

I-7

鋼管柱模型の繰り返し水平載荷実験と弾塑性解析

室蘭工業大学	フェロー	松岡健一
(株)日本製鋼所	正員	小枝日出夫
室蘭工業大学	正員	小室雅人
室蘭工業大学	○学生員	梶山義晴

1. はじめに

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震では、比較的靱性が高いと評価されていた鋼製橋脚にも多大な被害が生じた。これらの損傷の多くは、上部工の重量に起因する軸圧縮力と地震力による水平方向の繰り返し荷重によるものと考えられている。このような内陸型大地震に対する鋼製橋脚の耐震性を向上させるために、それらの構造物に対する弾塑性挙動に関する実験的・解析的研究が各研究機関で精力的に行われている^{1)~4)}。実験的研究に関しては、小型あるいは大型橋脚模型を用いた水平単調載荷実験や漸増繰り返し載荷実験が行われ、復元力特性や塑性率等を評価している。しかしながら、各研究機関で行われている鋼製橋脚の実験は多くが矩形断面鋼管橋脚模型であり、矩形断面に比べて単位重量当たりの強度が大きく力学的に有利であると考えられている円形断面鋼管橋脚模型に関する実験は比較的少ないようである。従って、合理的な鋼製橋脚の設計手法を確立するためには円形断面鋼管柱における細長比や径厚比の影響等を含め、その耐荷力や変形性能を定量的に把握することは工学的に重要であるものと判断される。一方、これら鋼管橋脚の耐震挙動特性を把握するためには、大規模な実験装置や多大な費用が必要となることから、耐震設計に反映可能な実験データの収集は容易ではない。従って、実験を補間する意味からも実現性を精度良く再現可能な数値解析手法の確立が望まれている。

本研究では、このような観点より、円形断面鋼管柱の耐震性評価のための基礎的資料を得ることを目的として、鋼管柱模型に対する単調および繰り返し水平載荷実験を行うとともに、単調載荷に関する数値解析も行い、実験結果と比較することにより解析手法の適用性を検討した。ここでは、特に径厚比および鋼種の違いが耐荷力や変形性能におよぼす影響に関して実験的に検討を行った。なお、数値解析には構造解析用汎用コード ABAQUS⁵⁾を用いた。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に試験体の寸法および各パラメータを、図-1には本実験に用いた鋼管柱模型の概形図を示す。なお、表-1における細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、径厚比パラメータ R_t は次式によって定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}}, \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)}$$

ここで、 L 、 r 、 t 、 σ_{ys} 、 E および ν は、それぞれ荷重点高さ、半径、断面2次半径、降伏応力、弾性係数およびポアソン比である。

用いた鋼管は、電気抵抗溶接鋼管 (JIS G 3444 STK400-E-G:一般構造用炭素鋼管) および鍛接鋼管 (JIS G 3452 SGP-B:配管用炭素鋼管) の2種類である。試験体の名称は、第1項が鋼種 (K: STK400-E-G, P: SGP-B)、第2項が板厚 (10 ~ 25 mm)、第3項が載荷方法 (-m: 単調載荷, -c: 繰り返し載荷) を示している。試験体の鋼

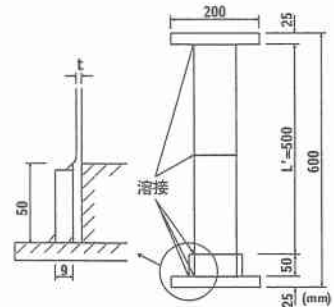


図-1 試験体の概要図

表－１ 試験体寸法および試験体パラメータ

試験体名	荷重点高さ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	半径 R (mm)	板厚 t (mm)	軸力比 P/P_y	降伏 水平荷重 H_y (kN)	細長比		径厚比	
							L/R	$\bar{\lambda}$	R/t	R/t
K-t10-m -c	631.5	500	47.75	1.0	0.08	3.86	13.2	0.514	47.8	0.147
K-t15-m -c			48.00	1.5		6.05	13.2	0.511	32.0	0.099
K-t20-m -c			48.25	2.0		8.26	13.1	0.508	24.1	0.074
K-t22-m -c			48.35	2.2		9.16	13.1	0.507	22.0	0.068
K-t25-m -c			48.50	2.5		10.5	13.0	0.506	19.4	0.060
P-t15-m -c			48.0	1.5		3.28	13.0	0.376	32.5	0.056

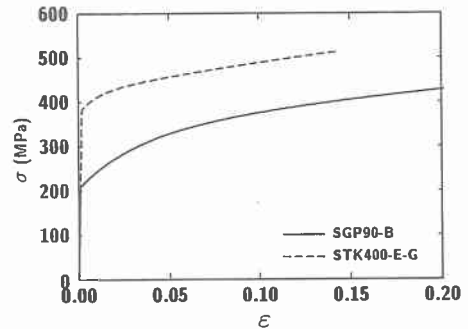
表－２ 引張試験結果

鋼種	降伏応力 σ_{ys} (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
STK400-E-G	384	516	206	0.3
SGP-B	210	425		

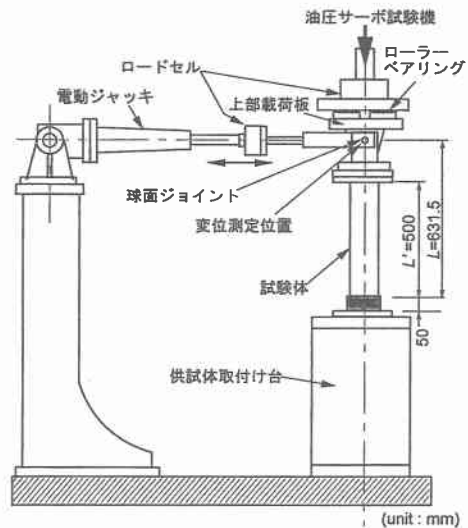
管部は、それぞれの鋼管を所定の長さに切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。試験体の上部には、軸力載荷用の鋼板を周溶接により取り付けられている。また、基部においては剛体変形をできるだけ小さくするために、厚さ 9 mm の鋼製リングをはめ込み 3ヶ所を周溶接し固定している（図－１参照）。また、使用鋼管の機械的性質を求めるために、それぞれの鋼管柱から JIS 6 号試験片を製作し引張試験を行った。表－２に各鋼種における引張試験結果を示す。また、図－２に真応力－真ひずみ曲線を示す。図から明らかなように、これらの鋼管はいずれも冷間加工されたもので降伏棚のない状態となっている。

2.2 実験装置

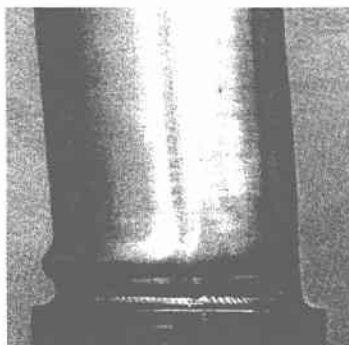
図－３に実験装置の概要を示す。本実験では、鋼管柱模型の径厚比および鋼種の違いに着目するため、軸方向荷重は 1.2 tf で一定としている。試験体上部には、橋梁上部工に相当する軸方向荷重を容量 100 kN の油圧サーボ式試験機により与えている。水平方向変位に関しては、ストローク 200 mm、容量 19.6 kN の電動式ジャッキにより載荷速度 0.39 mm/sec で一定として変位制御方式で与えている。水平方向荷重の載荷点は、試験体に生じる水平および軸方向の変位を拘束することなく、荷重の方向が極力水平を維持するような構造とした。実験における測定は、荷重載荷点における水平荷重、鉛直荷重および水平変位と試験体における各位置での歪である。



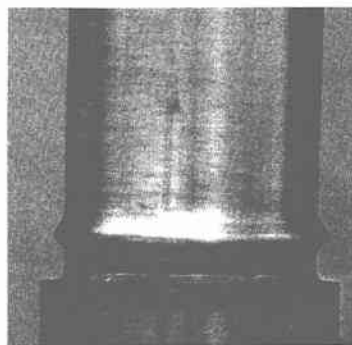
図－２ 真応力－真ひずみ曲線



図－３ 実験装置の概要



(a) K-t20-m (単調載荷)



(b) K-t20-c (繰り返し載荷)

図-4 実験終了後の局部座屈形態

これらの測定値は 16 bit 分解能を有するデジタルレコーダに連続記録している。実験は、1) 水平方向変位を一方方向に与える単調載荷実験、2) 降伏水平変位 δ_y に基づいた漸増繰り返し載荷実験である。なお、降伏水平変位 δ_y は、単調載荷実験結果を用いて弾性梁理論より得られる降伏水平荷重 H_y に相当する変位量である。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

表-3 に各試験体における座屈形態および座屈高さを整理して示している。また、図-4 には試験体 K-t20-m, K-t20-c を例に上げ実験終了後の局部座屈状況を示している。図より、載荷方法に限らず全ての試験体の基部において EFB (Elephant Foot Bulge) 型の局部座屈が発生した。また、表より最大荷重は径厚比が小さいほど増大し座屈高さも若干上昇していることがわかる。なお、試験体 P-t15-m, -c においては、降伏応力が小さいため、最大荷重、座屈高さともに小さい値を示している。

3.2 単調載荷実験

図-5 に、荷重載荷点における水平荷重-変位曲線を示す。縦軸には無次元水平荷重 H/H_y を、横軸には無次元水平変位を δ/δ_y 取り整理している。なお、無次元化は剛体変形を除去する形で行った。図より、無次元最大荷重に着目すると同一鋼種 STK400-E-G 試験体 (K-) において径厚比の変化による影響は小

表-3 座屈形態および最大水平荷重

試験体名	座屈形態	座屈高さ (mm)	最大荷重	
			H_m (mm)	H_m/H_y
K-t10-m -c	EFB	12	5.90	1.53
		18	5.74	1.48
K-t15-m -c		18	9.02	1.49
		16	8.75	1.45
K-t20-m -c		15	12.65	1.53
		22	12.42	1.50
K-t22-m -c		17	14.22	1.55
		22	13.95	1.52
K-t25-m -c		15	16.36	1.56
		22	15.71	1.50
P-t15-m -c		17	5.87	1.79
		17	6.46	1.97

EFB : Elephant Foot Bulge

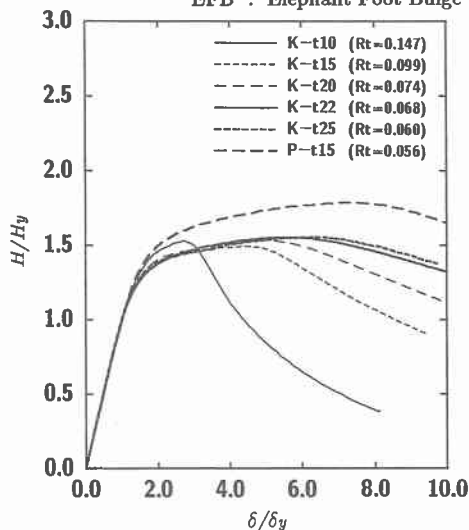
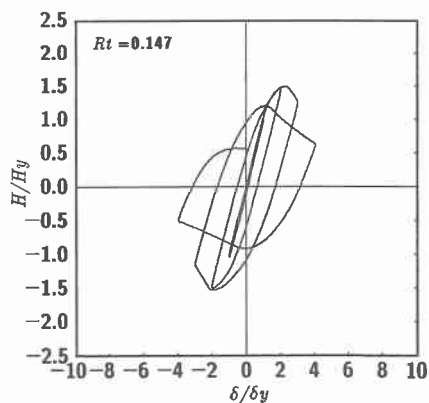
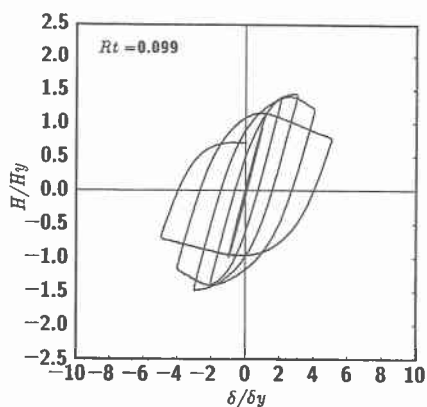


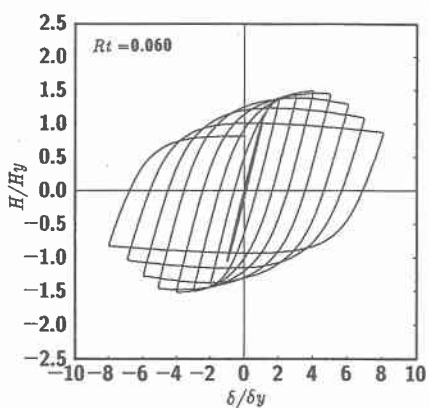
図-5 荷重-変位曲線 (単調載荷)



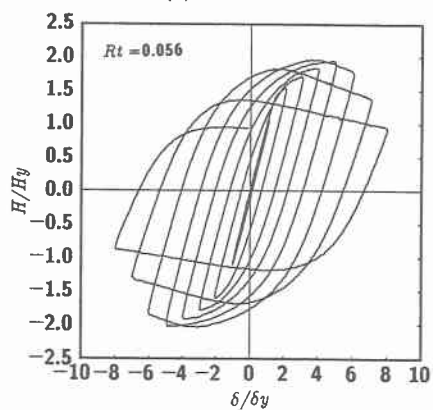
(a) K-t10-c



(b) K-t15-c



(c) K-t25-c



(d) P-t15-c

図-6 荷重-変位曲線 (繰返し載荷)

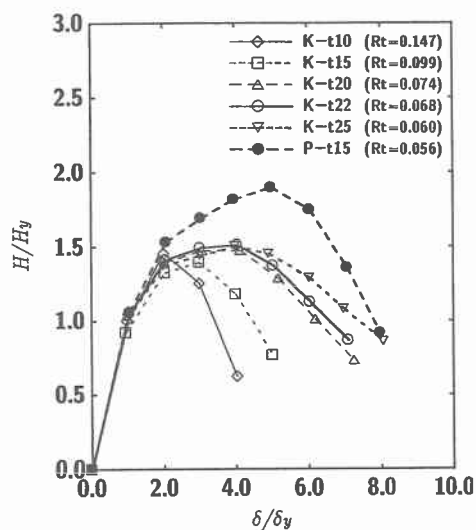


図-7 荷重-変位曲線の包絡線

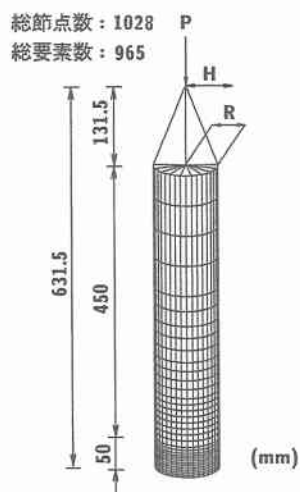


図-8 要素分割図

さいものと考えられる。また、最大荷重後の挙動として、径厚比が大きいほど耐力低下が著しいことがわかる。試験体 P-t15-m においては、低降伏点鋼を用いているにも関わらず、ピーク後の挙動に大きな耐力の低下は見られない。

3.3. 繰り返し載荷実験

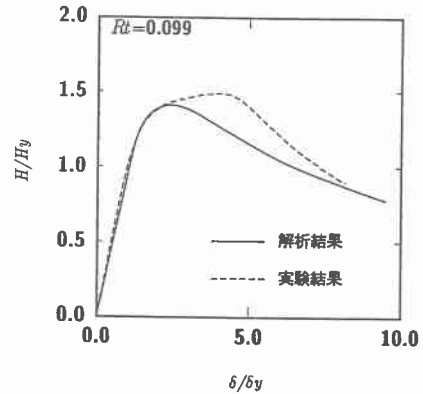
図-6 に各試験体の荷重-変位曲線を、図-7 に全ての試験体における各サイクルの最大変位点を結んだ包絡線をそれぞれ示す。図-6 は、試験体 K-t10-c、K-t15-c、K-t20-c および P-t15-c における結果である。図 (a), (b), (c) より単調載荷と同様に最大荷重において径厚比の変化による大きな差は見られない。最大荷重後の挙動に関しては、径厚比が大きいほど軟化挙動が顕著に表れている。また、低降伏点鋼を用いている P-t15-c に関しては単調載荷と同様に無次元最大荷重値が高降伏点鋼を用いる場合より大きくなっている。

4. 数値解析仮定

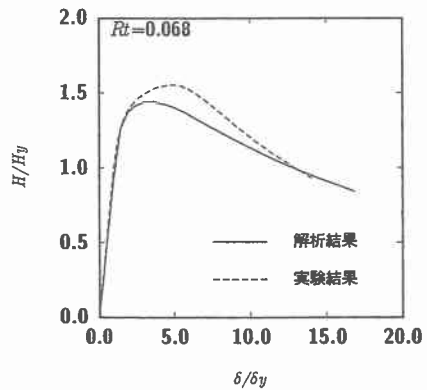
ここでは、前述の鋼管柱模型の単調載荷実験に着目し、構造解析汎用プログラム ABAQUS を用いた数値解析結果との比較を試みた。解析対象は、鋼管柱模型から上下鋼板および溶接部を除いた部分である。なお、対称性を考慮して鋼管の 1/2 のみモデル化している。要素分割は解の収束性を考慮し、周方向の分割数を 18 とし、高さ方向の分割に関しては基部より 2 mm ピッチで高さ 50 mm まで 25 分割し、その上部は、徐々に要素の大きさを大きくしている。図-8 に要素の分割状況を示す。

数値解析に用いた要素は 4 節点および 3 節点厚肉シェル要素 (S4R, S3R) であり、板厚方向の積分点は 11 としている。解析は底部を完全固定とし、切断部においては連続性を考慮した境界条件としている。なお、実験状況を考慮し頂部に軸力および水平変位は変位制御で与えることとした。

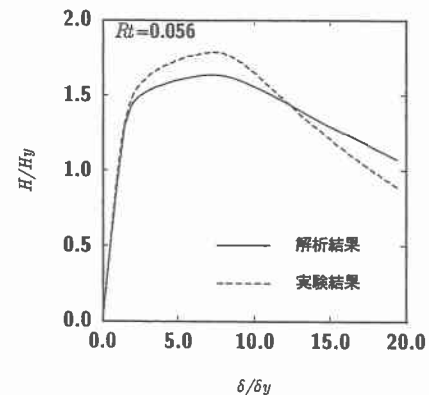
材料構成則に関しては冷間加工される材料であることより弾塑性状態における除荷時の弾性域は熱間加工された場合に比して縮小されているものと考えられる。しかしながら、その程度の推定が困難であることにより、これを考慮せず等方便化則を用いて多直線近似させている。なお、初期応力および初期不整は考慮していない。



(a) K-t15-m



(b) K-t22-m



(c) P-t15-m

図-9 実験結果と解析結果の比較

5. 数値解析結果

図－9 は、単調載荷実験における荷重－変位曲線に関して実験結果と解析結果を比較したものである。図－5 と同様に、縦軸には無次元水平荷重 H/H_y を、横軸には無次元水平変位量 δ/δ_y を取り整理している。また、図は試験体 K-t15-m、K-t22-m および P-t15-m に関する結果である。図より、いずれの試験体においても、解析結果は実験結果の降伏荷重 H_y 付近までは極めて良く一致していることがわかる。しかしながら、降伏荷重以降ではいずれの試験体においても解析結果が実験結果よりも過小評価となっている。また、低降伏点鋼（試験体 P-t15-m）の場合には、最大荷重時の変形量は実験結果と解析結果で概ね一致しているが、高降伏点鋼（試験体 K-t15-m、-t22-m）の場合には解析結果は実験結果よりも小さな評価となっている。しかしながら、いずれの試験体においても最大荷重値における誤差は、概ね 7 % 程度である。なお、同一鋼種で径厚比の異なる試験体（図－9 a, b 参照）に着目すると、径厚比パラメータが小さい程、最大荷重発生時の水平変位量も小さくなる傾向があることがわかる。

6. まとめ

本研究では、円形断面鋼管柱の耐震性評価のための基礎的資料を得ることを目的として、鋼管柱模型に対する単調および繰り返し水平載荷実験を行い、径厚比および鋼種の違いが耐力や変形性能におよぼす影響に関して実験的に検討を行った。また、併せて数値解析も行い単調載荷実験との比較により解析手法の妥当性に関する検討も行った。本研究で得られた結果を整理すると、

- 1) 単調および繰り返し載荷実験より、無次元最大荷重値への径厚比の影響は小さいことが明らかになった。
- 2) また、低降伏点鋼の試験体は、高降伏点鋼の試験体と比較して無次元最大荷重が大きくなることが明らかになった。
- 3) 数値解析結果より、実験結果を適切に評価再現することができなかった。これは、鋼材の製造過程における加工硬化の影響によるものと考えられる。

参考文献

- 1) 小枝日出夫, 岸 徳光, 佐藤昌志, 小室雅人: 軸力と交番曲げを受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動, 応用力学論文集 Vol.1, pp.549-558, 1998.8
- 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塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.105-114, 1996.3
- 3) 山口栄輝, 日野伸一, 阿部圭吾, 馬場 智, 村山隆之, 吉崎信之: 繰り返し水平荷重を受ける鋼製 R 付箱形断面橋脚柱の有限要素解析, 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.203-208, 1997.
- 4) 太田孝二, 中村聖三, 小林洋一, 中川知和, 水谷慎吾, 野中哲也: 鋼製橋脚の耐震設計に対する構造解析ソフトウェアの適用性, 橋梁と基礎, pp.33-39, 1997.
- 5) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.6, Hibbitt, Kalsson & Sorensen, Inc., 1997.