

神戸大学工学部 正会員 ○西野孝仁
神戸大学大学院 古川哲也
神戸大学工学部 三谷 勲

1. 緒言 鋼構造部材がその機能を喪失する要因に局部座屈・全体座屈等がある。筆者らは円形鋼管柱材の局部座屈形成を炭素繊維のフープ効果を利用し抑制する手法を提案し、短柱圧縮試験及び曲げせん断実験により、炭素繊維が局部座屈の形成を抑制し、円形鋼管柱材の変形能力を飛躍的に向上させることを明らかにした¹⁾。本研究は鋼構造部材が機能を喪失する残りの要因である全体座屈を抑制するために、鋼構造圧縮材を炭素繊維で座屈補剛する手法を提案し、座屈耐力及び座屈後耐力向上に対する炭素繊維補剛の効果に関する基礎資料を得ることを目的としている。

2. 実験概要 試験体の形状・寸法を図 1 及び表 1 に示す。試験体は細長比 2.0 の平鋼 (SS400) であり CFRP を試験体全長に渡って接着させている。CFRP は繊維方向が一方向である炭素繊維と結合材であるエポキシ樹脂で構成されており、平鋼弱軸面の材長方向にエポキシ樹脂を浸透させながら炭素繊維を一面につき 5 層貼り付けた。材端部の CFRP は外力が直接導入されないように斜めにカットした。各材料の機械的性質を表 2 に示す。試験体数は 2 面補剛、1 面補剛及び無補剛の 3 体である。載荷装置を図 2 に示す。載荷は万能試験機による両端ピン支持の中心圧縮であり、1 面補剛の場合も同様に平鋼の図心を載荷した。試験体両端部の材軸方向変形を変位計で、また材長方向 10 等分点両面の材軸方向ひずみをひずみゲージで測定した。

3. 実験結果 軸力 N と軸変形 δ の関係を図 3 に示す。軸力は降伏軸力 $N_y = A_s \cdot \sigma_y$ で、また軸変形は降伏軸変形 $\delta_y = L \cdot \epsilon_y$ で無次元化されている。ここに A_s は平鋼の断面積である。無補剛材の場合、最大耐力に達する前にたわみ変形が大きくなるため耐力の増加が緩慢となり、材中央部曲げ圧縮側の塑性化によって座屈が生じる。これに対して補剛された材の場合、CFRP が軸力を分担するため弾性限界点の発現は無補剛の場合に比べ遅延する。また材中央部曲げ圧縮側の塑性化によって耐力の増加が緩慢となるが CFRP によって曲げ剛性が增大しているため座屈せず、その後も耐力は増加し、1 面補剛の場合は塑性化領域の拡大によって、また 2 面補剛の場合は曲げ圧縮側 CFRP の部分剥離に伴って座屈が生じる。剥離は材片側半分における鋼とエポキシ樹脂の界面で生じた。座屈耐力は無補剛、1 面補剛、2 面補剛それぞれの場合について $0.235N_y$ 、 $0.452N_y$ 、 $0.679N_y$ となり、炭素繊維で補剛することにより座屈耐力は増大する。座屈後、1 面補剛の場合には比較的緩やかに耐力が劣化するのに対し、2 面補剛の場合には曲げ圧縮側 CFRP の部分剥離によって一面補剛の座屈後耐力と同程度まで急激に低下する。座屈後、1 面補剛及び 2 面補剛の場合とも炭素繊維破断の前に曲げ引張側 CFRP の全面剥離が生じた。剥離は全て鋼とエポキシ樹脂の界面で生じており、曲げ引張側 CFRP 剥離時の軸方向変形量は 1 面補剛の場合

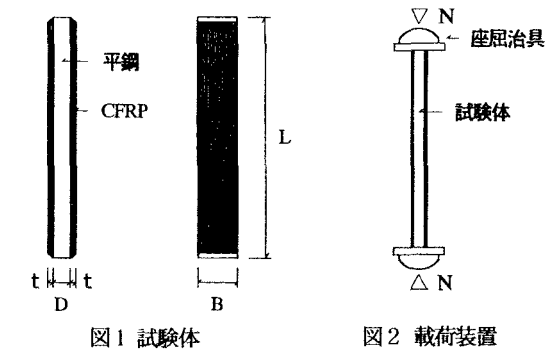


表 1 試験体寸法

平鋼			炭素繊維		CFRP	
L(cm)	B(cm)	D(cm)	設計厚さ(cm)	層数	t(cm)	
38.3	6.29	0.791	0.0165	5	2 面補剛	1 面補剛
					0.420	0.340

表 2 材料の機械的性質

平鋼		炭素繊維		エポキシ樹脂
降伏応力 $\sigma_y(t/cm^2)$	降伏ひずみ $\epsilon_y(\%)$	弾性係数 $E_c(t/cm^2)$	破断ひずみ $\epsilon_u(\%)$	接着強度 $\tau_y(t/cm^2)$
2.95	0.140	4000	0.750	0.120

が $7.94 \delta y$ 、2面補剛の場合が $5.44 \delta y$ である。曲げ引張側 CFRP 剥離時の耐力は無補剛の場合に比較して、1面補剛では 3.1 倍、2面補剛では 2.7 倍となり、炭素繊維で補剛することにより座屈後耐力は増大する。図 4 に 2面補剛における座屈時の鋼と CFRP の分担軸力分布を示す。CFRP の分担軸力は両面同位置のひずみゲージ値より平面保持を仮定して求めた各層炭素繊維のひずみから算出した。CFRP の分担軸力は材中央部ほど大きくなり、それに伴って平鋼の分担軸力は減少する。材中央部における曲げ圧縮側 CFRP の軸力分担率はおよそ 47% であり、CFRP は引張時だけでなく圧縮時においても相応の耐力を発揮する。図 5 に鋼-エポキシ樹脂界面に作用する接着応力分布を示す。接着応力はエポキシ樹脂の接着強度 τ_y で無次元化している。(a) が 2面補剛における曲げ引張側と曲げ圧縮側、(b) が 1面補剛における曲げ引張側の接着応力分布である。接着応力 τ は上述の CFRP 軸力を用い、次式により算出した²⁾。

$$\tau = \frac{\Delta N_{CFRP}}{B \cdot \Delta L}$$

ここに ΔN_{CFRP} は CFRP の材長方向の軸力差、 B は平鋼の幅、 ΔL はひずみゲージの貼付間隔長である。2

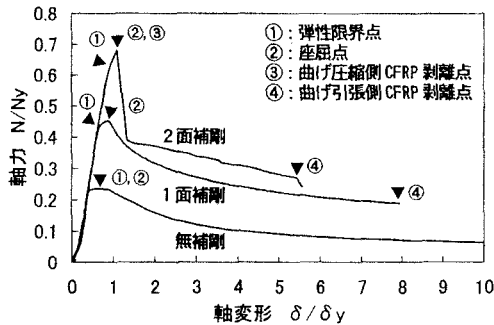


図3 軸力-軸変形関係

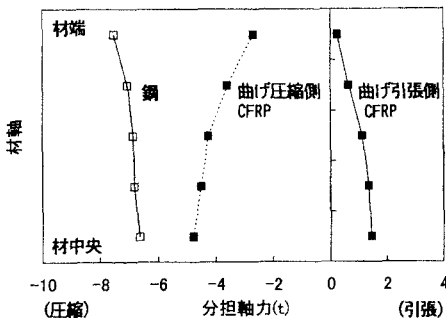


図4 分担軸力分布

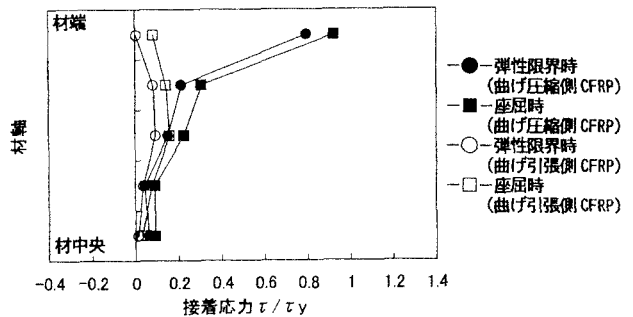
面補剛された座屈時の界面接着応力は材端部曲げ圧縮側が他に比べて卓越しており、ほぼ接着強度 τ_y に達している。また 1面補剛の場合における界面接着応力は曲げ圧縮の影響により材端と材中央部の中間点近傍が卓越しており、剥離時には接着強度 τ_y 程度となる。

4. 結論 全体座屈する鋼構造圧縮材に対する炭素繊維補剛の効果に関する基礎資料を得るために平鋼の座屈実験を行い、実験の範囲内で以下の結論を得た。

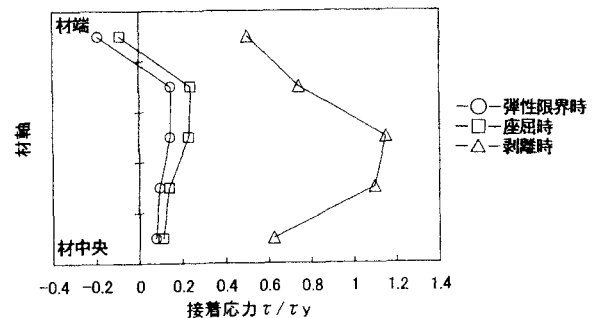
- 1) 炭素繊維補剛により座屈耐力及び座屈後耐力を増大させることが可能となる。
- 2) 座屈耐力は 2面補剛の方が 1面補剛よりも増大するが、2面補剛の場合には曲げ圧縮側 CFRP 剥離に伴う座屈が生じ、座屈後耐力は 1面補剛と同程度となる。
- 3) 鋼-エポキシ樹脂界面の接着応力は、座屈時は曲げ圧縮側における材端部が卓越し、座屈後は曲げ引張側における材端部と材中央部の中間点近傍が卓越する。

参考文献

- 1) 西野孝仁、古川哲也、三谷勲：CFRP によって局部座屈形成を抑制した円形鋼管柱材の変形能力、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、2000 年 9 月、pp. 463-464
- 2) 森川英典、小林秀恵、竹田達也、深貝孝義：実施工条件を考慮したコンクリート部材の鋼板接着補強におけるエポキシ樹脂接着性能の評価、建設工学研究所論文報告集第 40-A 号、平成 10 年 11 月、pp. 163-183



(a) 2面補剛



(b) 1面補剛

図5 接着応力分布