

水平 2 方向荷重を受ける鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究

Experimental Study on the Seismic Resistance Performance of Steel Bridge Piers Subjected to Bi-directional Horizontal Loads

大西哲広[†], 青木徹彦^{††}, 鈴木森晶^{††}

Akihiro OHNISHI, Tetsuhiko AOKI, Moriaki SUZUKI

Since Great Kobe earthquake in 1995, the seismic design of infra-structures in Japan was revised greatly in many items. But as far as the bridge piers concerned, the design concept by the conventional single directional seismic force has remained, not taking into account the actual bi-directional horizontal seismic forces. In this study, the strength and ductility of steel bridge piers subjected to bi-directional horizontal forces are investigated experimentally, which afford the basic information to establish the rational design rules. As the first stage of this research, actual seismic response is idealized into several simple hysteretic loading patterns, such as linear, circle, oval, radial, square and octagon types. The different seismic performances are obtained according to these loading patterns.

key words: Experiment Seismic Resistance performance, Steel Bridge Pier, bi-directional loading

キーワード: 耐震性能実験, 鋼製橋脚, 2 方向荷重

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震では、高速道路橋脚の倒壊および鋼製橋脚の座屈や損傷など土木構造物が大きな被害を受けた。とりわけ鋼製橋脚は、橋脚柱の局部座屈など多くの被害を被った。この兵庫県南部地震から耐震設計は大きく見直されることとなり、道路橋示方書が 1996 年に改定されるに至った。改定された道路橋示方書 V 耐震設計法では水平 2 方向からの慣性力が同時に最大値をとる可能性が低いことから水平 2 方向からの慣性力を橋軸方向、橋軸直角方向それぞれ独立に作用させて耐震設計を行うとしている¹⁾。しかし、今日までに本大学も含め多くの研究機関および大学で行われてきた実験のほとんどは、橋軸方向、橋軸直角方向に単独で水平荷重を載荷する 1 方向荷重による耐震実験であり、橋脚に実地震動が作用する場合の 2 方向入力を想定した研究は、建築構造物では以前から行われているものの²⁾、土木構造物を対象とした研究はほとんど行われていない。

土木構造物を対象とした研究では、東京工業大学で RC 橋脚に対して川島らにより行われた実験³⁾がある。それによると、水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚は、

水平 1 方向荷重と比較して、同一変位における曲げ耐力が低下すると同時に変形能も低下することを示し、特に矩形荷重および円形荷重した場合に顕著に見られるということを示した。

鋼製橋脚の分野では、杉浦らにより行われた先駆的な実験⁴⁾がある。杉浦らによると水平 2 方向繰り返し荷重を受ける角形鋼管柱は、1 方向比例荷重に比べ 2 方向非比例荷重の強度劣化が著しいことを明らかにしている。しかし、鋼製橋脚に関する研究は未だに少なく、2 方向入力の載荷履歴についても不十分で、実験データが十分蓄積されているとはいえない。また明確な耐震性能の評価基準が定義されていないのが現状である。

本研究では、図 1 に示すプロセスで地震動 2 方向入力に関する研究を進める。本論文では、そのはじめの段階として図 1 の①、②の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を行う。③、④は、将来の課題である。

実験に際して、はじめに供試体の 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。さらに 2 方向載荷のための自動制御プログラムの開発および実験システムを構築する。載荷実験では、第 1 段階として断面主軸に対して角度をつけた 2 方向からの繰り返し載荷実験を行い、第 2 段階として、実地震動波形を理想化した円周

[†] 愛知工業大学 大学院 建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

状および楕円状の波形履歴を 2 方向から入力する実験を行う。実験結果より,2 方向入力に関する鋼製橋脚の強度と変形能について比較検討する。

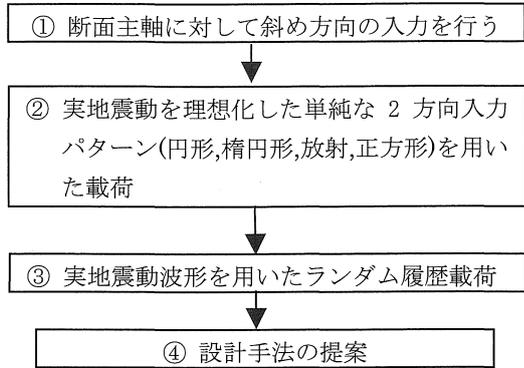


図 1 地震動 2 方向入力の研究プロセス

2. 実験計画および方法

2.1 実験供試体

実験に用いる供試体は,材質SM490,板幅 450mm,板厚 6mm の正方形補剛箱型断面とし,断面を構成する各面は 2 本の縦補剛材(6×55mm)と高さ方向に 450mm 間隔のダイアフラムで補剛されている。供試体断面図を図 2 に,供試体側面図を図 3 に,供試体寸法および各パラメータを表 1 に示す。なお,幅厚比パラメータ R_R , R_F , 細長比パラメータ λ は式(1)~(5)によって与えられる^{5),6)}。

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

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

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

$$k_F = \frac{(1+\alpha^2)^2 + n\gamma_1}{\alpha^2(1+n\delta_1)} \quad (\alpha \leq \alpha_0) \quad (4)$$

$$k_F = \frac{2(1+\sqrt{1+n\gamma_1})}{1+n\delta_1} \quad (\alpha > \alpha_0) \quad (5)$$

ここで, α : 補剛板の縦横寸法比, α_0 : 限界縦横寸法比, γ_1 : 縦方向補剛材の剛比, δ_1 : 縦方向補剛材 1 個の断面積比, b : 板幅, t : 板厚, σ_y : フランジ板パネルの降伏応力, E : 弾性係数, ν : ポアソン比, n : 補剛板のサブパネル数, r : 断面 2 次半径, h : 供試体の高さ, k_R : 座屈

係数 ($=4n^2$), k_F : 座屈係数(式(4), (5))である。

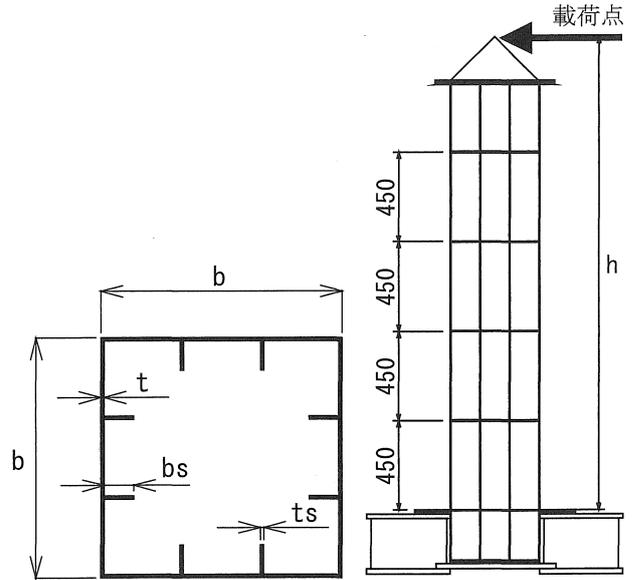


図 2 断面図

図 3 側面図

表 1 供試体寸法および各パラメータ

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
幅厚比パラメータ	R_F	0.339
細長比パラメータ	λ	0.350
補剛材細長比パラメータ	λ_s	0.372
補剛材剛比	γ/γ^*	2.50

2.2 実験システム

本研究の実験システムは, 载荷装置および計測装置, 制御装置で構成されている。载荷装置には, 水平荷重载荷用に 2000kN アクチュエータを 2 基用い上部構造重量を想定した鉛直荷重载荷には, 静的 1000kN アクチュエータ 1 基を用いる。計測装置には, デジタル動ひずみ測定器 DRA-101C および計測用コンピュータを用いた。

自動制御プログラムは, Visual Basic6.0 を用いて作製し, 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部分と, 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部分で構成されている。

2.2.1 目標値の到達判定のアルゴリズム

昨年度に自動制御を行ってコントロール不十分であった円周载荷(CRC)の水平荷重-水平変位履歴曲線を図 4 に示す。この履歴を見ると A の部分のように荷重が急に低下

しているところがある。これは、橋脚が弾性域の場合、行きも戻りも同じ直線上を移動するが、塑性域に入ると図 5 のように、戻りが無いときは A→A' のように進むが戻りがある場合、A 点から B 点方向へ橋脚の荷重は急に低下する。これが図 4 の A の部分として表れている。

そこで、目標変位をオーバーした場合でも目標変位に到達と判定して変位をホールドさせるようにプログラムを改良した。

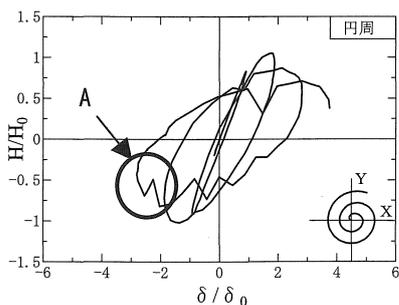


図 4 改善前アルゴリズム

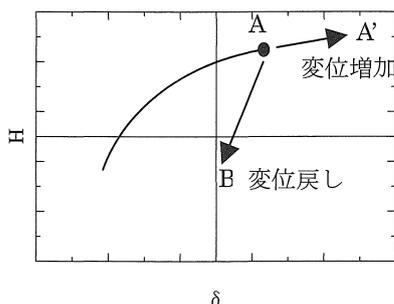


図 5 塑性域の H-δ 関係

2.3 荷重装置

本研究で使用される実験荷重装置の立体図を図 6 に示す。水平 2 方向および鉛直 1 方向荷重を荷重したとき荷重点が 3 次元的な挙動を示す。そこで、写真 1 に示す 3 方向荷重荷重治具を用い実験を行った。

治具の構造は、中心に直径 90mm の芯を配置し、その中間部に鉛直軸回りおよび水平軸回りに回転することのできる部品を X 軸方向、Y 軸方向アクチュエータの先端にそれぞれ取り付ける。部品の両端にアーム部を、また先端にアクチュエータ取り付けヘッドを設ける。これら水平加力点は、3 方向荷重点中心から ±33mm 離れている。このずれは、荷重点高さ 2420mm の約 1.4% に相当するが、この差が橋脚の強度および変形能に及ぼす影響、すなわち細長比のわずかな違いによる影響は、過去の研究⁷⁾からごくわずかであり、2 方向荷重の橋脚の挙動を調べる実験目的を損なうものではないと考えられる。また、鉛直荷重荷重を行うため、芯の上部に球座を取り付け、その上に 1000kN アクチュエータを取り付けた。球座の中心は、荷重点中心に一致している。

2.4 荷重方法

本研究で作用させる上部工重量に相当する鉛直荷重 P は、供試体の全断面降伏軸力 $P_y = 4321\text{kN}$ の 20% である 864kN を荷重する。ただし、 P_y は供試体設計時の断面寸法と公称降伏応力を用いている。また、降伏水平荷重 H_0 は式 (6)、(7) で求められたうちの小さい方の値を採用し、降伏水平変位 δ_0 はせん断変形を考慮した式 (8) により算出した⁸⁾。本研究で用いた降伏水平変位 δ_0 および降伏水平荷重 H_0 を表 2 に示す。

$$H_0 = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \tag{6}$$

$$H_0 = \frac{M_y}{0.85h} \left(1 - \frac{P}{P_E} \right) \left(1 - \frac{P}{P_u} \right) \tag{7}$$

$$\delta_0 = \frac{H_0 h^3}{3EI} + \frac{H_0 h}{GA_w} \tag{8}$$

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 : オイラーの座屈強度、 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。

表 2 各供試体の降伏変位 δ_0 および降伏水平荷重 H_0

荷重履歴	δ_0 (mm)	H_0 (kN)
UNI LIN23 CRC SQR	15.0	245
LIN45 OVL RAD OCT	14.0	230

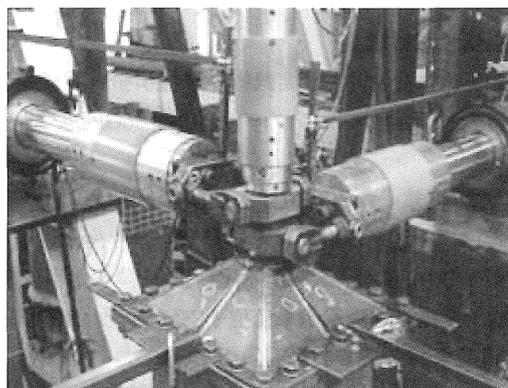


写真 1 3 方向荷重荷重治具

2.5 載荷履歴

実地震動波形をモデル化した単純な載荷変位履歴として、本研究では図 7 (a)~(f) に示す 8 通りを考える。これらの載荷変位履歴は、断面主軸に対して角度を持つ直線的な履歴(直線載荷 図 7(a), (e))と 2 方向からの変位履歴が円状または方形に変化する載荷パターン(曲線載荷 図 7(b), (c), (d), (f))とに分けることができる。図 7(a) の直線載荷パターンは、従来から行われている一方向載荷 (UNI) および UNI から 22.5 度傾けた LIN23, 45 度傾けた LIN45 の 3 種とする。

図 7(b), (c) の円周 (CRC), 楕円 (OVL) の載荷パターンでは、 $+1 \delta_0$ まで右回りのスパイラル履歴をとり、それ以降は、図 7 の Y 軸負方向の部分は原点中心、正の部分は $+ \delta_0 / 2$ を中心とした半円の履歴とする。ここに δ_0 は、式 (8) に示す降伏水平変位である。楕円載荷パターン (OVL) は、円周載荷パターン (CRC) の載荷履歴の Y 方向変位を 1/2 倍したものである。

図 7(d) の正方形パターン (SQR) は、X または Y 方向の変位を保ったまま他方向の変位を増加させることを交互に行うもので地震応答として最も極端なパターンである。載荷履歴は、はじめに Y 方向変位を 0 に保ち、X 方向を $+1 \delta_0$ まで進め、その後右回りに X 方向を保ち Y 方向を $-1 \delta_0$ の値まで動かす、その後交互に 1 方向変位を一定に保ちつつ、方向を換え、図 7(d) のような履歴とする。

図 7(e) の放射形パターン (RAD) は、図 7 (a) の一方向載荷 (UNI) と UNI から 45 度傾けた直線載荷 LIN45 を X, Y 方向に交互に載荷させるパターンである。載荷履歴は、X 方向の一方向載荷 (UNI) を $\pm 1 \delta_0$ 行い、次に Y 方向の UNI を $\pm 1 \delta_0$ 行う、その後 X 軸から 45° 方向に $\pm 2 \delta_0$ の LIN45 を行い、次に X, Y 方向に $\pm 3 \delta_0$ 行い、さらに 45° 方向に $\pm 4 \delta_0$ の載荷を行う。このパターンで変位を増大させる。

図 7(f) の八角形パターン (OCT) は、図 7(b) の円周載荷 (CRC) に外接する履歴をとる。この八角形パターンは、円周載荷 (CRC) と正方形載荷 (SQR) の中間に位置するパターンである。

3. 実験結果

3.1 引張り試験結果

載荷実験に先立ち、各供試体の素材引張り試験を行った。結果を表 3 に示す。ヤング率は、全て 206GPa であった。

3.2 水平荷重-水平変位履歴曲線

載荷実験により得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を図 9(a)~(h) に示す。縦軸は水平荷重 H を降伏水平荷重 H_0 、横軸は水平変位 δ を降伏水平変位 δ_0 でそれぞれ無次元化している。斜め直線載荷である図 9(b), (c) については、それぞれの方向の変位および水平荷重である。直線載荷以外の H- δ 曲線は、X, Y 方向ごとに図 9(d)~(h) に示す。

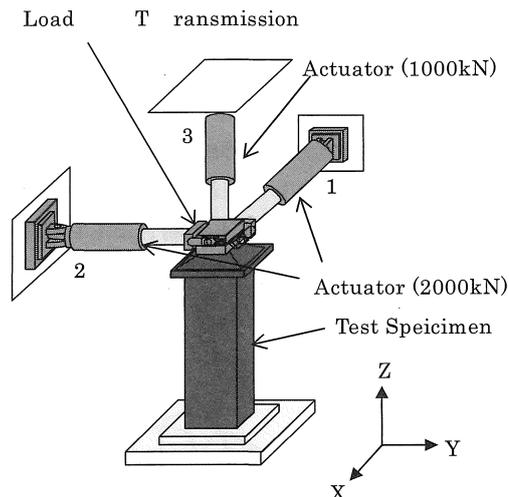


図 6 載荷装置立体図

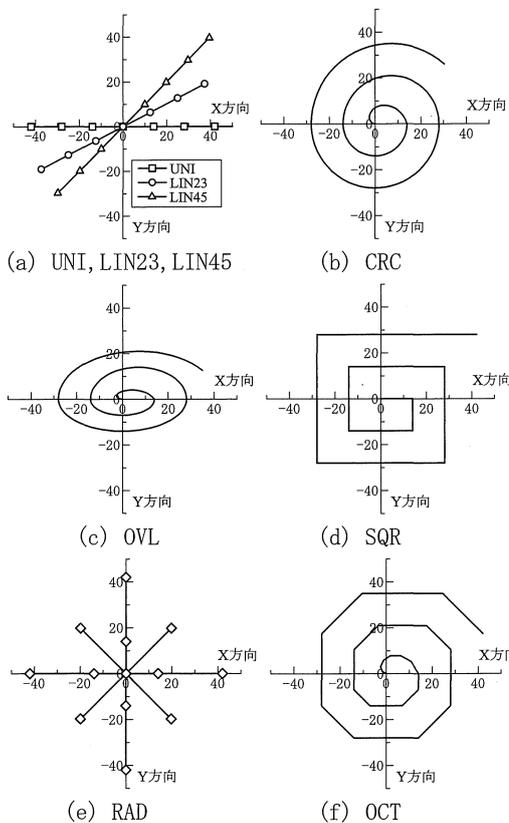


図 7 モデル化した載荷パターン (unit:mm)

表 3 引張試験結果

載荷履歴	降伏応力 σ_y (MPa)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
UNI LIN23 LIN45 CRC SQR	410	2200
OVL RAD	383	1858

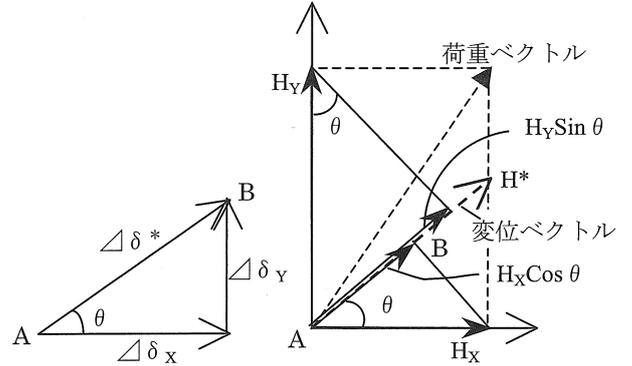
3.3 水平荷重－変位累積値関係

円周載荷(CRC)など非直線載荷パターンの実験を行った場合、変位ベクトル方向と荷重ベクトルの方向は等しくならない(図8(a),(b)参照). そのため本研究では、計測されたX方向変位増分 $\Delta\delta_x$ とY方向変位増分 $\Delta\delta_y$ から、移動方向距離ベクトル $\Delta\delta^*$ を式(9)で求め、この方向の力の合力 H^* を式(10)で計算する. したがって、式(11)は変位 $\Delta\delta^*$ の間になされた外力仕事増分を表すことになる. 各載荷パターンごとの H^* - δ^* 関係を図示すると図10(a)~(h)のようになった.

$$\Delta\delta^* = \sqrt{\Delta\delta_x^2 + \Delta\delta_y^2}, \quad \delta^* = \sum \delta^* \quad (9)$$

$$H^* = H_x \frac{\Delta\delta_x}{\Delta\delta^*} + H_y \frac{\Delta\delta_y}{\Delta\delta^*} \quad (10)$$

$$\Delta W = H^* \Delta\delta^* \quad (11)$$



(a) 移動方向距離ベクトル $\Delta\delta^*$ (b) 載荷方向水平荷重 H^*

図8 水平荷重－変位累積値概念

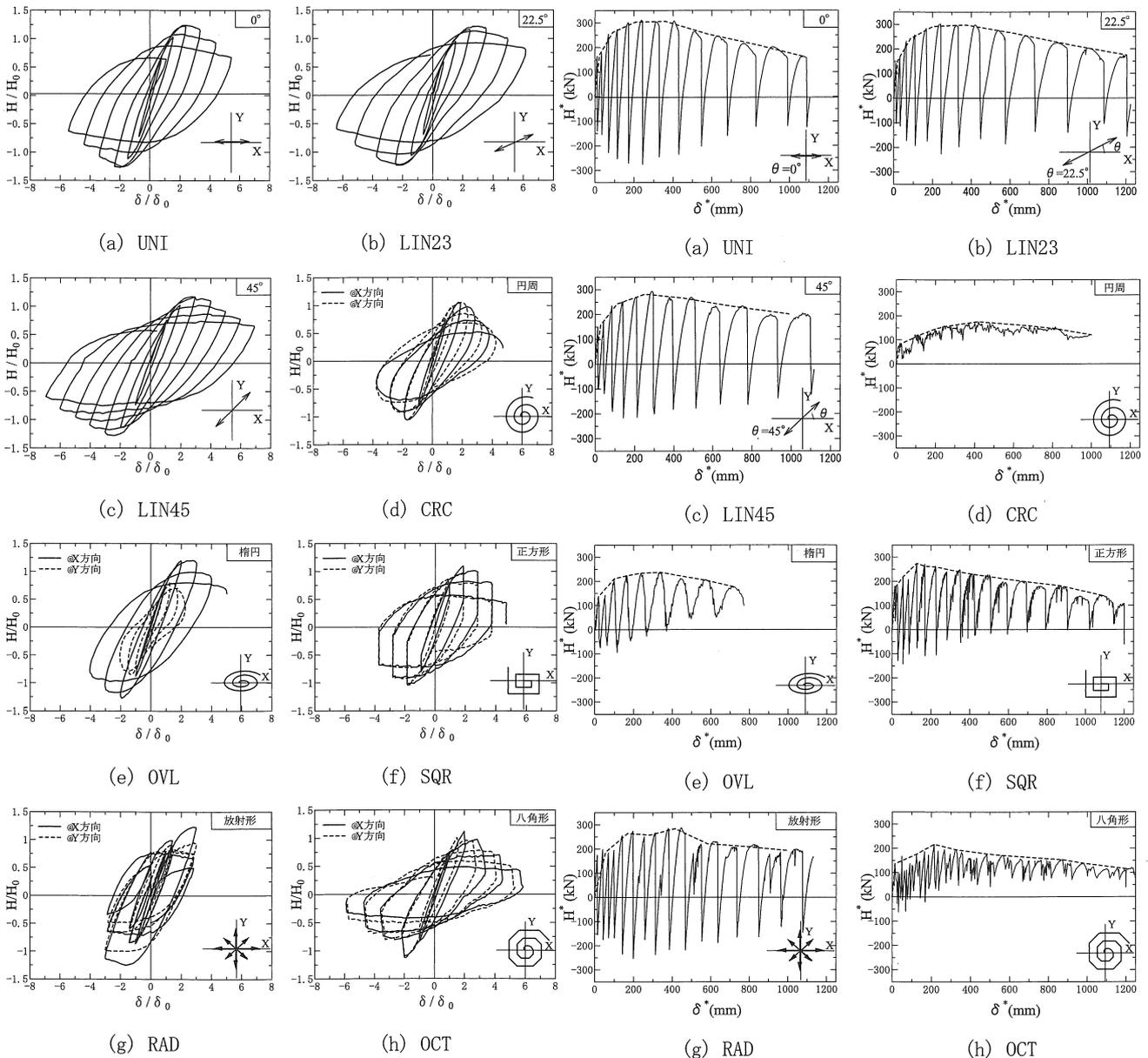


図9 水平荷重－水平変位履歴曲線

図10 水平荷重 H^* －変位累積値 δ^*

3.4 外部入力エネルギー

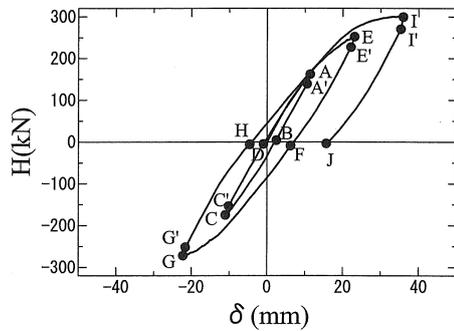
本研究では,各供試体の強度と変形能を比較するパラメータとして各载荷パターンでの外部入力エネルギーを求めた.外部入力エネルギー算出方法を,基準となる直線载荷(UNI)のデータを例に図 11 に示す.直線载荷(UNI)のH- δ とH*- δ^* 曲線の関係は,同図(a),(b)のようになった.同図(a)からH- δ 曲線のH→I→I'→Jの部分を取り出すと図 11(c)のようになり,斜線部分が吸収エネルギーとなる.また,同図(b)の同じH→I→I'→Jの部分は,図(d)のようになる.ここでI'点ではI点から除荷が始まった点で,I'からJの区間は負の仕事が行われ,図(d)の0→I'→Jの三角形部分の面積が,同図J'→I→0の面積と等しく符号が逆の関係となる.よって図(c)の斜線の部分の面積と図(d)のH→I→I'→Jで囲まれた正負を考慮した面積は等しくなる.結局,図(b)のH*- δ^* 曲線は,図(a)のH- δ 曲線と表現が異なった等価な荷重-変位曲線を示していることになる.すなわちH*- δ^* 曲線の描く図形の面積は外力によってなされた仕事(外部入力エネルギー量)を表し,一軸方向载荷と同じ評価をすることができるといえる.H*- δ^* 曲線で囲まれた面積を外部入力エネルギー量として求めた4サイクルまでの外部入力エネルギー量を表4に示す.表4の外部入力エネルギー比は,基準となる直線载荷(UNI)で無次元化した値である.また,()内の値は円周载荷(CRC)で無次元化した値である.

表 4 4 サイクルまでの外部入力エネルギー

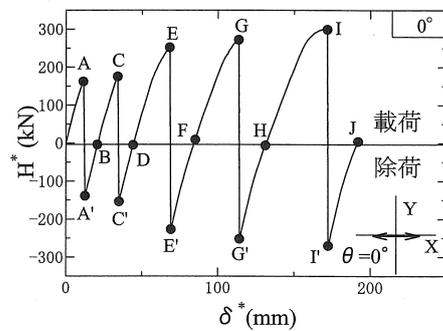
载荷履歴	入力エネルギー量 (kN/mm)	外部入力エネルギー比
UNI	44911	1.00
LIN23	48879	1.09
LIN45	49617	1.10
CRC	110770	2.47(1.00)
OVL	73647	1.64
SQR	133723	2.98(1.21)
RAD	111273	2.48(1.00)
OCT	118825	2.65(1.07)

3.5 包絡線

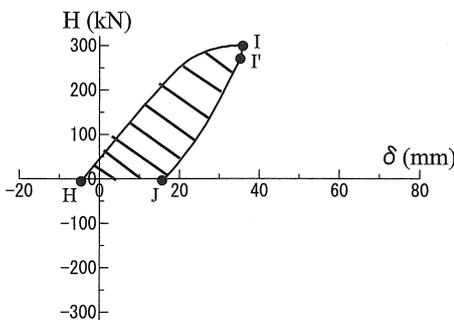
包絡線は, H*- δ^* 曲線を包絡する線(図中の破線)で表すものとする.ただし直線载荷(UNI, LIN23, LIN45)では,往路,復路でほぼ同じ形状を示すため,これらのピークの平均点を結んでいる.一方向载荷(UNI)およびLIN23, LIN45 载荷パターンを図 12(a)に,円周载荷(CRC),楕円载荷(OVL),正方形(SQR),放射形(RAD)载荷パターンの非直線载荷パターンを図 12(b), (c), (d)に示す.縦軸は,载荷方向の水平荷重H*を降伏水平荷重H₀で,横軸は,変位累積値 δ^* を降伏水平変位 δ_0 でそれぞれ無次元化している.



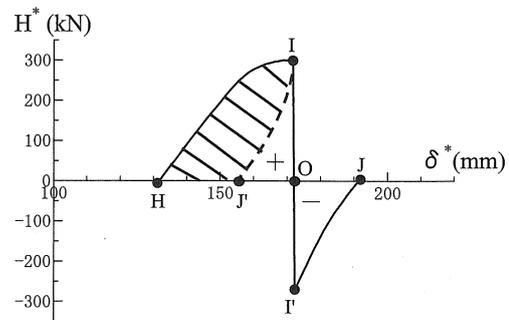
(a) H- δ 曲線の関係



(b) H*- δ^* 曲線の関係



(c) H- δ 曲線の外部入力エネルギー

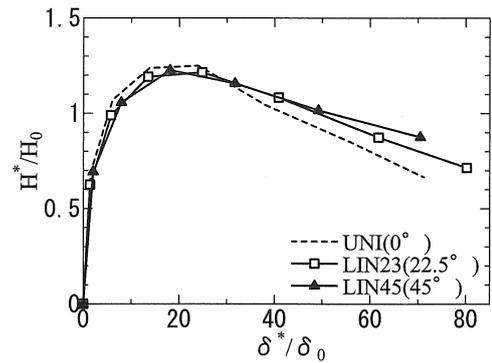


(d) H*- δ^* 曲線の外部入力エネルギー

図 11 外部入力エネルギー算出方法

(a) 一定方向直線荷重パターン

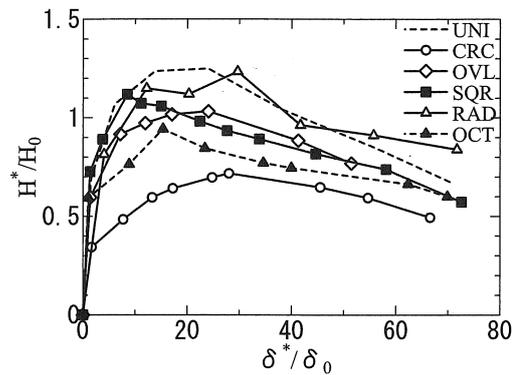
図 12(a)の 3 種の直線荷重パターンの包絡線を見ると、ほとんど差は現れていない。強いというなら、斜め方向荷重は最大荷重が若干低下する代わりに変形能が若干増加している。これは、斜め方向になるにつれて同じ変位を与えた場合でも部材の最外縁応力が大きくなり、早期に塑性化が始まるためと思われる。一方、基準荷重の 0° 方向荷重 (UNI) ではフランジ全断面に一樣応力が発生するためフランジ全体が座屈するまでは強度は増加するが、ひとたび座屈した後は耐力が急速に低下する。斜め方向荷重では、フランジ面内に発生する応力分布が三角形分布となり局部座屈発生領域が狭くなるため、最大荷重後の強度低下が緩やかとなって、変形能が若干大きくなったと考えられる。以上から断面主軸に対して、角度を持つ入射した繰り返し力は断面主軸に対して入射した場合と実際には差がないといえる。



(a) 直線荷重パターン

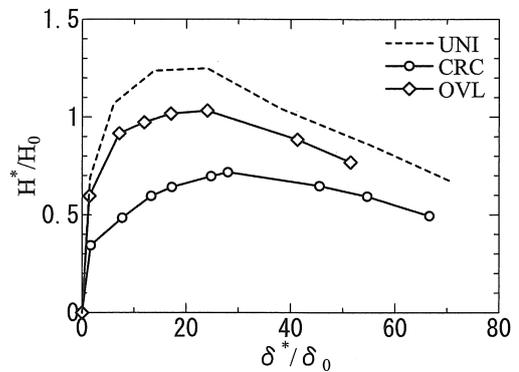
(b) 非直線荷重パターン

図 12(b), (c), (d)の破線は、比較のために直線荷重 (UNI)の結果を示したものである。同図から円周荷重 (CRC)が最も荷重が低い結果を示している。そこで非直線荷重のうち、はじめに円周、楕円荷重パターンの結果を考察する。図 12(c)は、これらの結果のみを取り出したものである。楕円荷重パターンは、直線荷重 (UNI)と円周荷重 (CRC)の中間型のパターンで、 $H^*-\delta^*$ 曲線にもこれが現れ、直線、楕円、円周の各荷重パターンの順でほぼ同じ割合で荷重が低下している。また基準となる直線荷重 (UNI)よりも大きく最大荷重が小さくなっているということから、2 方向荷重を行う場合、従来の耐震設計法のままでは危険であると考えられる。



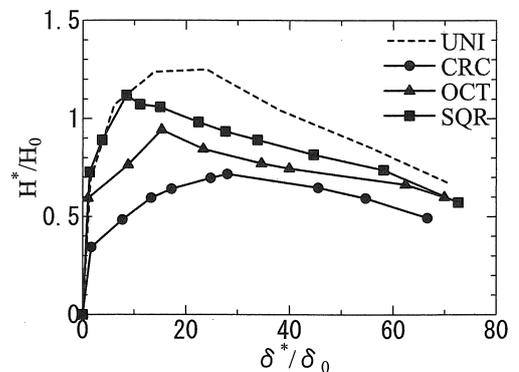
(b) 非直線荷重パターン

円周、八角形、正方形荷重パターンの結果を図 12(d)に示す。同図より正方形荷重 (SQR)が円周荷重 (CRC)よりも耐荷力が大きくなっている。また八角形荷重 (OCT)の包絡線は、円周荷重と正方形荷重の中間に位置した。



(c) 円周、楕円荷重パターン (UNI, CRC, OVL)

非直線荷重パターンの最大荷重が直線荷重 (UNI)より低くなった理由として、直線荷重 (UNI)は $+1\delta, -1\delta, +2\delta, \dots$ と 1 サイクルごとに変位が荷重前の原点 0 に戻るため座屈変形の回復が行われるが、円周、楕円、正方形荷重、八角形荷重などは変位が原点 0 から離れていくため、座屈変形の回復がなされず荷重が低下したと考えられる。



(d) 円周、八角形、正方形荷重パターン (CRC, OCT, SQR)

3.6 最大荷重比と塑性率比

図 12 に示す各荷重履歴の包絡線の最大水平荷重 H_{max}^* を一方向荷重 (UNI)の最大水平荷重 $(H_{max}^*)_{UNI}$ で無次元化して最大荷重比を求めた。また、同図の包絡線より最大水平荷重の 95% に対する変位累積値 δ_{95}^* を求め、UNIの δ_{95}^* で無次元化し塑性率比とした。計算結果を図 13, 図 14, 図 15 および表 5 に示す。これらの図の縦軸は最大荷重比および

図 12 包絡線

び塑性率比を,横軸は図 13 の直線載荷パターンについては載荷角度 θ を,図 14, 図 15 については各載荷パターンの外部入力エネルギー比をとっている.

(a) 直線載荷パターン

図 13 より直線載荷 22.5 度(LIN23)および 45 度(LIN45)の最大荷重は UNI とほとんど変わらず,それぞれ約 3%, 約 2% 低いだけである. 一方,塑性率は UNI の結果より LIN23 で約 14%, LIN45 で約 7% の上昇が見られた. この理由は,前述の通りである.

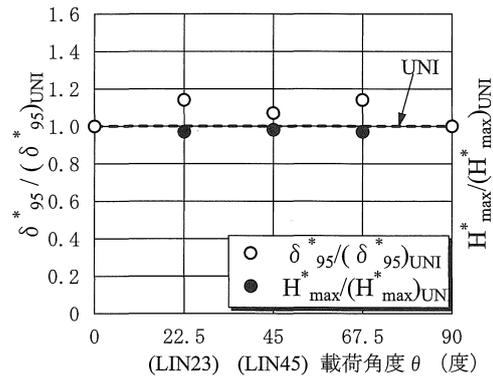


図 13 直線載荷パターン

(b) 非直線載荷パターン(楕円, 円周)

図 14 の横軸は外部入力エネルギー比である. また図中の破線は基準とする一方向載荷(UNI)の結果である. 同図より楕円載荷(OVL), 円周載荷パターン(CRC)と外部入力エネルギーが大きくなるにつれ塑性率は上昇, 最大荷重は減少しているのが分かる.

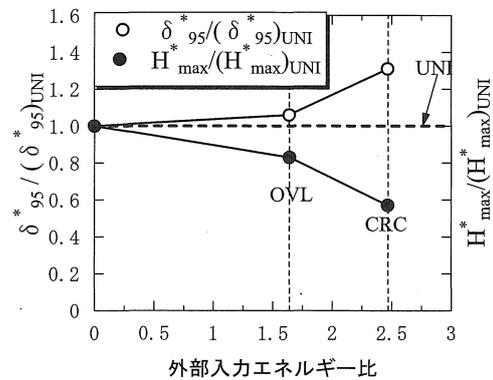


図 14 最大荷重比と塑性率比(円周, 楕円載荷パターン)

(c) 非直線載荷パターン(円周, 八角形, 正方形)

図 15 の横軸は外部入力エネルギー比である. この比は, 円周載荷(CRC)の外部入力エネルギーで他を無次元化したものである. 最大荷重の直線載荷(UNI)からの低下率は, 円周(CRC), 八角形(OCT), 正方形載荷(SQR)でそれぞれ約 43%, 25%, 10%である. また, 円周載荷(CRC), 八角形載荷(OCT), 正方形載荷(SQR)と外部入力エネルギーが大きくなるにつれ耐荷力が大きくなるのが分かった. これは, 一般的予想されることのように入力エネルギーが大きいと最大荷重が低下することとは逆の結果である. よって, 最大強度は外部入力エネルギーではなく載荷経路に關係していると考えられる.

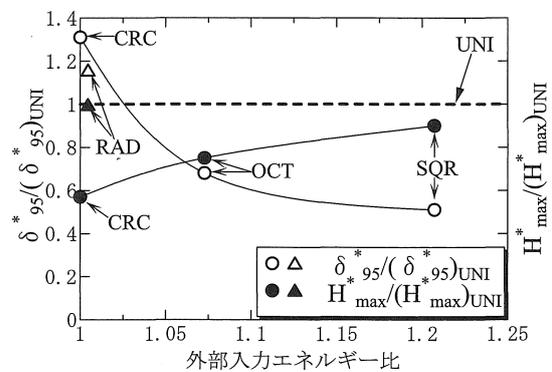


図 15 最大荷重比と塑性率比(円周, 八角形, 正方形)

塑性率比は, 外部入力エネルギーの増加にともない円周, 八角形, 正方形載荷の順に減少している. 一方向載荷(UNI)に比べ, 円周載荷(CRC)で約 31%, 放射形載荷(RAD)で約 15% の上昇, 八角形載荷(OCT), 正方形載荷(SQR)は, それぞれ約 32%, 49% の低下がみられた.

円周載荷パターン(CRC)では, 最大荷重は最も小さいが塑性率は最も大きいという特徴ある結果が得られた. また, 正方形載荷(SQR)は最大荷重は大きいものの塑性率の低下は著しく, 一方向載荷(UNI)より約 49% の低下となった. 正方形載荷(SQR)の塑性率が, 一方向載荷(UNI)より大きく低下した原因として X 方向だけでなく Y 方向にも X 方向と同程度の大きな載荷履歴をとるため外部入力エネルギーが大きく, その分損傷が大きくなったと考えられる.

八角形載荷(OCT)は, 最大荷重および塑性率が, 円周載荷(CRC)と正方形載荷(SQR)の中間に位置した. このように載荷パターンによって最大荷重, 変形能に比較的大きな差が現れることに注意を要する.

表 5 最大荷重比, 塑性率比

載荷履歴	$\delta_{95}^*/(\delta_{95}^*)_{UNI}$	$H_{max}^*/(H_{max}^*)_{UNI}$	外部入力エネルギー比
UNI	1.00	1.00	1.00
LIN23	1.14	0.97	1.09
LIN45	1.07	0.98	1.10
CRC	1.31	0.57	2.47(1.00)
OVL	1.06	0.83	1.64
SQR	0.51	0.90	2.98(1.21)
RAD	1.15	0.99	2.48(1.00)
OCT	0.68	0.75	2.65(1.07)

4. 結論

本研究では、はじめに実地震動波形を 8 通りの単純なパターンにモデル化した。次にこれらの荷重パターンを用いて正方形断面鋼製橋脚を 2 方向繰り返し荷重し、強度と変形能を求め検討を加えた。本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 昨年度までに開発された自動制御プログラムについて、外部変位計の目標変位到達判定および荷重速度のアルゴリズムを改善し、水平荷重の急激な低下を無くすことが出来た。
- 2) 直線荷重実験では 45 度方向入力になるにつれて、最大荷重は約 2%~3% 低下するが、変形能は 22.5 度、45 度方向でそれぞれ約 14%、7% の上昇がみられた。したがって正方形断面に直線繰り返し入力される場合、断面主軸に対する入力方向の影響はほとんど無いといえる。
- 3) 2 方向荷重では、様々な荷重パターンが考えられるため、最大荷重、塑性率などの評価方法として外部入力エネルギーを算出した。外部入力エネルギーは 4 サイクルまでの値を用い、円周荷重 1.0 に対し八角形荷重、正方形荷重はそれぞれ約 1.07、1.21 となった。
- 4) 直線荷重 (UNI) と円周荷重 (CRC) および楕円荷重 (OVL) を比較すると、円周および楕円荷重は、UNI より最大荷重が小さくなった。これは、円周および楕円荷重は X 方向変位に加えて Y 方向変位もあるため、部材が早期に塑性し、荷重が低下したと考えられる。
- 5) 包絡線の比較より楕円荷重 (OVL) は、直線荷重 (UNI) と円周荷重 (CRC) の中間的様相を呈した。これは、外部入力エネルギーと同じ傾向があり両者には密接な関係があると考えられる。
- 6) 円周、八角形、正方形荷重の順に外部入力エネルギーが大きくなるにもかかわらず、最大荷重は増加することが分かった。基準直線荷重 (UNI) からの最大荷重の低下率は円周、八角形、正方形、の順に約 43%、25%、10% となった。最大荷重は荷重経路に大きく影響されているものと考えられる。
- 7) 円周、八角形、正方形荷重の比較では、外部入力エネルギーが大きくなると塑性率は減少し、一方向荷重 (UNI) に比べ、円周荷重 (CRC) で約 31% の上昇、八角形荷重 (OCT)、正方形荷重 (SQR) は、それぞれ約 32%、49% の低下が見られた。正方形荷重 (SQR) の塑性率が、一方向荷重 (UNI) より

大きく低下した原因として X 方向だけでなく Y 方向にも大きな荷重履歴をとるため、最大荷重以降の強度劣化が大きく変形能が小さくなったと考えられる。

- 8) 円周荷重 (CRC) と正方形荷重 (SQR) の中間的な履歴をとる八角形荷重 (OCT) を行ったところ包絡線および最大荷重、塑性率とも円周荷重 (CRC) と正方形荷重 (SQR) の中間的な値を示した。
- 9) 放射形荷重 (RAD) の塑性率は、基準直線荷重 (UNI) より約 15% 上昇した。最大荷重は直線荷重 (UNI) とほぼ同じとなった。これは、放射形荷重 (RAD) の荷重履歴が直線荷重パターンと同じように 1 サイクルごとに変位が荷重前の原点 0 に戻るため座屈変形の回復がおこなわれたためと考えられる。

謝辞：本研究は、愛知工業大学耐震実験センター技術員鈴木博氏および学部生の村本憲彦君、中村領太君を始め、構造研究室の多くの方の協力を得た。ここに深く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2002. 4
- 2) 北嶋圭二，安藤洋，中西三和：2 方向入力を受ける鉄筋コンクリート造柱の振動台実験，日本建築学会構造系論文集 第 455 号，1994. 1
- 3) 早川涼二，川島一彦，渡邊学歩：水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性，土木学会論文集 No. 759/I-67, pp. 79-98, 2004. 4
- 4) 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
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善，2002. 4
- 6) 宇佐美勉：ハイダクティリティー鋼製橋脚，橋梁と基礎，Vol131, No. 6, pp. 30-36, 1997. 6
- 7) 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. 5
- 8) 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：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

(受理 平成 17 年 3 月 17 日)