

板厚テーパを有する箱形断面柱の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究

福山大学 正会員 上野谷 実 福山大学 正会員 中村 雅樹
日本鋼管(株) 山本 定弘 福山大学 学生会員 ○山本 幸司

1.はじめに

剛性を上げずに鋼製橋脚の耐震性を向上させる 1 つの方法として、塑性化が予想される箇所では部材軸方向に断面寸法を変化させた部材（以下テーパ部材という）を用いる事が考えられる。この方法においてテーパのつけ方を工夫すれば、作用曲げモーメントと抵抗曲げモーメントの部材軸方向分布が等しくなり、塑性変形はひずみ硬化に関係なく広範囲に発生させる事ができる。したがって、一断面への塑性変形集中を防ぎ、局部座屈による耐荷力の低下を遅らせることができると考えられる。ここでは板厚テーパを有する箱形断面柱の塑性域の広がり、塑性変形性能、エネルギー吸収量について考察する。

2.供試体および実験方法

供試体は図-1 に示すように、高さ 1500mm の 5 パネルからなる無補剛正方形箱形断面柱を用いた。柱上側 2 パネル(P4, P5)は等断面部分、柱基部側 3 パネル(P1~P3)はテーパ部分である。柱基部の断面形状 300×300mm、板厚 12mm を基本とし、テーパ部分の板厚を 12~12mm、12~9mm、12~7.5mm、12~6mm に変化させた。この 5 種類の供試体を TPC12-12、TPC12-9、TPM12-9、TPC12-7.5、TPC12-6 と呼ぶ。

図-2 に荷重装置を示す。実験は一定軸力のもと、供試体頂部に水平荷重を載荷する繰返し載荷と単調載荷を変位制御で静的に行った。柱基部を固定端とする片持ちばり理論を用い、水平荷重により載荷点が降伏するときの水平変位を降伏水平変位 δ_{yt} とし式(1)~(4)で計算した。そして、 δ_{yt} に剛体回転による水平変位を加えた δ_y を実験で用いる降伏水平変位とした。繰返し載荷はこの δ_y を片振幅とした両振り載荷を $+1\delta_y$ 、 $-1\delta_y$ 、 $+2\delta_y$ …と図-3 に示すように漸増するよう行った。単調載荷は一定方向に載荷した。また、供試体テーパの度合を表すパラメータとしてテーパ率 η を式(5)で定義する。表-1 に供試体の諸元を示す。

表-1 水平変位と載荷荷重

供試体名	σ_y (MPa)	N (kN)	H_y (kN)	δ_{yt} (mm)	δ_y (mm)	η
TPC12-12	285	535	187	5.32	9.24	0.00
TPC12-9	265	550	192	6.25	10.81	0.51
TPC12-7.5	273	565	197	6.95	12.23	0.80
TPC12-6	260	540	188	7.28	12.36	1.00
TPM12-9	265	549	191	6.24	11.57	0.44

$$P_y = \sigma_y A \cdots (1), \quad N = 0.15 P_y \cdots (2)$$

$$H_y = \left(\sigma_y - \frac{N}{A} \right) \frac{Z}{h} \cdots (3)$$

$$\delta_{yt} = \frac{H_y h^3}{375E} \left(\frac{61}{I_1} + \frac{37}{I_2} + \frac{19}{I_3} + \frac{8}{I_4} \right) \cdots (4), \quad \eta = \frac{h}{l} \left(1 - \frac{M_{yU}}{M_{yL}} \right) \cdots (5)$$

ここに、 σ_y ：降伏応力、A：供試体基部の断面積、N：鉛直荷重、 H_y ：降伏水平荷重、Z：供試体基部の断面係数、h：供試体高さ、E：弾性係数(公称値)、 $I_1 \sim I_4$ ：各パネル中間の断面 2 次モーメント、 δ_{yt} ：はり理論による降伏水平変位、 δ_y ：実験で用いる降伏水平変位、 η ：テーパ率、l：テーパ部分の高さ、 M_{yU} 、 M_{yL} ：一定軸力を考慮したテーパ部分の上下端断面の降伏モーメントである。

3.実験結果および考察

図-4 に TPC12-6 のひずみ分布を示す。横軸は箱形断面の軸方向四隅に貼付したひずみゲージの値 ε_x 、縦軸はパネル高さ x をそれぞれ降伏ひずみ ε_y と供試体高さ h で無次元化している。グラフ上に降伏の判定を容易にするためにひずみ ε_x が降伏ひずみに達するときの値、すなわち、 $\varepsilon_x / \varepsilon_y = \pm 1$ の線を示している。この線を

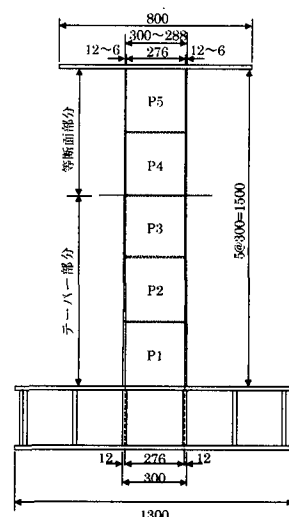


図-1 供試体

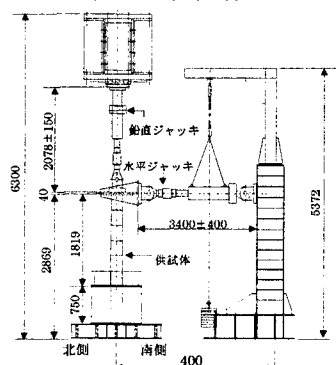


図-2 荷重装置

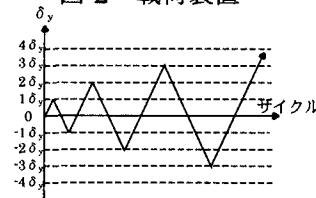


図-3 荷重サイクル

越えた場合を降伏と判定する。テーパー率の大きい供試体ほど $1\delta_y$ の降伏範囲が広がる。また降伏後の塑性域は供試体基部から始まり、テーパー率の大きな供試体ほど応力勾配が小さく、テーパー部分の上部まで広がる。各供試体の局部座屈の位置は、TPC12-12、TPC12-9、TPM12-9 ではP1(幅厚比パラメータ $R_f=0.43, 0.45, 0.44$)、TPC12-7.5 ではP2($R_f=0.52$)、TPC12-6 ではP3($R_f=0.76$)というように、 $1\delta_y$ の時に広がった降伏範囲以内で最も幅厚比パラメータが大きいパネルで生じている。

図-5 に水平荷重-水平変位履歴曲線の各サイクルの正と負の最大変位点における水平荷重の絶対値の平均を結んだ各供試体の包絡線を示す。横軸は水平変位 δ を降伏水平変位 δ_y で、縦軸は水平荷重 H を降伏水平荷重 H_y で無次元化している。表-2 に強度と塑性変形性能について示す。テーパー率が小さいほど剛性が高いパネルで局部座屈を起こしているため最大水平荷重(H_{max})は大きくなる。そして局部座屈が生じると強度が徐々に減少していく。しかし、幅厚比パラメータが0.5以上の場所で局部座屈を起こすと、強度が急激に低下している。それは、薄いパネルのたわみが急激に増加するため、強度劣化が生じたと考えられる。そこで、塑性変形性能の大きい供試体 TPC12-12 および TPC12-9 について比較すると、TPC12-9 は H_{max} が TPC12-12 に劣るが、塑性変形性能についてはほぼ同じである。また、TPC12-9 と TPM12-9 の比較をすると、単調荷重は繰り返し荷重に比べ、たわみがゆっくりと増加するため塑性変形性能も大きい。しかし強度に関しては、繰り返し荷重はひずみ硬化が早く起こるため H_{max} は大きい。

図-6 に各供試体の水平荷重-水平変位履歴曲線において、各サイクルの履歴曲線の面積をそのサイクルにおける供試体のエネルギー吸収量 Δ として示す。横軸は包絡線と同じく水平変位を降伏水平変位で、縦軸は各サイクルのエネルギー吸収量を弾性限エネルギー吸収量 $\Delta_E = H_y \cdot \delta_y / 2$ で無次元化している。テーパー率が大きくなるにつれて局部座屈による強度劣化が生じ、エネルギー吸収性能が低下する。エネルギー吸収性能に優れている供試体 TPC12-12 および TPC12-9 を比較してみても、エネルギー吸収量が $6\delta_y$ までは比例的に増加している。しかし、TPC12-9 は $7\delta_y$ 以降エネルギー吸収性能が低下している。

4.まとめ

実験結果から等断面とテーパー部材の弾塑性挙動を比較した結果、以下のことが明らかになった。

1. テーパー率が大きいほど $1\delta_y$ の降伏域がテーパー部分の広い範囲に生じる。また、降伏範囲以内で最も幅厚比パラメータの大きいパネルで局部座屈が生じる。
2. テーパー率が大きいほど剛性が低いパネルで局部座屈するため、最大水平荷重は小さくなる。
3. テーパー率が小さいとき、塑性変形性能およびエネルギー吸収性能は等断面部材とほぼ同じである。
4. テーパー率が大きいとき、幅厚比パラメータ $R_f=0.5$ 以上の場所で局部座屈を起こすと、急激なたわみ増加による強度劣化により、塑性変形性能およびエネルギー吸収性能は著しく低下する。
5. 単調荷重は繰り返し荷重に比べ、たわみがゆっくりと増加しているため塑性変形性能は大きい。しかし強度に関しては、繰り返し荷重はひずみ硬化が早く起り、最大水平荷重が大きい。

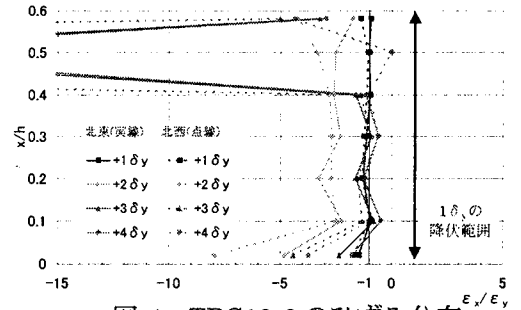


図-4 TPC12-6のひずみ分布

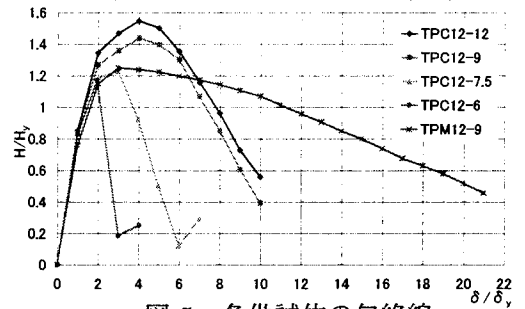


図-5 各供試体の包絡線

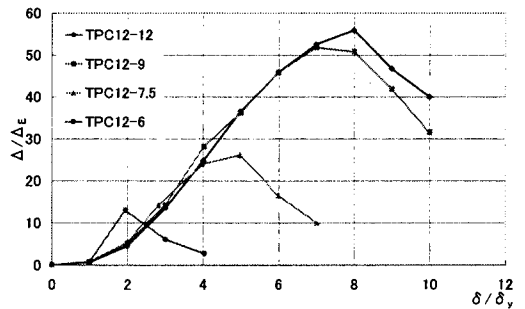


図-6 各供試体のエネルギー吸収量

表-2 各供試体の強度と塑性変形性能

供試体名	δ_{max} δ_y	$\delta_{0.5}$ δ_y	$\frac{H_{max}}{H_y}$	$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 K}}$		
				P1	P2	P3
TPC12-12	4.01	5.37	1.55		0.43	
TPC12-9	4.03	5.27	1.44	0.45	0.49	0.54
TPC12-7.5	2.99	3.27	1.23	0.45	0.52	0.62
TPC12-6	1.95	1.99	1.17	0.47	0.59	0.76
TPM12-9	4.00	6.52	1.25	0.44	0.48	0.50