円管の横圧縮変形に及ぼす肉厚の影響*

小林 秀 敏^{*1}, 臺丸谷 政志^{*1}, 永 井 光 輝^{*2}Effect of Tube Thickness on Deformation of Circular Tubes
in Lateral Compression

Hidetoshi KOBAYASHI, Masashi DAIMARUYA and Kouki NAGAI

In the present study, the effects of tube thickness and the mechanical properties of tube materials on the elastic-plastic deformation of circular tubes compressed laterally between rigid plates, were investigated. A series of lateral compression tests were carried out for a commercially pure aluminium, 1197-O, and two aluminium alloys, 6063-T5 and 2014-T1, at a quasi-static rate. In most of the specimens of 2014-T1 and 6063-T5, fracture occurs during lateral compression tests. The location of relatively thinner specimens was the outer surface close to the horizontal ends and that of thicker specimens was the inner surface close to the vertical ends. In order to investigate stress and strain in the deforming tube, finite-element analyses were also performed. The load/deflection curves of tubes obtained from the FEM analysis showed good agreement with those obtained from experiments. The FEM results could explain well the change of fracture location.

Key Words: Plasticity, Nonferrous Metal, Finite-Element Method, Lateral Compression, Circular Tube

1. 結 言

円管の横圧縮変形に関しては、変形により蓄積されたひずみエネルギーを特殊な積分的手法で求めた研究⁽¹⁾を初め、荷重/変位曲線を剛完全塑性⁽²⁾や線形ひずみ硬化則⁽³⁾⁽⁴⁾, n 乗硬化則⁽⁵⁾を仮定して解析的に求めた研究、鋼など数種の金属の薄肉円管をガラス板上で実験し、荷重点の移動距離と変位との関係を実験的に求めた研究⁽⁶⁾などが報告されている。有限要素法を用いた数値解析も、両端支持された曲面板⁽⁷⁾⁽⁸⁾や円管を対象⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に行われ、板中央部の飛び移り変形に関する考察や、平板と円管表面の接触に関する接触モデルの提案等がなされている。

また、衝撃エネルギーの吸収機構への応用の見地から円管の動的横圧縮変形を取扱った研究もいくつか報告されている。例えば、ひずみ速度依存性を含む構成式を用いた解析的研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾や、直径方向に補強された円管⁽¹³⁾や複数の円管を連ねた構造物⁽¹⁴⁾の動的変形などの研究がある。

以上の研究は、円管の平均直径(D)と肉厚(t)の比

(t/D)が、0.05以下の薄肉円管で、しかも変形中に割れを生じない比較的軟質な材料を対象としている。横圧縮変形中に割れを生じる円管に関する研究は、割れを生じない円管の製作や割れの工学的利用の上からも必要であるにもかかわらず、二、三の報告⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾を除いてほとんど行われていない。割れの発生に大きく関与している因子は、材料の機械的性質と円管の形状、特に肉厚であろうと思われる。

本研究では、3種類のアルミニウム合金丸棒より製作した肉厚の異なる円管の横圧縮試験を行い、荷重/変位曲線や割れの発生位置と円管の材質や肉厚との関係を明らかにした。さらに、変形中の円管内部の応力分布と割れとの関係を明らかにするために有限要素法による数値解析も実施した。

2. 実 験

直径25 mmの1197-O, 2014-T1, 6063-T5の丸棒より図1に示すような外径と管の長さが一定の管状試験片を作製し実験に供した。肉厚 t は、 $t=0.8, 1.8, 2.8, 3.8$ mmの4種類(これらは、 $t/D=0.035, 0.083, 0.135, 0.192$ にそれぞれ対応)とし、内面はリーマで仕上げた。横圧縮試験は引張試験機に圧縮用治具を取付け、この治具の間に厚さ0.05 mmのテフロンシート

* 原稿受付 平成2年9月10日。

^{*1} 正員、室蘭工業大学工学部 (〒050 室蘭市水元町27-1)。^{*2} 学生員、室蘭工業大学工学部。

を介して試験片を置き、1.0 mm/minの試験速度で行った。実験は、割れを生じるものは、割れて荷重が著しく落ち込むところで、割れを生じないものは上下内面が接触したところで、打ち切られた。

表1に、引張試験より求めた3材料の機械的性質を示す。表1の $\sigma_{0.2}$ 、 σ_B 、 ϵ_f は、それぞれ、0.2%耐力、引張強さ、破断時の公称ひずみであり、 B と n は、 n 乗硬化則を真応力/真ひずみ曲線に適用したときの強度係数とひずみ硬化指数、そして、 σ_f は、破断時における真応力である。

3. 実験結果

肉厚 $t=0.8$ mmの試験片の横圧縮試験より得られた荷重(P)/変位(δ)曲線を、図2に示す。縦軸は単位

表1 供試材の機械的性質

Materials	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϵ_f (%)	B (MPa)	n	σ_f (MPa)
1197-O	54	115	36.1	221	0.24	646
2014-T1	179	271	14.5	450	0.17	330
6063-T5	171	198	18.5	273	0.09	304

$t = 0.8, 1.8, 2.8, 3.8$ mm

図1 横圧縮試験片の形状

図2 肉厚0.8 mmの試験片の荷重/変位曲線

長さ当たりの荷重(P/L)、横軸は変位の平均直径に対する比(δ/D)である。いずれの材料も、変形初期では、荷重と変位は線形関係を保っているが、塑性領域の拡大にともなって、荷重の著しい増加を伴わず変形のみが進行していく。そして、1197材では $\delta/D=0.8$ 付近から、2014材では $\delta/D=0.5$ 、6063材では $\delta/D=0.7$ 付近から、荷重は急激に増大している。1197-Oと6063-T5は、上下内面が接触するまで割れを生じなかったが、2014-T1は、 $\delta/D=0.7$ 付近で円管の両サイドで割れを生じ、急激な荷重の低下が観察された。

図3は $t=1.8$ mmの試験片の結果である。1197-O材は、 $t=0.8$ mmの場合と同様に上下内面が接触するまで割れを生じなかったが、6063-T5材は、 $\delta/D=0.75$ 付近('F'のマーク)で左右の外側で割れを生じた。しかし、割れを生じた後も荷重は低下せず、点Cで上下内面が接触するまで増加した。2014-T1材は $\delta/D=0.5$ 付近で左右の外側に割れを生じた。

$t=2.8$ mmの円管の P/δ 曲線を図4に示す。これら

図3 肉厚1.8 mmの試験片の荷重/変位曲線

図4 肉厚2.8 mmの試験片の荷重/変位曲線

は、図3 ($t=1.8$ mmの結果) とほぼ同様の結果となっている。ただ、2014-T1 材の割れは、1.8 mmの試料に比べ著しく早い段階 ($\delta/D=0.17$ 付近) で、しかも左右外面ではなく上下内面に発生した。

肉厚 $t=3.8$ mm の円管の結果を図5に示す。割れを生じなかったのは1197-Oのみで、他の二つの材料は、どちらも、変形の初期の段階で上下内面に割れを生じた。

4. 考 察

4・1 変形中の荷重と肉厚の関係 図2～5から明らかなように、肉厚が大きくなるに従い、変形に要する荷重は著しく大きくなっている。この荷重と肉厚

図5 肉厚3.8 mmの試験片の荷重/変位曲線

図6 ある変位量における肉厚と荷重の関係

との関係を調べるために、ある変位量 (δ/D) における荷重値 (P/L) を四つの肉厚の試料の結果より求め、 δ/D をパラメータとして P/L と t/D を両対数グラフ上にプロットした。

図6は、試験中どの肉厚の円管も割れを生じなかった1197-Oのものである。 $\ln(P/L)$ と $\ln(t/D)$ は、どの変位量においても良い直線関係を示していることから、 P/L と t/D の間には、

$$P/L = a(t/D)^b \quad \dots\dots\dots (1)$$

の式で表される関係が成り立ちそうである。

そこで、式(1)で各データを整理して得た a , b の値を δ/D に対して図示すると図7, 8を得る。図中▲や■は三つのデータ点から、他の○□△は四つのデータ点より得たものである。図7より、 a の値は強度の高い材料ほど大きな値を示し、 δ/D が大きくなるに従い大きくなっている。一方、 b の値は、材料や δ/D の値に関係なくほぼ2.0前後の値を示しており、 P/L

図7 a値の変形量による変化

図8 b値の変形量による変化

は、

$$P/L \propto (t/D)^2 \dots\dots\dots (2)$$

と考えてもよさそうである。この関係を用いると、同一材であれば、一つの肉厚の横圧縮試験のデータを用いて、他の肉厚を持つ円管の任意の変位量 (δ/D) における P/L のおよその値を推定できる。

例えば、1197-O, $\delta/D=0.4$, $t=1.8$ mm ($t/D=0.078$) の P/L は 36.8 N/mm であり、これより a の値は、 $a=36.8/(0.078)^2=6\,049$ N/mm と求まり、 $t=3.8$ mm ($t/D=0.189$) の P/L を推定すると、 $P/L=6\,049 \times (0.189)^2=216$ N/mm となる。ちなみに、実験より得た $t=3.8$ mm の円管の $\delta/D=0.4$ における P/L の値は、226 N/mm であり、推定値は実験値とおおむね一致している。

4・2 円管の割れ 前述のように、割れは 6063 と 2014 の円管で観察され、比較的薄肉の円管は両サイドの外側(図9のHの位置)に、厚肉になると上下内面(図9のVの位置)に生じている。図10に、これらの円管に生じた割れの二、三の例を示す。図10の(a)は、2014-T1, $t=1.8$ mm に生じた位置Hの割れ、(b)は、2014-T1, $t=3.8$ mm 位置V、(c)は、6063-T5, $t=3.8$ mm 位置Vの割れである。2014 に生じた割れは、(a)、(b)ともに単純で直線的な鋭い割れであるのに対し、6063 のそれは、H、V のどちらの位置でも(c)のような数本の比較的短いジグザグした割れが生じており、材料によって割れの様子に差異が見られる。2024 材は、引張試験において、ほとんどくびれを生じ

ないで破断する脆性的な材料であるのに対し、6063 材は、比較的大きなくびれを生じ延性的な破断形態を示す材料であるために、円管の割れにもこのような差異が生じたものと思われる。

これら両材料と 1197-O の試験片の試験後の状況をまとめて表2に示す。表中、C は上下内面が接触するまで割れを生じなかったことを、H、V は、それぞれ、位置H、Vで割れを生じたことを示しており、 $(\delta/D)_f$ は割れを生じたときの (δ/D) の値である。 $(\delta/D)_f$ は、2014 では、 $t=1.8$ と $t=2.8$ mm の間で、6063 では、 $t=2.8$ と $t=3.8$ mm の間で大きく減少している。この減少は、割れの位置の変化と良く対応しており、位置Vに生じる割れは、変形の早い段階で起きることがわかる。逆に、変形の比較的初期で位置Vに割れを生じなければ、その円管は、割れないか、変形がある程度進んだ後、位置Hに割れを生じると考えられる。

さらに、この表から、同一材ならば、肉厚が大きくなるに従い、(割れない)→(位置Hでの割れ)→(位置Vでの割れ)へと推移していくと思われる。しかも、表1より各材料の強度を考慮すれば、この変化は、強度の高い材料ほど小さい肉厚で生じるものと思われる。

4・3 円管内部の応力と割れの関係 割れの発生位置が肉厚によって異なるのは、変形中の円管内に応力分布が異なるためと考えられる。これを確認するために、2014-T1 材の $t=1.8$ mm と $t=2.8$ mm の円管について二次元弾塑性有限要素法による解析を行った。

通常、この種の解析には、幾何学的非線形性を考慮した大変形理論に基づく方法が用いられている⁽⁹⁾が、ここでは、比較の変形量が小さい範囲での解析であること、簡便性などの点から微小変形理論に基づく方法

表 2 各試験片の試験後の状況

Materials	Thickness (mm)			
	0.8	1.8	2.8	3.8
1197-O	C	C	C	C
2014-T1 (δ/D) _f	H 0.70	H 0.47	V 0.17	V 0.12
6063-T5 (δ/D) _f	C	H,C 0.72	H,C 0.62	V 0.24

図 9 割れの観察された位置

図 10 割れの例 [a)2014-T1, $t=1.8$ mm
b)2014-T1, $t=3.8$ mm, c)6063-T5, $t=3.8$ mm]

を採用した。解析条件は、試験片の長さが円管直径の半分程度のリング状の試験片を用いており、円管の軸方向の変位は拘束されないと思われるので、平面応力条件とした。今回採用した平板と円管表面の接触モデルは、後藤、柴田によって提案されたモデル⁽⁹⁾である。このモデルでは、1ステップの計算で今までの荷重點とその隣の節点との高さが逆転するときは、両者の高さが同じになるようにそのステップの増分を調整し、その後は複数の節点に分布荷重をかけ計算を進め、さらに、分布荷重が作用している節点のうち、反力が零とみなして差支えなくなったとき、その節点を荷重點からはずし、荷重點の移動を行っている。なお、本解析で用いた手法は、先の報告⁽¹⁰⁾で詳述している。

図 11 実験と FEM より得た荷重/変位曲線の比較

図 12 変形中の相当応力分布

解析対象は、変形の対称性より 1/4 円弧とし、これを 8 節点アイソパラメトリック要素を用いて 48 要素 (197 節点) に分割した。計算に用いた構成式は、弾性では $\sigma = E\varepsilon$ 、塑性では $\sigma = B\varepsilon^n$ を使い、材料定数は、引張試験から得た 2014-T1 材のそれで、 $E=73$ GPa, $B=450$ MPa, $n=0.17$, $\sigma_v=160$ MPa である。ここで、 ν はポアソン比、 σ_v は降伏応力で、応力/ひずみ関係が線形からはずれる点での応力である。

得られた $t=1.8$ と $t=2.8$ mm の円管の P/δ 曲線を実験値と併せて図 11 に示す。FEM の解析より得られた P/δ 曲線は、いずれも実験値と良い一致を示しており、本解析は、実験を比較的精度良くシュミレートできていると思われる。

図 12 は、変形初期、中期、末期における $t=1.8$ mm の円管内部の相当応力分布である。変形の進行に伴い、荷重點は中央部から次第に外側へ移動し、それにつれて、高い応力値を示している領域も、中央部から外側へ移動している。このため、1/4 円弧上部内面(位置 V)付近は、変形中期から末期にかけて除荷が生じている。一方、1/4 円弧右端外面(位置 H)付近の相当応力は、常に増加しており、変形末期に最も高い応力値を示している。

そこで、位置 V と H 付近の相当応力 σ_v , σ_h の、変形の進行に伴う変化を図 13 に示す。 $t=1.8$ mm の σ_v は変形初期から比較的高い値を示し、 $\delta/D=0.17$ 付近で $\sigma_v=308$ MPa に達した後次第に減少している。これは、変形の進行に伴って荷重點が外側に移動して行くために、位置 V 近傍では除荷が生じたためである。これに対し、 σ_h は、変形初期では σ_v よりはるかに小さいが、 $\delta/D=0.25$ あたりで降下してきた σ_v に追いつき、その後も上昇を続け $\delta/D=0.5$ で σ_f (表 1 で示し

図 13 位置 H と V における相当応力の変化

た引張試験における破断時の真応力, 330 MPa)に達している。一方, $t=2.8$ mm では, σ_v , σ_H とともに, $t=1.8$ mm のそれらと比べて大きく, どちらも除荷を生じることなく単調に増加し, σ_v は $\delta/D=0.15$ 付近で, すでに σ_f の値に達している。

割れは, 表 2 に示したように, $t=1.8$ mm では, $(\delta/D)_f=0.47$, $t=2.8$ mm では, $(\delta/D)_f=0.17$ で生じており, 応力が σ_f に達する δ/D と良く一致している。これらのことを考慮すると, 割れの発生位置の H から V への移動が以下のように, 説明できる。すなわち, $t=1.8$ mm の円管は, 変形初期に急激に大きくなる σ_v が, ある値 σ_c (2014 の場合, σ_c は σ_f に近い応力であると思われる)に達する前に荷重点の移動により生じた除荷のために低下していくので, σ_H が σ_c に達する $\delta/D=0.5$ 付近で位置 H に割れを生じる。一方, $t=2.8$ mm の円管は, σ_v が, この低下が始まる前に σ_c に達してしまい, その時点, つまり変形の比較的初期の時点で位置 V に割れを生じる。

5. 結 論

3 種類のアルミニウム合金棒から肉厚を 4 段階に変えた円管を製作し, 準静的な横圧縮試験と, 有限要素法による数値解析を行い, 以下の結論を得た。

(1) ある変位 δ/D における P/L は, 肉厚 t の増加に伴い, 材料の機械的性質や δ/D に関係なく, ほぼ t/D の二乗に比例して大きくなる。

(2) 同一材ならば, 肉厚が大きくなるに従い, (割れない)→(円管両サイド外面での割れ)→(円管上下内面での割れ)へと推移していき, この推移は, アルミニウム合金に関しては強度の高い材料ほど小さい肉厚で生じる。

(3) 変形初期において, 円管の上下内面近傍の相当応力は, 両サイド外面近傍の応力より高い応力を示

すが, 荷重点の移動による除荷のためにあるピーク値を境にしだいに減少する。他方, 両サイド外面近傍の相当応力は変形の進行とともに常に増大する。

(4) 円管の内部応力がある数値を越えると, その近傍に, その時点で割れが発生するという考え方を導入すれば, 解析結果から割れの発生や発生位置の変化を説明できる。

終わりに臨み, 本研究に使用した 1197-O, 2014-T1 および 6063-T5 丸棒をご提供いただいた古河アルミニウム工業(株)の浅見氏に, 厚く感謝申し上げる。

文 献

- (1) Mutchler, L. D., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **27** (1960), 740.
- (2) Deruntz Jr, J. A. and Hodge Jr, P. G., *Trans. ASME, J. Appl. Wech.*, **30**(1963), 391.
- (3) Redwood, R. G., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **31** (1964), 357.
- (4) Reid, S. R. and Reddy, T. Y., *Int. J. Solids Struct.*, **14** (1978), 213.
- (5) 小林・ほか 2 名, 軽金属, **39**(1989), 8.
- (6) Reddy, T. Y. and Reid S. R., *Int. J. Solids Struct.*, **16** (1980), 545.
- (7) 井関・ほか 3 名, 機論, **54**-500, A(1988), 628.
- (8) 井関・ほか 3 名, 機論, **54**-501, A(1988), 1044.
- (9) 後藤・柴田, 第 39 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1988-10), 107.
- (10) 小林・壺丸谷, 機論, **57**-538, A(1991), 1371.
- (11) Reid, S. R. and Reddy, T. Y., *Inst. Phys. Conf. Ser. 47, Mech. Prop. High Rates of Strain*, J. Harding ed., (1979), 288.
- (12) Calladine, C. R. and English, R. W., *Int. J. Mech. Sci.*, **26**(1984), 689.
- (13) Reid, S. R., ほか 2 名, *Int. J. Impact Eng.*, **1**(1983), 175.
- (14) Veillette, J. R. and Carney III, J. F., *Int. J. Impact Eng.*, **7**(1988), 125.
- (15) 大久保・ほか 2 名, 第 72 回軽金属学会春期大会講演概要集, (1987-5), 127.
- (16) 木村・ほか 2 名, 第 74 回軽金属学会春期大会講演概要集, (1988-5), 165.