アルミニウム合金A2014の変形挙動に及ぼす静水圧の影響

篠原 宗憲*・内田 史彦*・宮川 松男**

Effect of hydrostatic pressure on deformation behavior of A2014 aluminum alloy

UDC: 669.715' 3' 721' 782: 539.3: 539.4.016

Munenori SHINOHARA*, Fumihiko UCHIDA* and Matsuo MIYAGAWA**

Tensile tests of smooth and notched bar specimens were carried out under hydrostatic pressures up to 4000 kgf/cm². The reduction of area in the smooth specimens increases with increasing the pressure, but the uniform strain does not. These facts suggest that plastic workings under hydrostatic pressure are usually favorable in the working limit, but some workings such as bulging in which the working limit is governed by instability are not so favorable. Notched specimens of A2014-T6 brittlely fractured. The finite element method was used for an elastic-plastic analysis of this problem. The plastic stress concentrates at a point slightly inner from the root of notch. This point concurs with the origin of void. The central part of the notched specimen remains to be in an elastic state at fracturing. Growth of voids is restrained by hydrostatic pressure. The fracture load of the notched specimen increases with increasing pressure.

(Received August 9, 1979)

1. 緒 言

金属材料の変形挙動に及ぼす静水圧の影響については、多くの研究者により広範囲な材料について研究されており、アルミニウムおよびアルミニウム合金についても研究されてきた^{1)~6)}。

静水圧下で引張試験を行なうと、くびれが発生するまでの一様ひずみは変化せず、3軸引張応力状態となるくびれ発生から破断に至るまでの局部ひずみが増大することが確認されている⁷⁾。引張りを受ける材料の変形と破壊に及ぼす静水圧の影響を定量的に論じるためには、くびれ発生から破断に至るまでの応力状態を知る必要がある。くびれ部の応力状態については Bridgman や Davidenkov らを初めとする解析があるが、いずれも最小断面のひずみ分布は一様であると仮定しており、多少問題があるように思われる。

鋭い切欠き材を引張ると延性材料でもぜい性的に破断することがある。これは、切欠き部では変形初期から3軸の引張応力状態になり、変形が拘束されるためである。延性が小さい材料の場合には、切欠き底近傍のみが局部的に降伏した状態で破壊を生じるため、有限要素法による弾塑性解析によって応力状態を比較的精度良く検

討することが可能である。

本研究では、以上の立場からアルミニウム合金A2014のO材及びT6材について、平滑材および切欠き材の引張試験を高静水圧下で行ない、その変形挙動に及ぼす静水圧の影響を検討し、更に有限要素法による弾塑性解析結果を用いて考察したものである。

2. 実 験

2.1 実験装置および実験方法

使用した高静水圧実験装置⁸⁾は7,000 kgf/cm²までの静水圧下で多目的な実験ができるように設計されたもので、圧力室は直径80 mm×高さ120 mm、負荷能力は150 tonである。実験は一定の圧力および速度で行なうことが可能である。圧力はマンガニン線コイル、荷重はひずみゲージ型ロードセルでそれぞれ高压容器内で検出し、試験片のチャック間の伸びは容器外でプランジャ変位を検出し、電磁オシログラフに自記させた。

実験は試験片をセットしたヨーク型引張ジグを高压容器内に組込み (Fig. 1) 鋼球を介してプランジャ先端に取付けたロードセルで押すことによつて試験片に引張力を加えて行なう。実験は大気圧から4,000 kgf/cm²までの各静水圧下で、引張速度約1 mm/分の条件で行なつ

* 東京都立大学工学部 (東京都)。Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University (Tokyo).

** 東京大学工学部 (東京都)。Faculty of Engineering, University of Tokyo (Tokyo).

Fig. 1 Tensile test jig put in high pressure chamber.

- 1. Plunger 2. Strain gage type load cell
- 3. Steel ball 4. High pressure chamber
- 5. Tension yoke type tensile jig 6. Specimen
- 7. Manganin coil pressure gage

Table 1 Chemical composition of specimen.
(wt%)

	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
A2014	0.6	1.0	0.23	0.82	0.61	0.13	0.04	0.04	Bal.

Table 2 Mechanical properties of specimens.

	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm ²	σ_B kgf/mm ²	δ %
A2014-0	17.5	19.1	15.0
A2014-T6	47.7	50.3	10.4

た。

2.2 供試材および試験片

供試材はアルミニウム合金A2014のO材およびT6材で、板厚15.5mmの圧延材である。その化学成分をTable 1に、機械的性質をTable 2に示す。試験片は圧延方向に採取し、機械加工後、O材については175℃×1時間の低温焼なましを施した。試験片の形状寸法をFig. 2に示す。切欠き材は60°のV形環状切欠き丸棒で、切欠き深さを一定にし、切欠き底半径 ρ を0.15および1.0mmの2種として応力集中の度合を変えている。図中に

(A) Smooth specimen

(B) Notched specimen

Fig. 2 Schematic drawing of specimens

Fig. 3 Tensile load-elongation curves of smooth specimens pulled under different pressures.

弾性応力集中係数を示す。

3. 実験結果および検討

3.1 平滑材の変形挙動

Fig. 3にA2014のO材およびT6材の各静水圧下における荷重-伸び図を示す。いずれの場合も最高荷重点まで曲線はほとんど重なり、くびれ発生以後の変形挙動が変化し、静水圧が高いほど破断までの変位は大きく、ま

Fig. 4 Distribution of the reduction of area for specimens fractured under different pressures.

Fig. 5 Effect of pressure on the reduction of area of smooth specimen.

た破断荷重は小さくなっている。この実験の範囲では、A2014の縦弾性係数 E 、降伏応力 σ_y および加工硬化指数 n は静水圧の影響を受けないと考えられる。なお、T6材の場合は高強度アルミニウム合金特有の弾完全塑性体に近い挙動を示している。

材料の一樣変形能は、一般に最高荷重点までのひずみ量で表示されるが、ここでは破断後のひずみ分布を求めることにより一樣ひずみを評価する方法⁹⁾を採用して比較する。Fig. 4は各静水圧下で破断したO材の断面減少率の分布を示す。このひずみ分布はバルバ形をしており、ここで採用した方法で一樣ひずみを評価することができる⁹⁾。破断部の最大断面減少率は静水圧が高いほど大きい、くびれ部から十分離れた部分では静水圧による差はない。このことは、静水圧は一樣ひずみには影響を及ぼさないことを示している。したがって、板材の張出し成形のような引張りの不安定限界がその加工限界を律する形式の成形に対しては、静水圧の付加はほとんど寄与しないものと考えられる。

Fig. 5はO材とT6材の破断部の断面減少率の静水圧による変化を示す。いずれの場合も断面減少率は静水圧

Fig. 6 Tensile load-elongation curves of notched specimens pulled under different pressures.

の増加とともに増加している。特に、T6材は大気圧下では断面減少率が20%とかなり延性が小さな材料であるが、4,000 kgf/cm²の静水圧下では60%にも延性が増加している。このことは高強度アルミニウム合金は大気圧下では延性が乏しく、塑性加工は困難であるが、静水圧あるいは機械的な方法による静水圧成分を付加することにより、塑性加工性を著しく改善できる可能性があることを示している。

3.2 切欠き材の変形挙動

Fig. 6はA2014-O材の切欠き底半径 $\rho = 0.15$ mm、およびT6材の $\rho = 0.15$ mm、1.0 mmの切欠き材の荷重-伸び図である。 $\rho = 0.15$ mmの場合のO材とT6材を比べると、延性の乏しいT6材は極めてぜい性的に破壊している。また、T6材の $\rho = 1.0$ mmに比べて切欠きが鋭い $\rho = 0.15$ mmの場合は、よりぜい性的に破壊している。T6材はいずれの切欠き底半径の場合もほぼ直線的に荷重が増加した後、急激に破壊に至る。静水圧が高くなると破壊時の荷重および伸びは増大し、荷重-伸び図はしだいに曲がついている。そして $\rho = 0.15$ mmでは4,000 kgf/cm²、 $\rho = 1.0$ mmでは2,000 kgf/cm²以上の静水圧下では最高荷重点を過ぎてから破壊している。Photo 1に平滑材および切欠き材の破断後の写真を示す。

Fig. 7はO材およびT6材の切欠き材の破断後の断面減少率の変化を示している。Fig. 5に示したように平滑材の場合、静水圧による断面減少率の増加はO材とT6材とはほぼ等しいが、切欠き材の場合にはT6材の断面減少率の増加はO材に比べ非常に小さく、4,000 kgf/cm²の静水圧下でも断面減少率は10%に満たず、極めてぜい

Specimen		P kgf/cm ²	
		0	4000
A2014-T6	smooth
	notched $\rho=0.15$ mm
A2014-O	smooth
	notched $\rho=0.15$ mm

Photo 1 Fractured specimens pulled under pressures 0 and 4,000 kgf/cm².

Fig. 7 Effect of pressure on the reduction of area of notched specimen.

性的な破壊をしている。平滑材の場合は、断面の全域がある程度一様に塑性変形した後、くびれが発生し、更に変形するとやがて破壊の条件が満たされて破断に至る。いつ봐, 切欠き材の場合は変形初期から3軸応力状態にあり、T6材の場合は後述のようにひずみ(応力)集中のため切欠き底近傍のみが塑性変形し、断面中央部がほとんど変形しない段階で破壊の条件が満たされ破断に至る。このように切欠きの有無により応力状態が異なるため、T6材のように延性が乏しい材料の場合は、静水圧による断面減少率の変化割合は切欠きの有無により大きく異なつて現われるものと考えられる。なお、T6材の場合も十分に高い静水圧を付加すれば、後述のようにボイドの成長が抑制されるため延性的な破壊に移行するもの

Fig. 8 Partition of elements for analysis.

Fig. 9 Load-displacement curve obtained by analytical calculation. (A2014-T6, $\rho=0.15$ mm)

と考えられる。

3.3 有限要素法による弾塑性解析

弾塑性状態で破壊する場合の応力状態の解析には有限要素法¹⁰⁾の適用が有効である。有限要素法に用いるパラメータである材料の降伏応力 σ_y 、縦弾性係数 E 、および加工硬化指数 n は 3.1 節で検討したように静水圧の影響をほとんど受けない。したがって、大気圧下における材料特性値を用いて弾塑性応力解析した結果と、各静水圧下の実験結果とを比較検討することができる。

ここでは、わずかな変形で破壊する A2014-T6材の $\rho=0.15$ mmの切欠き材について、有限要素法を用いて解析する。

Fig. 8 に試験片の要素分割を示す。要素数は145、節点数は91である。切欠き底近傍の応力状態を詳しく求めるために切欠き底のメッシュを細かくしてある。入力データとしての応力-ひずみ関係は、高強度アルミニウム合金において近似度の高い $\sigma = F(a + \epsilon)$ の形で表し、 $\sigma =$

Fig. 10 Distribution of axial stress at stage 1 (an element of root of notch yields).

120 ($0.39 + \varepsilon$) を用いた。

Fig. 9 は有限要素法により得られた、切欠き底断面 (中央) に対する自由節点 (88) の伸び変位と荷重の関係を示している。実験で得られる荷重-伸び図と有限要素法で得られる図とは、曲線の形はほぼ類似しているが、伸びについてみると一致していない。この原因は、実験における伸びはチャック間の伸びであるのに対し、有限要素法で得られる伸びは試験片の全荷重負担部の伸びではなく、自由節点88 (Fig. 8 参照) における伸びであるためである。しかし、荷重に着目すれば直線で近似できる範囲はほぼ一致しており、Fig. 6 に示す切欠き材の引張実験の破断荷重を上まわっている。したがって、Fig. 6 において荷重がほぼ直線的に増加した後、急激に破断する $3,000 \text{ kgf/cm}^2$ 以下について、破断に至るまでの応力状態を近似的に求めることができる。

Fig. 10 は切欠き底表面要素が降伏する Stage 1 における最大応力 σ_z (軸方向応力) の分布を示す。応力は切欠き底に集中し、切欠き底から少し離れた所では応力が非常に低いことがわかる。また、これより得られる弾性応力集中係数は 3.7 であり、Neuber の式より得られる 3.5 にほぼ等しい。

Fig. 11 は塑性域の進展状況を示している (Fig. 9 参照)。塑性域はまず切欠き底表面に生じるが、切欠き底断面中央部に向つてはなかなか進展せず、Stage 40 における中央部はまだ弾性域である。この Stage 40 における荷重は大気圧および $1,000 \text{ kgf/cm}^2$ における破断荷重を上まわっており、少なくとも $1,000 \text{ kgf/cm}^2$ 以下の静水圧下では切欠き底近傍のみが塑性域になった弾塑性応力状態で破壊することが確認できる。

Fig. 12 に大気圧下で破断したときの平均垂直応力 σ_m の分布を示す。図から明らかなように、弾塑性状態になると σ_m の最大値は切欠き底表面からわずかに内側に入った点へ移動する。この位置は Fig. 8 における要素 11

Fig. 11 Development of plastic region.
 σ_0 ; mean stress at minimum section of notched specimen.

Fig. 12 Distribution of the mean normal stress at fracture under atmospheric pressure.

に相当し、切欠き底表面より 0.05 mm 内部で、中央断面から 0.1 mm 程度軸方向にずれた位置である。また、最大応力 σ_z が最大になる位置も Fig. 12 の場合と一致し、静水圧を付加した場合の σ_m および σ_z が最大となる位置は大気圧の場合と同じである。この位置 (以後、塑性応力集中部とよぶ) は炭素鋼の切欠き材の初期ボイドの発生位置¹¹⁾と一致している。炭素鋼の同一形状の切欠き材についての有限要素法による解析によると、塑性応力集中部の位置は A2014-T6 材の場合と一致しており、塑性応力集中部の位置は材料特性によらず、切欠き形状のみによつて決まるものと考えられる。

著者らはさきに、炭素鋼について引張変形過程で静水

L_0 ; at this load, specimen fractures under atmospheric pressure

L_1 ; at this load, $(\sigma_m - P) = \sigma_{mof}$ where σ_{mof} ; mean normal stress in element 11 at fracture under 0 kgf/cm²

Photo 2 Profile of specimen pulled to L_1 under pressure 2,000 kgf/cm². (specimen; A2014-T6, $\rho = 0.15$ mm)

圧を変換する実験⁷⁾と、純銅および炭素鋼についてせん断加工過程で静水圧を変換する実験¹²⁾を行ない、破壊機構に及ぼす静水圧の影響を調べた。その結果、静水圧は電子顕微鏡によっても観察できないが破壊ひずみに影響を及ぼす程度の状態の微小ボイドの発生にはほとんど影響を与えず、おもにボイドの成長を抑える効果によって破壊ひずみは増加するとの結論を得ている。また、急激に成長しはじめる際のボイドの大きさは、静水圧が高いほど大きいと推論している。更に、ボイドの成長・合体に対しては引張応力あるいは応力の静水圧成分が影響を与えることが知られている¹³⁾が、静水圧を付加するとボイドの成長が抑制されることを考慮すると、ボイドの成長・合体には引張応力成分 ($\sigma_z - P$) あるいは静水圧成分 ($\sigma_m - P$) が影響するものと考えられる。

本実験では、切欠き材はかなりぜい性的な破壊を生じているが、破面はいずれの静水圧の場合もディンプル面となっており、ボイドの発生→成長・合体→破断という過程をとっているものと考えられる。ボイドは応力が最大となる切欠き底近傍に発生するが、前述のようにボイドの発生に対しては静水圧はほとんど影響しないため、ボイドはいずれの静水圧の場合もほぼ同一変形段階で発生しているものと考えられる。大気圧下ではボイドは変形の増加とともに急激に成長し、破断に至る。一方、静水圧 P を付加すると引張応力成分は ($\sigma_z - P$) また静水圧成分は ($\sigma_m - P$) となり付加した静水圧分だけ小さくなるため、変形が増加して各応力成分の増分が静水圧分以上になるまでボイドは成長しない。また、ボイドの成長は静水圧が高いほど抑制され、ボイドが急激に成長しはじめる際のボイドの大きさは静水圧が高いほど大きい。このような機構により、静水圧が高いほど、欠陥を生じな

い場合の曲線から離れる際の変形 (荷重) は大きくなり、破断荷重は大きくなるものと考えられる。

この推論を検証するために、2,000 kgf/cm²の静水圧下で大気圧下における破断荷重点 (L_0) および静水圧成分 ($\sigma_m - P$) が大気圧下破断時の (σ_{mof}) に等しくなる荷重点 (L_1) まで引張った後除荷して断面観察を行なった。荷重 L_0 まで引張った断面にはボイドは観察されない。しかし、荷重 L_1 まで引張った断面には **Photo 2** に示すように、さきに指摘した切欠き底からわずかに内側の位置にボイドが観察され、前述の推論が正しいことが確認された。

4. 結 言

アルミニウム合金 A2014 のO材およびT 6材について、平滑材および切欠き材の引張試験を 4,000 kgf/cm²までの静水圧下で行ない、更に有限要素法による弾塑性解析を行ない、その変形挙動に及ぼす静水圧の影響について検討し、次のような結果が得られた。

1) 本実験の範囲では、A2014材の縦弾性係数、降伏応力および加工硬化指数は静水圧によりほとんど変化しない。

2) 平滑材の場合、断面減少率は静水圧とともに増加するが、一様ひずみは静水圧を付加しても増えない。このことは、塑性加工する際に静水圧を付加することは、加工限界に対しよい影響を及ぼすが、不安定限界が加工限界を律する張出しのような加工に対しては静水圧効果は期待できないことを示している。

3) T 6材の切欠き底半径 $\rho = 0.15$ mm の切欠き材は、O材に比べ極めてぜい性的な破壊を示す。この場合について有限要素法を用いて弾塑性応力解析を行なった結果、破断時の切欠き底中央部はまだ弾性域であること、応力が最大となる塑性応力集中部は切欠き底表面よりわずかに内側の点であり、この位置はボイドの発生位置と一致することが明らかになった。

4) ボイドの成長・合体には引張応力成分 ($\sigma_z - P$) あるいは静水圧成分 ($\sigma_m - P$) が影響を及ぼす。そのため、静水圧が高いほどボイドの成長は抑制され、切欠き材 (A2014-T6, $\rho = 0.15$) の破断荷重は増大する。

終りに供試材のA2014を御提供下さいました神戸製鋼所に対し感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) B. Crossland: *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, **168** (1954), 935.
- 2) L. W. Hu: *J. Mech. Phys. Solids*, **4** (1955), 96.
- 3) H. Ll. D. Pugh: *The Mechanical Behaviour of Materials under Pressure*, Elsevier, (1970).
- 4) 西原, 田中, 西原, 村松: 材料, **13**(1964), 37.

- 5) 吉田, 小口: 日本金属学会誌, **34** (1970), 401.
- 6) 大南, 元家, 山陰: 材料, **20** (1971), 395.
- 7) 篠原, 米山, 宮川: 日本機械学会論文集, **43** (1977), 4002.
- 8) 篠原, 宮川: 塑性と加工, **15** (1974), 783.
- 9) 佐藤: 軽金属, **24** (1974), 508.
- 10) たとえば山田: 塑性・粘弾性, 培風館, (1972).
- 11) 篠原, 米山, 宮川: 塑性と加工へ投稿中.
- 12) 篠原, 宮川: 塑性と加工, **20** (1979), 398.
- 13) A. S. Tetelman and A. J. McEvily, Jr. (宮本博訳): 構造材料の強度と破壊①, 培風館, (1972), 204.