

V-24

炭素繊維シートを曲げ補強材として用いたRCはりの曲げ性状について

北海学園大学 ○正 員 高橋義裕

北海道大学 正 員 佐藤靖彦

1. はじめに

既存構造物の補強を行う上で重要なことは、曲げ及びせん断に対して十分な補強効果を有しているとともに、その施工性に優れていることであり、連続繊維シートはこの様な要求を十分に満たす新しい補強材料である。現在、連続繊維シート、特に炭素繊維（以下「CFRP」）シートは、高い引張強度を持ち軽量で耐食性に優れ、施工性に優れたシート状であるため、既存構造物の補強材に用いた事例が増えつつある。しかしながら、合理的な補強設計方法が確立されていない現時点では、適切な補強が行われているとは言えないものも多い。著者らは以前主鉄筋に異形棒鋼を使用し、下面にCFRPシートを貼り付けた矩形はりの曲げ実験を行ったが、異形棒鋼の場合降伏現象を伴うためその挙動は複雑なものとなる。そこで本研究は、今後、設計方法を構築する上で必要とされる基礎的な情報を得ることを目的とし、はりの主鉄筋に降伏現象のないアラミド（以下「AFRP」）ロッドを配置し、CFRPシートを曲げ補強材として下面に貼り付けたコンクリートはりの曲げ性状及びCFRPシートの性状について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

実験供試体は合計6体である。図-1に実験供試体の形状・寸法・鉄筋配置等について示す¹⁾。せん断補強鉄筋として、D10 (SD295) を5cm²毎で配置した。供試体F0は、CFRPシートを全く貼り付けていないはりである。供試体F1は下面にCFRPシートを1層、供試体F2は下面にCFRPシートを3層、供試体F3は下面にCFRPシートを3層貼付しさらに右スパン35cm、45cm、55cmの位置に幅5cmでゼブラ状にCFRPシート1層でU字に高さ10cmまで巻き上げ（以下「U字巻き上げ」）補強したはりである。供試体F4は、供試体F3のU字巻き上げをはり中央から5, 15, 25, 35, 45, 55cmの6箇所に施したものであり、供試体F5は供試体F4同様に6箇所のU字巻き上げで、巻き上げ高さを20cm（けた高さ）まで上げた。ここで供試体F1～F5の5体とも左スパンは、はり高さまで全面CFRPシート1層で巻き上げ補強した（図-2は供試体F4の例）。ここで試験区間を右スパンに限定するため供試体F1～F5の左スパンに下面CFRPシート貼付後新たにはり高さ（20cm）まで全面に1層のCFRPシートでくるむように巻き上げ補強した。各実験供試体に用いた材料の力学特性値を表-1に示す。また、実験供試体の諸元及び破壊荷重を表-2に示す。

本実験では、はりに二点対称集中荷重を作用させ、約5kNづつ単調に増加させ破壊に至らしめた。なお、AFRPロッドのひずみをスパン中央と中央より両サイド10cm、30cm、50cmの位置で測定した。また、供試体F1～F5の下面CFRPシートにはスパン中央から右側支点まで2cmピッチでひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。さらに、供試体F3～F5では、U字巻き上げ部CFRPシートに下面より1.5cm位置にひずみゲージを貼付し、ひずみ測定を行った。

コンクリートは、水セメント比45%、細骨材率38%、早強ポルトセメント、海砂及び川砂利を使用した。

以上の事により各実験供試体の破壊性状、AFRPロッドのひずみ及びCFRPシートのひずみ、供試体スパン中央と載荷点直下におけるはりの変位を測定した。また、比較検討の為、断面分割法による解析も試みた。

Flexural Behavior of RC Beams with Carbon Fiber Sheet as Flexural Reinforcement

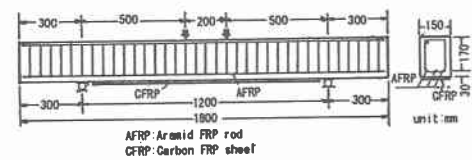
By Yoshihiro TAKAHASHI and Yasuhiko SATO

3. 実験結果

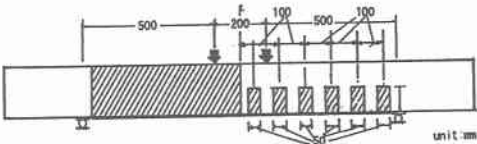
3. 1 破壊荷重及び破壊性状

一般に下面にCFRPシートで曲げ補強したはり曲げモーメントとせん断力を受けた場合、CFRPシートとコンクリートとの界面には、部材軸方向のずれに対するせん断応力（付着応力）が発生する。この付着応力がある値に達すると、まず局部的な付着切れが発生し、その後全面が付着破壊すると考えられる。従って、CFRPシートの積層数の増加によりある程度の耐力増加は期待出来るものと思われたが、表－2に示したように、本実験の範囲において下面にCFRPシートを張り付けない（供試体F0）場合と下面にただCFRPシートを張り付けた供試体F1とF2場合とでは耐力の差は、ほとんど見られずCFRPシート貼付による補強効果は明確に認められなかった。また、下面にCFRPシートを一層張った（供試体F1）場合と三層張った（供試体F2）場合との耐力差異もほとんど見られなかった。何故この様なことになったのか今後さらに詳しく検討してみる必要がある。一方、供試体F3の様に部分的にでもU字巻き上げを行うと、確かに下面に貼付したCFRPシートの剥離が拘束され耐力増加が認めれた。

破壊性状について、供試体F0は曲げ圧縮破壊、供試体F1はCFRPシートの局部的な剥離の後ほぼ載荷点直下でCFRPシートが破断した。この破断はひびわれを跨ぐ所で発生しており、コンクリートの角で切断されていた。供試体F2は下面のCFRPシートが剥離、供試体F3は下面CFRPシートが剥離した後、CFRPシート巻き上げ部のうち、中央より35cm及び45cm位置のCFRPシートが剥離し、次に55cm位置のCFRPシートが巻き上げコーナ部で水平に破断し終局耐力に達した。供試体F4は供試体F3同様巻き上げ部CFRPシートの剥離破壊、供試体F5は一部巻き上げ部CFRPシートの剥離後の巻き上げCFRPシートの破断破壊であった。



図－1 実験供試体



図－2 CFRP巻き上げ補強状況
(F4供試体の例)

表－1 使用材料の力学特性値

Type		Cross sectional area (mm ²)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
AFRP	K96S	73.0	66	-	1280
Steel	D10	71.3	200	377	390
CFRP		1.65 *	230	-	3480

*Cross sectional area in width of 10mm

表－2 実験結果一覧

Specimen No.	Compressive strength (MPa)	Tension bar	CFSh A _{CFs} (mm ²)	Ultimate load (kN)
F0	39.15	K96S×3	0	141.3
F1	38.70	K96S×3	198	142.3
F2	38.33	K96S×3	594	138.5
F3	37.90	K96S×3	594	156.8
F4	44.20	K96S×3	594	160.0
F5	44.20	K96S×3	594	178.0

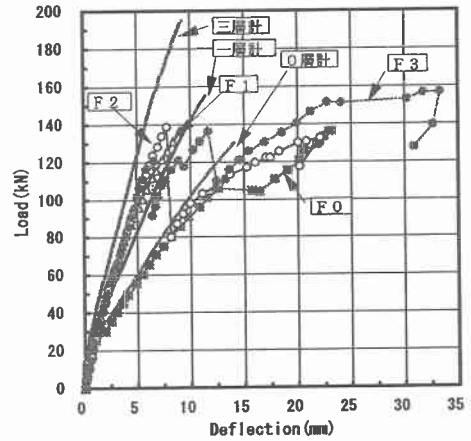
3. 2 変形状及びAFRPロッドのひずみ分布

図-3 (a) と (b) は各供試体の荷重と載荷点直下のたわみの関係を示したものである。ここで図-3 (a) は供試体F0～F3を、(b) 図は供試体F2～F5のたわみ関係を示している。また、同図には、CFRPシート無し、1層貼り、3層貼りの計算値も一緒に示されている。同図より、CFRPシートを貼付していない供試体F0とその他の供試体とを比較すると、下面にCFRPシートを貼付した供試体のたわみ曲線の傾きがCFShを貼付していない供試体のたわみ曲線に比べ曲線の勾配が急になっている。このことは、このはりの曲げ剛性増加のあることを示している。しかし、一層貼り（供試体F1）と三層貼り（供試体F2）とでの剛性の差異は殆ど見られず、さらに最大荷重付近でのたわみ量もほとんど等しい。また、下面にCFRPシートを貼付した供試体のたわみ曲線の推移から、下面貼付CFRPシート剥離後はCFRPシートなし供試体（F0）のたわみ曲線挙動にシフトしていくことが分かる。従って、CFRPシート剥離後はAFRPロッドが荷重を受け持っていることがわかる。また、U字巻き上げを行うことによりたわみ量は巻き上げを行わない場合に比べ約1.5倍となっておりかなりの終局変位の増加が確認できる。

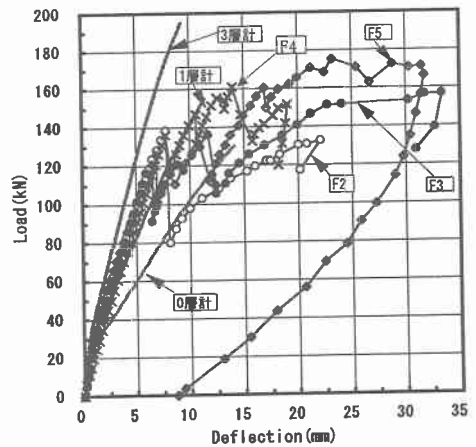
図-4 (a) と (b) は載荷点直下のAFRPロッドのひずみと荷重との関係を示したものである。ただし図-4 (a) は供試体F0～F3を、(b) は供試体F2～F5に関して示している。同図より供試体F0とその他の供試体のひずみ分布を比較すると、AFRPロッドのひずみはCFRPシートを貼付した供試体の方がCFRPシート剥離前までは小さいが、剥離後はCFRPシートなし供試体の挙動にシフトしているの分かる。このことは、確かにCFRPシート剥離前まではCFRPシートが荷重を分担していることが分かる。

3. 3 CFRPシートのひずみ性状

図-5 は供試体F2～F5の-span中央から右支点に向かって4cm位置に貼付したCFRPシートのひずみと荷重との関係を示したものである。また、同図には三層貼りの計算値も示されている。どの供試体供、下面貼付のCFRPシートが剥離するまではほぼ同様の挙動を示し、計算値にかなり近い挙動を示している。しかし、ひずみがだいたい $5000 \sim 6000 \mu \varepsilon$ 付近



(a) 供試体F0～F3



(b) 供試体F2～F5

図-3 荷重-変位関係（載荷点）

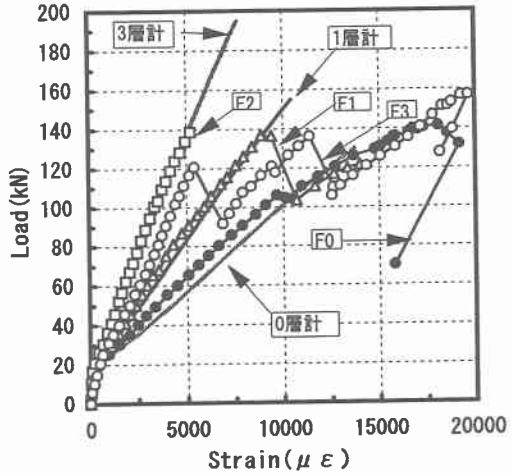
で荷重が一時的に低下しておりこの付近で剥離が発生したと思われる。その後の挙動は、供試体F2は一挙に荷重が80kN付近まで低下し、荷重がAFRPロッドにシフトし終局荷重に達している。しかし、U字巻き上げ補強をした供試体の場合は、このU字巻き上げ補強により下面CFRPシートを拘束し荷重の減少はある程度押さえられており、さらにCFRPシートのひずみも $2500\mu\epsilon$ の付近で一定値を保ち荷重増加が見られる。これは、CFRPシートのU字巻き上げ補強による補強効果によるものと思われる。その後荷重は増加するが、U字巻き上げCFRPシートの剥離が発生することによりほとんどの荷重はAFRPロッドにシフトしていったものと思われる。U字巻き上げの定着長の違いによる終局荷重の違いは見られるが、全体的挙動は似ている。この事は図-4からも貼付した下面CFRPシートが剥離した後はCFRPシートを全く貼付していない供試体F0のAFRPロッドにおけるひずみ量と概ね一致している事からも分かる。

図-6は、供試体F3、F4、F5のU字巻き上げCFRPシートの45cm位置に貼付したひずみゲージのY方向ひずみ（CFRPシートの繊維方向）と荷重との関係を示したものである。同図からも、荷重100kN付近から徐々にひずみが増加し、供試体F3において下面CFRPシートが剥離する120kN付近から、F4では135kN付近から急激にそれぞれ90kN及び120kN付近まで荷重は減少するがその後U字巻き付けCFRPシートの剥離が生ずる荷重まで荷重・ひずみ共増加しU字巻き付けCFRPシートの剥離により一挙にひずみはゼロになっている。しかし、供試体F5の場合、十分にU字巻き付けCFRPシートの定着長が確保されているため最大荷重通過後は徐々にひずみは減少している。このことより、巻き付けシートの定着長を十分に確保することにより終局耐力の増加とある程度の靱性が確保できるものと思われる。

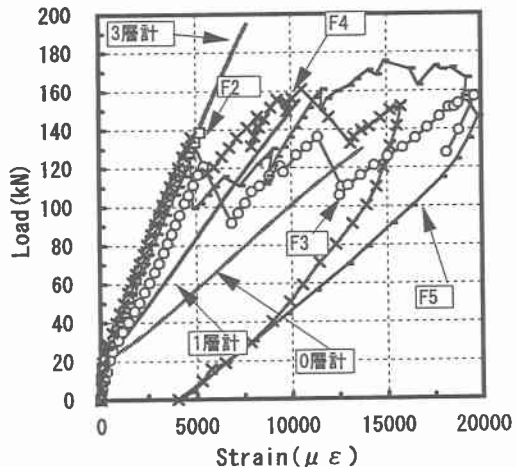
4. 変形、耐力及びひずみの評価

4. 1 解析の概要²⁾

ここで、本実験供試体の変形及び耐力を断面分割法により評価することを試みる。本解析では、コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係としてはコンクリート標準示方書³⁾によるものを用いた。コンクリー



(a) 供試体F0～F3



(b) 供試体F2～F5

図-4 アラミドロッド荷重-ひずみ関係
(AFRPロッド載荷点直下)

トの引張応力-ひずみ関係は、テンションスティフニングモデル⁴⁾を用いる。解析における鉄筋比（AFRPロッドの比）は、断面積とかぶりの2倍を掛け合わせた面積で除したものをを用いた。また、はりの変形は、部材断面を0.5cmピッチで40分割、部材軸方向には2cmピッチで60分割し各応力により内力モーメントを求め、外力モーメントとの釣り合いにより曲率と中立軸位置を求めた。たわみは曲率を供試体軸方向に数値積分する事により求めた。ただし、供試体の非対称性は考慮していない。

4. 2 変形及び耐力の検討

先に示した図-3における実線は、本解析より求めた荷重と変位との関係を示す。本解析では、はり上縁のコンクリートが圧縮ひずみに達した時点で計算を終了させている。しかし、剥離の条件は考慮されていない。本解析は、CFRPシートにより補強した場合も補強しない場合も実際の変形性状を概ね追跡している。又、供試体F0の解析における最大荷重は135kNであり実験値（141.3kN）を概ね予測していると思われる。

4. 3 主筋AFRPロッド及び下面CFRPシートのひずみ性状

図-4に示されているAFRPロッドの荷重-ひずみ関係より曲げによるひびわれ発生荷重は、概ね計算値と実測値が一致していることが分かる。また、下面CFRPシート剥離前までは、計算値と作用荷重は概ね一致し、剥離後は下面CFRPシートなしの計算値にシフトしていくことが示されている。ここで下面CFRPシートなし供試体のAFRPロッドのひずみの計算値は、概ね実験値を追跡していることより、CFRPシート剥離後はCFRPシートに作用していた引張力がAFRPロッドにシフトしていくことを示しているものと考えられる。

図-5に示される供試体下面に貼付されるCFRPシ

ートの荷重-ひずみ関係より剥離前の計算値のひずみ分布は概ね実験値を追跡できているが剥離後は実験値をうまく追跡出来ていない。従って今後は、剥離条件を考慮した計算手法の開発を行う必要がある。

5. まとめ

本研究は、引張主鉄筋に降伏点のないAFRPロッドを用い、下面にCFRPシートを貼付したはり供試体及びCFRPシート貼付後さらにCFRPシート1層でゼブラ状にU字巻き上げを施したはり供試体を用いてはりの耐力及び変形、AFRPロッド及びCFRPシートのひずみ分布について実験的に検討したものである。今後

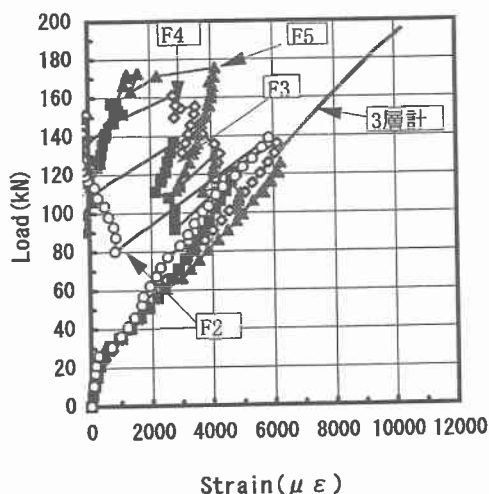


図-5 荷重-ひずみ関係
(CFRPシート4cm位置)

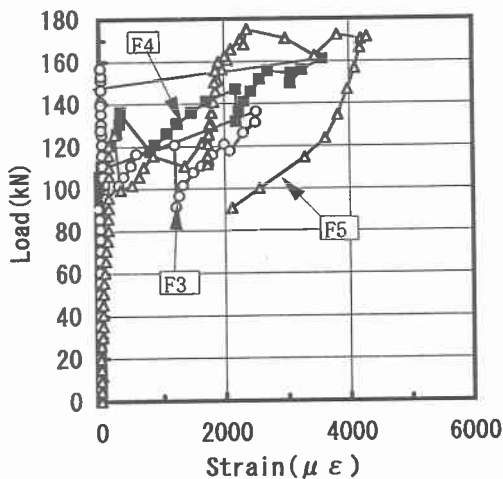


図-6 荷重-ひずみ関係
(U字巻き上げ部・中央より45位置)

さらに検討すべき点もあるが本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) 下面CFRPシートの貼付積層数の増加は終局耐力の増加に殆ど寄与していなかった。これは主引張鉄筋として降伏現象の無いAFRPロッドを用いた為なのか今後検討してみる必要がある。

(2) U字巻き上げを施すことにより最大荷重付近でのたわみ量はU字巻き上げのない場合に比べて1.5倍となっており、かなりの終局変位の増加が認められた。また、終局耐力も約10%増加し補強効果が認められた。

(3) U字巻き上げを有する供試体の破壊進行のプロセスとしては、まず下面CFRPシートの剥離が発生するがそれをU字巻き上げがある荷重段階まで制御し、その後制御しきれずU字巻き上げ部の剥離破壊により最終破壊に至っていく。

謝 辞

本研究の遂行においてCFRPシート及び接着剤の提供を頂いた東燃（株）及びAFRPロッドの提供を頂いた三井建設（株）の関係各位に深く感謝の意を表します。また、実験を進めるに当たっては、北海学園大学工学部土木工学科の学生諸氏の協力を得た。さらに、本研究の一部は、「平成10年度私立大学学術フロンティア推進事業」の補助金を受けた。ここに付記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋義裕ほか：炭素繊維シートで曲げ補強したはりの曲げ性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 20，No. 1，pp. 509-514，1998
- 2) 高橋義裕ほか：炭素繊維シートにより補強した鉄筋コンクリートはりの耐力及び変形，コンクリート工学年次論文集，Vol. 19，No. 2，pp. 1611-1616，1997
- 3) コンクリート標準示方書・設計編（平成8年制定），土木学会
- 4) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991