

I - 22

鋼管橋脚模型の交番載荷実験

(株)日本製鋼所 正 員 長谷川 久
 北海道開発局 正 員 佐藤 昌志
 (株)日本製鋼所 正 員 小野 信市
 (株)日本製鋼所 正 員 別所 俊彦
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳光

1. はじめに

兵庫県南部地震では、比較的靱性が高いと考えられてきた鋼製橋脚にも比較的大きな被害が発生した。被害の内容としては、矩形断面の1本柱の角溶接が割れて圧壊、矩形断面柱の補剛板の局部座屈、また円形断面柱には円周方向に膨らむ提灯座屈の現象などが起こっていた。これらの損傷の多くは、軸力と地震力による繰返し負荷となる水平力の作用による弾塑性座屈によるとの見解から、近年繰返し水平荷重を受ける鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究¹⁾が数多く行なわれるようになった。特に、矩形断面橋脚に関しては、寸法比や軸力の大きさなどをパラメータとした詳細な実験的、理論的検討が行なわれている²⁾。しかしながら、矩形断面に比べ単位重量当たりの強度が大きく³⁾、力学的に有利と考えられる円形断面橋脚の研究例⁴⁾は少なく、その弾塑性挙動はほとんど明らかにされていない。また、昨年改定された道路橋示方書⁵⁾では、非線形動的解析により鋼製橋脚の耐荷力を照査することが規定されている。この動的解析に必要な復元力モデルは、繰返し水平載荷実験により得ることとなっている。

このような観点から、本研究では、鋼管橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、鋼管試験体を用いた単調および繰返し水平載荷実験を行ない、径厚比や軸力というパラメータが鋼管橋脚の耐荷力と変形性能にどのような影響を与えるのかについて実験的に調査、検討を行なった。

2. 実験の概要

2.1 供試材および供試体

供試材は、JIS 規格の圧力配管用炭素鋼鋼管(JIS G 3452 STPG370 90A)を用いた。その機械的性質を表-1に示す。機械的性質は、鋼管から製作したJIS 6号試験片による引張試験により求めた。上記鋼管を所定の長さに切断後、旋盤により内外面を切削して薄肉鋼管を製作した。この鋼管を2本突き合わせ溶接し図-1に示す供試体を製作した。供試体の上下端部には、試験台および載荷板を固定するための鋼板を周溶接により取付けている。

表-1 供試材の機械的性質

降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
336	448	206	0.3

2.2 載荷方法

表-2に供試体寸法および試験パラメータをまとめて示す。表-2における細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ ⁶⁾および径厚比パラメータ R_t ⁷⁾は次式により定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L'}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}} \quad \dots (1) \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad \dots (2)$$

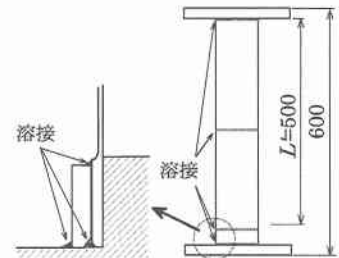


図-1 供試体の形状

表-2 供試体寸法および試験パラメータ

試験体 No	載荷形態	荷重点 高さ	鋼管 高さ	半径	板厚	細長比		径厚比		軸力			降伏荷重	降伏変位
		L (mm)	L' (mm)	R (mm)	t (mm)	L/R	$\bar{\lambda}$	R/t	R_z	P (kN)	P/P_y	方式	H_y (kN)	δ_y (mm)
t10-N15-c	単調載荷 繰返し載荷	631.5	500	47.75	1.0	10.5	0.381	47.8	0.129	15.3	0.15	油圧	3.21	3.825
t15-N15-m		631.5	500	48.00	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086	22.8	0.15		4.84	3.786
t15-N15-c		631.5	500	48.25	2.0	10.4	0.377	24.1	0.065	30.6	0.15		6.49	3.747
t20-N15-m		631.5	500	48.50	2.5	10.3	0.375	19.4	0.052	38.4	0.15		8.16	3.709
t25-N15-m		631.5	500	48.50	2.5	10.3	0.375	19.4	0.052	38.4	0.15	重錘	8.16	3.709
t25-N15-c		631.5	500	48.50	2.5	10.3	0.375	19.4	0.052	38.4	0.15		8.16	3.709
t15-N0-m		631.5	500	48.00	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086	0.0	0.00		5.70	4.454
t15-N0-c		631.5	500	48.00	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086	0.0	0.00		5.70	4.454
t15-N8-m		631.5	500	48.00	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086	11.8	0.08		5.26	4.109
t15-N8-c		631.5	500	48.00	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086	11.8	0.08		5.26	4.109

ここで、 σ_{ys} は降伏応力、 R は平均半径、 L' は鋼管高さ、 t は板厚、 r は断面2次半径、 E は弾性係数、 ν はポアソン比である。

繰返し載荷の方法は、図-2に示すように水平変位 δ を降伏水平変位 δ_y を基準にして各サイクルで漸増しながら繰返し与えた。ただし、降伏水平変位 δ_y は弾性はり理論より次式で定義した。

$$H_y = \frac{(\sigma_{ys} - P/A)I}{RL} \quad \text{..... (3)}$$

$$\delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI} \quad \text{..... (4)}$$

ここで、 H_y は鋼管基部が降伏応力に達するときの水平力、 P は軸力、 A 鋼管の断面積、 I は断面2次モーメントである。

実験はいずれのパラメータに関する試験体に関しても単調載荷と繰返し載荷実験を行なった。試験体は、1)径厚比の影響を検討するために一定軸力 P (降伏軸力 P_y の15%)として板厚のみを変化させた場合、2)軸力 P の影響を検討するために、板厚を一定($t=1.5\text{mm}$)とし軸力を変化させた場合に着目し合計11体製作した。なお、実験は変位速度を0.39mm/sとする水平変位制御で行なっている。

2.2 実験装置

実験装置の概要を図-3に示す。載荷装置は、水平方向荷重を作用させるストローク200mmの電動式ジャッキと軸方向荷重を作用させる容量100kNの油圧サーボ式試験機から構成されている。荷重載荷点は、供試体に水平および軸方向変位が生じて、それらを拘束することなく、荷重ができるだけ水平を保つ構造とした。軸方向荷重はローラーベアリングを介して上部載荷板に作用させ、供試体の水平変位および回転に関わらず常に鉛直下向きに作用するような構造になっている。また、水平方向および軸方向荷重の載荷点は球面ジョイントにより自由に回転することができ、供試体上端部の拘束を防いでいる。水平変位は水平荷重載荷位置の左右2箇所所で測定した。水平方向の荷重と変位は、容量50kNのロードセルおよび容量

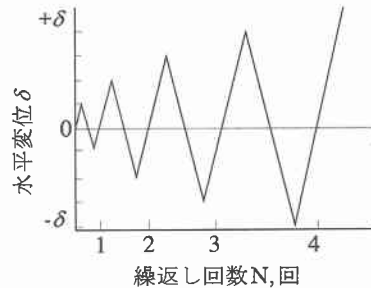


図-2 繰返し載荷方法

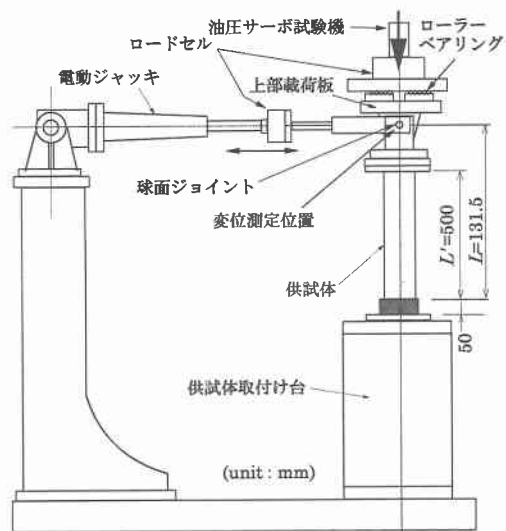


図-3 水平載荷装置

200mmのひずみゲージ式変位計で、また、軸方向の荷重は、容量100kNのロードセルでそれぞれ計測し、デジタルデータレコーダに記録した。

3. 実験結果と考察

3.1 単調載荷実験

図-4に降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化した水平荷重-水平変位曲線を示す。(a)図は、径厚比パラメータ R_t の影響を比較したものである。径厚比が大きくなるほど最大荷重以降の耐力力の低下が著しいことがわかる。(b)図は、径厚比パラメータ $R_t=0.086$ の供試体について軸力の影響を比較したものである。軸力 $P/P_y=0.15$ の最大荷重が他の供試体に比べ高めにでているが、 $P/P_y=0, 0.08$ の供試体に関しては最大荷重まで軸力の大きさによる差は見られない。しかしながら最大荷重以降は軸力が大きくなるほど耐力力の低下が著しい。軸力 $P/P_y=0.15$ の供試体の荷重が高めにでているが、その差は水平荷重で400N程度であり、供試体の板厚などのばらつきと考えられる。

3.2 繰返し載荷実験

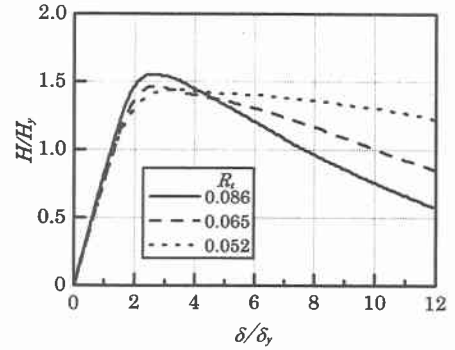
3.2.1 座屈形態

表-3に実験後の供試体の座屈位置および座屈形態を示す。径厚比パラメータ $R_t=0.129$ の供試体では、図-5(a)に示すようなDiamond Patternの局部座屈変形が見られ、径厚比パラメータ $R_t=0.086$ 以下の供試体は図-5(b)に示すように、基部より15～25mm位置にElephant Foot Bulgeと言われる局部座屈変形が見られた。

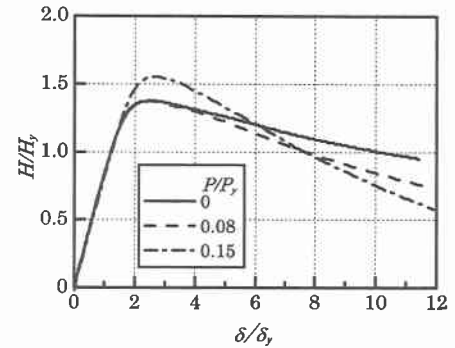
3.2.2 水平荷重-水平変位履歴特性

径厚比パラメータを変化させた供試体の水平荷重-水平変位履歴曲線図を図-6に示す。同図は水平荷重 H と水平変位 δ をそれぞれ降伏 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化して示している。また、表-3に最大荷重時の変位 δ_m を示す。図、表より径厚比が小さくなるほど最大荷重時変位 δ_m は大きくなり、強度劣化が少ないことがわかる。

図-7に繰返し載荷の各変位振幅の最大変位を結んだ包絡線を降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化して示している。図-7(a)は径厚比パラメータの影響を見たものである。図より径厚比が大きくなるほど最大荷重以降の荷重の低下が著しいことがわかる。図-7(b)は軸力を変化させた場合の包絡線である。最大荷重に達するまでは大きな差は見られないが、局部座屈変形が大きく成長するにしたがい軸力の大きなものほど荷重の低下が著しい。



(a) 径厚比の影響



(b) 軸力の影響

図-4 単調載荷の水平荷重-水平変位線図



(a) $R_t=0.129$ (No.t10-N15-c)



(b) $R_t=0.052$ (No.t25-N15-c)

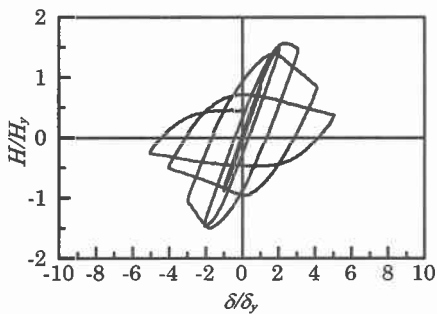
図-5 基部の局部座屈の状況

表-3 座屈位置と形態および塑性率

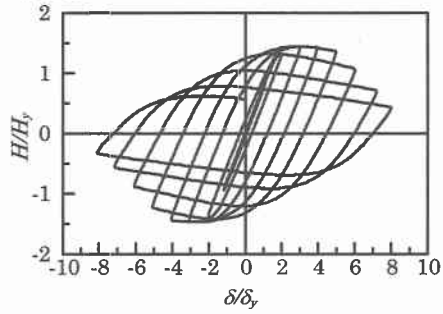
試験体 No	載荷形態	座屈形態	座屈位置 (mm)	最大荷重		最大荷重時変位		H_y 時変位	
				H_m (kN)	H_m/H_y	δ_m (mm)	$\frac{\mu_m}{\delta_m/\delta_y}$	δ_u (mm)	$\frac{\mu}{\delta_u/\delta_y}$
t10-N15-c	単調載荷	DP	10~40	4.97	1.55	8.96	2.34	14.50	3.79
t15-N15-m		EFB	20	7.50	1.55	9.37	2.47	29.11	7.69
t15-N15-c		EFB	16	7.26	1.50	9.49	2.51	17.68	4.67
t20-N15-m		EFB	19	9.52	1.47	10.34	2.76	37.55	10.02
t20-N15-c		EFB	18	9.36	1.44	10.82	2.89	23.08	6.16
t25-N15-m	繰返し載荷	EFB	25	11.76	1.44	12.95	3.49	54.12	14.59
t25-N15-c		EFB	20	12.06	1.48	11.60	3.13	26.82	7.23
t15-N0-m		EFB	15	7.84	1.38	11.52	2.59	45.34	10.18
t15-N0-c		EFB	16	7.61	1.34	11.15	2.50	23.29	5.23
t15-N8-m		EFB	14	7.24	1.55	10.11	2.46	31.68	7.71
t15-N8-c		EFB	15	7.18	1.50	10.28	2.50	19.93	4.85

*) DP:Diamond Pattern

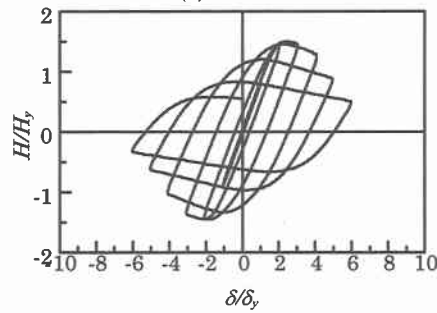
*) EFB:Elephant Foot Bulge



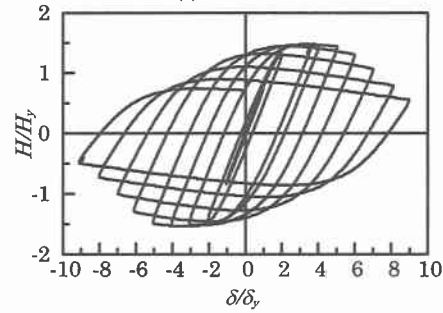
(a) $R_t=0.129$



(c) $R_t=0.065$

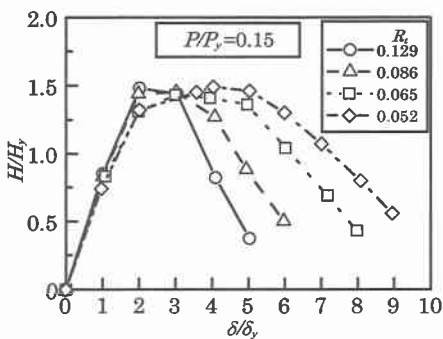


(b) $R_t=0.086$

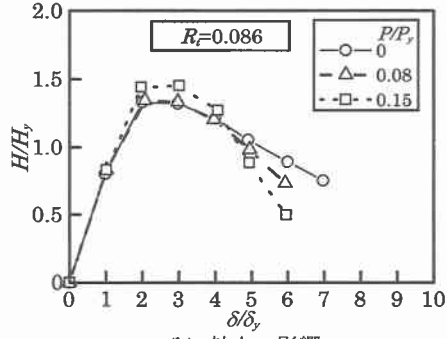


(d) $R_t=0.52$

図-6 水平荷重-水平変位履歴曲線($P/P_y=0.15$)



(a) 径厚比の影響



(b) 軸力の影響

図-7 水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線

3.2.3 剛性比の変化

図-8は水平荷重-水平変位履歴曲線から各ループが横軸($H=0$)を横切る点の勾配(正側)を求め、1サイクル目の弾性域の値で無次元化した値を剛性比としてプロットしたものである。(a)図は径厚比 R_t をパラメータに取って整理しているが、径厚比 R_t が大きくなるほど剛性比の低下は著しい。また、径厚比 R_t が小さくなるほど剛性比0.9~0.8の範囲の剛性比の低下は小さくなる。(a)図と図-7(a)を比較すると剛性比が急激に低減するサイクルにおける変位振幅は包絡線荷重が低下し始める変位振幅と同程度であることがわかる。

図-8(b)は径厚比パラメータ $R_t=0.086$ の供試体について軸力の影響を見たものである。剛性比は軸力の大きさに関係なくほぼ直線的に低下する傾向を示している。

3.2.4 吸収エネルギー量

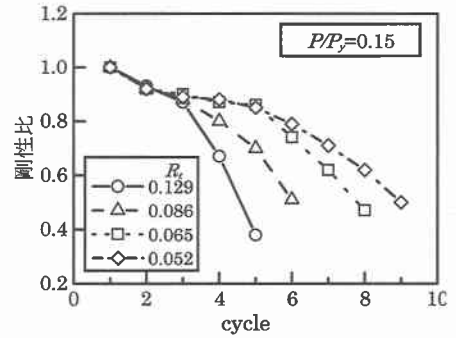
変位振幅(サイクル)と各サイクルの履歴曲線の面積から求めた吸収エネルギーの関係を図-9に示す。同図において水平変位は δ_y で、吸収エネルギー量は弾性エネルギー $\delta_y H_y/2$ で無次元化してある。図-9(a)を見ると径厚比が変化しても各サイクルの吸収エネルギー量は同様な傾向を示して上昇していることがわかる。図-7(a)の包絡線図と比較すると、吸収エネルギー量最大時の変位振幅(サイクル)は水平荷重が H_y まで低下した時点の値に対応していることがわかる。図-9(b)には軸力を変化させた場合の吸収エネルギー量を示す。吸収エネルギー量は4サイクルまでは軸力の大小に関係なく同様に増加する傾向を示しているが、その後局部屈曲変形の増大とともに増加し、やがてゆるやかに減少する。吸収エネルギー量が最大となるのは $PP_y=0, 0.08, 0.15$ に対してそれぞれ6, 6, 5サイクル目の時点である。この時点の水平荷重 H を図-9(b)より求めると、 $0.7 \sim 0.9 H_y$ であることがわかる。

3.2.5 塑性率の変化

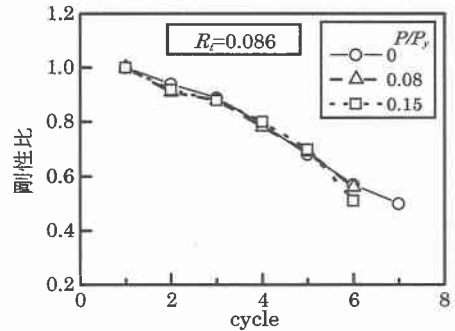
塑性率を検討するために、本論文では以下の2つの方法により評価するものとする。すなわち、

$$\mu_m = \delta_m / \delta_y \dots\dots (5) \quad \mu = \delta_u / \delta_y \dots\dots (6)$$

である。ここで δ_m は最大変位 H_m に対応する変位、 δ_u は水平荷重が最大値に到達後局部屈曲の発生によって H_y まで低下した時点の変位である。これらの値は表-3および図10,11に整理されている。図-10より、径厚比、軸力の増大とともにいずれの塑性率も減少が一

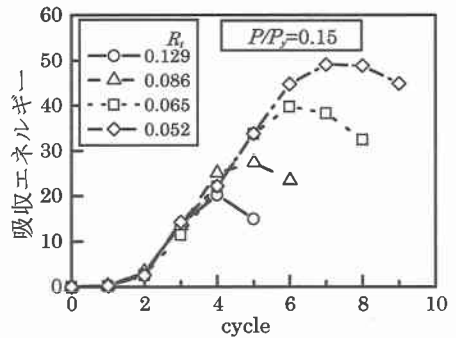


(a) 径厚比の影響

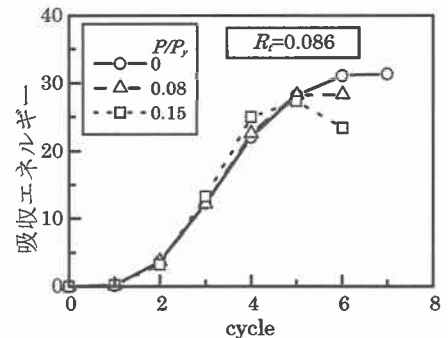


(b) 軸力の影響

図-8 剛性比の変化



(a) 径厚比の影響



(b) 軸力の影響

図-9 各サイクルの吸収エネルギー量

様となる傾向にあることがわかる。また、載荷方法の違いによる塑性率 μ の分布を調べると、繰返し載荷の場合には単調載荷時の1/2強の値を示していることがわかる。これより、繰返し載荷時の塑性率は単調載荷時の値を1/2とすることにより安全側で評価可能であるものと考えられる。図-11より、塑性率 μ_m は軸力の大小にかかわらず、また、載荷方法によらず一様な値となっていることがわかる。これは、最大荷重に達するまでの水平荷重-水平変位の履歴には軸力の影響が小さいことを意味している。

4. まとめ

本研究では、鋼管橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、鋼管試験体を用いた水平載荷実験を行ない、径厚比および軸力が鋼管橋脚の耐力と変形性能にどのような影響を与えるのかを実験的に調査、検討を行なった。得られた結果をまとめて以下に示す。

- 1) 実験後の供試体の局部座屈変形は、径厚比 $R_t=0.129$ はDiamond Pattern、他の径厚比のものはElephant Foot Bulgeと言われる局部座屈変形が見られた。
- 2) 単調載荷では、径厚比および軸力が大きくなるほど最大荷重以降の耐力の低下は著しい。
- 3) 径厚比が大きくなるほど剛性比の低下は著しい。しかし、軸力による影響は小さい。
- 4) 繰返し載荷による各サイクルの吸収エネルギー量は、径厚比、軸力に関係なく水平荷重が $H/H_y=1\sim 0.7$ まで低下した時点の変位振幅で最大となる。
- 5) 径厚比が大きくなるほど塑性率は低下するが径厚比 $R_t=0.086$ 以上になると塑性率の差は小さくなる。
- 6) 径厚比が同じ場合、軸力が大きくなるにしたがい塑性率 δ は小さくなる。しかし、最大荷重までの履歴が軸力によって大きな影響を受けないため、塑性率 μ_m に大きな差はない。
- 7) 繰返し載荷時の塑性率 μ は単調載荷時の値を1/2にすることにより安全側で評価可能である。

参考文献

- 1) 西川, 山本, 名取, 寺尾, 安波, 寺田: 既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 42A (1996), pp975-986.
- 2) 宇佐美勉, 今井康幸, 青木徹彦, 伊藤義人: 繰返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A (1991), pp93-106.
- 3) 宇佐美勉, 青木徹彦, 加藤正宏: 鋼管短柱の圧縮および曲げ耐力実験, 土木学会論文集, 第416号 /I-13 (1990), pp255-264.
- 4) 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返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 42A (1996), pp105-114.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 丸善, 1996年.
- 6) (社)土木学会: 鋼構造物の設計指針, PART A 一般構造物, 鋼構造シリーズ3A, (1987).
- 7) (社)土木学会鋼構造委員会: 座屈設計ガイドライン, (1987).

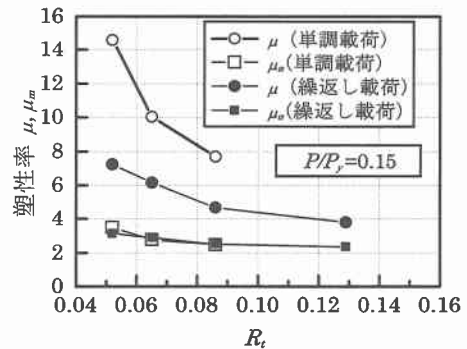


図-10 径厚比と塑性率の関係

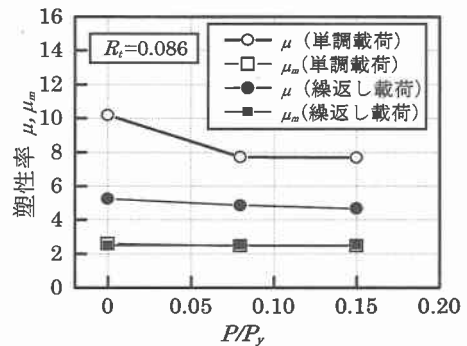


図-11 軸力と塑性率の関係