段付き円管の塑性バルジとエネルギー吸収*

王 燕 建^{*1}, 林 沛 征^{*2}, 平 野 嘉 一^{*2}
青 砥 史 明^{*3}, 一之瀬 和夫^{*4}, 小久保 邦雄^{*5}

Plastic Bulge and Energy Absorption of Stepped Circular Thin Pipe

Yanjian WANG, Peizheng LIN, Yoshikazu HIRANO,
Humiaki AOTO, Kazuo ICHINOSE and Kunio KOKUBO^{*6}^{*6} Kogakuin University, Dept. of Mechanical Eng.,
1-24-2 Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-8677 Japan

Load carrying capacity and energy absorption of plastic bulges of stepped pipes enlarged by dies at the edge are investigated in this paper. The pipes are enlarged by dies and then compressed axially on the edge in the experiment. Relations between load and displacement, and the deformation process of plastic bulge are examined in the experiments. The process of enlargement by a die and compression are simultaneously analyzed by finite element analyses. The load-displacement relations and the deformation modes predicted by finite element analyses are in good agreement with the experiments. The energy absorption ability in monotonic increasing load and cyclic varying load are also estimated by analyses. In the deformation process of a moving plastic bulge the constant load carrying capacity is obtained.

Key Words: Cylindrical Pipe, Plastic Bulge, Finite Element Analysis, Energy Absorption, Structural Analysis

1. 緒 言

薄肉円管は軽量で高剛性のため、各種構造物に最も多く利用される形状の部材である。しかし、圧縮応力が生じる薄肉の円管では座屈のため大変形が生じて崩壊する。圧縮応力が塑性域では座屈変形はやや穏やかに生じ、このような塑性座屈による変形を衝撃荷重に対するエネルギー吸収のために利用することも検討されており、円管の塑性域での大変形挙動についても把握することが重要となっている⁽¹⁾⁽²⁾。この円管の大変形現象は荷重や形状パラメータの組合せにより種々の現象が生じるため、円管の大変形挙動を評価するためには形状パラメータ、荷重条件、境界条件などの影響を把握しておくことが重要である⁽³⁾。

切削加工で製作した段付き円管のエネルギー吸収特性についても検討されているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、本研究では円管

の一部を拡管して製作した形状が一様でない円管を対象として衝撃エネルギー吸収材として利用可能かどうかについて研究する。その第一ステップとして、静荷重に対する変形状態を実験と解析により検討する。外径 25 mm (肉厚 1 mm) のアルミニウム合金製の小形円管パイプの端部を拡管して段付き円管に軸圧縮荷重を加え、円管の塑性バルジの挙動について実験を行い、さらに有限要素法により解析する。

解析は有限要素法の汎用ソフト ANSYS を用いて大変形、塑性、接触を含めた高度の非線形解析を実施する。これにより拡管工程から圧縮負荷時の工程までを一貫解析し、変形と荷重変位関係を求めエネルギー吸収量の比較検討を行う。

2. 試験体の形状と材料

実験では外径 25.0 mm (肉厚 1.0 mm)、長さ 150 mm のアルミニウム合金 (A 6063) パイプを使用した。このパイプは引抜きにより製造されたものである。このパイプを図 1 の I ~ III に示すように下端を固定し上部の一部を拡管工具で拡管部分の長さが 50 mm 程度である 4 種類の段付き円管を製作した。この 4 種類の拡管モデルに対する拡管工具の形状と寸法を図 2 と表 1 に示す。

* 原稿受付 2001 年 7 月 18 日。

^{*1} 工学院大学工学部機械工学科大学院 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2)。^{*2} 学生員、工学院大学工学部機械工学科大学院。^{*3} (株)日立マクセル情報メディア事業部 (〒618-8525 京都府乙訓郡大山崎町小泉 1)。^{*4} 工学院大学工学部機械システム工学科。^{*5} 正員、工学院大学工学部機械工学科。

E-mail: at21317@ccs.kogakuin.ac.jp

円管の内径 (D) に対する拡管工具の外径 (D_r) の比 D_r/D を拡管率とし、表 1 では D は 23.0 mm として表示した。図 3 に示すように圧縮実験では拡管により製作した段付き円管を下端で支持して、圧縮工具により上端から強制変位を与えて荷重と変位の関係を求める実験を行った。

有限要素法による解析を実施するためパイプ材料について材料試験を行い応力-ひずみ関係を求めた。この材料の材料定数は、ヤング率 $E=73.5$ GPa, ポアソン比 $\nu=0.33$ である。0.2%耐力は製作時の引抜きによる加工硬化のためやや高く 202.6 MPa であった。

3. 実験結果

実験では全モデルの上端に最大 30 mm まで変位を与える。モデル 1.1-30 では変形の進行に伴い表面同士の接触が強くなるため変形が安定しないものも見られた。

図 4 はモデル 1.3-30 の拡管前、拡管後、および上端に変位を与えたときの変形図で、図 5 はモデル 1.3-30 の変形後の断面図である。このモデルでは上端変位が 0.5, 7.0 mm のときに、それぞれ耐荷能力が最大、最小となり、12.4 mm を超えるとほぼ一定の荷重になる。

Table 1 Test model and its dimension

Model	D_r/D	D_r (mm)	α (°)	R (mm)
1.3-30	1.3	30.1	31.0	7.1
1.4-30	1.4	32.1	33.5	7.4
1.1-30	1.1	25.2	21.3	6.5
1.3-45	1.3	30.0	43.2	4.7

Fig. 1 Method of experiment

Fig. 2 Geometry of dies Fig. 3 Experimental setup

図 6 に全モデルの荷重と変位の関係を示す。図 6 よりすべてのモデルでほぼ同じような荷重-変位関係が得られていることがわかる。変形が小さい領域で荷重は最大に達し、不安定領域を経て荷重は最小になり、その後は拡管されていない部分が順次拡管されてゆくことになり、荷重はほぼ一定となる。最大荷重を比べると 15.9 kN(モデル 1.1-30)が最大であり、続いて 15.0 kN(モデル 1.4-30), 13.4 kN(モデル 1.3-30), 11.6 kN(モデル 1.3-45)の順である。また、最大荷重の値は異なるが、モデル 1.1-30 を除いて上端が 15 mm 程度変位すると径の小さい円管部が一定の荷重で拡管されるようになるためほぼ同じような荷重-変位曲線が得られている。

4. 有限要素法による解析

4・1 解析の手順 図 1 に示す実験の過程に対応して円管パイプを拡管したときの残留応力も含めて評価できるようにするため、解析では図 7 に示す手順で

Original enlargement 7mm 12.4mm 30mm 50mm

Fig. 4 Deformation modes (model 1.3-30, experiment)

Fig. 5 Deformation modes (model 1.3-30, cut model)

Fig. 6 Load and displacement (experiment)

拡管から圧縮過程までを同一の有限要素モデルにより一貫して計算した。拡管工具は解析では同じ形状をもつ剛体と仮定した。

解析では計算時間を減らすため、実験で用いた試験体の長さの約1/3、つまり50 mmの長さの円管をモデル化した。このため解析モデルで用いた拡管部は実際の約半分の25 mm程度の部分である。また、図6の実験結果によると試験体1.1-30を除いて変位20 mm以降は荷重がほぼ一定になるので、変位25 mm程度まで解析を行った。実験で一樣な変形をしないモデル1.1-30については変位20 mm程度まで解析した。

4.2 解析方法 円管の拡管工程と圧縮工程を含めて一貫解析するため図8(b), (c)に示す拡管剛体を利用して軸対称要素を用いて解析する。汎用解析ソフト ANSYS で解析するため有限要素タイプは大ひずみを表現できる図9(a)に示す4節点の軸対称ソリッド要素 VISCO 106 を用いる。板厚方向に6~8程度の分割を行っている。この要素では節点で要素座標系の x, y 方向の2自由度の変位成分を有する。材料は真応力と対数ひずみの関係で示され、大変形を考慮して回転する要素座標系で表現される。円管の拡管時および圧縮荷重による変形では工具と円管、および円

管の表面同士の接触問題となる。したがって、接触する可能性のある部分に接触要素 CONTACT を用いて接触対象物体に食い込まないようにする必要がある⁽⁶⁾。この軸対称モデルの接触を表現するために図9(b)に示す3節点からなる CONTACT 48 面接触要素を使用する。この接触要素の形状は、一方の面(ターゲット面)上の2節点で作られる線を一辺とし、もう一方の面(コンタクト面)上の節点を頂点とする三角形によって作られ、図9(b)に示すものであり、接触はコンタクト節点がターゲット面に食い込むときに発生する。

ANSYS の材料非線形解析では、まず弾性域を一つの直線で表し、塑性域は多直線近似による等方硬化則

Fig. 10 Stress and strain

Fig. 7 Procedure of finite element analysis

(a) Axisymmetric model (b) Enlarged pipe (c) Axisymmetric pipe

Fig. 8 Axisymmetric finite element model

(a) VISCO 106 (b) CONTACT 48

Fig. 9 Axisymmetric finite element and contact element

Fig. 11 Deformation of model 1.3-30 (analysis, enlargement)

Fig. 12 Deformation of model 1.3-30 (analysis, compression)

〔Multilinear Isotropic Hardening (MISO)〕として解析することができる。降伏判定は von Mises の降伏条件を用いる。ここで用いたアルミ合金 (A 6063) の実測による応力-ひずみ関係を図 10 に示す。境界条件は解析モデルの下端を完全に拘束し、計算の安定性を考えて上端に強制変位を与えて、大ひずみ、材料非線性、接触を考慮した計算を行った。

5. 解析結果および考察

5.1 変形図と解析結果 図 11, 12 はモデル 1.3-

Fig. 13 Deformation of model 1.3-45 (analysis, compression)

Fig. 14 Deformation of model 1.4-30 (analysis, compression)

Fig. 15 Deformation of model 1.1-30 (analysis, compression)

30 の拡張工程と圧縮工程の変形図で、拡張前、拡張中、拡張後、拡張剛体の撤去の解析である。この後の圧縮工程の解析では変位が 0 mm (圧縮開始), 0.4, 6.4, 10, 15, 25 mm と圧縮剛体の撤去の順に図示してある。図 13, 14, 15 にモデル 1.3-45, 1.4-30, 1.1-30 の

Fig. 16 Load and displacement (analysis)

Fig. 17 Analysis and experiment (model 1.3-30)

Fig. 18 Analysis and experiment (model 1.3-45)

Fig. 19 Analysis and experiment (model 1.4-30)

Fig. 20 Analysis and experiment (model 1.1-30)

変形図を示す。

全モデルの荷重-変位関係を図 16 に示す。実験とほぼ同様な曲線が得られている。モデル 1.3-30 では図 17 より最大、最小荷重は変位 0.4 mm のときの 13.2 kN と 6.4 mm のときの 3.85 kN であり、ほかのモデルについても図 18~20 から読取ることができ、実験と解析はほぼ一致していることがわかる。モデル 1.1-30 については図 15 と図 16 に示すように、円管上端が 8.7 mm 程度変位するとパイプの表面同士が接触し始め変形が進行しにくくなるため、荷重は急激に増加する。図 6 の実験でも同様な結果が得られている。

5.2 実験と解析の比較 試験体の全長は 150 mm であるが、解析では計算時間を減らすため一様部分は省略した。実験と解析の荷重-変位関係の比較では実験結果の変位から一様部分の変形分を修正した。すなわちこの修正では段付き部を離れた一様円形断面は、一様な変形をしているとしてひずみの値に一様部分の長さを乗じて一様部分の変形を実験値より引き算した。このようにした一貫解析と比較できる部分の荷重-変位関係を図 17~20 に示す。図 17~20 のそれぞれモデルに対する荷重-変位関係の一貫解析と実験結果を比較すると、一貫解析と実験結果がよく一致していることがわかる。とくに最大荷重についても一貫解析と実験ではよく一致している。図 12~15 に示す変形図を調べると、拡張した部分が最大荷重に大きく影響し、また、テーパ部が折れ曲がり、軸線にほぼ直

角になって変形するとき荷重が最小になることがわかる。そのあと荷重が大きくなるのは拡張されていない部分が変形し始めるときである。拡張されていない部分が拡張されながら変形を続けるときには荷重はほぼ一定になる。図 21 はモデル 1.3-30 の各変位における変形図の解析と実験の比較であり、上の図は一貫解析で、下の図は実験による変形後の断面図である。

以下でこのような荷重-変位関係に及ぼす影響因子について検討してみる。

(1) 加工ひずみによる流動応力増加の影響 図 12~15 に示すように円管には拡張後残留ひずみが生じ、拡張後に圧縮荷重を受けると見かけ上降伏応力が増加する。この加工ひずみによる流動応力の増加が圧縮荷重-変位の関係に与える影響を検討する。このためには次のような解析を行う。まず、モデル 1.3-30 の拡張した後の形状寸法で新しく作った有限要素モデルにより荷重-変位関係を求める。この拡張工程を含めないで拡張後のモデルを単に圧縮する解析を圧縮解析と呼ぶことにする。圧縮解析と一貫解析の荷重-変位関係の比較を図 22 に示す。この結果より、拡張後の加工ひずみによる流動応力の増加が荷重-変位関係に影響し、とくに最大荷重が約 20% 上昇していることがわかる。しかし、変位 20 mm 以降の拡張工程が影響していない部分が変形していく段階では、両曲線は重なり影響はなくなっている。これより拡張後焼なましを行って実験をする場合でも変形部分が移動した後の段階ではその後の変形能力には影響がないと考えてよい。

(2) 摩擦係数の影響 拡張後の円管を圧縮し円管が変形すると、表面同士が接触することはすでに見たとおりである。この現象は摩擦係数によりかなり影響をうけることが予想される。拡張率が小さく接触現象がいちばん顕著なモデル 1.1-30 を対象にして検討を行う。摩擦係数を 0.1, 0.2, 0.3 として解析したが、荷重-変位関係は図 23 に示すようにほとんど影響されていないことがわかる。

(3) 拡張の R が最大荷重に及ぼす影響 変形

Fig. 21 Deformation modes (model 1.3-30)

Fig. 22 Comparison of analysis (model 1.3-30)

Fig. 23 Effect of friction coefficient μ (max disp. 13 mm)

モードをみると拡張した部分が最大荷重に大きく影響していることが予想される。ここでは図 24 に示す拡張部の R の最大荷重への影響を圧縮解析のみを用いて調べてみる。解析はモデル 1.3-30 の寸法を考えるが、拡張による板厚の変化を考慮しないですべて 1 mm の肉厚モデルを使用した。モデルの R を 1, 5, 10, 15 mm として変位 2 mm を与えて解析する。この結果を図 25 に示す。最大荷重は R の影響をうけ、R が大きいとき最大荷重も大きくなるのがわかる。

6. 段付き円管のエネルギー吸収特性

構造物は塑性変形するときエネルギー吸収し、その総吸収量は荷重-変位線図において線図と変位軸で囲まれる部分の面積で評価される。このような円管を衝撃荷重に対するエネルギー吸収材として利用可能かどうかを検討するにはエネルギー吸収量が重要なパラメータとなる。図 17~20 の荷重-変位関係の実験と解析の結果はほぼ一致しており、この荷重-変位関係の結果を調べれば、モデルのエネルギー吸収特性が知られる。荷重が最大荷重になったあと大きく低下し、数 mm 変位するとまた増加する。このように耐荷能力が大きく変動する現象はこの円管を衝撃荷重吸収材として実際に利用するうえでは好ましくない現象であると考えられる。一方、モデル 1.1-30 を除くとほかのモデルでは変位 20 mm 以降荷重がほぼ一定になり、

この部分は一定の耐荷能力が期待できエネルギー吸収材として適している。このような荷重-変位関係を有する段付き円管を作成するには拡張したあと最大荷重を超えるまで負荷し、その後除荷すればよいことがわかる。このようなケースをモデル 1.3-30 を対象として解析する。計算は簡単のため図 22 に示す比較結果をもとに圧縮解析のみで行う。

表 2 と図 26 に示す解析過程は、まず荷重が最小値(変位が 6.4 mm のとき)になる前の 4 mm, 0.5 mm の変位を与え(解析 1, 2 の Step I), その後で除荷する。圧縮解析で除荷するには、逆の方向に荷重が零になるまで変形させる(解析 1, Step II), または変位を 0 mm になるまで戻し(解析 2, Step II), その後再度変位を与える(Step III)。

単調増加で 20 mm まで変位を与える場合と解析 1, 2 の Step I から Step III までの除荷を含む場合の荷重-変位関係の比較を図 27 に示す。図 27 より変位が大きくなると両者はよく一致していることがわかる。これより段付き円管を軸圧縮する場合では、荷重が最小になる前に除荷あるいは変形を零に戻しても再び軸圧縮を与えると変形が進んだ段階では荷重-変位関係が変わらない性質を有することがわかる。次にエネルギー吸収特性を検討するため、さらに表 3 に示す二つの解析 3, 4 を行う。解析 3 では、まず荷重が最小になる変位 6.4 mm よりも大きな変位 6.5 mm を与えた

Table 2 Disp. history in analysis 1 & 2 (1)

	Step I (disp.)	Step II (disp.)	Step III (disp.)
analysis 1	0~4 mm	4~3.7 mm	3.7~20 mm
analysis 2	0~0.5 mm	0.5~0 mm	0~20 mm

Fig. 24 Effect of R

Fig. 25 Effect of R

Table 3 Disp. history in analysis 3 & 4 (2)

	Step I (disp.)	Step II (disp.)	Step III (disp.)
analysis 3	0~6.5 mm	6.5~6.2 mm	6.2~20 mm
analysis 4	0~20 mm	20~19.7 mm	19.7~40 mm

Fig. 26 Displacement history (analysis)

Fig. 27 Monotonic and cyclic loading (max disp. 20 mm)

のち荷重が零になるまで除荷し、再度軸圧縮する。解析4では20 mmまで変位を与えたのち除荷し、その後圧縮する。解析3, 4の結果を図28, 29に示す。

図28で解析3のStep IIIの負荷時の初期の荷重-変位曲線は、Step IIの除荷時の荷重-変位曲線と完全に重なっている。図28のIIIの部分では、荷重は一定値になるまで変位とともに増加する。解析結果4によると図29に示すように大きく変形した後の負荷過程では、荷重-変位関係がほぼ直線になり、この部分では安定な荷重-変位関係が得られエネルギー吸収量は高いことがわかる。これよりすでに述べたように一定の荷重-変位曲線を有する段付き円管を実現することができる。

単調増加の荷重ではなく、例えば地震荷重のように不規則に変動する交番荷重に対するエネルギー吸収部

材を考えるとときには負荷と除荷の繰返しに対してエネルギー吸収特性を検討する必要がある。この検討を表4に示す変位履歴を用いて行う。変位の+は上端に引張りの変位を与えることを意味する。解析5では、+2~-2 mmの範囲で変位を変化させる場合、解析6では解析4のStep IIの変位19.7 mmからさらに負荷し40 mmで除荷した場合である。変形図を図30, 31に示す。荷重-変位の関係を図32, 33にそれぞれに示す。解析5では、+2~-2 mmの範囲で変位を変化させるとき、このヒステリシスにより多くのエネルギー吸収が生じ、とくに圧縮後-2 mmまで引張りを与えるとき、約1.5 倍のエネルギーを吸収し、この引張状態から圧縮変位を与えるとき、耐荷力は大きく増大する。一方、解析6は解析4の続きであり、ほぼ荷重一定の条件でエネルギー吸収をすることが明らかになった。

Table 4 Disp. history in analysis 5 & 6 (3)

	Step I (disp.)	Step II (disp.)	Step III (disp.)
Analysis 5	0~2 mm	2~-2 mm	-2~2 mm
Analysis 6	19.7~40 mm	40~20 mm	20~40 mm

Fig. 28 Load and displacement (analysis 3, I, II, III)

Fig. 29 Load and displacement (analysis 4, III)

(a) 2 mm (Step I) (b) -2 mm (Step II) (c) 2 mm (Step III)

Fig. 30 Deformation mode (analysis 5)

(a) 20 mm (b) 30 mm (c) 40 mm

Fig. 31 Deformation mode (analysis 6)

Fig. 32 Load and displacement (analysis 5)

Fig. 33 Load and displacement (analysis 6)

形をとりあげ、軸圧縮荷重のもとで塑性バルジが成長していく挙動について有限要素法による解析と実験を行った。本研究で得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) 荷重は変形の初期の段階で最大値に達し、テーパー部分の変形が進行するときに最も低くなり、その後ほぼ一定になる。これは、拡張されていない部分が拡張されながら変形が持続するためである。

(2) 有限要素法による軸対称モデルで、大変形、塑性、接触を含めた解析が可能である。特に拡張工程も含めることにより拡張と圧縮の一貫解析も可能である。

(3) 荷重-変位関係で荷重がほぼ一定値になる部分は安定な変形状態であり、エネルギーの吸収量が高

い。この部分はエネルギー吸収材として実際に利用できる性質を持っていることがわかる。

ここでは静荷重に対するエネルギー吸収特性を検討したが、今後動荷重に対する特性やき裂の発生限界も検討する必要がある。

文 献

- (1) Mamalis, A. G., ほか 3 名, *Int. J. Mech. Sci.*, 30-3/4 (1988), 249-256.
- (2) 都井裕, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, (1985-7), 209-214.
- (3) 小久保邦雄・ほか 3 名, 機論, 61-583, A (1995), 140-145.
- (4) 村瀬勝彦・西村融, 機論, 52-479, A (1986), 1663-1668.
- (5) 谷村眞治・ほか 3 名, 機論, 65-635, A (1999), 186-192.
- (6) 久田俊明・野口裕久, 非線形有限要素法の基礎と応用, (1998), 323, 丸善.