

## 水平2方向荷重を受ける鋼製橋脚の耐震性能に関する研究

A study on the seismic performance of steel bridge piers  
subjected to bi-directional horizontal loads

水野豪<sup>†</sup>, 鈴木森晶<sup>††</sup>, 青木徹彦<sup>††</sup>

Takeshi MIZUNO, Moriaki SUZUKI, Tetsuhiko AOKI

Most of the studies that have so far been carried out on seismic performance of steel bridge piers were based on one-directional loading. However, actual structures have to sustain more complex multi-directional horizontal forces when subjected to earthquake. Stress concentration may often occur at the bottom corners of the pier due to biaxial bending in multi-directional loading. This has great influence on ultimate strength and ductility of steel bridge piers. Experimental study was performed to investigate the seismic performance of steel bridge piers subjected to two-directional horizontal forces. For this purpose, several square section columns were served and the strength and ductility were investigated.

### 1. 序論

#### 1.1 背景

現在までに大学、研究機関で数多く行われてきた鋼製橋脚に関する研究は<sup>1)~3)</sup>、地震時の慣性力を想定した水平荷重を橋軸方向や橋軸直角方向という1方向に入力する研究が大部分であった。一方で橋軸方向および橋軸直角方向同時に水平力を作用させる2方向入力に関する研究は建築構造物を対象に以前から行われてきたが<sup>4)</sup>、土木構造物を対象とした研究はほとんどなされておらず、現時点では未解明な部分が多い<sup>5)~7)</sup>。

土木構造物を対象とした研究として、杉浦ら<sup>8)</sup>は、角形鋼管柱が地震力を理想化した水平2方向の繰り返し荷重を受ける際の荷重-変形関係を実験的に求め、1方向比例荷重と比較して2方向非比例荷重での強度劣化が著しいことを明らかにしている。西田ら<sup>9)</sup>は、RC柱が水平2方向の地震入力を受ける際の非線形領域における耐力・変形特性を検討するために振動台加振実験を行い、非線形領域において加速度や変位履歴が水平2方向に対して長周期化しながら描くということを確認した。小畑ら<sup>10)</sup>は、橋脚モデルに対して水平2方向の地震波に対するハイブリッド地震応答実験を行い、従来の1方向荷重と2方向荷重の差を具体的に明らかにした。

ところで、橋脚が2方向からの荷重を受けた場合、2軸曲げが生じることが考えられる。従ってこのような状態での橋脚基部の応力は角部に集中し、従来から行われてきた橋軸および橋軸直角

方向への繰り返し荷重実験での基部応力分布とは明らかに異なる分布を示すことが考えられる。このように慣性力が複雑に作用した状態での橋脚の耐震性能をより現実的に検討するには、地震動の2方向入力を想定した状態が必要になると考えられる。しかし、現時点では参考となる実験データが十分蓄積されておらず、明確な耐震性能の評価基準が定義されていないという理由から水平荷重の2方向入力について十分検討できる状態とは言い難い。

#### 1.2 本研究の位置付け

1.1で述べた背景をもとに地震動の2方向入力に対する鋼製橋脚の耐震性能把握のための研究プロセスを提案する。本研究で提案する研究プロセスを図1に示す。この研究プロセスの中での本研究の位置付けは、①、②を対象としている。

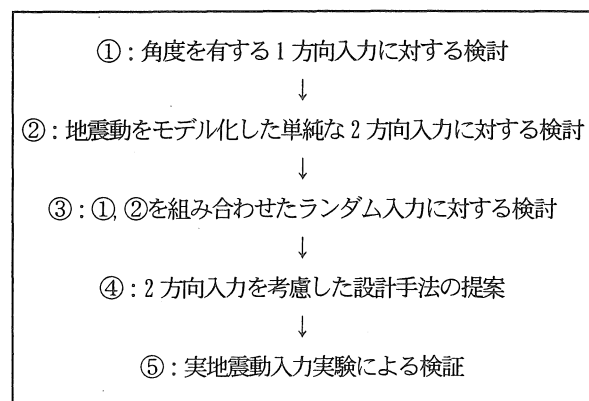


図1 研究プロセス

<sup>†</sup> 愛知工業大学 建設システム工学専攻

<sup>††</sup> 愛知工業大学 土木工学科(豊田市)

### 1・3 研究目的

本研究では, 実地震動波形を単純なパターンにモデル化し, 地震時の慣性力に相当する水平荷重を受ける正方形断面を有する鋼製橋脚の 2 方向繰り返し載荷実験および FEM 解析を行う。実験に際して, 供試体の 3 次元的な挙動を再現することができる載荷装置の開発を行う。次に 2 方向載荷自動制御プログラムの開発等の実験システムを作製し, 動作確認および検証を行う。

載荷実験では, 第 1 段階として断面の主軸方向およびこれに角度をつけた 2 種類の方向からの繰り返し載荷実験を行う。第 2 段階として, 実地震動波形に多く見られる円周状および楕円状の波形を再現するために 2 方向からの載荷変位履歴が非直線的に変化する非直線履歴を用いた繰り返し載荷実験を行う計画であるが, 本研究では, 載荷実験の前に FEM 解析により, その挙動を明らかにし 2 方向からの円周状および楕円状の載荷変位履歴に対する耐震性能を検証する。

## 2. 実験概要

### 2・1 実験供試体

本研究で使用する実験供試体は, フランジ, ウェブにそれぞれ 2 本の縦方向補剛材を持つ正方形補剛箱型断面である。図 2 に供試体断面図, 表 1 に供試体寸法および構造パラメータを示す。構造パラメータは, 式(1), (2)を用いて算出した<sup>8),9)</sup>。

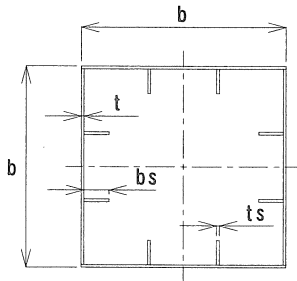


図 2 供試体断面図

表 1 供試体諸元

鋼種		SM490
板幅	$b$ (mm)	450
板厚	$t$ (mm)	6
縦補剛材板幅	$bs$ (mm)	55
縦補剛材板厚	$ts$ (mm)	6
供試体高さ	$h$ (mm)	2420
幅厚比パラメータ	$R_R$	0.522
細長比パラメータ	$\lambda$	0.350
補剛材剛比	$r/r^*$	2.50

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

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここで,  $b$ : 板幅,  $t$ : 板厚,  $\sigma_y$ : フランジ板パネルの降伏応力,  $E$ : 弾性係数,  $\nu$ : ポアソン比,  $k$ : 座屈係数 ( $=4n^2$ ),  $n$ : 補剛板のサブパネル数,  $r$ : 断面 2 次半径,  $h$ : 供試体高さである。

### 2・2 実験システム

本研究では, 地震時の慣性力を想定した水平荷重の 2 方向入力を実現するために, 水平荷重載荷用 2000kN アクチュエータを 2 基用いた。また, 任意の載荷パターンに対応するためコンピュータによる自動制御とした。この自動制御を実現するために, 理研精機社製静的油圧アクチュエータ・システム制御ラック (RCX-70) および東京測器社製 A/D 変換器 (DRA-101C), 制御用コンピュータ, 計測用コンピュータを使用した実験システムを作製した。実験システムは, 載荷装置および計測装置, 制御装置の 3 つで構成されている。

#### 2・2・1 計測装置および制御装置

計測装置および制御装置は, A/D 変換器と計測用および制御用のコンピュータ, 制御プログラムで構成されている。制御プログラムは, Visual Basic 6.0 を用いて作製した。本プログラムは, 制御用コンピュータで使用し, アクチュエータおよび A/D 変換器からの出力信号値の計測を行う計測値取得プログラムと, アクチュエータ・システム制御ラックとの通信を行い, アクチュエータを自動制御させるプログラムで構成されている。

#### 2・2・2 載荷装置

載荷装置平面図を図 3 に示す。載荷は, 上部構造重量を想定した鉛直荷重を載荷するために供試体上部に 1000kN アクチュエータ 1 基, 地震時の水平 2 方向からの慣性力を想定した水平荷重を載荷するために 2000kN アクチュエータ 2 基を取り付けた。本研究では, 水平荷重を 2 方向から載荷するため, 荷重載荷位置が 3 次元的な挙動をする。そのため, 既存の載荷治具に替わる新たな載荷治具として, 以下に述べる鉛直荷重載荷治具と 3 方向荷重載荷治具を作製した。

##### (1) 鉛直荷重載荷治具

鉛直荷重載荷治具を写真 1 に示す。鉛直荷重載荷治具は, 供試体上部に PC 鋼棒 4 本で反力床から支持し, 載荷治具底面に 1000kN アクチュエータを取り付け, 供試体真上から載荷を行う。

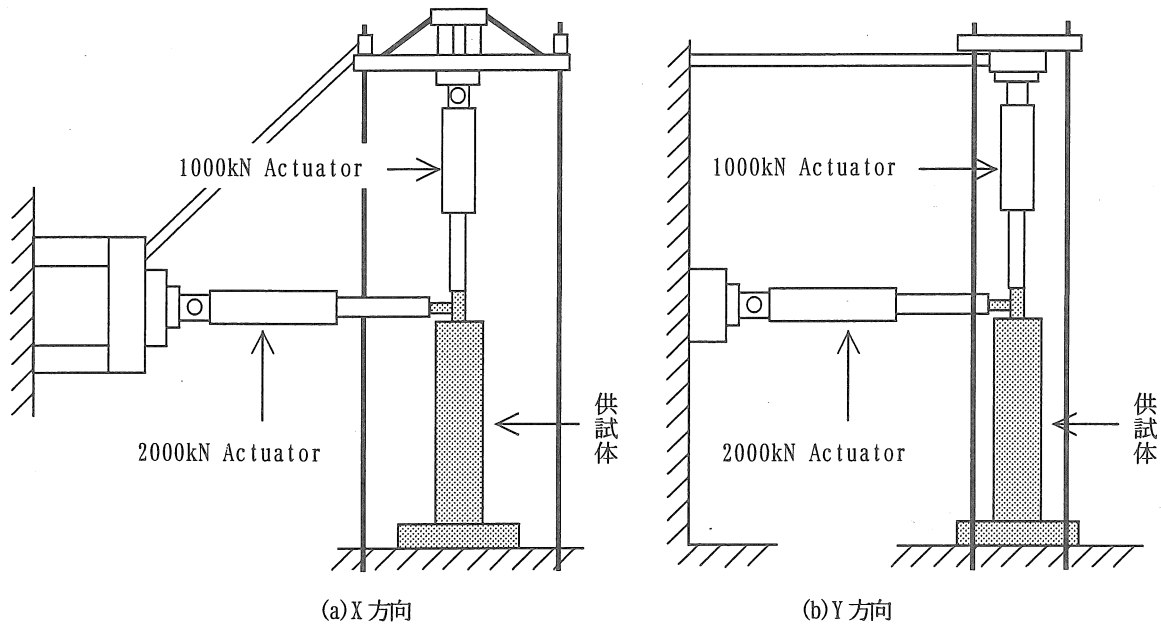


図3 荷重装置平面図

(2) 3方向荷重載荷治具

本研究で作製した3方向荷重載荷治具を写真2に示す。載荷治具の構造は、中心に直径90mmの芯を配置し、その中間部に両端にアームを有する回転部品を取り付ける。回転部品の両端に取り付けられたアームの先端に、アクチュエータ取り付け部を設ける。また、鉛直荷重載荷用に芯の上部に球座を取り付け、アクチュエータ先端を凹型にすることでピン支持とする。なお、芯と回転部品、回転部品とアームの取り付け部分はピン構造となっている。3基のアクチュエータと3方向荷重載荷治具との固定部分がピン構造となるため、荷重載荷位置の3次元的な挙動を実現させることができる。

2・3 荷重方法

本研究では、供試体の全断面降伏軸力  $P_y$  の20%である864kNを上部構造重量を想定した鉛直荷重  $P$  とした。載荷実験では、鉛直荷重  $P$  を一定に保持した状態で水平2方向への変位制御による繰り返し載荷を行った。繰り返し載荷の基本となる降伏水平荷重  $H_y$  は式(3)、(4)を用いて算出した値のうち小さい方の値を採用し、降伏水平変位  $\delta_y$  は曲げ変形とせん断変形を考慮した式(5)を用いて算出した<sup>10), 11)</sup>。

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad (3)$$

$$H_y = \frac{M_y}{0.85h} \left(1 - \frac{P}{P_E}\right) \left(1 - \frac{P}{P_u}\right) \quad (4)$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} + \frac{H_y h}{GA_w} \quad (5)$$

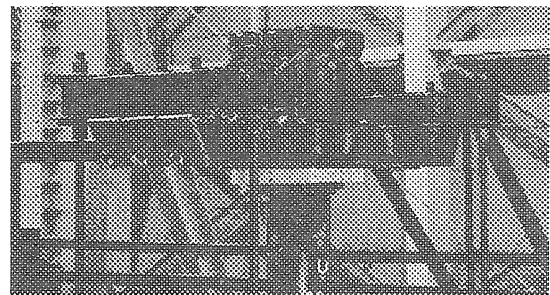


写真1 鉛直荷重載荷治具

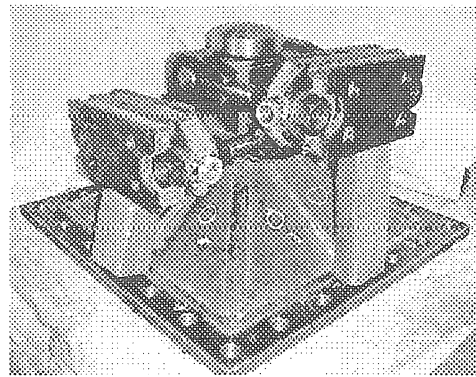


写真2 3方向荷重載荷治具

ここで、 $M_y$ : 降伏モーメント、 $h$ : 供試体高さ、 $E$ : 弾性係数、 $I$ : 断面2次モーメント、 $P_E$ : オイラー座屈強度、 $P_u$ : 道路橋示方書に示される局部座屈の影響を考慮した中心軸圧縮強度、 $G$ : せん断弾性係数、 $A_w$ : ウェブ断面積である。

2・4 載荷履歴

地震動の 2 方向入力に対する橋脚の挙動を把握するためには、実地震動波形を入力する動的載荷実験や 2 方向載荷ハイブリッド地震応答実験を行うのが最適である。しかし、これらの実験では、多くの実地震動を入力する必要があるばかりでなく、得られる結果は複雑で整理が難しくなることが報告されている<sup>6),7)</sup>。

一般に地震動は、波形が直線的に変化する直線成分と非直線的に変化する非直線成分の 2 種類に分類される。そこで、本研究では地震時の慣性力を想定した 2 方向からの水平荷重を、実地震動波形に多く含まれる角度を有する直線成分や円周状および楕円状の非直線成分にモデル化した 7 通りの載荷変位履歴で再現する。これらのモデル化した載荷変位履歴を図 4(a)~(e)に示す。なお、載荷変位履歴名は、UNI(直線 0 度), BI-L27(直線 26.6 度), BI-L45(直線 45 度), BI-CIR(円周), BI-OVL(楕円), BI-OVL45(楕円 45 度), BI-SQ(正方形)とする。

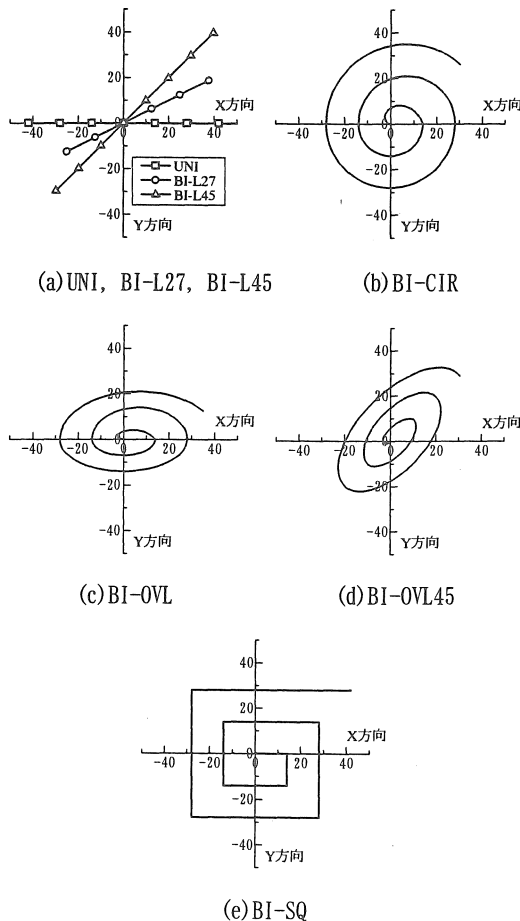


図 4 モデル化した載荷変位履歴(単位: mm)

3. 実験結果

3・1 材料試験結果

本実験で使用した鋼材の材料試験結果 4 体の平均値を表 2 に示す。ここで、E: 弾性係数,  $\sigma_y$ : 降伏応力,  $\epsilon_y$ : 降伏ひずみ,  $\nu$ : ポアソン比である。

表 2 材料試験結果

E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	$\nu$
206	410	2200	0.275

3・2 直線載荷

本研究では、直線載荷の実験により得られた X, Y 方向別の水平荷重、水平変位を載荷方向の合成値として水平荷重 H, 水平変位  $\delta$  を定義する。

(1) 水平荷重-水平変位履歴曲線および包絡線

図 5(a)~(c)に載荷方向別の水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。また、これらの包絡線を図 6 に示す。縦軸および横軸は、水平荷重 H, 水平変位  $\delta$  を材料試験結果を用いて算出した降伏水平荷重  $H_y$ , 降伏水平変位  $\delta_y$  により無次元化した値である。

図 5 および図 6 より、載荷方向における最大荷重値の差は、約 3~4%とそれほど大きな差は見られないが、最大荷重以降の強度劣化の程度は UNI (X 方向載荷) と比較して BI-L27, BI-L45 は比較的緩やかな劣化となり、変形能が上昇した結果となった。これは、板パネルに発生する応力分布の違いが要因であると考えられる。UNI では供試体基部に発生する応力はフランジ面によって主に受け持たれ、フランジ面は載荷方向に対して直角であり勾配を持たない。そのため、フランジ面で発生する応力はほぼ均等な値となり、一旦座屈が生じるとフランジ面内全体が座屈し強度劣化の進展は加速する。

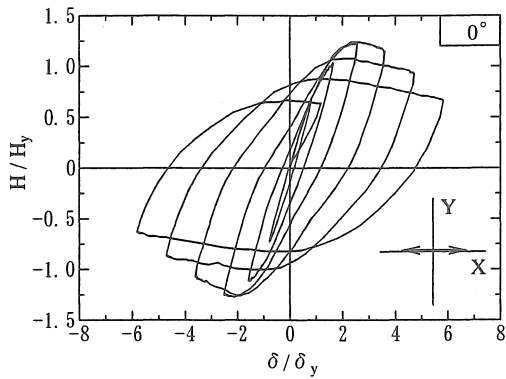
一方、載荷方向に角度を持つ BI-L27 や BI-L45 は、角部を構成する板パネルが載荷方向に対して勾配を持つため、発生する応力も載荷方向に対して勾配が存在する。BI-L45 の場合、載荷方向が供試体断面の対角線方向となるため角部に応力が集中し、角部付近で早期に座屈を生じさせ、最大荷重の低下を早める。しかし、角部を構成するウェブおよびフランジ板パネルに発生する応力に勾配が存在するため、座屈の進展は緩やかとなる。

このように、板パネルに発生する応力に勾配を持つことが変形能を上昇させる結果となったと考えられる。

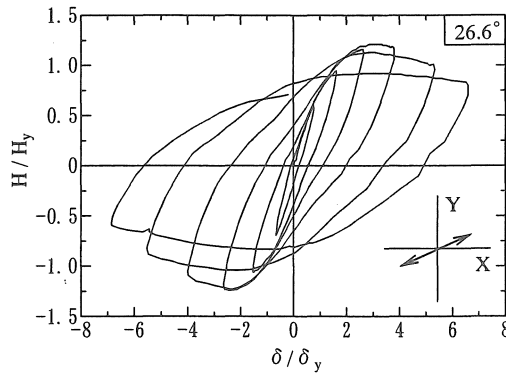
(2) ひずみ分布

図 7(a), (b)に UNI および BI-L45 の実験から得られた +2  $\delta_y$  時の供試体基部ひずみ分布を示す。ひずみは、基部から高さ 75mm の供試体側面補剛材上に貼り付けたひずみゲージより得られた値である。図中の太線は供試体断面であり、ひずみ 0 ( $\mu$ ) を表す。その太線の外側を圧縮ひずみ、内側を引張ひずみとする。また、

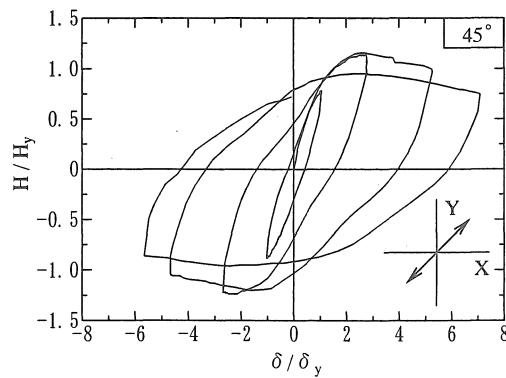
矢印は+側の荷重方向を示す。図 7 より, UNI は圧縮フランジ面に約 2400~3200( $\mu$ )の圧縮ひずみが生じた。一方, BI-L45 は荷重方向側の供試体角部を構成する板パネルにそれぞれ約 450~6400( $\mu$ )の圧縮ひずみが生じた。BI-L45 の供試体角部のひずみは, UNI の同位置のひずみと比較して約 2 倍生じていることがわかる。また, UNI ではウェブ面で圧縮, 引張の両ひずみが分布しているのに対して, BI-L45 は UNI のウェブ面に相当する板パネルのひずみ分布に占める圧縮ひずみの割合が大きくなっていることがわかる。



(a)UNI



(b)BI-L27



(c)BI-L45

図 5 水平荷重-水平変位履歴曲線

(3) 最大耐荷力と塑性率

本研究では, 最大荷重  $H_{max}$  を UNI の最大荷重  $(H_{max})_{UNI}$  で無次元化した値を最大耐荷力とした。また, 水平荷重が最大荷重到達後にその 95%まで低下したときの荷重方向の水平変位  $\delta_{95}$  を降伏水平変位  $\delta_y$  で無次元化した値を塑性率  $\mu_{95}$  と定義した。図 8 に最大耐荷力と荷重角度の関係および塑性率  $\mu_{95}$  を UNI の塑性率  $(\mu_{95})_{UNI}$  で無次元化した値と荷重角度の関係を示す。縦軸は  $H_{max}/(H_{max})_{UNI}$  および  $\mu_{95}/(\mu_{95})_{UNI}$ , 横軸は荷重角度を示す。なお, 0 度, 26.6 度は対称性を考慮してプロットしてある。

図 8 より, 荷重角度が断面主軸(X 方向)から 45 度方向に近づくほど最大耐荷力の低下が見られるが, その差は BI-L27 で約

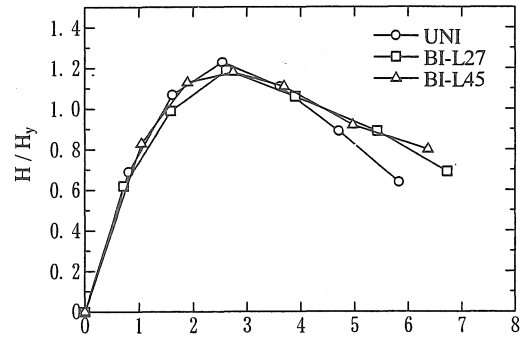
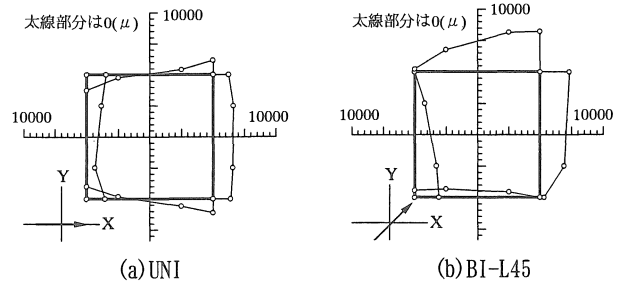


図 6 包絡線



(a)UNI

(b)BI-L45

図 7 ひずみ分布

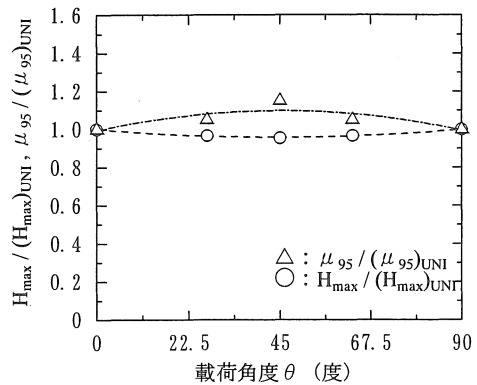


図 8 最大耐荷力と塑性率

3.3%, BI-L45 で約 4.1%とそれほど大きな低下は見られない。しかし、塑性率では逆に BI-L27 で約 4.6%, BI-L45 で約 15.0%の上昇が見られた。当初、載荷角度が断面主軸から大きくなるのこともない最大耐荷力および塑性率ともに低下すると考えられた。しかし、本研究から得られた結果によると、最大耐荷力には若干の低下が見られるものの、塑性率に関しては載荷方向が断面主軸に対して角度を持つもののほうが、断面主軸方向の載荷実験結果より上昇することが明らかとなった。これらの理由は、先の(1)項で述べたとおりである。

#### 4. 解析概要

直線載荷以外のパターンについては載荷実験を行う前に、FEM 解析を用いてその挙動を予測する。解析結果を検討することで地震動に含まれる波形の非直線成分が橋脚の耐震性能に与える影響を解析的に明らかにする。なお、解析は非直線載荷のうち BI-CIR, BI-OVL, BI-OVL45 について行った

##### 4.1 解析モデル

解析モデルは、図 9 に示すように局部座屈が柱基部に生じることを考慮して基部から第 3 ダイアフラムまではシェル要素を用い、それより上は、はり要素を用いてモデル化した。ただし、はり要素は、供試体断面と断面積および断面 2 次モーメントが等しい等価無補剛正方形断面とし、シェル要素とはり要素の接続部分は剛体とした。

解析には汎用構造解析ソフト ABAQUS<sup>12)</sup>を使用し、鋼材の繰返し弾塑性挙動に関する構成則は、修正二曲面モデルを用いた<sup>13), 14)</sup>。このモデルは、繰返し荷重を受ける鋼構造物の挙動を、従来の構成則モデルによる解析と比較して精度良く予測できるものであることが検証されている<sup>15)~17)</sup>。

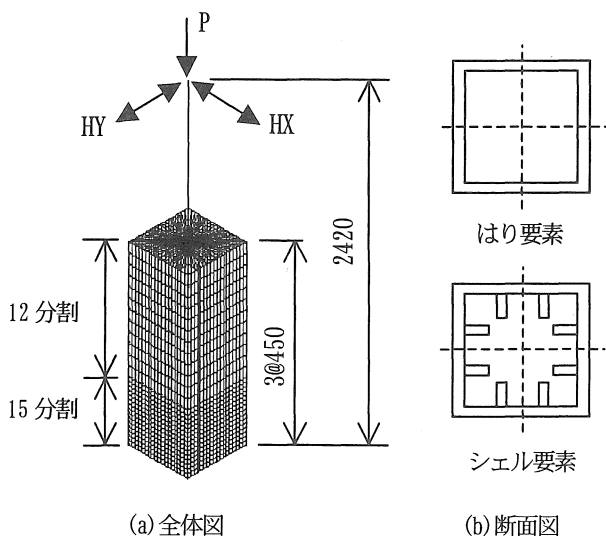


図 9 解析モデル(単位: mm)

#### 5. 解析結果

##### (1) 水平荷重-水平変位履歴曲線および包絡線

FEM 解析により得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を図 10(a)~(c)に示す。図中の水平荷重および水平変位は、材料試験結果から算出した  $H_y$ ,  $\delta_y$  で無次元化した値である。なお、図 10 には解析により得られた UNI の包絡線を併せて示す。

図 10 に示すように非直線載荷 BI-CIR, BI-OVL, BI-OVL45 は、UNI と比較して最大荷重以降の強度が著しく低下し、十分な変形能を得られていないことがわかる。

次に、断面主軸に直交する方向(Y 方向)への載荷変位の大きさが変形能に与える影響を検証するために UNI, BI-OVL, BI-CIR, BI-OVL45 の X 方向の包絡線を図 11 に示す。縦軸および横軸は、前述した  $H_y$ ,  $\delta_y$  で無次元化した値である。

図 11 より、断面主軸に直交する方向(Y 方向)の載荷変位が最も大きい BI-OVL45 の強度劣化が著しく、明らかに横方向載荷の影響が表れている。これは、非直線的な 2 方向からの載荷により断面内に発生する最大応力部分が、断面内を移動するためと考えられる。円周状や楕円状の履歴は、実地震動波形に多く含まれる波形であるため、実験によりその挙動をより正しく検証する必要がある。

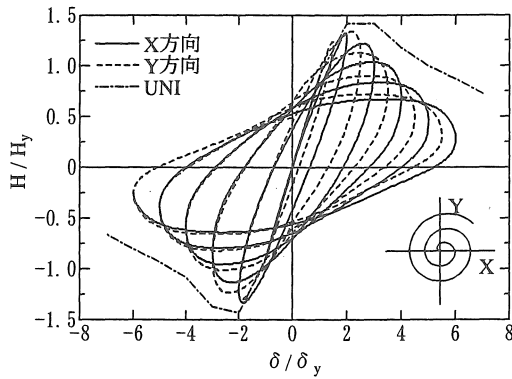
##### (2) 破壊変位点を用いた安全性の検討

2 方向地震動を考慮した安全性評価のための評価手法についての考察を示す。FEM 解析により得られた各載荷変位履歴の X, Y 方向別の包絡線において、水平荷重が最大荷重の 95%まで低下したときの水平変位  $(\delta_{95})_X$ ,  $(\delta_{95})_Y$  を  $(\delta_{95})_{UNI}$  で無次元化した値を破壊変位点  $\delta_{u_x}$ ,  $\delta_{u_y}$  と定義する。図 12 に X, Y 方向の破壊変位点を示す。同図には比較のため直線載荷の実験値より算出した破壊変位点を併せて示す。

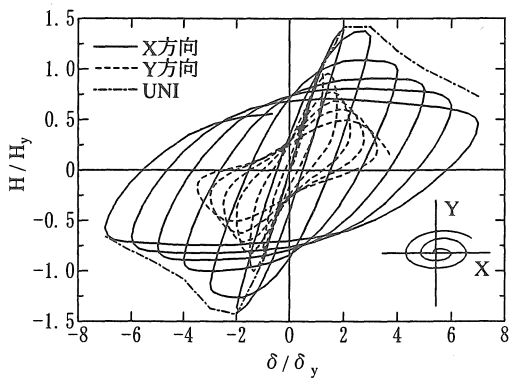
評価手法として、従来のように断面主軸方向または直交方向の 1 軸方向の結果を利用して安全性を評価する場合を考える。この場合の破壊基準線は、図 12 に示す円弧である X, Y 方向の破壊変位のベクトル合成となり、BI-OVL を除くすべての載荷変位履歴はこの外側に分布し、安全側の変形能を示すことがわかる。

別の評価手法として、断面主軸方向または直交方向の破壊変位の重ね合わせにより安全性を評価する手法がある。この場合、その破壊基準線は図 12 に示す破線となり、2 方向地震動を受けた場合の破壊基準を過小評価しすぎである(安全側すぎる)ことがわかる。

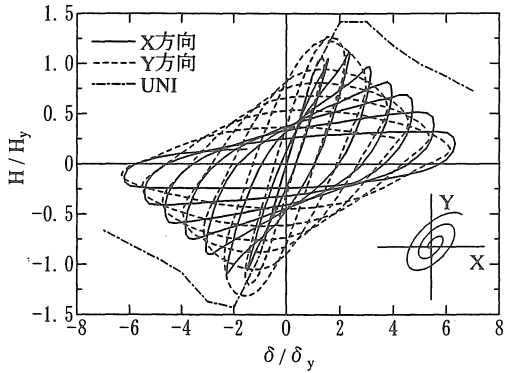
以上の結果から、2 方向地震動を考慮した安全性の評価手法としては、断面主軸方向または直交方向の 1 軸方向の結果を利用して決定した図 12 に示すような円弧の破壊基準線を用いることが妥当であると考えられる。



(a) BI-CIR



(b) BI-OVL



(c) BI-OVL45

図 10 水平荷重-水平変位履歴曲線

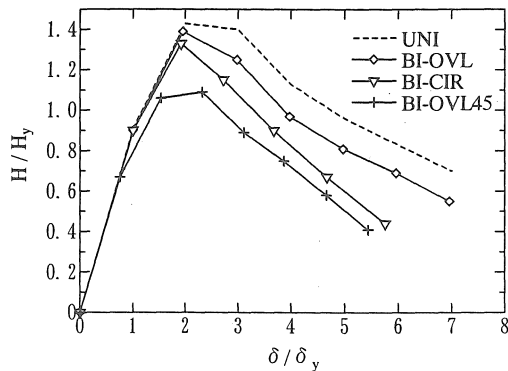


図 11 包絡線 (X 方向)

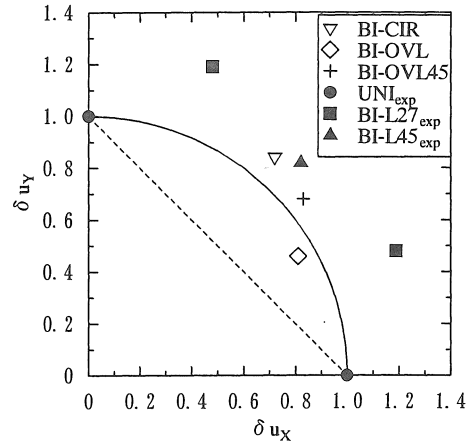


図 12 破壊変位点

## 6. 結論

本研究では、実地震動波形をモデル化した水平荷重の 2 方向入力に対する鋼製橋脚の耐震性能を実験および解析により明らかにするとともに、実験載荷装置を含めた実験システムの開発を行った。本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 地震時の水平 2 方向からの慣性力を想定した水平荷重の載荷を可能にする載荷装置を含む実験システムを作製した。数回にわたる制御プログラムの改良と実験時の載荷治具の変位補正を行い、十分な実験精度を得る実験システムを構築することができた。
- 2) 橋脚の断面主軸に対して角度を持つ直線的な載荷変位履歴を用いた 2 方向繰り返し載荷実験の結果から、断面主軸に対して角度を持つ入力地震動を受ける橋脚の変形能は、断面主軸方向の変形能と比較して上昇することが明らかとなった。橋脚の地震時の応答は耐力と変形の組み合わせで評価させるため、斜め方向の入力地震動に対して正方形断面は安全側であることが確認できた。
- 3) 円周状および楕円状の載荷変位履歴に対する FEM 解析の結果、断面主軸方向(X 方向)の直交方向(Y 方向)への変位が大きいくほど断面主軸方向の変形能が低下することが明らかとなった。これは、非直線的な 2 方向からの載荷によって断面内に発生する最大応力部分が、載荷にともない移動することによる断面全体への拡大が要因であると考えられる。
- 4) 2 方向地震動を考慮した安全性の評価手法としては、断面主軸方向または直交方向の 1 軸方向の結果より算出した破壊変位点を用いて、これら 2 方向のベクトル合成で決定した破壊基準線で評価することが妥当であると考えられる。ただし、BI-OVL についてはこの破壊基準線を下回っているため、実験による確認が必要である。
- 5) 今後、FEM 解析により明らかにした非直線載荷における橋脚挙動を実験により検証する必要がある。

6) 本研究では, 供試体に正方形断面を使用した, より信頼性の高い実験データの蓄積のために長方形や円形断面を用いた実験を行う必要があると思われる.

謝辞: 本研究を行うにあたり名古屋大学大学院宇佐美勉教授, 葛西昭助手に有益な助言を頂いた. また, 実験は本学土木工学科 4 年生大西君, 寺尾君, 名古屋大学大学院高原君, 名古屋大学 4 年生岡崎君, 本学耐震実験センター技術員の鈴木博氏の協力により行われ, FEM 解析は本学土木工学科 JSPS 特別研究員 K. A. S. Susantha 氏の協力により行われた. なお, 実験は本学耐震実験センターで行った. ここに深く感謝いたします.

#### 参考文献

- 1) 田嶋仁志, 半野久光, 池田茂, 輿守: 矩形鋼製橋脚の変形性能に関する載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 281-288, 1998. 3
- 2) 日本橋梁建設協会: 鋼製橋脚の耐震設計マニュアル(資料編), 1998. 11
- 3) 日本橋梁建設協会: 鋼製橋脚の耐震設計マニュアル(ラーメン橋脚等の実験及び実績調査編), 2001. 3
- 4) 高橋孝二, 山内泰之, 酒井章, 阿世賀宏: 水平 2 方向地震動を受ける偏心 RC 造ボックス壁の耐震性評価, 日本建築学会構造系論文集第 530 号, pp. 123-130, 2000. 4
- 5) 杉浦邦征, ウォルター・オヤワ, 渡邊英一: 繰り返し水平 2 方向力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 第 3 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, pp. 97-103, 1999. 11
- 6) 西田秀明, 運上茂樹, 長屋和宏: 正方形断面 RC 柱の水平 2 方向非線形領域加振振動台実験, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 913-916, 2001. 8
- 7) 小畑誠, 下村太一郎, 松尾奈緒美, 後藤芳顕: 橋脚モデルの 2 方向載荷擬似動的実験, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, I-414, pp. 827-828, 2002. 9
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, pp. 162-173, 2002. 4
- 9) 宇佐美勉: ハイダクティリティー鋼製橋脚, 橋梁と基礎, Vol. 131, No. 6, pp. 30-36, 1997. 6
- 10) 土木学会・鋼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, 1996
- 11) 青木徹彦: 構造力学, 株式会社コロナ社, 東京, 1998. 2
- 12) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5. 7, 1999
- 13) Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T.: A Generalized Two-Surface Model for Structural Steel under Cyclic Loading, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. of JSCE, Vol. 10, No. 2, 23(59s)-33(69s), July, 1993
- 14) 坂野茂, 宇佐美勉, 水野英二: 修正二曲面モデルによる板要素の繰り返し圧縮・引張弾塑性有限変位解析, 土木学会論文集, No. 525/I-33, pp. 1-15, 1995. 10
- 15) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉: 鋼製補剛桁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. 5
- 16) 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. 557/I-41, pp. 181-190, 1997. 10
- 17) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉: 鋼構造物の繰り返し弾塑性解析用構成則の実験データによる検証, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 201-210, 1998. 3

(受理 平成 15 年 3 月 19 日)