

# テーパ付き柱基部を有する変断面柱の 非弾性地震応答性状に関する研究

酒造 敏廣

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

本研究は、水平地動を受ける鋼変断面片持ち柱の動的弾塑性解析を行ったものである。柱基部をテーパ部材にして塑性変形を分散させることにより、塑性ひずみの累積をどの程度低減できるかを検討している。数値解析の結果から、柱基部腹板に2, 3%のテーパをつけると塑性変形の累積による損傷をかなり低減できること、および、変厚板を用いても同様な効果が得られることを示す。塑性変形が集中してひずみの累積が著しくなるラーメン部材断面に対して、この種のテーパ部材がエネルギー吸収部材として有効となる可能性が高いことを示唆している。

**Key Words:** variable cross-section, tapered column, inelastic behavior, earthquake response

## 1. まえがき

鋼製橋脚の耐震性能を改善するために、柱の断面形状や補剛構造を工夫したり、コンクリートを部分充填すること等、部材の補強方法が種々提案されている<sup>1)</sup>。しかし、非弾性域に及ぶ繰返し力を受ける橋脚の柱部材では、常時の鉛直荷重による軸方向作用圧縮力が小さいために、塑性変形が発生する箇所では部材軸方向への塑性域進展をあまり期待できず、ごく限られた範囲内で累積する塑性ひずみが大きな損傷を引き起こす。また、筆者らのこれまでの研究を参考にすると、抵抗断面力が断面変化位置で急変する従来の変断面構造の柱では、2つ以上の構成断面で同時の塑性変形を認めても、抵抗断面力の差異に起因して、ひずみの累積に対応した効率のよい履歴エネルギー吸収を期待することは難しい<sup>2,3)</sup>。

本研究は、激震時の鋼製橋脚の柱基部の損傷を低減させることを目的にして、鋼変断面片持ち柱の非弾性地震応答解析を行うものである。柱基部は、フランジ・プレート幅、腹板高さ、および、板厚が部材軸方向に一樣に変化する箱形断面のテーパ部材としている。まず、このような柱基部の塑性化を把握するための無次元テーパ率を定義する。つぎに、柱基部のテーパ率や高さを変化させて、地震応答解析を行う。そして、復元力特性、塑性ひずみの累積性状、履歴消費エネルギー等の変動を調べ、等断面柱基部との比較を通じて、テーパ付き柱基部の弾塑性性状を考察する。

## 2. 変断面柱の数値解析モデル、解析方法、および、無次元テーパ率

### (1) 解析モデルと解析方法

Fig.1 に示すように、定鉛直荷重  $P$  の作用下で水平地動を受ける片持ち柱を研究对象とした。柱頭部には、鉛直・水平並進運動に対応する集中質量  $M_c$  を仮定した<sup>2)</sup>。Sec.2 は等断面、Sec.1 はテーパ付き柱基部であり、仮定する水平地動と組み合わせて、以下の3ケースの柱を解析する。

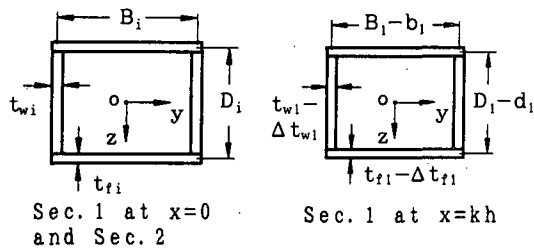
Case 1: フランジ・プレートおよび腹板の板厚、それぞれ  $t_f$  および  $t_w$  が一定で、腹板高さ  $D_1$  が柱基部の下端 ( $x=0$ ) から上端 ( $x=kh$ ) まで一様に  $d_1$  だけ変化する。水平地動  $\alpha_g \ddot{u}_{cg}(t)$  には El-Centro 波の NS 成分記録の最初の 8 秒間を 2 倍 ( $=\alpha_g$ ) に増幅して用いる。

Case 2: フランジ・プレートと腹板が板厚差  $\Delta t_f (= \Delta t_w)$  の変厚板で、幅  $B_1$  および高さ  $D_1$  がそれぞれ  $b_1$  および  $d_1$  だけ一様に変化する (Fig.1(a) 参照)。水平地動は Case 1 と同様とする。

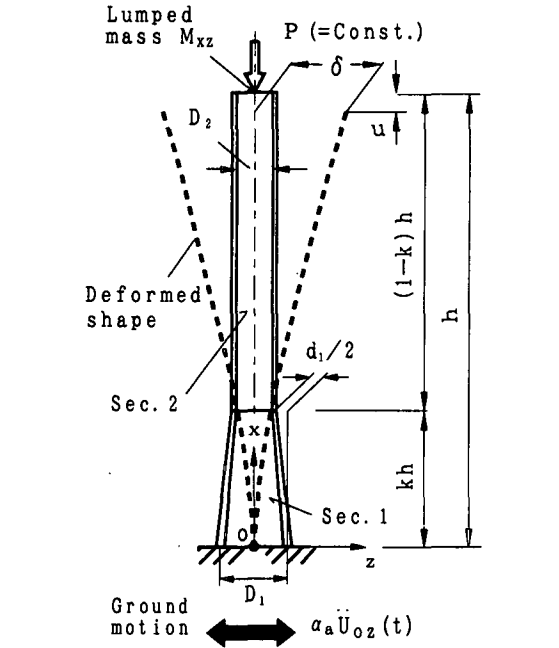
Case 3: Case 1 と同様な柱で、道路橋示方書<sup>4)</sup>の時刻歴応答解析用の強震波形 (Ⅲ種地盤用、継続時間が約 50s) を用いる ( $\alpha_g=2.0$ )。

等断面の柱基部を有する基準解析モデルの寸法諸元、降伏点等を Table 1 に示す。柱頭部の集中質量としては、基準解析モデルの弾性 1 次固有周期  $T=1s$  として求めた  $M_c$  値を全解析モデルで共通とした。

解析は、文献 2), 3) で示した平面骨組の動的弾塑性



(a) Cross-section of Sec. i



(b) Column with variable cross-section

Fig.1 Numerical model for columns with tapered base part subjected to ground motion

Table 1 Properties of column ( $\xi_{cp}=0$ )

Item	$t_{fi}$ (cm)	$t_{wi}$ (cm)	Yield point $\sigma_{yi}$ (Mpa)
Sec.1	3.2	3.2	314
2	3.2	3.2	314

Notes;  $h=9m$ ,  $B_1=D_1=0.9m$ , Case 1:  $k=0.15\sim 0.45$ ,  $b_1=0$ ,  $\Delta t_{f1}=\Delta t_{w1}=0$  and  $P=0.2N_{yLU}$ ; Case 2:  $k=0.3$ ,  $\Delta t_{f1}=\Delta t_{w1}=0.4cm$  and  $P=0.2N_{yLU}$ ; Case 3:  $k=0.3$ ,  $b_1=0$ ,  $\Delta t_{f1}=\Delta t_{w1}=0$  and  $P=0.1N_{yLU}$ ,  $N_{yLU}$ : Squash force of bottom cross-section of Sec.1, Natural period:  $T=1s$ .

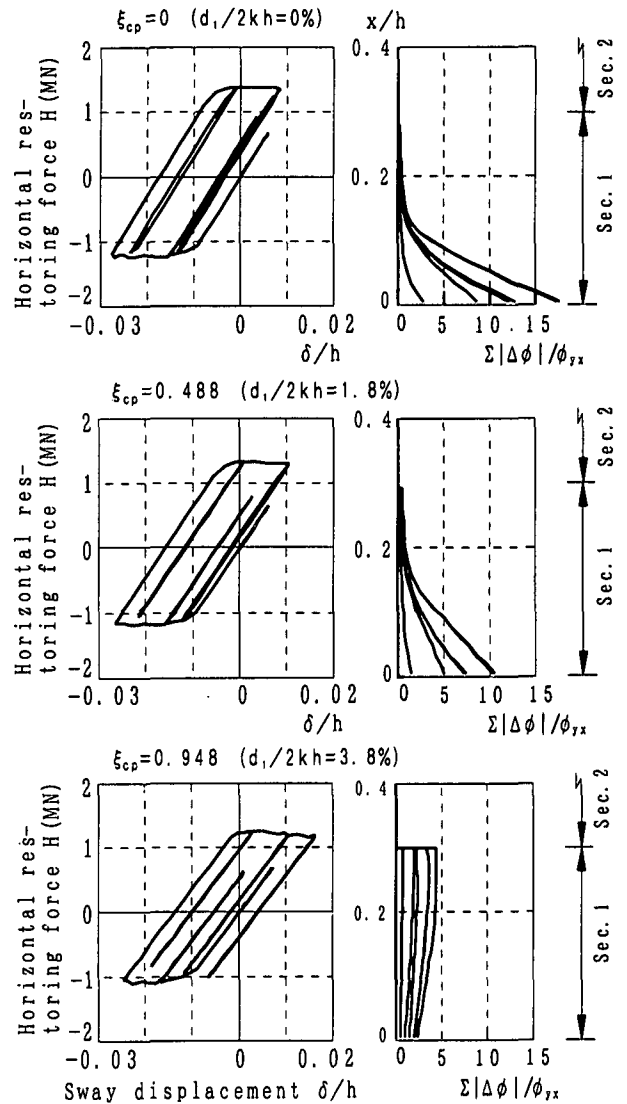
解析法に従っている。鋼材の応力-ひずみ曲線としては、等方・移動硬化を簡易的に考慮した Bi-Linear 型を仮定した<sup>5)</sup>。

## (2) 柱基部断面の無次元テーパ率 $\xi_{cp}$

まず、柱頭部に漸増水平荷重を仮定し、柱基部 Sec.1 の上下端が同時に全塑性状態になるという条件を基にして、無次元テーパ率  $\xi_{cp}$  を次式で定義した。

$$\xi_{cp} = \frac{1}{k} \left( 1 - \frac{M_{p1U}}{M_{p1L}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $M_{p1U}$ ,  $M_{p1L}$  は柱基上部・下端の全塑性曲げモーメントである。



(a) H -  $\delta$  curves (b) Distribution of plastic curvature

Fig.2 Variation of inelastic response of columns with  $\xi_{cp}$  (Case 1:  $k=0.3$ ,  $b_1=0$ ,  $\Delta t_{f1}=\Delta t_{w1}=0$ )

メントである。

上式によると、 $\xi_{cp}=0$  のとき柱基部は等断面であり塑性変形はその下端に集中する。 $\xi_{cp}>0$  のとき抵抗断面力が部材軸方向に変化する。 $\xi_{cp}=1$  のとき柱基部内全体に塑性変形が生じる。

本研究では、無次元テーパ率が  $0 \leq \xi_{cp} \leq 1$  の範囲に入るように、Case 1~3 に従って断面寸法を変化させた。ただし、Sec.2 断面については、解析結果の比較を容易にするため、降伏点と寸法諸元を一定にした。

## 3. 無次元テーパ率 $\xi_{cp}$ による柱の非弾性地震応答性状の変動

上述した Case 1~3 について、テーパ率  $\xi_{cp}$  を変化させた解析結果を以下に示す。

以下の考察においては、断面の損傷を表す指標とし

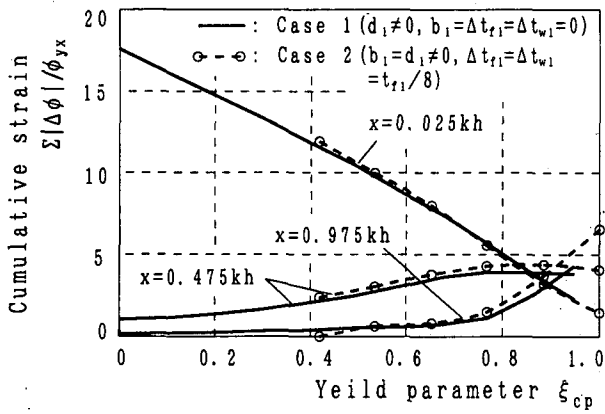


Fig.3 Variation of cumulative plastic curvature in column base section with  $\xi_{cp}$  (Cases 1 and 2:  $k=0.3$ )

て、増分塑性軸ひずみと曲率の絶対値和（以下、絶対累積ひずみと言う）、それぞれ  $\Sigma|\Delta\varepsilon_{op}|/\varepsilon_y$  および  $\Sigma|\Delta\phi_p|/\phi_{yx}$  を用いている<sup>2),3)</sup>。ここに、 $\varepsilon_y$  は降伏ひずみ、 $\phi_{yx}$  は降伏曲率である。

### (1) 水平復元力 H-変位 δ 曲線と柱基部内の損傷分布

Case 1 で  $k=0.3$ ,  $\xi_{cp}=0, 0.488$  および  $0.948$  の柱の H-δ 曲線と柱頭部の水平変位反転時における柱基部内の絶対累積曲率  $\Sigma|\Delta\phi_p|$  の分布を Fig.2 に示す。

同図(a)からわかるように、 $\xi_{cp}=0.948$  の H-δ 曲線では最大耐力後の H-δ 曲線の各ループの勾配が若干小さくなる傾向にあるが、テーパ率  $\xi_{cp}$  の変動による H-δ 曲線の変動は小さい。また、同図(b)から、テーパ率が大きくなると塑性域が柱基部全体に拡がり、腹板に数%のテーパ (=  $d_1/2kh$ ) を付けることにより塑性ひずみの累積をかなり低減できることがわかる。

### (2) 柱基部内における絶対累積曲率の変動

上記(1)の結果から、柱基部内の  $x=0.025kh, 0.475kh$  および  $0.975kh$  における累積曲率  $\Sigma|\Delta\phi_p|$  を調べ、 $\xi_{cp}$  による変動を Fig.3 に示す。同図には、フランジ・プレートを変厚板とした Case 2 の結果も図示している。

まず、Case 1 の結果から、柱基部下端の累積曲率はほぼ  $\xi_{cp}$  に比例して小さくなり、 $\xi_{cp}$  = 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、 $\xi_{cp}$  = 約 0.9 のときに累積曲率は柱基部内でほぼ平均化されている。 $\xi_{cp} >$  約 0.9 の範囲では上端の累積曲率が最も大きい。等断面柱の場合と比べて、その大きさは 1/4 以下になっている。さらに、Case 1 と 2 を比較すると、箱形断面形状にテーパを付けて ( $b_1 \neq 0, d_1 \neq 0$ )、かつ、板要素を変厚板としても、 $\xi_{cp}$  による累積曲率の変動はほぼ同様な傾向にある。

### (3) 柱基部高さによる損傷分布の変動

Case 1 で柱基部高さ  $kh$  を  $k=0 \sim 0.45$  の範囲で変化

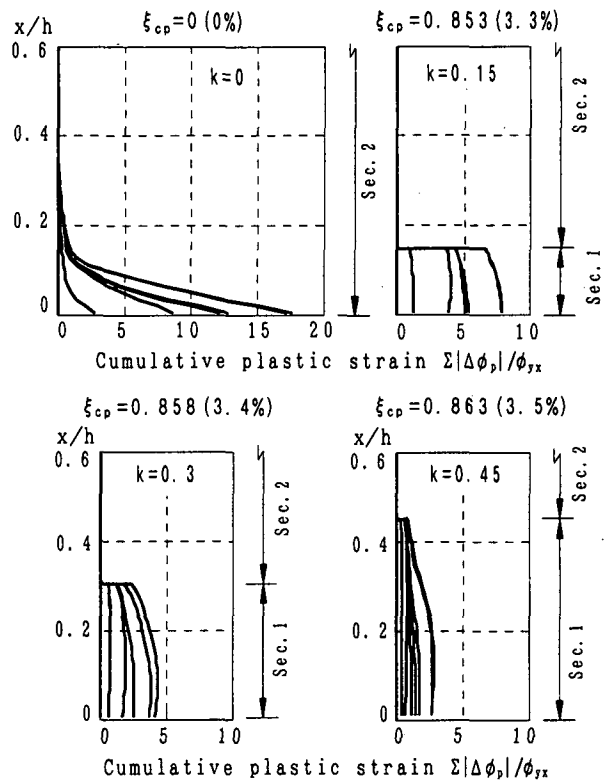
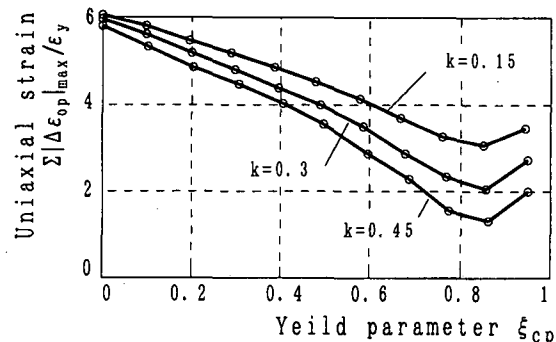
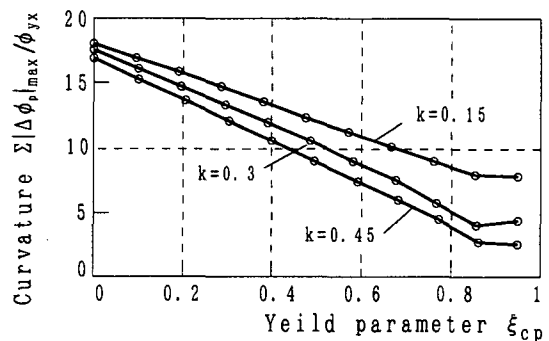


Fig.4 Variation of distribution of cumulative plastic curvature with  $k$  and  $\xi_{cp}$  (Case 1:  $k=0.15 \sim 0.45, b_1=0, \Delta t_{f1}=\Delta t_{w1}=0$ )



(a) Maximum cumulative uniaxial strain



(b) Maximum cumulative curvature

Fig.5 Variation of maximum cumulative plastic curvature with  $\xi_{cp}$  (Case 1:  $k=0.15 \sim 0.45, b_1=0, \Delta t_{f1}=\Delta t_{w1}=0$ )

させ、塑性変形が柱基部内で最も分散したときの絶対累積曲率  $\Sigma|\Delta\phi_p|$  の分布を調べた。等断面 ( $\xi_{cp}=0$ ) の結果とともに、 $\Sigma|\Delta\phi_p|$  の分布形状の変動を Fig.4 に示す。

同図からわかるように、 $k=0.15 \sim 0.45$  を通じて、テーパ率  $\xi_{cp}$  = 約 0.86 のとき、累積ひずみが柱基部内で

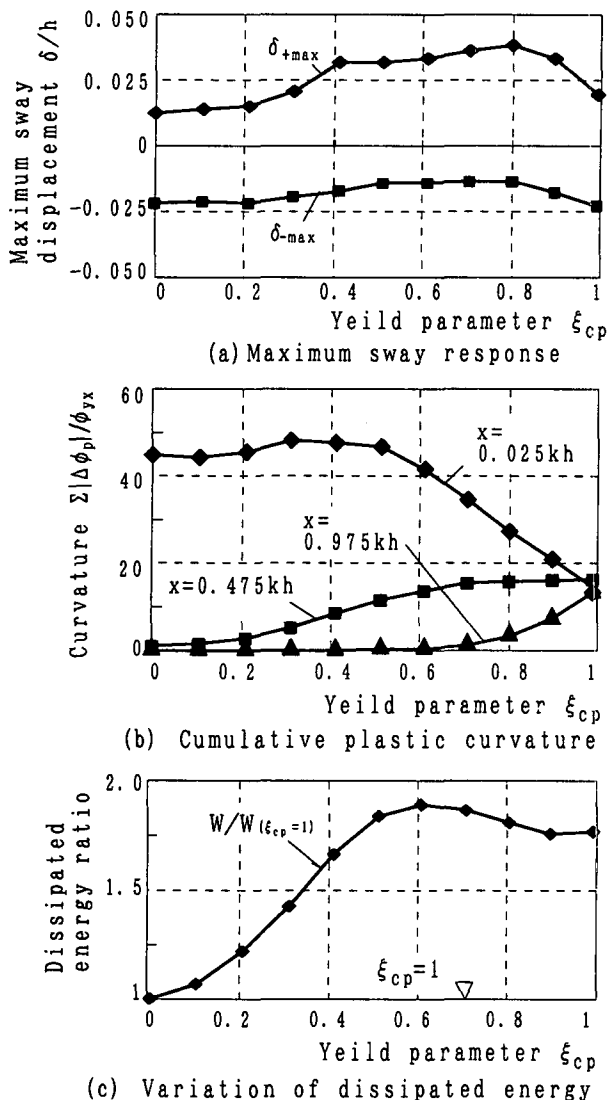


Fig.6 Inelastic response of displacement, cumulative plastic curvature and dissipated energy (Case 3:  $k=0.3$ ,  $b_1=0$ ,  $\Delta t_n = \Delta t_w = 0$ )

同程度に発生している。また、柱基部高さが大きくなると、累積ひずみの増大を押さえる効果が顕著になることがわかる。

#### (4) テーパー率、柱基部高さ、および、損傷の関係

上記(3)の結果をまとめ、柱基部内の絶対累積ひずみ  $\Sigma|\Delta\epsilon_p|$  および  $\Sigma|\Delta\phi_p|$  の最大値と  $\xi_{cp}$  の関係を Fig.5 に示す。

この図からわかるように、絶対累積ひずみの最大値は、 $\xi_{cp} < 0.9$  の範囲で  $\xi_{cp}$  に比例して減少している。

#### (5) テーパー率 $\xi_{cp}$ による変位応答、累積ひずみ、および、消費エネルギーの変動 (Case 3)

継続時間の長い水平地動を仮定した Case 3 の結果から、柱頭部の正負の最大変位応答  $\delta_{+max}$  と  $\delta_{-max}$ 、柱基部内の絶対累積曲率  $\Sigma|\Delta\phi_p|$  の分布、および、履歴消費エネルギー  $W$  の変動を Fig.6 にまとめる。

同図(a)からわかるように、水平変位の応答は、 $\xi_{cp} = 0.2 \sim 0.9$  の範囲で、 $\xi_{cp} = 0$  のそれよりも大きく、最

大で約 1.5 倍となっている。また、同図(b)から、柱基部下端 ( $x=0.025kh$ ) の累積ひずみの減少は、Case 1, 2 と比べて (Fig.3 参照)、 $\xi_{cp} < 0.6$  の範囲で緩慢であることがわかる。しかし、 $\xi_{cp} \approx 1$  のときの累積ひずみは柱基部内で最も平均化され、 $\xi_{cp} = 0$  のときの約 1/3 になっている。さらに、同図(c)からわかるように、履歴消費エネルギーは、テーパーを付けると大きくなり、 $\xi_{cp} = 1$  のときには、 $\xi_{cp} = 0$  の場合に比べて約 1.6 倍となっている。これは、テーパーを付けると柱基部全体に塑性ひずみが広がることに起因すると考えられ、一断面に生じる累積ひずみが小さくても、履歴消費エネルギーが大きくなるという特徴があると言える。

## 4. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 柱基部の断面に数%のテーパーを付けると、塑性変形が柱基部全体に拡がり、塑性ひずみの累積量が激減する。
- 2) 変厚板を組み合わせても同様な効果が現れる。
- 3) 今後、この種の柱の弾塑性性状を十分に把握して、最適な柱基部高さ、変厚板も組み合わせたテーパーの形状とテーパー率、および、補剛構造を検討していく価値がある。
- 4) 柱基部のみならず、ラーメン隅角部近傍のはり・柱断面に対しても、損傷を押さえるためにテーパー部材が有効となる可能性が高い。

謝辞：本研究は平成 8~9 年度の文部省科学技術研究費・基盤研究(C)の一部として実施したこと、および、平成 9 年度の大同工業大学・研究奨励金の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会・構造新技術小委員会・耐震設計研究 WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術、平成 8 年 7 月。
- 2) 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。
- 3) 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, pp.205~216, 1997 年 3 月。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1991 年 2 月。
- 5) 若林 賢, 柴田道生：筋違部材の座屈後の挙動に関する研究 (その 4), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 16 号, pp.201~204, 1976 年 6 月。