

# 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

杉浦邦征\*, ウォルター・オヤワ\*\*, 渡邊英一\*\*\*

\*Ph.D. 京都大学大学院助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*M.Sc. 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻博士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\*Ph.D.・工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

1995年兵庫県南部地震によって鋼構造物の多くは、予想をはるかに越えた多大な被害を受け、その結果、道路橋示方書においては耐震設計基準が見直された。さらに、設計時に仮定される一方向地震荷重入力および任意方向に対するその応答の単純重ねあわせの仮定に対する不確定性から、複雑でしかも三次元的である構造物の地震時応答をより正確に把握すべき必要性が高まってきた。そこで、本研究では、高架橋の脚柱および建築物の柱材に多用されている中空断面圧縮部材の履歴性状に及ぼす2方向水平力の負荷経路の影響について実験的に検討した。特に、非比例的に繰り返し外力を受ける場合に着目した。実験結果によると一方向に水平力を繰り返し受ける場合に比べて2方向同時に、しかも非比例的に水平力を組み合わせて受ける場合の方が、剛性低下、強度劣化、変形能減少を伴うことが明らかになった。

Key Word: Biaxial bending, non-proportional loading, cyclic behaviour, strength, ductility

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震による土木構造物の被害は甚大で、これまで中小規模の地震に対しては比較的健全であった土木鋼構造物の多くも同様に歴史的な被害を受けた<sup>1),2),3)</sup>。1973年・1980年の道路橋示方書<sup>4),5)</sup>にしたがって設計された鋼製橋脚の多くは、断面を構成する薄板の幅厚比が比較的大きく、縦方向補剛材やダイアフラムによって補剛されているものの、フランジ板およびウェブ板に局部屈曲が生じるなどの被害を受けた。そこで、兵庫県南部地震時の入力地震動の大きさのみならず、その構造物の応答性状の複雑さならびに被害の多様さから、道路橋および鉄道橋に代表される社会基盤施設の各種設計基準の耐震設計条項が大幅に見直され、例えば、1996年12月には、道路橋示方書が改定されるに至った<sup>6)</sup>。1989年の改定で導入された鉄筋コンクリート構造物に対する保有水平耐力照査法<sup>7)</sup>が鋼構造物にもねばりを考慮した設計法として導入された。

一方で、兵庫県南部地震時に観測された地震動加速度波形において、東西方向、南北方向の水平2方向の各最大値の多くは、ほぼ同レベルであり、上下動に関しても水平動に匹敵する大きな加速度を有していた。しかしながら、改定された耐震設計においても地震動の3次元性に配慮した設計体系は導入されていない。すなわち、構造物のねばりを考慮した設計法として導入されてきた一方向地震力入力のみに対応した保有水平耐力照査による耐震設計に加え、時刻歴応答解析に

よる安全性確認も積極的に導入されるに至ったが、多くの検討は、橋軸方向および橋軸直角方向で、独立に耐震性の検討がなされたり、単なる重ねあわせで2方向同時地震力入力に対する構造物の安全性が検討されており、地震動の3次元性、それに対する構造物の応答の3次元性に基ついた耐震設計の具体化はなされておらず、いまだその方向すら見出されていないのが現状である。これまでに、一方向地震力入力においても構造物の非対称性が、ねじれ振動、直角方向の振動を誘発させるなど、構造物の3次元応答の評価の重要性、ならびに組み合わせ荷重下における構造物の強度評価に関する研究成果が多く見られる<sup>8)-14)</sup>。しかし、その多くは、鉄筋コンクリート構造物に対するもので、鋼構造物に対する同様な研究成果は極めて少ない。

そこで、本研究では、鋼製橋脚ならびに建築物の柱部材に代表される圧縮力下の角形鋼管柱が、水平2方向に地震力を繰り返し受ける際の荷重-変形関係の実験的解明、さらには、強度および変形能を検討した。特に、2方向繰り返し変位履歴が、強度劣化、エネルギー吸収能に及ぼす影響に着目した。

## 2. 載荷実験の概要

### 2.1 実験供試体および載荷試験装置

自由端に一定の鉛直荷重および繰り返し水平荷重を受ける片持ち柱として載荷実験を行った。実験供試体は、図-1に示すように  $B=150\text{mm} \times D=100\text{mm}$  の角形の鋼断面を有し (板厚 4.21mm)、試験長 853.2 (試験体長

は、 $L=874.8\text{mm}$ ) であり、各種荷重パターンを検討するため9体用意した。また、ダイヤフラムとして柱基部近傍には、板厚  $6\text{mm}$  の板2枚を断面周辺(部材円周方向)に溶接し、基部には非破壊部の弾性変形を極力押さえるため台形のリブを各面に2枚ずつ部材方向溶接した。ここで、 $X$  方向および  $Y$  方向を、それぞれ長方形断面の幅の広い板幅方向、幅の狭い板幅方向と定義した。すなわち、 $X$  軸周りは、断面の弱軸を、 $Y$  軸周りは断面の強軸を表す。

実験供試体の製作には、STK400 材の角形鋼管を用いた。その断面諸量を表-1、および材料試験結果を表-2 に示す。ここで、断面を構成する薄板要素の無次元幅厚比は、それぞれ  $0.53$  (幅の狭い板)、 $0.79$  (幅の広い板)、および柱の無次元細長比は、弱軸周りに  $0.555$ 、強軸周りに  $0.405$  である。なお、 $X$  および  $Y$  方向の降伏水平荷重ならびに水平変位は(軸力の効果は考慮しない)、それぞれ  $38\text{KN}$  ( $X$  方向)、 $30\text{KN}$  ( $Y$  方向)、 $5.73\text{mm}$  ( $X$  方向)、および  $8.58\text{mm}$  ( $Y$  方向) である。また、残留応力に関しては、降伏応力の約  $20\%$  の平均圧縮応力が各薄板要素に存在し、コーナー部で引張応力が発生していた。初期変形に関しては各薄板の中央部で約  $0.5\text{mm}$  程度の変形を計測した。

荷重実験には、京都大学土木系専攻教室内に設置された3次元構造物試験装置を用いた。この概略を図-2 に示す。この試験装置は、9台の油圧ジャッキを有し、 $X$ - $Y$ - $Z$  の各軸方向に力を加えられるとともに各軸周りにモーメントも独立して荷重可能な装置である。 $X$ - $Y$  方向の荷重能力は、 $100\text{KN}$ 、 $\pm 100\text{mm}$  であり、 $Z$  方向の荷重能力は、圧縮  $500\text{KN}$  (引張りは  $300\text{KN}$ )、 $\pm 100\text{mm}$  である。また、各軸周りには、 $100\text{KN}\cdot\text{m}$ 、 $\pm 10.3^\circ$  の荷重が可能である。これら9台の油圧ジャッキを制御用コンピュータが一括管理し、並進3成分および回転3成分、合計6自由度の変形を任意の組み合わせで高精度に制御可能となっている。

表-1 材料試験結果

	降伏 応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	降伏 歪 (%)	弾性係 数 ( $\text{KN}/\text{mm}^2$ )	ポア ソン 比	引張 強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	伸び (%)
引張 試験	374	0.174	211	0.28	459	42.5
短柱 試験	375	0.146	206	-	386	0.48*

\*座屈時のひずみ

表-2 実験供試体の断面諸量

	断面積 ( $\text{mm}^2$ )	断面二次 モーメント( $\text{mm}^4$ )	断面二次 半径( $\text{mm}$ )	形状係数
$X$ 軸回り	2038	$3.5 \times 10^6$	41.2	1.15
$Y$ 軸回り	2038	$6.5 \times 10^6$	56.5	1.15

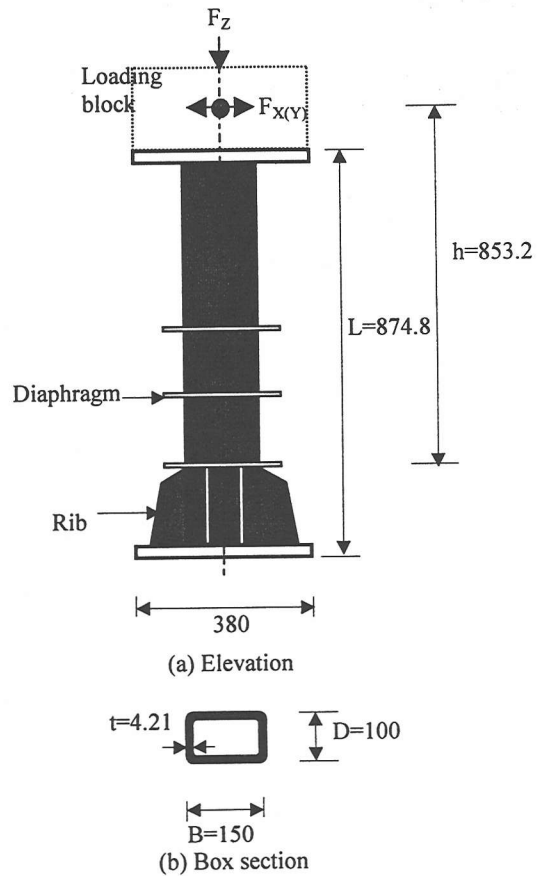


図-1 実験供試体の寸法 (単位: mm)

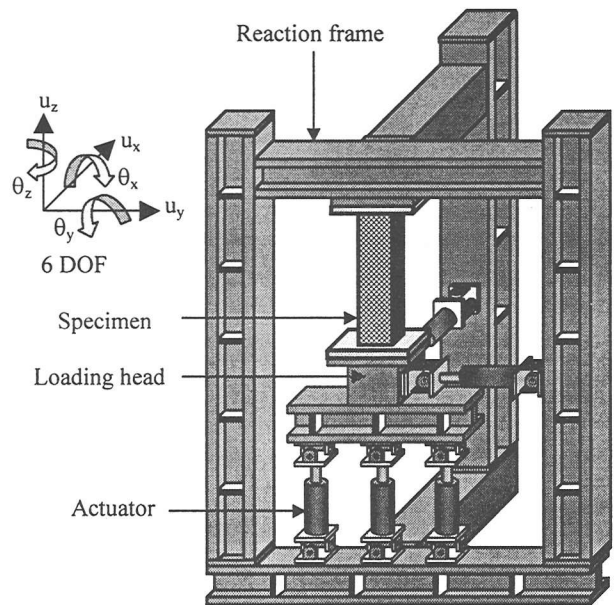


図-2 3次元構造物試験装置の概略

## 2.2 荷重プログラム

荷重は、部材軸方向には荷重制御で降伏軸力の  $20\%$  の軸圧縮力を一定に荷重し、水平2方向に対しては試験体基部および試験装置全体の弾性変形を取り除いて変形計測を行うための外部変位計に対して直接変位制

御として準静的に繰り返し入力した。

一般に、水平面内の地震動の履歴は、図-3 に示すように非常にランダムであるが、本研究では、それを理想化して、7通りの载荷パターンを採用した。その一覧を表-3 に示す。一方向比例载荷としては、X方向のみ (S-UX), Y方向のみ (S-UY), および X-Y方向同時 (S-BL, 無次元変位空間で 1:1 の方向) の3種類を考え、一方、各方向成分が非比例となる载荷パターンとしては、正方形 (S-BS), 円形 (S-BC), ダイヤモンド形 (S-BD) およびプラス形 (S-BP) の4種類を設定した。

なお、表中に示すように各変位振幅に対して3サイクルづつ、顕著な強度劣化を生じるまで载荷を続けた<sup>15)</sup>。また、X方向ならびにY方向には、別途単調载荷実験を実施した。

### 3. 実験結果および考察

载荷実験により得られた水平荷重-水平変位曲線を図-4~図-10 に示す。なお、荷重および変位は、それぞれ軸力を考慮しないそれぞれの降伏値で除して無次元化して表示した。また、最大荷重を記録した点を、矢

表-3 繰り返し水平変位履歴の一覧

Specimen	Load path	Typical cycling history
S-UX (also S-UXm*)	 Uniaxial-X	
S-UY (also S-UYm*)	 Uniaxial-Y	
S-BL	 Biaxial-Linear	
S-BS	 Biaxial-Square	
S-BC	 Biaxial-Circular	
S-BD	 Biaxial-Diamond	
S-BP	 Biaxial-Plus	

\* Monotonic tests in the X and Y directions for specimens S-Uxm and S-UYm, respectively, were also conducted

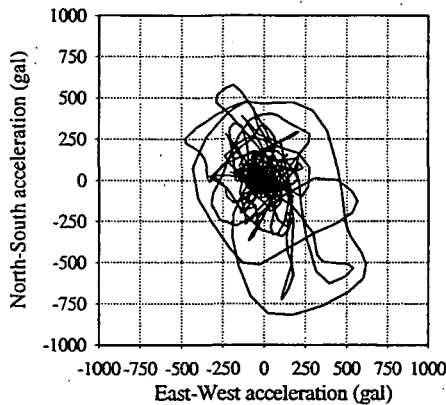


図-3 兵庫県南部地震時の加速度波形

印でピンポイントし、表示した。さらに、図-4 および図-5 には、単調載荷実験の結果も比較のため重ねて示した。なお、最大耐荷力点を記録したサイクルの変位振幅ならびに最大耐荷力点での変位の値を降伏変位で除して変形能（それぞれ $\mu_n$ 、 $\mu_m$ とする）と定義し、まとめて表-4 に示した。

まず、一方向比例載荷の場合を比較してみると、S-UXの方が、S-UY に比して高い強度/変形能を有することが分かる。強度低下を生じる入力変位振幅は、それぞれ約  $2.0\delta y$ 、 $1.5\delta y$  である。これは、繰り返し圧縮力を受ける薄板の幅厚比の違いによるものであることは容易に推測できる。一方、S-BL においては、2軸曲げ状態であるため、X 方向、および Y 方向の水平荷重成分の最大値は、S-UX および S-UY の最大荷重値に比べて大きく低減していることが分かる。一方、荷重が低下し始める入力変位振幅は、前述の S-UX、S-UY に比べて若干低いものの強度劣化の程度は、S-UX、S-UY に比べて顕著に劣るとは言い難い。特に、最大耐荷力の評価のためには、2軸曲げ状態における何らかの等価強度、等価変形能の定義が必要と考えられる。

一方、2方向非比例載荷である S-BC、S-BS、S-BD、S-BP を比較してみると、一方向比例載荷時に比べて約  $1.5\delta y$ 、 $1.0\delta y$  とより小さな入力変位振幅で、荷重が低下し始めるのが分かる。特に、S-BS においては、著しい低下が見られる。しかし、最大荷重は、S-UX、S-UY と同等な荷重レベルまで達しており、これは、変位一サイクル中に最大変位振幅が X もしくは Y 成分のみで存在するためと考えられる。また、一方向比例載荷を区分的に組み合わせた B-SP においては、一方向比例載荷時の挙動に一番近いと考えられる。

軸圧縮力と2軸曲げを受ける部材の耐荷力の相関曲線は、一般に次式で与えられる。

$$\left| \frac{M}{\gamma M_y} \right|_x^\alpha + \left| \frac{M}{\gamma M_y} \right|_y^\alpha = 1 \quad (1)$$

ここで、 $M$ 、 $M_y$  は、各軸周りの作用曲げモーメントと降伏曲げモーメントで、 $\alpha$  および  $\gamma$  は、それぞれ定数である（ $\gamma$  は、形状係数であり、 $\alpha$  は、一般に 0 から 1 の値を取る）。式(1)で  $\gamma=1$  と考え、 $\alpha=1$ （算術和）および  $\alpha=2$ （2乗和平方根）に対して、各変位サイクルの耐荷力の包絡曲線を図-11 に示す。 $\alpha=1$  の場合は、すべての載荷パターンでの最大耐荷力のレベルに幅が見られ、2軸曲げに対する等価荷重の評価としては不十分と考えられる。一方、 $\alpha=2$  においては、多くの載荷パターン間での最大耐荷力レベルの分布幅も狭まり、S-BL のみ若干低いものの、全体的には耐荷力を等価に評価できていると考えられる。さらに、前述の S-BS、S-BC、S-BD の3パターンにおいて、他の一方向載荷時に比べて荷重の低下が著しいことが明確に説明できている。

次に、各サイクル毎のエネルギー吸収量を次式にしたがって評価し、等価変位振幅（式(1)の定義に準ずる）に対する変動として図-12 に示した。

$$E = \sum_{i=1}^2 \left( \frac{E_k}{E_e} \right)_i = \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\int H \cdot d\delta}{E_e} \right)_i \quad (2)$$

ここで、 $E_e$  および  $E_k$  は、それぞれ弾性限の変形を受けた時のエネルギー吸収量、 $k$  サイクル時の一サイクル当りのエネルギー吸収量である。また、 $i=1$  および  $i=2$  は、吸収エネルギーの X 成分、および Y 成分を示す。このエネルギー観点からの評価においても、S-BS、S-BC のエネルギー吸収能の低下が著しいこと、また、 $\alpha=2$  による等価変位の定義の方が、変位振幅の小さい時のエネルギー吸収能を等しく評価し、定性的な分類に適していることが分かる。

一方向に荷重を受ける場合には、最大耐荷力ならびに変形能の定義は、これまでの定義式を用いれば良いが、本研究で取り扱ったような組み合わせ荷重（2方向載荷）下においては、新たな指標の定義が不可欠である。今後は、 $\alpha$  の適切な値を多様な載荷パターンによる結果を踏まえて決定する必要がある。

表-4 強度と変形能のまとめ

試験体	X 成分			Y 成分		
	$H_{max}/H_v$	$\mu_m$	$\mu_n$	$H_{max}/H_v$	$\mu_m$	$\mu_n$
S-UX	1.10	1.62	2.00	-	-	-
S-UY	-	-	-	1.07	1.37	1.41
S-BL	0.72	1.39	1.41	0.68	0.86	1.00
S-BS	0.96	0.95	1.00	0.69	0.95	1.00
S-BC	1.06	1.33	1.41	0.79	0.96	1.00
S-BD	1.05	1.31	1.41	0.83	1.29	1.41
S-BP	1.08	1.77	2.00	0.88	1.38	1.41

(注)  $\mu$  : 変形能指標

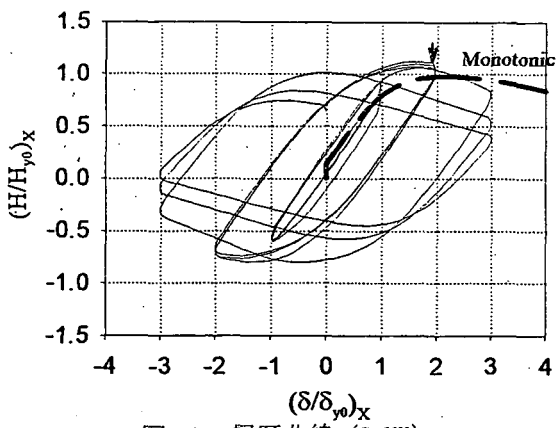


图-4 履歷曲線 (S-UX)

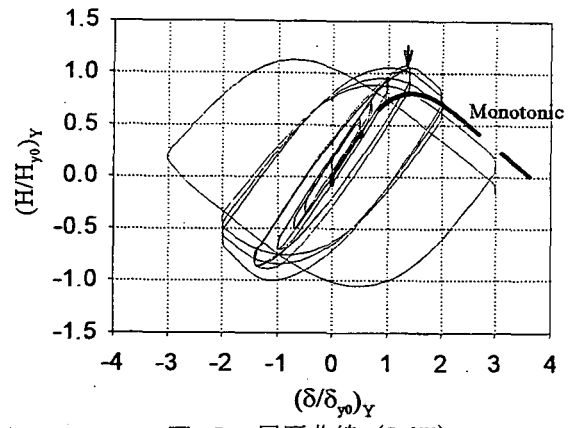
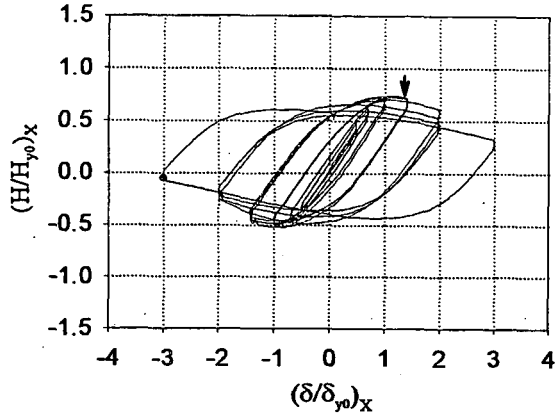


图-5 履歷曲線 (S-UY)

(a) X-成分



(b) Y-成分

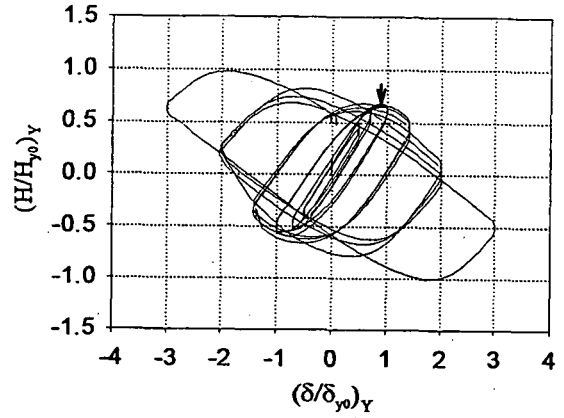
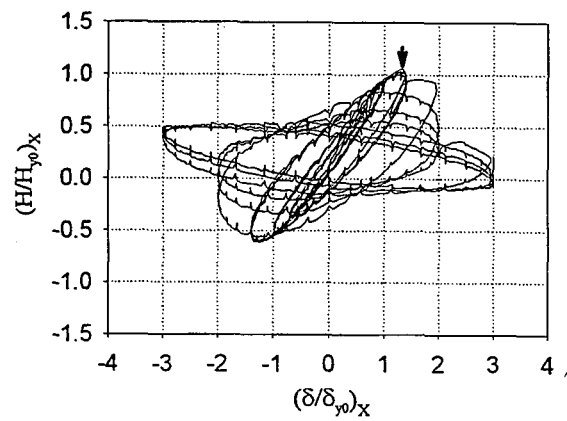


图-6 履歷曲線 (S-BL)

(a) X-成分



(b) Y-成分

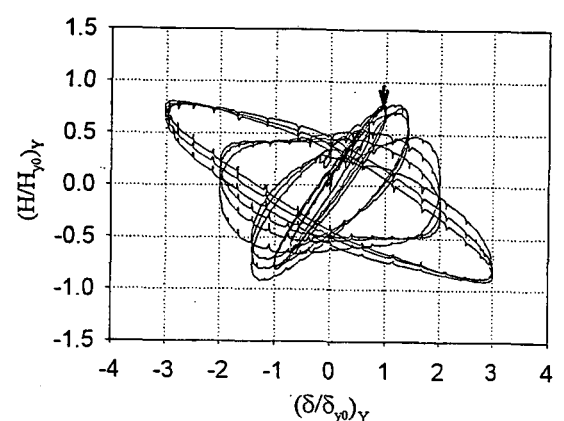
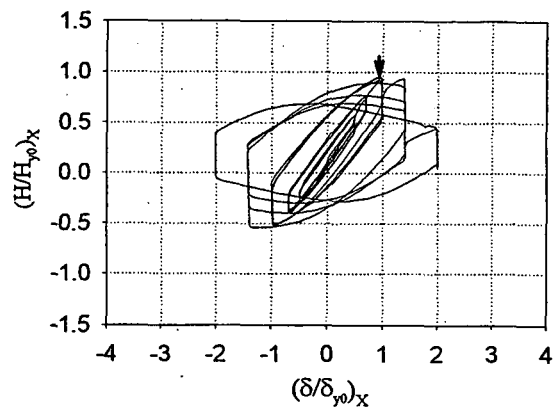


图-7 履歷曲線 (S-BC)

(a) X-成分



(b) Y-成分

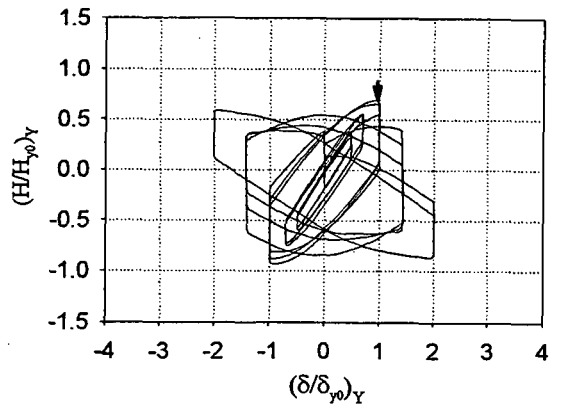


图-8 履歷曲線 (S-BS)

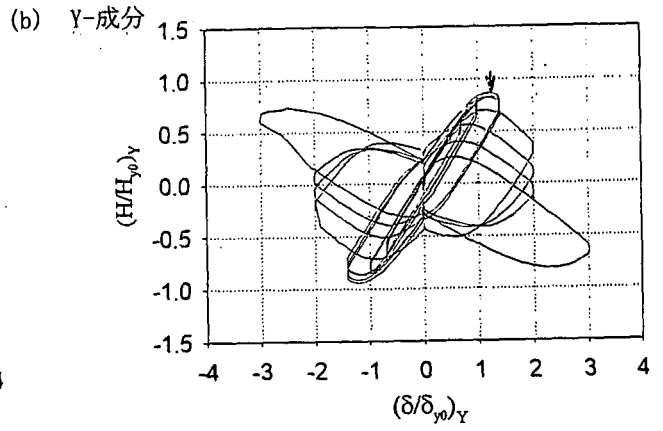
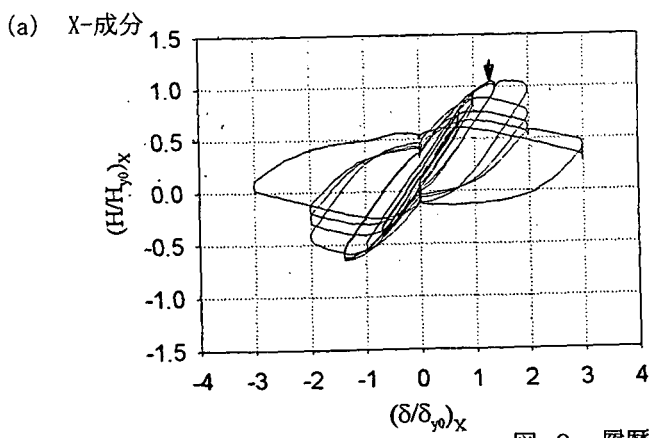


図-9 履歴曲線 (S-BD)

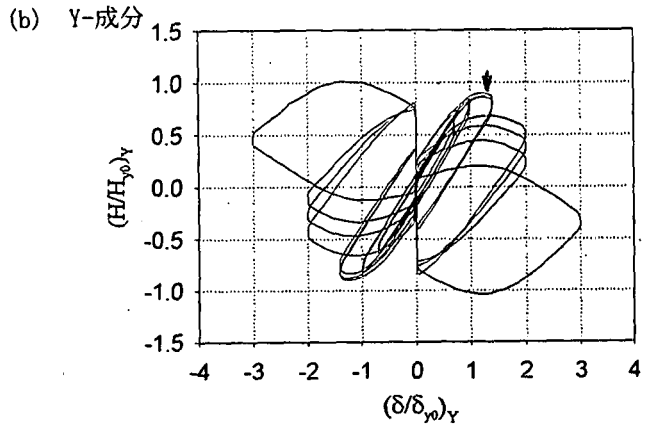
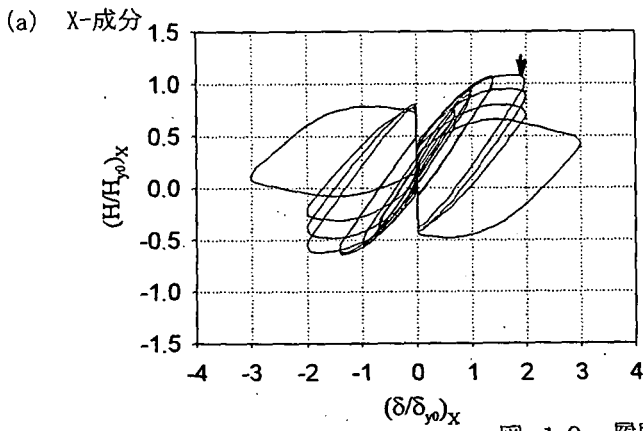


図-10 履歴曲線 (S-BP)

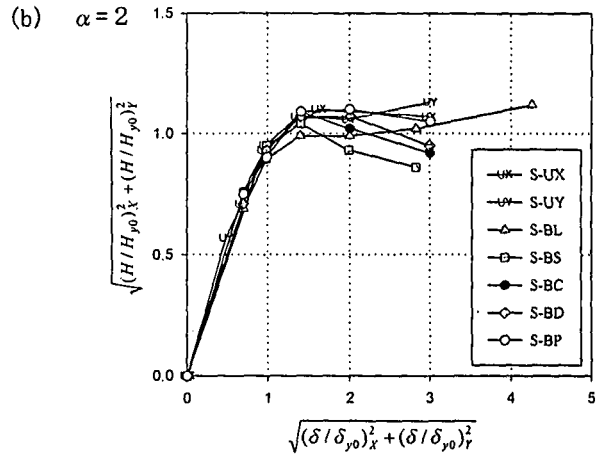
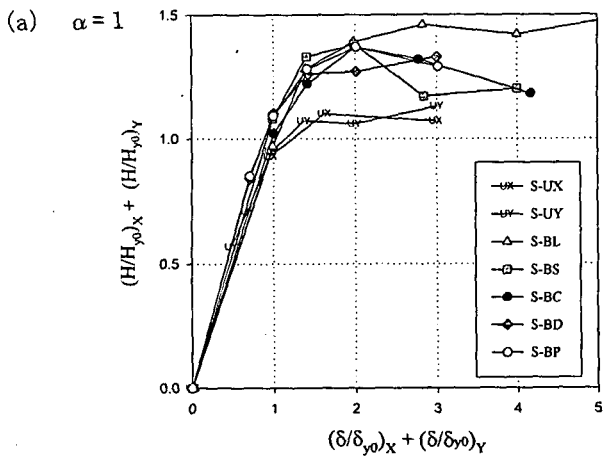


図-11 サイクル毎の等価荷重の変化

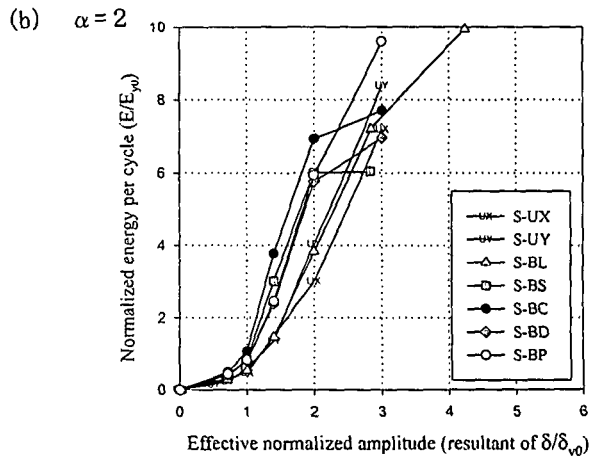
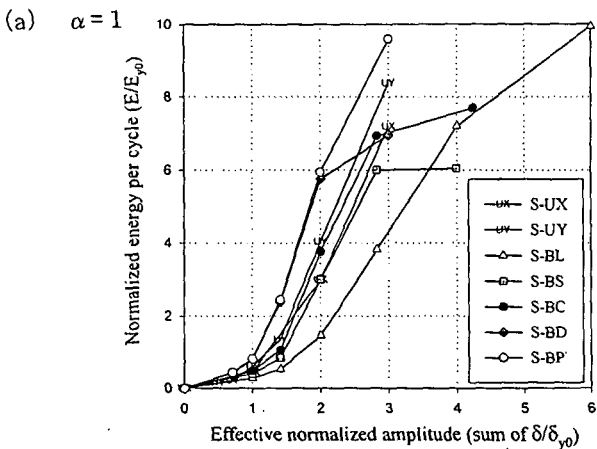


図-12 サイクル毎のエネルギー吸収能の変化

#### 4. 結論

本研究では、鋼製橋脚ならびに建築物の柱部材に代表される圧縮力下での角形鋼管柱が、水平2方向に地震力を繰り返し受ける際の荷重-変形関係を実験的に求め、その強度および変形能について検討した。特に、2方向繰り返し変位履歴が、強度劣化、エネルギー吸収能に及ぼす影響に着目した。以下に得られた結果を述べる。

- (1) 1方向比例載荷時に比べて2方向非比例載荷時においては、角形鋼管柱の強度劣化が著しいことが明らかになった。
- (2) 1方向比例載荷においても断面の強軸・弱軸方向と載荷軸が一致しなければ、直角2方向の各荷重成分は、大きく減少し、多軸空間で等価荷重の適切な定義が必要となる。
- (3) 2方向非比例載荷パターンの中でも、四角形変位載荷が、一番強度劣化を生じさせる。
- (4) エネルギー吸収能の観点からも結論(1)と同様な結果が得られた。

2方向載荷の影響は、非弾性領域で顕著となると考えられるが、特に、材料の非弾性挙動が、一般的には履歴依存であることに注意しなければならない。本研究で取り上げた載荷履歴は、非常に限られたものである。今後多様な載荷履歴に対して同様に耐荷力劣化ならびにエネルギー吸収能に関して検討する必要がある。また、合理的な耐震設計を確立する上で、本研究で取り上げた載荷履歴等を他の断面形状に対しても検討し、地震動の2方向成分の特性、構造物の平面2方向における応答性状とも関連付けた検討が急務であると考えられる。特に、文献[16]・[17]に見られるように弾塑性有限変位解析により、精度の高い応答性状が得られる技術が確立された現在においては、解析的検討も含めて早急に前述したデータの蓄積を進める必要がある。

#### 謝辞

本研究は、平成10-11年度・科学研究費補助金(基盤研究(C) No. 10650462)の一部を使用して行った。

#### 参考文献

- 1) Kawashima, K. and Unjoh, S.: Impact of Hanshin/Awaji earthquake on seismic design and seismic strengthening of highway bridges, *J. Struct. Mech.*, JSCE, pp. 1-30, 1997.
- 2) 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.

- 3) 渡邊英一, 前川順道, 杉浦邦征, 北根安雄: 鋼橋の被害と耐震性, *土木学会誌*, Vol.80(7), pp.54-62, 1995年7月.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 1973年.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 1980年.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 1996年.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 1989年.
- 8) Takizawa, H. and Aoyama, H.: Biaxial effects in modeling earthquake response of R/C structures, *Int. J. Earthq. Engrg. Struct. Dyn.*, Vol. 4(6), pp. 523-552, 1976.
- 9) Zahn, F.A., Park, R., and Priestley, M.J.N.: Strength and ductility of square reinforced concrete column section subjected to biaxial bending, *ACI Struct. J.*, Vol. 56(2), pp. 123-131, 1989.
- 10) Wong, Y., Paulay, T. and Nigel Priestley, J.N.: Response of circular reinforced concrete columns to multi-directional seismic attack, *ACI struct. J.*, Vol. 90(2), pp. 180-191, 1993.
- 11) Bousias, S.N., Verzeletti, G., Fardis, N. and Gutierrez, E.: Load-Path effects in column biaxial bending with axial force, *J. Engrg. Mech.*, ASCE, Vol. 121(5), 596-605, 1995.
- 12) Umehara, H. and Jirsa, J.O.: Short rectangular RC columns under bi-directional loadings, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 110(3), pp. 605-618, 1984.
- 13) Zeris, C.A. and Mahin, S.A.: Behaviour of reinforced concrete structures subjected to biaxial excitation, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 117(9), pp. 2657-2673, 1991.
- 14) 渡邊英一, 杉浦邦征, 北根安雄: 地震時における橋梁構造物の3次元挙動, *構造工学論文集*, Vol.43A, 土木学会, pp. 897-906, 1997.
- 15) ECCS: Study on Design of Steel Building in Earthquake Zones, *ECCS-Technical Committee 1*, 1986.
- 16) Usami, T. and Ge, H.B.: Cyclic behaviour of thin-walled steel structures-numerical analysis, *J. thin-walled structures*, Vol. 32(1-3), pp. 41-80, 1998.
- 17) Goto, Y., Wang, Q. and Obata, M.: FEM analysis for hysteretic behaviour of thin-walled columns, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 124(11), pp. 1290-1301, 1998.

(1999年11月19日受付)

# ELASTO-PLASTIC BEHAVIOUR OF COMPRESSIVE STEEL RECTANGULAR HOLLOW COLUMN SUBJECTED TO BI-DIRECTIONAL HORIZONTAL LOADS

Kunitomo SUGIURA, Walter O. OYAWA and Eiichi WATANABE

The unprecedented damage to steel structures during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake not only prompted the revision of the Japanese seismic code but also emphasized the need for a comprehensive understanding of seismic response, which in reality is complex and multi-directional, as opposed to the conventionally assumed uni-directional approach. Thus, this study investigated the effects of multi-directional load histories on the response of tubular columns widely used in the construction of elevated highways and building structures. Test results indicate that, in comparison with uniaxial displacement paths, multi-directional displacement patterns lead to significant degradation of stiffness, strength and ductility of tubular columns.