

圧縮芯をもつ鋼管橋脚の耐震性能実験

Seismic Resistance Performance Test of Steel Tubes with a Compression Core Column

服部宗秋[†], 青木徹彦^{††}, 鈴木森晶^{††}

Muneaki Hattori, Tetsuhiko Aoki, Moriaki Suzuki

Abstract Since the Great Hanshin Earthquake, many researches had been performed experimental studies on the steel bridge piers. But few works had presented high performance of seismic resistance for them. In this study, new idea improving the ductility of steel bridge piers is proposed, in which steel piers have a central core column. Cyclic loading test is conducted to certify the seismic performance using steel tubes of steel grade SS400 and STK400 with 600mm diameter, changing the radius to thickness parameter $R_t=0.066$ to 0.131 and the axial force ratio $P/Py=0.15$ to 0.35 . Comparing with conventional piers, the pier models with central core column show an excellent high seismic performance.

Key Word: Steel bridge pier, Compression core column, Seismic resistant performance

キーワード: 鋼管橋脚, 圧縮芯, 耐震性能

1. 序論

都市高架高速道路は、災害時に都市機能を維持するための主要交通道路としての重要性が大きく、高い安全性が要求されている。1995年に発生した兵庫県南部地震以来、鋼製橋脚の耐震安全性に関して実験的、理論的研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾が大量になされてきたが、耐震性能の大きい構造形式が実現できたとは言いがたい。

耐震性能を表す主な項目には、強度、塑性変形性能、エネルギー吸収性能がある。構造物の強度を増加させるには、より強度の大きい材料を使用するか、大断面寸法を用いればよく、一般に強度は最低要求水準を満たすよう経済的制約条件で済ませる。不確定性の大きい地震力に対して、強度のみで対応することは現実的でなく、設計で想定する以上の大きさの地震力に対しては、塑性変形性能で対応せざるを得ない。エネルギー吸収性能は地震時の構造物の減衰性能を高めるため重要な特性であるが、塑性変形性能が大きければ必然的にエネルギー吸収性能は上がる。よって構造物の耐震設計では、ある一定レベル以上の強度を確保した上で、塑性変形性能の優れた構造物が求められる。さらに地震終了後に、構造物が本来持っている機能の回復が早いもの、損傷後の補修容易なものが望まれる。以上から本論文では、「耐震性能」とい

う表現を主として「塑性変形性能」と同義に使用している。

さらに公共構造物の建設コスト削減は昨今の重要な課題である。コストを下げるために鋼構造物を薄肉にすると、外力が繰り返し作用する地震時に、早期に局部座屈が生じ、必要とされる変形能が十分に期待できない。

また、鋼製橋脚の場合は軸力の大きな部材では変形能がより低下することが知られている。逆に、軸力が小さくなるにつれて変形能は大きくなる。これに対処する鋼製橋脚として、その中心部に安価なコンクリートパイプを設け、これに圧縮力を受け持たせ、鋼断面部の座屈を防止する構造が考えられる。

本実験では、縮小供試体のサイズの関係で、コンクリートパイプの代わりに供試体中心部の圧縮芯としてコンクリート充填鋼管を用いる。実験供試体に上部工重量を想定した鉛直力を圧縮芯に受け持たせ、地震時の慣性力に相当する水平力の繰り返し载荷実験を行って、その耐震性能を明らかにする。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

本実験では圧縮芯のない供試体(-NC)と圧縮芯のある供試体(-CR)の2種類の供試体を用いる。これらの供試体を用いて「圧縮芯の有無」、「径厚比パラメータの影響」、「軸力比の影響」を検討する。実験計画を表-1に示す。

[†] 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)

圧縮芯の役割は、圧縮芯の軸剛性が大きい橋脚に作用する鉛直荷重はすべて圧縮芯にかかることが期待される。また水平荷重による曲げについても、鋼管橋脚の圧縮側に作用する曲げ圧縮力は、破壊の進行度によっても変わるがその大半は圧縮芯により受け持たれ、曲げによる引張力は圧縮芯のない従来の鋼管橋脚と同様、鋼管橋脚基部の引張側で受け持つと考えられる。

従来、鋼管橋脚は、ひとたび基部に象足座屈が生ずれば水平荷重は急速に失われ、崩壊に至る。圧縮芯を設けることにより、このような座屈崩壊を防ぐというのが圧縮芯の基本的役割である。

2.2 供試体の実験パラメータの設定

供試体の実験パラメータの設定は以下のように定めた。道路橋設計示方書¹¹⁾の許容ひずみ ϵ_a を求める式の適用範囲にもあるように、一般的に橋脚として用いられる鋼管柱の径厚比パラメータは $0.03 \leq Rt \leq 0.08$ にある。これは $Rt=0.08$ 以上になると径に比べて肉厚が薄くなりすぎ、地震時に早期に座屈を生じやすく、また座屈後の変形性能がほとんどないためである。しかし断面性能的には径厚比の大きいものを使いたいところである。そこで本研究では径厚比パラメータ変化シリーズで $Rt=0.08$ を夾んで、 $Rt=0.066, 0.098, 0.131$ の 3 種を選んだ。これらをグループ R とする。

また実構造物で軸力比のよく使用される範囲は $0.15 \leq P/Py \leq 0.2$ 程度であり、軸力比が大きくなるにつれて耐震性能は低下する。しかし実構造物では $P/Py=0.2$ より大きなものも存在し、このような鋼管橋脚への圧縮芯の効果を調べる必要がある。そこで本実験供試体では、 P/Py を $0.15, 0.25, 0.35$ の 3 種と変え、軸力比変化シリーズとした。この場合、径厚比パラメータは $Rt=0.066$ 一定とした。これらをグループ P とする。

2.3 実験供試体

本実験で使用する供試体は 1/3 縮小モデルを想定して外径 $D=600$ mm, 供試体高さ $h=2880$ mm の円形断面鋼製橋脚（以下では鋼管橋脚と呼ぶ）モデルである。供試体は性能比較のため、圧縮芯のある供試体と圧縮芯のない供試体を同一条件で各 1 体ずつ用意する。

表-1 実験計画

Group	供試体名	軸力比P/Py	径厚比パラメータRt	芯
R	R4.5-NC	0.15	0.131	×
	R4.5-CR			○
	R6.0-NC		0.098	×
	R6.0-CR			○
	R9.0-NC		0.066	×
	R9.0-CR			○
P	P15-NC	0.15	0.066	×
	P15-CR			○
	P25-NC	0.25		×
	P25-CR			○
	P35-NC	0.35		×
	P35-CR			○

グループ R は実験供試体の鋼種を SS400 とし、軸力比を $P/Py=0.15$ と一定とし、径厚比パラメータ Rt の影響を調べる。径厚比パラメータは前述のように $Rt=0.131, 0.098, 0.066$ の 3 種とし、各 2 体合計 6 体用意した。これらの径厚比パラメータを実現させるため、板厚 4.5mm, 6.0mm および 9.0mm の板材を巻き、溶接して鋼管とした。

グループ P では、供試体すべて同一の径厚比パラメータ $Rt=0.066$ を用いるので、供試体製作費の節減のため、既製の構造用鋼管を使用した。鋼種は STK400 とし、軸力比 P/Py の影響を調べる。軸力比は前述のように $P/Py=0.15, 0.25, 0.35$ の 3 種とし、各 2 体合計 6 体用意した。供試体緒元を表-2 に示す。表-2 に示す供試体名のあとに -NC を記したものを圧縮芯のない供試体とし、-CR と記したものは圧縮芯のある供試体として区別する。なお、径厚比パラメータ Rt 、細長比パラメータ λ は式(1)、(2)によって与えられる。また供試体断面図および側面図を図-1、図-2 に示す。

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

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \tag{2}$$

ここで、 ν =ポアソン比、 σ_y =鋼材の降伏応力、 D =外径、 E =ヤング率、 t =板厚、 h =載荷点高さ。

表-2 供試体緒元

Group		グループR			グループP		
供試体名		R4.5	R6.0	R9.0	P15	P25	P35
鋼種		SS400			STK400		
載荷点位置	h (mm)	2880			2880		
供試体長さ	h' (mm)	2600			2600		
外径	D (mm)	600			600		
板厚	t (mm)	4.5	6	9	9		
細長比パラメータ	λ	0.30			0.30		
径厚比パラメータ	Rt	0.131	0.098	0.066	0.066		
軸力比	P/Py	0.15			0.15	0.25	0.35

※-NC, -CR とともに同一緒元の供試体のため省略して表記

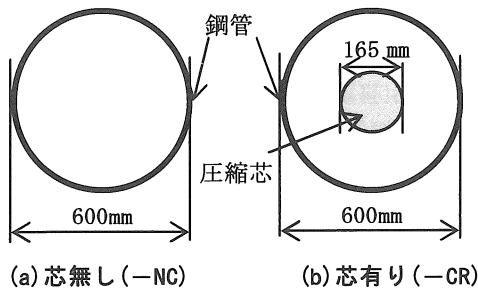


図-1 供試体断面図

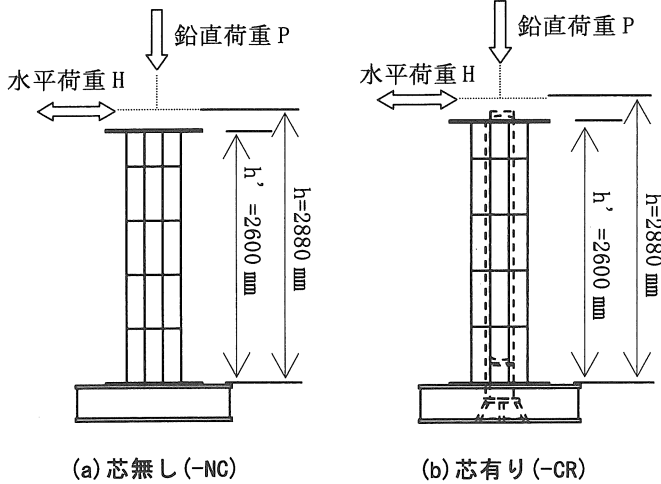
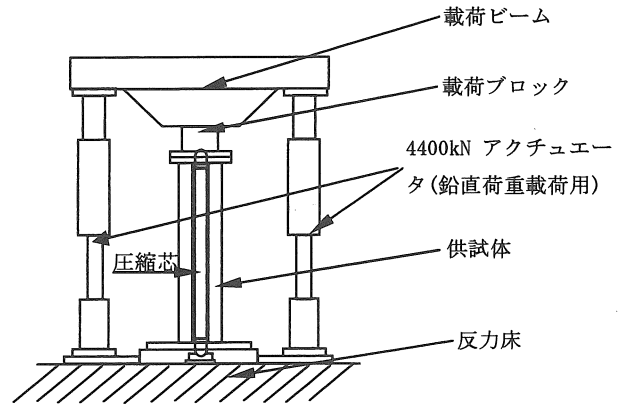
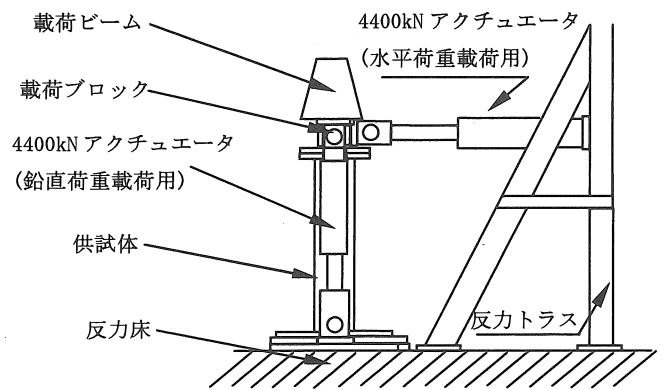


図-2 供試体側面図



(a) 正面図



(b) 側面図

図-3 実験荷重装置

2.4 実験荷重装置

図-3に実験荷重装置を示す。供試体を反力床に固定し、供試体の上に荷重ブロックを設置し、鉛直荷重載荷用の荷重ビームを設置する。上部工重量を想定した一定鉛直荷重Pは、荷重ビームの両端に4400kNアクチュエータを1基ずつ取り付け、これを鉛直方向下向きに一定力を載荷することにより実現する。

地震時の上部工重量の慣性力を想定した繰り返し水平荷重Hは、荷重ブロックに水平に4400kNアクチュエータ1基を取り付け載荷する。アクチュエータの両端はピン構造になっており、供試体の大変形にも対応できる。鉛直アクチュエータの傾きによって、水平分力が生じるがこれを水平アクチュエータの荷重の読みに加えて供試体への水平荷重とした。

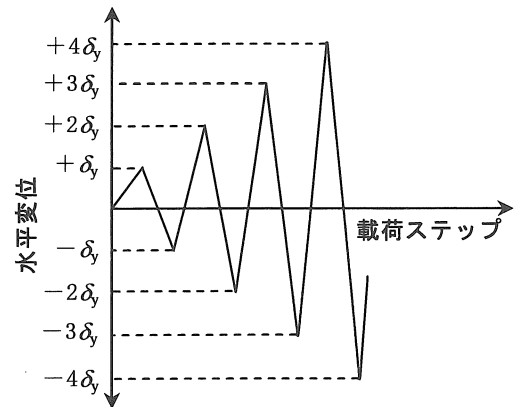


図-4 荷重パターン

2.5 実験荷重方法

実験では、一定鉛直荷重のもとで、地震時の上部工重量の慣性力を想定した水平荷重Hを載荷する。繰り返し水平荷重は図-4に示すように1サイクル目の降伏水平変位 δy を基準とし、 $\pm 1\delta y$ 、 $\pm 2\delta y$ 、 $\pm 3\delta y$...のように漸増載荷を行う。水平荷重Hが最大水平荷重 H_{max} に達した後、降伏水平荷重 H_y まで低下した時点で実験終了する。 H_y まで低下しない場合、降伏水平変位 δy の10倍に達するまで載荷を続ける。

2.6 圧縮芯

実構造では橋脚中心の圧縮芯に、安価なコンクリートパイプを用いることが考えられるが、実験では1/3~1/4の縮小モデルを用いるため、圧縮芯も小型にせざるを得ず、また2000kN近い高強度に耐えるため小口径のコンクリート充填鋼管を使用する。

(1) 圧縮芯の構成

コンクリート充填鋼管製の圧縮芯は鋼管、充填コンクリート、PC棒、球芯、球座から成る。鋼管は材質SM490、外径 $D=165.2$ mm、板厚 $t=7$ mm、高さ $h=2490$ mmを使用した。鋼管の中に高強度コンクリートを打ち、PC棒で圧縮

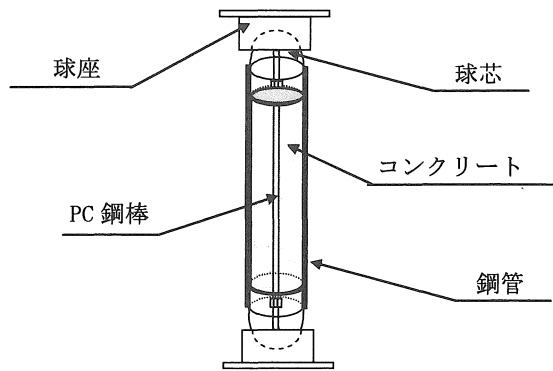


図-5 圧縮芯概略図

をかけることにより排水させ、コンクリート強度をさらに増加させる。コンクリートを高強度とするため減水剤(HP-11)を1%混入している。コンクリートの28日圧縮強度は平均84.7N/mm²であった。

鋼管の両端に球芯を取り付け、球芯を球座に合わせることによりピン構造として機能するようにする。ピン支持部品は、材質SS400の鋼材から加工されている。圧縮芯概略図を図-5に示す。

(2) 圧縮芯の設置

図-6に圧縮芯設置概略図を示す。鋼管の上下部には圧縮芯を設置する穴が開けてあり、圧縮芯下部は鋼管橋脚下部と同様、ピン回転部品を介して基礎に固定する。鋼管橋脚上フランジは図-6(b)に示すように載荷ブロックとボルト結合するが、ボルト締め付け前に圧縮芯上端の球座をくさびに介して載荷ブロックに固定し、鉛直荷重がすべて圧縮芯にかかるようにする。くさびをスクリーで押し込んで載荷ブロックと密に接触させた。その後、曲げによる引張力が鋼管橋脚に伝わるように鋼管橋脚の上部フランジと載荷ブロックをボルト結合した。

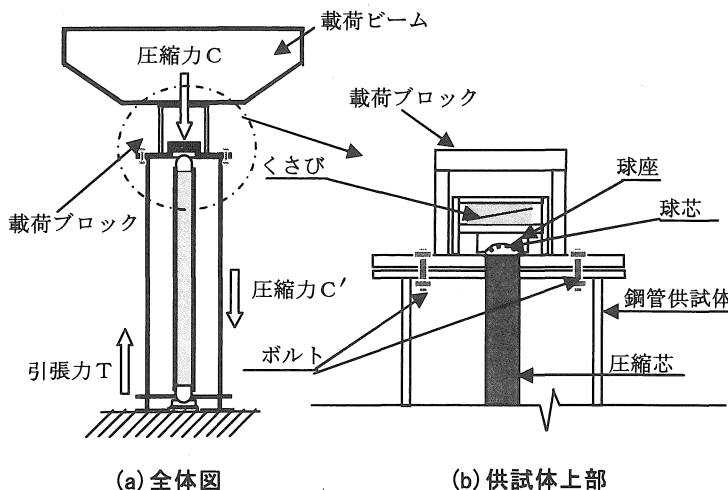


図-6 圧縮芯設置概略図

3. 実験結果

3.1 鋼材引張試験結果

実験前に鋼管橋脚供試体材料の各供試体に対し3体の引張試験を行った。引張試験結果の平均を表-3に示す。

表-3 引張試験結果

鋼種		SS400			STK400
板厚	t(mm)	4.5	6	9	9
ヤング率	E(GPa)	216	204	201	197
降伏応力	σ_y (MPa)	219	332	298	337
ポアソン比	μ	0.24	0.31	0.31	0.29

3.2 降伏水平荷重 H_y , 降伏水平変位 δ_y

はじめに、公称降伏応力 σ_F を用いて鋼管橋脚の降伏軸力 $P_y = \sigma_F \cdot A$ (A は鋼管断面積) を求め、実験で設定した軸力比 P/P_y から軸力 P による応力 $\sigma_N = P/A$ を算定する。つぎに引張試験により得られた鋼材の降伏応力 σ_y を用い、式(3)から降伏水平荷重 H_y を算定した。実験では鋼管橋脚に水平荷重 H を載荷していき、これがちょうど H_y に達したときの変位を降伏水平変位 δ_y として定めた。なお、比較を容易にするため圧縮芯のある供試体の降伏水平変位 δ_y は圧縮芯のない供試体と同じ値を用いた。降伏水平荷重 H_y , 降伏水平変位 δ_y の算出結果を表-4に示す。

$$H_y = \left(\sigma_y - \frac{P}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad (3)$$

ここに、 σ_y : 鋼材の降伏応力, P : 軸力, A : 断面積, Z : 断面係数, h : 供試体高さ。

表-4 降伏水平荷重 H_y , 降伏水平変位 δ_y

Group	供試体名	H_y (kN)	降伏水平変位 δ_y (mm)
R	R4.5-NC	77	9.45
	R4.5-CR	76	
	R6.0-NC	117	12.7
	R6.0-CR	120	
	R9.0-NC	178	
P	R9.0-CR	175	13.2
	P15-NC	248	15.6
	P15-CR	246	
	P25-NC	221	14.4
	P25-CR	223	
	P35-NC	196	
	P35-CR	196	12.1

3.3 水平荷重—水平変位履歴曲線

圧縮芯のない供試体6体と圧縮芯のある供試体6体に対する繰り返し載荷実験によって得られた水平荷重—水平変位履歴曲線を図-7, 図-8に示す。図-7(a)~(c)は径厚比パラメータ R_t を変えた供試体6体についてまとめたグループRであり、図-8(a)~(c)は軸力比 P/P_y を変えた

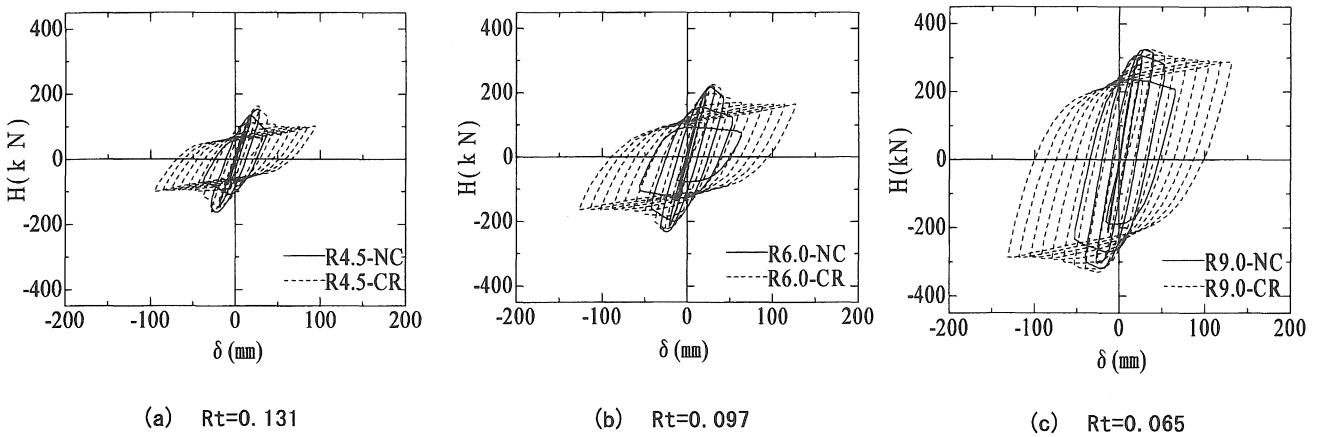


図-7 水平荷重-水平変位履歴曲線 (径厚比パラメータの違い)

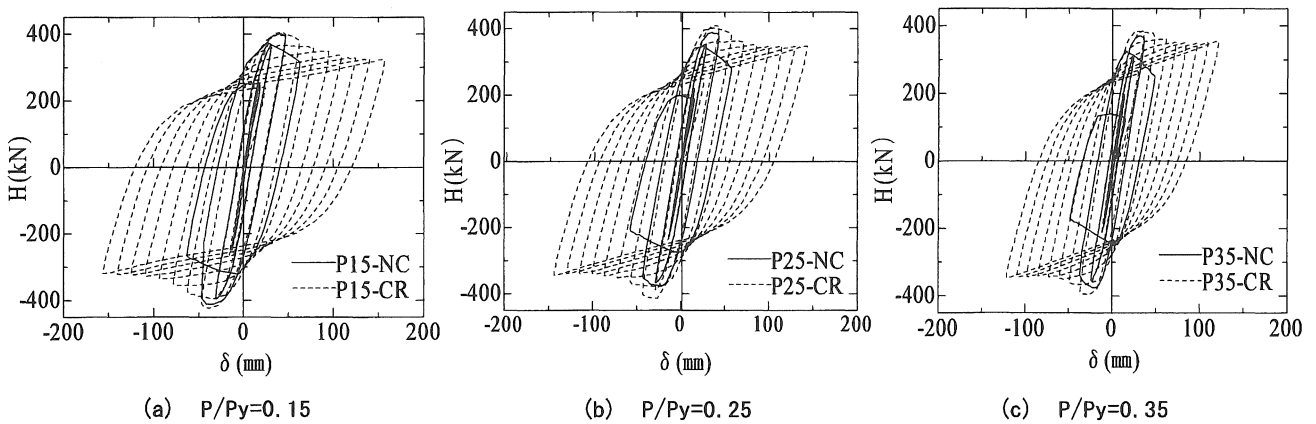


図-8 水平荷重-水平変位履歴曲線 (軸力比の違い)

供試体6体グループPを示している。

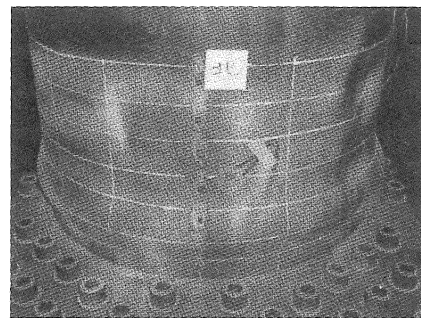
これらの図から明らかなように、圧縮芯のある供試体(図中破線)は圧縮芯のない供試体(図中実線)に比べ、非常に大きな履歴を描いており、耐震性能が著しく向上していることがわかる。

3.4 座屈の様子

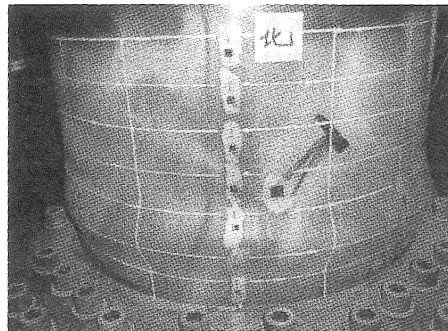
実験後の供試体損傷状況を写真-1に示す。圧縮芯のない供試体は、 $2\delta_y$ で供試体に象足座屈が現れ始め、 $3\delta_y$ で最大荷重を迎え、その後さらに膨らみが大きくなり荷重が急激に低下した。圧縮芯のある供試体は圧縮芯のない供試体と同様、 $2\delta_y$ で供試体にわずかながら象足座屈が現れ始め、 $3\delta_y$ で最大荷重を迎えたが圧縮芯のない供試体に比べれば座屈変形量は極めて少なく、繰り返し変位が増加しても、膨らみは大きくならなかった。径厚比の最も大きい供試体R4.5-CRは実験終了後、象足座屈の上部に凹みが見られた。

3.5 包絡線

繰り返し載荷実験で得られた履歴曲線の包絡線を図-9(a), (b)に示す。包絡線の縦軸、横軸をそれぞれ H_y , δ_y で無次元化したものを図-10(a), (b)に示す。図-9(a), 図-10(a)はグループR(径厚比パラメータRtの違い)につ



(a) P25-NC (4δy)



(b) P25-CR (10δy)

写真-1 供試体損傷状況(実験終了時)

いてまとめたもので, 図-9(b), 図-10(b)はグループ P(軸力比 P/P_y の違い)についてまとめたものである. 両図とも実線は圧縮芯のない供試体グループ, 破線は圧縮芯のある供試体グループを表している.

(a) グループ R (径厚比パラメータ R_t の違い)

図-9(a)より, 径厚比パラメータ R_t の違いにより両者の最大荷重に大きな差が見られるが, 圧縮芯の有無に関わらず両者の最大荷重はほぼ等しい. また圧縮芯のない供試体は最大荷重後急速に荷重が低下しているのに対し, 圧縮芯のある供試体は最大荷重後に若干の荷重低下があるものの, 大きな変位領域でもほぼ一定の水平荷重を保持し続けている. 図中の曲線の初期剛性は, 供試体によって径厚比 R_t が異なるため, その違いにより明確な差が生じている.

図-10(a)では図-9(a)に比べると 6 体の供試体のいずれも最大荷重の差は小さくなった. 圧縮芯のない供試体は $4\delta_y$ から $6\delta_y$ で降伏水平荷重 H_y 以下に低下し崩壊してしまうが, 圧縮芯のある供試体は $10\delta_y$ 以上の著しく大きな変位でも H_y の約 1.3~1.7 倍の大きな水平荷重を保有している. このように鋼管橋脚に圧縮芯を設ければ, 変形性能を著しく向上させることができることが分かる.

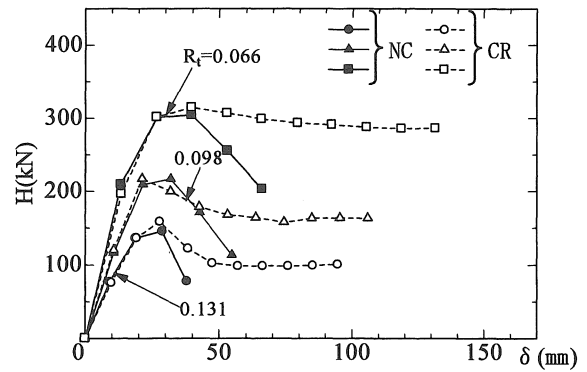
(b) グループ P (軸力比 P/P_y の違い)

図-9(b)より, 同じ径厚比 $R_t=0.066$ で軸力比を変えた場合, 軸力比が大きくなると最大荷重は若干低下しているが圧縮芯のある供試体は低下が少ないことが特徴的である. これは軸力が増加しても圧縮芯がその多くを分担し, 鋼管橋脚の圧縮側に屈曲が生じにくいためと思われる. また前と同様, 圧縮芯のない供試体は最大荷重後急速に崩壊しているが, 圧縮芯のある供試体は最大荷重後の荷重低下は若干あるものの大きな変位領域まで一定の水平荷重を保持している. 供試体はすべて同じ径厚比 $R_t=0.066$ を用いているため, 図中の曲線は弾性域ではすべて初期勾配が等しくなっている.

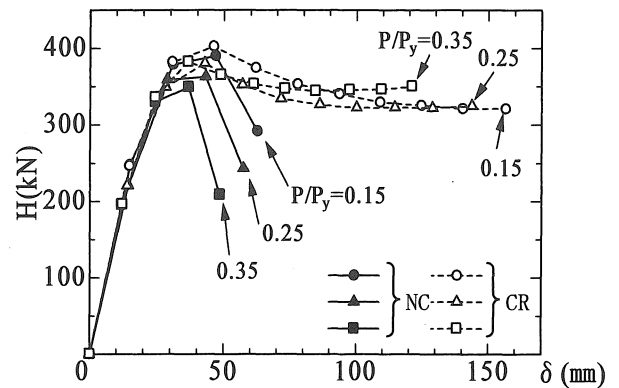
図-10(b)はこれらを無次元化した図で, 圧縮芯のない供試体が $4\delta_y \sim 5\delta_y$ あたりで降伏水平荷重 H_y 以下に落ち, 崩壊しているのに対し, 圧縮芯のある供試体では $10\delta_y$ の非常に大きな変形域でも降伏水平荷重 H_y の約 1.3~1.8 倍もの大きな水平荷重を保持している. 無次元化した場合, 軸力比の大きいものの方が最大荷重がより低下している. この理由は次項で述べる.

3.6 最大強度

図-9(a), (b)の包絡線から求めた各供試体の最大水平荷重 H_{max} および降伏水平荷重 H_y を図-11(a), (b)に示す. 図-11(a)はグループ R(径厚比パラメータ R_t の違い)についてまとめたもので, 図-11(b)はグループ P(軸力比 P/P_y の違い)についてまとめたものである. 図-11(a)の横軸は径厚比パラメータ R_t を表しており図-11(b)の横軸は軸力比 P/P_y を表している. 各供試体の最大水平荷重 H_{max} , 降伏水平荷重 H_y および無次元化量を表-5に示

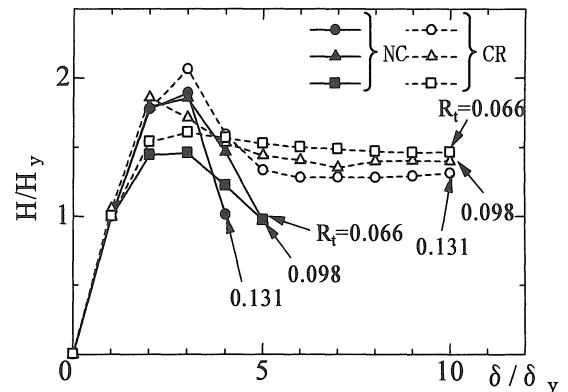


(a) グループ R

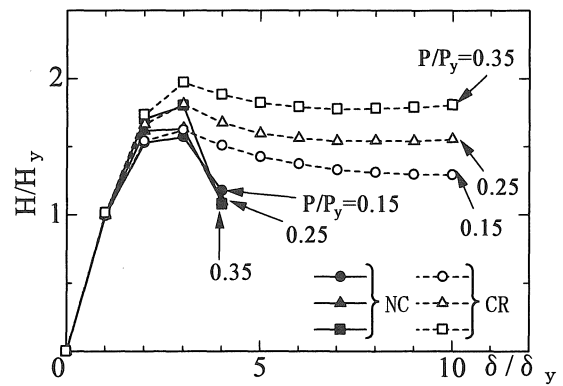


(b) グループ P

図-9 包絡線



(a) グループ R



(b) グループ P

図-10 無次元化包絡線

す。

(a) グループ R (径厚比パラメータ R_t の違い)

図-11(a)から、径厚比パラメータ R_t が大きくなるにつれて最大荷重が低下する様子がわかる。Hy も同じ割合で低下しており、Hy で除した最大強度図-12(a)では、図-11(a)のような変化は少なくなっている。

(b) グループ P (軸力比 P/P_y の違い)

一方、軸力比を変えた図-11(b)の結果から分かるように、軸力比 P/P_y によって圧縮芯のある供試体は最大荷重 H_{max} に大きな差はないものの、Hy は圧縮芯の有無にかかわらず軸力比が大きいものほど小さくなり、Hy で無次元化した場合、図-12(b)の破線で示すように、圧縮芯に関係なく軸力比が大きいものほど最大強度は大きくなっている。すなわち無次元化によって傾向が変わることに注意が必要である。

圧縮芯を設けても最大水平荷重が特に増加しない理由は以下のように考えられる。圧縮芯のある供試体でもないものでも、大きな水平荷重のもとでは鋼管橋脚基部に曲げによる引張および圧縮の大きな塑性変形を生じ、その部分断面では降伏強度以上にならない。この強度は圧縮芯の有無に関わらず一定の大きさである。したがって圧縮芯があっても大きな水平荷重には抵抗できないと考えられる。

3.7 塑性率

塑性率は従来の研究でなされているように、最大水平荷重を過ぎた後、最大水平荷重の 90%の点での変位を δ_{90} とし、式(4)で定義した。結果を図-13(a), (b)に示す。図-13(a)はグループ R (径厚比パラメータの違い)についてまとめたもので、図-13(b)はグループ P (軸力比の違い)についてまとめたものである。

$$\mu_{90} = \frac{\delta_{90}}{\delta_y} \quad (4)$$

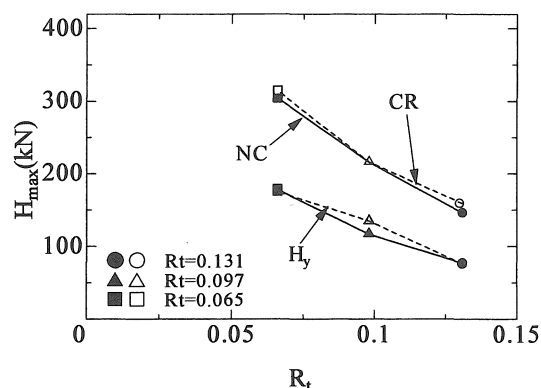
(a) グループ R (径厚比パラメータ R_t の違い)

図-10(a)より径厚比パラメータ $R_t=0.066$ の場合、圧縮芯のある供試体の塑性率 μ_{90} は 10 以上あるが径厚比パラメータ $R_t=0.098, 0.131$ の場合、圧縮芯のある供試体と圧縮芯のない供試体には塑性率 μ_{90} に大きな差が表れていない。

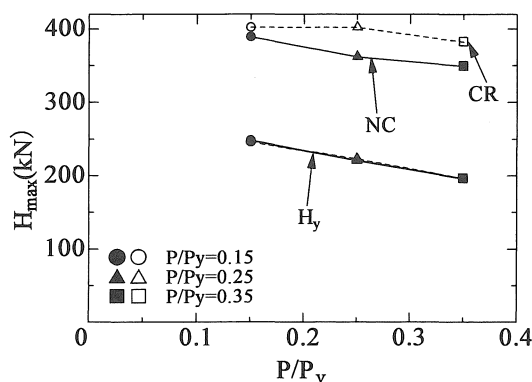
(b) グループ P (軸力比の P/P_y 違い)

図-10(b)より、軸力比 $P/P_y = 0.35$ では圧縮芯のある供試体は塑性率 μ_{90} が 10 以上あるが、 $P/P_y=0.15, 0.25$ の圧縮芯のある供試体では図-8 包絡線にみられるような大きな変形性能がみられなかった。

したがって式(4)で定義した塑性率は圧縮芯のある供試体の変形性能を適切に表現していない。なぜなら図-7, 図-8 から明らかのように、圧縮芯のない供試体は最大水平荷重後急速に崩壊するのに対し、圧縮芯のある供試体

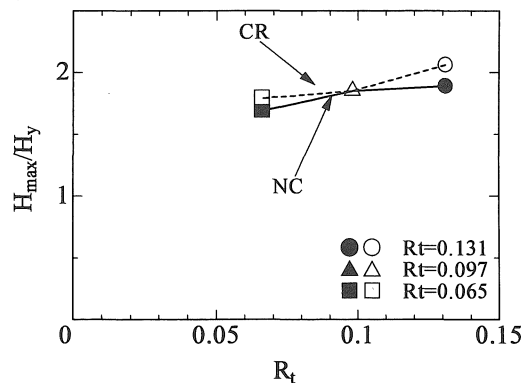


(a) グループ R

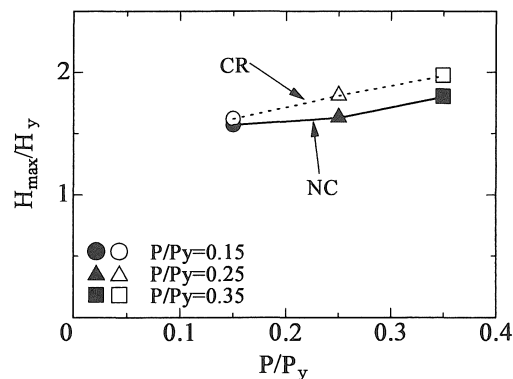


(b) グループ P

図-11 最大水平荷重 H_{max} および降伏水平荷重 H_y



(a) グループ R



(b) グループ P

図-12 最大強度

では最大荷重後に多少の荷重低下はみられるものの, その後の荷重低下はほとんどなく, $10\delta_y$ という非常に大きな変位に対しても H_y を越えるほぼ一定の荷重を保持しており, 式(4)はこのような特性を表現していないからである.

変形性能が大きく, 大地震時に構造物が崩壊しないということは極めて重要な特性である. この変形性能を表す特性として塑性率があるが, その定義には, 最大荷重点の変位を用いるもの¹¹⁾の他, 従来の研究では式(4)に示したよう 90%点ないし 95%点を用いたものがあり, 明確な根拠を示した定説はない. 今回の圧縮芯のある供試体の例のように, 大変位を与えても荷重は最大荷重点から約 10%~40%低下するものの, なお H_y を越える荷重を保有し続ける特別な場合の変形性能を評価するためには, 従来の定義ではなく別の評価法が必要となる. 参考のため $10\delta_y$ 時点での水平荷重を求めたところ, 圧縮芯のある供試体は H_y の 1.3 倍~1.8 倍の荷重を保持していた. これを表-5 に示す. そこで今回は最大荷重後, H_y まで低下する点の変位を用いて塑性率を評価した. 圧縮芯のある供試体は $10\delta_y$ を越えるので, 図では矢印を付けている. このような低い荷重点を塑性率に用いて問題はないか疑問が生じるが, 従来の橋脚のように最大荷重後に急速に荷重低下を来す場合には, 相対的評価としてはどの荷重点を用いた塑性率でも靱性の評価には大きな差は表れることはなく(表-5 参照), 今回のような H_y 荷重点変位 δ_{Hy} を用いた塑性率でも, 変形能を表現するための物理的意味はあると考えられる.

本実験では, 先に述べたように変位が $10\delta_y$ 近くになってもポストピークでの荷重低下がほとんどみられなかったために, $10\delta_y$ で実験を停止している. よって δ_{Hy} で定義した塑性率は 10 以上の大きな値をもつと考えられ, 圧縮芯を入れたことによる変形能の改善は顕著であるといえる.

3.8 エネルギー吸収量

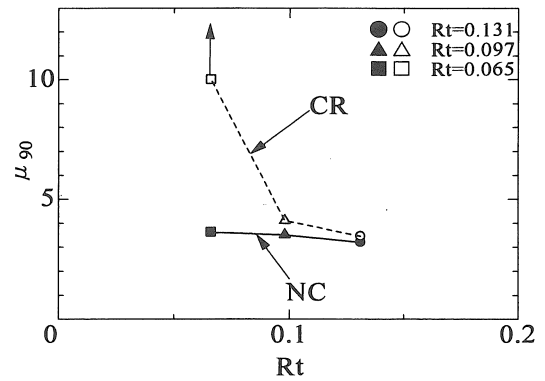
各供試体のエネルギー吸収量を図-15(a), (b)に示す. 縦軸はエネルギー吸収量 E を弾性ひずみエネルギー E_y で無次元化し, 横軸は変位 δ を降伏水平変位 δ_y で無次元化している. 図-15(a)はグループ R(径厚比パラメータ R_t の違い)についてまとめたもので, 図-15(b)はグループ P(軸力比 P/Py の違い)についてまとめたものである.

(a)グループ R(径厚比パラメータ R_t の違い)

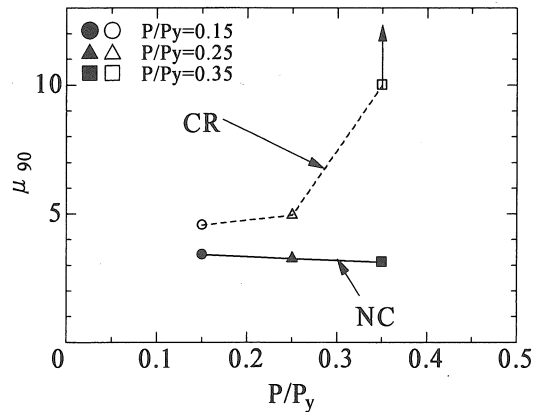
図-15(a)より, 圧縮芯のない供試体も圧縮芯のある供試体も $4\delta_y$ までにはほぼ同じ履歴を通過しているが, 圧縮芯のある供試体は $5\delta_y$ 以降の大きな変位に対して圧縮芯の効果が現れ, エネルギー吸収量は著しく増加している. また径厚比パラメータ R_t を小さくするほどエネルギー吸収量は増加していることがわかる.

(b)グループ P(軸力比 P/Py の違い)

図-15(b)より, 圧縮芯のある供試体はないものに比べ,

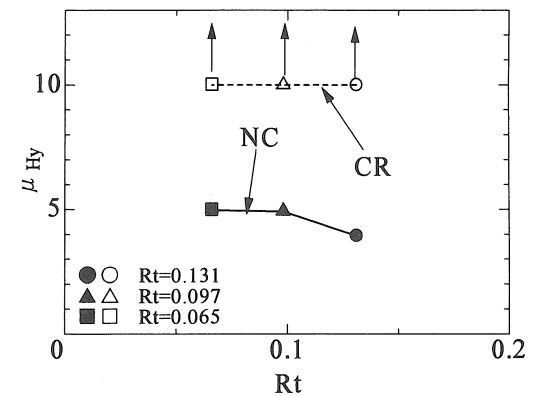


(a) グループ R

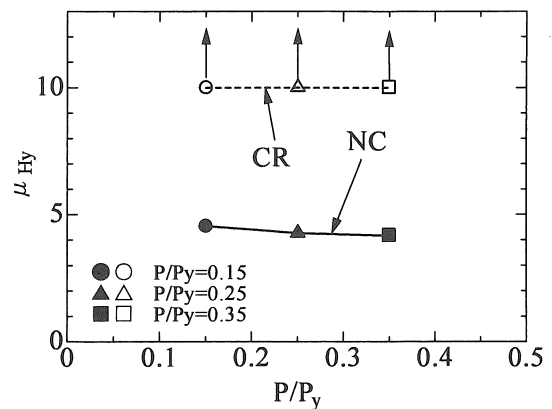


(b) グループ P

図-13 塑性率 (μ_{90})

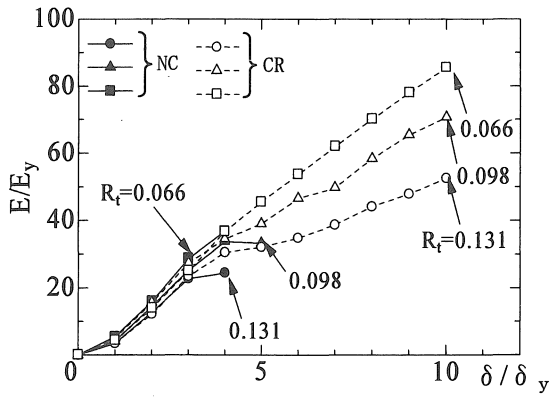


(a) グループ R

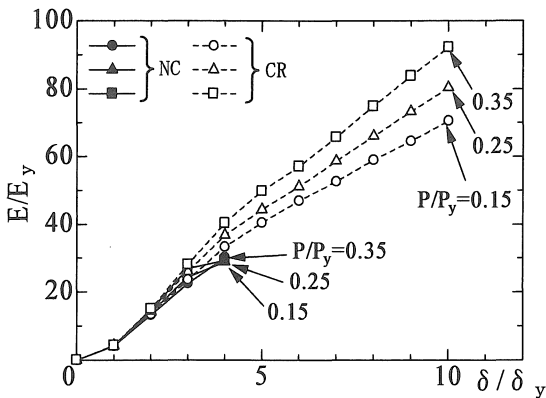


(b) グループ P

図-14 H_y 低下点に対する塑性率 (μ_{Hy})



(a) グループ R



(b) グループ P

図-15 エネルギー吸収量

グループ R と同様エネルギー吸収量が飛躍的に増加している。また軸力比 P/P_y が大きい程エネルギー吸収量は大きい。

3.9 供試体と圧縮芯の荷重分担と圧縮芯の役割

供試体に貼り付けたひずみゲージの値により、供試体に作用する軸力割合を推定する。圧縮芯にもコンクリート充填鋼管にひずみゲージが貼り付けてあるが、今回のコンクリート充填鋼管では圧縮荷重を内部コンクリートのみを与える構造としているため、圧縮芯鋼管表面に貼り付けたひずみゲージの読みは小さく、鉛直作用力に相

当するひずみは観測されなかった。

グループ P の圧縮芯のある供試体 P35-CR ($P/P_y = 0.35$) を例に、 $1\delta_y \sim 3\delta_y$ 時の供試体上部の載荷点から 880mm の位置 (載荷点高さ $h=2880\text{mm}$) に貼った 4 枚のひずみゲージの値と水平荷重の関係を図-16 に示す。この位置では大変位でもひずみは弾性を保っている。同図で、実線は載荷方向位置のひずみゲージの値、破線は側面位置のゲージの値である。これらの図 (a)~(c) から繰り返し載荷の変位が $1\delta_y \sim 3\delta_y$ へと大きくなっててもひずみの値の傾向は変わらず絶対量に変化しているだけであることがわかる。他の、供試体についても同様の傾向が見られた。

4 枚のひずみゲージの平均値に軸剛性 EA (E: ヤング係数, A: 断面積) をかければ軸方向力となる。同じ供試体で圧縮芯のある供試体と圧縮芯のない供試体について、 $3\delta_y$ 時のそれぞれ供試体上部のひずみの平均値を水平荷重に対して図示すると図-17 のようになった。同図で実線は圧縮芯のない供試体、破線は圧縮芯のある供試体を示す。

これらの図から、軸方向ひずみは水平荷重の増加、減少に関係なく、ほぼ一定値を保っていること、圧縮芯のある供試体 (破線) では軸方向ひずみ、すなわち軸方向力が圧縮芯のない供試体 (実線) より半減していることが読みとれる。これから、圧縮芯は供試体に作用する軸力のほぼ半分を分担していることがわかる。以上は供試体上部のひずみの観察からいえることである。

供試体基部では鉛直荷重に加え、水平荷重による曲げ圧縮力と引張力が鋼管断面の曲げ方向の外縁に作用し (図-6(a) 参照)、圧縮芯のない場合には圧縮力が鋼管圧縮部分に作用し、やがて座屈を発生させる。圧縮芯のある供試体では、鋼管の圧縮側の縮みが生じようとする、ある縮み以上になると圧縮芯がこれを支え、座屈変形の進行を防ぐ。これにより鋼管柱特有の象足座屈の発生やその後の急速な荷重低下や崩壊が生じることがなくなる。すなわち鋼管柱の崩壊につながる圧縮側の座屈変形は、圧縮芯があれば防ぐことができ、これにより非常に大きな変位に対しても水平荷重を保ちうるものと考えられる。

表-5 実験結果

Group	供試体名	パラメータ	H_y (kN)	H_{max} (kN)	$H_{(10\delta_y)}$ (kN)	H_{max}/H_y	$H_{(10\delta_y)}/H_y$	$H_{(10\delta_y)}/H_{max}$	μ_{90}	μ_{Hy}	
R	R4.5-NC	Rt	0.131	77	146	101	1.89	1.33	0.65	3.21	3.95
	R4.5-CR			76	157		2.06			>10.0	
	R6.0-NC		0.098	117	216	163	1.85	1.36	0.75	3.52	4.93
	R6.0-CR			120	216		1.80			>10.0	
	R9.0-NC		0.066	206	305	286	1.48	1.44	0.91	3.62	4.98
	R9.0-CR			198	315		1.59			>10.0	>10.0
P	P15-NC	P/Py	0.15	248	389	321	1.57	1.30	0.81	3.42	4.54
	P15-CR			246	402		1.62			>10.0	
	P25-NC		0.25	221	360	345	1.63	1.55	0.84	3.26	4.26
	P25-CR			223	400		1.81			>10.0	
	P35-NC		0.35	196	353	350	1.80	1.79	0.91	3.12	4.17
	P35-CR			196	386		1.97			>10.0	>10.0

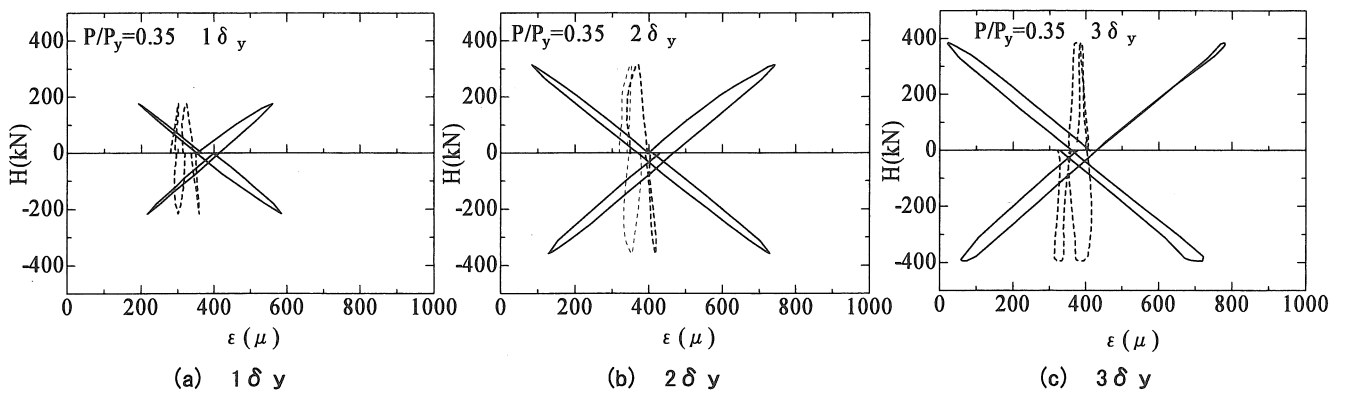


図-16 供試体上部のひずみ-水平荷重関係 (供試体 P35-CR)

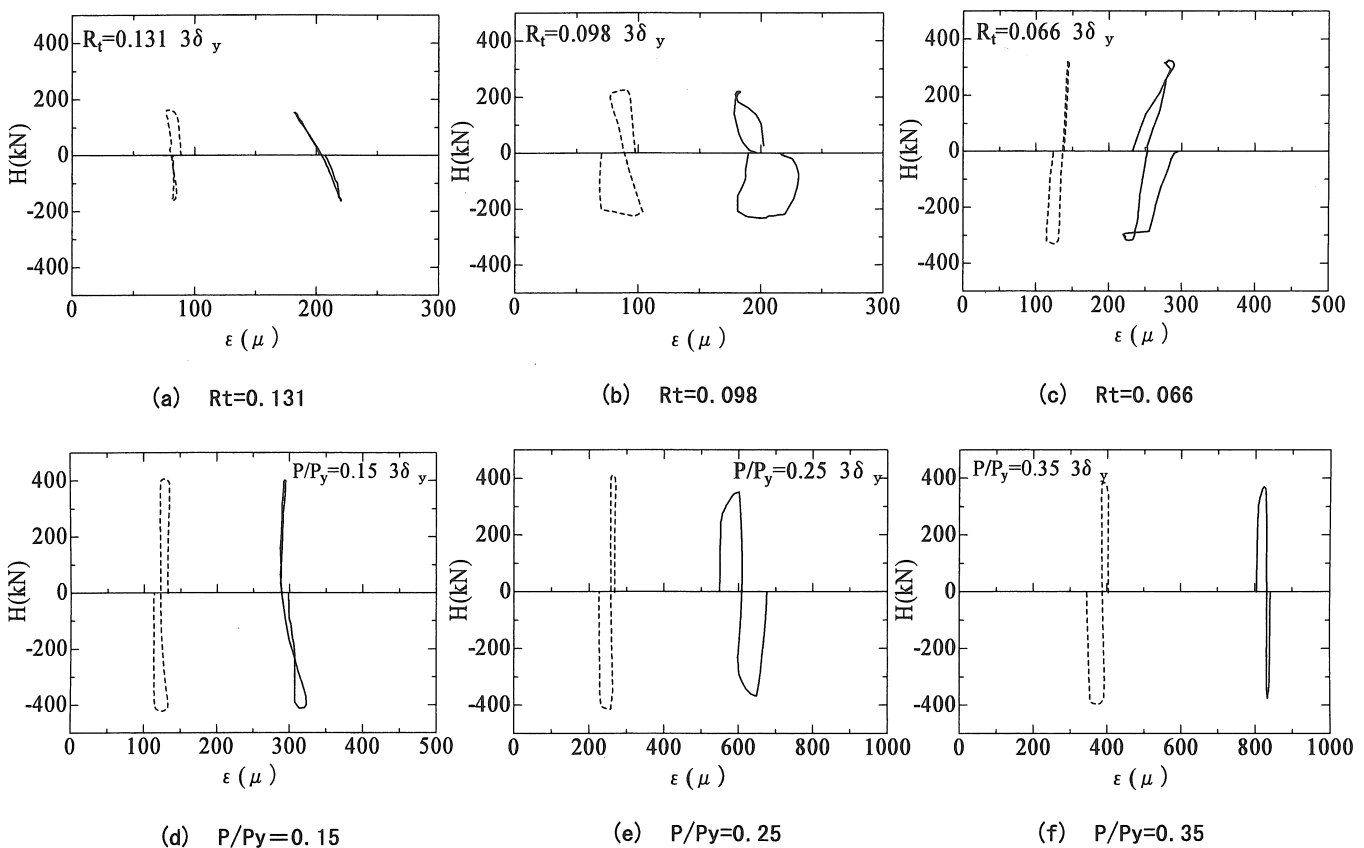


図-17 ひずみの平均値-水平荷重関係 (3δy 時)

4. 結論

本研究は鋼製橋脚の耐震性能を向上させるために、円形断面鋼製橋脚の中心部に圧縮芯を用いて耐震性の向上を図る新方式橋脚を提案し、その耐震性能を実験的に検討した。研究によって得られた結論は以下のようにまとめられる。

(1) グループ R, グループ P 共に圧縮芯を設けた橋脚モデルの繰り返し載荷実験では、いずれの供試体も最大荷重までは圧縮芯のない供試体とほぼ類似の荷重変形特性を示した。しかし圧縮芯のない供試体は従来の実験結果と同様、最大荷重後、3δy 以降急速に荷

重が低下して崩壊したのに対し、圧縮芯のある供試体では最大荷重の 7~35% の荷重低下の後にはほとんど荷重の低下はなく、10δy になってもほぼ一定の荷重を維持した。実験はここで終了したが、変形性能は 10δy 以上続くと予想できる。(図-9, 図-10 参照)

(2) 圧縮芯を設けても最大強度は圧縮芯のないものと大きな差が現れなかった。強度が必要以上に大きくなると地中基礎構造物の破壊が考えられ、好ましくないが、圧縮芯を設けたことによるこのような弊害はなく、逆に変形能が大きいことによる作用地震力の低減が期待できる。

- (3) 径厚比パラメータ R_t を変化させたグループ R では、圧縮芯の有無に関わらず、 R_t が約 0.03 大きくなる毎に最大荷重は約 30%低下した。降伏水平荷重 H_y で除した場合、これらの間の差は見られなかった（図-11(a)，図-12(a) 参照）。
- (4) 軸力比 P/P_y を 0.15, 0.25, 0.35 と増加させた実験グループ P では、軸力比を大きくすると最大荷重は低下するが、圧縮芯のある供試体の変化は小さかった。圧縮芯のない橋脚は P/P_y が 0.1 増加する毎に約 2~8%の荷重低下が見られた。降伏水平荷重 H_y で除した場合、軸力比の増加によって最大強度はやや増加する傾向が見られた（図-11(b)，図-12(b) 参照）。
- (5) 圧縮芯のある供試体の変形性能をより正確に表す指標として最大荷重から H_y まで低下する点の変位を用いた塑性率 μ_{H_y} を定義した。この塑性率を用いると圧縮芯のない供試体では μ_{90} の約 20~40%大きくなるが、圧縮芯のある橋脚の変形性能が評価でき、その塑性率 μ_{H_y} は 10 以上の非常に大きな値を持つ。（図-14 参照）。
- (6) グループ R, グループ P 共にエネルギー吸収量も、圧縮芯のある供試体が圧縮芯のない供試体に比べて著しく大きな値を示した。（図-15(a)，(b) 参照）
- (7) 圧縮芯は橋脚上部で、本来橋脚にかかる鉛直荷重の約 1/2 を分担しており、橋脚基部では水平荷重によって生じる曲げ圧縮分も分担し、鋼管の圧縮部分の座屈変形防止に役立っていると思われる。（図-16，図-17 参照）
- (8) 実験結果を総合的に判断して、圧縮芯を設けた橋脚は、実用的なパラメータの範囲で最大強度の過度の増加がなく、変形性能、エネルギー吸収性能の著しい増加が認められた。このことから、圧縮芯をもつ橋脚は従来の鋼管橋脚に比較し、極めて高い耐震性能を有する優れた構造形式であることが実験的に確認できた。

謝辞：本研究は、愛知工業大学耐震実験センターで行なわれ、耐震実験センター研究費を使用して行いました。学部4年生、鈴木博技術員他ご協力頂いた方に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 竹本潔史: 鋼製橋脚モデルの静的および準静的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 507, I-30, pp99-108, 1995
- 2) 水谷慎吾, 宇佐美勉, 青木徹彦, 伊藤義人, 岡本隆: パイプ断面鋼圧縮部材の繰り返し弾性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 42A, pp105~114, 1996. 3
- 3) 三木千寿, Jorge MULLER, 佐々木哲也: 断面変形部を有する円形断面鋼製橋脚の耐震性能の検討, 土木学会論文集 No. 605/I-45, 117-127, 1998. 10
- 4) 村瀬清満, 安原真人, 渡辺忠朋, 木下雅敬: コンクリート充填円形鋼管柱の耐荷力と変形性能の評価, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp1555~1564, 1998
- 5) 安波博道, 寺田昌弘, 青木徹彦, 山田将樹: 高張力鋼(SM570Q)鋼管柱の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 591/I-43, 233-242, pp233-242, 1998. 4,
- 6) 宇佐美勉, 渡辺孝一, 金田一智章, 岡本隆, 池田茂: ハイダクティリティー鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 591, pp207-218, 1998
- 7) 半野久光, 田嶋仁志, 池田茂, 岡本隆, 水谷慎吾: 縦リブを有する円形鋼製橋脚の変形性能, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp207~214, 1999
- 8) 陵城成樹, 堀江佳平, 加賀山泰一, 新名勉, 内田輪, 渡邊英一: 円形断面を有する鋼製橋脚の弾塑性的挙動と耐震性能に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 46A, pp215~220, 2000
- 9) 森下益臣, 青木徹彦, 鈴木森晶: コンクリート充填鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 45A, pp73~83, 2000
- 10) 成瀬孝之, 青木徹彦, 鈴木森晶: 繰り返し等荷重を受ける逆L形鋼管橋脚の強度と変形性能に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 45~56, 2001. 3
- 11) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, v 耐震設計編, 2002, 3月
- 12) (社) 日本道路協会, 道路橋支承便覧, 平成3年7月, p26

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)