

CFRP と鋼の付着に関する基礎的研究

The Basic Study on Bond between CFRP and Steel

小野 紘一* 杉浦 邦征** 佐々木 敦*** 若原 直樹**** 小牧 秀之*****

Koichi ONO Kunitomo SUGIURA Atsushi SASAKI Naoki WAKAHARA Hideyuki KOMAKI

ABSTRACT Using FRP for the structural material instead of steel or concrete is many benefits. But the knowledge about material characteristics is not enough on using FRP for bridge members. In composite structure using CFRP, steel and concrete displaying cooperating effects. This paper has two theme, 1) comparing CFRP with steel on material characteristics, 2) the bond between two materials experimentally. Firstly build-up beams made by steel-beams and CFRP or epoxy was tested. Secondly winding CFRP around steel pipes was tested. The result is verified that the shear strength of epoxy is similar to bond strength between CFRP and steel. CFRP has anisotropy, so CFRP cannot follow the local deformations of steel, and the bond strength is low.

Key Words : CFRP(炭素繊維強化プラスチック), 付着, 積層梁, 複合構造

CFRP(Carbon Fiber reinforced Plastics), Bond, Build-up beams, Composite Structures

1. 概要

FRP(繊維強化プラスチック)は、軽量かつ高強度で腐食しない等の特長を持つため、鋼やコンクリートに代わる土木構造材料としての活用に期待が寄せられている。しかし、FRPは様々な長所が見出されている半面、脆性的な破壊を生じ、部材の隅角部において切れやすく、異種材料との複合化において、その接着力が性能を左右するという欠点も指摘されている。また、コストが高く現時点では実用的ではないと考えられるが、FRPの構造材料としての適用可能性に関する研究を広く進めるべきだと考えられる。

これまでは、棒状のFRPを鉄筋あるいは緊張材の代替として用いたり、シート状のFRPを橋桁や橋脚に貼り付けて、補強材として用いたり、ボルト周りの亀裂損傷を補修するという目的での適用のみである。FRP橋梁もしくはコンクリート、鋼との複合効果への適用を前提としたFRP材料の材料特性に関する基礎データは十分とは言えない。また連続繊維シートの場合、繊維の編み方や組み方によりその材料特性が大きく変化するが、材料

として異方性の小さなFRPを作る研究も為されている。しかし、補修・補強では特に異方性の強いものとして一方向性の連続繊維シートを用いることが多い。そこで本論文では、一方向性の連続繊維シートのうちCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を取り上げ、これと既存の構造材料である鋼、コンクリートとの合成・複合構造としての活用に注目する。特に軽量・長大化のニーズに協同効果が期待できるCFRPと鋼の複合体をに対して、その挙動を支配するCFRPと鋼の付着に関する基礎データを収集することを目的とする。

ここでは、①CFRPと鋼の材料特性の比較検討を実施するとともに、②付着特性について実験的に明らかにする。実際に付着に寄与しているのはCFRP層と対象物である鋼の間に存在するプライマー層であるが、CFRPに用いているマトリックスのエポキシ樹脂にも接着剤としての効果がある。そこで、CFRPに加えてエポキシ樹脂のみを鋼板で挟み込んだ積層梁の曲げ試験を行い、両者の付着強度についての検討を加えた。また、CFRPと鋼管の積層複合体に対する載荷実験を行い、複合体が発揮する合成効果について検討した。また、一方向性の炭素繊維シートを用いたCFRPの持つ異方性のために生じた、鋼管の局部変形が剥離性状に及ぼす影響も別途検討した。

*工博 京都大学大学院工学研究科 教授

**工博 京都大学大学院工学研究科 助教授

***工修 京都大学大学院工学研究科 修士課程

****コニシ株式会社大阪研究所

*****日石三菱株式会社中央技術研究所

2. 実験方法

2.1. CFRP および鋼の材料特性

今回試験に用いた炭素繊維シートは、日石三菱(株)製の TU クロス HT400 で、これにコニシ(株)製のエポキシ樹脂 E2500 を含浸させることで CFRP とした。炭素繊維シートは一方方向の繊維束をシートの長さ方向に目付量を 400g/m^2 として組んだものであり、シートの一方方向に異方性が見られる材料である。表 1～3 に CFRP, エポキシ樹脂と鋼(SS400)との材料物性の比較を行なった。

これから CFRP は鋼と比べて、おおよそ 10 倍の強度を有しているが、引張弾性率は同じオーダーを示していることが分かる。それに比して、破断ひずみを考えると鋼は塑性化したのち弾性係数が減少し、延性的な破壊を生じるが、CFRP は破断強度まではば一定の弾性係数を示し、脆性的な破壊を生じる。また、エポキシ樹脂は炭素繊維シート単体と比べると、限界ひずみが大きいためマトリックスの破壊より先に繊維の破断をもって CFRP の破壊とすることができると考えられる。以上のことから、鋼が等方性の材料で、今回用いた CFRP は異方性のものであることを除けば、両者の複合体は一体化した後、方向性の問題はあるが、付着が完全であるならば、複合構造としての能力を発揮でき得ると考えられる。

2.2. 積層梁の曲げ载荷試験

CFRP の付着性能を明らかにするために鋼板とエポキシ樹脂および CFRP の付着せん断強度試験を行った。これにより、接着剤の付着強度ならびに付着強度に及ぼす CFRP の接着層の影響を検討した。供試体として、図 1 に示すように厚さ 40mm の鋼板 2 枚でエポキシ樹脂もしくは CFRP を挟み込んだものを製作した。その際、CFRP と鋼板の接着力を向上させるため、鋼板の表面にプライマーを塗布した。供試体の製作方法は、①鋼板の表面にプライマーを塗布し、②エポキシ樹脂を 1g/cm^2 の量で炭素繊維シート 1 層に含浸させ CFRP として成形し、③もう一方の鋼板で挟み込んだ。また、エポキシ樹脂のみを挟み込むものについては、エポキシ樹脂の層厚が 1mm となるようにした。これらを 3 点曲げ载荷により断面中央部に働くせん断力から、完全合成を仮定し接着層にはたらく付着限界ひずみを測定した。ひずみの測定位置は载荷点直下とその点から 50mm 離れた 2 断面において、各 14 点、計 28 点である。使用した CFRP, エポキシ樹脂および鋼板の材料物性は表 1,2 および 3 に準ずる。

表 1 CFS および CFRP の材料特性

	CFS ^{※1}	CFRP
幅 (mm)	25.00	12.50
厚さ (mm)	1 層	0.22 ^{※2}
引張強度 (N/mm ²)	2570 ^{※3}	3960
引張係数 (N/mm ²)	2.62×10^5	2.62×10^5
破断ひずみ	0.0148	0.0166

※1 炭素繊維シートのみ

※2 樹脂を含浸させたときの 1 層分の厚み

※3 繊維の太さを直径 $10\mu\text{m}$ とし、一束 6 万本、6.25 束分の面積で換算した値

表 2 エポキシ樹脂の材料特性

引張強度 (N/mm ²)		53
圧縮強度 (N/mm ²)		100
せん断強度 (N/mm ²)		25
引張弾性率 (N/mm ²)		3290
限界ひずみ	引張時	0.018
	圧縮時	0.036
圧縮時ポアソン比		0.490

表 3 鋼板の材料特性 (SS400)

降伏時応力 (N/mm ²)	402
引張強度 (N/mm ²)	519
引張弾性係数 (N/mm ²)	1.91×10^5

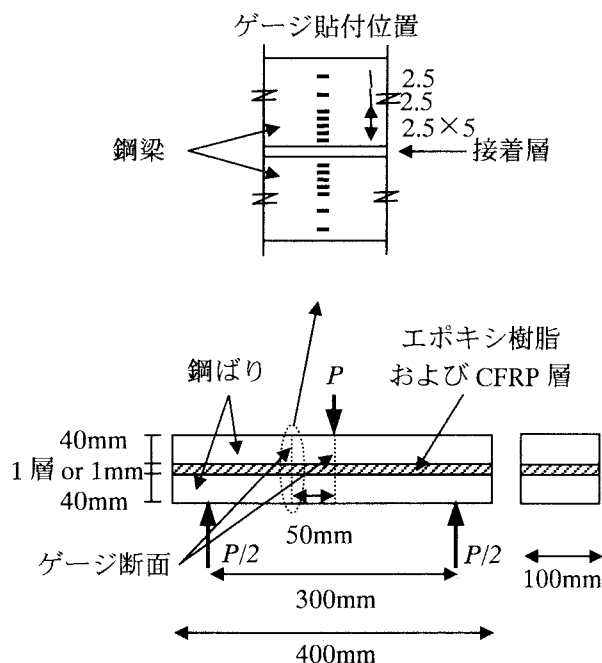


図 1 積層梁の曲げ試験の概要

2.3. CFRPと鋼管の複合体に対する曲げ試験

積層構造の曲げ性能を明らかにするため、図2に示すように全長1100mmの鋼管に対して、四点曲げ載荷試験を行った。支点区間長は1000mmで試験区間長400mmにおいて等曲げモーメントが得られるようにした。鋼管内部には、支持点、載荷点での集中荷重下における断面の偏平化を防ぐため、厚さ9mmのリングを接着し、外部からも拘束具を取り付けた。

JIS 2201 規格 STK400 の鋼管に炭素繊維シートを巻立て、エポキシ樹脂を含浸させ、一体化させる。以後硬化した炭素繊維シート・エポキシ樹脂をCFRPと呼ぶ。用いた鋼管の材料特性を表4に示す。また、使用した炭素繊維シートは日石三菱製のTUクロスHT400（繊維目付400g/m²）を用い、これにコニシ（株）製のボンドE2500（エポキシ樹脂）を0.2g/cm²の量で含浸させた。巻立て方法としては①鋼管の表面に付着性能を向上させるためのプライマーを塗布し、②エポキシ樹脂を塗布した上で炭素繊維シートを巻立て、③再度エポキシ樹脂を塗布してシートに含浸させる。

表4 鋼管の材料特性（STK400）

降伏応力 (N/mm ²)	331
引張強度 (N/mm ²)	390
引張弾性率 (N/mm ²)	2.12×10^5

表5 供試体の条件

	ND-1	ND-4	ND-1-330
積層数	1層	4層	1層
定着長	1000mm	1000mm	330.4mm
貼り付け方法	巻き付け	巻き付け	等間隔に貼る

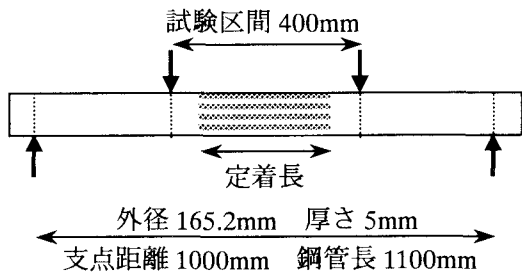


図2 曲げ試験の概要

3. 結果および考察

3.1. 積層梁の曲げ載荷試験結果

実験時の荷重と中央部の変位関係を図3に、断面内のひずみ分布図を図4、5および6に示す。エポキシ樹脂のみを挟んだ場合、載荷初期において図3に示すように、荷重と中央部の変位の関係は非線形性を示し、たわみが大きくなると二つの鋼梁は重ね梁としての剛性に近づく。一方CFRPを挟んだ場合、初期においては二つの鋼梁は完全合成と仮定できる程度に剛性が高く、線形的な挙動を示すが、剥離後はエポキシ樹脂のみの場合と同様に重ね梁としての剛性に変化する。

載荷初期においては、軸ひずみ分布は図4のようにほぼ平面保持の仮定に従う線形分布をしており、二つの鋼梁が一体で挙動しているのが分かる。エポキシ樹脂を挟んだ場合は、断面中央部においてせんだんずれ変形が生じていることがわかる。一方図5および6に示すように、荷重が大きくなるにつれ、接着部を境にひずみの不連続性が顕著に現れる。二つの鋼梁の断面におけるひずみ分布は、剥離後に別々に平面保持の仮定に従う線形分布となる。また、接着が完全として完全合成の仮定をし、最大荷重時におけるせん断力から、付着せん断強度を求める式(1)により算定し、表6に示す。なお、この式は矩形断面の断面中央部に働くせん断応力を求める式である。

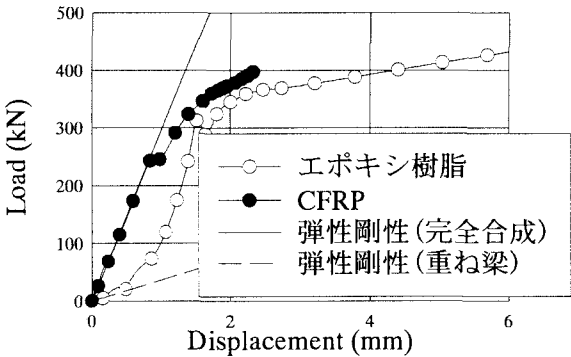


図3 荷重と中央部の変位の関係

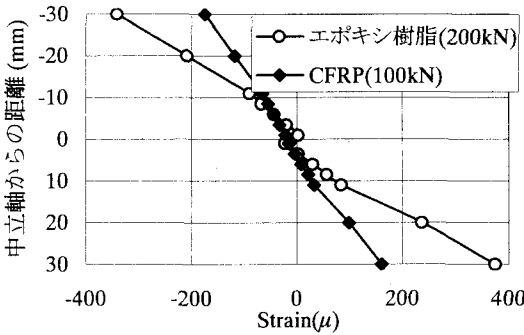


図4 載荷初期におけるひずみ分布

$$\tau_{\max} = \frac{3Q}{2A} \quad (1)$$

$\tau_{\max}$: 層間の付着強度
 Q : 断面に働くせん断力 (最大荷重/2)
 A : 断面積 ($100 \times 80 = 8000 \text{ mm}^2$)

表6 鋼板とエポキシ樹脂および
CFRPの付着せん断強度

	樹脂のみ	CFRP
最大点荷重 (kN)	341.48	243.00
付着せん断強度 (N/mm^2)	32.0	22.8
最大点ひずみ (%)	0.004	0.001

この実験結果から、付着せん断強度は、ほぼエポキシ樹脂の物性値を満足している。ここで、エポキシ樹脂のみの場合が、CFRPの場合に比べて強度が高いのは、炭素繊維シートの存在により層間に生じるせん断力分布が変化するためと考えられる。それは最大点ひずみにおいて、CFRPのものが小さい値を示したことから分かる。また図7に示すように、エポキシ樹脂のみの場合を挟んだ場合は、接着層でひずみの不連続が生じているが、これは樹脂部分で弾性係数が急変し、せん断変形が集中するためである。

3.2. CFRPと鋼管の複合体に対する曲げ試験結果

CFRPを巻付けた鋼管の曲げ挙動と付着強度の関係を図8～10に示す。曲率は円筒状のCFRPの外面に貼り付けたひずみゲージにより計測した軸ひずみによって算定し、部材中央断面から左右に20mm離れた断面での曲率で評価した。曲線の比較から荷重初期における断面の曲げ剛性および最大曲げ耐力が向上していることがわかる。これから、CFRPと鋼管の複合化により、その合成効果を確認することができた。また、1層のみの補強を行った場合 (ND-1) に比べて4層巻立てること (ND-4) で初期剛性が向上していることから、積層数を増やすことでCFRPと鋼管の曲げ剛性を向上させることが可能であるとわかる。ただし、4層巻立ての供試体は、実験中に荷重点において断面が扁平化し局部座屈を生じてしまい、合成断面の最大曲げ耐力を求めることができなかった。しかし1層巻立ての試験結果から明らかなように、最大曲げ耐力の向上が期待できると予想される。

剥離が生じている過程を検討するために、図9にND-1の断面のひずみ分布の変化を示す。剥離

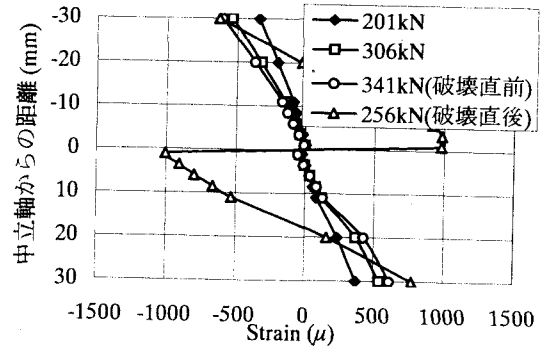


図5 鋼ばりの曲げひずみ分布図
(エポキシ樹脂を挟んだもの)

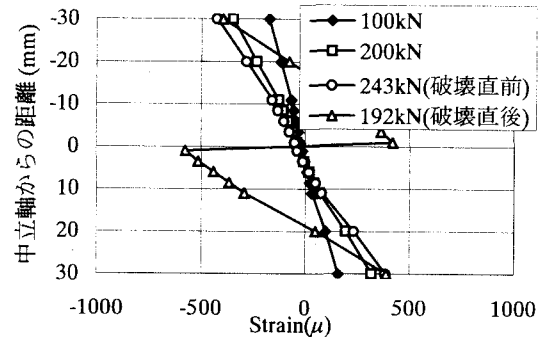


図6 鋼ばりの曲げひずみ分布図
(炭素繊維シートを挟んだもの)

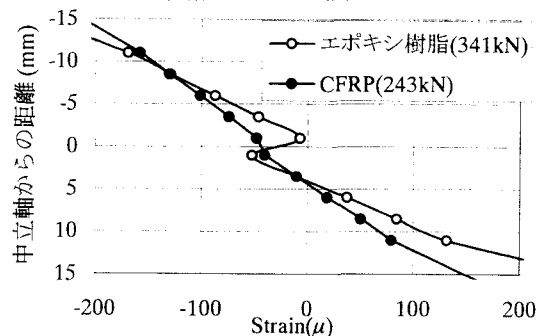


図7 接着層付近ひずみ分布図 (剥離直前)

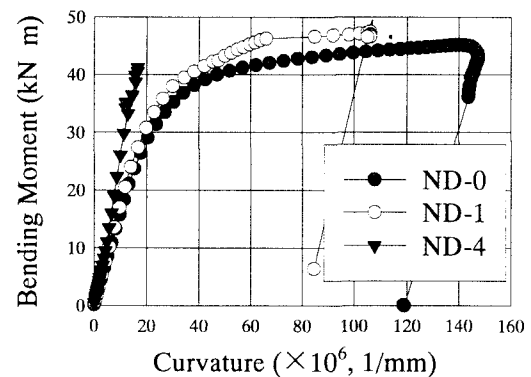


図8 CFRPと鋼管の複合体に対する曲げ試験
曲げモーメント-曲率関係

が生じていなければ、断面保持の仮定が成り立つので、先の積層梁の曲げ荷重試験の結果と同様に、ひずみ分布が線形であると考えられる。しかし、断面に作用する曲げモーメントが $19\text{kN}\cdot\text{m}$ を越えた時点で、中立軸が下方に移動し、しかもひずみ分布が縁端部で線形性を失っていることが分かる。

その際、ND-1 の鋼管内面と CFRP 外層のひずみ差をとり、曲げモーメントの推移と比較した結果を図 10 および 11 に示す。これにより、層間に生じるひずみが先の付着せん断強度試験の結果と比べて、大きな値を示すとき、剥離が生じているといえる。また鋼管が降伏した後、その変形に CFRP が追従できずに引張側の方から剥離が生じている事が分かった。

そこで、CFRP と鋼管の変形性能の違いを明らかにするために、CFRP を周方向に 8 等分して貼り付けた供試体(ND-1-330)を用意し、同様の曲げ試験を行った。図 12 および 13 に周方向のひずみ分布と曲げモーメントの関係を示す。これから、管が降伏する前後で周方向のひずみが大きくなり、CFRP はその変形に追従できずに、引張側の最下縁から剥離が生じる事が分かる。一方圧縮縁においては、CFRP の弾性率が小さいため、同じ荷重レベルに対しても剥離は生じないと考えられる。

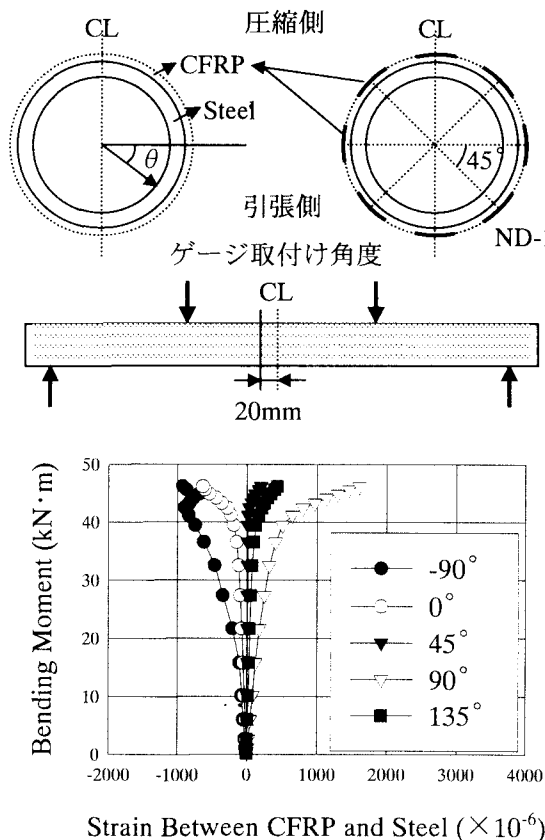


図 11 層間ひずみ(中央付近 ND-1)

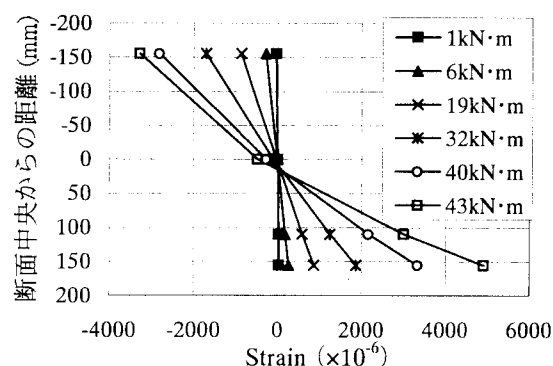


図 9 断面内のひずみ分布の変化 (ND-1)

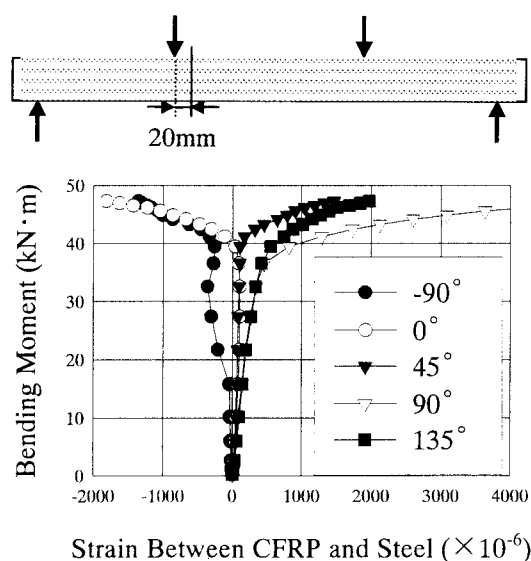


図 10 層間ひずみ(荷点付近 ND-1)

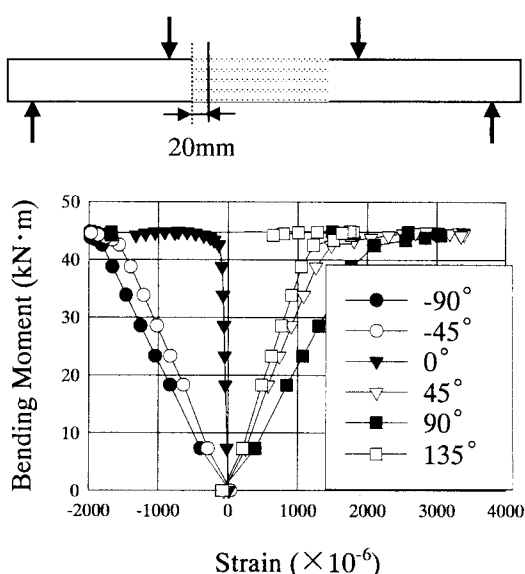


図 12 軸方向ひずみ(端部付近 ND-1-330)

4. 結論

積層梁および CFRP と鋼管の複合体に対する曲げ載荷試験から、以下のことが結論として挙げられる。

- ・ エポキシ樹脂の付着接着強度と、鋼と CFRP の付着強度は、層厚、繊維の有無に左右されこうと CFRP の付着強度は若干低い。
- ・ CFRP のマトリクスであるエポキシ樹脂は単体ではその変形性能が十分に発揮されるが、炭素繊維シートに含浸させることで繊維に拘束され、CFRP の変形性能はエポキシ樹脂単体のそれに比べると小さいものとなる。
- ・ CFRP は異方性を有するため、鋼管の直交 2 方向の曲面的な変形に十分追従できず、平面的な接着時の場合に比較して、早期に付着剥離が生じることが分かった。

また、CFRP を実際鋼管に巻き付けることにより、その複合体に期待される合成効果として、以下のことがわかった。

- ・ 炭素繊維シートを多層巻くことにより初期剛性が向上するということが確認できた。また、最大耐力の改善にも効果がある。
- ・ 剥離性状は積層数にほとんど関係なく、脆性的な破壊形態の改善にも効果がなかった。すなわち、炭素繊維シートによる合成効果は見られるものの、炭素繊維シートが破断する前に剥離が生じて破壊に至っていた。

以上より今後の課題として下記の項目が挙げられる。

- ・ 炭素繊維シートおよびその接着層は鋼管の局部変形に追従できず、剥離を防ぐ対策を講じなければならない。
- ・ 炭素繊維シートが破断する破壊形態を期待するには、付着性状の改善が重要である。
- ・ 様々な形状の構造物との複合化に際しての指針としては、付着せん断応力の分布特性を詳細に評価し、付着強度および定着長に対してさらに検討が必要である。
- ・ 変形性能の高い接着剤等により、局所的な付着せん断応力の集中を低減し、十分な荷重伝達機構が確立できれば、プレファブ式の鋼管継手として部材一般部以上の強度が期待できる継手開発が可能となる。

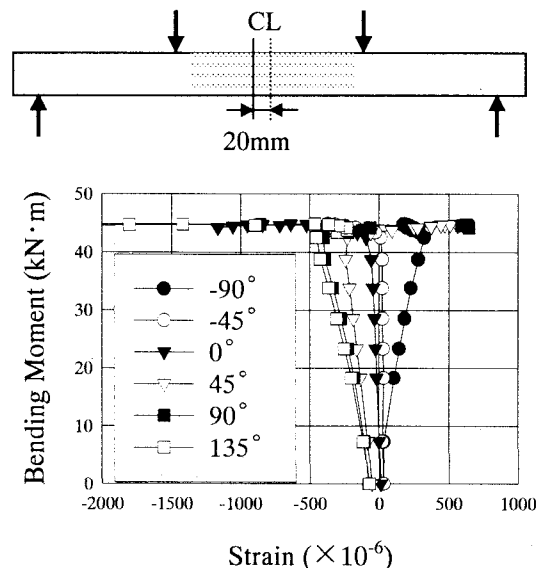


図 13 軸方向ひずみ(中央付近 ND-1-330)

本研究は、平成 10-12 年度・科学研究費補助金（基盤研究(B)No.10555155)の一部を使用して行った。

【参考文献】

- [1] 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一: 付着剥離構成モデルに基づく連続繊維シート補強 RC 部材のせん断耐力評価, 連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.7-14, 1998.5.
- [2] A.BASSETTI, P.LIECHTI, A.NUSSBAUMER: *Fatigue Resistance and Repairs of Riveted Bridge Members*, Institute of Steel Construction (ICOM), ESIS Publication 23, Elsevier, pp.201-218, 1999.
- [3] N.AMMAR, *Rehabilitation of Steel Bridge Girders with Graphite Pultrusion*, CCM Report 96-26, University of Delaware, Center for Composite Materials, Newark, Delaware, 1996.
- [4] 建設省土木研究所: 繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同報告書 (I)―一次構造物材料としての FRP の適用事例調査―, 1998.10.
- [5] 酒井芳文: 炭素繊維シートを用いて曲げ補強を行った RC 床版の力学的特性, コンクリート学会年次論文報告集, pp.1445-1451, 1996.
- [6] 鈴木博之, 井東恵美, 袴田文雄: 切欠きを有する材の炭素繊維強化樹脂版による補強, 鋼構成年次論文集第 7 巻, pp.325-330, 1999.11.