

### 第3章 一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動

### § 3. 1 序

塑性設計法や耐震設計法を確立するためには、部材および骨組が終局崩壊状態に至るまでの弾塑性挙動を明らかにしておくことが必要である。このような観点から、一定軸力と水平力を受ける部材や骨組の挙動を明らかにするための研究が、局部座屈や横座屈が生じる場合も含めて、数多く行われてきている。しかしながら、これらのほとんどはH形鋼に限定されており、鋼管に対しては機械的性質や圧縮材、接合部に関する研究はなされているものの、柱材の非弾性挙動に関する研究は数少ない。しかし、円形鋼管は柱材として用いられており、円形鋼管柱材の耐力と挙動や、主としてH形鋼に対して検討されてきた柱材の設計式の妥当性を明らかにする必要がある。

したがって、本章の研究目的は、局部座屈現象を支配する径厚比と柱の軸力比をおもな実験変数にとり、一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管片持ち柱の実験を行い、円形鋼管柱の弾塑性性状におよぼす径厚比、軸力比の影響を調べることで、鋼構造の許容応力度設計法<sup>3・1)</sup>および塑性設計<sup>3・2)</sup>で使われている柱材の設計式の妥当性について検討することである。

わが国での鋼構造の設計規準としては、1970年に発行された鋼構造設計規準<sup>3・1)</sup>があるが、鋼管構造の加工・施工に関する具体的な指針を与えるという観点から、1980年に鋼管構造設計施工指針<sup>3・3)</sup>が発行され、1990年には耐震設計の2次設計として使用できる終局耐力設計に関する記述を含めた改訂版<sup>3・4)</sup>が出版されている。

本章に関係する円形鋼管に関係する既往の研究として、文献3・5では種々の製法（電縫管、スパイラル鋼管、U・O鋼管、ロール曲げ鋼管）で製作された鋼管の引張り、圧縮に対する機械的性質を調べ、鋼管は原板に比べ降伏比が著しく大きくなり、塑性加工の影響が大きいことを示している。加藤・青木<sup>3・6), 3・7)</sup>は電縫鋼管の製造過程で受ける冷間曲げ加工によって生じる残留応力の推定を多軸応力状態の影響を考慮して解析的に行い、残留応力は円周方向と管軸方向の両方に存在し、その値は降伏応力の半分以上ある場合もあることを示している。また、その結果をもとに計算した短柱の応力-ひずみ関係を実験結果と比較している。辻ら<sup>3・8), 3・9)</sup>はバウシinger効果を考慮して電縫鋼管の製造過程履歴の解析を行い、残留応力分布、塑性ひずみの影響を検討し、残留応力の大きさは管周方向より管軸方向が大きく、その値は降伏応力の4割～6割であることを示している。

圧縮材に対しては、加藤ら<sup>3・10), 3・11)</sup>は種々の製法で作られた鋼管の短柱圧縮試験を行い、応力上昇率、最大耐力時のひずみの実験式を求めている。鈴木ら<sup>3・12)</sup>は高張力鋼管に対して局部座屈耐力、変形能力を短柱圧縮実験と弾塑性大変形解析を行うことにより検討している。若林・野中ら<sup>3・13)</sup>は電縫鋼管に対して残留応力分布を測定・モデル化し鋼管柱の座屈耐力式を求めている。また短柱圧縮試験よりえられた見かけの応力-ひずみ関係を用いた解析も行ない、見かけの応力-ひずみ関係を用い

れば中心圧縮柱，偏心圧縮柱の実験耐力を精度よく予測できることを示している。青木・福本ら<sup>3.14), 3.15)</sup>，加藤・李<sup>3.16)</sup>も電縫鋼管を対象として，短柱圧縮試験より得られた応力－ひずみ関係を用いて座屈荷重を算定し，解析結果は実験値とよく対応することを示している。また冷間成形鋼管の耐力は圧縮降伏応力を基準にとれば S S R C のカーブ 2 で評価できることを示している。辻・康<sup>3.17)</sup>は管軸，管周方向の 2 軸応力状態を考慮した中心および偏心圧縮柱の座屈解析を行い，耐力と残留応力，パウシグー効果，加工硬化の関係を検討している。

曲げ材あるいは柱材の性状を調べたものとして，加藤・秋山ら<sup>3.18), 3.19)</sup>は電縫鋼管よりなる曲げ材，偏心圧縮柱および軸力と曲げを受ける材の実験および解析を行ない，鋼構造塑性設計規準（案）の耐力式と比較している。また，径厚比を 28～61 まで変化させた曲げ実験を行い，座屈後も含めた挙動解析を行っている<sup>3.20)</sup>。五十嵐・長尾は<sup>3.21)</sup>径厚比 50，98 の電縫鋼管の曲げ実験を行っている。Tomaら<sup>3.22)</sup>はアーク溶接管に対して残留応力，断面形の初期不整，初期たわみを考慮してモーメント曲率関係，長柱の耐力を求め，C R C の柱曲線では危険側となることを示している。Sherman<sup>3.23)</sup>らは，アーク溶接管に対する残留応力を考慮した解析により終局耐力に対するモーメント－軸力相関曲線を求め，A I S C の耐力式は単曲率曲げを受ける場合は解析値とよい対応をしていることを示している。また，径厚比を 6 種類（18～102）変化させて実験を行い，径厚比が 35 でも断面の初期不整のため，等曲げを受ける場合には全塑性モーメントを期待出来ない場合があることを示している<sup>3.24)</sup>。辻ら<sup>3.25) - 3.28)</sup>は一定鉛直荷重の下で両端固定複曲率繰返し曲げを受ける径厚比 25，33 の電縫鋼管柱の実験を軸力比，柱長さを変化して行い，解析結果と比較している。また，単調加力実験を同様な境界条件で行っている<sup>3.29)</sup>。また，変形能力，荷重－変形関係予測に関して加藤<sup>3.30)</sup>，最相<sup>3.31)</sup>は曲げ材，柱材の径厚比と塑性変形能力の関係を解析的にもとめている。越智ら<sup>3.32) - 3.34)</sup>は限界状態設計法の観点から確率・統計論に基づいた部材耐力，塑性変形能力の評価を行っている。また，文献 3.35 では，鋼管柱の荷重－変形関係を 3 本ないし 4 本の直線で近似する半実験式を，Sherman<sup>3.36)</sup>は実験式を示している。

しかしながら，本章で目的とする円形鋼管柱の弾塑性性状におよぼす径厚比，軸力比の影響や，鋼構造の許容応力度設計法および塑性設計で使われている柱材の設計式の妥当性については明らかにされているとはいえ，本章では局部座屈現象を支配する径厚比と柱の軸力比をおもな実験変数にとり，一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管片持ち柱の実験を行い，上述の研究目的に対する検討を行った。

## § 3. 2 実験

### 3. 2. 1 実験計画

円形鋼管柱の弾塑性挙動を規定するのは局部座屈であり，局部座屈発生荷重・座屈後挙動に関係すると考えられる，1) 径厚比，2) 軸力比を主な実験変数にとった。さらに，3) 加力方法，4) 残留応力除去のための熱処理の有無も実験変数に選び，

(1) 径厚比 ( $D/t$ ， $D$ ：鋼管の外径， $t$ ：板厚) : 21, 40, 61, 87

(2) 軸力比  $n$  ( $= P/P_y$ ， $P$ ：一定鉛直荷重， $P_y$ ：柱の降伏荷重) :  
0.07, 0.21,  
0.35  
0.3 (焼きなまし  
試験体)

(3) 加力方法 : 単調加力と繰り返し加力

(4) 熱処理の有無

を実験変数として実験計画をたてている。径厚比および軸力比の値は鋼構造の柱材として実際に使われる範囲のものが選ばれている。

### 3. 2. 2 試験体

試験体は，図3. 1に示すように鉄骨骨組が水平力を受けるときの柱材の反曲点と材端の間を抽象化したもので，一端固定，他端自由の境界条件となる片持ち柱であり，一定鉛直荷重と変動水平力を受ける。

試験体に用いた円形鋼管は，公称で外径 $D$ が139.8mm，板厚 $t$ が6.6mm (径厚比 $D/t = 21$ )，3.5mm ( $D/t = 40$ )，2.3mm ( $D/t = 61$ )，1.6mm ( $D/t = 87$ )の4種類である。径厚比が21と40の鋼管は電縫鋼管 (STK41)である。径厚比が61と87の鋼管は，径厚比の大きい円形鋼管は市販されてないため，鋼板 (SS41)を円形に曲げ加工した後，溶接により製作した。焼きなましを行わない試験体を基準としたが，残留応力除去のための焼きなましを行った試験体4体を加えて計28体の実験を行った。なお，焼きなましの条件は，3時間で600°Cまで熱し，その温度を1時間保持した後，400°Cまで温度を落とし，放冷した。

図3. 2に試験体の形状・寸法を示す。試験体の上端部には，試験体を球座に取り付けるため，下端部には，試験体を加力装置に固定するために鋼板を溶接している。固定端と球座の中心までの距離 $l$ は75cmである。試験体の設置は，鋼管シーム部が処女載荷時に曲げ引張り側になる位置にセットした。

試験体の名前，実験条件および機械的性質を表3. 1，表3. 2に示す。試験体の名前は実験条件を表し，A-BCDで示す。Aはシリーズの名前，BCは柱の断面の

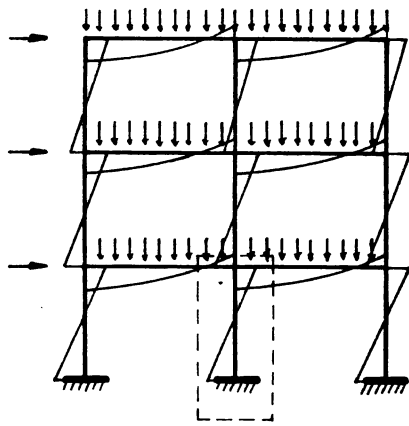


図 3.1 骨組のモデル化

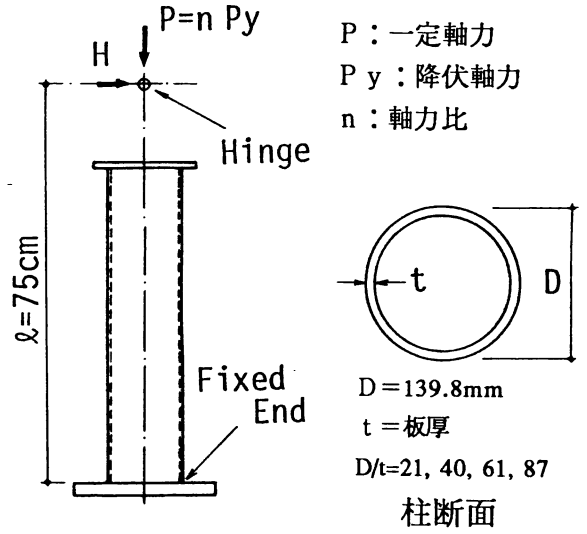
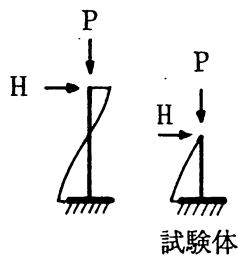


図 3.2 試験体

表 3.1 実験条件

(1) : 公称幅厚比 (2) : 規準の幅厚比制限値  
(3) : 指針の幅厚比制限値

No.	試験体	公称 径厚比 (1)	$\frac{240}{\sigma_y}$ (2)	(1) (2)	$\frac{120}{\sigma_y}$ (3)	(1) (3)	軸力比 n	細長比 $\lambda$	加力方法
1	I-201	21.2	53.9	0.39	27.0	0.79	0.07	31.7	単調
2	I-203						0.22		
3	I-205						0.37		
4	II-201						0.07		繰返し
5	II-203						0.22		
6	II-205						0.37		
7	I-203A	69.8	0.30	34.9	0.61	0.30	31.2	単調	
8	II-203A					0.30		繰返し	
9	I-401	39.9	56.7	0.70	28.4	1.40	0.07	30.8	単調
10	I-403						0.21		
11	I-405						0.35		
12	II-401						0.07		繰返し
13	II-403						0.21		
14	II-405						0.35		
15	I-403A	75.7	0.53	37.9	1.06	0.31	30.7	単調	
16	II-403A					0.31		繰返し	
17	I-601	60.8	68.6	0.89	34.3	1.77	0.07	30.7	単調
18	I-603						0.21		
19	I-605						0.35		
20	II-601						0.07		繰返し
21	II-603						0.21		
22	II-605						0.35		
23	I-901	87.4	64.3	1.36	32.2	2.00	0.07	30.7	単調
24	I-903						0.21		
25	I-905						0.35		
26	II-901						0.07		繰返し
27	II-903						0.21		
28	II-905						0.35		

表 3.2 鋼材の機械的性質

板厚 (mm)	径厚比	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	Y ( $\sigma_y/\sigma_u$ )	$\epsilon_y$ (%)	$\epsilon_u$ (%)	$\epsilon_{st}$ (%)
1.6	87	3.73	4.54	0.82	0.18	24.6	2.58
2.3	61	3.50	4.57	0.77	0.17	24.3	1.40
3.5	40	4.23	4.77	0.89	0.20	31.7	1.64
3.5*	40	3.17	4.17	0.76	0.15	41.2	2.41
6.6	21	4.45	5.05	0.88	0.21	30.5	1.75
6.6*	21	3.44	4.54	0.76	0.16	41.1	2.03

$\sigma_y$  : 降伏応力度

$\sigma_u$  : 引張り強度

\* : 焼きなまし

Y : 降伏比

$\epsilon_y$  : 降伏ひずみ度

$\epsilon_u$  : 伸び

$\epsilon_{st}$  : ひずみ硬化開始時のひずみ度

径厚比の近似値、Dは軸力比（それぞれD = 1, 3, 5でn = 0.07, 0.21, 0.35）を表す。試験体名の最後にAのついている試験体は焼きなましを行った試験体である。機械的性質は、径厚比が21, 40の鋼管に対しては、JIS 12号B試験片を、溶接シーム部を含む4ヶ所から採取し、引張試験を行った結果の平均値である。径厚比が64, 88の鋼管に対しては、鋼管製作前の原板より採取したJIS 1号B試験片2ヶの引張試験結果の平均値によるものである。

表3.1には鋼構造設計規準に規定されている径厚比制限値 $240/\sigma_y$ および鋼構造塑性設計指針で規定されている制限値 $120/\sigma_y$ を本章の試験体の径厚比とともに示している（ここで $\sigma_y$ は降伏応力度である）。この表より塑性設計の径厚比制限値を満足する試験体は径厚比が21のもの、許容応力度設計の径厚比制限値を満足する試験体は径厚比が21, 40, 61のものであり、径厚比が87の試験体は許容応力度設計の制限値を満足してないことになる。なお、鋼構造設計規準および塑性設計指針の径厚比制限値は、鋼管短柱の圧縮試験結果に基づいており、それぞれ最大圧縮応力度が許容応力度の基準値F、耐力時のひずみが降伏ひずみの8倍となるように決められたものである。

### 3.2.3 加力装置および加力方法

加力装置を図3.3に示す。この装置は基本的には2章のものと同様であるが、加力構面内のローラだけを用い、試験体は加力構面内にだけ変形できるようにしている。実験は、鉛直荷重Pを試験体にアムスラー型試験機で加え、所定の値に保持したあとにオイルジャッキで準静的に水平力Hを加えた。水平力を載荷することによって起こる水平変位は、試験機ベッドと支持ビームの間にローラを挿入することにより、支持ビーム全体が移動することで生じる。

水平力の加力方法は2つのシリーズよりなっており、単調荷重の実験（シリーズI）は、単調挙動に主眼をおいた大変形域での挙動を調べるためのものであり、加力装置の能力の範囲内あるいは試験体に荷重した軸力が維持できる範囲内で、処女荷重時にできる限り大きい水平変位を与えた。処女荷重以後も、できるだけ大きい変位振幅で1ないし2サイクルの繰り返し加力を行った。

繰り返し荷重の実験（シリーズII）は、比較的小さい変形域での繰り返し挙動を調べるためのものであり、水平変位（ $\delta$ ）と材長（ $l$ ）の比が、 $\delta / l = \pm 0.01$ の一定振幅で水平力を2サイクル加えた。その後、変位振幅を2サイクルごとに0.01づつ増加させた。

### 3.2.4 測定方法

鉛直荷重Pは試験機の計測部、水平力Hはジャッキ先端部にとりつけたロードセルで測定した。水平変位 $\delta$ は、支持ビームと加力盤の相対変位を支持ビーム上に設置した変位計で計測した。

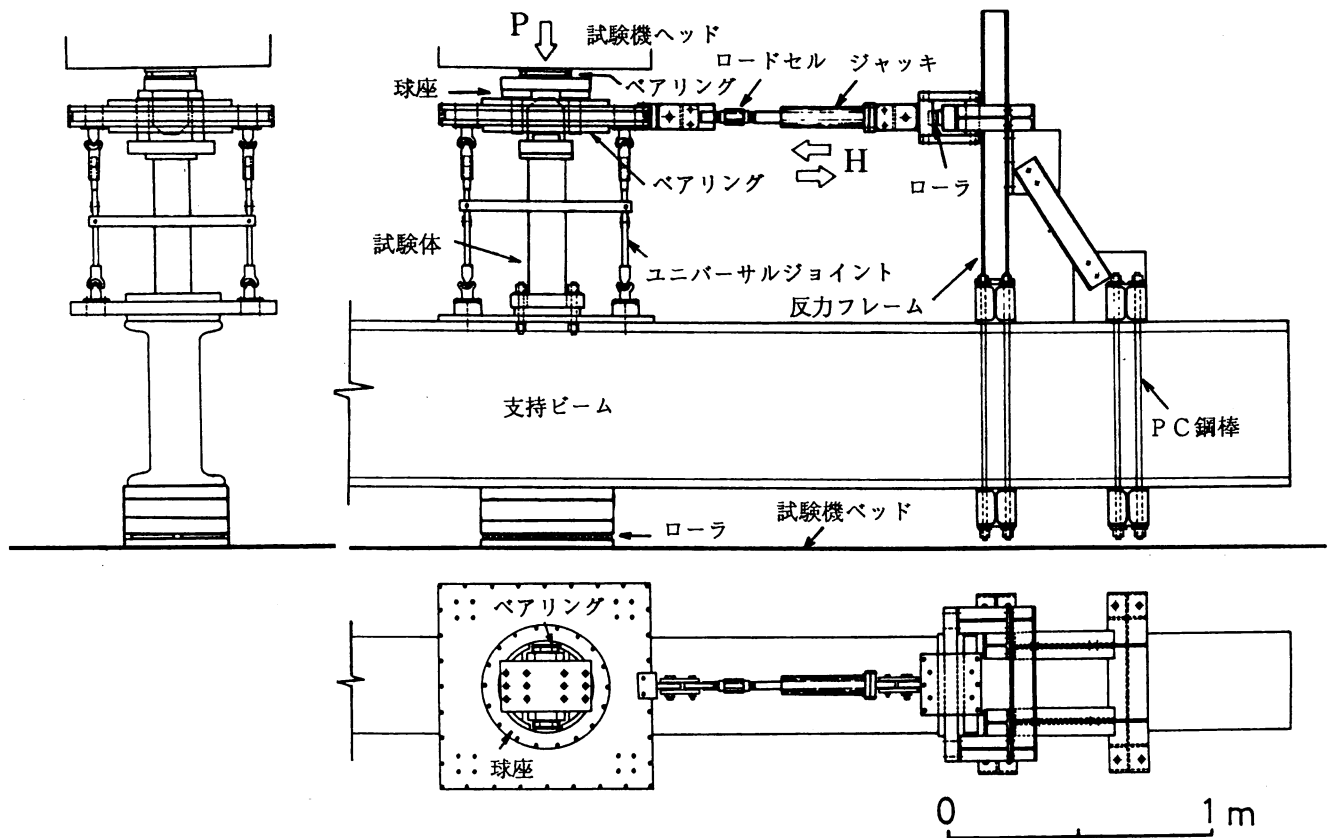


図 3.3 加力装置

### 3. 2. 5 実験結果

図3. 4～3. 7に水平力(H)－水平変位( $\delta$ )関係を示す。図中、実験結果を実線で示し、局部座屈発生点を**l b**、局部座屈がリング上になった点を**r**で示している。また、柱脚溶接部に亀裂が観察された点を**c r**で示している。局部座屈の発生は、肉眼によった。

一点鎖線は柱脚に塑性ヒンジが形成されると仮定して、転倒モーメント( $P\delta$ モーメント)の影響を考慮した2次塑性解析より求めた剛塑性崩壊直線である。剛塑性崩壊直線は次式で表現される。

$$H = M_{pc} / l - P \cdot \delta / l \quad (3. 1)$$

ここで、 $M_{pc}$ は軸力の存在を考慮して低減した全塑性モーメント、 $l$ は材長(75 cm)、 $P$ は圧縮力、 $\delta$ は水平変位である。 $M_{pc}$ は板厚が径に比べて小さいとし、面積が板厚中心に集中してあるとして次式で求めた。

$$M_{pc} / M_p = \cos \{ (\pi / 2) \cdot (P / P_y) \} \quad (3. 2)$$

ここで、 $P_y$ は断面の降伏軸力で、表3. 2の降伏応力度に断面積を乗じたものである。 $M_p$ は軸力の存在しないときと全塑性モーメントであり、次式で求めた。

$$M_p = D^3 \cdot \{ 1 - (1 - 2 \cdot t / D)^3 \} \cdot \sigma_y / 6 \quad (3. 3)$$

(1) 単調挙動 シリーズIの試験体の実験挙動は、柱脚付近の曲げ圧縮側に局部座屈が発生し、座屈波の成長という過程を経て、抵抗力の低下が起こった。抵抗力の低下は局部座屈が生じた時点直後には起きず、座屈が成長していく過程で抵抗力が低下することが観察される。また径厚比が2.1の試験体では、軸力比の大きさにかかわらず、一点鎖線で示した剛塑性崩壊曲線に到達することができるが、幅厚比、軸力比が大きくなるにつれて崩壊直線で与えられる耐力に達することが出来ない場合もあり、最大耐力後の抵抗力の低下も大きくなることが観察される。

また、試験体I-201、I-203Aはそれぞれ1サイクル目、1/2サイクル目に柱脚溶接部分に亀裂が発生して、急激に抵抗力が低下した。

座屈発生箇所は、径厚比が2.1の試験体は、軸力比に関係なく柱脚より45 mm程度、4.0の試験体は柱脚より70 mm、6.1、8.8の試験体は柱脚より40 mm程度の位置であった。

(2) 繰返し挙動 シリーズIIの試験体の局部座屈も、単調挙動と同様に曲げ圧縮側柱脚部に発生した。逆方向の加力とともに、軸力比が小さい場合には、最初の局部座屈波が小さくなり、曲げ圧縮側が座屈を生じる。その後の繰返しで、両方の局部座



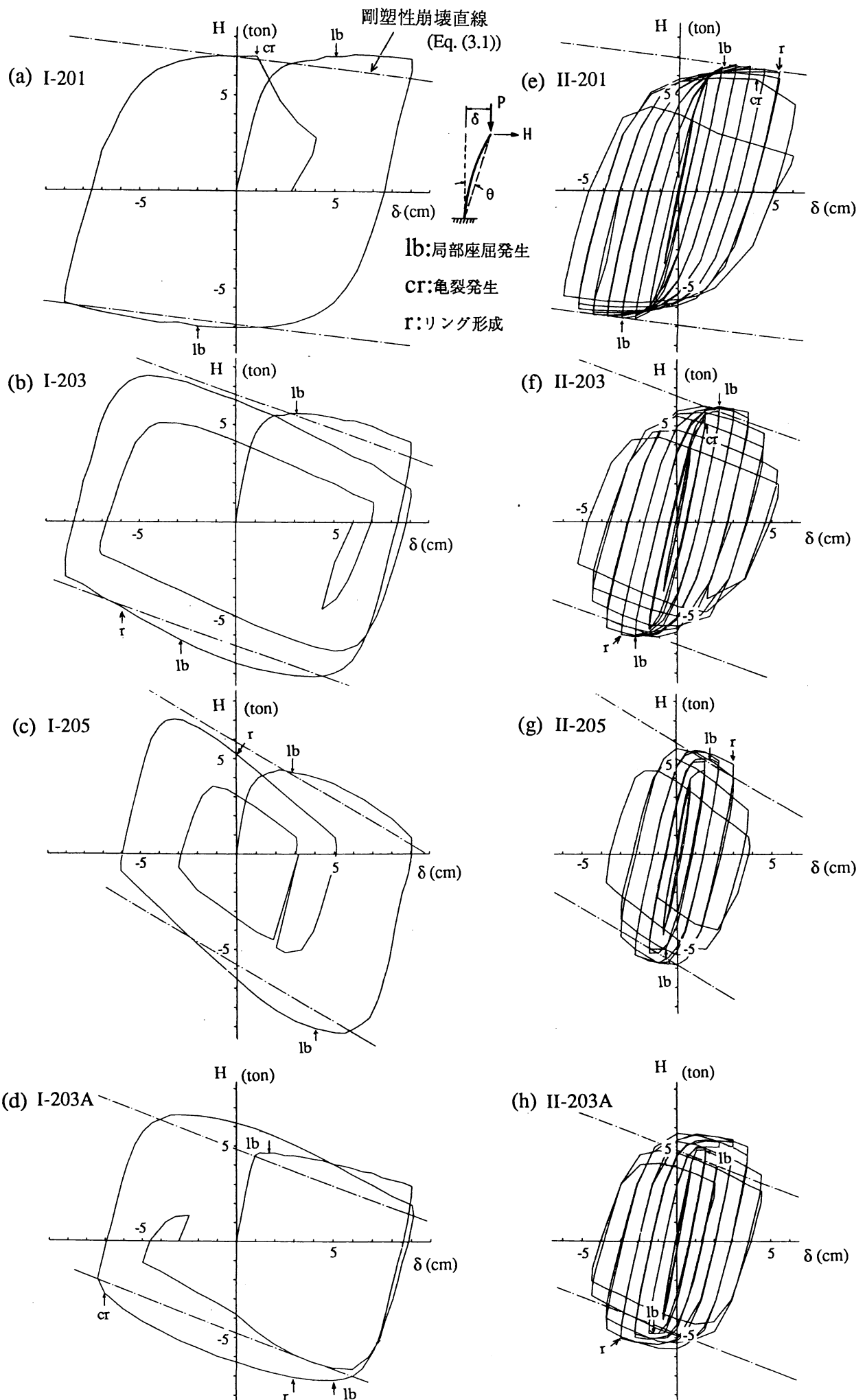


図 3.4 水平力 (H) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係 ( $D/t = 21$ )

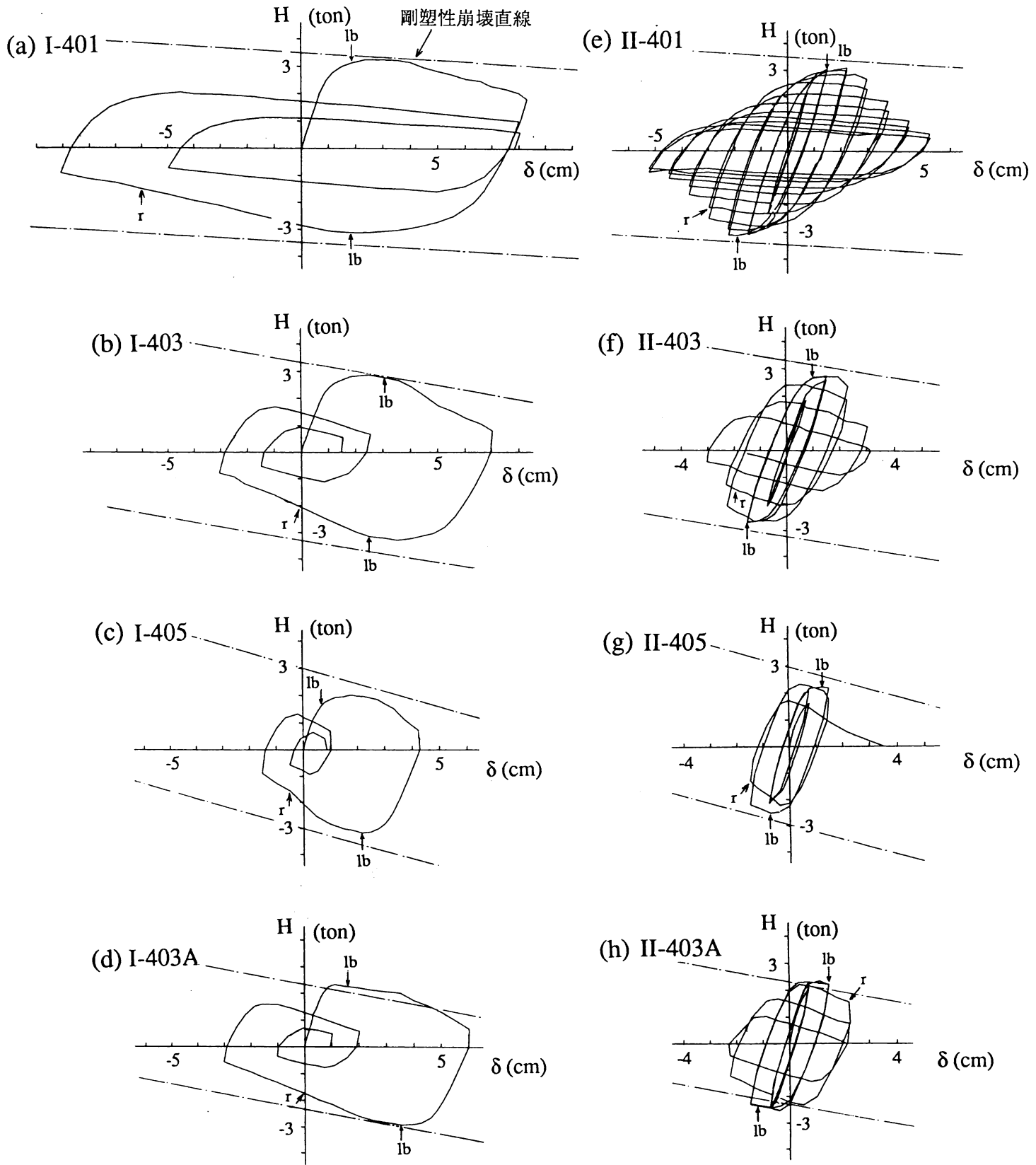


図 3.5 水平力 (H) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係 ( $D/t = 40$ )

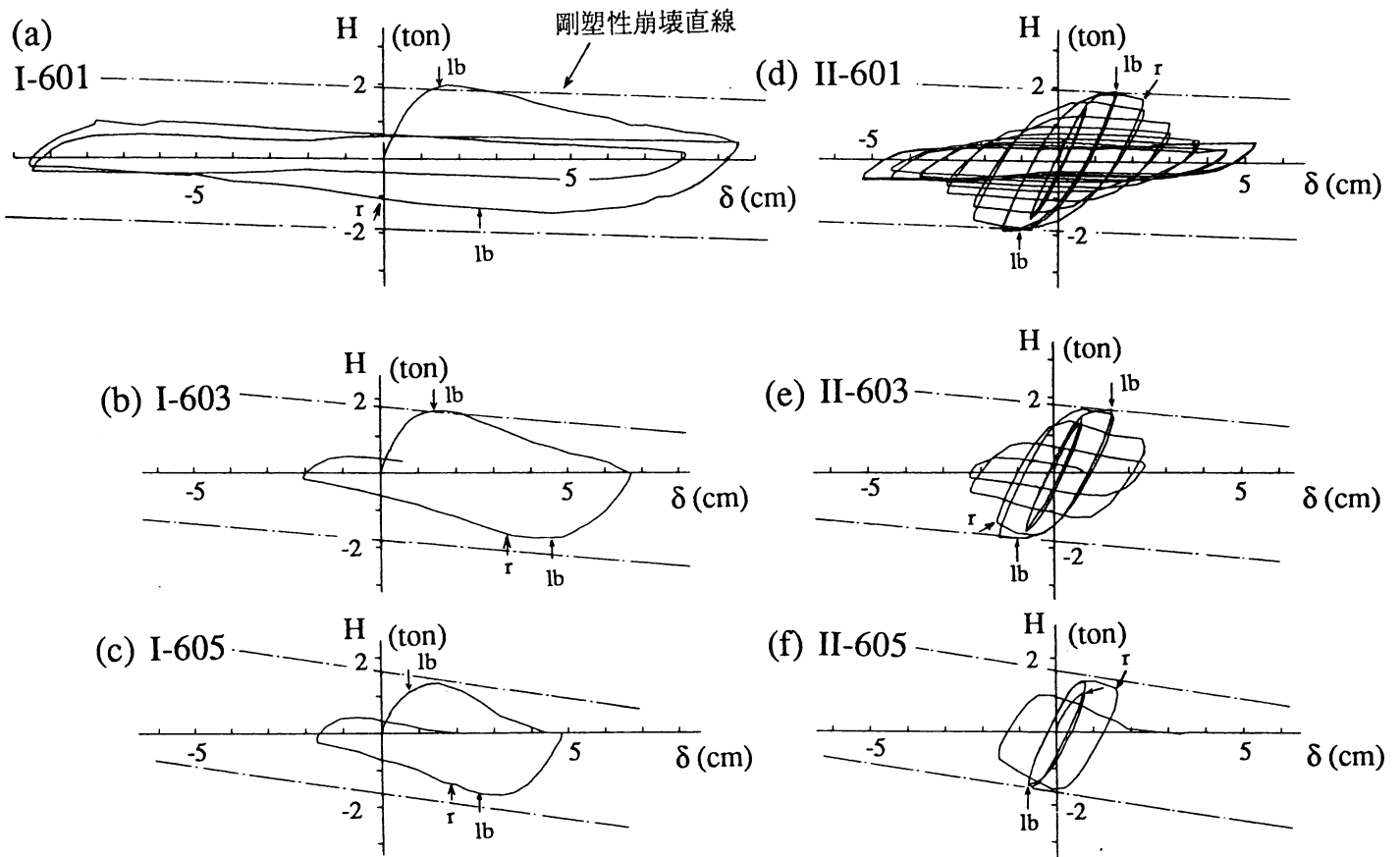


図 3.6 水平力 (H) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係 ( $D/t = 6.1$ )

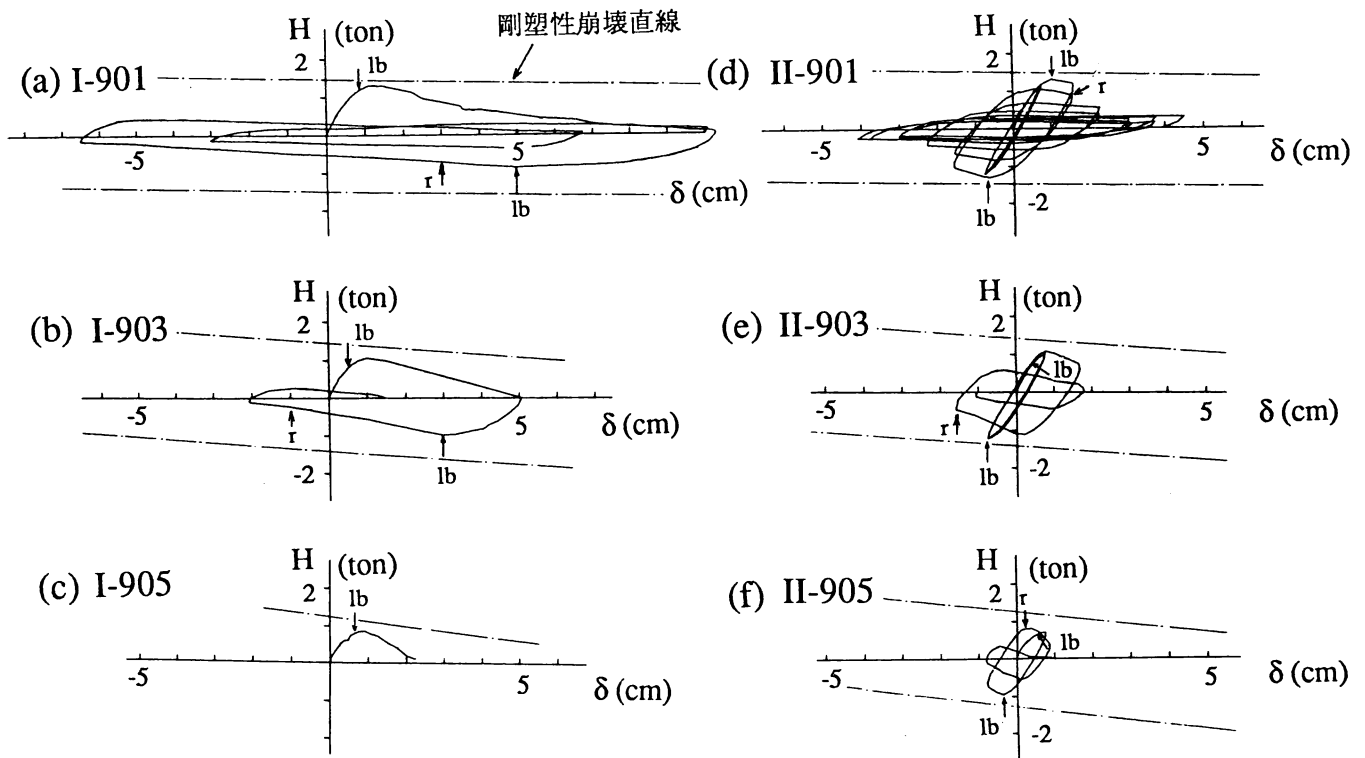


図 3.7 水平力 (H) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係 ( $D/t = 8.7$ )

屈波がつながっていき、リング状の形状となった。また、軸力比が大きい場合には、局部座屈が発生すると、荷重方向が逆になっても、座屈変形は戻らなかった。局部座屈が生じたあと抵抗力は繰返しサイクルごとに低下するが、リング状の形状となったあたりより抵抗力の低下が大きくなる。径厚比と軸力比の影響は、上に述べた単調挙動と同様であることが観察される。試験体Ⅱ-201、Ⅱ-203は繰返し荷重の過程で、柱脚溶接部が破断した。座屈発生箇所は、シリーズⅠの試験体とほぼ同じ箇所が発生した。

### § 3. 3 考察

#### 3. 3. 1 弾塑性挙動

図3. 4～3. 7の水平力-水平変位関係では、抵抗力の低下は局部座屈によるものだけでなく、柱に軸圧縮力が存在するため転倒モーメント（ $P \cdot \delta$ モーメント）による低下も含まれる。

ここでは、転倒モーメントによる抵抗力の低下を除去し、局部座屈による劣化を調べるため、図3. 8に示すように、水平力-水平変位関係を柱脚のモーメントと部材回転角の関係に変換し、さらに縦軸を $M_{pc}$ で、横軸を $\theta_{pc}$ で無次元化した。柱が完全弾塑性材料で出来ており局部座屈が生じないとすれば、塑性崩壊機構に達した状態では、軸力比の値に関係なく、縦軸の値は1となる。

ここで、縦軸の無次元量は軸力の存在による低減した全塑性モーメントであり、式(3. 2)で求めた。また、横軸の無次元量は、軸力の存在による曲げ剛性の低下と、変形後の力の釣合を考慮した弾性限界回転量 $\theta_{pc}$ で、次式で求めた。

$$\theta_{pc} = M_{pc} \cdot \{1 - \lambda_1 \cdot \ell / \tan(\lambda_1 \cdot \ell)\} / (P \cdot \ell) \quad (3. 4)$$

ここで、 $\lambda_1 = \sqrt{(P / (E \cdot I))}$ である（ $E$ ：ヤング係数、 $I$ ：断面2次モーメント）。

図3. 9および図3. 10にシリーズⅠの試験体の処女荷重時の柱脚のモーメント（ $M / M_{pc}$ ）と部材回転角（ $\theta / \theta_{pc}$ ）の関係を示す。

### (1) 径厚比の影響

図3.9に径厚比の影響を示す。それぞれの図に、軸力比が同じ値を持つ柱の挙動を示している。図より径厚比が大きくなるにつれて最大耐力は小さくなり最大耐力後の抵抗力の低下が大きくなることが観察される。径厚比が40でも軸力比が大きくなると、全塑性モーメント $M_{pc}$ を期待できなくなることがわかる。径厚比が40と61の耐力を比較すると、径厚比が61の方が大きくなっているが、この理由は径厚比が40の試験体は電縫鋼管であり、61の試験体は鋼板を曲げ加工し、溶接により製作したため、両者の残留応力が異なること、また降伏比が61の方が小さいためであると考えられる。

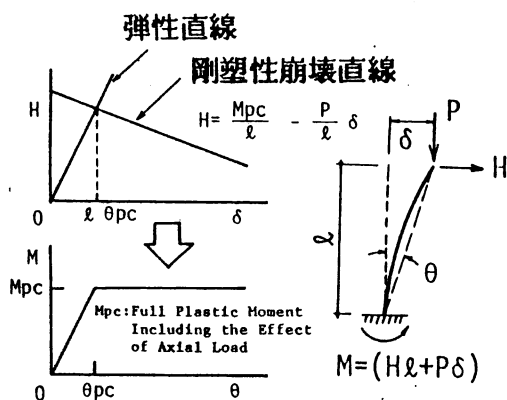


図3.8 無次元量の定義

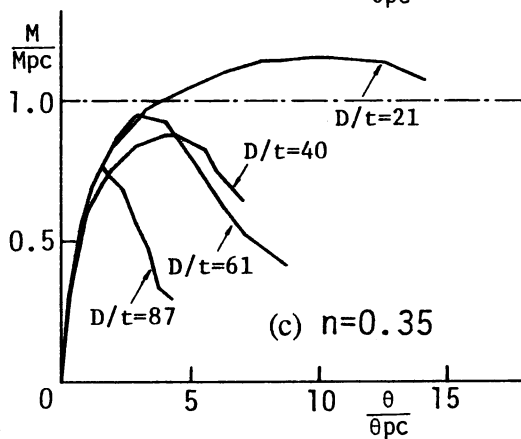
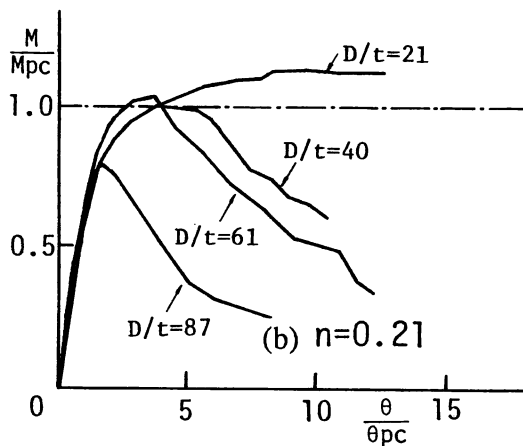
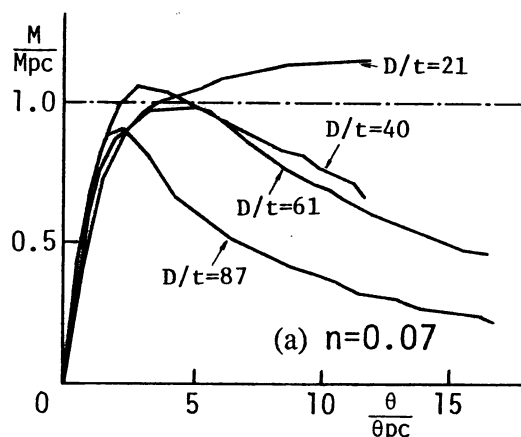


図3.9 径厚比の影響

### (2) 軸力比の影響

図3.10に軸力比の影響を示す。径厚比が21の試験体は焼きなましを行った試験体を別にすると、軸力比に関係なく同様な挙動を示しているが、他の径厚比の試験体は、軸力比が大きくなるにつれて最大耐力は小さくなり最大耐力後の抵抗力の低下が大きくなる。図3.10(a), (b)より、焼きなましを行った試験体は行わない試験体に比べて耐力・変形能力ともに大きいことが観察される。この理由は、焼きなましを行った試験体は、残留応力が少なく、また降伏比が小さくなったことによると考えられる。

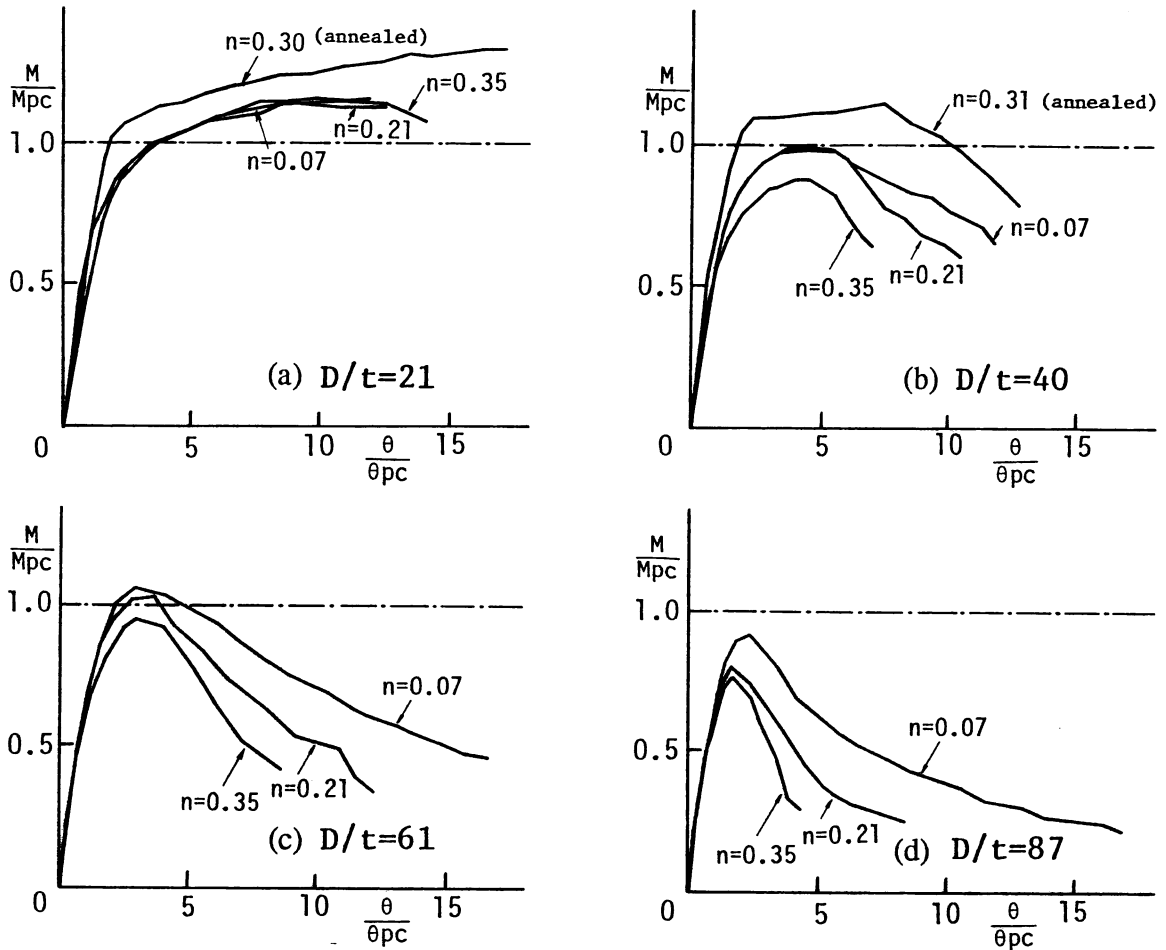


図 3.10 軸力比の影響

### (3) 単調挙動と繰返し挙動の対応

図 3.11 にシリーズ II の試験体の実験挙動とシリーズ I の実験挙動を比較して示している。シリーズ II の荷重・変形関係は図 3.12 に示す変換を行っている。図 3.11 中で●印はシリーズ I の試験体の処女載荷時の実験結果を、実線および点線で、それぞれ図 3.12 の (b), (c) で求めたシリーズ II の結果を示している。

図 3.11 より、点線で示した挙動と●印の挙動の対応は、径厚比の小さい場合 ( $D/t = 21, 40$ ) には、シリーズ I の方が最大耐力が大きく、また耐力時の変位も対応していないが、径厚比が 61, 87 の試験体では耐力、および耐力時の変位まで良く対応している。また、耐力後の変形まで含めた大変形域までについて考えると、実線で示した結果の包絡線と単調挙動が比較的良好に対応していることがわかる。

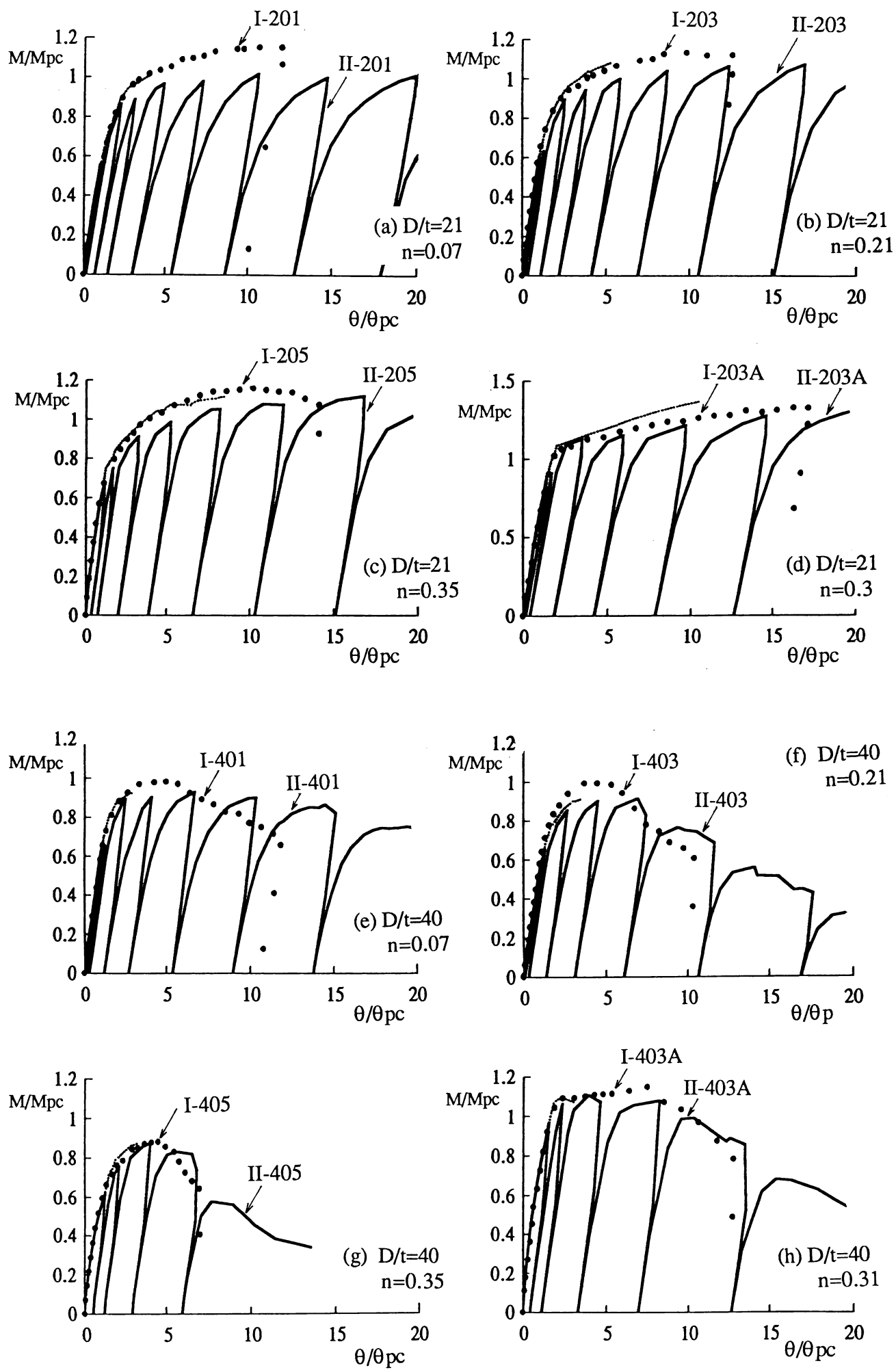


図 3.1.1 単調挙動と繰返し挙動の対応 (つづく)

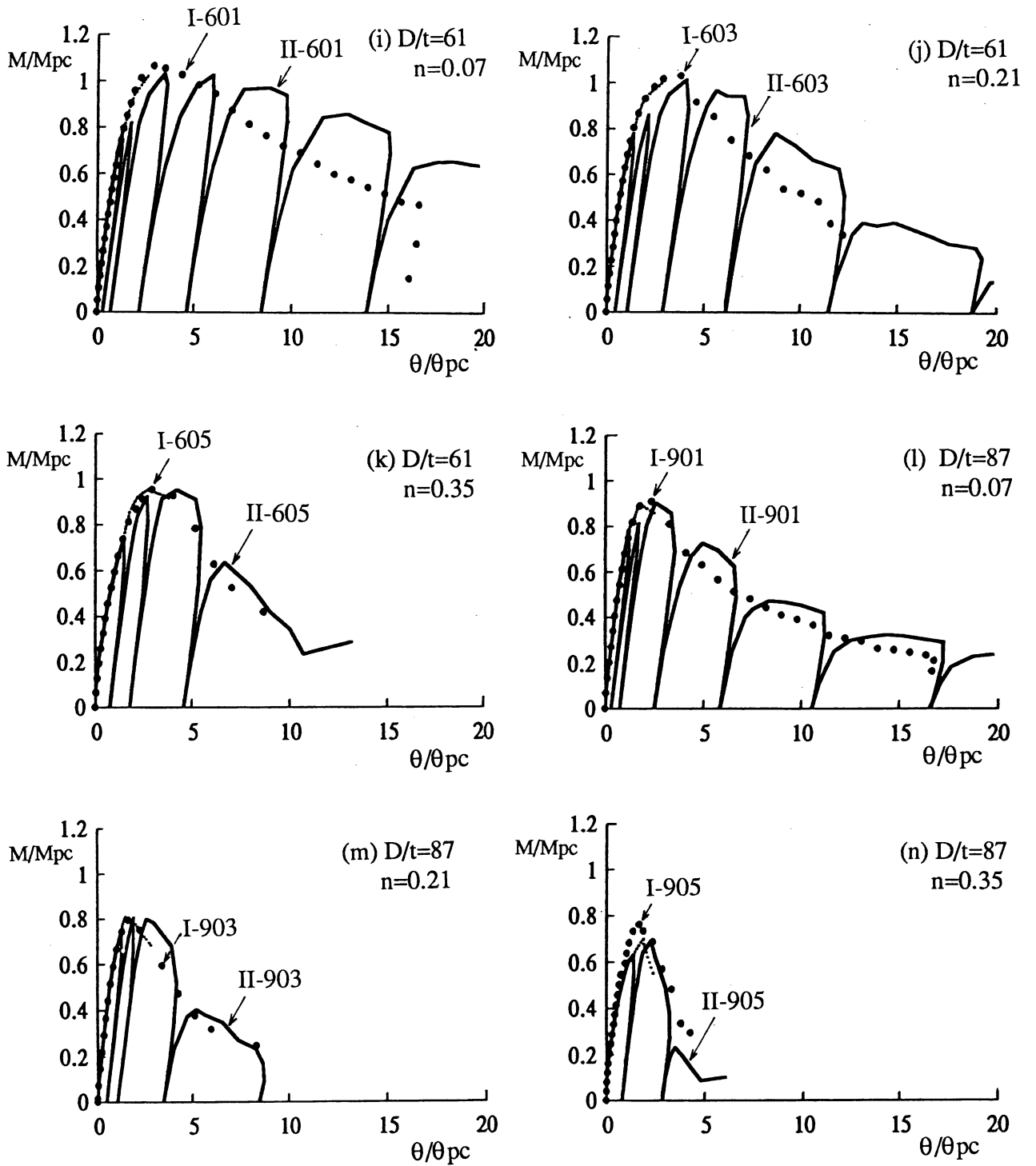


図 3.1 1 単調挙動と繰返し挙動の対応 (つづき)

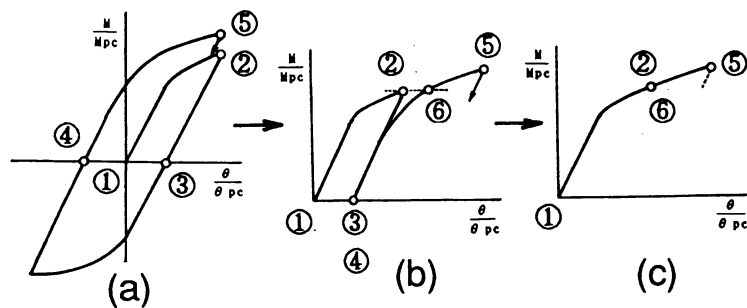


図 3.1 2 繰返し挙動の変換



### 3.3.2 座屈発生時のひずみ度

図3.13にシリーズIの試験体の視察による局部座屈発生時のひずみ度 $\epsilon_{cr}$ と無次元化径厚比( $\beta = (D/t) \cdot (\sigma_y/E)$ )の関係を示す。このひずみは、試験体鋼管に材長方向へ貼付したひずみゲージにより求めたものである。図中点線で、文献3.10による下式で表現される実験式を示している。

$$\epsilon_{max} = 0.44 \cdot t/D \quad (3.5)$$

式(3.5)は、残留応力を含む鋼管の耐力時のひずみを表す実験式であり、鋼管の圧縮試験により得られたものである(文献3.10によると、径厚比34から106までの実験が行われているが、ほとんどの試験体の座屈時のひずみ度と耐力時のひずみは等しくなっている)。実験結果はばらつきが大きい、式(3.5)で概ね座屈時のひずみ度の下限値を捉えているといえる。推定式より座屈時のひずみ度が高いのは、材長方向、断面方向に応力勾配があるため、短柱試験体に圧縮力を載荷する場合よりも局部座屈しにくくなるためと考えられる。また、塑性設計指針の径厚比を満足すれば、本実験からも降伏ひずみの8倍を超えることがわかる。

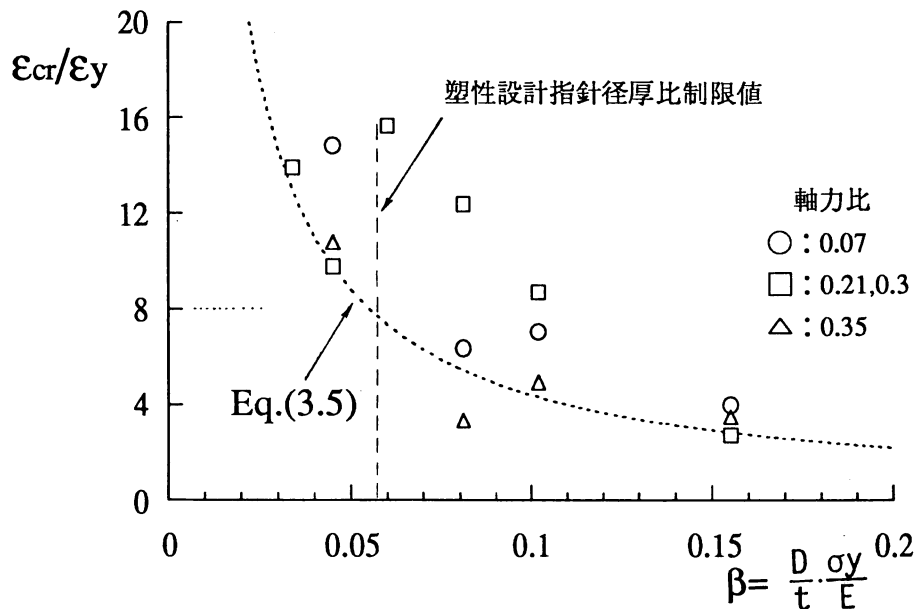


図3.13 局部座屈発生時のひずみ度

### 3.3.3 耐力

本節では、終局曲げ耐力の検討および鋼構造塑性設計指針<sup>3.2)</sup>、鋼構造設計規準<sup>3.1)</sup>の柱材の設計式の検討を実験結果と比較することにより行う。

#### (1) 終局曲げ耐力

表3.3に柱断面の曲げ強度を示すものとして $M_{max}/M_{pc}$  ( $M_{max} = (H \ell + P \delta)_{max}$ : 柱脚部最大モーメントの実験値)を示す。図3.14に終局耐力に関するモーメント-軸力相関関係を示す。図中○、△印はシリーズI、●、▲印はシリーズIIの

実験結果であり、△、▲印は焼きなましを行った試験体の結果である。図中実線で示すM-N相関式は、板厚が径に比べて小さいと仮定して求めた式(3.2)によるものである。図3.15に曲げ耐力と径厚比の関係を示す。

これらの図表より、径厚比が大きくなると曲げ耐力が小さくなる傾向があること、塑性設計の径厚比制限値(D/t=120/σ<sub>y</sub>)を満足すれば全塑性モーメントを期待できること、許容応力度設計の制限値(D/t=240/σ<sub>y</sub>)を満足する試験体でも全塑性モーメントに到達できない場合があることがわかる。図中に単調加力の実験結果を最小2乗法により近似した耐力と無次元化径厚比の関係を破線で示している。最小2乗法による近似式は下式で与えられるが、この式によれば全塑性モーメントを期待できる無次元化径厚比はおよそ0.075程度となる。

$$M_{max}/M_{pc} = -0.000219\beta^{-2} + 0.0265\beta^{-1} + 0.704 \quad (3.6)$$

径厚比が40で焼きなましを行っていない試験体の方が61の試験体よりも耐力が小さくなっている理由は、材料の降伏比が径厚比が61の試験体のものが小さいこと、鋼管の製法および板厚の違いによる残留応力の違いによるものと考がえられる。

表3.3 耐力および変形能力

H<sub>p1</sub> : 指針耐力, H<sub>a1</sub> : 規準耐力

M<sub>max</sub> : 曲げ耐力, H<sub>max</sub> : 水平耐力, R<sub>95</sub> : 変形能力

No.	試験体	H <sub>max</sub> (ton)	δ <sub>max</sub> (cm)	H <sub>p1</sub> (ton)	H <sub>a1</sub> (ton)	$\frac{M_{max}}{M_{pc}}$	$\frac{H_{max}}{H_{p1}}$	$\frac{H_{max}}{H_{a1}}$	R95
1	I-201	7.10	6.00	6.31	4.80	1.15	1.12	1.48	10.98
2	I-203	5.59	2.78	5.04	3.95	1.13	1.11	1.42	11.59
3	I-205	4.41	2.15	3.85	3.10	1.16	1.15	1.42	12.41
4	II-201	6.67	3.00	6.31	4.80	1.01	1.06	1.39	-
5	II-203	6.04	1.50	5.05	3.95	1.08	1.20	1.53	-
6	II-205	5.55	0.01	3.85	3.10	1.12	1.44	1.79	-
7	I-203A	4.64	1.20	3.48	2.72	1.33	1.33	1.71	16.20
8	II-203A	5.71	0.02	3.48	2.72	1.36	1.64	2.10	-
9	I-401	3.25	2.36	3.20	2.49	0.98	1.01	1.31	5.26
10	I-403	2.87	2.49	2.59	2.06	0.99	1.11	1.39	4.98
11	I-405	2.02	1.79	2.03	1.65	0.88	1.00	1.22	4.34
12	II-401	3.11	2.25	3.20	2.48	0.93	0.97	1.25	-
13	II-403	2.74	1.51	2.60	2.07	0.92	1.06	1.33	-
14	II-405	2.32	0.42	2.02	1.65	0.86	1.15	1.41	-
15	I-403A	2.33	1.11	1.69	1.34	1.15	1.38	1.74	7.22
16	II-403A	2.35	1.15	1.68	1.34	1.11	1.40	1.76	-
17	I-601	1.99	1.67	1.77	1.38	1.06	1.13	1.44	3.62
18	I-603	1.71	1.57	1.45	1.15	1.03	1.18	1.48	3.11
19	I-605	1.34	1.47	1.15	0.93	0.95	1.17	1.45	3.20
20	II-601	1.92	1.50	1.76	1.38	1.03	1.09	1.40	-
21	II-603	1.71	1.50	1.45	1.15	1.01	1.18	1.48	-
22	II-605	1.41	1.00	1.15	0.93	0.95	1.23	1.52	-
23	I-901	1.32	1.44	1.37	1.08	0.91	0.96	1.23	1.78
24	I-903	1.06	0.95	1.12	0.90	0.8	0.94	1.18	1.17
25	I-905	0.87	0.89	0.89	0.72	0.76	0.98	1.21	0.99
26	II-901	1.32	1.01	1.37	1.08	0.9	0.96	1.23	-
27	II-903	1.09	0.75	1.12	0.90	0.8	0.97	1.21	-
28	II-905	0.84	0.36	0.89	0.72	0.69	0.95	1.16	-

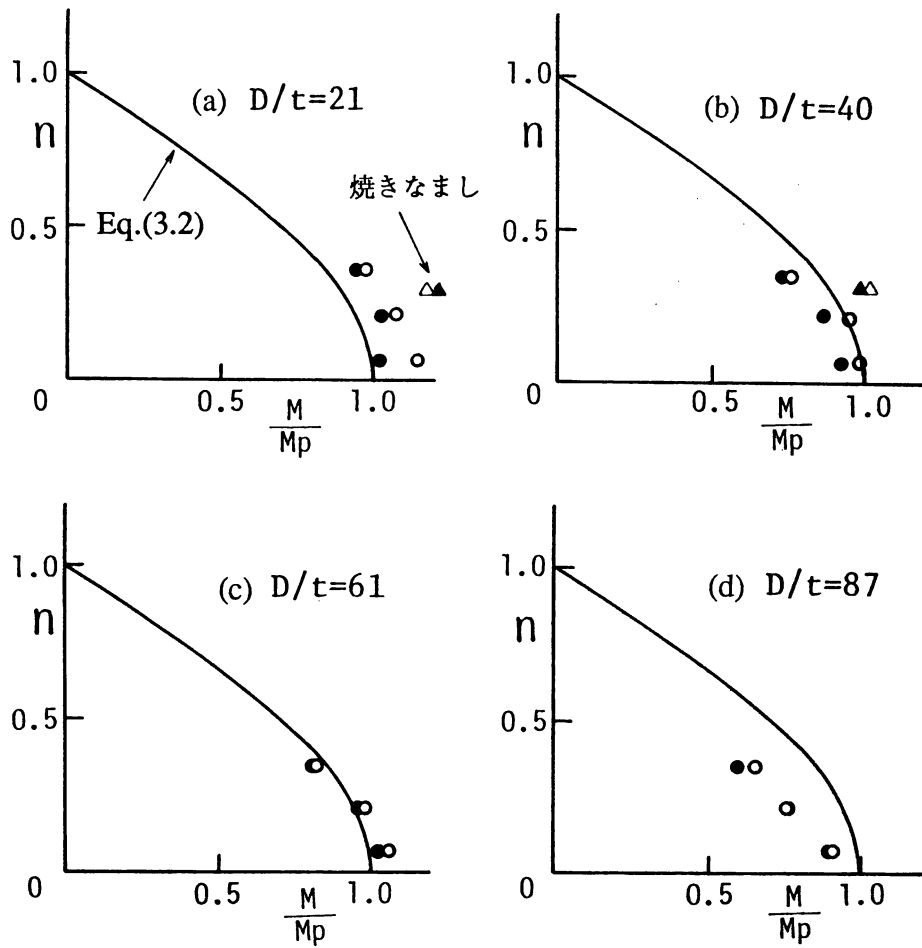


図 3.14 モーメント-軸力相関関係 (曲げ耐力)

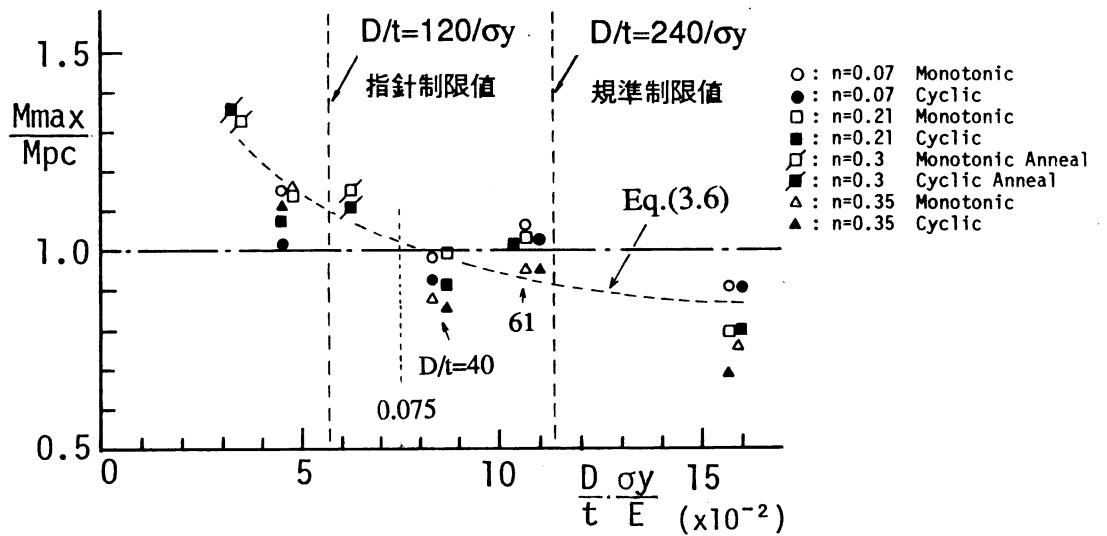


図 3.15 曲げ耐力-径厚比関係

## (2) 鋼構造塑性設計指針による設計式の検討

鋼構造塑性設計指針の柱材の設計式は次式で示される。

$$P/N_{cr} + CM M_1 / \{(1 - P/NE) \cdot M_{cr}\} = 1 \quad (3.7)$$

鋼構造塑性設計指針の柱材の設計式による耐力 $H_{pl}$ の算定に際しては、柱材の設計式(3.7)において、座屈強度 $N_{cr}$ は指針で規定されている柱材の座屈強度式(3.8)、等価曲げモーメント係数 $CM$ の値は柱頭の水平変位が拘束されていないことより1、柱の曲げ面内におけるオイラー座屈強度 $NE$ は座屈長さを $2\ell$ (=150cm)、柱の横座屈強度 $M_{cr}$ は横座屈を生じないことより全塑性モーメント $M_p$ とし、 $M_1$ を式(3.9)で計算し、式(3.10)で求めた。

$$N_{cr} = \{1 - 0.545 \cdot (\bar{\lambda} - 0.3)\} \cdot P_y \quad (\text{ただし, } 0.3 < \bar{\lambda} < 1.3) \quad (3.8)$$

ここで、 $\bar{\lambda} = \sqrt{(\sigma_y/E)} \cdot \lambda / \pi$ である。

$$M_1 = (1 - \bar{\lambda}^2 \cdot n) \cdot \{1 - n / [1 - 0.545 \cdot (\bar{\lambda} - 0.3)]\} \cdot M_p \quad (3.9)$$

$$H_{pl} = M_1 / \ell \quad (3.10)$$

表3.3に柱材の耐力式(3.7)による水平耐力 $H_{pl}$ を示す。同表には実験よりえられた最大水平耐力( $H_{max}$ )およびその時の水平変位( $\delta_{max}$ )も示している。ただしシリーズIの試験体の耐力は処女載荷時の耐力である。図3.16に、式(3.9)より得られる曲げモーメント( $M_1$ )と軸力比( $n$ )の相関曲線を実線で、実験値とともに示す。設計式(3.7)による耐力は、塑性設計指針の径厚比制限値を満足する試験体(径厚比21)に対しては安全側である。一方、制限値を超えた試験体には危険側の評価をする場合もあるが、 $H_{max}/H_{pl}$ の値は0.94から1.40の範囲にあり、比較的良い評価をしていることがわかる。

図3.17には、水平耐力と設計式による耐力の比 $H_{max}/H_{pl}$ と径厚比の関係を示している。径厚比が大きくなるにつれて、 $H_{max}/H_{pl}$ の値は小さくなる傾向がある。図中に破線で単調加力の実験値を最小2乗法で近似した下式で表現される曲線を示している。

$$H_{max}/H_{pl} = -0.000396 \beta^{-2} + 0.0241 \beta^{-1} + 0.874 \quad (3.11)$$

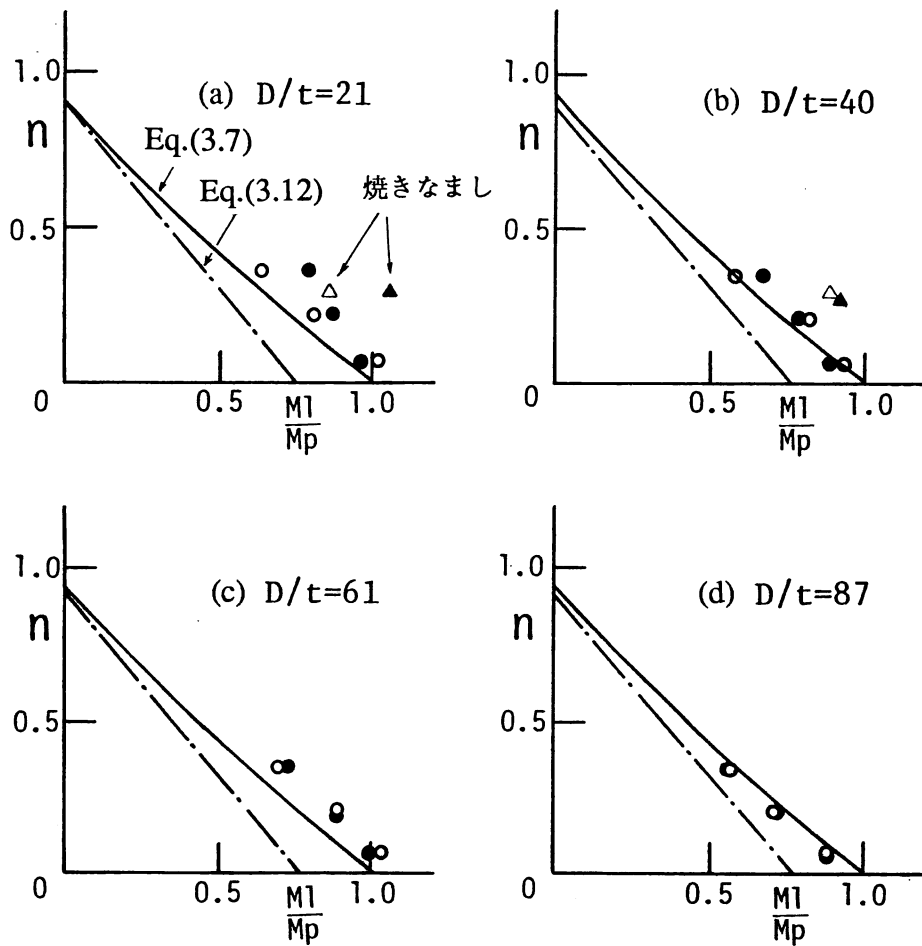


図 3.16 モーメント-軸力相関関係 (設計式)

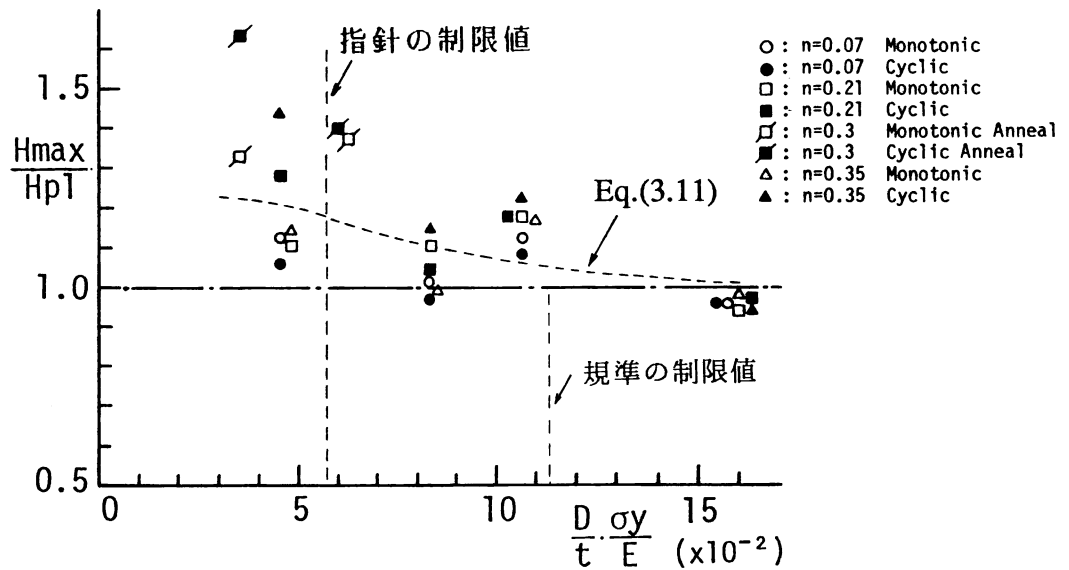


図 3.17  $H_{max}/H_{pl}$ -径厚比関係

これより、規準の制限値の範囲内であれば、全塑性モーメントを期待できない試験体に対しても、指針の柱材の耐力式を用いれば大略安全側に耐力を評価できることがわかる。

載荷条件の相違による最大水平耐力の違いは、径厚比が21と41では材料のひずみ硬化現象により、軸力比が大きい試験体でシリーズI Iの試験体のほうが大きくなっているものの、全体として顕著な差は認められない。

### (3) 鋼構造設計規準の設計式の検討

鋼構造設計規準の柱材の設計式は次式である。

$$\sigma_c / f_c + c \sigma_b / f_b = 1 \quad (3.12)$$

ここで、 $\sigma_c$ は圧縮応力度、 $c \sigma_b$ は圧縮側曲げ応力度であり、式(3.13)、(3.14)である。したがって、短期許容水平力 $H_{al}$ は式(3.15)で得られる。式(3.15)で $f_c$ は許容圧縮応力度、 $f_b$ は許容曲げ応力度であり、式(3.16)、(3.17)で表せる。ここで許容応力度を求めるための基準値 $F$ の値としては、表3.2に示す降伏応力度を用いた。

$$\sigma_c = P / A \quad (A: \text{断面積}) \quad (3.13)$$

$$c \sigma_b = M_1 / Z \quad (Z: \text{断面係数}, M_1 = H_{al} \cdot l) \quad (3.14)$$

$$H_{al} = Z \cdot f_b \cdot \{1 - P / (A \cdot f_c)\} / l \quad (3.15)$$

$$f_c = 1.5 \cdot F \cdot \{1 - 0.4 (\lambda / \lambda_p)^2\} / \{3/2 + 2 \cdot (\lambda / \lambda_p)^2 / 3\}$$

$$(\lambda: \text{細長比}, \lambda_p: \text{限界細長比} = \pi \sqrt{(E / 0.6 F)}) \quad (3.16)$$

$$f_b = F \quad (3.17)$$

図3.16に $M_1 / M_p - n$ 相関曲線(一点鎖線)、図3.18に径厚比との関係を実験値とともに示す。図中の○、△印、●、▲印はそれぞれシリーズIおよびシリーズI Iの実験結果である。これらの図表より、径厚比が87と規準の径厚比制限値を超えた試験体でも設計式による耐力は安全側であることがわかる。図3.18中に示す破線は、単調加力の実験値を最小2乗法で近似した下式で表現される曲線を示している。

$$H_{max} / H_{al} = -0.000384 \beta^{-2} + 0.0282 \beta + 1.11 \quad (3.18)$$

これより、規準の耐力式は規準の径厚比の1.4倍程度の径厚比よりなる柱材でも安全側に耐力を評価できることがわかる。

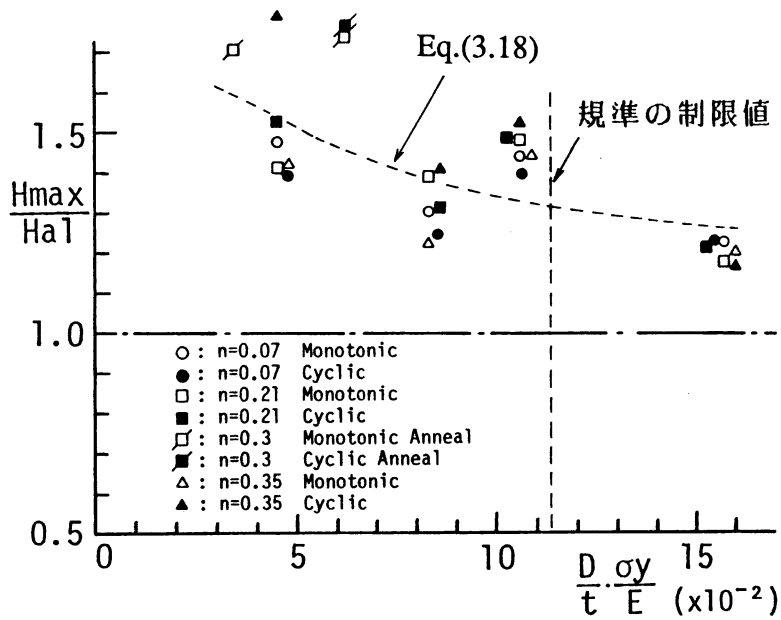


図 3.18 Hmax/Ha1—径厚比関係

### 3.3.4 変形能力

塑性設計に関しては骨組が崩壊メカニズムに達するまで塑性ヒンジは抵抗力を低下する事なく回転できる必要がある。耐震設計に関しては構造物の耐力だけでなく、エネルギー吸収能力および耐力の低下が始まる変位が重要である。ここでは、実験結果より、変形能力 (R<sub>95</sub>) を求めた。

変形能力は、図 3.19 に示すモーメント M/M<sub>pc</sub>—回転角 θ/θ<sub>pc</sub> 関係において、最大耐力後の 0.95 M<sub>max</sub> に対応する回転角を θ<sub>95</sub> とし (3.19) 式で定義した。

$$R_{95} = \theta_{95} / \theta_{pc} - 1 \quad (3.19)$$

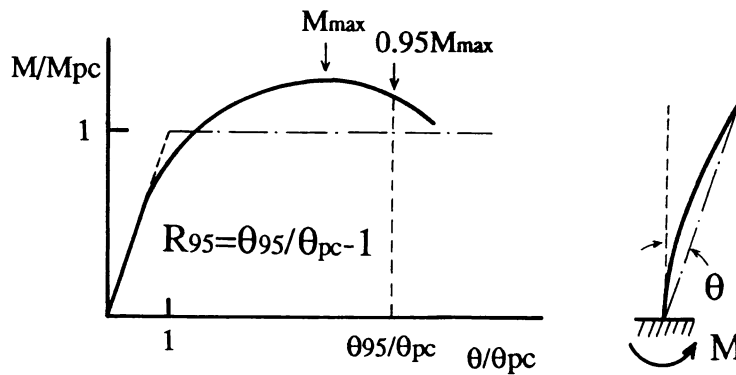


図 3.19 変形能力の定義

表 3. 3 にシリーズ I の試験体の塑性変形能力 (R95) を示す. また, 図 3. 2 0 に塑性変形能力と径厚比の関係を示す. 変形能力 R95 は径厚比が大きくなると小さくなる. 変形能力 R95 に対しては, 耐力の場合と同じく, 最小 2 乗法で近似した下式で表現される曲線を図中点線で示している.

$$R_{95} = 0.00247\beta^{-2} + 0.572\beta^{-1} - 2.4 \quad (3. 20)$$

これによれば, 塑性設計の制限値の径厚比で  $R_{95} = 8.4$ , 許容応力度設計の制限値の径厚比で  $R_{95} = 2.8$  となる.

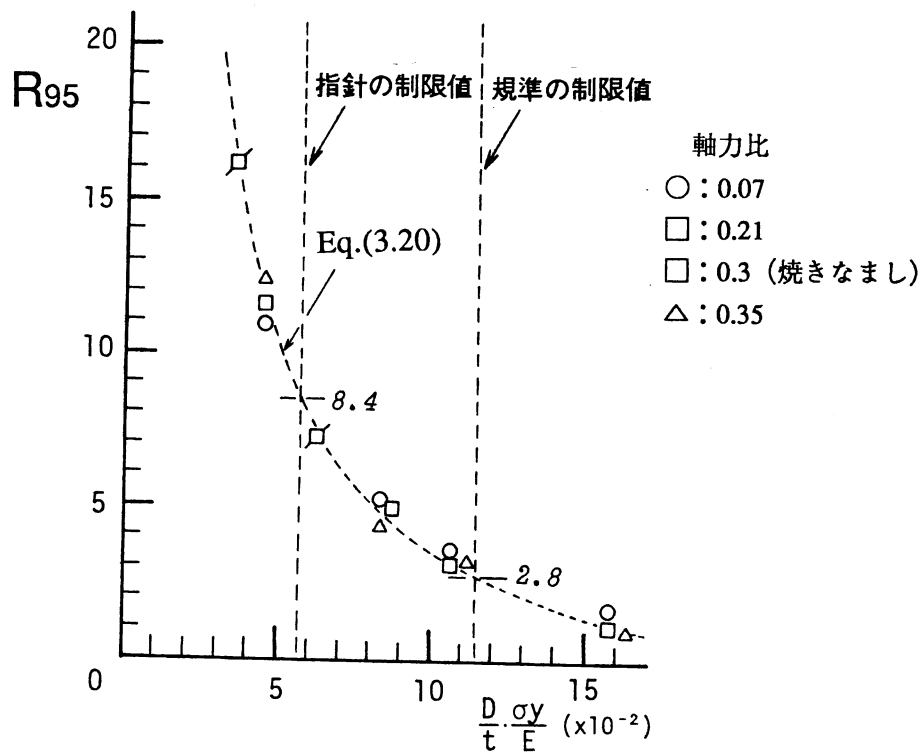


図 3. 2 0 変形能力—径厚比関係



### 8 3. 4 結論

径厚比が21から87の断面を持つ円形鋼管柱の実験を28体行い、弾塑性挙動を調べた。次に実験結果より鋼構造の塑性設計で用いられる柱材の耐力式の検討を行い、変形能力について考察した結果以下のことがわかった。

1) 円形鋼管柱は局部座屈によって、抵抗力の低下が生じる。抵抗力の低下は径厚比および軸力比が大きいほど著しい。

2) 鋼構造塑性設計指針の径厚比制限値を満足すれば、式(3.2)による全塑性モーメントを期待できる。しかし、鋼構造設計規準の径厚比制限値を満足しても、全塑性モーメントを期待できるとは限らない。本実験結果を最小2乗近似すれば、無次元化径厚比 $\beta$ の値が0.075以下で全塑性モーメントを期待できる。

3) 鋼構造の塑性設計で使われる柱材の設計式(3.7)による耐力は、塑性設計の径厚比制限値を満足する試験体に対しては耐力を安全側に評価する。制限値を超えた試験体には危険側の評価をする場合もあるが、比較的良く耐力を評価する。

4) 鋼構造設計規準の柱材の耐力式は径厚比が87と規準の径厚比制限値を1.4倍超過した鋼管でも安全側の評価を与える。

5) 変形能力は径厚比が大きくなるほど小さくなる。鋼構造塑性設計指針の径厚比制限値を満足すれば、変形能力は8.4、鋼構造設計規準の径厚比を満足すれば2.8程度の変形能力が期待できる。

6) 鋼構造塑性設計指針の径厚比制限値を満足すれば、局部座屈発生時のひずみ度は、降伏ひずみ度の8倍以上となる。

7) 繰返しの荷重変形関係の原点を移動して求めた荷重変形関係の包絡線は、単調挙動と概ね対応する。

### 第3章の参考文献

- 3.1) 日本建築学会：鋼構造設計規準，1970. 5.
- 3.2) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975. 11.
- 3.3) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説，1980. 2.
- 3.4) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説，1990. 1.
- 3.5) 日本鋼構造協会鋼管 J I S 小委員会：塑性加工をうけた鋼材の機械的性質  
－ S T K 4 1 の引張ならびに圧縮に対する機械的性質， J S S C， Vol. 6，  
No. 53， 1970.
- 3.6) 加藤勉，青木博文：電気抵抗溶接鋼管のひずみ履歴と残留応力－短柱の圧縮試験  
における見掛けの応力-ひずみ関係の影響について－，日本建築学会論文報告  
集，第230号，pp. 43-51，1975. 4.
- 3.7) Kato B. and Aoki H. : Residual Stresses in Cold-formed Tubes, Journal of  
Strain Analysis, Vol. 13 No. 4, pp. 193-204, 1978.
- 3.8) 辻文三：電縫鋼管の引張・圧縮挙動（I：単調載荷時の挙動解析），日本建築学  
会大会学術講演梗概集，pp. 809-810，1986. 8.
- 3.9) 辻文三，西本真佐美：電縫鋼管材の残留応力と力学特性，日本建築学会大会学術  
講演梗概集，pp. 877-878，1987. 10.
- 3.10) 加藤勉，秋山宏，鈴木弘之：軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力，日本建  
築学会論文報告集，第204号，pp. 9-17，1973. 2.
- 3.11) Kato, B. : Local Buckling of Steel Tubes in Plastic Region, Proc.  
International colloquium on stability of Structures under Static and  
Dynamic Loads, SSRC/ASCE, Washington, D. C., 1977. 3.
- 3.12) 鈴木敏郎，小河利行ほか：軸圧縮を受ける高張力鋼管の強度性状に関する研究，  
日本建築学会論文報告集，第321号，pp. 28-37，1982. 11.
- 3.13) 若林實，野中泰二郎ほか：電縫鋼管の座屈に関する実験的研究，京大防災研究所  
年報，第12号A，pp. 1-24，1969. 3.
- 3.14) 青木徹彦，福本秀士：小口径電縫鋼管の統計的材料特性と残留応力分布の評価，  
土木学会論文報告集，第314号，pp. 39-51，1981. 10.
- 3.15) 青木徹彦，福本秀士：小口径電縫鋼管柱の中心軸圧縮強度分布，土木学会論文報  
告集，第337号，pp. 17-26，1983. 9.
- 3.16) Kato B. and Lee M. J. : Column Strength of Cold-Formed Square and  
Circular Hollow Section Members, 構造工学論文集, Vol. 31B pp. 135-142,  
1985. 3.
- 3.17) 辻文三，康海偉：電縫鋼管柱の座屈耐力及び座屈後挙動，構造工学論文集  
Vol. 36B, pp. 359-368, 1990. 3.
- 3.18) 加藤勉，秋山宏ほか：軸力と曲げモーメントを受ける鋼管柱の弾塑性挙動，日本

- 建築学会大会学術講演梗概集, pp.877-879, 1970. 9.
- 3.19)加藤勉, 秋山宏他: 鋼管柱の弾塑性性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.461-462, 1971.11.
- 3.20)加藤勉, 秋山宏, 鈴木弘之: 鋼管梁の曲げ耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1019-1020, 1973.
- 3.21)五十嵐定義, 長尾直治: 電縫鋼管部材の局部座屈挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.829-830, 1975.
- 3.22)Toma, S., and Wai F. Chen: Analysis of Fabricated Tubular Columns, ASCE ST11, pp.2343-2366, 1979.11.
- 3.23)Donald R. Sherman, Hacik Erzurumlu, and Wendelin H. Mueller: Behavioral Study of Circular Tubular Beam-Columns, pp.1055-1068, 1979.6.
- 3.24)Donald R. Sherman: Tests of Circular Steel Tubes in Bending, ASCE ST11, PP.2181-2195, 1976.11.
- 3.25)辻文三, 西野孝仁, 中塚力: 鋼管柱の弾塑性変形性状に関する研究 (I), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.681-682, 1985.10.
- 3.26)辻文三, 西野孝仁, 中塚力: 鋼管柱の弾塑性変形性状に関する研究 (II), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1115-1116, 1986.8.
- 3.27)辻文三, 西野孝仁, 中塚力: 鋼管柱の弾塑性変形性状に関する研究 (III), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.837-838, 1987.10.
- 3.28)Tsuji, B., Nakatsuka, T.: Inelastice Strength and Deformation Behavior of Tubular Beam-Columns, Proc. of the International Meeting on Safety Criteria in Design of Tubular Structures, pp.27-35, 1986.7.
- 3.29)辻文三, 寺坂延章: 鋼管の弾塑性変形・崩壊挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1307, 1989.10.
- 3.30)加藤勉: 閉断面部材の局部座屈と変形能力, 日本建築学会構造系論文報告集, 第378号, pp.27-36, 1987.8.
- 3.31)最相元雄: 円形鋼管部材の変形能力式, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1109-1110, 1988.10.
- 3.32)越智健之, 最相元雄, 黒羽啓明: 冷間成形円形鋼管部材の変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1119-1120, 1986.8.
- 3.33)越智健之, 黒羽啓明: 冷間成形円形鋼管部材の耐力と変形能の統計的評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第391号, pp.59-71, 1988.9.
- 3.34)越智健之: 円形鋼管部材の終局耐力と変形能の統計的評価, 熊本大学学位論文, 1991.1.
- 3.35)鋼材倶楽部: 中低層鉄骨建物の耐震設計法, 1978.4.
- 3.36)Donald R. Sherman: Interpretive Discussion of Tubular Beam-column Test Data, Report to Shell Oil Company, pp.1-65, 1980.12.