

引張・圧縮を受ける円形鋼管部材の局部座屈および履歴挙動

LOCAL BUCKLING AND HYSTERETIC BEHAVIOR OF CIRCULAR
TUBULAR MEMBERS UNDER AXIAL LOADS

越智健之*, 山下正弘**, 小川厚治***,

黒羽啓明****, 村瀬良秀*****

*Kenshi OCHI, Masahiro YAMASHITA, Koji OGAWA,**Yoshiaki KUROBANE and Yoshihide MURASE*

Circular tubular struts with a compact section sustain local buckling after large deflection of these due to flexural buckling. Local buckling has significant effects on both post-buckling compressive and straightening-out tensile envelopes during cyclic loading. Although the inelastic cyclic behavior of struts has been the subject of intensive study, its interactions with local buckling still remain to be identified more clearly.

A point-hinge approach incorporating both inelastic and post-local buckling deformations was devised to calculate buckling, post-buckling, and inelastic tensile hysteretic envelopes of tubular struts under reversed load. This method of analysis was found to be capable of simulating experimental results satisfactorily. Several numerical results were presented to evaluate post-buckling capacity of bracings of frames to resist seismic shear loads.

Keywords : circular tube, cyclic loading, strut, buckling, local buckling

1. はじめに

ひずみ硬化を無視したヒンジ解は、繰返し荷重を受ける部材の変形挙動を大局的に表現することが可能である。また、その方法に基づけば構造物の変形挙動をとらえることが比較的簡単であり、繰返し荷重を受ける骨組の解析にも使用されている。さらに、その応用として曲げ座屈後の安定耐力を設計に生かすことも提案されている¹⁾。

しかし、実用的な径厚比の円形鋼管部材でも、曲げ座屈後に局部座屈により耐力が著しく低下することが多くの文献に報告されている。また、局部座屈による断面力の低下は履歴性状に大きく影響するので、局部座屈による耐力低下性状を把握できるモデルが必要であると考えられる。

局部座屈により断面力が低下を始めるときの変形量については、加藤、秋山の短柱圧縮試験の結果に基づいた考察がある²⁾。また、野本らはヒンジ解による解析結果と実験の荷重-軸縮み、荷重-横たわみ関係とを比較し、局部座屈の発生ひずみを理論値と比較している³⁾。

局部座屈後の耐力低下性状を考えた解析としては、福知ら⁴⁾とChenら⁵⁾の提案がある。福知らは圧縮方向に単調な荷重を受ける場合の荷重-変形関係についての解析を行っている。すなわち、局部座屈を生じなくて曲げ座屈のみが生じている領域ではCDC法に基づいた数値解析を行い、その解析と実験結果から局部座屈により断面力が低下を始めるときの変形量について考察している。さらに、断面力が低下していく領域の荷重-変形関係についてはヒンジ解を応用した解析を行っている。また、Chenらは等曲げを受ける部材が局部座屈により耐力低下を始めるときの変形量の実験式を用いて、曲げ座屈後に断面力の低下が始まる時の変形量を与えている。その後の挙動は運動学的許容場を仮定した塑性解析の結果から、局部座屈による断面力の変化を表現している。

Chenらと福知らの方法に共通しているのは、局部座屈による局所的なへこみを断面欠損として断面力を求めていることである。しかし、局部座屈の影響を断面欠損に置き換えるには複雑な仮定が必要となる。そのために、

* 熊本大学 助手

** (株)リョーセンエンジニアズ

*** 熊本大学 助教授・工博

**** 熊本大学 教授・工博

***** 三菱重工業(株)広島研究所

Research Assistant, Kumamoto University

Ryosen Engineers, Ltd.

Associate Professor, Kumamoto University, Dr. Eng.

Professor, Kumamoto University, Dr. Eng.

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Hiroshima Research & Development Center.

断面欠損の仮定を応用して任意の復元力を与えるのは困難であり、1 サイクルまでの荷重-変形曲線が与えられているのみである⁵⁾。

本論では、ヒンジ解に基づいて部材の繰返し変形挙動を考察する。また、信頼性の高い短柱の圧縮試験結果に基づいた実験式で局部座屈の影響を考慮する。ただし、ひずみ硬化を無視するので、応力は降伏応力を超えないとする。さらに、断面力の低下領域では局部座屈を生じている部分の応力が変化することを仮定する。それらの仮定に基づいた解析結果と実験結果とを比較検討する。また、解析結果を用いて基礎的な考察を行う。

2. 曲げ座屈後の挙動

多くの研究で、ヒンジ解による曲げ座屈後挙動の解析が行われている。それらを参考にして局部座屈以前の塑性ヒンジを有する部材の荷重-変形挙動を定式化しておく。なお、本論では曲げ座屈と局部座屈を考察の対象としているので圧縮方向を正とする。

2.1 横たわみによる軸方向変形

I) たわみ形にサイン関数を仮定した場合 (図-1)

軸縮み U_i と中央部の横たわみ W の関係は

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx = \pi^2 \cdot \frac{W^2}{4l} \dots\dots\dots (1)$$

材軸方向の中央部での曲げモーメントは

$$M = W \cdot N \dots\dots\dots (2)$$

全塑性状態の相関式は

$$\frac{M}{M_p} = \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{N_y} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 N_y : 降伏軸力 M_p : 全塑性モーメント

(1), (2), (3) 式から W を消去して軸方向力 N と軸縮み U_i の関係は

$$U_i = \frac{\pi^2}{4l} \left\{ \frac{M_p}{N} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{N_y} \right) \right\}^2 \dots\dots\dots (4)$$

II) たわみ形に2本の直線を仮定した場合

(1) 式と同様に

$$U_i = \frac{2W^2}{l} \dots\dots\dots (5)$$

(2), (3), (5) 式から

$$U_i = \frac{2}{l} \left\{ \frac{M_p}{N} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{N_y} \right) \right\}^2 \dots\dots\dots (6)$$

(4) 式は Paris の解の変形であり、加藤、秋山²⁾はこ

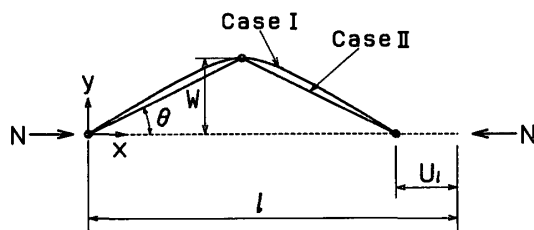


図-1 横たわみによる軸方向変形

の解を用いて曲げ座屈後の変形性状について考察している。しかし、(4) 式と (6) 式は一定比の関係にあり、同じ横たわみにおける軸方向力を比較するとその比率も 1 に近い。また、繰返し荷重下における引張領域のたわみ形にサイン関数を仮定するのは不自然である。野中⁶⁾のように弾性変形と塑性変形とを区別して、荷重-変形関係を数式で表した研究もある。しかし、本論では局部座屈後の繰返し変形挙動に主眼をおくので、取り扱いが簡単になるように引張と圧縮のたわみ形を区別しなくて、たわみ形を2本の直線近似として(6)式を使用する。

2.2 中立軸の移動による軸方向変形

(6) 式のみで与えた荷重-変形曲線は、曲げ座屈後の挙動の下限となり、実験結果との適合性は一概に良いとはいえない。井上らは幾何学的な関係から生じる軸方向変形を考えている⁷⁾。すなわち、断面の重心から中立軸までの距離 y_1 を用いたその軸縮みは、図-2を参照して

$$U_h = y_1 \cdot 2\theta \doteq y_1 \cdot \frac{4W}{l}$$

全塑性状態における y_1 は

$$y_1 = r \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{N_y} \right) \dots\dots\dots (7)$$

したがって、(2), (3) 式から

$$U_h = \frac{2r}{l} \cdot \frac{M_p}{N} \cdot \sin \left(\pi \cdot \frac{N}{N_y} \right) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、曲げ座屈後に横たわみが増大すると断面力が変化し、断面のひずみ分布が変化する。このために生じるひずみの累積を無視し、中立軸の位置ではひずみを生じないこととする。

曲げ座屈後の軸方向の変形 U は前述の各変形と弾性変形 U_e を足し合わせて

$$U = U_i + U_h + U_e \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

$$U_e = \frac{l N}{A E} \quad A: \text{断面積} \quad E: \text{ヤング係数}$$

3. 局部座屈による耐力低下

3.1 局部座屈の影響を含んだ応力-ひずみ関係

加藤、秋山²⁾は部材の曲げ座屈後の変形性状について

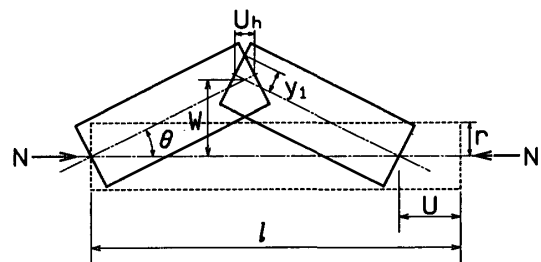


図-2 中立軸の移動による軸方向変形

簡便な荷重-変形関係を提案しているが、それを参考にして局部座屈による耐力低下を含めた応力-ひずみ関係を単純なモデルで表す。ただし、加藤、秋山のモデルよりも簡単で安全側となるように耐力が低下していく領域を無視し停留値のみを与える。すなわち、塑性ヒンジにおける応力-ひずみ関係に短柱圧縮試験の結果に基づいた図-3の実線で表される2段の剛塑性モデルを使用する。このモデルに必要な数値は耐力低下を始めるときのひずみ ϵ_m と耐力低下後の応力 σ_d である。

局部座屈後の応力 σ_d は降伏線による解析値⁸⁾を用いて与える。すなわち

$$\frac{\sqrt{3}}{4} n^2 + \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{D-t}{t}} \cdot \sin \theta' \cdot n - \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\cos \theta' \cdot \frac{2}{3} \pi^2 - 1 \right) = 0 \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 D : 鋼管の外径 t : 鋼管の厚さ

文献8)において n は短柱圧縮試験のひずみ硬化後の最大耐力と存在応力の比率としたが、ここではひずみ硬化を無視しているため、 $n = \sigma/\sigma_y$ とする。また、図-4に示すように、 θ' は降伏線の回転角である。

図-4において局部座屈を生じている領域の平均ひずみは

$$\epsilon_d = 1 - \cos \theta' \dots\dots\dots (11)$$

(10), (11) 式から求めた応力-ひずみ関係を図-5に示す。図-5によれば停留値 σ_d を与えるにはかなり大胆な仮定が必要であることが分かる。しかし、径厚比が大きくなると耐力低下を始めるときのひずみ量に変化するのみでその後の性状には大した差異はない。そこで、図-5の一点鎖線で示した $\epsilon_d = 0.1$ と解析結果の実線が交わる点の応力を σ_d とした。 ϵ_d を一定値とすると (11)

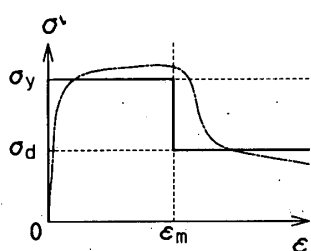


図-3 局部座屈による耐力低下性状と応力-ひずみ関係のモデル

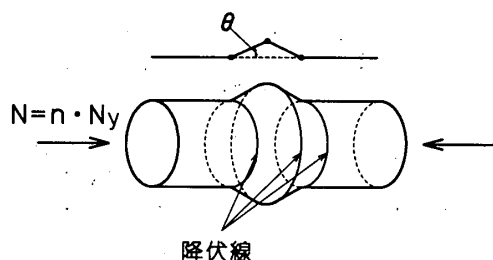


図-4 局部座屈の崩壊機構

式から(10)式の n の根を陽関数で与えることができる。すなわち

$$\sigma_d/\sigma_y = 1.29 (\sqrt{D/t + 2.94} - \sqrt{D/t - 1}) \dots\dots (12)$$

(12) 式を図-6に示す。

短柱の圧縮試験では、試験方法と ϵ_m を求める方法が ϵ_m の値に誤差を生じやすい。また、(10), (11) 式から ϵ_m を与えるには複雑な計算が必要であり実用的ではないことを文献8)に述べた。そこで、多くの実験資料に基づいた実験式⁸⁾を用いて ϵ_m を与える。すなわち

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_y} = 0.205 \left(\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{D}{t} \right)^{-1.39} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、(13) 式の降伏応力は短柱圧縮試験の降伏応力である。

なお、図-5のひずみは一波の局部座屈による軸縮みを局部座屈の波長で割った平均ひずみであり、局部座屈波の長さや波の数を定めなければ、部材の耐力低下性状を与えることができない。ここではひずみが ϵ_m に達すると応力は σ_d に一挙に低下することを仮定しているために、局部座屈の波の数あるいは局部座屈の領域の長さは部材の荷重-変形関係に関係しない。

3.2 局部座屈後の断面力

図-3の応力-ひずみ関係に基づいて、図-7のよう

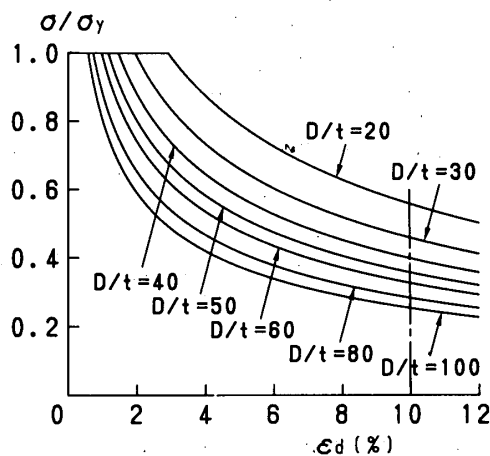


図-5 局部座屈後の応力-ひずみ関係

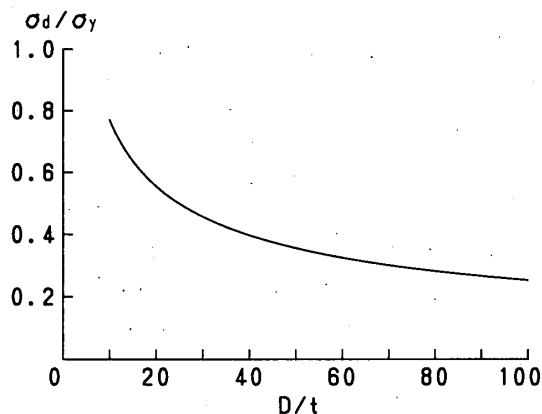


図-6 局部座屈後の応力と径厚比の関係

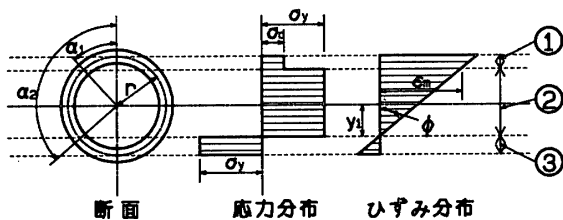


図-7 局部座屈後の断面の応力分布

に局部座屈後の領域①と圧縮の降伏応力を維持している領域②，引張の降伏応力となる領域③に分けて断面力を求める。領域①は平面保持を仮定して，曲率 ϕ と重心から中立軸までの距離 y_1 からひずみを求めその値が ϵ_m 以上になる領域とする。すなわち，重心からの距離が y である部分のひずみは

$$\epsilon = (y + y_1) \cdot \phi$$

このひずみが ϵ_m に等しい位置が領域①と領域②の境界 ($r \cdot \cos \alpha_1$) であるとすると

$$\alpha_1 = \arccos \left(\frac{\epsilon_m / \phi - y_1}{r} \right) \dots \dots \dots (14)$$

(14) 式を用いるには曲率と横たわみの関係が必要である。そこで，(6)，(8) 式に用いたたわみ形と異なるが，局部座屈で断面力が低下を始めるときの変形量が実験値と良く一致するので，たわみ形にサイン関数を仮定した曲率と横たわみの関係を用いる。すなわち

$$\phi = \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \cdot W \dots \dots \dots (15)$$

後に述べる引張荷重下での計算には (15) 式を用いる必要がない。また，(15) 式の定数項を変化させた解析も行ったが，局部座屈により断面力の低下を始めるときの変形量が増えるのみで，その後の挙動にはあまり変化が生じないことを確かめている。

また，軸方向力 N と曲げモーメント M は図-7 を参照して

$$N = N_y \cdot \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_y} \cdot \alpha_1 - \alpha_1 + 2 \alpha_2 - \pi \right) \dots \dots \dots (16)$$

$$M = \frac{M_p}{2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_y} \cdot \sin \alpha_1 - \sin \alpha_1 + 2 \cdot \sin \alpha_2 \right) \quad (17)$$

(16)，(17) 式の曲げモーメントと軸方向力が局部座屈後の断面力とする。すなわち，圧縮側最外縁のひずみが ϵ_m に達した後は，(3) 式の代わりに (16)，(17) 式を満足する (2) 式の横たわみ W を求める。そのたわみを (5) 式に代入して U_t を求める。また， y_1 から図-2 に示した U_h を与える。さらに，軸方向の弾性変形を求めて (9) 式と同様にそれらの和が局部座屈後の軸縮みとする。計算にはそれぞれの条件を満足するように収束計算が必要である。

4. 繰返し荷重下での挙動

4.1 弾性変形領域

繰返し荷重下では横たわみが存在する状態で弾性変形の性状を与えておく必要がある。

除荷領域においても図-8 のようにたわみ形が 2 本の直線であるとして，中央部に曲げ剛性 k_T の回転ばねを仮定する。また， k_T は曲げ剛性が EI の弾性棒とばね-剛体系モデルの座屈荷重 N_E が等しくなるように定める⁹⁾。すなわち，軸方向力が 0 となる時点の横たわみ W_0 を基準にして，除荷領域における軸方向力と横たわみの関係は

$$W = \frac{W_0}{1 - N/N_E} \dots \dots \dots (18)$$

したがって，(5) 式から横たわみによる軸方向変形は

$$U_E = \frac{2}{l} \left(\frac{W_0}{1 - N/N_E} \right)^2 \dots \dots \dots (19)$$

弾性領域の変形では中立軸の移動による軸方向の変形を考えないこととして除荷領域の軸方向変形は

$$U = U_e + U_E$$

4.2 局部座屈による応力低下

繰返し荷重下において最初に圧縮側で降伏し，その後局部座屈で耐力が低下し，さらに，荷重が反転していく過程は，図-9 のように塑性ヒンジにおける応力-ひずみ関係を仮定する。すなわち，1 サイクル目の圧縮領域では，前述のように ϵ_m を境として応力を変化させる。2 サイクル目以降の圧縮領域では，一度耐力低下した部分の応力の再上昇はなく，局部座屈後の応力 σ_d とする。以上のことから，前述の方法で圧縮領域の解析が可能である。

また，図-12 の実験資料では次の特性がある。

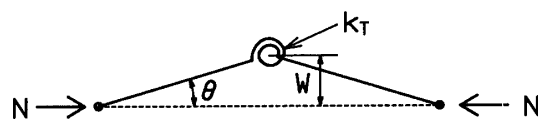


図-8 弾性領域の回転ばね

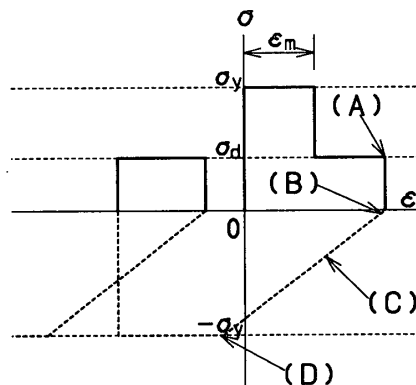


図-9 繰返し荷重下の応力-ひずみ関係

1) 実験結果に基づいた考察やヒンジ解に基づいた解析によると、圧縮領域の反転時の荷重が N_1 であれば、引張荷重が N_1 になると弾性変形から崩壊曲線（機構の荷重-変形曲線）に移るといわれている^{2),3)}。しかし、局部座屈を生じるような大きな変形を受けた後の実験結果はそうならなくて、引張の崩壊曲線に移った時点の荷重は N_1 をかなり下回る。（図-10）

2) 曲げ座屈変形を生じた後に、引張変形を十分に受けた場合には、軸方向力は降伏耐力に近い値になる。これは局部座屈を生じた後でも同様である。

これらの特性は、局部座屈後の応力 σ_a となった部分の応力が、部材として引張力を受けていく段階で変化するために生じると考えることができる。そこで、これらの特性 1), 2) は計算上の断面の応力を変化させることで対処する。すなわち

- 1) 引張の崩壊曲線に移った時点では、局部座屈で耐力の低下した図-7中①の領域の応力を 0 とする。
- 2) 横たわみが消失すると、局部座屈を生じた部分の応力は降伏応力に復帰する。

図-11 を用いて説明する。また、図-11 中の各段階の図番と図-9, 10 中の記号を一致させており、それぞ

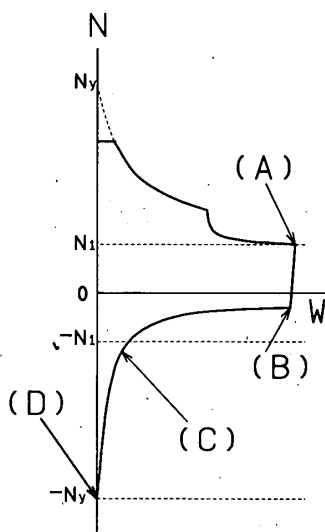


図-10 横たわみと軸方向力の関係

れの段階の応力は図-9, 10 に示したような履歴と対応している。図中 (A) の段階で荷重が反転したとすると、弾性除荷領域を経て、引張荷重下における崩壊曲線に移る (B)。すなわち、応力の正負が逆転し σ_a は σ'_a となる。横たわみが減少すると σ'_a は増大して (C)、横たわみが消失すると全断面が降伏応力となる (D)。

1), 2) の仮定から図-11(B), (D) における σ'_a と部材の横たわみ W の関係を求めることができるので、その 2 点の間を直線補間して中間段階である図-11(C) の σ'_a は

$$\sigma'_a = \frac{W \cdot \sigma_y}{W_B} - \sigma_y \dots \dots \dots (20)$$

ただし、 W_B : 引張荷重下において、弾性除荷から崩壊曲線に移る時点 (B) の横たわみ

(16), (17) 式右辺の符号を逆転し (20) 式の σ'_a を σ_a に代入することで、曲げモーメントと軸力の関係を与えると前述の圧縮荷重下での計算と同様に、引張荷重下での U_i と U_h を求めることができる。ただし、引張荷重下では局部座屈後の部分（図-7中①）は広がらないと考えられるので、図-7の α_1 は変化しないこととする。その後、部材の荷重が引張から圧縮へ移行した後は、図-9のように前回の履歴で σ_a となった部分の応力は σ_a であるとし、変形が大きくなり (16), (17) 式を満足する α_1 が前回の値を超えた場合にはその α_1 を有効とする。これらの仮定で繰返し荷重下での計算が可能である。

5. 実験結果と解析結果との比較

実験資料は文献 10) に公表した資料である。実験の

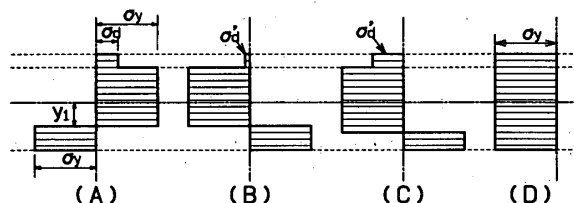


図-11 引張荷重下における応力の変化

表-1 試験体の寸法と素材の機械的性質

試験体名	D/t	λ	λ'	D (cm)	t (cm)	l (cm)	引張試験		短柱圧縮試験	
							σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	σ_y (t/cm ²)	σ_m (t/cm ²)
60-80	61.1	80.6	1.15	26.78	0.438	751.3	4.57	5.28	4.31	4.61
50-100	50.4	100.2	1.25	21.63	0.429	750.8	3.68	4.59	3.15	3.53
50-80-A	50.0	82.5	1.03	21.47	0.429	614.5	3.38	4.43	3.20	3.58
50-80-B	50.5	82.1	1.12	21.56	0.427	614.2	4.05	4.89	3.73	4.07
50-60-A	50.0	61.4	0.83	21.42	0.428	455.0	3.34	4.59	3.60	3.80
50-60-B	50.7	60.8	0.83	21.60	0.426	455.4	4.05	4.89	3.73	4.07
40-80	39.1	82.6	1.06	21.57	0.551	614.2	3.94	4.72	3.36	3.82
40-60	39.4	60.4	0.77	21.68	0.550	451.4	3.94	4.78	3.64	4.18
H40-60	39.0	60.4	0.92	21.69	0.556	451.5	5.62	6.44	5.06	6.08

ただし、 λ : 細長比 λ' : 無次元化細長比 σ_u : 引張強さ σ_m : 圧縮最大強さ

詳細はその文献を参照されたい。試験体の寸法等の概略を表—1に示す。同寸法の試験体を用いて変位振幅を変化させた多数の実験を行っており、紙面の都合からすべての実験結果と解析結果を比較することはできない。そこで径厚比、細長比を変化させた実験は網羅するようにして代表的な例を図—12に実線で示す。

ただし、実験結果の無次元化に使用した降伏応力は短柱の圧縮試験の結果である。解析値の無次元化にも圧縮の降伏応力を用いているが、(6)、(8)式あるいは(16)、(17)式の計算には引張の降伏応力を用いる。これは、ひずみ硬化を考慮した解析には残留応力の影響を含んだ圧縮の降伏応力が有効であるが^{8),11)}、曲げと圧縮を受ける部材の短柱領域における最大耐力は引張降伏応力を用いた設計式と良く一致する¹¹⁾ことから、残留応力の影響があまり関係しないものと考えられるヒンジ解には、引張の降伏応力を用いることが有効であると考えられるからである。

初期圧縮領域において接線剛性理論値 N_{cr} 以上となる場合にはそれ以上の曲線をカットする。2サイクル目からは、実験結果が最初の圧縮耐力よりも低下することを考慮してカットする耐力を N_{cr} の半分とする。ただし、崩壊曲線と弾性変形が交わる点はその基準値よりも低い場合には崩壊曲線を優先する。

ここで、接線剛性理論に必要な応力—ひずみ関係を Ramberg-Osgood 式で与える。すなわち

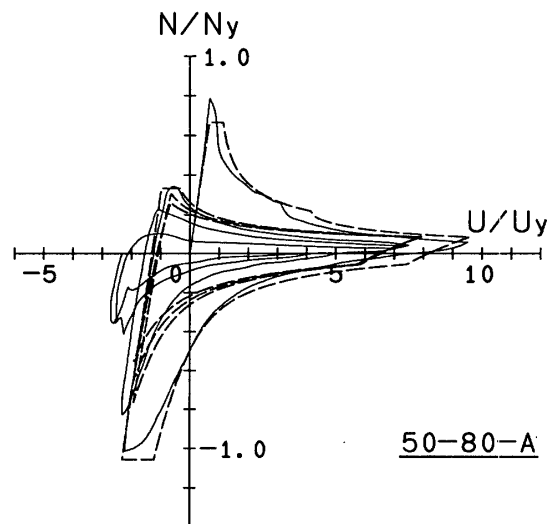
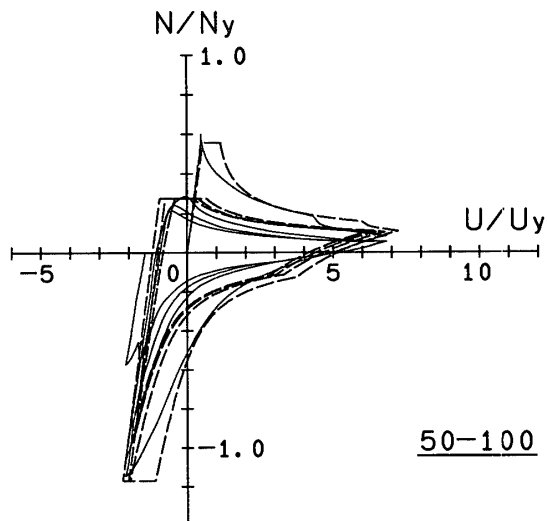
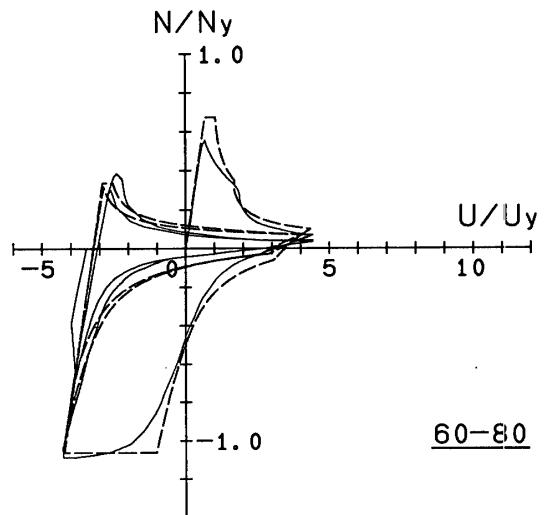
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^m$$

として、硬化指数 m は降伏比の関数として与える¹¹⁾。また、この式における σ_y は圧縮の降伏応力とする⁸⁾。2サイクル目から N_{cr} の半分の値を用いるのは、実験値がその程度の値であるからであり、これが Baushinger 効果の影響であるのか、あるいは局部座屈の影響であるのかは不明である。この問題は冷間成形の影響を考えると複雑であり、この問題を解明するには別の方法での実験が必要である。

以上の仮定に基づいて得られた解析値を図—12に破線で示す。図—12によれば、荷重—変形関係における1回目の最大耐力は試験体により計算値との対応が異なり、曲げ座屈直後の軸方向力は解析結果が実験結果に比べて高いことが分かる。しかし、変形が大きくなるに伴い実験結果と解析結果は近くなる。局部座屈で耐力の低下する領域では両者はよく一致している。また、繰返し载荷における局部座屈後の挙動も大局的に表せている。

実験の観測によれば、局部座屈後に繰返し荷重を受けると、短柱の圧縮試験のような単純なちょうちん形の局部座屈ではなく、へこみや非軸対称の局部的な変形を生じており、図—4に示したような降伏線を仮定した解析値が適切であるとは考えられない。また、 ϵ_m もおもに

ちょうちん形の変形を生じた短柱圧縮の試験結果から得た実験式である。しかし、それらのことを無視した解析結果と実験結果はよく一致している。へこみや非対称の変形を考慮することは、実用的方法では不可能であり、繰返し荷重下での挙動を簡単に表現するには、ここでの方法が有効であるといえる。



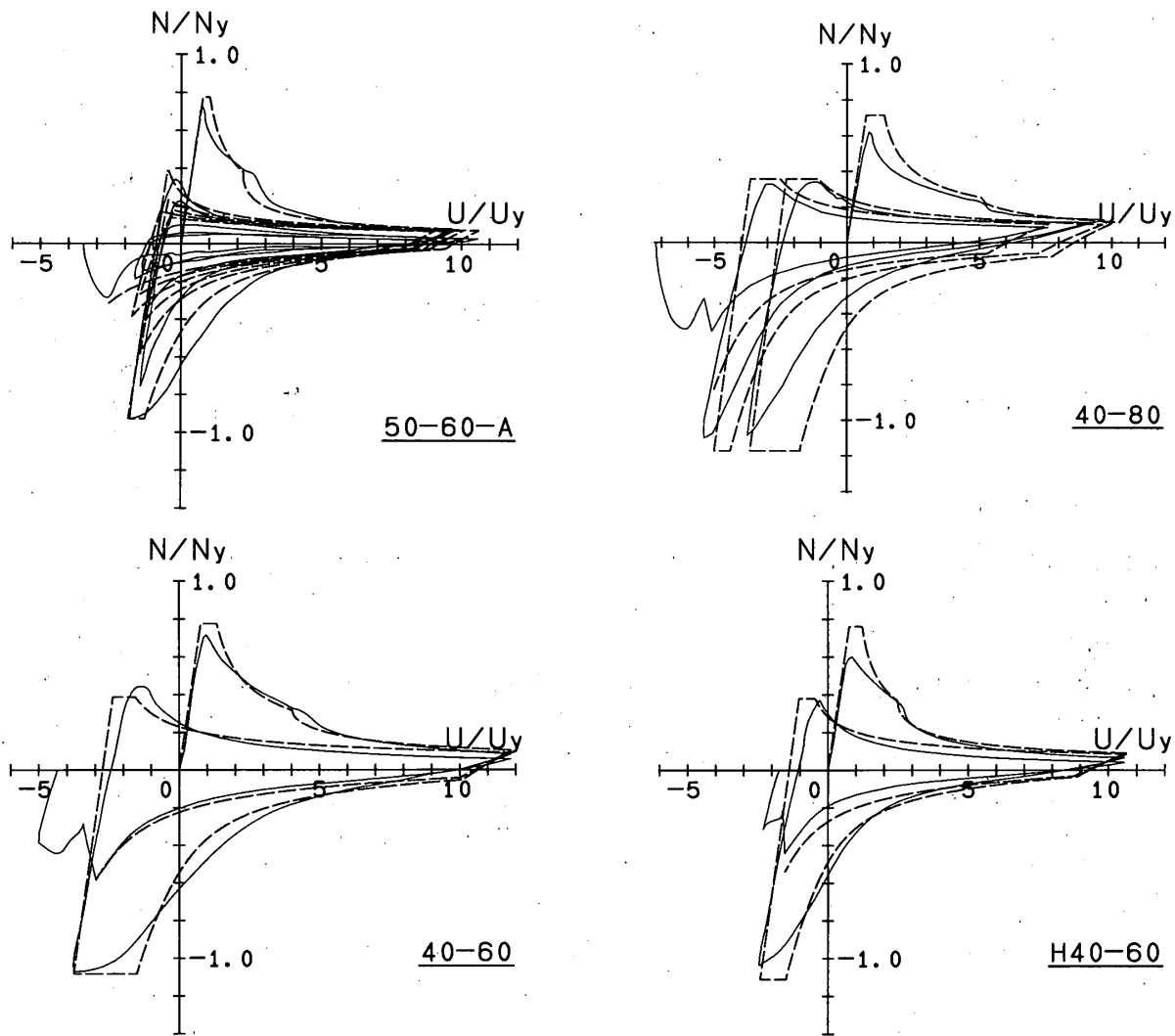


図-12 実験結果と解析結果

6. 局部座屈により断面力が低下を始めるときの変形量

規準(案)¹⁾では本論で扱うような部材の変形能力の規定はなく、曲げ変形の塑性倍率から径厚比が算定されている。しかし、規準(案)にあるような曲げ座屈後の安定耐力を設計に生かすためには、局部座屈を生じなくて安定耐力を維持できる変形量についての考察が必要である。また、骨組に筋かいとして細長比の大きな部材を用いた場合には、圧縮の強さよりも圧縮領域においてどの程度の変形まで局部座屈を生じずに骨組の変形に追随できるかが問題であろう。そこで、前述の方法を用いてその変形量について考察する。

局部座屈以前では圧縮側最外縁のひずみ ϵ_c は (7) 式から

$$\epsilon_c = r \left[1 + \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{N_y} \right) \right] \cdot \phi \dots \dots \dots (21)$$

ϵ_c が ϵ_m に達した時に断面力が低下することにして、 N_y の計算には引張の降伏応力を使用しており、(13) 式の降伏応力とは異なる。そこで、引張と圧縮の降伏応力の比率に統計的な平均値⁸⁾を使用して、(13)

式は引張降伏応力を用いて近似的に

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_v} = 0.207 \left(\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{D}{t} \right)^{-1.38} \dots \dots \dots (13)'$$

(21) 式の ϕ には (15) 式を用いて $\epsilon_m = \epsilon_c$ とし、無次元化細長比 λ' ($1/\pi \cdot \sqrt{\sigma_y/E} \cdot \lambda$) と軸力比 n (N/N_y) で整理すると軸力比の関数は

$$\begin{aligned} f_i(n) &= \frac{1}{n} \left[1 + \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot n \right) \right] \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot n \right) \\ &= \frac{\pi \cdot \lambda'^2}{4} \cdot 0.207 \left(\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{D}{t} \right)^{-1.38} \dots \dots \dots (22) \end{aligned}$$

また、(6)、(8) 式を無次元化して

$$\frac{U_i}{U_y} = \frac{16}{(\pi^2 \cdot \lambda')^2} \left[\frac{1}{n} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot n \right) \right]^2 \dots \dots \dots (6)'$$

$$\frac{U_h}{U_y} = \frac{8}{\pi^3 (\lambda')^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sin(\pi \cdot n) \dots \dots \dots (8)'$$

ただし、 U_y : 降伏軸力時の弾性変形 ($\epsilon_y \cdot l$)

$U_e/U_y = n$ であるから、(9) 式に基づいた断面力が低下を始めるときの変形 U_{max} を U_y で無次元化した値は、無次元化細長比と無次元化径厚比の関数となる。2

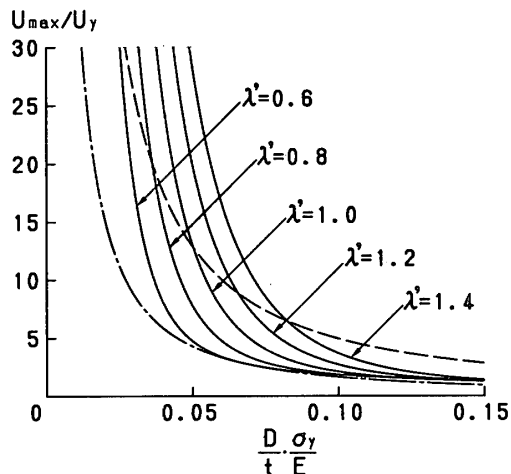


図-13 断面力が低下を始めるときの変形量

分法で求めた (22) 式の n を (6)', (8)' 式に代入した結果を図-13 に実線で示す。この図によれば無次元化径厚比が大きくなるに従って、局部座屈により耐力が低下するときの変形量が小さくなる事が分かる。また、無次元化細長比が大きくなると変形能力は増大している。これらの傾向は、実験報告¹⁰⁾にも報告しており実験値とよく一致した。図中の破線は、(13)' 式であり短柱が局部座屈のみで耐力が低下するときの変形量である。また一点鎖線は (13)' 式の 1/3 の値である。細長比が異なっても実線の下限值は同じ値になる傾向があり、(13)' 式の 1/3 程度である。

加藤、秋山の仮定²⁾では、無次元化細長比が小さい場合には短柱の圧縮試験と変形能力が等しくなり、無次元化細長比が大きくなると変形能力が一定値まで低下するとしている。一定値まで変形能力が低下することはここでの結果と良く一致しているが、無次元化細長比の影響はここでの結果や実験報告¹⁰⁾と異なる。この違いは、細長比の領域に関係するものと考えられる。加藤、秋山が考察の対象としたのは、細長比が 50 以下である。このような部材では、曲げ座屈を生じる以前に軸方向の塑性変形を生じるので塑性領域で局部座屈のみを生じる短柱の結果と直接比較することができるものと考えられる。しかし、比較的長柱の場合にはここで示したように曲げ変形によるひずみ分布が問題となり、局部座屈のみを生じる短柱の結果と傾向自体も異なる。

ここでの解析では曲げ座屈以前の軸方向の塑性ひずみを無視しており、短柱領域部材の挙動については考察できない。しかも、局部座屈により明らかに耐力が低下した短柱領域における部材実験の報告は少なく、この効果を定量化するには資料不足である。そこで、細長比の領域を比較的大きな場合に限って議論を進める。鋼管構造設計施工指針¹²⁾には、実験資料の降伏応力を用いた無次元化径厚比に対する変形能力の変化についての考察があるが、公称の降伏応力を使用すれば無次元化径厚比を

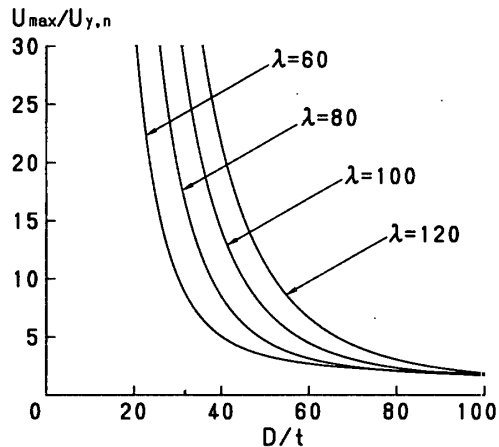


図-14 断面力が低下を始めるときの変形量 (STK 41)

小さく見積もることになり危険側の評価である。また、規準(案)では、実際の降伏応力を用いて実験式を補正しているが、設計と実状が異なるので必ずしも安全側とはいえない。比較的長柱の場合には圧縮強さよりも局部座屈を生じる変形量が問題となるので、変形量を公称の降伏応力で無次元化しておけば、設計の際に実際の変形量を与えることになる。そこで、径厚比の変化に伴う降伏応力の変化を考慮して STK 41 材の統計量⁸⁾は

$$\sigma_y = 4.69 \left(\frac{D}{t} \right)^{-0.0622} \quad (\text{t/cm}^2) \dots \dots \dots (23)$$

ただし、規準(案)と同様に変形能力の算定には、この値の変動を考えなくて確定値とする。(23)式を用いて、無次元化細長比と無次元化径厚比をそれぞれ細長比と径厚比に換算した結果を図-14 に示す。ただし、図中の $U_{y,n}$ は公称の降伏応力 (2.4 t/cm²) を用いた軸方向の降伏変形量である。図-14 によれば細長比が大きい場合には、局部座屈以前の変形量はかなり大きくなる事が分かる。

7. まとめ

たわみ形を仮定した繰返し軸方向力を受ける部材の解析モデルに局部座屈の影響を単純な形で当てはめた。簡単な解析としては実験結果とよく一致した。解析に使用した変数の統計量はすでに明らかにしており、このモデルを使用すれば、大局的な挙動を簡便に説明することができる。また、モデルを用いて局部座屈による耐力低下の特性値を求め、設計変数の影響を考察した。これらの結果は実験値とよく一致している。また、その結果は既往の報告と異なる傾向があることを指摘した。

今後の課題は、短柱領域の部材についての考察と局部座屈でひずみ集中を起こした後のきれつを生じる変形についての考察である。そのことは、曲げ座屈、局部座屈以前の軸方向の塑性変形の累積や、局部座屈後のひずみの集中を仮定すればここでの方法を応用して定量化でき

る可能性がある。また、これらの問題が解決すれば、実験結果によればかなり大きい局部座屈後のエネルギー吸収能力をどの程度まで設計に反映するかが明らかになる。

謝 辞

住友金属工業株式会社の坂本 傑氏から実験資料の提供を受けた。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説，1990.2
- 2) 加藤 勉，秋山 宏：鋼構造筋違付骨組の復元力特性，日本建築学会論文報告集，第260号，pp.99-107，1977.10
- 3) 野本敏治，榎沢 誠，鈴木 隆，横山 保，藤田 譲：圧縮および引張荷重を受ける構造要素の変形挙動(第2報)繰返し荷重を受けるパイプの変形挙動，日本造船学会論文集，第158号，pp.413-422，1985.11
- 4) 鈴木哲也，福知保長，尾崎猛美：局部座屈を伴う鋼管の座屈とその後の挙動に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造Ⅱ，pp.1123-1124，1989.10
- 5) Sohal, I. S., Chen, W. F. : Local Buckling and Inelastic Cyclic Behavior of Tubular Members, Thin-Walled Structures 5, pp.455-475, 1987.10
- 6) 野中泰二郎：繰返し軸方向荷重を受ける部材の履歴挙動に関する閉解，第1部 基礎式の誘導，日本建築学会論文報告集，第334号，pp.1-8，1983.12，第2部 解析例，日本建築学会論文報告集，第338号，pp.29-35，1984.4，第3部 塑性履歴性状，日本建築学会論文報告集，第343号，pp.42-50，1984.9
- 7) 井上一朗，清水直樹：ブレース架構の保有水平耐力に関する考察，日本建築学会構造系論文報告集，第388号，pp.59-69，1988.6
- 8) 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
- 9) 加藤 勉，向井昭義：繰返し荷重を受ける筋違の復元力特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造Ⅱ，pp.801-802，1987.10
- 10) Matsumoto, T., Yamashita, M., Murase, Y., Harada, H., Hashinaka, I., Sakamoto, S., Iida, T. : Post-Buckling Behavior of Circular Tube Brace under Cyclic Loadings, Proc. of International Meeting on Safety Criteria in Design of Tubular Structures, Tokyo, pp.15-25, 1987.2
- 11) 越智健之，黒羽啓明：曲げと圧縮を受ける冷間成形円形鋼管部材の終局耐力の統計的評価，日本建築学会構造系論文報告集，第408号，pp.55-65，1990.2
- 12) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説，1990.1

(1990年5月25日原稿受理，1990年8月28日採用予定)