

論文 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

高橋義裕^{*1}・秦 地大^{*2}・前田敏也^{*3}・佐藤靖彦^{*4}

要旨: 矩形断面はりの引張主鉄筋に降伏現象のないアラミドロッドを用い、はり下面に炭素繊維シートを貼付し、二点対称集中荷重を作用させ、ロッド及びシートのひずみ性状、はりの曲げ性状、及び破壊性状について実験的に検討した。その結果、曲げ補強のため供試体下面に貼付した炭素繊維シートの積層数の違い（一層と三層）による終局耐力の差はほとんど見られなかった。しかし、曲げ補強シート貼付後さらにシートでU字巻き上げ補強することにより下面シートの剥離進行が制御され、終局耐力及び終局変位が増加した。また、下面のシートが剥離する前までのはりの変形は、断面分割法により概ね予測することができた。

キーワード: 曲げ補強、炭素繊維シート、U字巻き上げ、曲げ耐力、曲げ変形

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、特に炭素繊維シート（以下「CFSH」）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。このような現状を踏まえ現在合理的な補強設計方法の確立に向けての積極的な検討がなされている。しかし、なお検討すべき点が数多く残されているのが現状である。著者らは以前主鉄筋に異形棒鋼を使用し、下面にCFSHを貼り付けた矩形はりの曲げ実験を行った¹⁾が、異形棒鋼の場合降伏現象を伴うためCFSHのひずみ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、はりの引張主鉄筋に降伏現象のないアラミドロッド（以下「AFRPr」）を配置

し、CFSH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CFSHの性状について実験的に検討した。

2. 実験概要

実験供試体は合計4体である。実験供試体の形状・寸法・鉄筋配置等については図-1に示す通りである。せん断補強鉄筋として、D10 (SD 295) を5cmピッチで配置した。供試体F0は、CFSHを全く貼り付けていないはりである。供試体F1は下面にCFSHを1層、F2は下面にCFSHを3層、F3は下面にCFSHを3層をそれぞれ支点区間に渡り貼付（ただし、支点部手前3cmで貼り止めコンクリート表面を直接支持している）しさるに右スパンでは、はり中央から35cm, 45cm, 55cmの位置に幅5cmのゼブラ状のCFSHをU字に高さ10cmまで巻き上げ（以下「U字巻き上げ」）補強した。ここで試験区間を右スパンに限定するため供試体F1～F3の左スパンに下面CFSH貼付後新たにはり高さまで全面CFSHでくるむように巻き上げ補強した（図-2参照）。各実験供試体に用いた

*1北海学園大学教授

工学部土木工学科

工博（正会員）

*2北海道開発局

土木部技術第一部

工修（正会員）

*3清水建設（株）

土木部技術第一部

工修（正会員）

*4北海道大学大学院助手

工学研究科社会基盤工学専攻

工博（正会員）

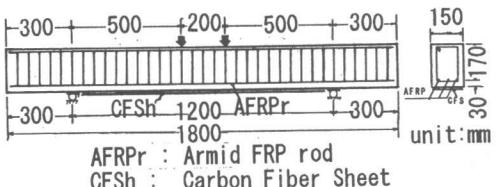


図-1 実験供試体

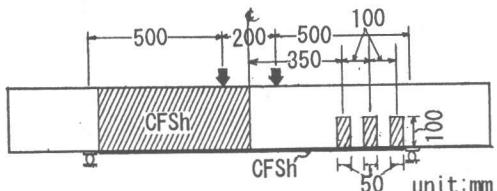


図-2 CFSH巻き上げ補強状況

表-1 使用材料の力学特性

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

*Cross sectional area in width of 10mm

表-2 実験供試体の断面諸元及び破壊荷重

Specimen No.	Compressive strength (MPa)	Tension bar	CFSH A _{csb} (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

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、荷重を約5kNずつ単調に増加させ破壊に至らしめた。なお、AFRPrのひずみをスパン中央より両サイド10cm, 30cm, 50cmの位置で測定した。また、供試体F1, F2の下面CFSHにはスパン中央から右側支点まで2cmピッチで、F3においてはスパン中央から両支点に向かい4cmピッチでそれぞれ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では、U字巻き上げ部CFSHに三軸ひずみゲージを貼付し、ひずみ測定も行った。ゲージの貼付位置は、下面より3.0cmとした（図-2 参照）。

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、AFRPrのひずみ及びCFSH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。

3. 実験結果

3.1 破壊荷重及び破壊性状

一般に下面にCFSHで曲げ補強したRCはりが曲げモーメントとせん断力を受けた場合、CFSH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、CFSHの積層数の増加によりある程度の耐力増加は期待でき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CFSHを張り付けない（供試体F0）場合と下面にただCFSHを張り付けた（F1とF2）場合とでは耐力の差違は、ほとんど見られずCFSHによる補強効果は明確に認められなかつた。さらに、下面にCFSH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つた。なぜ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、下面におけるCFSHの剥離が拘束され耐力増加が約10%認められた。

破壊性状について、供試体F0は曲げ圧縮破壊、供試体F1はCFSHの局部的な剥離の後ほぼ載荷点直下でCFSH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CFSHが剥離し終局耐力に達した。また供試体F3は下面CFSHが剥離した後、CFSH巻き上げ部のうち、中央より35cm及び45cm位置のCFSHが剥離し次に55cm位置

のCFSHが巻き上げコーナ部で水平に破断し終局耐力に達した。

3.2 変形性状及びAFRPrのひずみ分布

図-3は全供試体の荷重と載荷点直下のたわみとの関係を示したものである。また、同図中には比較のためCFSH補強のない場合、一層貼り、三層貼りの断面分割法(4.1で後述)による計算値も示されている。同図より、CFSH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CFSH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てその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が増加したことを見ている。しかし、一層貼り(供試体F1)と三層貼り(供試体F2)との剛性の差異は殆ど見られない。また、下面にCFSHを貼付した供

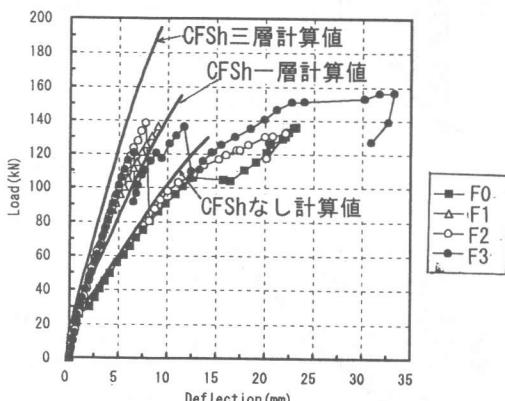


図-3 荷重-変位関係(載荷点直下)

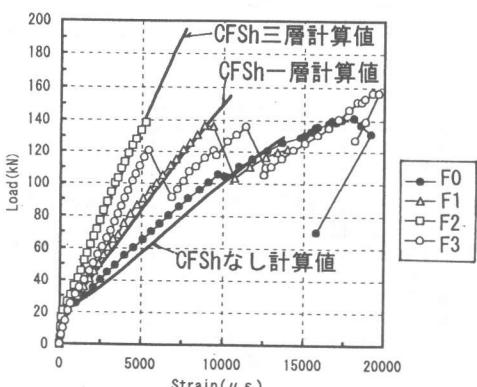
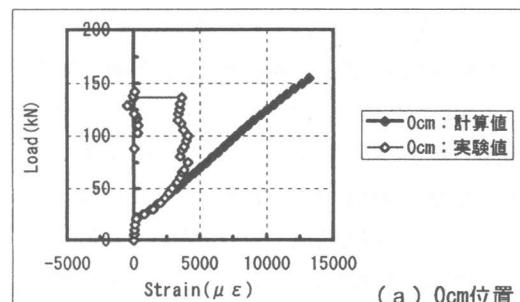


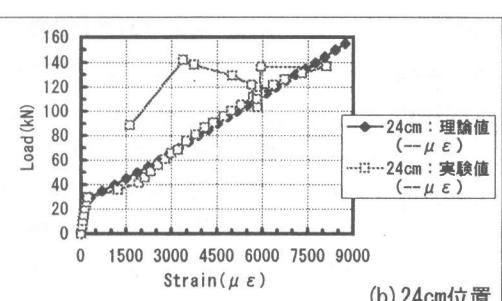
図-4 荷重-ひずみ関係
(アラミドロッド・載荷点直下)

試体のたわみ曲線の推移から、下面貼付CFSH剥離後はCFSH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、CFSH剥離後はAFRPr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は載荷点直下のAFRPrのひずみと荷重との関係を示したものである。また、同図中には図-3同様にCFSHなし、一層貼り、三層貼りの計算値も示されている。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、AFRPrのひずみはCFSHを貼付した供試体の方がCFSH剥離後はAFRPrが荷重を受け持っていることがわかる。



(a) 0cm位置



(b) 24cm位置

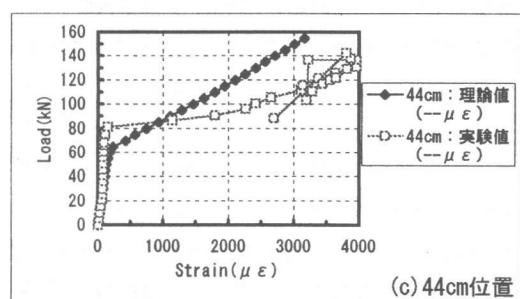


図-5 下面CFSHのひずみ分布(供試体F1)

離前までは小さいが、剥離後はCFSHなし供試体のひずみ挙動にシフトしていることが分かる。このことは、確かにCFSH剥離前まではCFSHが荷重を分担していることを示している。

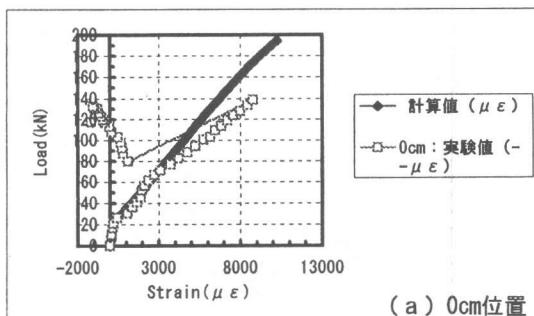
3.3 CFSHのひずみ性状

図-5(a), (b), (c)はそれぞれ、供試体F1の0cm, 24cm, 44cm位置におけるCFSHのひずみと荷重との関係を示したものである。また、同図中にはCFSH一層貼りの計算値も示されている。同図より、等曲げ区間(0cm位置)のひずみ分布より60kN付近よりひずみが一定値(約4000 $\mu\epsilon$)を保っている。このことは、この付近でCFSHの剥離が発生していることを示している。一方、曲げせん断区間(24cm位置及び44cm位置)では、まだ剥離が発生しておらずひずみは荷重の増加に伴い増加している。そして140kN付近で曲げせん断区間での剥離が一挙に発生し、等曲げ区間でのCFSHのひずみはほとんどゼロになっており、24cm位置でも8000 $\mu\epsilon$ から一度6000 $\mu\epsilon$ まで低下し荷重の増加とともに1500 $\mu\epsilon$ まで下がっている。一方、44cm位置でのひずみ分布挙動から、この付近のCFSHは終局荷重近くまで付着が確保されていた可能性がある。

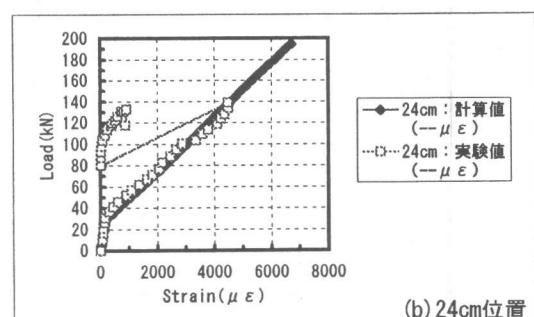
図-6(a), (b), (c)は、それぞれ供試体F2の0cm, 24cm, 44cm位置でのCFSHのひずみ分布である。同図にもまた、三層貼りの計算値が示されている。三層貼りの場合も一層貼りと同様に、140kN付近で等曲げ区間のCFSHが一挙に剥離している。一方、曲げせん断区間では、荷重がある値になるとひずみの急激な減少が見られるが、変形が更に進行し荷重の増加とともにひずみも増加している。これは、不完全な剥離状態になっている為であると思われる。44cm位置では終局荷重付近まで剥離は生じていないと思われる。

図-7(a), (b), (c)は、図-5及び図-6同様にそれぞれ供試体F3の0cm, 24cm, 44cm位置でのCFSHのひずみ分布を示したものである。この図にも同様にCFSH三層貼りの計算値も示されている。この供試体は、"CFSHの三層貼り+CFSHの巻き上げ"を有する供試体である。この供試

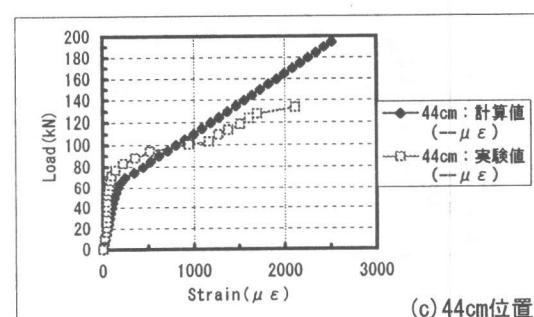
体の場合、今までの2体の供試体と異なり、巻き上げによる補強効果がはっきりと認められる。この場合の破壊にいたるプロセスとしては、まず120kN付近で等曲げ区間での下面CFSHの剥離が発生している。これは、0cm位置でのひずみ挙動(4000 $\mu\epsilon$ 付近で一定値を保っている)から確認できる。曲げせん断区間では一時的にひずみ値が下がるけれどもまた、荷重の増加とともにひずみも増加しているので付着が確保されているものと思われる。また、U字巻き上げ補強により下面CFSHの完全な剥離を制御し荷重は140kN付近まで増加したが、再び100kN付近まで一挙に減少し、ひずみも500 $\mu\epsilon$ くらいまで低下して



(a) 0cm位置



(b) 24cm位置



(c) 44cm位置

図-6 下面CFSHのひずみ分布(供試体F2)

いる。これは、U字巻き上げのシートの剥離が発生しCFSHに作用していた引張力がAFRPrにシフトしていったものと思われる。この事は図-4のAFRPrのひずみ分布からも供試体F2, F3に貼付した下面CFSHが剥離した後はCFSHを全く貼付していない供試体F0のAFRPr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-8は、供試体F3の45cm位置でのU字巻き上げ部位位置に貼付した三軸ひずみゲージのY方向ひずみ(CFSH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、90kN付近から徐々にひずみが増加し下面CFSHが剥離する120.7kNから急激に90kN付近まで荷重が減少するがひずみ量は、1200 $\mu\epsilon$ 付近で一定となっており、その後ひずみは増加し巻き上げCFSHの剥離が生ずる136.2kNで一挙にひずみはゼロになっている。図-7と同様、巻き上げ部のCFSHの補強効果が明確に認められる。

4. 変形、耐力及びひずみの評価

4.1 解析の概要¹⁾

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²⁾によるものを用いた。コンクリートの引張応力-ひずみ関係は、テンションスティーリングモデル³⁾を用いる。解析における鉄筋比(AFRPr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

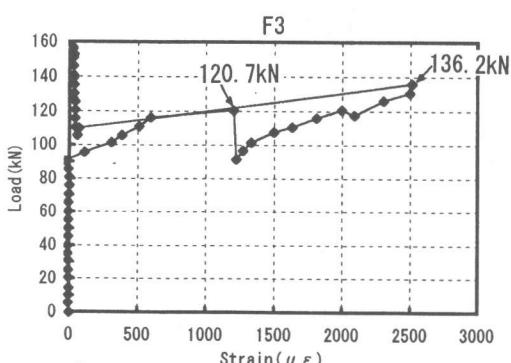
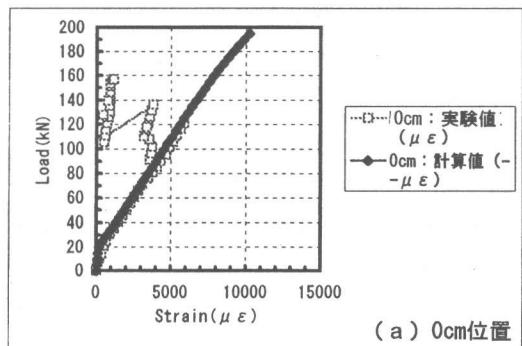
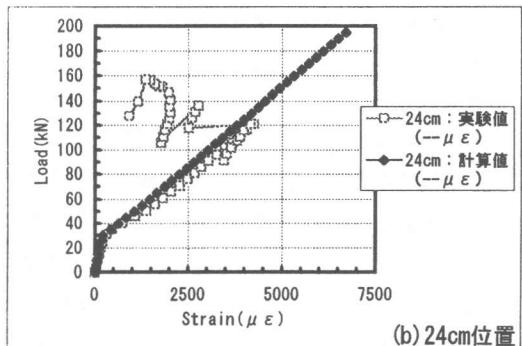


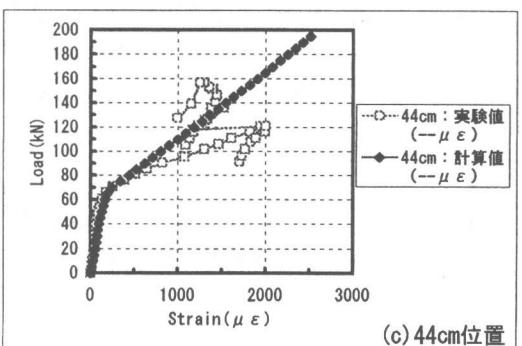
図-8 荷重-ひずみ関係
(45cm巻き上げ・Y方向)



(a) 0cm位置



(b) 24cm位置



(c) 44cm位置

図-7 下面CFSHのひずみ分布(供試体F3)
のを用いた。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。但し、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

先の図-3に示されている荷重と変位の関係を用いて説明する。同図中は、CFSHのない場合とCFSHのある場合(一層貼り及び三層貼り)との計算値も示されている。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。従って、剥離前までの計算値の変形挙動は、概ね実験値を追跡しているものと思われる。また、供試体F0の計算から求まる最大荷重は、135kNであり実験値（141.3kN）を概ね予測していると思われる。一方、供試体F2の計算最大荷重は195kNであり実験結果（138.5kN）を大きく上回る結果となった。

4.3 主筋AFRPr及び下面CFSHのひずみ性状

図-4に示されているAFRPr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CFSH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CFSH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CFSHなし供試体のAFRPr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、CFSH剥離後はCFSHに作用していた引張力がAFRPr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～図-7に示されるCFSH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AFRPrを用い、下面にCFSHを貼付したはり供試体及びCFSH貼付後さらにゼブラ状に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、AFRPr及びCFSH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CFSHの剥離性状は、まず等曲げ区間より発生し、その後支点に向かって進展していく。
- (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CFSH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（今回は10cmの巻き上げ）の剥離破壊により最終破壊に至っていく。U字巻き上げ部の長さ（=定着長）を十分取ることにより巻き上げ部の剥離破壊に対する抵抗力の改善ができるものと思われる。

謝 辞

本研究の遂行においてCFSH及び接着剤の提供を頂いた東燃（株）及びAFRPr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四年生、郡 豊君及び東海林 健治君の協力を得た。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
- 2) コンクリート標準示方書・設計編（平成8年制定），土木学会
- 3) 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