブ部材の変形が小さくなったと推察される。

鋼材による端部定着を行った試験体 (No3) は, 鉄筋ひずみが, 約 1000μ 発生時に CFS と鋼材背面 (CFS との接着面) の部分的な剥離が起こり急激に耐力が低下すると同時に鉄筋降伏に至った。その後, 荷重の増加は見られたが, 鋼材背面が完全に剥離し, 荷重低下した。鋼材部分は, ほとんどコンクリートスラブの変形に追随していない状況であった (写真-2)。鋼材の CFS 定着側に貼付けた 3 軸ゲージの最大ひずみは, 117μ 程度であった。

CFRP 定着体による端部定着を行った試験体 (No4) は, 引張鉄筋降伏までは何ら破壊の兆候は観察されなかった。鉄筋降伏後, コンクリートベース部分に埋設された CFRP ロッド周辺を避ける様に接合部に曲げひび割れが徐々に入り, その後, ベース部分のせん断破壊によって最大耐力が決定した。この時, CFRP ロッドの抜け, 波型 CFRP 板の剥離, 割れなどはなく CFRP 定着体がスラブ部分の変形に十分追従していたことが確認された (写真-2)。従って, ベース部がせん断破壊に至らなければ更に荷重は増加したと推察される。

図-11 に波型 CFRP 板表面ひずみ分布を示す。波型 CFRP 板の主応力は CFRP ロッドの引張方向に沿うように発生しており, CFRP ロッドによる躯体側への応力伝達が有効になされていたと推察される。

図-12 に試験体 (No4) の最大耐力時接合部分の断面ひずみ分布を示す。CFRP ロッドのひずみは, 3600μ 程度であることから, CFRP ロッドの

負担引張力は、38 kN 程度となる。この CFRP ロッド引張力は前述の要素試験レベルよりも低い荷重レベルであり、それ故に CFRP 定着体の破壊に至らなかったと考えられる。

図-13 に荷重-載荷点変位関係、図-14 に荷重-鉄筋ひずみ関係を示す。

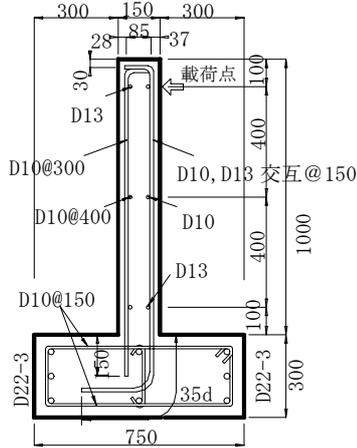


図-8 試験体形状寸法

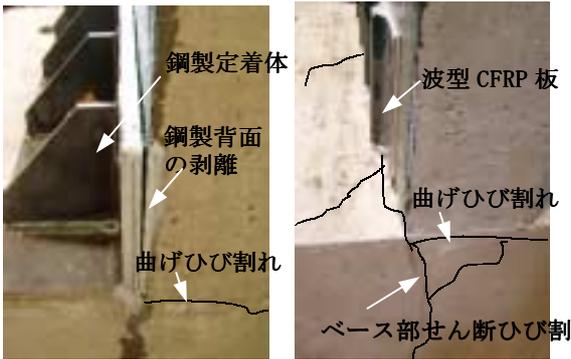


写真-2 最大耐力時ひび割れ状況

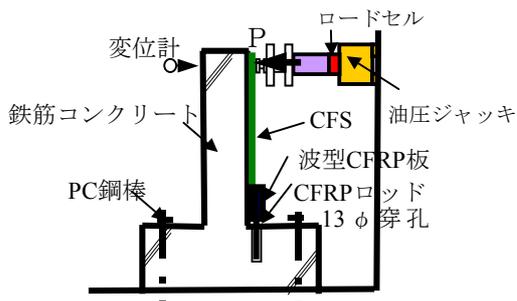


図-10 接合部曲げ試験

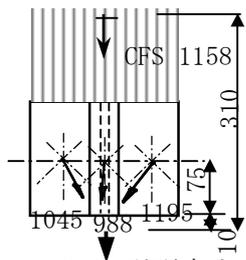


図-11 CFRP 板表面歪分布

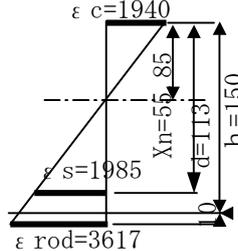


図-12 ひずみ分布図

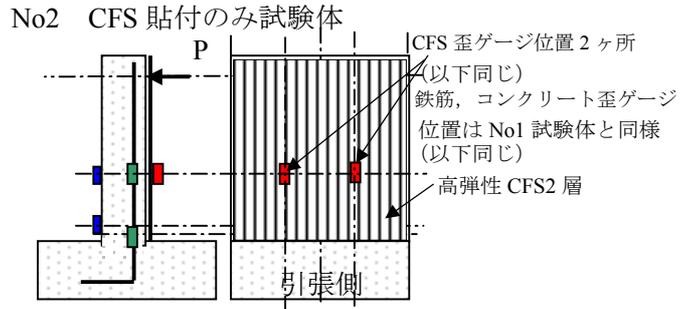
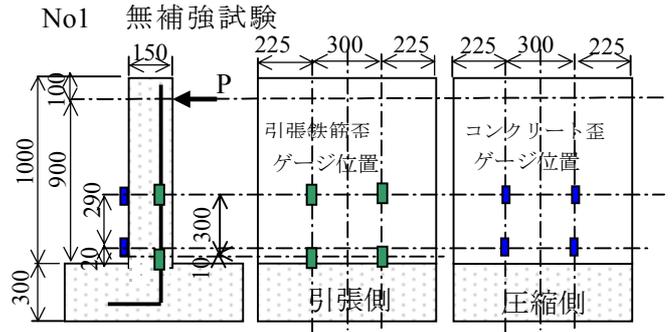


図-9 試験体種類, 歪ゲージ位置

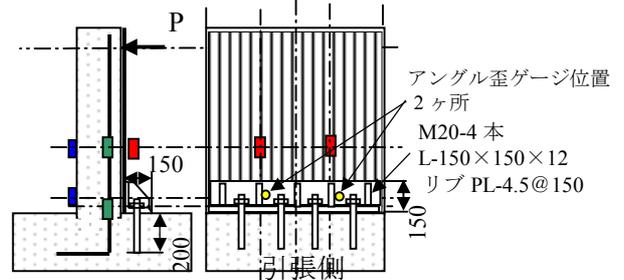


図-9 試験体種類, 歪ゲージ位置

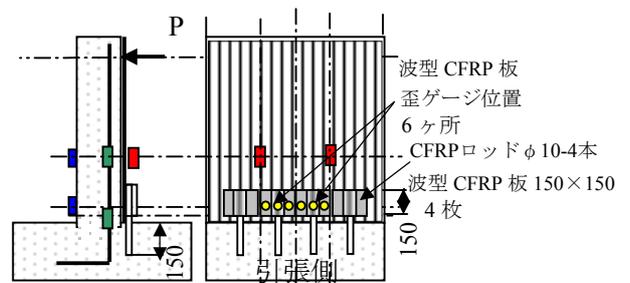


図-9 試験体種類, 歪ゲージ位置

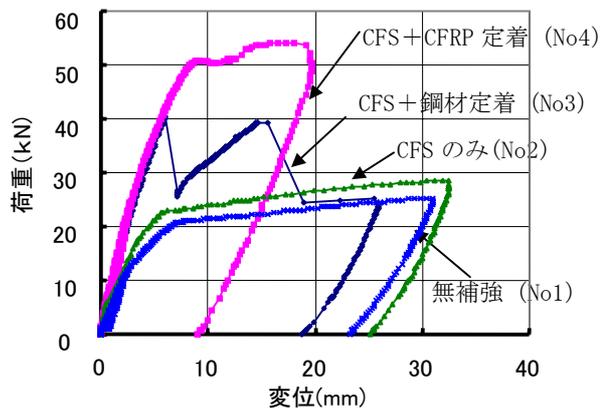


図-13 荷重-載荷点変位関係

表-5 試験結果一覧

試験体 No	H=10 位置鉄筋歪 2000 $\mu$ 時		最大耐力時									
	荷重 (kN)	H=310 位置鉄筋歪 ( $\mu$ )	荷重 (kN)	CFS 歪 ( $\mu$ )		波型 CFRP 板歪 ( $\mu$ )			コンクリート 圧縮歪 ( $\mu$ )		鉄筋歪 ( $\mu$ )	
				H=75 位置	H=310 位置	平板部左	凸部	平板部右	H=20 位置	H=310 位置	H=20 位置	H=310 位置
No1	19.81	425	25.53	—	—	—	—	—	1896	599	—	917
No2	19.87	68	28.66	130	247	—	—	—	2582	242	—	466
No3	—	—	40.48	—	606	117(鋼材部歪)			557	344	*1076	*423
No4	50.22	497	54.11	—	1158	1045	988	1195	1940	459	1985	573

※鋼材と CFS の剥離時の鉄筋ひずみ

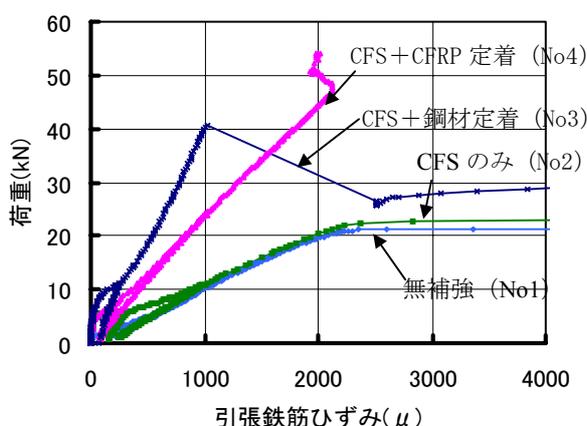


図-14 荷重—鉄筋ひずみ関係

#### 4. まとめ

##### 4.1 要素試験

- (1) CFRP ロッドとコンクリートの付着力は、エポキシ樹脂パテを用いる事によって確保できることが確認された。
- (2) 波型 CFRP 板の繊維積層構成を変化させることや面外固定アンカーを用いることによって定着耐力の増加が図れることが明らかとなった。

##### 4.2 接合部曲げ試験

- (1) 接合部曲げ補強では、定着体による補強を施さないと、補強効果はほとんど期待できないことが確認された。
- (2) 鋼材定着体は、一軸引張せん断試験から得られた CFS と鋼材の付着応力度を用いて十分な定着長を確保したが、鉄筋ひずみが 1000  $\mu$  程度で CFS と鋼材背面が剥離し、補強効果が低い結果となった。これは、コンクリート部材の回転変形に鋼材が追従しなかった

為と推察される。

- (3) CFRP 定着体は、鉄筋降伏まで十分な補強効果を有していた。

#### 参考文献

- 1) 例えば、村上聖, 下田誠也, 三井宜之ほか: 連続織シートによる鉄筋コンクリート梁の曲げ補強設計に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.185-192, 2002.11
- 2) コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書 (Ⅲ), 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会, 1999.12
- 3) 有留義朗, 金久保利之ほか: 繊維シートによる RC 構造物の耐震補強におけるシート端部定着に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 10 巻第 2 号, pp.119-130, 1999.5
- 4) 2001 年版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説, 日本建築防災協会, 2001.10
- 5) 久部修弘ほか: CFRP ロッドと波型 CFRP 板を用いた炭素繊維シート用端部定着方法に関する研究, 日本建築学会大会学術論文集 (北海道), pp.1071-1072, 2004.8
- 6) 炭素繊維シートによる鋼製橋脚の耐震補強工法研究報告書, 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), 財団法人土木研究センター, 2002.7