

# 逆L形鋼製橋脚の繰り返し弾塑性解析

高 聖彬\*・葛 漢彬\*\*・宇佐美勉\*\*\*

\*学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程在学中 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)  
 \*\*正会員 博士(工学) 名古屋大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)  
 \*\*\*正会員 D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

本研究は、繰り返し弾塑性解析より逆L形鋼製橋脚(上部構造重量が偏心して作用する橋脚)の耐震性能を評価しようとしたものである。対象となる断面は、補剛箱形断面とパイプ断面の2種類である。解析では、一定の偏心鉛直荷重と面内または面外繰り返し水平荷重が作用する荷重条件を模擬している。構成則は、構造用鋼材の繰り返し挙動を精度よく表現できる「修正二曲面モデル」を用いている。本研究では、幅厚比または径厚比、細長比、および偏心量を主なパラメータとして考えた。本解析の結果と過去に行われたT形橋脚の結果との比較・分析により、履歴曲線においてT形橋脚(上部構造重量が中心軸に作用する橋脚)と逆L形橋脚との間に一定の相関関係があることが明らかにされている。その結果、T形橋脚の履歴特性が既知であればそれに対応する逆L形橋脚の履歴特性が簡単に得られることがわかった。

**Key Words :** *Cyclic analysis, Ductility, Eccentricity, Inverted L-shaped steel bridge pier, Strength*

## 1. 緒言

著者らは、繰り返し弾塑性有限変形解析より、T形(即ち、軸圧縮力が中心軸に作用する)鋼製橋脚の変形性能の検討を行ってきた<sup>1),2)</sup>。鋼製橋脚の耐震性能を調べるために、これまでに数多くの準静的実験(繰り返し載荷実験)が行われてきており、耐震設計に関する有用な知見が得られている<sup>3)</sup>。これに加え、解析的な研究も盛んに行われ、広い範囲にわたって諸パラメータの影響を調べることにより、荷重-変位特性などの定量化が図られている<sup>4)~8)</sup>。検討の対象となっている橋脚のほとんどは、軸力が柱の中心に作用するものである。しかしながら、既設橋脚の現状からみれば、T形橋脚よりも、逆L形橋脚やラーメン橋脚のほうが圧倒的に多い。これまでに、そういった構造形態の鋼製橋脚に関する耐震検討には手が及ばず、地震時挙動をあまり把握できていないと言ってもよい。

本研究は、逆L形鋼製橋脚を対象とした繰り返し弾塑性解析の結果についてまとめたものである。対象となる断面は、補剛箱形断面とパイプ断面の2種類である。解析では、一定の偏心鉛直荷重と面内または面外繰り返し水平荷重が作用する荷重条件を模擬している。構成則は、構造用鋼材の繰り返し挙動を精度よく表現できる「修正二曲面モデル」<sup>9)</sup>を用いている。本研究では、幅厚比または径厚比、細長比、および偏心量を主なパラメータとして考えた。これらのパラメータの影響を調べるために、面内繰り返し荷重が作用する場合、箱形断面橋脚とパイプ断面橋脚にそれぞれ9ケース、面外繰り返し荷重が作用する場合は、パイプ断面橋脚のみの14ケースについて解析を行った。本解析の結果と過去に行われたT形橋脚の結果との比較・分析

により、履歴曲線においてT形橋脚と逆L形橋脚との間に一定の相関関係があることがわかった。したがって、T形橋脚の履歴特性が既知であればそれに対応する逆L形橋脚の履歴特性が提案した相関関係より簡単に得られる。

## 2. 解析モデル

解析の対象は、柱軸から偏心量が $e$ の所に一定鉛直力と変動変位振幅の繰り返し水平力を受ける、逆L形鋼製橋脚である。解析は、繰り返し水平力が逆L形橋脚の平面内とそれに垂直する面(これ以後、面外と称する)にそれぞれ作用する2ケースを考えた。面内載荷の場合、張出し部の変形が小さいとすれば偏心に作用する軸力を図-1(a)に示すように中心軸に作用する軸力と曲げモーメントに置き換えることができる。断面は、図-1(c)に示すようなフランジとウェブにそれぞれ2本の補剛材を有する正方形補剛箱形断面と無補剛パイプ断面である。一方、面外載荷の場合、無補剛パイプ断面橋脚のみについて解析した。ただし、図-1(b)に示すように、張り出し部ははり要素でモデル化し、柱と同一の断面を仮定した。

メッシュ分割は、文献1)と2)と同様に、局部座屈は柱基部近辺に発生することから、柱基部はフランジ幅または直径の2倍の高さまでシェル要素を用い、残りの部分は、はり要素を用いてモデル化した。面内繰り返し荷重の場合、構造と荷重の対称性から1/2モデルとしたが、面外繰り返し荷重の場合はねじりモーメントが生じるため全モデルとした。

解析に使用したソフトは、汎用プログラムABAQUS<sup>10)</sup>で、それに構成則としての修正二曲面

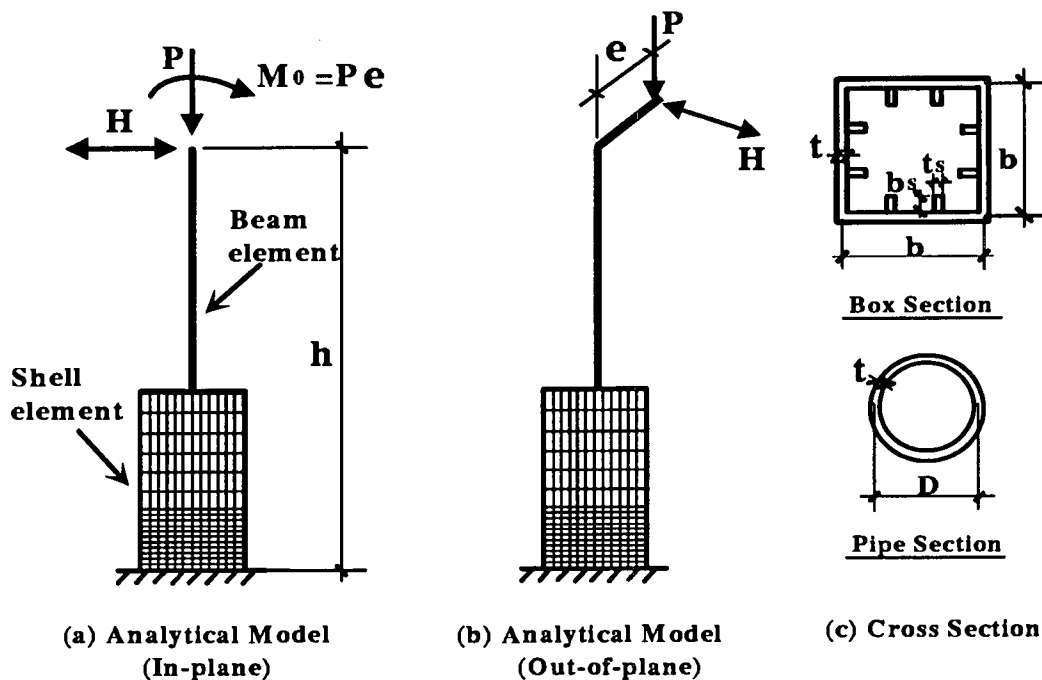


図-1 逆L形鋼製橋脚の解析モデル

モデルが組み込まれている。修正二曲面モデルに関する詳細は文献9)等を参照されたい。また、要素としては、同ソフトに提供されているTimoshenkoのはり理論に基づくはり要素B31OSHと4節点の低減積分有限膜ひずみシェル要素S4Rを用いた。

本研究においては、フランジプレートの幅厚比パラメータ  $R_f$  またはパイプ断面の径厚比パラメータ  $R_t$ 、柱の細長比パラメータ  $\bar{\lambda}$  および偏心量  $e$  を主要なパラメータとして考えた。ただし、 $\bar{\lambda}$  が大きく偏心量も大きい橋脚が用いられるのは少ないと思われるので、 $\bar{\lambda}$  が比較的小さい橋脚のみを検討の対象とした。また、箱形断面柱の場合、縦横比  $\alpha (= L_d/b, L_d = \text{ダイアフラム間隔}, b = \text{フランジ幅})$  を0.5、補剛材の剛比  $\gamma/\gamma^*$  ( $\gamma^* = \text{線形座屈理論から求められる最適剛比}$ ) を3.0とした。なお、軸力比  $P/P_y$  ( $P = \text{軸力}, P_y = \text{全断面降伏軸力}$ ) に関しては、各箱形断面柱とP1シリーズを除いた各パイプ断面柱に対して0.15とした。ただし、P1シリーズの場合、文献1)で報告されているT形柱P1との比較を行うために  $P/P_y = 0.12$  に統一した。表-1には、各解析モデルの諸元を示す。箱形断面柱であるB3, B5およびB6の各シリーズの内、B3, B5およびB6はT形柱で、文献2)でのB3, B5およびB6-15に相当する。同様に、パイプ断面柱であるP1, P8およびP12の各シリーズの内、P1, P8およびP12はT形柱で、文献1)でのP1, P8およびP12に対応している。これらのT形柱の詳細については、それぞれの文献を参考されたい。なお、面外繰り返し荷重を受ける逆L形橋脚の解析では、細長比パラメータ  $\bar{\lambda}$  を0.3と0.2に設定し、比較のため文献1)で解析の対象とならなかった  $\bar{\lambda} = 0.2$  のT形橋脚 (P13, P14およびP15の3ケース) の解析も併せて行った。ここで、 $R_f, R_t$  および  $\bar{\lambda}$  は次

式で定義される。

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

$$R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{D}{2t} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{Kh}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

上式中、 $t = \text{板厚}, D = \text{直径}, \sigma_y = \text{降伏応力}, E = \text{弾性係数}, \nu = \text{ポアソン比}, k = \text{フランジ板の座屈係数}, K = \text{有効座屈係数 (片持柱では } K=2), h = \text{供試体の柱としての長さ}, \text{ および } r = \text{鋼断面の断面2次半径である。なお、解析においては、初期たわみと残留応力は考慮しなかった。}$

各解析モデルの材料定数は表-2に示されている。P1シリーズの諸元は、引張試験から得られたものである。その他の解析モデルの材料定数  $E, \sigma_y$  および  $\nu$  はそれぞれの公称値を用い、ひずみ硬化開始時の硬化係数  $E_{s1}$  とひずみ硬化開始時のひずみ  $\epsilon_{s1}$  は、引張試験<sup>9)</sup>から得られた平均的なものを用いている。また、修正二曲面モデルのモデルパラメータとしてはSS400またはSM490材に対する値<sup>9)</sup>をそれぞれ用いた。

### 3. 面内繰り返し荷重を受けた場合の解析結果と考察

#### 3.1 T形柱と逆L形柱との履歴特性の比較

表-1に示されている18ケースについて解析を行った。図-2には、例として箱形断面柱2ケースとパイプ断面柱2ケースの履歴曲線を示す。実線は今回新たに行われた逆L形柱の解析結果を、破線は文献1)または2)で報告されているT形柱の解析結果を表している。こ

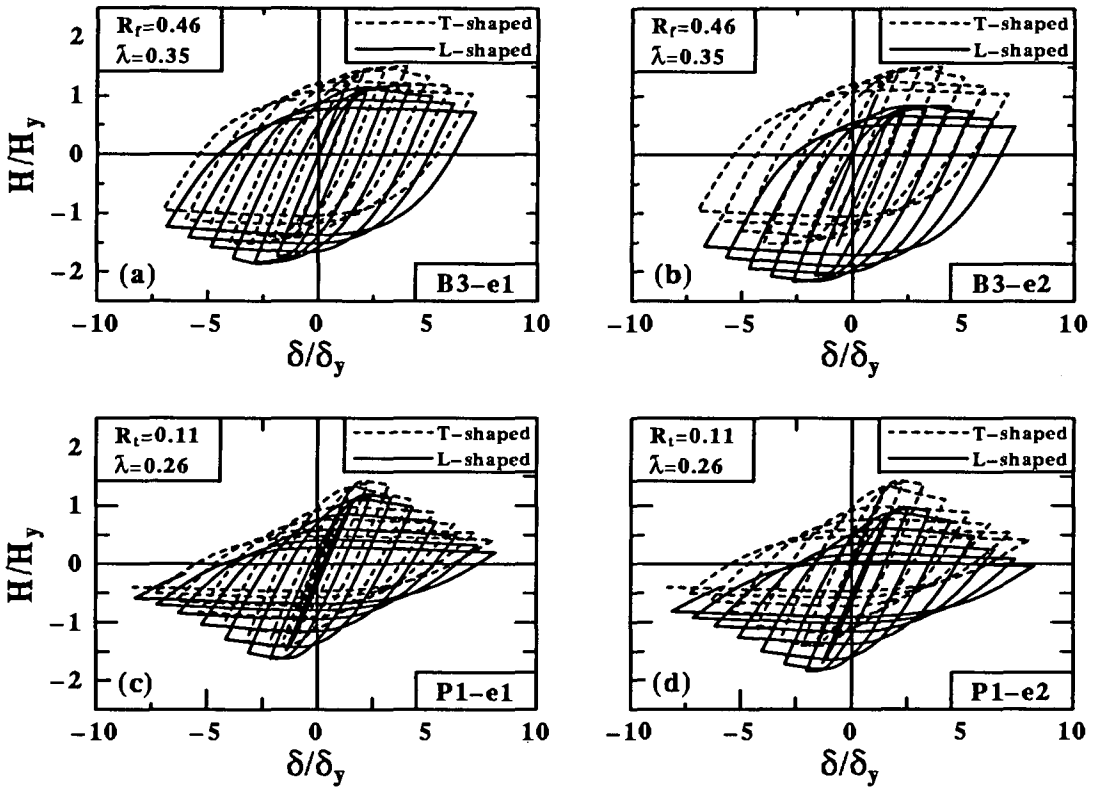


図-2 逆L形鋼製橋脚（面内）の履歴曲線の比較，箱形断面：(a)~(b)；パイプ断面：(c)~(d)

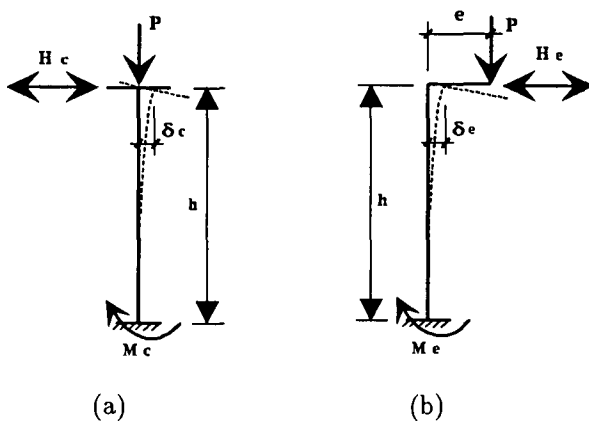


図-3 T形鋼製橋脚と逆L形鋼製橋脚（面内）

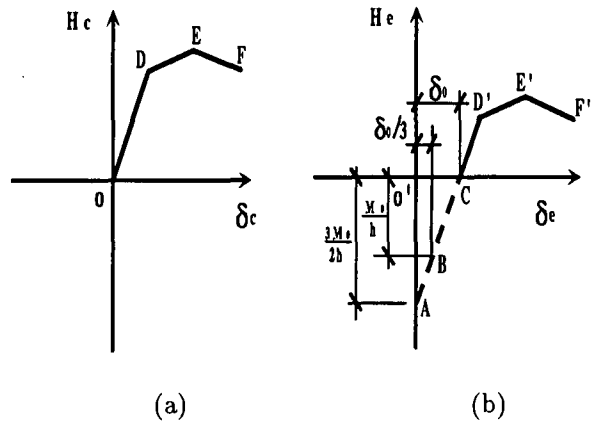


図-4 T形鋼製橋脚と逆L形鋼製橋脚（面内）の荷重-変位関係

ここで、横軸は $\delta_y$ で無次元化した柱上端部の水平変位、縦軸は $H_y$ で無次元化した水平荷重とした。降伏荷重 $H_y$ と降伏変位 $\delta_y$ は、T形柱に対するものであり、その求め方は文献1), 2)に参考されたい。

### 3.2 T形柱と逆L形柱との履歴特性の相関性

ここで、図-3に示すT形柱と逆L形柱の荷重-変位特性における相関性を調べてみる。

T形柱と逆L形柱の柱基部における曲げモーメントをそれぞれ $M_c$ と $M_e$ とすると、次式のようになる。

$$M_c = H_c \cdot h + P \cdot \delta_c \quad (4)$$

$$M_e = H_e \cdot h + P \cdot \delta_e + M_0 \quad (5)$$

ここで、 $H_c$  = T形柱の水平荷重、 $H_e$  = 逆L形柱の水

平荷重、 $\delta_c$ 、 $\delta_e = H_c$ と $H_e$ にそれぞれ対応する水平変位、 $M_0 = P \cdot e$  = 偏心荷重による付加モーメント、および $e$  = 偏心量である。図-4には、T形柱と逆L形柱の荷重-変位曲線のスケッチを示す。弾性理論より、 $\delta_c$ と $\delta_e$ はそれぞれ次(6)と(7)で与えられる。

$$\delta_c = \frac{H_c \cdot h^3}{3EI} \quad (6)$$

$$\delta_e = \delta_0 + \frac{H_e \cdot h^3}{3EI} = \frac{M_0 \cdot h^2}{2EI} + \frac{H_e \cdot h^3}{3EI} \quad (7)$$

ここで、 $I$  = 断面2次モーメント、 $\delta_0$  = 偏心荷重による初期水平変位である。 $H_c$ と $H_e$ を式(4)と(5)より求め、式(6)と(7)に代入すると、次のようになる。

$$\left(P + \frac{3EI}{h^2}\right)\delta_c = M_c \quad (8)$$

表-1 解析モデルの諸元

モデル	$R_f, R_t$	$\bar{\lambda}$	$e/h$	$\frac{P}{P_y}$	備考
B3	0.460	0.35	0.0	0.15	T形 <sup>2)</sup>
B3-e1	0.460	0.35	0.1	0.15	面内
B3-e2	0.460	0.35	0.2	0.15	面内
B5	0.350	0.20	0.0	0.15	T形 <sup>2)</sup>
B5-e1	0.350	0.20	0.1	0.15	面内
B5-e2	0.350	0.20	0.2	0.15	面内
B5-e3	0.350	0.20	0.3	0.15	面内
B5-e4	0.350	0.20	0.4	0.15	面内
B5-e5	0.350	0.20	0.5	0.15	面内
B6	0.350	0.35	0.0	0.15	T形 <sup>2)</sup>
B6-e1	0.350	0.35	0.1	0.15	面内
B6-e2	0.350	0.35	0.2	0.15	面内
P1	0.110	0.26	0.0	0.12	T形 <sup>1)</sup>
P1-e1	0.110	0.26	0.1	0.12	面内
P1-e2	0.110	0.26	0.2	0.12	面内
P8	0.075	0.30	0.0	0.15	T形 <sup>1)</sup>
P8-e1	0.075	0.30	0.1	0.15	面内
P8-e2	0.075	0.30	0.2	0.15	面内
P8-e1-o	0.075	0.30	0.1	0.15	面外
P8-e2-o	0.075	0.30	0.2	0.15	面外
P13	0.075	0.20	0.0	0.15	T形
P13-e1	0.075	0.20	0.1	0.15	面内
P13-e2	0.075	0.20	0.2	0.15	面内
P13-e3	0.075	0.20	0.3	0.15	面内
P13-e4	0.075	0.20	0.4	0.15	面内
P13-e5	0.075	0.20	0.5	0.15	面内
P13-e1-o	0.075	0.20	0.1	0.15	面外
P13-e2-o	0.075	0.20	0.2	0.15	面外
P13-e3-o	0.075	0.20	0.3	0.15	面外
P13-e4-o	0.075	0.20	0.4	0.15	面外
P5	0.100	0.30	0.0	0.15	T形 <sup>1)</sup>
P5-e1-o	0.100	0.30	0.1	0.15	面外
P5-e2-o	0.100	0.30	0.2	0.15	面外
P14	0.100	0.20	0.0	0.15	T形
P14-e1-o	0.100	0.20	0.1	0.15	面外
P14-e2-o	0.100	0.20	0.2	0.15	面外
P12	0.005	0.30	0.0	0.15	T形 <sup>1)</sup>
P12-e1-o	0.005	0.30	0.1	0.15	面外
P12-e2-o	0.005	0.30	0.2	0.15	面外
P15	0.050	0.20	0.0	0.15	T形
P15-e1-o	0.050	0.20	0.1	0.15	面外
P15-e2-o	0.050	0.20	0.2	0.15	面外

表-2 実験供試体の材料定数

シリーズ	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\frac{E}{E_{st}}$	$\frac{\epsilon_{st}}{\epsilon_y}$	材質
B3, B5, B6	314.0	593.0	30	7.0	SM490
P1	289.6	576.0	40	14.0	SS400
P1以外の パイプ橋脚	235.4	426.1	40	10.0	SS400

$E = 2.06 \times 10^5$  (MPa),  $\nu = 0.3$

$$(P + \frac{3EI}{h^2})\delta_e = M_e + \frac{1}{2}M_0 \quad (9)$$

上式より、 $\delta_c$ と $\delta_e$ との間に次の関係式が得られる。

$$(P + \frac{3EI}{h^2})(\delta_e - \delta_c) = M_e - M_c + \frac{1}{2}M_0 \quad (10)$$

ただし、 $\delta_e - \delta_c$ は水平変位の差を表す。この式は、 $\delta_e - \delta_c$ が一定であれば、 $M_e - M_c$ が一定となることを意味す

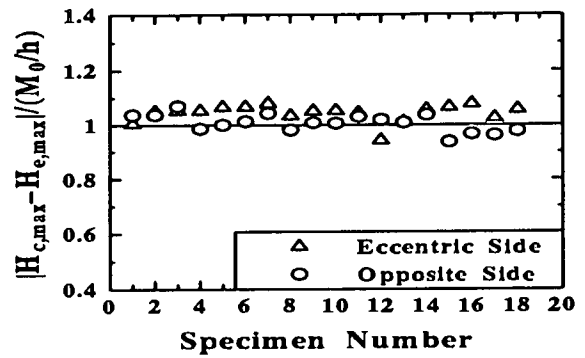


図-5 T形鋼製橋脚と逆L形鋼製橋脚（面内）との最高荷重の差

る。例えば、 $\delta_e - \delta_c = 0$ のとき

$$M_e - M_c = -\frac{1}{2}M_0 \quad (11)$$

また、 $\delta_e - \delta_c = \delta_0/3$ のとき

$$M_e - M_c = \frac{P\delta_0}{3} \quad (12)$$

あるいは、 $\delta_e - \delta_c = \delta_0$ のとき

$$M_e - M_c = P\delta_0 + M_0 \quad (13)$$

そして、式(11)~(13)に式(4)と(5)を代入すれば、以下に示すT形柱と逆L形柱との水平荷重の関係式が得られる。

$$H_e = H_c - \frac{3M_0}{2h} \quad (14)$$

$$H_e = H_c - \frac{M_0}{h} \quad (15)$$

$$H_e = H_c \quad (16)$$

式(14)~(16)は、水平変位差 $\delta_e - \delta_c$ をそれぞれ0,  $\delta_0/3$ および $\delta_0$ としたときの、水平荷重 $H_c$ と $H_e$ との関係式である。ここで、これらの式の物理的意味を図-4を用いて解釈してみる。図-4(a)の原点Oで $\delta_c = 0$ と $H_c = 0$ であるので、 $\delta_e - \delta_c = 0$ の場合、 $\delta_e = 0$ と $H_e = -3M_0/2h$ が得られる。即ち、点Oに対応する点は、図-4(b)の縦軸上の点Aである。一方、 $\delta_e - \delta_c = \delta_0/3$ の場合、 $\delta_e = \delta_0/3$ および $H_c = -M_0/h$ になるので、点Bは点Oに対応する点である。同様に、もし $\delta_e - \delta_c = \delta_0$ を採用した場合、横軸上の点Cは点Oに対応する点になる。その他の点の対応関係については、仮定した水平変位差に応じて式(14)~(16)のいずれかにしたがって平行移動すればよい。ただし、前述したように、これらの関係式は、あくまでも弾性理論に基づいているものであり、弾性域以外の領域において妥当かどうかについては調べる必要がある。もし弾塑性領域で式(14)~(16)のどれか(或いは全く別の関係式)が成り立つことが証明されれば、全領域にわたって1つの相関式があるため、逆L形橋脚の荷重-変位履歴特性はT形橋脚のものから簡単に求めることができる。

まず、最高荷重をみてみよう。解析した18ケースの最大荷重 $H_{c,max}$ を様々な方法で整理したが、図-5の

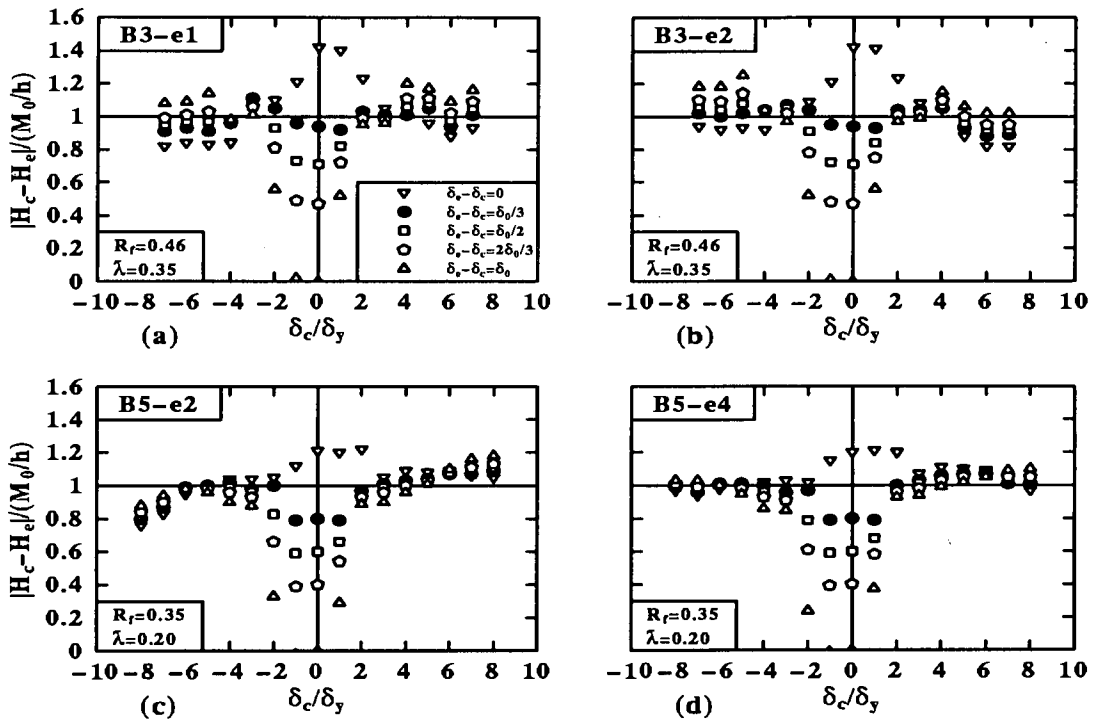


図-6 任意変位レベルにおけるT形鋼製橋脚と逆L形鋼製橋脚（面内）との荷重の差

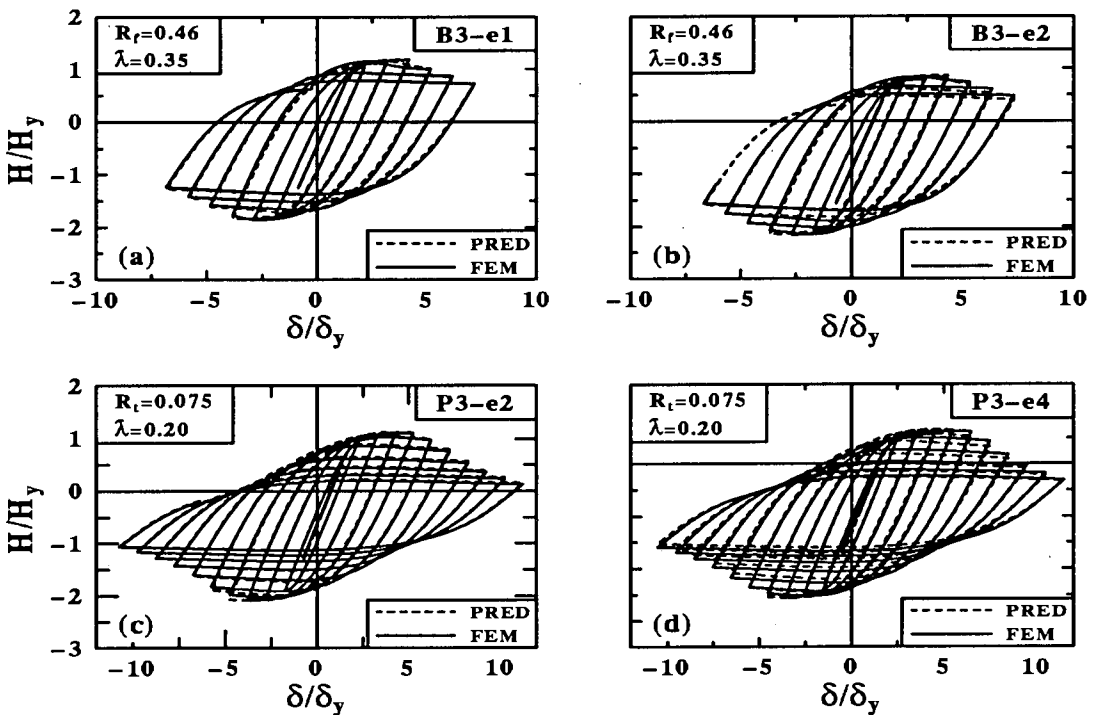


図-7 解析値と推定値との比較：逆L形鋼製橋脚（面内）の履歴曲線

ように整理すると、ばらつきが最も小さかった。ここで、横軸には解析ケースの番号を表す数字、縦軸には逆L形柱の最高荷重とT形柱の最高荷重との差の絶対値を  $M_0/h$  で割ったものをとっている。同図より、解析したすべてのケースにおいて、逆L形柱の最高荷重とT形柱の最高荷重との差は約  $M_0/h$  ではば一定と見なせることが言える。

次に、各変位振幅、即ち  $\delta_c/\delta_y = 0, 1, \dots$  の各折り返

し点の荷重  $H_c$  を最高荷重点の場合と同様にプロットしたものの一部が図-6に示されている。これらの図には、 $\delta_e - \delta_c = 0, \delta_0/3, \delta_0/2, 2\delta_0/3$  および  $\delta_0$  の5ケースについて調べた結果が含まれている。この図を見てみると、 $\delta_e - \delta_c = \delta_0/3$  の場合、他のケースに比べ、荷重差  $|H_c - H_e|$  は弾性域と非弾性域とともに約  $M_0/h$  となっていることがわかる。

以上のことを総合すると、T形柱の変位  $\delta_c$ 、荷重  $H_c$

と逆L形柱の変位 $\delta_e$ 、荷重 $H_e$ との間に、以下の近似関係式が成り立つことがわかる。

$$\delta_e = \delta_c - \frac{\delta_0}{3} \quad (17)$$

$$H_e = H_c - \frac{M_0}{h} \quad (18)$$

### 3.3 履歴特性の推定値と解析値との比較

ここで、T形柱の履歴特性より、式(17)と(18)を用いて逆L形柱の履歴特性を推定する手順を説明する。ただし、逆L形柱のある変位 $\delta_e$ に対応する荷重 $H_e(\delta_e)$ を求めることとする。

1. 式(17)より、与えられた $\delta_e$ に対応するT形柱の変位 $\delta_c$ を算出する。
2. T形柱の荷重変位曲線から、 $\delta_c$ に対応する荷重 $H_c(\delta_c)$ を求める。
3. 式(18)より、逆L形柱の荷重 $H_e(\delta_e)$ が得られる。

上述した推定法に従って、18ケースの荷重-変位履歴曲線を予測してみた。得られた結果の一部を解析結果とともに図-7に示す。推定曲線と解析曲線は非常によく一致していることがわかる。

### 4. 面外繰り返し荷重を受けた場合の解析結果と考察

この節では、逆L形橋脚の先端に一定の偏心軸力 $P$ と面外繰り返し水平荷重 $H$ が作用したときの結果について述べる。この場合、 $P$ による面内付加モーメント $M_0 (= P \cdot e)$ 以外に、 $H$ による付加ねじりモーメント $T (= H \cdot e)$ も生じる。したがって、橋脚の履歴特性に及ぼす曲げとねじりの影響を調べる必要がある。

図-8に、例として4ケースの履歴曲線(破線)を示す。比較のため、それらに対応するT形柱の解析結果(実線)もプロットされている。まず、 $R_t = 0.10$ と $\bar{\lambda} = 0.2$ の2ケースを見てみる。図-8(a)と(b)はそれぞれP14-e1-o( $e/h = 0.1$ )とP14-e2-o( $e/h = 0.2$ )の結果である。図-8(a)より、偏心量 $e/h = 0.1$ の場合、履歴特性に逆L形柱とT形柱との差がピークまではほとんどなく、その後の強度劣化は逆L形柱の方が大きい。これに対し、偏心量 $e/h = 0.2$ の場合、図-8(b)に見られるように、両者の差異がピーク前からも顕然に現れており、逆L形柱の強度と変形能は格段に小さいことがわかる。次に、 $R_t = 0.10$ と $\bar{\lambda} = 0.3$ の2ケース[図-8(c)と(d)]を見ると、上述した傾向も見られる。これより、偏心量が大きい( $e/h = 0.2$ )逆L形橋脚の耐震性能がかなり低いことが言える。また、図-8(a)と(c)、あるいは図-8(b)と(d)を比較すると、同じ偏心率でも、T形柱に対する逆L形柱の強度劣化は $\bar{\lambda} = 0.3$ の方が $\bar{\lambda} = 0.2$ より大きいことがわかる。

続いて、履歴曲線の包絡線を用いて考察する。図-9(a)と(b)には、P13シリーズ( $R_t = 0.075$ ,  $\bar{\lambda} = 0.2$ )

とP8シリーズ( $R_t = 0.075$ ,  $\bar{\lambda} = 0.3$ )の結果が示されている。これらの図では、 $e = 0$ のものがT形柱の結果である。この2つの図より、偏心量 $e/h$ が大きくなるにつれて強度と変形能は小さくなることがわかる。ただし、 $e/h = 0.1$ と $e/h = 0$ の曲線を比較すると逆L形柱の方が多少低いものの、両者の差はそれほど大きくない。これは、偏心が小さいので付加モーメントとねじりモーメントの影響が小さいからである。

一方、曲線の弾性域に注目すると、偏心量 $e/h$ が大きくなると、弾性剛性が低下していくことが一目瞭然である。これは、ねじりモーメント $T$ によるものと思われる。その裏付けを得るために、次のように分析してみる。弾性理論によれば、水平荷重 $H_e$ とねじりモーメント $T$ による水平変位 $\delta_e$ は次式から求められる。

$$\delta_e = \frac{H_e \cdot h^3}{3EI} + \frac{T \cdot h \cdot e}{GI_p} \quad (19)$$

ここで、 $G = E/[2(1+\nu)]$  = せん断弾性係数、 $I_p$  = 断面2次極モーメント。なお、上式中の第1項は曲げ変形、第2項はねじり変形を表している。薄肉パイプ断面の場合、式(19)は次のように書くことができる。

$$\delta_e = \frac{H_e h^3}{3EI} [1 + 3(1+\nu) \left(\frac{e}{h}\right)^2] \quad (20)$$

上式中

$$\beta = 1 + 3(1+\nu)(e/h)^2 \quad (21)$$

とおけば、次式が得られる。

$$\delta_e = \frac{\beta H_e h^3}{3EI} \quad (22)$$

上式は、T形柱の水平変位式[式(6)]と似た形になっている。弾性域において、同じ変位での水平荷重 $H_e$ と $H_c$ の関係は、式(22)中の $\delta_e$ を式(6)中の $\delta_c$ と等しくさせることにより得られる。

$$H_c = \beta H_e \quad (23)$$

言い換えれば、逆L形柱の水平荷重 $H_e$ に係数 $\beta$ を乗じたものが、T形柱の水平荷重 $H_c$ に等しい。その結果、両者の弾性剛性が一致する。このようにして図-9(a)と(b)をプロットし直すと、図-9(c)と(d)が得られる。同図よりわかるように、 $\delta_y$ までの領域いわゆる弾性域はほぼ一致し、 $2\delta_y$ までもかなり一致している。したがって、ねじりの影響が弾性剛性低下の原因であると判明できた。

さらに、図-9(a)と(b)において最大荷重 $H_{max}/H_y$ は $e/h$ が大きくなればなるほど低下していたが、(c)と(d)では $\beta H_{max}/H_y$ はほぼ一致している。これは、逆L形柱の最高荷重にねじりによる弾性剛性低下係数 $\beta$ を乗じて得られた値がT形柱の最高荷重に近いことを意味している。これを裏付けするため、全て14ケースの逆L形柱の最高荷重について以上の方法で整理し、T形柱に対する提案式との比較を行った。その結果を図-10(a)に示す。したがって、T形柱の強度が経験式<sup>1)</sup>より算出し、それを $\beta$ で割ったものが逆L形柱の強度であ

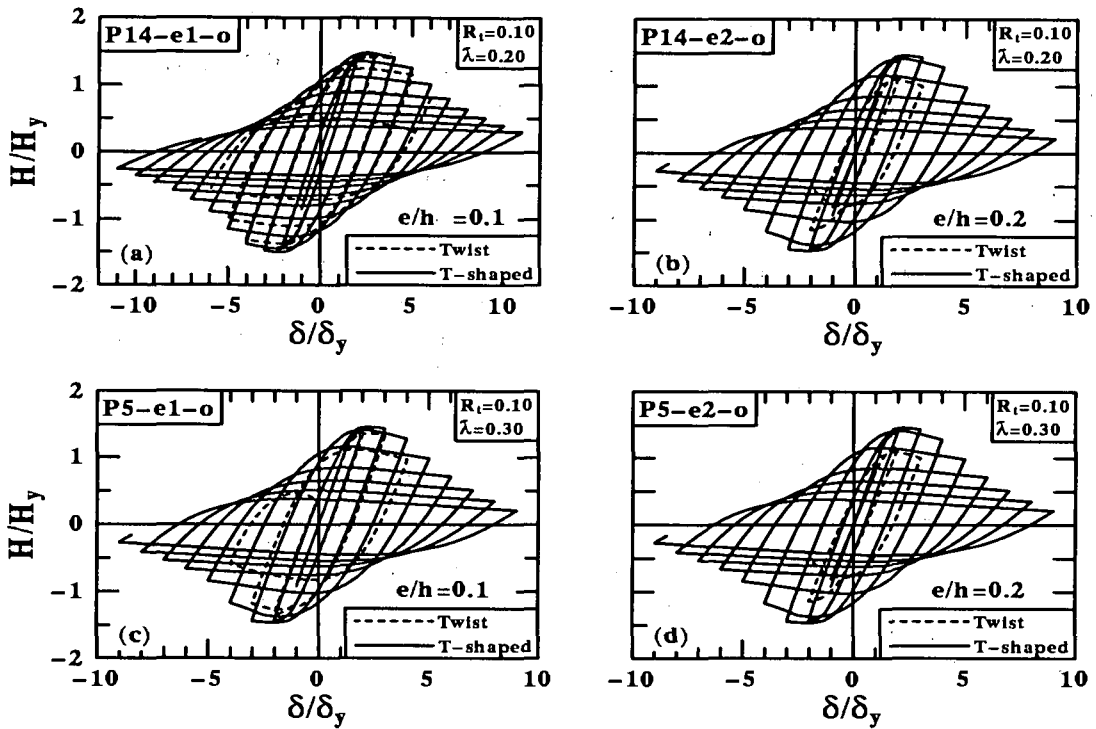


図-8 逆L形鋼製橋脚（面外）とT形鋼製橋脚の履歴曲線の比較

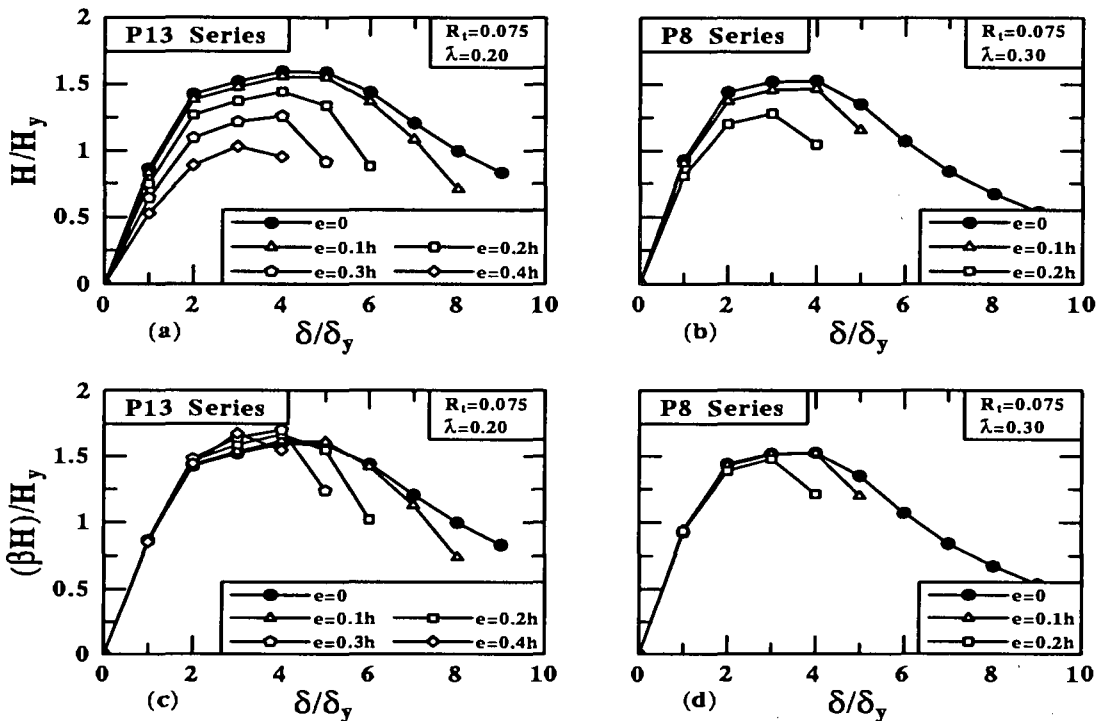


図-9 逆L形鋼製橋脚（面外）の包絡線の比較, (a)~(b) : 補正前 ; (c)~(d) : 補正後

る、ということが言える。しかし、以上のように整理しても、最大荷重に対する変位 $\delta_m/\delta_y$ 、95%強度に対応する変位 $\delta_{95}/\delta_y$ に関しては、逆L形柱とT形柱との相関性はまだわからない。ただし、図-9(c)と(d)に見られるように、 $e/h$ が大きくなると $\delta_m/\delta_y$ と $\delta_{95}/\delta_y$ ともに小さくなる。そこで、近似的方法として最高荷重の場合と同様に、逆L形柱の変形能 $\delta_m/\delta_y$ と $\delta_{95}/\delta_y$ に係数

$\beta$ を乗じて得られた値とT形柱の近似式との比較を図-10(b)と(c)に示した。同図より、両者がよく一致していることがわかる。したがって、逆L形柱の変形能は最高荷重の場合と同様にねじりによる弾性剛性の低下係数 $\beta$ を導入すれば、T形柱に対する提案式から求めることができる。

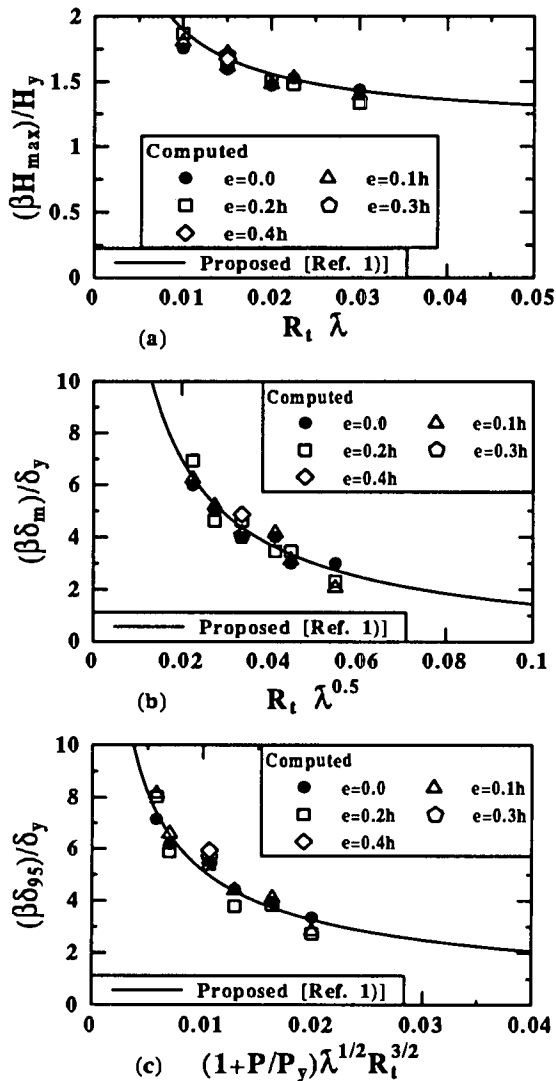


図-10 面外繰り返し荷重を受けた逆L形鋼製橋脚の強度と変形能

## 5. 結言

本研究より得られた主な結論を要約すると次のようである。

1. 面内繰り返し水平荷重を受ける逆L形鋼製橋脚とT形鋼製橋脚との荷重—変位関係は、式(17)と(18)の近似関係がある。
2. 面外繰り返し水平荷重を受ける逆L形鋼製橋脚とT形鋼製橋脚との比較では、式(21)のねじりによる弾性剛性の低下係数を導入すれば、強度と変形能には良い相関関係が得られた。
3. 以上の結果を用いれば、過去に得られたT形柱に対する提案式より、逆L形柱の強度と変形能は簡単に得られる。

## 参考文献

- 1) 葛 漢彬, 高 聖彬, 宇佐美勉, 松村寿男: 鋼製パイプ断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.181-190, 1997年10月.
- 2) 葛 漢彬, 高 聖彬, 宇佐美勉: 鋼製補剛箱形断面橋脚の繰り返し弾塑性解析と耐震性評価, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.85-92, 1997年.
- 3) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG (主査: 宇佐美勉): 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996年.
- 4) 崎元達郎, 渡辺 浩, 富田 聡, 中島黄太: 繰り返し水平力を受ける鋼柱の終局挙動の簡易解析法, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.111-116, 1997年.
- 5) 小枝日出夫, 熱海明彦, 佐藤昌志, 岸 徳光: 鋼管橋脚の交番載荷実験と解析, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.161-168, 1997年.
- 6) 山口栄輝, 阿部圭吾, 久保喜延: 繰り返し水平荷重を受ける鋼製円筒橋脚柱の一解析法, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.197-202, 1997年.
- 7) 後藤芳顯, 王 慶雲, 小畑 誠, 高橋宜男: 繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚の有限要素法解析と材料構成則, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.209-216, 1997年.
- 8) 井浦雅司, 小牧 理: 汎用プログラムによる円形鋼製橋脚の局部座屈解析, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.217-222, 1997年.
- 9) Shen, C., Mamaghani, I. H. P., Mizuno, E. and Usami, T.: Cyclic Behavior of Structural Steels. II: Theory, J. of Eng. Mech., ASCE, Vol.121, No.11, pp.1165-1172, 1995.
- 10) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.5, 1995.

(1998年8月17日 受付)

## CYCLIC ELASTOPLASTIC ANALYSIS OF INVERTED L-SHAPED STEEL BRIDGE PIERS

Shengbin GAO, Hanbin GE and Tsutomu USAMI

The present paper is concerned with a nonlinear analysis of inverted L-shaped steel bridge piers subjected to in-plane or out-of-plane cyclic loading. In the analysis, a modified two-surface plasticity model is used to trace the inelastic cyclic characteristic of steel. Both the box-sectional and pipe-sectional piers are investigated. Analytical results show that there is a correction of hysteretic curves between the T-shaped and inverted L-shaped piers. Correspondingly, many contributions to the T-shaped columns can be easily extended to the inverted L-shaped or eccentric columns.