

部分テーパ付きはり-柱の弾塑性履歴性状 に関する基礎的実験

酒造敏廣¹・川田真也²

¹正会員 工博 大同工業大学教授 工学部建設工学科 (〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

²学生会員 大同工業大学大学院工学研究科修士課程在学中 (〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

本論文は、部分テーパ付きはり-柱部材の弾塑性履歴性状を実験によって調べている。部分テーパ部材では、早期の塑性変形集中を防ぎ、局部座屈による耐力低下を遅延させる効果があることを示した。その特長として、等断面構造の場合よりも、剛性を上げないで損傷を小さくできること、および、履歴エネルギーが大きくなることをあげた。さらに、テーパ部フランジ・プレート内で塑性変形が一様になることに起因して、部材軸方向のわずかな区間において、塑性変形箇所が半サイクル毎に交番する場合があることも示した。最後に、部分テーパ構造の利点を橋脚部材に生かすためには、テーパ部で抵抗断面力が小さくなる箇所の補剛構造が重要になることを考察した。

Key Words : beam-column, partially tapered member, elasto-plastic, hysteretic behaviour

1. まえがき

兵庫県南部地震で被害を受けた鋼製橋脚¹⁾の損傷には、変断面はり・柱部材の断面変化点の付近で塑性変形し、局部座屈を起こしているものが多くあった²⁾。とくに、柱部材では、柱基部の中埋めコンクリート充填部直上の鋼等断面部分において、塑性変形が部材軸方向にあまり進展せずに、ごく限られた範囲に大きな損傷が現れた。これらは、繰返し力下で塑性変形が集中・累積して、局部座屈するという鋼構造部材の典型的な損傷パターンである。

その地震の後、鋼製橋脚の耐震性能を上げるために、柱の補剛構造の改善(断面のかど補強や補剛材剛比を上げること等)、断面形状の工夫、部分充填したコンクリートを考慮すること等について精力的に研究が行われ、部材断面の補強方法が種々提案されてきた(たとえば、文献3)~6)参照)。これらは、局部座屈に起因する復元力の急激な低下を防ぐ目的で、部材あるいは断面にねばりを持たせて、基本的な塑性変形能力を上げようとするものである。ほとんどの場合、補強された部材の剛性は大きくなり、橋脚の固有周期は小さくなる傾向にある。

ところで、剛性を上げずに部材の耐震性を上げる方法の一つとして、塑性化が予想される箇所で、部材軸方向に断面寸法を変化させた部材(以下、部分テーパ部材と言う)を用いることが考えられる⁷⁾。

この種の部材では、テーパの付け方を工夫すれば、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する⁷⁾。したがって、等断面構造で見られる一断面への損傷集中が回避できて、かつ、幅厚比が小さい板要素に低降伏比鋼を用いた場合と同様に、非弾性域でのねばりを引き出せる可能性がある。しかし、テーパ部で塑性域が一気に広がるために、繰返し力下で不安定な弾塑性挙動を示す可能性も否定できない^{8)~13)}。

これまでの土木鋼構造物のテーパ部材としては、長大橋のタワーや一部の橋脚で見られる部分テーパ柱、高さが変化する桁橋の腹板、変厚鋼板¹⁴⁾を用いた桁橋のフランジ・プレート等が挙げられる。また、腹板高さが一様に変化するH形鋼柱については、曲げ・圧縮耐荷力に関する研究^{15)~17)}も行われている。しかし、筆者らの知る限り、これまでのテーパ部材の使用は地震力を想定したものでなかったため、繰返し力下でどのような弾塑性性状を呈するかは、ほとんど解明されていない。

本研究は、定軸方向圧縮力の下で繰返し曲げを受ける部分テーパ付きはり-柱の弾塑性性状を明らかにするために、鋼製片持ち柱の交番載荷実験を行うものである。柱基部は、フランジ・プレート幅と腹板高さが部材軸方向に一様に変化する箱形断面のテーパ構造としている。テーパ率を

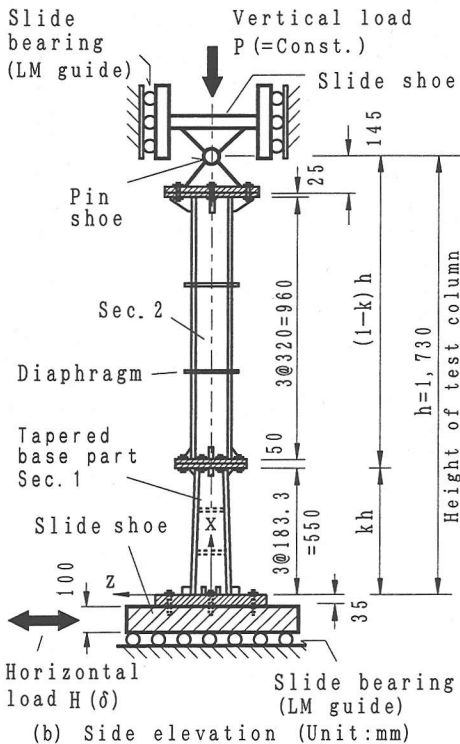
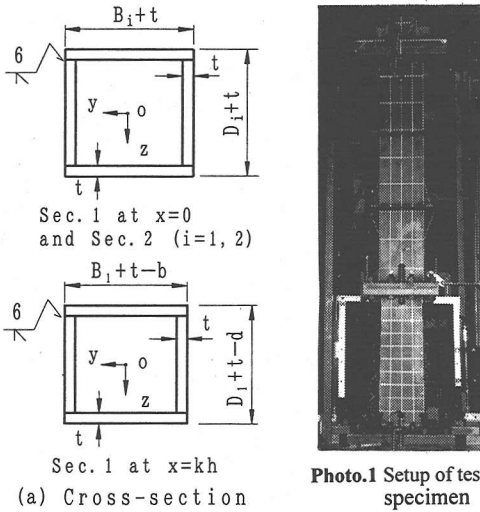


Fig.1 Test specimen and testing device¹⁰⁾

変化させた供試体 (計 10 体) を製作し、定鉛直荷重下で繰り返し水平力を載荷して実験を行う。

実験結果から、復元力-変位曲線、軸ひずみや曲率から見たテーパ部の塑性変形の累積性状、履歴消費エネルギー、損傷度合、および、損傷パターンを調べる。最後に、等断面構造との比較を通じて、部分テーパ部材に特有な弾塑性履歴性状やテーパ部材の有する耐震上の利点について考察する。

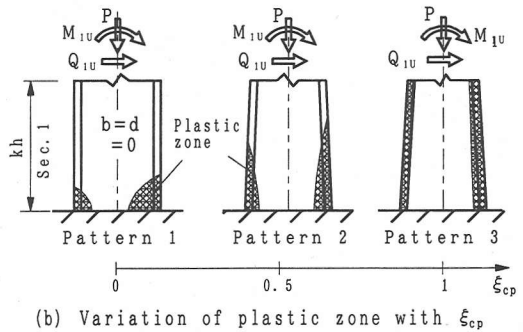
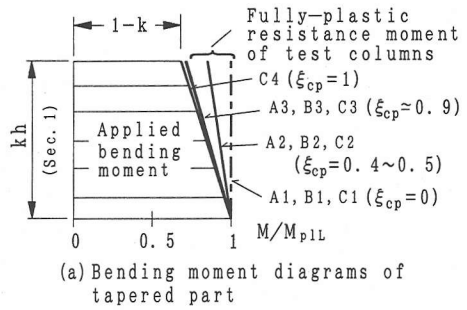


Fig.2 Variation of resistance bending moment and collapse patterns of tapered parts

2. 実験概要

(1) テーパー付き柱基部を持つ実験供試体

Fig.1 に示すように、2 つの無補剛箱形断面 Sec.1 と Sec.2 からなり、定鉛直荷重 P の作用下で繰り返し水平荷重 H を受ける鋼製片持ち柱 (計 10 体) の非弾性実験を行う。Sec.1 はフランジ幅 B_1 と腹板高さ D_1 がその下端から上端まで、それぞれ b および d だけ一様に変化するテーパ構造の箱形部材である。Sec.2 は等断面箱形であり、実験中は常に弾性範囲に留まる。

供試体は、Sec.1 上端と Sec.2 下端に溶接した 25mm 鋼板を高力ボルト接合して組み立てた。すべての供試体で、Sec.2 の部分は共通であり、柱高さ h と断面変化位置 ($k=0.318$) も同一である。Sec.1 の高さ kh は、テーパの大小による塑性変形や局部座屈箇所の変動を捉えられるように、フランジ・プレート幅 B の約 3 倍をとっている。

また、テーパ部材を柱基部や隅角部付近のはり・柱部材に利用することの可能性を探るため、鉛直荷重 P としては、Sec.1 の最下部断面 ($x=0$) の全塑性圧壊荷重 N_{yL} に対して、約 0.15 倍、0.075 倍の 2 種類を仮定した。これらの値は、断面が小さくなる Sec.1 上端 ($x=kh$) では 11~20% 大きくなる。以下、 P/N_{yL} を軸力比と呼ぶ。

さらに、テーパ部のフランジ・プレートと腹板

Table 1 Dimension and properties of test columns

Test columns	Items		Dimension (mm)				Plate slenderness			Column stiffness K_c (kN/m)	Taper ratio ξ_{cp} (Eq.(1))	Initial yield displacement δ_y (mm)	Vertical load P/N_{yL}
			$B_1=D_1$ (at bottom of Sec.1, $x=0$)	Plate thickness t	d	b	R_f ($x=0$)	R_{fu} ($x=kh$)	R_{wu} ($x=kh$)				
A1-R	-0	-0.14	180.7	8.96	0	0	0.40	0.40	0.40	4,165	0	13.6	0.14
A2-R	-0.47	-0.14	180.1		20				0.35	3,852	0.47	15.0	0.14
A3-R	-0.90	-0.14	180.7		40				0.31	3,536	0.90	16.5	0.14
B1-R	-0	-0.072	180.7		0				0.40	4,165	0	16.2	0.072
B2-R	-0.45	-0.072	180.1		20				0.35	3,852	0.45	16.0	0.072
B3-R	-0.88	-0.072	180.7		40				0.31	3,536	0.88	17.4	0.072
C1-SK	-0	-0.076	165.0	8.86	0	0	0.39	0.39	0.39	3,469	0	17.7	0.076
C2-SK	-0.44	-0.076	171.8		17	17	0.40	0.37	0.37	3,437	0.44	18.0	0.076
C3-SK	-0.88	-0.076	176.5		27	27	0.41	0.35	0.35	3,433	0.88	20.0	0.076
C4-SK	-1.0	-0.076	180.1		31	31	0.42	0.35	0.35	3,491	1.00	20.0	0.076

Notes; B_1, D_1, t, b and d : See Fig.1, $B_2=D_2=180\text{mm}$, $h=1,730\text{mm}$, R_f : Nondimensionalized plate slenderness of flange and web plates at bottom cross-section of Sec.1, R_{fu} and R_{wu} : Nondimensionalized plate slenderness of flange and web plates at upper cross-section of Sec.1, respectively, and N_{yL} : Squash force of bottom cross-section of Sec.1.

Table2 Mechanical properties of test columns (SS400)

Items	Young's modulus $E (\times 10^5 \text{ MPa})$	Poisson's ratio μ	Yield point σ_y (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	ϵ_H (%)
A and B series	2.125	0.289	287	434	1.7
C series	2.058	0.262	318	459	1.5

Notes; ϵ_H corresponds to onset of strain hardening.

の幅厚比は、局部座屈が早期に発生しないように、柱基部下端で約 18~20 とした。これは幅厚比パラメータ R で約 0.4 に相当する¹⁸⁾。テーパの付け方によって、 R は柱基部上方で若干小さくなる。柱の細長比は、テーパを付けない等断面の場合で、細長比パラメータ λ に換算して 0.5 程度である¹⁸⁾。

供試体 10 体の実測寸法諸元と各種パラメータ等を Table 1 にまとめる。同表において、供試体の記号はその特徴を表しており、以下のことを意味する。

(表記例) C3 - S K - 0.88 - 0.076
 ① ② ③ ④ ⑤

- ①実験した柱のシリーズ名 (A~C) と番号
- ②フランジ・プレート、腹板の両方にテーパを付けた場合を S、腹板のみにテーパを付けた場合を R と記している。以下では、それぞれテーパタイプ S およびタイプ R と言う。
- ③同じシリーズで、柱の全体曲げ剛性 K_c が一定になるようにテーパを付けた場合は K と記す。
- ④式(1)で定義される無次元テーパ率 ξ_{cp} を表す。
- ⑤実験で仮定した柱の軸力比 P/N_{yL} であり、実験中の測定値の平均を示す。

すなわち、A, B シリーズは、柱基部下端で断面寸法が等しく、軸力比がそれぞれ約 0.14, 約 0.072 の

テーパタイプ R の供試体である。C シリーズは、テーパタイプ S で、軸力比 0.076 の曲げ剛性一定モデルであり、テーパが大きくなると剛性が小さくなる B シリーズと比較するための供試体である。

(2) 機械的性質

供試体に用いた SS400 鋼板から JIS5 号試験片(計 16 体)を製作した。材料試験から得られた供試体の機械的性質は Table 2 に示すとおりである。柱 A, B と C シリーズでは、製作に用いた鋼板が異なったため、降伏点で約 11%の差異が現れた。これは、無次元幅厚比 R から見ると、3%程度の差異があるのみである (Table 1 参照)。

(3) テーパー率 ξ_{cp} と抵抗曲げモーメント分布

テーパを付けた箇所の弾塑性性状を整理するため、次の無次元テーパ率を導入した⁷⁾。

$$\xi_{cp} = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{M_{plU}}{M_{plL}} \right) \quad (1)$$

ここに、 k は柱高さ h に対する柱基部高さの比 (= 0.318), M_{plU} と M_{plL} は軸方向力の影響を考慮した柱基部の上・下端断面の全塑性モーメントである。

上式は、 $\xi_{cp}=0$ のときに柱基部下端で全塑性状態、および、 $\xi_{cp}=1$ のときは、その上・下端で同時に全塑性状態に達するという条件から導いたものである。

本研究では、実験前に実施した予備計算の結果⁷⁾を踏まえて、テーパの影響が顕著に現れる $0 \leq \xi_{cp} \leq 1$ の範囲で ξ_{cp} を設定し、テーパ量 b, d を決めた (APPENDIX 参照)。

Fig.2(a)は、柱基部が全塑性状態となる作用曲げ

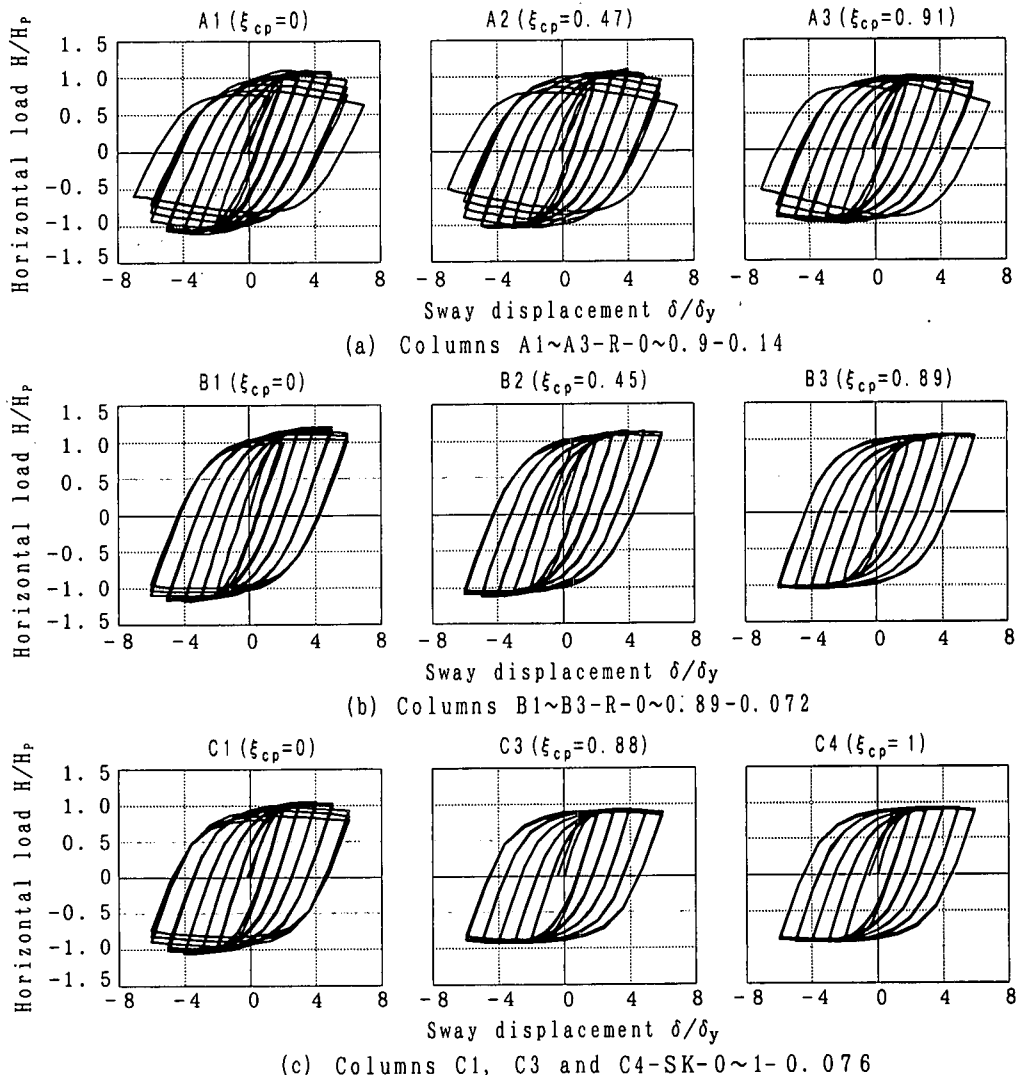


Fig.3 Horizontal load H - sway displacement δ/δ_y curves of test columns

モーメントに対して、各供試体の柱基部の抵抗曲げモーメントがどのように変化するかを示し、同図(b)はテーパ率 ξ_{cp} による塑性域の広がりの変動を模式的に表したものである。たとえば、 $\xi_{cp}=1$ のときの抵抗曲げモーメント分布は作用曲げモーメント分布と等しくなり、テーパ部全体に同時に塑性変形が生じると考えてよい。

(4) 実験方法

実験する柱の境界条件は Fig.1(b)に示したとおりである。水平変位を拘束した柱上部で鉛直荷重 P 、および、たわみ角を拘束した柱下端で水平荷重 H を載荷して、柱上端で P と H を同時に受ける片持ち柱の弾塑性挙動を再現できるようにした¹⁰⁾。

実験では、まず鉛直荷重 P を所定の値まで載荷し、

持続荷重として保持した後、繰り返し水平力 H を変位制御により柱基部下端の載荷板部分に与えた。具体的には、弾性実験結果から定めた初期降伏の水平変位 δ_y を基準にして、水平変位の初期値を $2\delta_y$ 、増分値を δ_y として、3 サイクルずつ、損傷を観察しながら、 $6\delta_y \sim 7\delta_y$ まで実験を続けた。

(5) 軸ひずみと曲率の測定方法

テーパを付けた柱基部内の弾塑性性状を実験結果から調べるときに、軸ひずみ ϵ_0 と曲率 ϕ を求めた。これらは、箱形断面の四隅に貼付したひずみゲージの測定値の和・差から換算した。

供試体为非弾性域に至る交番載荷実験で、ひずみゲージを用いて、 ϵ_0 と ϕ を求める方法の精度は文献10)で検討している。ひずみゲージの測定値から換

算した値は、 Π 形の摺動型変位計で測定した ϵ_0 と ϕ の変動性状をほぼ把握できることを確かめている。

3. 実験結果と考察

(1) 水平荷重 H -水平変位 δ 曲線

供試体の水平荷重 H -水平変位 δ 曲線の実験結果を Fig.3 に示す。図中、 H 、 δ は、それぞれ柱基部下端の全塑性モーメント M_{pl} から換算した塑性崩壊荷重 $H_p (=M_{pl}/h)$ と初期降伏水平変位 δ_y を用いて、無次元表示している。

a) 柱 A1~A3 (軸力比 0.14, タイプ R, 同図(a))

テーパ率 $\xi_{cp}=0$ で等断面柱基部を持つ柱 A1 では、 $|\delta|=6\delta_y$ のときに、 H - δ ループの最大耐力が徐々に低下し、局部座屈が進んでいることがわかる (Photo.2(a) 参照)。柱 A2 でも同様であり、 $\xi_{cp}=0.47$ のときは、テーパを付けた影響はほとんど現れていない。

しかし、テーパが大きい $\xi_{cp}=0.91$ の柱 A3 では、 $|\delta|\leq 6\delta_y$ の範囲で大きな耐力低下は起こっていない。この範囲では、等断面の柱 A1 と比べると、テーパを付けたことが有利に働いている。

b) 柱 B1~B3 (軸力比 0.072, タイプ R, 同図(b))

これらの供試体は、上の A シリーズに比べて軸力比が小さいために、安定した履歴ループを示していることがわかる。柱 B1 では、 $|\delta|=6\delta_y$ のときに、わずかな耐力低下が見られるが、B2, B3 では耐力低下がほとんどなく、テーパを付けた効果が現れている。

c) 柱 C1, C3 および C4 (軸力比 0.076, タイプ S, 同図(c))

柱 C1, C3 および C4 の H - δ 曲線の性状は、テーパタイプ R の B シリーズの柱 B1, B3 の場合とほぼ同様であることがわかる。テーパタイプ S の場合、抵抗断面力が小さくなる柱基部上方でフランジ・プレート幅厚比がわずかに小さくなることが有利に働くと考えられたが、水平変位 $|\delta|\leq 6\delta_y$ の範囲内では、差異は見られない。また、テーパ率が大きい柱 C3 と C4 の H - δ 曲線を比較すると、両者の差異は小さく、 $\xi_{cp}=0.88\sim 1.0$ の範囲では、テーパの効果は同程度であると考えられる。

なお、A~C シリーズを通じて、テーパ率 ξ_{cp} が大きくなると、最大水平耐力は、ほぼ塑性崩壊荷重 H_p を上限として、 $\xi_{cp}=0$ の等断面の場合よりも小さくなっている。これは、テーパ部下端が塑性化して、ひずみ硬化の影響が大きくなる前に、塑性域がテーパ部上方に広がることに起因するものである。

これらの結果から、部分テーパ部材は、局部座

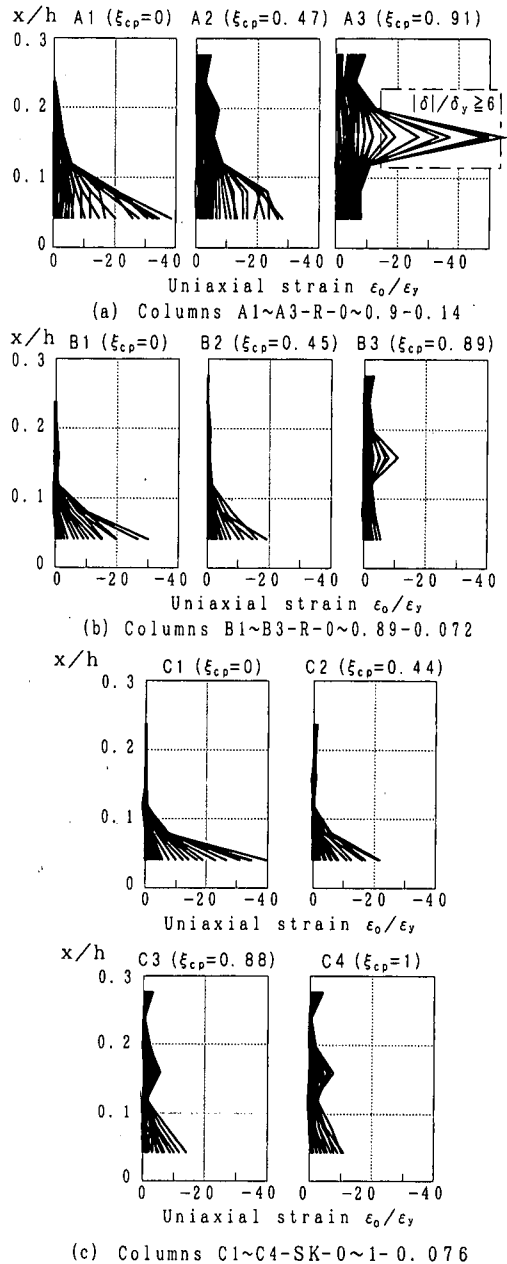


Fig.4 Uniaxial strain distribution in tapered base part of test columns

屈による耐力低下を遅延させる効果を持つことがわかった。

(2) テーパー部の軸ひずみと曲率の部材軸方向分布

水平変位反転時に着目し、2. (5) に述べた方法で、柱基部内の 5~7 断面について、軸ひずみ ϵ_0 と曲率 ϕ の概略値を求めた。それらの部材軸方向分布を Fig.4 と Fig.5 に示す。図中、 ϵ_0 と ϕ は、それぞれ降伏ひずみ ϵ_y と対応する断面の降伏曲率 ϕ_y で無次元化

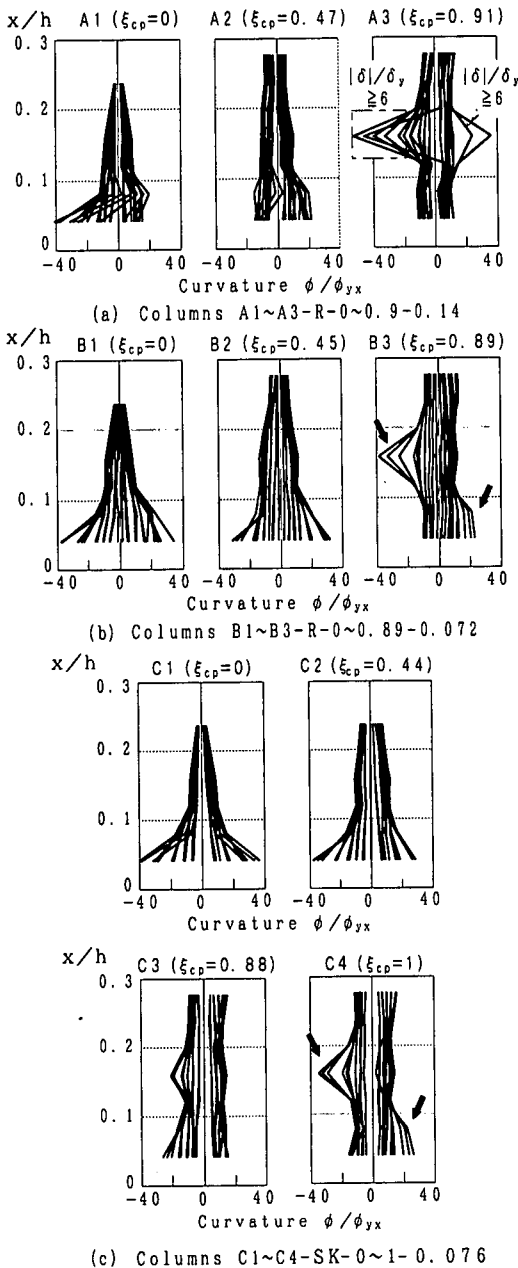


Fig.5 Curvature distribution in tapered base part of test columns

している。なお、軸ひずみの結果において、ひずみ分布が節になっている箇所は、ほぼダイアフラムの位置に相当する (Fig.1(b)参照)。

a) 軸ひずみの分布 (Fig.4)

同図(a)に示す軸力比 0.14 の A シリーズの結果から、テーパ率 ξ_{cp} が大きくなると、柱上方への軸ひずみの進展が大きくなっていることがわかる。ここで、図中に示すように、柱 A3 の $|\epsilon_c|/\epsilon_s \geq 15$ の結果は、局部座屈が成長し始めた変位 $|\delta| = 6\delta_y$ 以降のもの

のである。この点を考慮すると、A3 では、 $|\delta| \leq 5\delta_y$ の範囲で柱基部内の軸ひずみがほぼ一様に分布しており、 $\xi_{cp} = 0.9$ のときには、塑性変形をテーパ部全体に分散させる効果が確認できる。

また、同図(b)から、軸力比が 0.072 の B シリーズも同様であり、 $\xi_{cp} = 0.45$ の柱 B2 と $\xi_{cp} = 0.89$ の B3 の最大軸ひずみは、 $\xi_{cp} = 0$ の B1 と比べて、それぞれ約 75% および 30% に減少していることがわかる。

さらに、同図(c)に示すように、軸力比 0.076 でテーパタイプ S の C シリーズの場合も、 $\xi_{cp} \geq 0.88$ のときの最大軸ひずみは、 $\xi_{cp} = 0$ のときの約 25~30% になっており、テーパを付けた影響が顕著に現れている。

b) 曲率の分布 (Fig.5)

曲率 ϕ の分布も、軸ひずみ分布とほぼ同様に、テーパ率 ξ_{cp} が大きくなると、曲率がテーパ部の下端から上端まで均一に分布する傾向にある。

ただし、 $\xi_{cp} = 0.88 \sim 1$ の範囲では、曲率は、最終的にテーパ部の下端あるいは中間部に集中する傾向がある。すなわち、柱 A3 ではテーパ中央部、B3, C3, および C4 では中央部と下端で曲率が大きくなっている。とくに、軸力比 0.14 の柱 A3 では、 $|\delta| = 6\delta_y$ 以降、柱基部中央部への曲率集中が顕著である。このような塑性変形状の良否については後述する (4. (1)参照)。

また、柱 B3 と C4 では、図中に矢印で示すように、最終的に中間部と下端の 2 箇所 で正負逆方向に曲率が大きくなっている。このことから、これらの柱は、水平荷重の載荷方向によって、塑性変形箇所が交番する弾塑性挙動^{9), 10), 12)}を呈していることが予想される ((3), 4. (2)参照)。

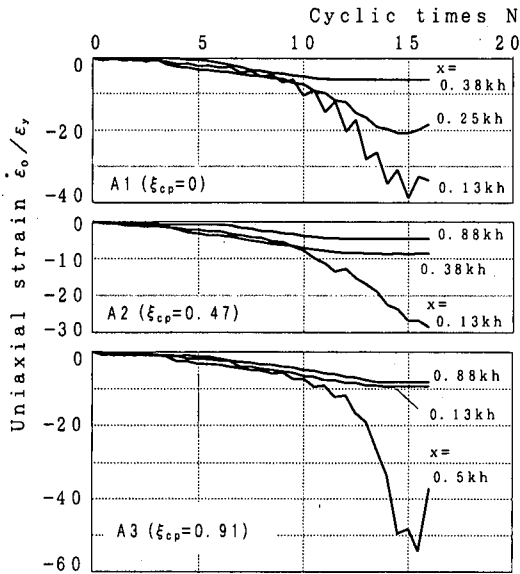
(3) 繰り返しサイクル数 N によるテーパ部の軸ひずみ ϵ_0 と曲率 ϕ の変動

定軸方向圧縮力の下で塑性変形が著しくなると、局部座屈が起こると、その断面の軸ひずみが繰り返し毎に累積する。そのため、テーパ部の数断面において、軸ひずみの変動を調べれば、重大な損傷に至るまでの経過を調べることができる。

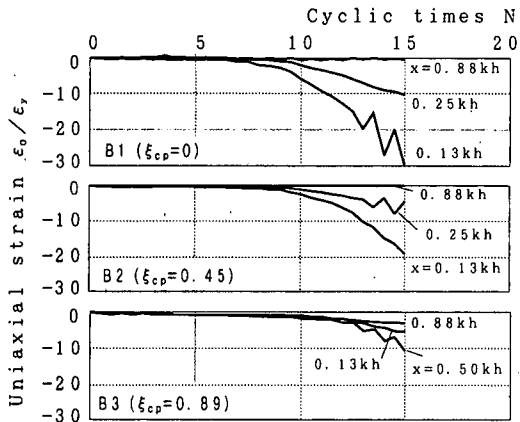
そこで、上で整理した軸ひずみ ϵ_0 と繰り返しサイクル数 N の関係を Fig.6 にまとめる。また、(2)で述べたように、半サイクル毎に塑性変形箇所が交番したと予想される柱 B3 と C4 に対しては、曲率 ϕ と N の関係を Fig.7 に示す。ここで、サイクル数 N は、1 回目の水平変位反転点を 0.5 とし、ある反転点から次の反転点までを 0.5 サイクルと数えている。

a) 軸力比 0.14 の柱 A1~A3 (Fig.6(a))

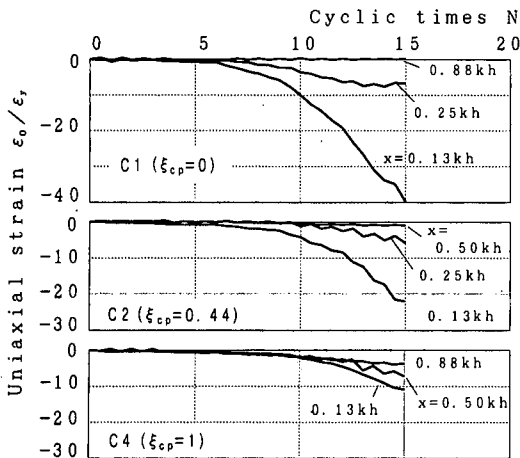
柱 A1 では、サイクル数 $N \geq 12$ ($|\delta| \geq 5\delta_y$) の範



(a) Columns A1~A3-R-0~0.9-0.14



(b) Columns B1~B3-R-0~0.88-0.072



(c) Columns C1, C2 and C4-SK-0~1-0.076

Fig.6 Variation of uniaxial strain with cyclic times

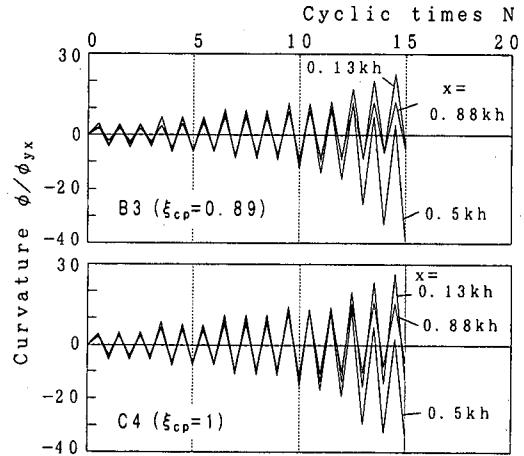


Fig.7 Variation of curvature with cyclic times

困で、柱基部下端 ($x=0.13kh$) の軸ひずみが大きくなり、塑性変形が集中し始めていることがわかる。 $\xi_{cp}=0.91$ の A3 では、上述したように、 N =約 11 まではテーパ部全体で軸ひずみが大きくなり、それ以降はテーパ中間部 ($x=0.5kh$) に軸ひずみが集中している (Fig.4(a)参照)。テーパ中間部の抵抗断面力は下端のそれより小さいために、塑性変形が集中する度合は、柱 A1 の下端 ($x=0.13kh$) よりも大きくなっている。

b) 軸力比 0.072 の B1~B3 (Fig.6(b))

この図からわかるように、テーパ率 $\xi_{cp}=0$ のときにテーパ部下端 ($x=0.13kh$) に集中していた塑性変形は、 ξ_{cp} が大きくなると、テーパ部全体に広がっている。とくに、 $\xi_{cp}=0.89$ の柱 B3 では、軸ひずみの最大値は、等断面の B1 に比べて約 30% に留まっており、テーパを付けたことの効果が大きい。

c) 軸力比 0.076 の C1, C2 および C4 (Fig.6(c))

これらの供試体でも、テーパ率が大きくなると、軸ひずみの低下が顕著に現れている。

d) B3, C4 の曲率の変動 (Fig.7)

柱 B3, C4 のテーパ部下端 ($x=0.13kh$) と中間部 ($x=0.5kh$) の曲率 ϕ/ϕ_{yx} の変動を見ると、 N =約 11 までは、両方の断面とも、曲率は正負にほぼ等しい振幅で変動している。しかし、 $N \geq$ 約 12 の範囲で、前者は曲率が正方向に漸増し、後者は負方向に大きくなっている。これより、(2)で述べたように、塑性変形箇所が半サイクル毎に交番し始めていることがわかる。

この現象は、文献 9), 10) で指摘した変断面片持ち柱のそれと類似している。たとえば、テーパ率 $\xi_{cp}=1$ の柱 C4 では、①最初はテーパ部全体に塑性変形がほぼ同時に生じる、②しかし、水平変位が増大して変位反転時に塑性曲率が残留曲げ変形とし

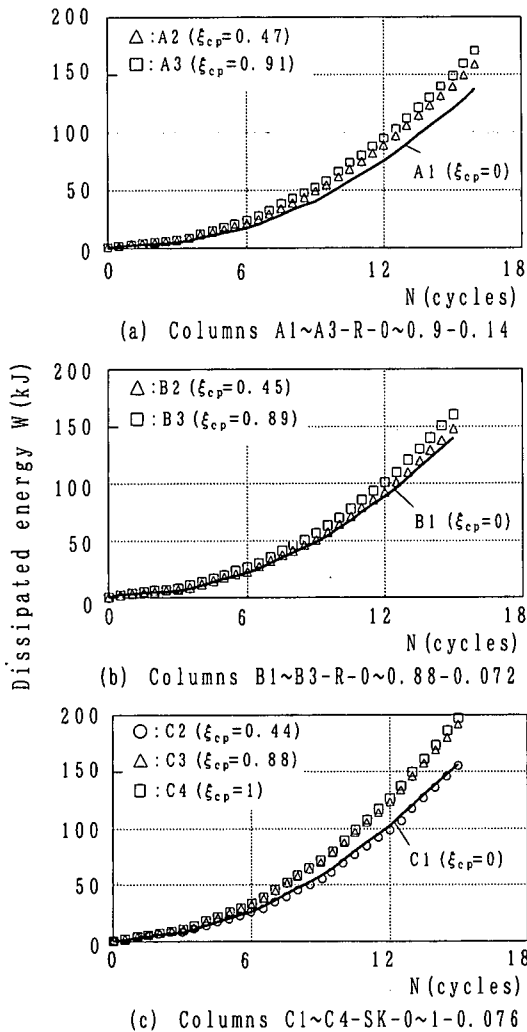


Fig.8 Variation of hysteretic energy of test columns with cyclic times

て累積し始めると、 $P\delta$ 効果の影響でテーパー内の一断面の降伏がわずかに先行する、③次の変位反転時には、この断面の塑性曲率が変位の進む方向と反対方向に残留するので、この断面に作用する $P\delta$ モーメントが小さくなる。その結果、別の断面の降伏が先行するようになる。軸力比が小さくとも、残留曲げ変形に起因する $P\delta$ モーメントの変動がテーパー内部のわずかな降伏荷重の差異を半サイクル毎に相殺し、塑性変形箇所が交替するようになる。

以上から、軸力比が小さい部材に対しては、テーパーを付けると塑性変形が分散して、一断面への塑性変形の集中・累積を抑える効果が大きくなると結論できる。一方、軸力比が大きくなると、テーパー率 ξ_{cp} が大きい場合は、柱 A3 のように、最終的に塑性変形がどの箇所集中するかを予測することが難しくなるように思われる。

(4) テーパー部材の履歴消費エネルギー

荷重-変位の実験結果から、水平荷重 H と鉛直荷重 P による荷重増分毎の仕事、それぞれ ΔW_H , ΔW_P を求めて、柱の履歴消費エネルギー W の変動を調べた¹⁰⁾。すなわち、

$$\Delta W_{H_i} = H_{i-1} \Delta \delta_i + \frac{1}{2} (H_i - H_{i-1}) \Delta \delta_i \quad (2)$$

$$\Delta W_{P_i} = P_{i-1} (u_i - u_{i-1}) + \frac{1}{2} (P_i - P_{i-1}) (u_i - u_{i-1}) \quad (3)$$

$$W = \sum_{i=1}^n (\Delta W_{H_i} + \Delta W_{P_i}) \quad (4)$$

ここに、 n は着目するサイクル数、 u_i , H_i , P_i および $\Delta \delta_i$ は、載荷ステップ i における柱頭部の鉛直変位、水平荷重、鉛直荷重、および増分水平変位である。

繰り返しサイクル数 N による A~C シリーズの履歴エネルギー W の変動を Fig.8 に示す。ただし、実験開始直後の鉛直荷重によるエネルギーは、 $N=0.5$ に含めている。

ここで、各供試体の上部断面 Sec.2 は実験中塑性域に留まるので、エネルギー W の大半は、テーパー付き柱基部の塑性変形による消費であると考えてよい。また、鉛直荷重による仕事 W_p は、軸力比が大きい方の A シリーズの場合でも、全体の消費エネルギー W の 1% 以下であり、水平荷重による仕事がほとんどである。

この図からわかるように、A~C シリーズでテーパー率 $\xi_{cp} =$ 約 0.9~1 の供試体では、いずれの場合も、 $\xi_{cp} = 0$ の等断面の場合に比べて、消費エネルギーが 10~20% 大きくなっている。とくに、軸力比が小さい B と C シリーズを比較すると、テーパー率による消費エネルギーの増加量は、テーパー部の剛性がほぼ一定の C シリーズの方が大きくなる傾向にある⁷⁾。

なお、消費エネルギーは損傷状況とも比較する必要がある。この点は 4. (1) で考察する。

4. テーパー部材の損傷と橋脚部材への適用に関する考察

(1) テーパーが損傷に及ぼす影響

実験中、テーパーを付けた柱基部には、ほぼ一定の軸方向圧縮力が作用しているため、塑性変形が著しく累積したり、局部座屈が発生して損傷が大きくなると、その縮み量が激増する。

そこで、柱基部全体の縮み U_i を用いて、テーパーを付けたことによる損傷の変動を考察する。各供試体テーパー部の縮み U_i と繰り返しサイクル数 N の関係を Fig.9(a) に示す。また、水平変位 $|\delta| = 6\delta_y$ の

3 回目にあたる $N=15$ のときと実験終了後に代表させて、テーパ率 ξ_{cp} と無次元縮み U_t/kh の関係を同図(b)にまとめる。

この図から、軸力比が小さい方の B, C シリーズでは、塑性変形の進んだ $N \geq 12$ の範囲において、テーパ率 ξ_{cp} の増大に伴って、縮み U_t が小さくなり、損傷が小さくなっていることがわかる。具体的に、 $N=15$ および実験終了後において、 $\xi_{cp}=0.44 \sim 1$ の B2, B3, C2~C4 の損傷は、等断面 ($\xi_{cp}=0$) の場合の約 50% になっている。

一方、軸力比が 0.14 の A シリーズでは、 $N \geq 13$ の範囲で A3 の損傷が A2 のそれを上回っており、テーパ中間部で損傷したことが影響していることがわかる。しかし、実験終了後、A3 の損傷は A1 と同程度であり、損傷とテーパ率 ξ_{cp} との間に相関性はあまりない。

なお、C シリーズの柱基部の損傷は、同程度の軸力比の B シリーズよりも 35~40% 大きい。これは、前者の曲げ剛性が後者のそれよりも約 1~17% 小さく、かつ、降伏点が約 10% 高いために、水平降伏変位 δ_y が大きく設定されたことが原因するものである (Tables 1, 2 参照)。

ここで、各供試体の損傷と Fig.8 の消費エネルギーを照合すると、A1 と A3 の実験終了後の損傷はほぼ同じであるが、A3 のエネルギーが約 20% 大きい。また、B3, C3 および C4 の場合は、損傷が小さいにもかかわらず、テーパ無しの場合に比べてエネルギーが大きくなっている。

以上のことをまとめると、次のようになる。

- i) テーパー部材は、等断面構造の場合よりも剛性を増すことなしに損傷を小さくでき、しかも塑性変形による消費エネルギーを大きくできる利点を有している。
- ii) 抵抗曲げモーメントの小さいテーパ部分に局部座屈が集中すると、損傷を軽減する効果はほとんどない。

(2) テーパー部材の崩壊モードに関する考察

実験終了後の供試体を観察し、テーパを付けた柱基部の崩壊モードを調べた。テーパの有無による損傷パターンの変動がわかるように、各シリーズの損傷状況を Photo.2 に比較する。写真の中で、局部座屈が著しい箇所には大きな矢印、軽微な損傷箇所には小さな矢印を付けている。

この写真から、等断面柱基部 ($\xi_{cp}=0$) の供試体 A1, B1, C1 のいずれの場合も、下端のフランジ・プレートと腹板に大きな局部座屈が生じていることがわかる。とくに、軸力比が 0.14 のときは、テ-

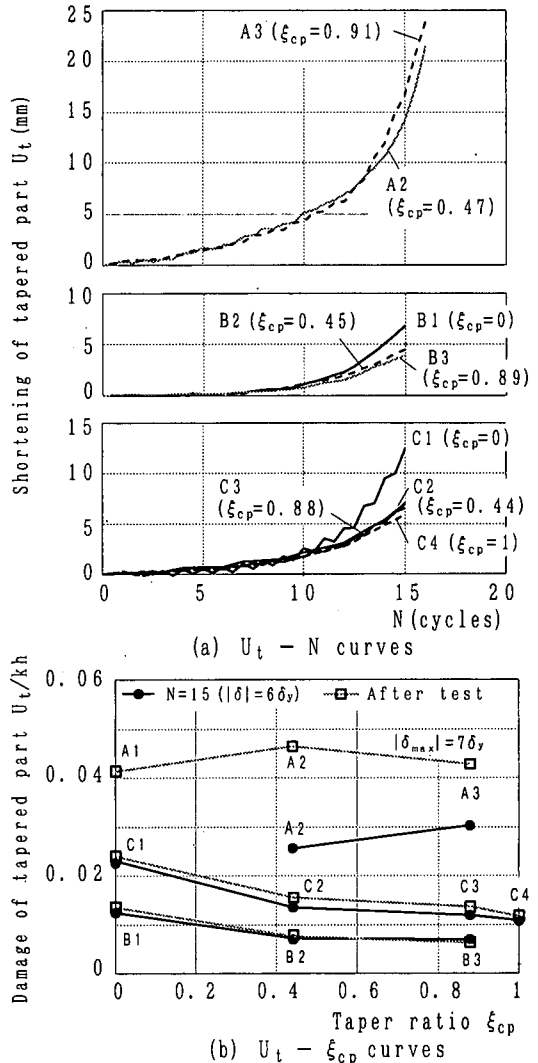


Fig.9 Variation of uniaxial displacement at top of tapered parts with cyclic times and taper ratio

ーパー率 $\xi_{cp}=0.47$ の A2 の損傷も大きい。 $\xi_{cp}=0.91$ の柱 A3 では、テーパ部のほぼ中央に A1 と同程度の大きな局部座屈が現れている。

また、軸力比が 0.072, 0.076 の B, C シリーズでは、テーパ率 ξ_{cp} が大きくなるにつれて、損傷が小さくなっており、 $\xi_{cp} \geq 0.88$ の柱 B3, C3 および C4 では、柱基部フランジ・プレートの下端から上端までの間に、数半波形の小さな局部座屈が起こっている。

さらに、供試体 B3, C4 では、テーパ部中央と下端で異なった側のフランジ・プレートに若干大きな局部座屈波形が見られた。この結果から、(3) d) で述べたように半サイクル毎に塑性曲げ変形する個所が変化する弾塑性挙動を確認できた。

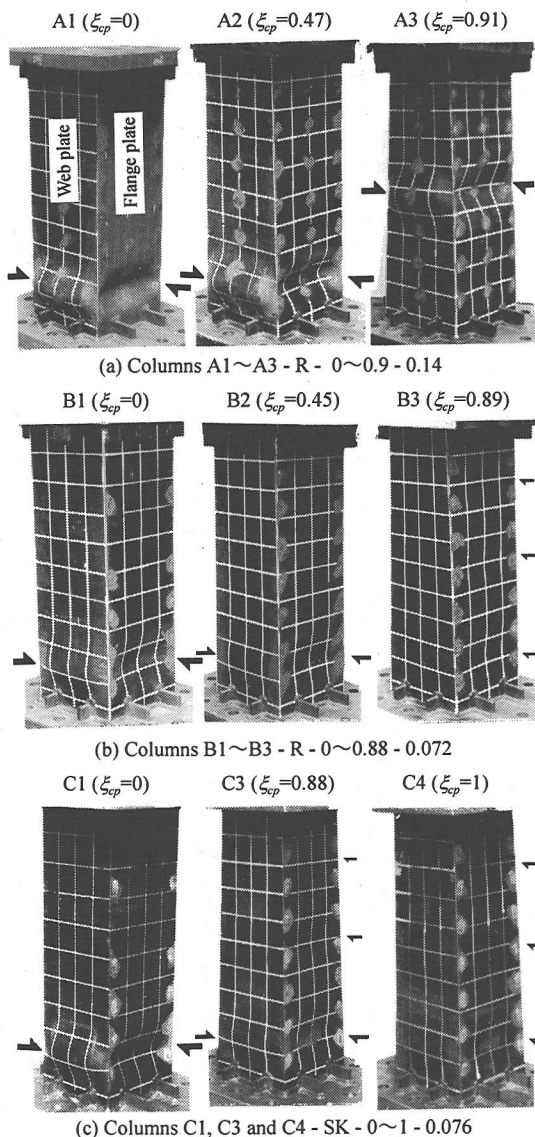


Photo.2 Collapse modes and damage of tapered parts

軸力比が非常に大きい単一の等断面柱や変断面柱では、このような崩壊モードの変化は最大耐力の大きな変動を伴った弾塑性挙動を引き起こすことが、これまでに指摘されている^{8)~10)}。

本実験では、軸力比が小さい場合でも、テーパ部材には、同種の現象が起こり得ることが確認された。ただし、実験で仮定した軸力比 0.15 程度では、 $H-\delta$ ループの最大耐力点～変位反転点間の耐力低下が小さいため、最大耐力が大きく変動することはないと考える¹³⁾。軸力比がさらに大きく、テーパ長さが大きい場合、この種の現象が起こると、テーパ付きはり一柱がどのような弾塑性挙動を呈する

かは今後検討の余地がある^{11), 12)}。

(3) テーパー部材の橋脚部材への適用について

ここまでの実験結果と考察を通じて、テーパ部材の持つ利点と問題点をほぼ把握できたと考える。

そこで、強震動を受ける鋼製ラーメン橋脚において、曲げモーメントが大きく、塑性化が予想される箇所にテーパ部材を適用することについて、以下に考察する。

a) テーパー部材内の損傷モードの制御

これまでに変断面骨組の非弾性地震応答解析を通じて指摘してきたように^{19), 20)}、抵抗断面力の大きな断面は小さな塑性変形によって大きなエネルギーを消費できるが、同じエネルギーを抵抗断面力が小さい断面で消費させれば、大きな損傷が避けられない。

この点から、テーパ部の抵抗曲げモーメントが小さい断面に局部座屈が集中すると、損傷を抑える効果が小さくなると考えられる。これは、供試体 A3 で現れたテーパ中間部の局部座屈に相当する。

したがって、抵抗断面力が小さくなる部材軸方向に、縦補剛材剛比を大きくして³⁾、横補剛材間隔を小さくすること等²¹⁾、よりねばりが出るように補剛方法を工夫する必要がある。これにより、損傷を小さくして、消費エネルギーを大きくできるという利点を生かしていけば、テーパ部材を耐震部材として利用する価値は十分にある。

b) 部分テーパ構造の対象となる橋脚部材

部分テーパ構造を用いる箇所としては、ラーメンが崩壊メカニズムを呈しても曲げモーメント分布形状の変動が小さく、曲げモーメントが卓越して、構成板要素の幅厚比が小さい柱基部や隅角部・補強範囲付近のはり・柱断面が挙げられる。

たとえば、隅角部の補強範囲付近をテーパ構造にして塑性化させれば、極厚板からなる隅角部の脆性破壊²⁾を防ぐのに有効になると考える²³⁾。また、補強範囲のはり部材に適用すれば、ラーメンがはり崩壊型の骨組²⁰⁾になって、地震時の損傷を軽減できる可能性がある。ただし、作用曲げモーメント勾配が急な箇所では様な塑性化を起こすためには、フランジ・プレート幅や腹板高さを変化させるだけでなく、変厚鋼板¹⁴⁾を組み合わせた設計自由度の高いテーパ構造⁷⁾を考えていくことが一つの課題になると考える。

これらの点は、テーパ部材の損傷パターンに影響を及ぼす軸力比の制限や部分テーパ構造を実橋脚部材に組み入れ可能であるかどうかの点を含めて、今後実験や数値解析を行って検討していく必要がある。

5. まとめ

本論文は、繰り返し曲げを受ける部分テーパ付きはり一柱の弾塑性性状の基本的特性を実験によって明らかにしたものである。

実験で得られた主な結論を以下に列記する。

- 1) 軸力比が約 0.075 のテーパ部材では、塑性変形がテーパ部全体に広がり、等断面構造よりも、損傷が小さくなった。
- 2) 軸力比が約 0.075 および 0.15 のとき、テーパを付けると、局部座屈による耐力低下を遅延させる効果があることを確認できた。
- 3) 軸力比が約 0.15 のとき、フランジ・プレート内で塑性変形が一樣になることに起因して、抵抗曲げモーメントが小さい箇所に局部座屈が集中し、テーパを付けないときと同程度の損傷が現れた。
- 4) テーパ部材では、軸力比が小さくても、塑性曲げ変形の箇所が繰り返し力の半サイクル毎に交替する場合がある。
- 5) 部分テーパ構造を橋脚部材に適用するためには、塑性変形が累積しても、テーパ部の抵抗曲げモーメントが小さい箇所に局部座屈が集中しないように断面の補剛方法を検討する必要がある。
- 6) テーパ部材は、等断面構造よりも剛性を上げないで、損傷を小さくできて、かつ、履歴消費エネルギーを大きくできる利点を有しており、橋脚の耐震部材としての適用を検討する価値がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、大同工業大学の平成 9 年度研究奨励金、および、平成 10~11 年度特別研究費の補助を受けた。また、実験供試体の製作に際しては、瀧上工業(株)橋梁技術部の左合玄一部長に種々ご配慮いただきました。さらに、実験では、大同工業大学・建設工学科土木工学専攻・構造研究室 4 年生の皆さんにご協力いただきました。ここに記して、深甚の謝意を表します。

APPENDIX 供試体のテーパ率 ξ_{cp} を設定するための予備計算結果⁷⁾

本実験において、柱基部 Sec.1 のテーパ量を設定するに際しては、実験供試体とほぼ同様な片持ち柱 ($k=0.3$, $P/N_{yUL}=0.2$) の非弾性地震応答解析を実施し、その結果を参考にした。

文献 7) で検討した内容を以下に説明する。

テーパ付き柱基部内の損傷として、数値解析の解析増分毎に得られる有限要素の増分塑性曲率の絶対値と $\Sigma|\Delta\phi_p|/\phi_{yx}$ を調べた²⁰⁾。

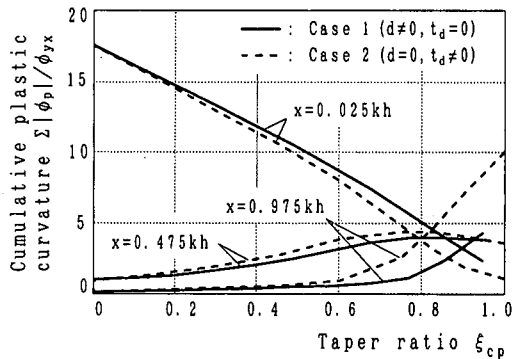


Fig.A-1 Variation of cumulative plastic curvature in columns with tapered base part⁷⁾

柱基部内の代表的な断面の累積曲率 $\Sigma|\Delta\phi_p|/\phi_{yx}$ とテーパ率 ξ_{cp} の関係を示すと、Fig.A-1 のとおりである。ここで、図中の $x=0.025kh$, $0.475kh$ および $0.975kh$ は、それぞれ柱基部の下端、中間部および上端を指す。また、図中の Case 1, 2 は、以下の解析モデルを意味する。

Case 1: 腹板高さ D_1 が、柱基部($x=0$)から断面変化点 ($x=kh$) まで、一様に d だけ変化する場合。

Case 2: フランジ・プレートと腹板の板厚が、 $x=0$ から kh まで、 t_d だけ一様に小さくなる変厚鋼板を用いた場合。

解析では、Case 1, 2 ともに、水平地動として El-Centro 波 NS 成分の最初の 8 秒間を用いている。

まず、同図の Case 1 の結果から、柱基部下端 ($x=0.025kh$) の累積曲率はテーパ率 ξ_{cp} にほぼ比例して小さくなり、 ξ_{cp} は約 0.6~0.8 の段階で、塑性変形は柱基部の上端にまで及んでいることがわかる。また、 ξ_{cp} は約 0.9 のとき、累積曲率は柱基部内でほぼ平均化されている。 $\xi_{cp} > 0.9$ の範囲では、上端の累積曲率が最も大きい。等断面柱 ($\xi_{cp}=0$) の下端のそれと比べて約 25%以下になっている。

Case 1, 2 を比較すると、腹板高さ、フランジ・プレートと腹板の板厚のいずれを変化させても、テーパ率 ξ_{cp} による累積曲率の変動はほぼ同様な傾向にある。そして、 ξ_{cp} は約 0.8~0.9 のときに、テーパ部の損傷を最も小さくできることがわかる。

実験では、この結果を参考にして、テーパ率による柱基部の弾塑性性状の変動が考察できるように、 $\xi_{cp}=0$, 約 0.5, 約 0.9 および 1 に設定した。

参考文献

- 1) 中井 博, 河井章好, 吉川 紀, 北田俊行, 酒造敏廣: 鋼製ラーメン橋脚の実績調査(上), (下), 橋梁と基礎,

- Vol.16, No.6, pp.35~40, 1982年6月, および,
Vol.16, No.7, pp.43~49, 1982年7月.
- 2) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造震災調査特別小委員会: 阪神・淡路大震災における鋼構造物の震災の実態と分析, 鋼構造シリーズ10, 土木学会, 1999年5月.
 - 3) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996年7月.
 - 4) 才塚邦宏, 宇佐美勉: コンクリート部分充填鋼製橋脚の終局耐震設計法と耐震実験による検証, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.287~296, 1997年7月.
 - 5) 高橋実, 村越潤, 西川和廣, 松田宏: かど補強を施した矩形断面鋼製橋脚の変形性能に関する数値解析, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会鋼構造委員会, 構造物の耐震検討小委員会, pp.77~84, 1998年11月.
 - 6) 中西克佳: 鋼製・合成橋脚柱の耐震性に関する実験的研究, 学位請求論文(大阪市立大学), 1998年4月.
 - 7) 酒造敏廣: テーパー付き柱基部を有する鋼変断面柱の非弾性地震応答性状に関する研究, 第24回地震工学研究発表会・講演論文集, 土木学会地震工学委員会, D8-3, pp.1041~1044, 1997年7月.
 - 8) 中村恒善, 上谷宏二: 両振り繰り返し塑性曲げを受ける片持ち梁一柱のための対称限界曲線と設計基礎曲線, 日本建築学会論文報告集, 第346号, pp.78~90, 1984年12月.
 - 9) 酒造敏廣: 繰り返し水平力を受ける鋼変断面片持ち柱の弾塑性性状に関する研究, 土木学会論文集, No.446/I-19, pp.127-136, 1992年2月.
 - 10) 酒造敏廣, 事口壽男, 西幸二: 鋼変断面片持ち柱の弾塑性履歴崩壊性状に関する基礎的実験, 構造工学論文集, Vol.39A, 土木学会, pp.127~284, 1993年3月.
 - 11) 後藤芳頭, 王慶雲, 小畑誠: 塑性分岐解析に基づく圧縮板の座屈モードの局所化現象の解析, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.55~70, 1996年7月.
 - 12) Miki, T. and Nethercot, D.A.: Cyclic Instability of Columns with Variable Cross-Section due to Combination of Collapse Mechanisms, *Proc. of 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, Nagoya, Japan, pp.596~576, July 1997.
 - 13) 酒造敏廣: 繰り返し水平力を受ける片持ちテーパー柱の弾塑性性状, 第47回応用力学連合講演会・講演予稿集, 日本学術会議メカニクス・構造研究連絡委員会, pp.145~146, 1998年1月.
 - 14) 堀田毅, 滝英明, 村上茂之, 西村宜男: LP周辺支持板および補剛板の圧縮強度特性と設計法, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.6, pp.335~342, 1998年11月.
 - 15) Column Research Council: *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 4th Edition, Edited by Galambos, T. V., John Wiley & Sons, pp.329~358, 1988.
 - 16) 塩見弘幸: 鋼変断面曲げ圧縮部材の耐力評価式に関する基礎的研究, 学位請求論文(名古屋大学), 1984年11月.
 - 17) 吉田博, 西田進: 変断面H形鋼柱の強度と変形, 土木学会論文集, No.220, pp.17~27, 1974年12月.
 - 18) 日本道路協会: 道路橋示方書, I.共通編, II.鋼橋編・同解説, 1996年.
 - 19) 酒造敏廣: 水平地動を受ける鋼変断面片持ち柱の動的弾塑性挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.501, pp.75~84, 1994年10月.
 - 20) 酒造敏廣, 事口壽男, 長田好夫: 鋼変断面ラーメンの非弾性地震応答性状と崩壊モードに関する研究, 構造工学論文集, Vol.43A, 土木学会, pp.205~216, 1997年3月.
 - 21) 家村浩和, 山田善一, 岡重洋, 伊津野和之, 前田英輝: 鋼製箱形橋脚模型の横方向高密度補剛による変形性能の向上, 第22回地震工学研究発表会・講演概要, pp.487~490, 1993年7月.
 - 22) 酒造敏廣, 池田範行: 鋼製ラーメン部材の変断面性に関する設計パラメータの調査研究, 平成2年度研究発表会・講演概要集, I-11, 土木学会中部支部, 1992年3月.
 - 23) 三木千寿, 四十沢利康, 穴見健吾: 鋼製橋脚ラーメン隅角部の地震時脆性破壊, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.273~281, 1998年4月.

(1999.7.26 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ELASTO-PLASTIC HYSTERETIC BEHAVIOUR OF STEEL PARTIALLY TAPERED BEAM-COLUMNS

Toshihiro MIKI and Shinya KAWADA

This paper studies the elasto-plastic behaviour of steel partially tapered beam-columns. Ten test columns with tapered base part were tested up to failure by imposing the alternating horizontal displacement under the constant vertical load. Test results show the some advantage of the tapered members, i.e., it can delay the occurrence of local buckling, the resulting damage is less than the uniform cross-section members and corresponding dissipated energy becomes larger with the increase in taper ratio. It is also pointed out that the bending collapse patterns of tapered parts may change every half cycle because of the uniform plastic deformation in flange plates. It needs for the practical design use to stiffen the smaller cross-section in tapered parts so as not to have the heavy damage of tapered members.