

V-28

炭素繊維シートで補強した RC 部材の引張剛性モデルの一検討

北海道大学大学院 ○学生員 庄司 和晃
 北海道大学 学生員 山口 隆一
 北海道大学大学院 正会員 佐藤 靖彦
 北海道大学大学院 正会員 上田 多門

1. まえがき

近年の既存インフラ施設の老朽化、および 1995 年に発生した阪神・淡路大震災をきっかけとした耐震補強に対する関心の高まりに伴い、都市構造物の補修・補強が盛んに行われている。またそれと同時に技術的かつ経済的に有効な設計法、耐震診断および耐震補強工法の早急な開発が求められている。

コンクリート構造物の補強工法の一つに高強度・高弾性率という材料特性を持つ連続繊維シートの貼付、巻き付けによる接着工法がある。その中でも、特に将来性の大きいと予想される炭素繊維シート（以下「CFS」）は、鉄筋コンクリート（以下「RC」）構造物に及ぼす補強効果として、鉄筋降伏後に CFS が荷重を受け持ち変形することによりエネルギーを吸収し、構造物に靱性を持たせるといものである。そのため、曲げやせん断破壊に関する検討が過去に数多くなされてきた。その結果として、CFS 補強 RC 部材の変形および抵抗機構を明らかにする上で、CFS を貼り付けた RC 部材の一軸引張特性を正確に把握することが、不可欠であると認識されている。しかしながら、その検討は十分になされているとは言えない。

そこで本研究では、CFS 補強 RC 部材の引張剛性モデルの構築を念頭におき、その基礎的なデータの蓄積を目的として、一軸引張試験を行い、鉄筋と CFS のひずみ性状および分担荷重特性を実験的に明らかにするものである。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験供試体には、図-1 に示すような断面が $150 \times 150 \text{ mm}$ のコンクリート角柱の中央に鉄筋を一本埋め込んだものとした。鉄筋比は D16 と D19 の径の違う鉄筋を用いることで調節した。本研究では、ひび割れ位置における鉄筋および CFS のひずみ分布の測定が重要であり、ひずみ分布の測定をコンクリートと鉄筋との付着を損なわなうことなく、またひび割れをできるだけ多く入れるためコンクリート部材にあらかじめ人工ひび割れを設けた（図-3 参照）。ひび割れ位置における鉄筋および CFS の応力は直接測定できないため

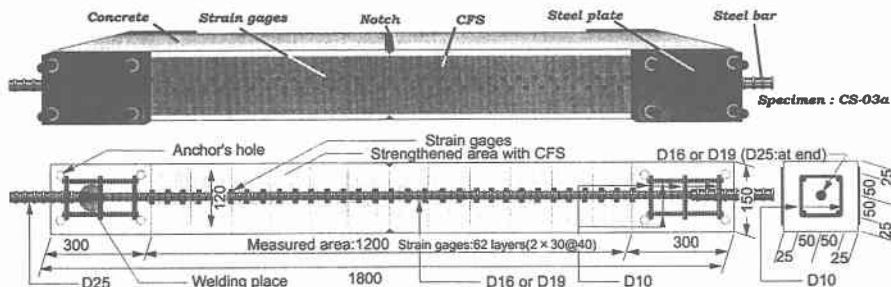


図-1 実験供試体図

A investigation on tension stiffening model of reinforced concrete members strengthened with CFS
 by Kazuteru SHOJI, Ryuichi YAMAGUCHI, Yasuhiko SATO, and Tamon UEDA

表-1 実験供試体諸元

Series	Denomination of Specimens	Compressive Strength f_c' (MPa)	Reinforcement Ratio of Steel p_s (%)	Reinforcement Ratio of CFS p_{CFS} (%)	Ratio of p_{CFS} to p_s	Number Of CFS layers
A	CS-00a	27.50	0.89	-	-	-
	CS-01a	30.70	0.89	0.117	0.13	1
	CS-02a	30.70	0.89	0.234	0.26	2
	CS-03a	32.82	0.89	0.351	0.40	3
B	CS-00b	29.00	1.27	-	-	-
	CS-01b	30.60	1.27	0.117	0.09	1
	CS-02b	32.20	1.27	0.234	0.19	2

ひずみを測定し、応力-ひずみ関係を用いて応力に変換する手法を用いた。測定区間以外で鉄筋の降伏を防ぐため、コンクリートからの突出部に D25 の鉄筋を使用した。D16、D19 と D25 との接合部には、それぞれをねじ切りした上で溶接を施し、引張補強筋を配置した。表-2、表-3 に使用した CFS および鉄筋の材料特性を示す。

2.2 実験条件

RC 要素の引張剛性に影響を及ぼすと考えられる鉄筋比および CFS の補強量を実験条件として選び、7 ケースについて実験を行った。鉄筋比 p_s が 0.89% のものをシリーズ A、1.27% のものをシリーズ B とし、供試体名の語尾の番号は、CFS の積層数を意味する。CS-00～CS-03 の違いは CFS の補強量である。実験供試体と実験条件の対応を表-1 に示す。

2.3 実験方法

本実験では、載荷フレームの中に実験供試体を水平に設置し、供試体から突出した両端の鉄筋にヒンジを介し、一端を固定、他端をセンターホールジャッキによって引張力を加える方法によった。供試体の底面には、摩擦を防ぐためにローラーを介した。載荷中には、鉄筋と CFS のひずみ、引張荷重を測定した。

3. 実験結果および考察

本実験において CS-03a を除く補強供試体は D16、D19 と D25 との接合部での破断で実験が終了した。そのため、破壊性状については観測できなかった。しかしながら、鉄筋降伏後における鉄筋および CFS のひずみ性状を検討するためには、十分な測定ができたと思われる。以下 7 体の実験結果の比較を行い、本論文ではひび割れ発生後、さらには鉄筋降伏後の、ひずみ性状に着目して述べる。

3.1 ひずみ分布

3.1.1 鉄筋のひずみ分布（降伏前）

図-2 の上段、中段、下段に各供試体の降伏前における鉄筋のひずみ分布、CFS のひずみ分布および、ひび割れ性状の対応を示す。

表-2 CFS の力学的特性

Type	High strength
Tensile strength (MPa)	3840
Young's modulus (GPa)	230
Thickness (mm)	0.11
Ultimate Strain (%)	1.5

表-3 鉄筋の力学的特性

Type	SD345D16	SD345D19
Sectional area (mm ²)	198.6	286.5
Diameter (mm)	15.9	19.1
Young's modulus (GPa)	170 (177) ^{※1}	172
Yielding strength (MPa)	390 (395) ^{※1}	395
E_{sh} ^{※2} (GPa)	2 (3) ^{※1}	3.5
ϵ_{sh} ^{※3} (%)	2.37(2.2) ^{※1}	1.4

※1: material property of CS-03a

※2: Stiffness after strain - hardening starts

※3: Strain when strain - hardening starts

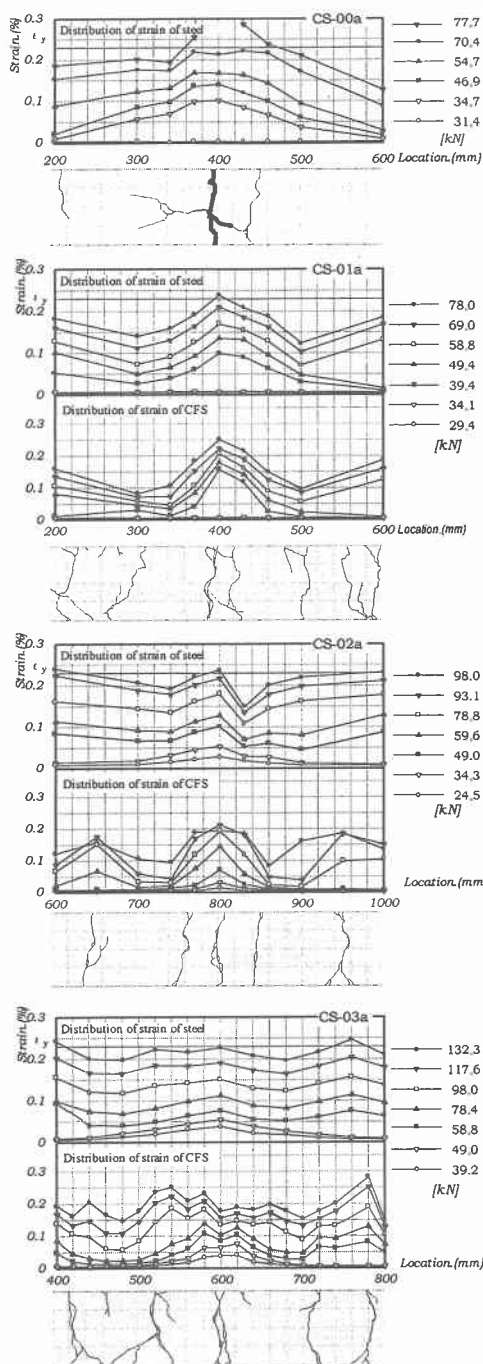


図-2 鉄筋とCFSのひずみ分布とひび割れ性状の対応

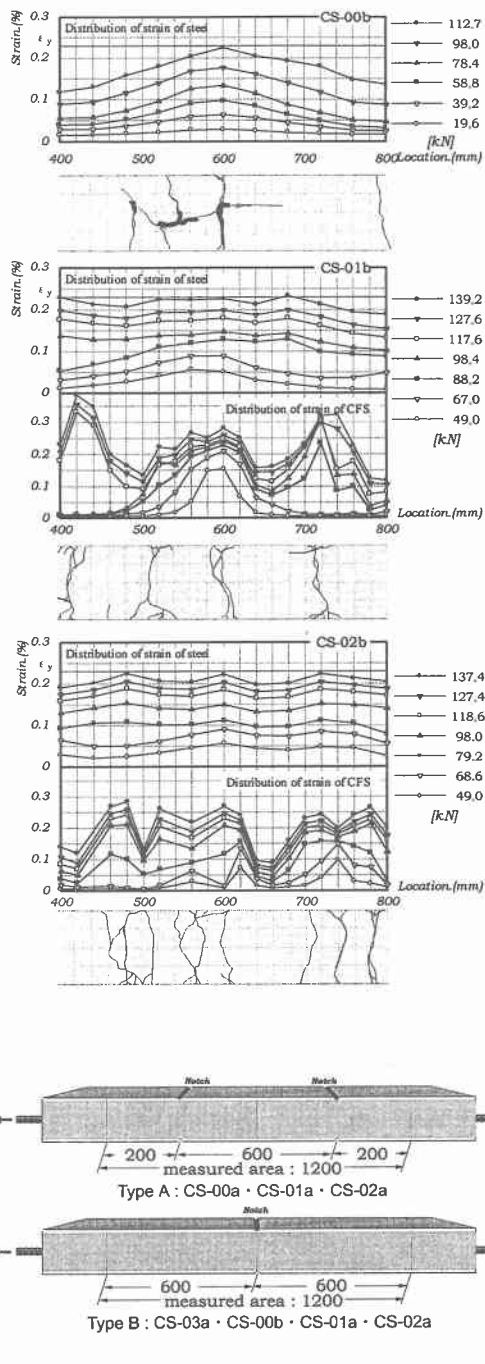


図-3 人工ひび割れの位置

シリーズ A の CS-00a～CS-02a では測定区間の 400mm と 800mm の人工ひび割れのある位置からひび割れが入り、シリーズ A の CS-03a、シリーズ 2 の CS-00b～CS-02b は人工ひび割れのある 600mm の位置からひび割れが入った。ひび割れ図は実験終了時における図であり、無補強供試体の CS-00a、CS-00b とともに終局時に割裂ひび割れが発生し、破壊に至ったことが示されている。供試体 CS-01a に多数生じているひび割れは、終局時に発生したコンクリートの表面的な微小ひび割れであり、貫通ひび割れではない。補強供試体は無補強供試体に比べてひび割れの分散性が良く、補強量が増えるとともにその傾向が強いといえる。図-4 に平均ひび割れ間隔と CFS の補強量の関係を示す。CFS 補強によるひび割れ間隔の縮小傾向は、鉄筋のひずみ分布性状に影響を及ぼしていると思われる。ひび割れ位置での鉄筋が降伏点に達する時のひずみ分布形状は、最大ひずみと最小ひずみとの差という点で、明らかに無補強供試体と補強供試体では異なる。

CFS のひずみ分布は、ひび割れ位置で局部的なひずみ増加をしており、特に CFS の補強比 (p_{CFS} : 以下「シート比」) が 0.117% の CS-01a および CS-01b は、ひび割れの発生直後、約 0.15% 以上の急激なひずみの増加が見られる。それに対してシート比が 0.234% の CS-02a と CS-02b、シート比が 0.351% の CS-03a には、そのような急激なひずみの増加は見られない。鉄筋比とシート比との比 (p_{CFS}/p_s) の小さい CS-01b、CS-01a、CS-02b に比べて CS-02a のひずみ勾配は小さく、CS-03a のそれはさらに小さいといえる。そのため引張荷重が増加すると、CFS の引張力を受け持つ部分 (付着力を分担している付着領域 : 以下「有効付着長」) は、鉄筋比とシート比との比 (p_{CFS}/p_s) が大きければ大きいほど長くなる傾向があるといえるが、補強量の増加に伴うひび割れ間隔の縮小化のために、ひび割れ間で隣り合う有効付着域が重なり合うという現象が起きていることが見られる。

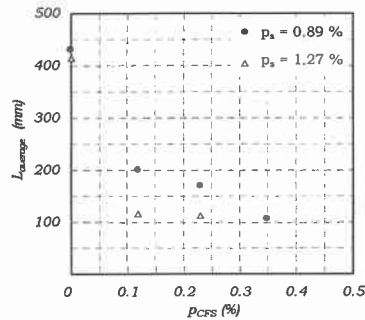
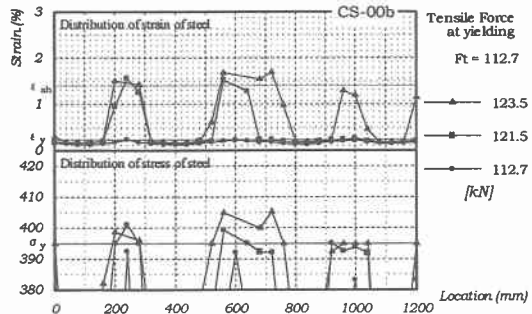
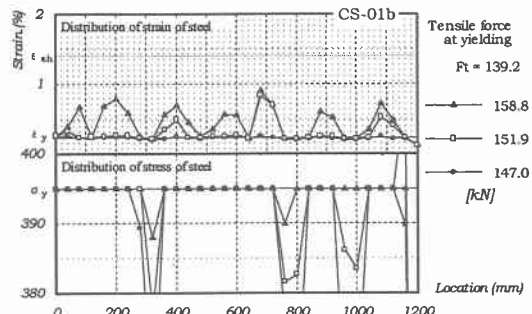


図-4 平均ひび割れ間隔—CFS 補強量の関係



I. 無補強供試体



II. 補強供試体

図-5 鉄筋降伏後の鉄筋のひずみ分布

3.1.2 鉄筋のひずみ分布 (降伏後)

図-5 に無補強供試体と補強供試体の降伏後における、ひずみ分布および応力分布の比較を示す。無補強供試体は、ひび割れ位置において降伏後直ちにひずみ硬化を起こしており、応力分布において、応力一定の区間がほとんど存在していない。それに対して、補強供試体では降伏直後における硬化ひずみへの跳ね上がりは見られず、徐々にひずみを増加させている。そのため、応力一定区間が存在している。

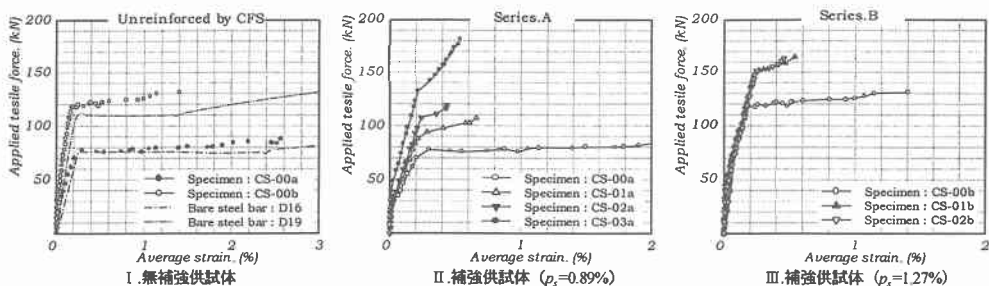


図-6 荷重-平均ひずみ関係

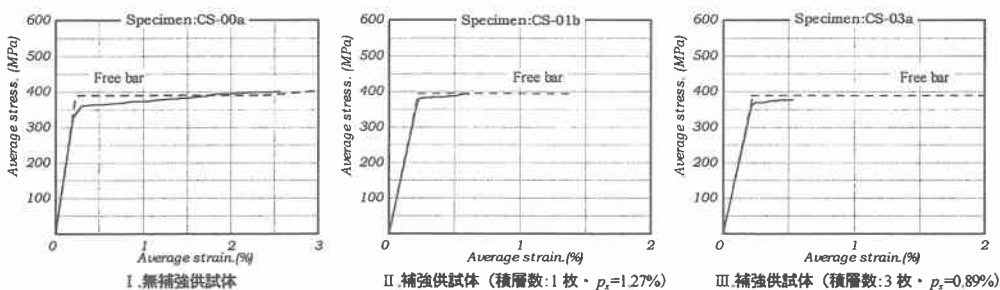


図-7 鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係

3.2 平均応力と平均ひずみ

3.2.1 荷重-平均ひずみ関係

図-6 にシリーズ A とシリーズ B における荷重-平均ひずみ関係の比較を示す。シリーズ A においては、CFS で補強することで鉄筋の降伏荷重が増加している。シリーズ B においても、CFS で補強することで降伏荷重が増加する傾向が伺えるが、CFS の補強量の異なる CS-01b と CS-02b では、ほとんど差のない結果となった。全体的には鉄筋降伏後の荷重-平均ひずみ曲線の傾きは、鉄筋比とシート比との比 (p_{CFS}/p_s) が大きいほど大きくなる傾向があるといえる。

3.2.2 鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係

CFS で補強した供試体における鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を図-7. II、図-7. III に、比較のために無補強の場合の関係を図-7. I に示す。CFS で補強した場合、ひび割れ位置において、鉄筋が降伏した後は CFS が主に引張力を分担することより、RC 部材にみられる鉄筋のひずみ硬化領域は小さくなり、その代わり降伏後の領域が増え (図-5. II 参照)、CFS 補強 RC 部材の鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線は、単体鉄筋の応力-ひずみ曲線に近づく傾向があると予想される。しかし、平均ひずみが 0.5% 程度までしか測定できなかったため、実験では無補強の場合との差異を確認することができなかった。シリーズ A およびシリーズ B における CFS の補強量による降伏点の違いは見られず、RC 部材に見られる鉄筋比が低いほど降伏点が低くなるという傾向のみ確認できた。

3.2.3 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

図-8 に無補強の CS-00a、CS-00b のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係と島らの提案する式 (図-9 中の式-1 (参考文献)) との比較を示す。ひび割れ発生後もコンクリートが引張応力を分担する Tension Stiffening は、実験値と計算結果とは概ね一致しているといえる。補強供試体と無補強供試体との比較を行

う上で、純粋に軟化曲線部の比較を行うために、縦軸の平均応力を各供試体における最大引張強度で除し、ひび割れ発生ひずみを 0.02% に合わせた。図-9 に無補強供試体と CFS の補強供試体との比較を示す。シリーズ A においては、CFS で補強することにより降伏前の Tension Stiffening が増加する結果になった。また、CS-03a においては鉄筋降伏後も緩やかな軟化曲線を示しており、無補強の Tension Stiffening を大きく上回る結果となった。それに対して、CS-01a、CS-02a は降伏後において Tension Stiffening の低下傾向が見られ、特に CS-02a は降伏直後に急激な低下をしている。シリーズ B では、CS-01b がシリーズ A と同様に降伏前において、無補強の Tension Stiffening を上回り、降伏直後に低下するという結果になった。CS-02b に関してはひび割れ発生した後、平均ひずみが約 0.1% あたりまで、僅かであるが無補強の Tension Stiffening を上回り、その後急激に低下している。

4. 引張剛性モデルの評価

CFS で補強した RC 部材の引張剛性は、部材を構成するコンクリート、鉄筋および CFS に分けてそれぞれの特性を重ね合わせるにより評価できる。それぞれの特性は平均応力-平均ひずみ関係として表せる。CFS は弾性体であるため、単独の特性を使用できる。一方、鉄筋とコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係に CFS の影響があることは明らかであり、その定量化が必要である。今後、CFS および鉄筋の付着応力-すべりひずみ関係を用いることによりその定量化を図り、CFS 補強 RC 部材の引張剛性モデルを構築したいと考えている。

5. 結論

本研究において鉄筋および CFS のひずみ性状を詳細に検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) CFS で補強することで平均ひび割れ間隔が小さくなり、補強量が増えるとさらに小さくなる傾向がある。その結果、鉄筋のひずみ分布性状における最大ひずみと最小ひずみの差が小さくなる傾向がある。
- 2) 降伏後の鉄筋のひずみ分布において、硬化ひずみへの跳ね上がりが見られず、応力一定区間が存在する。そのため、鉄筋の平均応力-平均ひずみ曲線は、単体鉄筋の応力-ひずみ曲線に近づく傾向がある
- 3) 降伏後における荷重-平均ひずみ関係の傾きは、 p_{CRS} / p_s が大きくなるほど大きくなる傾向がある。

参考文献 玉井、島、出雲、岡村：一軸引張部材における鉄筋の降伏以降の平均応力-平均ひずみ関係、土木学会論文集 第 378 号(1987)

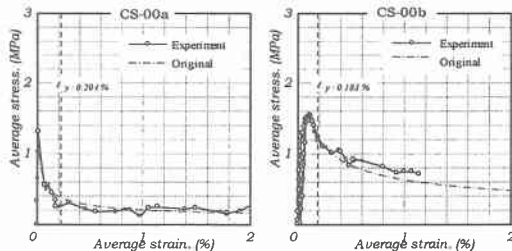


図-8 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

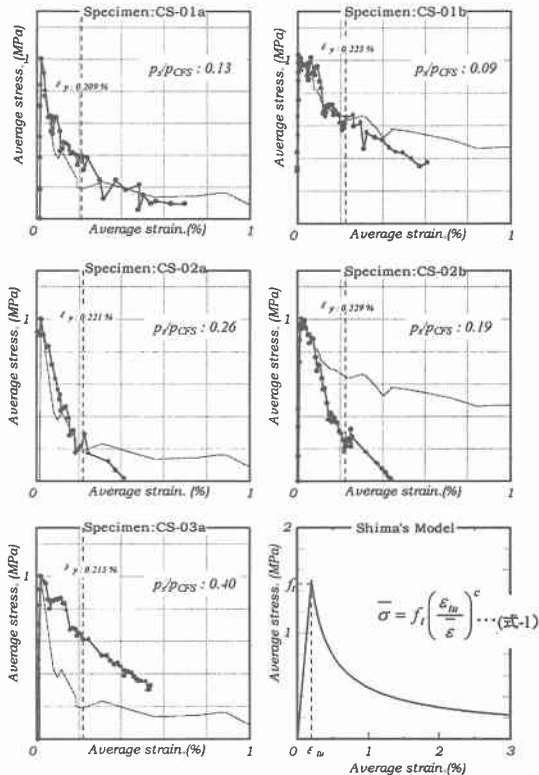


図-9 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係における補強供試体と無補強供試体の比較