

論文 カーボンファイバーを用いた補強コンクリート柱の曲げせん断性状

日高桃子^{*1}・崎野健治^{*2}・鄭 吉男^{*3}

要旨：平行弦連続炭素繊維を主筋に用いたコンクリート柱の一定軸力下における曲げせん断性状を、12体の試験体を用いて実験的に検討した。配筋形式としては、X形配筋形式と通常の鉄筋コンクリート柱と同様な配筋形式を用いた。主筋のひずみ挙動から、配筋形式によらず、主筋は圧縮抵抗はしないが、低軸力下の柱の主筋としては有効であることがわかった。炭素繊維を主材料とする帯筋を用いた試験体の実験結果から、この帯筋の横補強効果の有効性を確認した。

キーワード：柱，炭素繊維，補強筋，曲げせん断実験，QN 相関曲線

1. はじめに

RC 建物の寿命を決める要因の一つは鉄筋の腐食である。現在、建築構造用の炭素繊維は主にコンクリートのジャケット材として使われているが、コンクリート補強筋として腐食の心配がなく高強度のこの材料を用いることができれば、建物の長寿命化の観点からメリットがある。本論文は、平行弦連続炭素繊維（以降、非硬化型を UCCF、レジンを用いた硬化型を CFRP とよぶ）材を主筋として用いたコンクリート柱の構造形式を考案し、繰り返し曲げせん断実験によってその耐震性能を調べることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験計画

主筋に用いる炭素繊維材は、表面に付着力が生じない弦材である。このような材を用いて曲げせん断力に抵抗させるために、通常なされる材軸と平行に主筋を並べる配筋形式（以降、従来型配筋形式とよぶ）ではなく、X形配筋とすることが提案されている^{1,2)}。全試験体12体のうち、シリーズ1, 2にはX形配筋を採用した。X形配筋試験体は、せん断抵抗能力を上げるために3.5mm厚の鋼管を横補強材として用いた。一方、従来型配筋形式を用いる場合でも、帯筋があれば、

帯筋とコンクリートの圧縮束によるせん断抵抗を期待できる可能性がある。シリーズ3, 4は従来型配筋形式の試験体とし、帯筋に3mm厚の角形CFRP管（繊維方向は管周方向）を幅3mmに切断した角形バンド状にしたものを用いた。X形配筋の場合と異なり、従来型配筋の主筋には付着力が生じる可能性があることから、付着性状に差異があることが予想されるUCCFとレジン硬化型のCFRPの2種類を主筋として用いた。

コンクリートも炭素繊維も変形能力が大きい材料ではないので柱に大変形が生じた場合には脆性的に破壊することが懸念される。3シリーズの試験体は、柱断面の中心に圧壊防止のための円形鋼管を用いた。

2.2 試験体

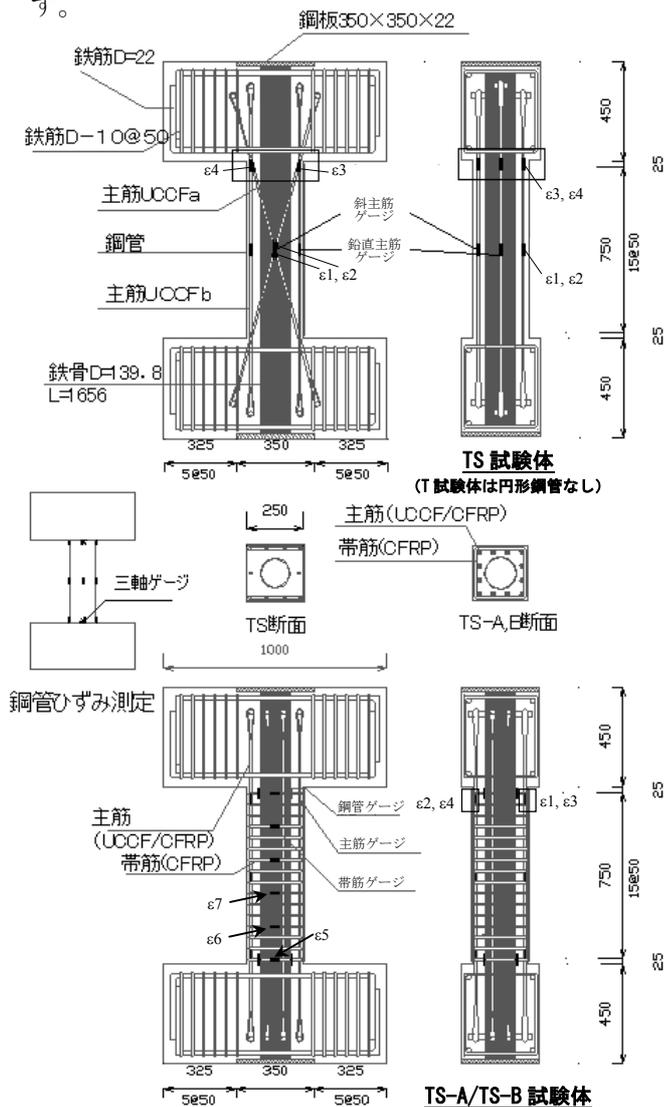
試験体の一例を図—1に示す。試験体はコンクリート、主筋（UCCF, CFRP）、横補強材（角形鋼管, CFRP 帯筋）、内蔵円形鋼管（STK）で構成される。柱断面は250mm角の正方形で、柱部の高さは800mmである。TおよびTS試験体には、UCCFをX形に4本（以降、斜主筋とよぶ）と鉛直方向に左右各1本ずつ配筋し、3.5mm厚の角形鋼管で横補強している。TS試験体は、139.8mm径、3.5mm厚の円形鋼管を内蔵している以外はT試験体と同様である。TS-AとTS-B

*1 九州大学大学院 人間環境学研究院助手 人間環境博（正会員）

*2 九州大学大学院 人間環境学研究院教授 工博（正会員）

*3 さくらテック（株）

試験体には、12本の主筋と50mmピッチ16組のCFRP帯筋を用いている。TS-Aの主筋はUCCF、TS-Bの主筋はCFRPで、断面積はともに 18.4mm^2 である(CFRPの断面積は硬化剤を含めると 33.0mm^2)。CFRPはUCCFより引張強度が4割程高い。UCCFやCFRPには表面の付着力を期待しない上、腐食の心配がないので、被り厚さは通常の鉄筋コンクリート部材より小さい10mmとした。試験体に用いた材料の機械的性質を表—1に示す。実験変数は、配筋形式、内蔵鋼管の有無、主筋の種類、横補強形式および軸力比(N/N_0 : 載荷軸力 / (コンクリート柱断面積 × コンクリートのシリンダー強度)) $N/N_0=0.1, 0.3, 0.5$ である。試験体の一覧と各試験体に用いたコンクリートのシリンダー強度を表—2に示す。



図—1 試験体

2.3 加力および測定方法

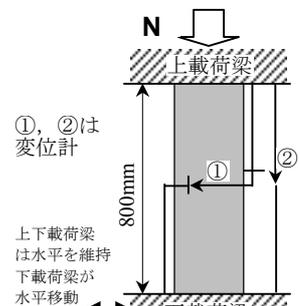
載荷条件を図—2に示す。5000kN試験機により所定の鉛直力を柱に載荷した後、鉛直力を一定に保持したまま500kN水平加力用油圧ジャキを用いて繰返し水平力を載荷した。図—2に示す変位計で、試験体の水平変位(①)および鉛直変位(②)を測定し、柱の部材角(R)は変位計①の水平変位を柱内法高さ800mmで除した値と定義する。載荷プログラムは、 $R=0.5\%$ ずつの漸増変位振幅正負交番繰返し載荷とした。 $R=0.5\sim 2.5\%$ の範囲では各変位振幅につき3サイクルずつ、 $R=3\sim 5\%$ の範囲では各変位振幅につき1サイクルずつとした。実験中、試験体が軸力保持能力を失った場合は、その時点で実験を中止する。主筋、円形鋼管、横補強鋼管および帯筋の表面に貼付したゲージによりひずみを測定した。このうち、主筋と帯筋のひずみゲージ貼付位置を図—1に示す。

3. 実験結果

3.1 履歴性状

図—3に全試験体の水平力(H)-層間変形角(R)関係を示す。全試験体とも層間変形 $R=0.5\%$ 時に剛性が低下し始めた。

耐力が最大となる変



図—2 載荷条件

表—1 材料の機械的性質

	用いた試験体	σ_y (N/mm ²)	Y	ϵ_u (%)
円形鋼管 STK	TS-1	368	0.84	20.0
	TS-3,5	401	0.83	33.7
	TS-A	382	0.84	44.7
	TS-B	381	0.85	34.2
横補強鋼管	T, TS-1	346	0.76	18.3
	TS-3,5	321	0.72	37.6
炭素繊維材		c_{FE} ($\times 10^3$ N/mm ²)	$c_{F\sigma_u}$ (N/mm ²)	c_{FA} (mm ²)
	UCCF	156	1680	18.4
	CFRP(主筋)	136	2350	18.4**
	CFRP(帯筋)*	230	4900	9.0

* に関しては公称値

σ_y : 降伏応力度、Y: 降伏比、 ϵ_u : 伸び、 c_{FE} : ヤング率
 $c_{F\sigma_u}$: 引張強さ、 c_{FA} : 断面積 (**は炭素繊維のみ)

形は、T および TS 試験体については軸力比 $N/N_0=0.1$ の場合で $R=2\%$ 、 $N/N_0=0.3$ では $R=1.5\%$ 、
 また、 $N/N_0=0.5$ では $R=1\%$ である。
 TS-A, B 試験体については、軸力比 $N/N_0=0.1$ の場合で $R=1.5\%$ 、
 $N/N_0=0.3$ および 0.5 の場合は $R=1\%$ である。 $N/N_0 \leq 0.3$ の試験体
 の場合、耐力が最大の 90% に減少
 するのは $R \geq 2\%$ の時であった。
 $N/N_0=0.5$ の大きな軸力下の試験体
 の内、T-5 は $R=1.5\%$ で横補強鋼管
 の溶接部が破断し、TS-A5 および
 TS-B5 は $R=2 \sim 3.5\%$ サイクルにお
 いて帯筋が破断した。それ以上大

きな層間変形では軸力保持不能となり実験を終了した。

表-2 試験体一覧

試験体名	軸力比	主筋	配筋形式	横補強形式	σ_B	Qmax
T-1	0.1	非硬化型	X形	横補強鋼管	38	125
T-3	0.3				39	186
T-5	0.5				37	248
TS-1	0.1				38	207
TS-3	0.3				44	294
TS-5	0.5				39	305
TS-A1	0.1	硬化型	従来型	UCCF帯筋	39	187
TS-A3	0.3				41	221
TS-A5	0.5				36	215
TS-B1	0.1				39	185
TS-B3	0.3				40	201
TS-B5	0.5				40	215

σ_B : コンクリートシリンダー強度 (N/mm^2)、Qmax: 最大耐力 (kN)

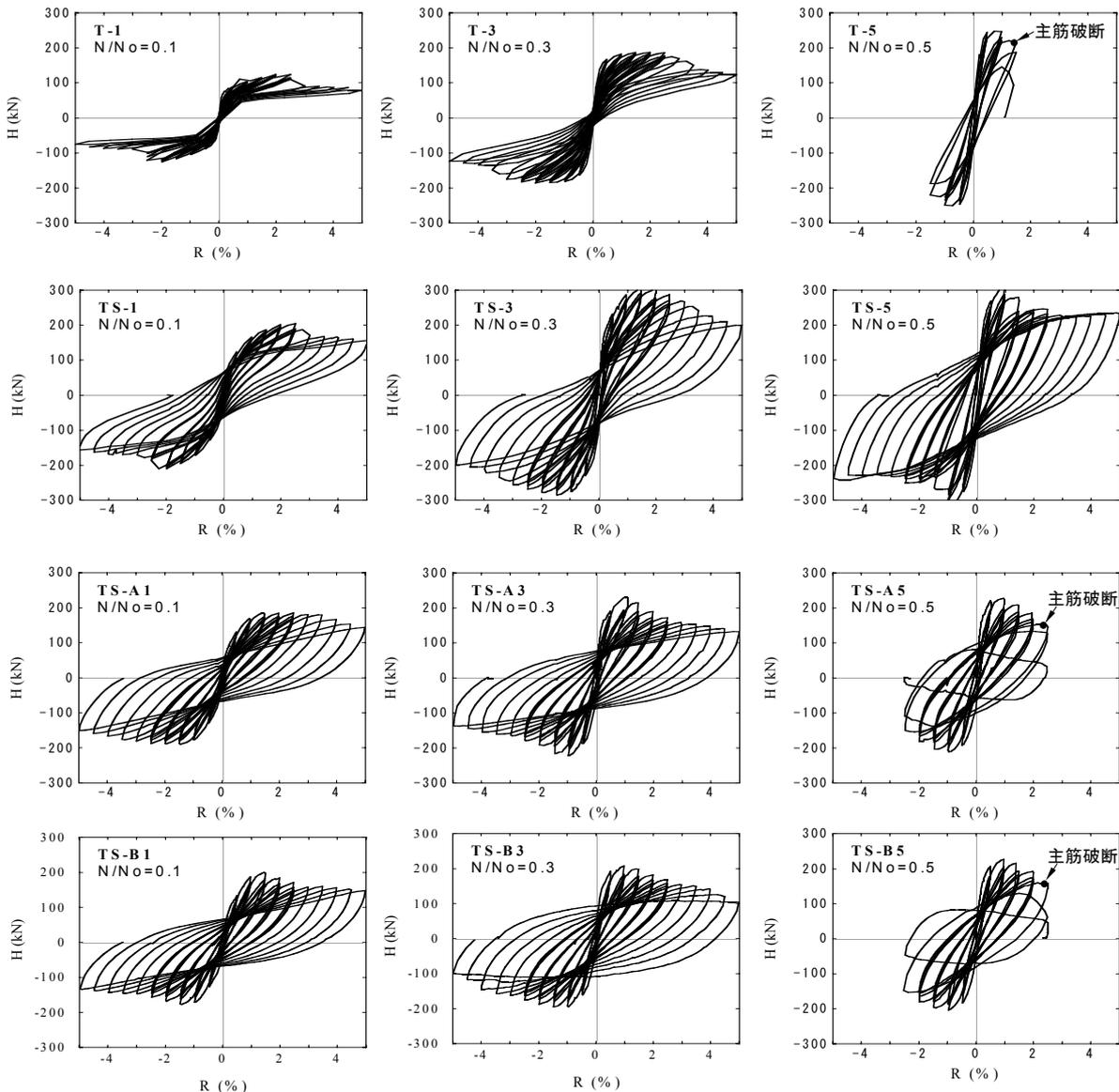


図-3 水平力-層間変形角関係

T 試験体と TS 試験体の履歴曲線を比較すると、炭素繊維やコンクリートはエネルギー吸収能力が乏しい材料であるので、内蔵鋼管無しの T 試験体はループが細く、エネルギー吸収能力は極めて低いが、 $N/N_0 \leq 0.3$ であれば水平耐力は $R=2.5\%$ まで増加し続け、その後も軸力を保持し続ける。 $N/N_0=0.5$ のような高軸力下では $R=0.5\%$ 程度の変形で損傷し、 $R>1\%$ の変形では軸力保持能力を失う。これに対して、鋼管を内蔵する TS 試験体は、エネルギー吸収能力が高く、 $N/N_0=0.5$ の高軸力下においても $R=5\%$ の大変形時まで軸力を保持し続ける。

TS 試験体と主筋、配筋形式およびコンクリートの補強形式が異なる TS-A 試験体は、高軸力 ($N/N_0=0.5$) 下での軸力保持可能な R の最大値は TS 試験体より小さい。履歴ループは、TS 試験体の場合やや逆 S 字形の細かいループとなっているのに対し、TS-A 試験体は紡錘形である。主筋が非硬化・硬化型であることによる性能の違いは、TS-A と TS-B 試験体の履歴曲線を比較する限り明瞭ではない。

3.2 破壊性状

鋼管横補強された試験体 (T, TS) は、どの試験体も $R=1\%$ 時に端部のコンクリートに水平方向のひび割れが観察された。実験後に鋼管を剥ぎ取り観察したコンクリートと UCCF の破壊状況を写真—1 に示す。コンクリートには材端から、 $N/N_0=0.1$ の試験体では 10mm の範囲にわずかに、 $N/N_0=0.3$ の試験体では 20mm の範囲に曲げひび割れが見られた。T-5 試験体に関しては斜主筋に沿ったひび割れも見られた。TS 試験体にも T 試験体と同様のひび割れが生じていた。T 試験体の斜主筋の半分は破断していたが、TS 試験体の斜主筋は破断していなかった。

TS-A, B に関しては、 $R=1\%$ サイクルまでひび割れが生じなかった TS-A1 を除き、全試験体において、初期荷重時の水平力 $H=120\sim 170\text{kN}$ の時に、ウェブ部分にひび割れが生じた。その後、 $R \geq 1.5\%$ の層間変形が生じると、ひび割れが生じた付近のコンクリートが剥離した。 $R=2.5\%$ にな

ると、フランジ側面に縦方向のひび割れが観察される試験体もあった。特徴的であったのは、ひび割れが特に柱中央部に集中したことである。

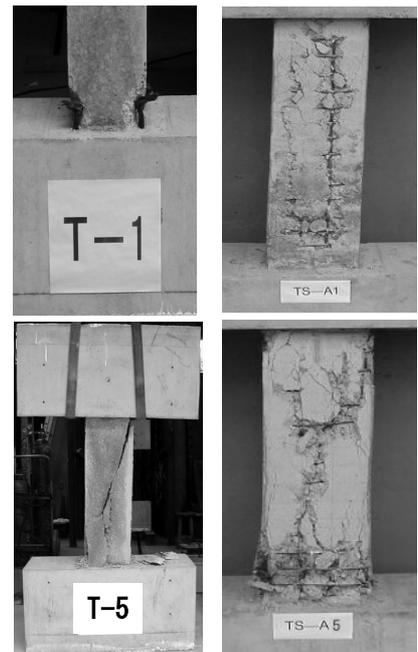
写真—1 の TS-A1 および TS-A5 から、その破壊の様子

がわかる。中央の主筋（最外縁の主筋ではない）に沿ったようなひび割れが生じている。TS-B 試験体にも TS-A と同様の損傷が生じていた。TS-A5 のような軸力が大きい試験体は上下端部でその CFRP 帯筋が破断していたが、主筋が破断した試験体はない。

3.3 主筋のひずみ挙動

図—4a に TS 試験体における主筋の中央部のひずみ—正側荷重サイクルのピークでの層間変形角 (R) 関係を示す。ゲージの貼付位置は図—1 に示している。図中の鉛直破線は、最大耐力時の R を示す。ひずみを中央部 (図—1 の $\varepsilon_1, \varepsilon_2$) と端部 ($\varepsilon_3, \varepsilon_4$) とで比較すると概ね等しかった (従って図—4a に $\varepsilon_3, \varepsilon_4$ は示さない)。T 試験体のひずみ挙動は TS 試験体と同様である。

T および TS 試験体に関しては、早期に壊れた T-5 を除けば、引張側の斜主筋に最大耐力時に 0.2% (TS-3) $\sim 0.8\%$ (TS-1) の引張ひずみが生じている一方、圧縮側の斜主筋には、圧縮ひずみは殆ど生じていない。このことから、斜主筋は引張応力のみを負担することによって柱の水平抵抗に寄与していることがわかる。また、図には示していないが、鉛直方向の UCCF 主筋に生じたひずみは斜主筋のひずみに比べて著しく



写真—1 実験後の試験体 (T-1, T-5, TS-A1, TS-A5)

小さく、主筋として機能していないことがわかった。

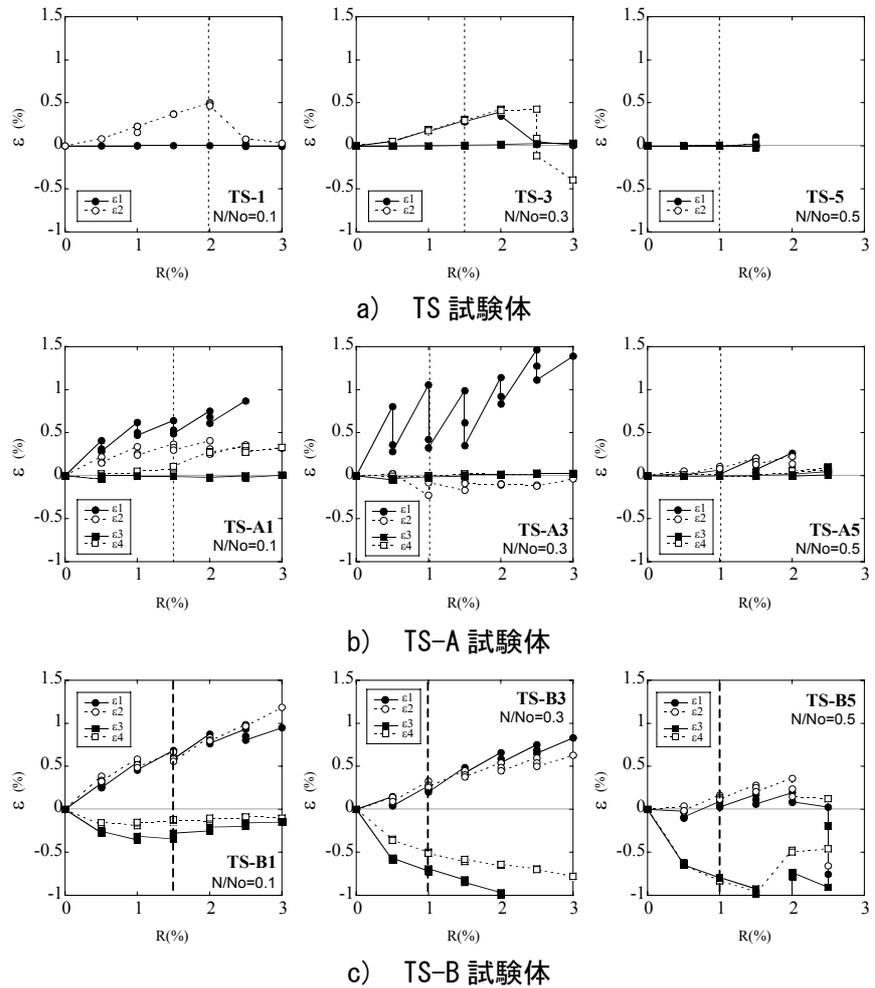
図—4b に図—1 に示す位置の TS-A および TS-B 試験体の主筋のひずみ (柱上部, $\epsilon_1 \sim \epsilon_4$) を示している。TS-A 試験体の場合も、X 形配筋試験体 (T, TS) と同様に、UCCF 主筋には圧縮ひずみが殆ど生じておらず、圧縮抵抗していないことがわかる。一方、軸力比 $N/N_o=0.5$ の TS-A5 の引張側主筋には殆どひずみが生じていないものの、 $N/N_o \leq 0.3$ の試験体には、最大耐力時に、0.5% (TS-A1) ~1% (TS-A3) の引張ひずみが生じている。TS-A 試験体と異なり、TS-B 試験体には引張ひずみのみでなく圧縮ひずみも生じている。主筋に生じた引張ひずみは、TS-A 試験体の UCCF と TS-B 試験体の CFRP とで同程度の大きさであった。

図—4 を見ると $N/N_o=0.5$ の試験体の主筋の引張ひずみは、高軸力によって柱の全長が縮むため、いずれも小さい。従って、このような高軸力下の柱における UCCF および CFRP 主筋の効果は小さい。

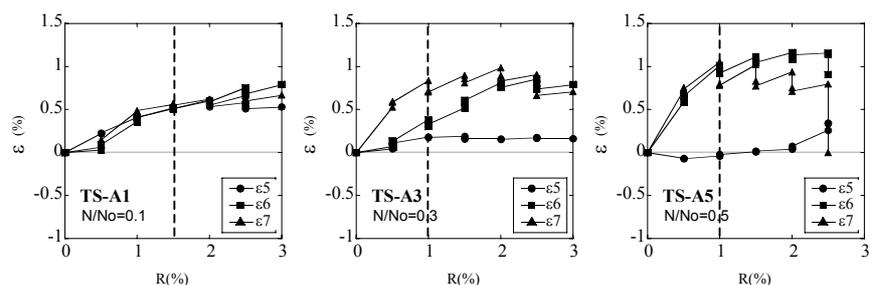
3.4 横補強材のひずみ挙動

図—5 は TS-A 試験体の図—1 に示す CFRP 帯筋のひずみの各 R 時でのピークにおける値を示している。TS-B 試験体の帯筋のひずみ挙動は TS-A と同様であった。軸力比 $N/N_o=0.1$ の試験体を除けば材端部の帯筋は殆ど横補強に寄与していない (ϵ_5 参照) が、柱端部から概ね柱せいの距離だけ離れた位置

の帯筋のひずみ (ϵ_7) は増加している。各試験体の最大耐力時における帯筋のひずみに注目すると、 $N/N_o=0.1$ の場合は 0.5% 程度だが、軸力比に比例する形で増加し、 $N/N_o=0.5$ の場合は 1% 程度の引張ひずみが生じている。TS-B の帯筋に生じるひずみの方がやや大きかったが、主筋が UCCF の場合も CFRP である場合も、CFRP 帯筋に期待できる帯筋としての効果は概ね同じレベルである。



図—4 主筋のひずみ—層間変形角関係



図—5 CFRP 帯筋のひずみ—層間変形角関係

3.5 耐力算定

図—6a, bに T および TS 試験体の軸力—せん断累加耐力線 (QN 相関曲線) を示す。コンクリート強度は寸法効果を考慮してシリンダー強度 39N/mm^2 (シリンダー強度は概ねどの試験体も同じ) を 0.89 倍³⁾した値 (34.6N/mm^2) を用い、内蔵円形鋼管の降伏応力度は表—1 の値を用いた。主筋に関しては、X 形配筋された UCCF の引張力のみを考慮することとし、耐力時に生じていたひずみ (図—6a, b の () の値) に UCCF の軸剛性を乗じた値を UCCF の断面応力とする。軸力比 $N/N_0 \geq 0.3$ の試験体に関しては、耐力を過少評価している。この原因については今後の研究課題としたい。 $N/N_0=0.1$ の試験体に関しては計算耐力と実験耐力は概ね一致している。

図—6c は TS-A および TS-B の QN 相関曲線である。コンクリート強度と鋼管の強度は上記と同様の値を用いる。試験体の主筋には最大耐力時において概ね 0.5% のひずみが生じていた (図—4 参照)。これは UCCF 引張試験の最大ひずみの約 $1/3$ であり、この場合主筋の断面には 13.8kN の応力が生じている。計算において、主筋は引張力に対してのみ弾性抵抗するが、 13.8kN 以上の応力は負担しないとして計算した。TS-A 試験体の実験結果は耐力線と概ね等しい。TS-B 試験体の CFRP 主筋は要素実験でその圧縮性状を調べておらずわからないので、この耐力算定法の妥当性は不明であるが、参考のために記した。

4. 結論

平行弦連続炭素繊維を主筋に用いたコンクリート柱の一定軸力下における曲げせん断性状を、12 体の試験体を用いて実験的に検討し、以下の結論を得た。

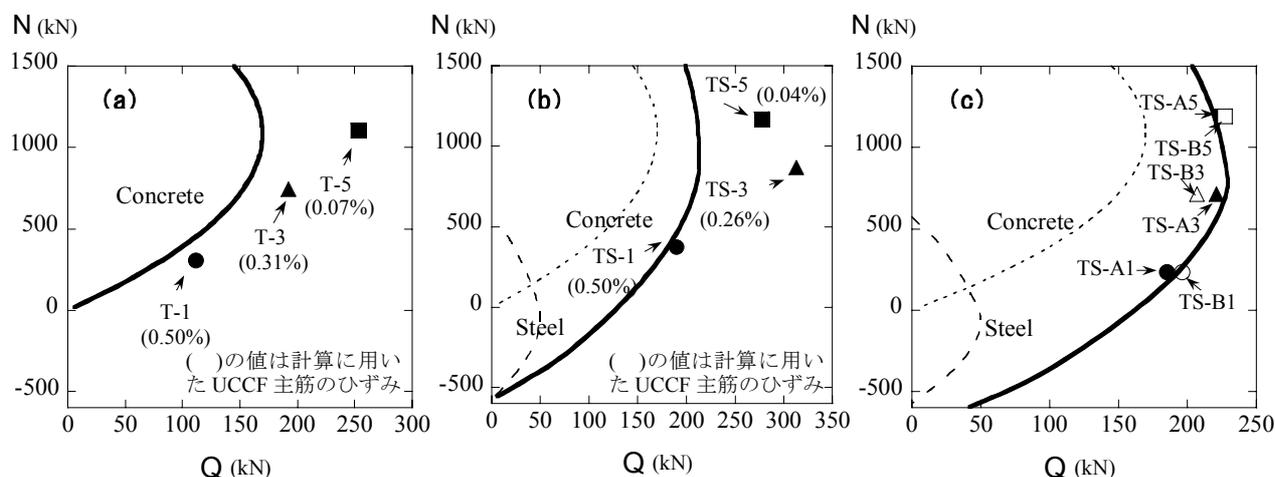
- 1) 炭素繊維を主材料とする主筋は、表面に付着力が働かない弦材であるため、圧縮には抵抗しない。しかしながら、X 形配筋または帯筋を組み合わせた通常の鉄筋コンクリート柱と同様の配筋形式とすれば、軸力比 0.3 以下の柱の引張主筋としては有効に機能する。
- 2) 市販されている硬化型炭素繊維管を切断して製作した帯筋は、最大耐力時には横補強効果を発揮する。

謝辞

本研究で述べた実験に当っては文部技官川口晃、久島昭久、有働文久各氏の協力を得た。また、山口浩平助手 (九州大学工学研究院) には計画全般に助言を頂いた。深く感謝します。

参考文献

- 1) Paulay, T. and Binney, J.R.: Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls, ACI Special Publication 42, Vol.2, pp.579-598, 1974
- 2) 若林 實, 南 宏一: X 型配筋を用いた鉄筋コンクリート柱の耐震性能について, 第 2 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.433-436, 1980.6
- 3) 中原浩之, 稲井栄一, 崎野建治: コンクリート充てん角形鋼管短柱の中心圧縮耐力, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 44, pp.167-174, 1998. 3



図—6 QM 耐力線と実験結果