

V-4

炭素繊維シートにより曲げ補強したはりの耐力及び変形に関する実験的研究

北海学園大学	学生員	秦 地大
北海学園大学	正 員	高橋 義裕
北海道大学	正 員	佐藤 靖彦
清水建設(株)	正 員	前田 敏也

1. はじめに

連続繊維補強材料は、既存のコンクリート構造物に対する補強材料として期待されている材料の一つである。中でも炭素繊維シート（以下「CFS」）は高い引張り強度を持ち軽量で耐食性に優れ、さらにシート状であるため施工性に対して優れた材料である。

本研究の目的はCFSを実験供試体下面に貼付して、補強方法における破壊性状の違いや変形及び耐力の違いについて実験的に検討しようとするものである。著者らは、以前主鉄筋に異形棒鋼を使用し、下面にCFSを貼付したはりの曲げ実験^{[3][4]}を行っていたが、異形棒鋼の場合、降伏現象を伴うため、その耐力及び変形を十分に検討できなかったため、今回は全ての供試体に異形棒鋼の代りとして、降伏現象の伴わない、アラミドロッド（以下「AFRP ロッド」）を使用した。

2. 実験概要

実験供試体は合計4体である。供試体の形状、寸法、配筋状態については図-1に示すとおりである。せん断補強鉄筋として、D10を5cmピッチで補強した。供試体FRP000はCFSを全く貼付しない供試体である。供試体FRP000以外は右スパンを試験区間として左スパン全長をCFSで巻き上げた。供試体FRP001は下面にCFSを一層張り付け、供試体FRP002は下面にCFSを三層張り付けた。供試体FRP003は下面にCFSを三層張り付け、さらに右スパンに35cm、45cm、55cmの位置に幅5cmのCFSを巻き付けた（以下「巻き上げ部」）。巻き上げ状態を図-2に示す。各実験供試体に用いた材料の力学的特性値を表-1に示す。また、実験供試体の諸元を表-2に示す。

本実験では、はりに二点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 ロッドにはスパン中央点より両サイド、10cm、30cm、50cmの位置にひずみゲージを貼付して、ひずみ量を測定し、下面のCFSには供試体FRP001、FRP002においてはスパン中央から右側支点まで2cmピッチで、供試体FRP003においてはスパン中央から両支点に向かい4cmピッチでCFSの下面中央にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。また、供試体FRP003においては、巻き上げ部CFSに三軸ひずみゲージを貼付した。貼付位置は下面よりA面側で1.5cm、B面側で3.0cmとした（図-2参照）。三軸ひずみゲージの方向は、供試体軸方向をX方向とし、それと直角の方向をY方向（CFSの繊維方向）、X方向とY方向の中間45度をXY方向として貼付した（図-3参照）。

コンクリートは水セメント比45%、細骨材率38%、早強ポルトランドセメント、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CFS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。

Experimental Study on Strength and Flexural Behavior of RC Beams with Carbon Fiber Sheet as Flexural Reinforcement.

By Chihiro HATA, Yoshihiro TAKAHASHI, Yasuhiko SATO and Tosiya MAEDA

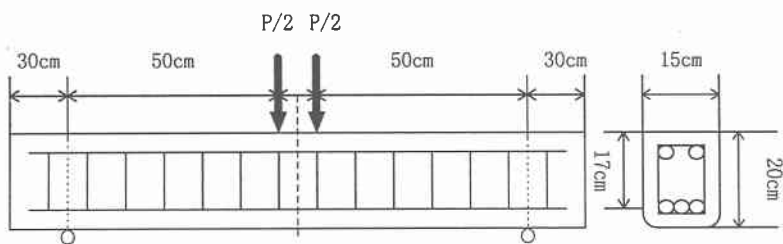


図-1 実験供試体図

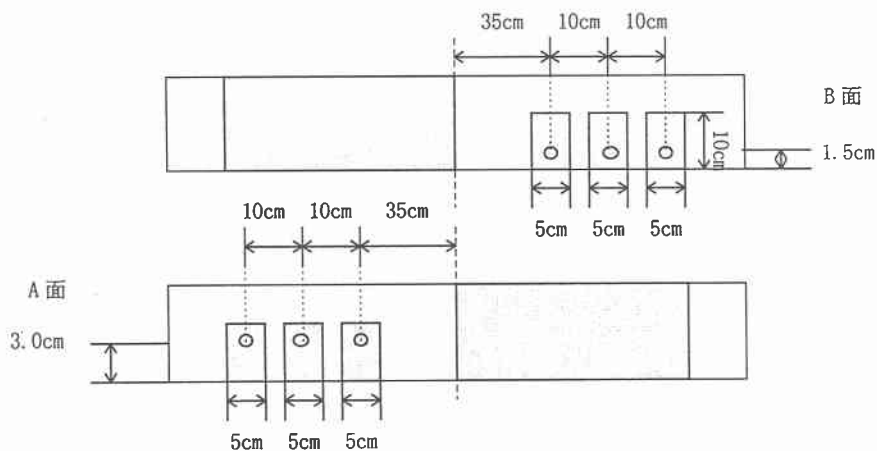


図-2 U字巻き上げ部のひずみゲージ貼付位置

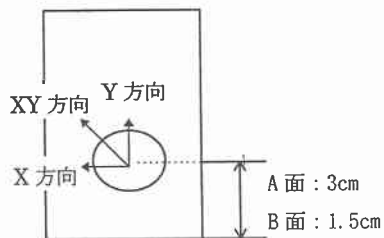


図-3 三軸ひずみの貼付方向

表-1 使用材料の力学的特性値

Type		Cross sectional area (mm ²)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
AFRP	K96	73.0	66	—	1280
Steel	D10	71.3	200	377	390
CFS		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	Compressive strength (MPa)	Tension AFRC		CFS	Ultimate load (kN)	Failure modes ¹⁾
		Type	p_s	$A_{CFS} (mm^2)$		
FRP000	39.15	K96×3	2.00%	0	141.3	F
FRP001	38.70	K96×3	2.00%	198	142.3	DP
FRP002	38.33	K96×3	2.00%	594	138.5	P
FRP003	37.90	K96×3	2.00%	594	156.8	P

1) F : 曲げ破壊、 DP : CFS の局部的剥離後 CFS の破断、 P : CFS の剥離

3. 実験結果

3. 1 終局耐力及び破壊性状

表-2 に示したように、本実験の範囲において下面にただ CFS を貼付した（供試体 FRP001 と FRP002）だけでは、CFS による終局耐力における補強効果は明確に認められなかった。著者らが以前行った、主鉄筋に異形棒鋼を使用した実験でははっきりとした耐力増加が認められたが、今回のように降伏現象を伴わない AFRP ロッドを主鉄筋に用いた場合、CFS をただ下面に張り付けただけでは、耐力の増加が期待できないのかもしれない。一方、供試体 FRP003 の様に、部分的に U 字巻き上げを行うと、確かに下面における CFS の剥離が拘束され耐力増加が認められた。また、CFS を下面に一層張った場合（供試体 FRP001）と CFS を三層張った場合（供試体 FRP002）との耐力の差異は、あまり見られなかった。従って下面に張った CFS の補強効果はコンクリート面と接している一層目との付着強度で殆ど決まっているのかも知れない。

破壊性状について、供試体 FRP000 は曲げ圧縮破壊、供試体 FRP001 は CFS の局部的な剥離の後、ほぼ載荷点直下で CFS が破断した。供試体 FRP002 は下面の CFS が剥離、供試体 FRP003 は下面の CFS が剥離した後、巻き上げ補強部 CFS の内、中央より 35cm、45cm 位置の CFS が剥離し、55cm の CFS が破断し終局耐力に達した。

3. 2 変形状

図-4 は全供試体の荷重とたわみ量の関係について示したものである。同図より、CFS を貼付していない供試体 FRP000 と、その他の供試体とを比較すると、CFS を貼付した供試体 FRP001、002、003 はたわみ曲線の傾きが立っているので、剛性の増加が見受けられる。しかし、供試体 FRP001 と供試体 FRP002 を比較すると、その曲げ剛性の増加は、殆ど見られなかった。CFS を貼付した供試体のたわみ曲線の推移から、CFS を貼付している供試体について、荷重は下面に貼付した CFS の剥離または破断の後、AFRP ロッドが受け持っている事が認められる。

図-5 は載荷点直下の AFRP ロッドにおけるひずみ量と荷重との関係を示したものである。供試体 FRP000 とその他の供試体を比較すると、AFRP ロッドのひずみ量が減少している事が分かる。これは、CFS が荷重を分担している為と思われる。

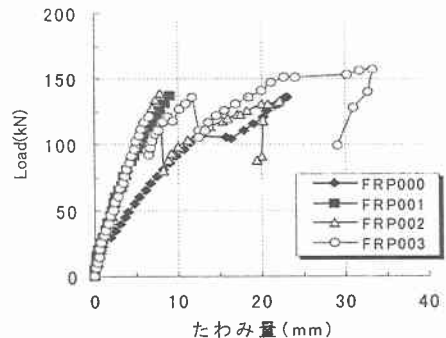


図-4 荷重－変位曲線

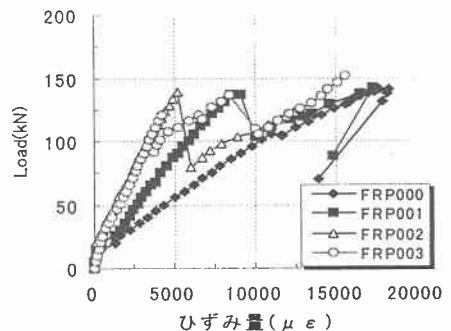


図-5 AFRP ロッドの荷重－ひずみ曲線

3.3 CFS のひずみ性状

図-6 は供試体 FRP002 と供試体 FRP003 のスパン中央から右支点に向かって、下面の CFS 4cm の位置に貼付したひずみと荷重関係を示したものである。同図より二つの供試体は、CFS が剥離するまでほぼ同じ挙動を示している。しかし、供試体 FRP002 については荷重が 138.5kN で下面の CFS が剥離し、荷重が約 80kN まで低下、ひずみ量も一挙に低下した。また、供試体 FRP003 については、荷重が 120.7kN で下面の CFS が剥離したが、CFS で U 字に巻き上げて補強しているため、荷重の減少は約 90kN で止まり、ひずみ量の減少は供試体 FRP002 に比べ約半分にとどまった。この事により、供試体 FRP003 における U 字巻き上げ補強は下面の CFS を拘束し、剥離を抑える事により一定の補強効果があったものと思われる。さらに、同図から CFS が剥離した後の耐力上昇は、AFRP ロッドに荷重がシフトした事によるものと思われる。また、この事は図-5 からも供試体 FRP002、FRP003 に貼付した CFS が剥離した後は、同様に、CFS を全く貼付していない供試体 FRP000 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。さらに、同図から供試体 FRP002、003 共に、約 5000 $\mu\epsilon$ で下面の CFS が剥離しており、本研究の範囲では、下面の CFS が剥離するひずみ量は約 5000 $\mu\epsilon$ 付近と思われる。

図-7 は、供試体 FRP003 の U 字巻き上げ部に貼付した 45cm 位置の三軸ひずみゲージの、Y 方向ひずみと荷重との関係を示したものである。同図からも、下面の CFS が付着切れを起こした約 80kN からひずみ量が増加、荷重 120.7kN で下面の CFS が剥離し、ひずみ量が大きくなっている様子が分かり、図-6 と同様、巻き上げ部の CFS の補強効果があったものと思われる。

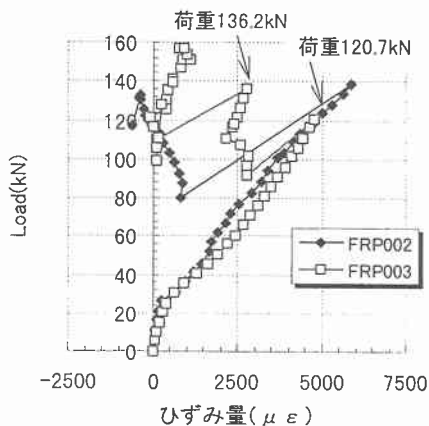


図-6 CFS の荷重—ひずみ曲線

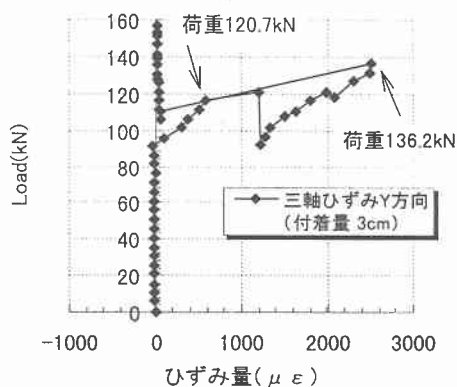


図-7 U字巻き上げ部の荷重—ひずみ曲線

4. 変形及び耐力の評価

4.1 解析方法

本研究では、変形及び耐力について、断面分割法による解析を試みた。本解析では、コンクリートの圧縮応力—ひずみ関係にコンクリート標準示方書^[1]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、テンションスティフニングモデル^[2]を用いている。鉄筋の応力—ひずみ関係は、図-8 に示すものを用いた。解析における鉄筋比は、断面幅とかぶりの 2 倍を掛け合わせた面積で除したものを用いた (図-9)。また、CFS の応力—ひずみ関係は図-10 を使用した。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。

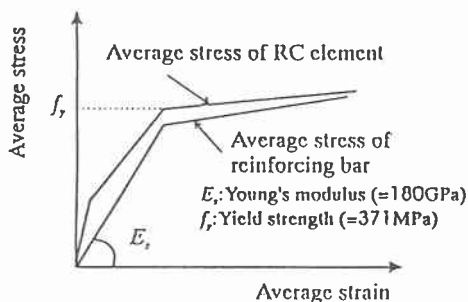


図-8 鉄筋の応力-ひずみ曲線

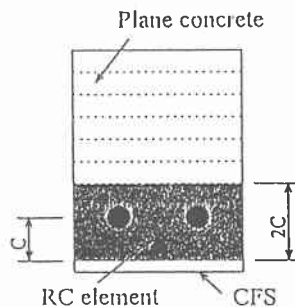


図-9 断面分割図

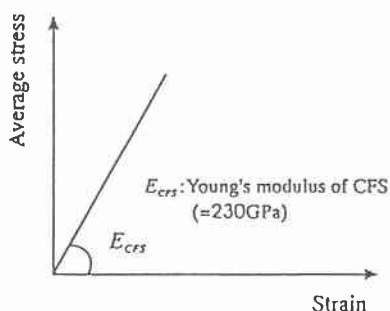


図-10 CFS の応力-ひずみ曲線

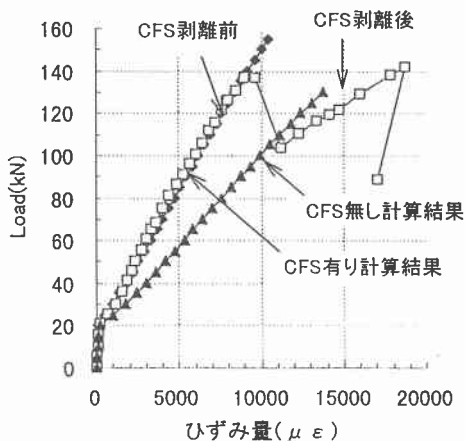


図-11 ARFP ロッドの計算結果との比較

4.2 解析結果とAFRP ロッドのひずみ性状

図-11 は供試体 FRP001 の実測値と供試体 FRP001、FRP000 の解析結果について、AFRP ロッドにおけるひずみと荷重の関係を示している。同図から、曲げ応力によるひび割れ発生荷重が約 20kN で発生しているものと思われる、計算値とほぼ一致している。また、下面の CFS が剥離する約 136.2kN より以前は、CFS を考慮した供試体 FRP001 の計算結果と概ね一致し、剥離後は CFS を貼付していない供試体 FRP000 の計算結果とほぼ一致している。この事は、CFS 剥離後は AFRP ロッドに荷重がシフトしている事が計算結果からも伺える。また、この解析方法により、実験値を概ね追跡できるものと思われる。

4.3 解析結果とCFS のひずみ分布

図-12 は、供試体 FRP001 の下面に貼付した CFS のひずみ分布を示している。実線は解析値を、三角は CFS 剥離前の荷重 100kN におけるひずみ分布を、四角は剥離後の荷重 103kN におけるひずみ分布を示している。剥離前のひずみ分布は概ね計算値を追跡しているが、

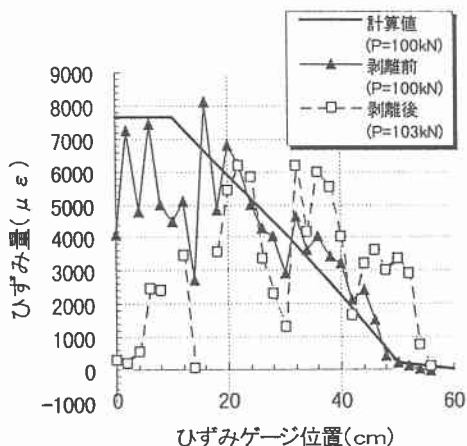


図-12 CFS のひずみ分布

剥離後は等曲げ区間において、計算値を大きく下回っている。これは、解析には剥離の条件が考慮されていない為である。実験結果において、供試体 FRP001 はひずみ量が部分的に増加している所がある。これは、供試体の破壊性状によるものと思われ、下面の CFS に部分的な剥離が発生した後、破断に至った為増加したものと思われる。

5. まとめ

本研究は主鉄筋に降伏点の無い AFRP ロッドを用い、下面に CFS を貼付したはり型供試体を用いて、はりの耐力及び変形、AFRP ロッド及び CFS 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結果を以下に示す。

- (1) CFS を U 字に巻き上げる事により下面の CFS の剥離の進行を制御する事ができ、一定の補強効果があった。
- (2) 下面の CFS が剥離した後、主鉄筋の AFRP ロッドが荷重を受け持ち、終局耐力に至った。
- (3) 下面の CFS に剥離破壊が発生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事ができる。
- (4) 本研究の範囲において、下面に貼付した CFS が剥離するひずみ量は、約 $5000 \mu \epsilon$ であると思われる。

謝辞

本研究の遂行において、CFS の提供を頂いた東燃（株）の及び AFRP ロッドの提供を頂いた三井建設（株）の関係者各位に深く感謝の意を表します。また、本研究を進めるにあたって北海学園大学工学部土木工学科四年生、郡 豊氏、東海林 健治氏の協力を得た。ここに、付記して謝意を表す。

参考文献

- [1] コンクリート標準示方書・設計編（平成 8 年制定），土木学会
- [2] 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線型解析と構成則，技法堂出版社、1991
- [3] 高橋義裕ほか：炭素繊維シートにより曲げ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報告集，Vol. 19, No. 2, 1997
- [4] 佐藤靖彦ほか：炭素繊維シートを曲げ補強材料として用いた RC はりの曲げ及びせん断性状について，土木学会北海道支部 論文報告集 第 52 号(A)，1996