

鋼管橋脚の交番載荷実験と解析

小枝 日出夫* 熱海 明彦** 佐藤 昌志*** 岸 徳光****

*(株)日本製鋼所 室蘭研究所研究員 (〒051 室蘭市茶津町4番地)

** (株)日本製鋼所 鉄構機器橋梁部課長 (〒051 室蘭市茶津町4番地)

***北海道開発局開発土木研究所 構造部構造研究室室長 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

****工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27番1号)

本研究では、細長比や径厚比のような各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を調査するために、鋼管橋脚を模擬した鋼管試験体を用いて単調および繰返し水平載荷実験を行なった。その結果、1)細長比および径厚比が小さいほど最大耐荷力は大きくなる、2)エネルギー吸収量は、細長比が大き径厚比が小さいほど大きくなる。さらに、設計の効率化を図るために有限要素法による弾塑性大変形解析を行ない、実験結果を再現し得る解析方法を検討した。

Key Words : steel pipe pier, cyclic load, local buckling, elastic-plastic large displacement analysis

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、矩形断面の橋脚に関しては、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、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、その弾塑性挙動は明らかにされていない。また、実用上重要である細長比の影響を検討した実験例は、著者の知る限りでは見当たらない。

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が、大がかりな実験装置が必要なこと、あるいは多大な実験費用を要すること等より、工学的には数値解析によって評価を可能にすることが肝要である。しかしながら、この種の解析は局部座屈をともなうため、大ひずみ領域での弾塑性大変形解析となり非常に困難である。また、理論解が存在しないため、実験結果だけが検証手段となる。

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、細長比や径厚比のような各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を調査、検討を行なった。さらに、この実験結果を比較対象とし、3次元有限要素法を用いた弾塑性大変形解析を行ない、実験結果を再現し得る有効な解析条件を検討した。

2. 水平載荷実験

2.1 供試材および試験体

円形断面鋼製橋脚の耐荷力に大きく影響するパラメータとして、鋼種、細長比、径厚比、軸力比などが考えられる。本研究では、これらのパラメータのなかで、鋼種と軸力比を固定し、細長比と径厚比を変化させた実験を行なった。試験体の形状を図-1に、寸法および試験パラメータを表-1に示す。表-1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。

$$R_t = \frac{R \sigma_{ys}}{t E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (1)$$

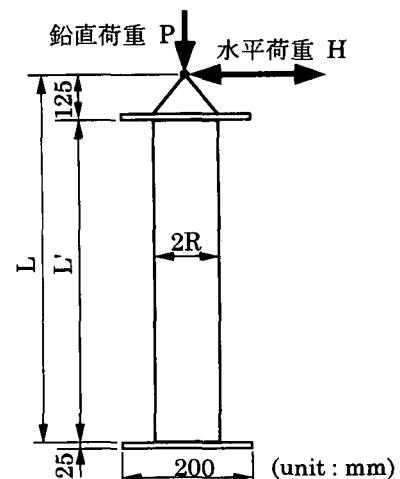


図-1 試験体の形状と載荷方法

表-1 試験体寸法および試験パラメータ

試験体 No.	鋼管高さ	高さ	半径	板厚	細長比		径厚比		軸力
	L'(mm)	L(mm)	R(mm)	t(mm)	L/R	$\bar{\lambda}$	R/t	R _t	P/P _y
L10-t22-M L10-t22-C	1000	1125	49.0	2.2	20.4	0.67	22.3	0.038	0.2
L5-t22-M L5-t22-C	500	625	49.0	2.2	10.2	0.37	22.3	0.038	0.2
L3-t22-M L3-t22-C	300	425	49.0	2.2	6.1	0.25	22.3	0.038	0.2
L3-t11-M L3-t11-C	300	425	48.5	1.1	6.2	0.25	44.0	0.076	0.2

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ_{ys} は降伏応力、 R は平均半径、 L は部材長、 t は板厚、 r は断面2次半径、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比である。

試験体は全て、厚さ4.2mmの配管用炭素鋼鋼管(JIS G 3452 SGP 90A)を所定の長さで切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。試験体の上下端部には、試験台および載荷板に固定するための厚さ25mmの鋼板を周溶接により取付けた。試験体の柱としての部材長 L は、下部の鋼板上面から水平荷重作用位置までの距離とした。

水平載荷実験に先立ち、鋼管の材料試験を行なった。材料試験の内容は、降伏応力などの機械的性質を得るための引張試験と、大ひずみ領域までの加工硬化特性を得るための円柱圧縮試験である。引張試験は、鋼管から製作したJIS 6号試験片を用いて行ない、また、円柱圧縮試験は直径3.5mm、高さ5.25mmの試験片を用いて、ひずみ速度一定の条件で行なった。ひずみ速度は、 $10^{-4}, 10^{-2}, 10^0, 10^1$ 1/sの4条件とした。

2.2 実験装置および載荷方法

実験装置の概要を図-2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10tonの油圧サーボ式試験機から構成されている。水平方向荷重の載荷点は、試験体に生じる水平および軸方向の変位を拘束することなく、荷重の方向ができるだけ水平を維持するような構造とした。また、水平方向荷重と軸方向荷重の接続点にはボールジョイントを使用し、試験体上端部の回転が拘束されるのを防いでいる。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ており、試験体に水平変位や回転が生じても常に鉛直下向きに作用するようになっている。

実験における測定は、水平変位、水平方向および軸方向荷重、ひずみについて行なった。水平変位の測定にはひずみゲージ式変位計を用い、水平荷重載荷位置と試験体上端部において、試験体基部との相対変位を測定した。また、水平方向および軸方向の荷重は、それぞれ容量5tonおよび10tonのロードセルを用いて計測した。さらに、局部座屈の発生が予想される試験体下端部(下端から20mmと40mmの位置)では、容量10%の大ひずみゲージを用いてひずみを計測した。これらの測定値はデジタルデータレコーダに

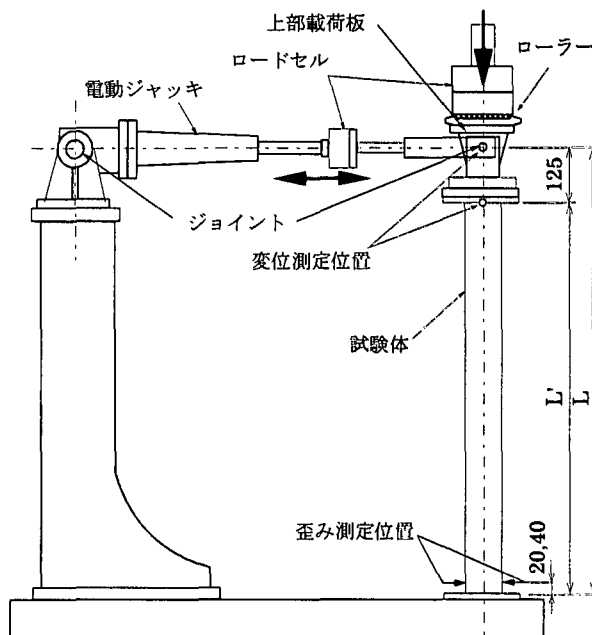


図-2 実験装置の概要

表-2 実験条件

試験体 No.	載荷形態	負荷速度 $\dot{\delta}$ (mm/s)	降伏荷重 H_y (kgf)	降伏変位 δ_y (mm)
L10-t22-M L10-t22-C	-M 単調載荷	0.59	257.9	7.16
L5-t22-M L5-t22-C		0.58	464.2	2.21
L3-t22-M L3-t22-C	-C 繰返し載荷	0.25	682.7	1.02
L3-t11-M L3-t11-C		0.26	333.6	1.03

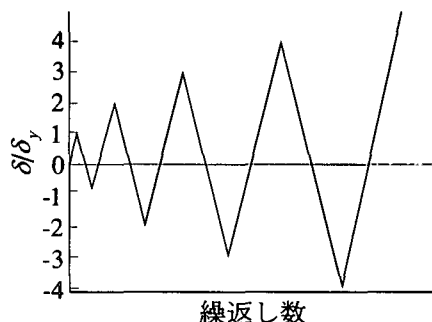


図-3 繰返し載荷方法

連続記録した。

実験は、水平荷重載荷点での水平変位制御で行ない、変位速度は一定とした。載荷形態は、一方向の単調載荷と変動変位の繰返し載荷の2通りとした。また、軸力は降伏軸荷重 P_y の20%を定常的に作用させた。表-2に実験条件をまとめて示す。

繰返し載荷の方法は、図-3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 は次式で定義した。

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

$$\delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI} \dots\dots\dots (4)$$

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 は断面積、 I は断面2次モーメントである。

2.3 実験結果および考察

(1) 材料試験結果

引張試験の結果を表-3に示す。また、円柱圧縮試験から得られた真応力-真ひずみ関係を図-4に示す。この図を見ると、ひずみ速度が 10^2 1/s程度までは流動応力の差は小さい。しかし、 10^0 1/sを越えると流動応力のひずみ速度依存性が顕著になり、特にひずみが大きな領域では、ひずみ速度と流動応力の大小関係が逆転している。地震動による鋼製橋脚の終局状態では、このような条件下になることも十分予想される。したがって、鋼製橋脚の動的挙動を検討する場合には、流動応力のひずみ速度依存性を考慮する必要があるものと考えられる。

(2) 単調載荷実験

降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化した水平荷重-水平変位曲線を図-5に示す。同図a)は、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響を比較したものであるが、細長比が大きくなると変形能が低下することがわかる。特に、 $\bar{\lambda}=0.67$ の場合、降伏後すぐに最大荷重に達しており、最大荷重点での変位が $2.8\delta_y$ と小さい。これは、 $P-\Delta$ 効果によるものと考えられる。また、図-5のb)は、径厚比パラメータ R_t の影響を比較したものであるが、径厚比が大きくなることにより変形能が低下することがわかる。

(3) 繰返し載荷実験

繰返し載荷実験では、すべての試験体において基部から20~30mm高さの位置に、図-6に示すような全周にわたる凸状の局部座屈が見られた。座屈位置および座屈形態をまとめて表-4に示す。この局部座屈は次のような過程で発生したと推測される。最初の局部座屈は、最大荷重時に圧縮側で発生する。そして、次に逆方向に曲げられたときには、最初は引張側であった部分が圧縮を受け新たな局部座屈が発生する。このような曲げが繰返されていく間に、座屈波形が一つにつながり、全周にわたる凸状の局部座屈が発生したと考えられる。

表-3 供試材の引張試験結果

鋼種	降伏応力, σ_{ys} kgf/mm ²	引張強さ, σ_u kgf/mm ²	伸び %
SGP 90A	21.8	36.1	37.1

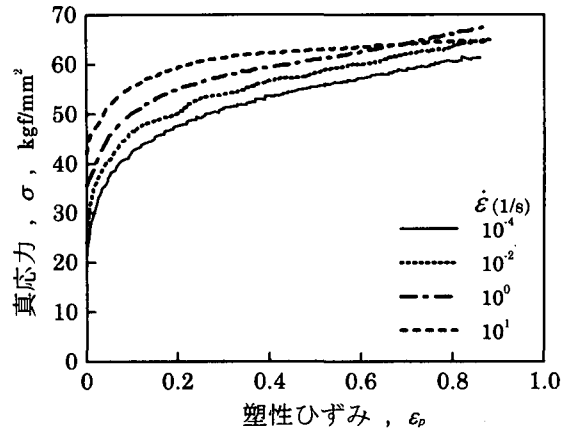
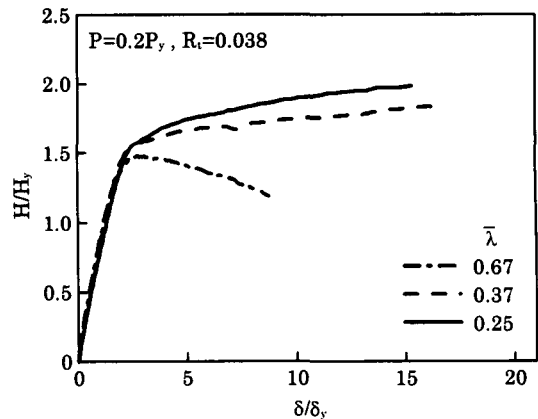
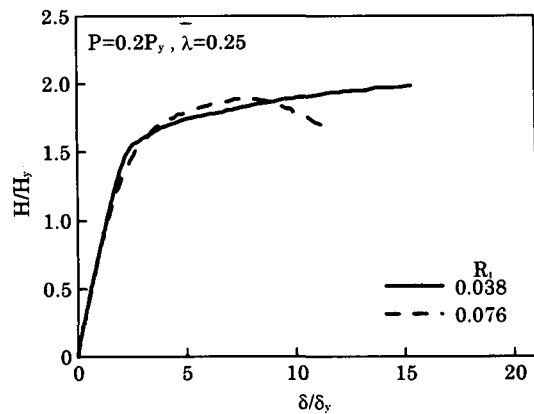


図-4 供試材の真応力-真ひずみ曲線



a) 細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響



b) 径厚比パラメータ R_t の影響

図-5 水平荷重-水平変位曲線(単調載荷)

この局部座屈の成長過程を試験体 L3-t11-C を例に取り、図-7 に示す軸方向ひずみの変化から見てみると、ひずみの振幅は水平変位の振幅と対応しながら、その振幅の中心は残留ひずみ分だけ圧縮側へ遷移して行く。しかし、局部座屈が大きくなるとその頂点近傍は、外側に凸となるように曲げられるため、ひずみは急速に引張側へと遷移しており、この時のひずみはひずみゲージの測定限界である0.1を越えている。また、ひずみ速度は大きく変動しており、測定範囲内で $1 \times 10^{-3} 1/s$ に達している。この試験体では、弾性域における基部のひずみ速度がほぼ $1 \times 10^{-4} 1/s$ となるように変位速度一定(0.26mm/s)で荷重しており、ひずみ速度が局所的に10倍以上変化したことになる。

各試験体の水平荷重-水平変位履歴曲線を図-8 に示す。同図において水平荷重と水平変位は、それぞれ降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化してある。また、水平荷重-水平変位履歴曲線の最大変位点を結んだ包絡線を図-9 に示す。図-9 より、細長比および径厚比の拡大にともない、最大荷重および最大荷重点での変位が低下することがわかる。しかし、最大荷重後の強度劣化におよぼす細長比および径厚比の影響は小さい。また、この包絡線を単調荷重における荷重-変位曲線(図-5)と比較すると、繰返し荷重の最大荷重は単調荷重に比べ大きく増加し、最大荷重における変位は減少している。この原因は素材の塑性繰返し硬化によるものと考えられる。

ところで、図-8 a) の履歴曲線を見ると、3ループ目以降では各ループの最大荷重点が最大変位点と一致していない。このような場合、履歴曲線から得られる最大荷重と、包絡線から得られる最大荷重は異なったものとなるので注意が必要である。

水平変位と各サイクルのループの面積から求めたエネルギー吸収量の関係を図-10 に示す。同図によれば、細長比が大きいほどエネルギー吸収量が大きくなっている。これは、同じ曲げモーメントを与えた場合、細長比が大きいほど軸方向の応力勾配が緩やかであることから、その結果塑性化する範囲が大きくなるためと考えられる。

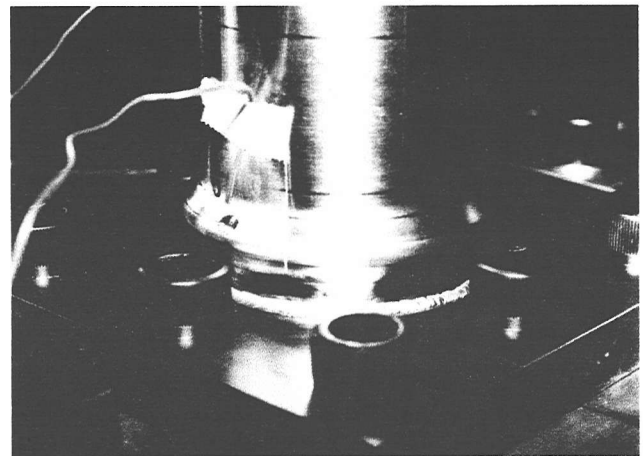


図-6 基部の局部座屈の状況(試験体 L3-t11-C)

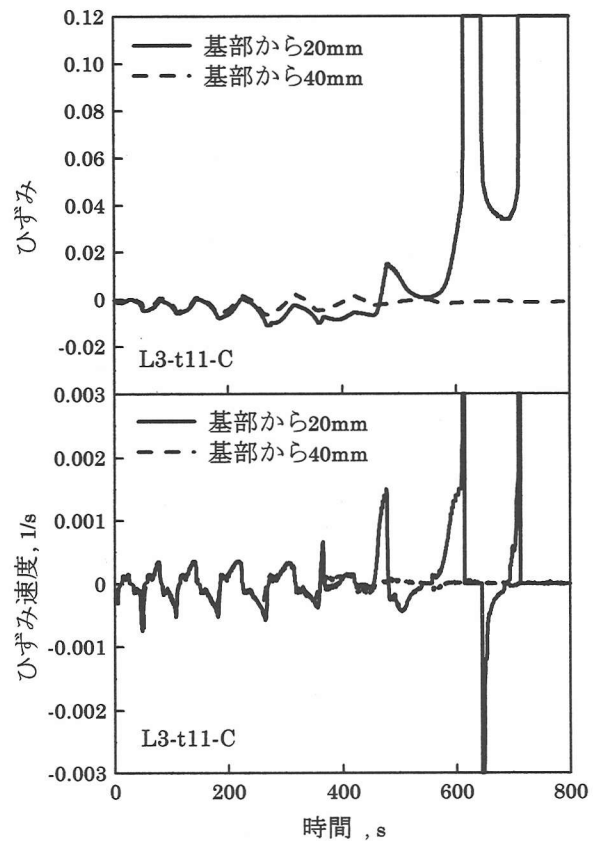
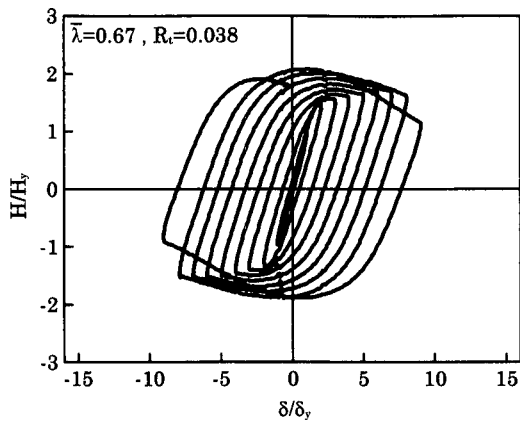


図-7 軸方向のひずみおよびひずみ速度の変化(繰返し荷重)

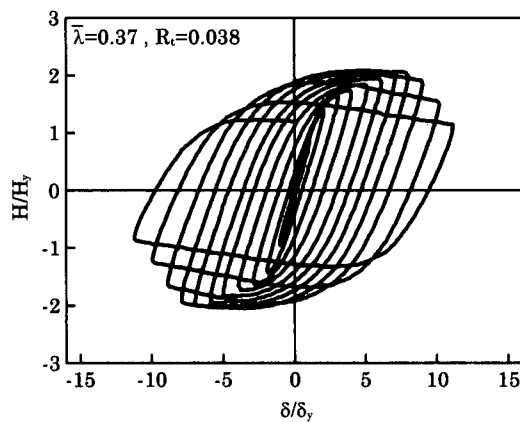
表-4 座屈位置および座屈形態

試験体 No.	荷重形態	座屈位置 (mm)	座屈形態	最大荷重 H_{max}/H_y	最大変位 δ_{max}/δ_y
L10-t22-M	単調荷重	—	—	1.48	2.80
L5-t22-M		25	EFB	—	—
L3-t22-M		30	EFB	—	—
L3-t11-M		20	EFB	1.90	7.74
L10-t22-C	繰返し荷重	30	EFB	2.08	1.10
L5-t22-C		25	EFB	2.01	7.01
L3-t22-C		25~30	EFB	2.31	9.00
L3-t11-C		20	EFB	1.90	4.98

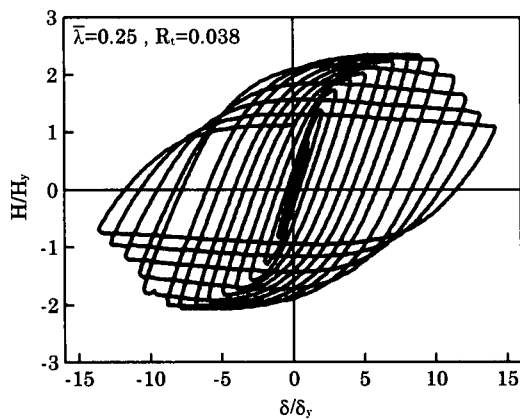
*) EFB:Elephant Foot Bulge, 最大変位は最大荷重での変位



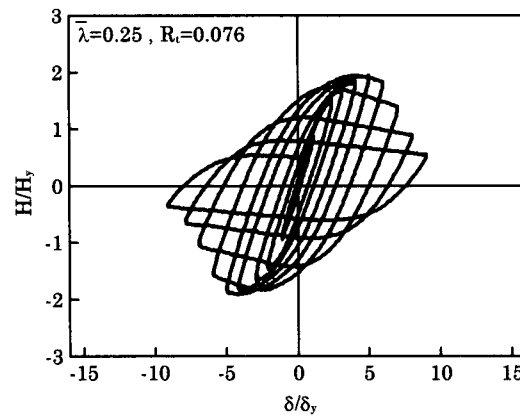
a) L10-t22-C



b) L5-t22-C

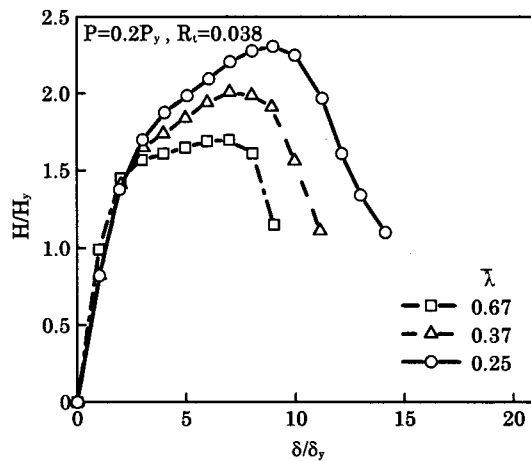


c) L3-t22-C

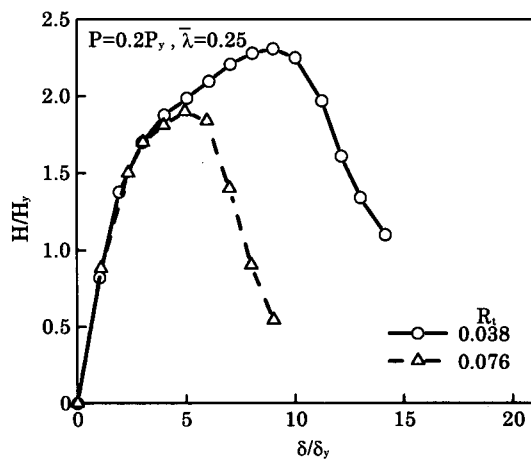


d) L3-t11-C

図-8 水平荷重-水平変位履歴曲線(繰返し載荷)



a) 細長比パラメータの影響



b) 径厚比パラメータの影響

図-9 最大荷重におよぼす各パラメータの影響

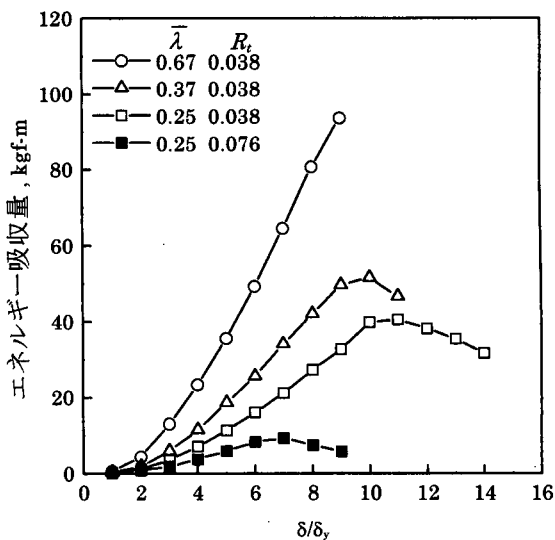


図-10 エネルギー吸収量におよぼす各パラメータの影響

3. 弾塑性解析

3.1 解析方法および解析条件

本研究の解析対象は、図-1に示した片持ち鋼管柱であり、前項の水平載荷実験の結果を比較対象とした。

解析は、汎用の構造解析プログラムMARC(K6.2)を用い、文献(8)を参考にして行なった。モデルの対称性から鋼管の1/2について、下端固定、上端自由として行なった。上端には剛体板を介して鉛直下向きの一定荷重 P を定常的に作用させた状態で、水平変位 δ を実験と同様に、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り返し与えた。ただし、降伏水平変位 δ_y は実験と同じ(4)式で定義する。

材料定数は、引張試験および円柱圧縮試験で得られたひずみ速度 10^{-4} 1/sにおける真応力-真ひずみ曲線を、(5)式に示す直線と近似式で表現し、相当応力-相当ひずみ関係として用いた。用いた材料定数および近似係数をまとめて表-5に示す。

$$\begin{aligned} \sigma &\leq \sigma_{ys} \\ \sigma &= E\varepsilon \\ \sigma &> \sigma_{ys} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_{ys} + A_1 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\bar{\varepsilon}_p}{t_1}\right) \right\} + A_2 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\bar{\varepsilon}_p}{t_2}\right) \right\}$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみである。

解析に使用した要素は、面外せん断ひずみが考慮された4節点厚肉シェル要素である。この要素では、板厚方向層分割法を用いることにより、シェル断面の各層毎に降伏が考慮できる。本解析では層分割を11とした。

降伏条件には von Mises の条件を用い、Update Lagrangian 手法により幾何学的非線形性を考慮した。また、硬化則は比較のために、等方硬化と移動硬化の両方について検討した。要素分割は解の収束性を検討した結果、図-11に示すように鋼管の下端から100mmの部分を細かく分割し(板厚1.1mmのモデルで60分割、板厚2.2mmのモデルで40分割)、100mmから上の部分は粗くした。また、周方向の分割数は12とした。なお、解析には初期不正および残留応力は考慮していない。

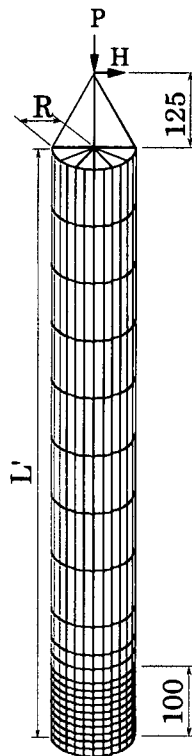


図-11 解析モデル

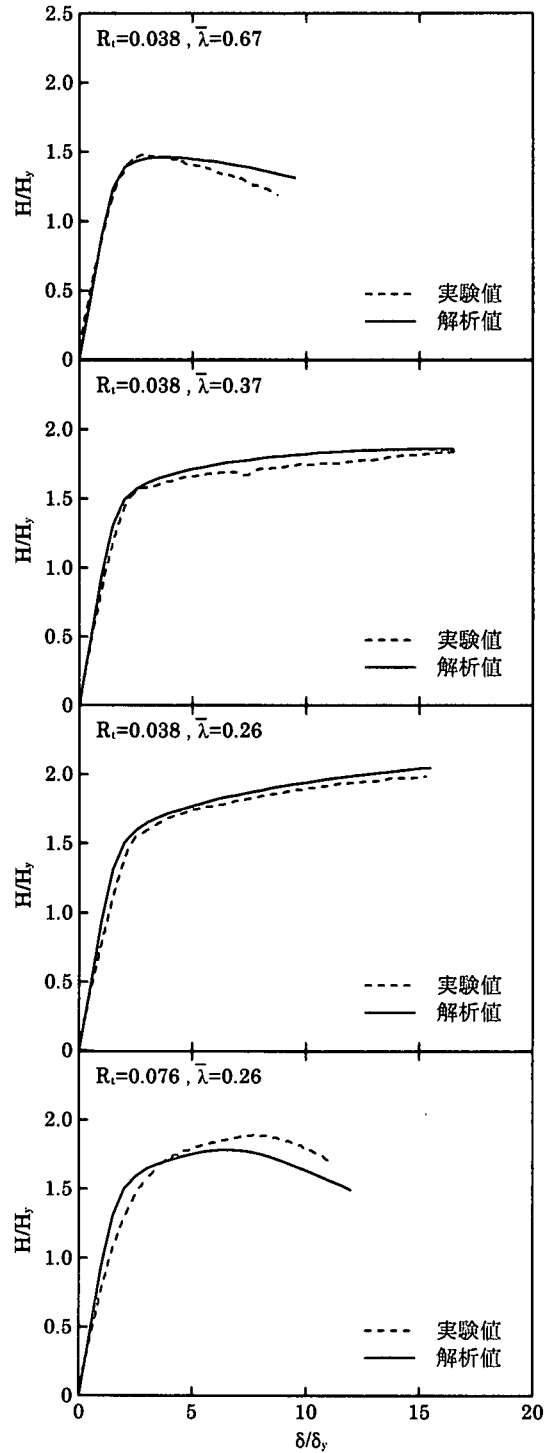


図-12 水平荷重-水平変位曲線の比較(単調載荷)

表-5 解析に用いた材料定数および近似係数

E kgf/mm ²	ν	σ_{ys} kgf/mm ²	A_1	t_1	A_2	t_2
21000	0.3	21.84	28.218	0.5218	16.4280	0.0301

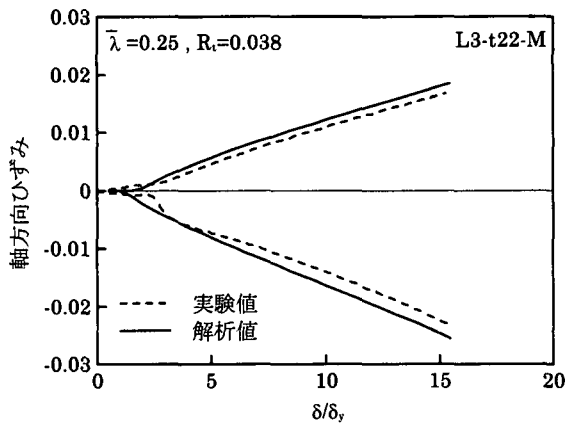


図-13 軸方向ひずみの比較(単調載荷)

3.2 解析結果および考察

(1) 単調載荷

図-12は、単調載荷における水平荷重-水平変位曲線の解析結果を実験結果と比較して示している。板厚が2.2mm($R_t=0.038$)の場合は、解析値は実験値と非常によく一致している。また、板厚が1.1mm($R_t=0.076$)の場合は、弾性域の勾配が解析と実験で若干異なるものの、最大荷重値や最大荷重点以降の荷重低下の挙動などの全体の傾向はほぼ一致している。

水平載荷実験では、試験体下端から20mmと40mm高さの位置で軸方向ひずみが測定されている。一例として、試験体L3-t22-Mの20mm位置における軸方向ひずみの解析値を実験値と比較して図-13に示す。圧縮側で解析値が実験値よりもやや高めの値を示しているものの、両者はよく一致している。

(2) 繰返し載荷

図-14は、試験体L3-t22-Mの水平荷重-水平変位履歴曲線の解析結果を実験結果と比較して示している。等方硬化則を用いた場合は、実験値に比較して荷重が大幅に大きくなっており、履歴ループの形も実験値とかなり異なっている。一方、移動硬化則を用いた場合は、荷重が実験値に比較してかなり小さく、また、実験のような除荷時の剛性の低下も見られない。

これらの原因の一つとして、使用している硬化則の適用性が考えられる。等方硬化則では、降伏曲面の移動が行なわれず拡大するだけであるため、繰返し負荷に対する加工硬化を大きく見積もる傾向にある。一方、移動硬化則では、降伏曲面の中心が移動するだけで拡大は考慮されないため、加工硬化を表現できず荷重を過小評価してしまう。したがって、降伏曲面の中心が移動すると同時に、等方的な拡大や縮小も可能な硬化モデルを用いることにより、実験結果をよりよく再現できるものと判断される。

実際、後藤ら⁹⁾は同様な検討を行ない、降伏曲面が縮小可能な混合硬化モデルを提示し、鋼製橋脚の解析に適用することでその有効性を示している。

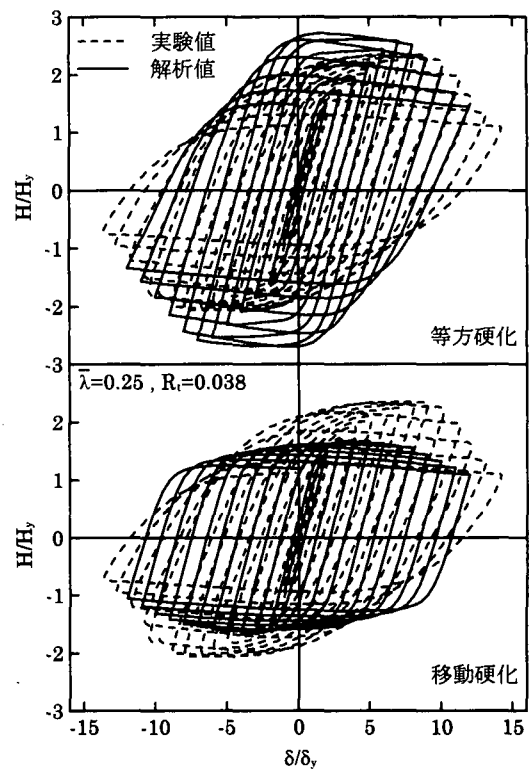


図-14 履歴曲線におよぼす硬化則の影響(繰返し載荷)

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、鋼管試験体を用いて単調および繰返し水平載荷実験を行ない、細長比や径厚比のような各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調査、検討を行なった。さらに、この実験結果を比較対象とした弾塑性大変形解析を行ない、実験結果を再現し得る有効な解析方法を検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 鋼管に繰返し荷重が作用すると、基部から20~30mm高さの位置に全周にわたる凸状の局部座屈が発生する。この時、座屈部に生じるひずみは10%を越えており、また、ひずみ速度は10倍以上の幅で変動する。
- 2) 繰返し載荷実験では、細長比が小さいほど最大耐荷力は大きく、細長比が大きいほど各サイクルのエネルギー吸収量は大きくなる。また、径厚比に関しては、それが小さいほど最大耐荷力とエネルギー吸収量は大きい。
- 3) 単調載荷と繰返し載荷における荷重-変位曲線の比較では、繰返し載荷の最大荷重が単調載荷に比べ大きく増加し、また、最大荷重における変位は減少する。
- 4) 単調載荷における解析結果は、水平荷重-水平変位曲線および座屈部のひずみとも実験値とよく一致する。
- 5) 繰返し載荷における水平荷重-変位履歴曲線の解析において、等方硬化則を用いた場合は荷重を過大に、移動硬化則を用いた場合は荷重を過小に評価する傾向にある。実験結果を再現するためには、混合硬化のような他の硬化モデルを使う必要がある。

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荷力実験,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.
- 8)松浦真一,中村秀治,小木曾誠太郎,大坪英臣:高速増殖炉容器の耐震座屈設計法に関する研究(第5報,座屈解析法の適用性評価),日本機械学会論文集(A偏),61巻585号(1995-5),pp138-146.
- 9)王慶雲,後藤芳顯,高橋宣男,小畑誠:繰返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析について,第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集,(1996-1),pp369-376.

CYCLIC LATERAL LOADING TESTS AND FEM ANALYSIS OF STEEL PIPE PIER MODELS

Hideo KOEDA, Akihiko ATSUMI, Masashi SATO and Norimitsu KISHI

In order to study the effect of a ratio of length to radius (L/R) and radius to thickness (R/t) on the ultimate loading capacity and deformability of steel pipe piers, eight steel pipe column models were examined by monotonic and cyclic lateral loading under a constant compressive axial load. And results of these experiments were compared with ones obtained from elasto-plastic large displacement FEM analysis. Results obtained from this study were as follows; 1) the smaller L/R and R/t are, the bigger the ultimate loading capacity of steel pipe piers is; 2) the energy absorption capacity of that has a tendency to increase with increasing L/R and/or decreasing R/t ; and 3) in the elasto-plastic large displacement analysis of steel pipe columns, the numerical analyses using isotropic hardening rule and kinematic hardening rule models tend to overestimate and underestimate strength of that, respectively.