

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760092

研究課題名（和文） 金属円管の多軸応力試験による結晶塑性理論の検証および改良

研究課題名（英文） Development of the multi-axial stress test machine and verification of crystal plasticity model

研究代表者

吉田 健吾 (YOSHIDA KENGO)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70436236

研究成果の概要（和文）：

本研究では、多結晶金属円管の弾塑性変形挙動を測定するための多軸試験装置の開発を行った。多軸応力試験機は、円管に軸力、内圧、ねじりの独立した3種類の荷重を同時に負荷することができる試験機である。各荷重は油圧駆動のアクチュエータによって負荷される仕組みとなっており、試験機の制御には電磁弁を使用した。本研究で開発した試験機により、円管試験片に作用する3応力成分を任意に制御しながら塑性変形挙動を測定することが可能となった。本試験機を活用すれば多軸応力状態下での塑性構成則の検証を実施することができる。

研究成果の概要（英文）：

A multi-axial stress testing machine for thin-walled tubular specimens has been developed in the present study. The test machine is capable of applying axial force, internal pressure and torque to a thin-walled tubular specimen. Using the testing apparatus developed in this study, the plastic deformation behavior under tri-axial stress state can be observed. This experimental evidence observed by this machine would provide meaningful information for validating the constitutive models for metals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：多軸応力状態，降伏曲面，塑性構成則，材料試験

1. 研究開始当初の背景

結晶塑性理論の概念は 1938 年に Taylor GI (Roy. Soc. London) によって初めて提唱された。その後、1970 年代から 1980 年代にかけて、Hill, Rice, Needleman, Asaro, Pierce らが有限変形理論の枠組みにおいて結晶塑性理論の骨格を形成した。特に、Pierce, Asaro, Needleman によって定式化された弾・粘塑性型の結晶塑性理論が現在の基礎をなしている (1983, 1985, Acta Metall.; 1989, JMPS)。その後、時間非依存の弾塑性の結晶塑性理論は、Anand と Kothari (1996, JMPS) および Miehe ら (1996, IJSS) によってその基礎が構築されている。

これらの結晶塑性モデルの予測精度の検証は、単純な圧縮試験において Kalidindi ら (1992, JMPS; 2000, Mat. Sci. Eng. A) が行っており、2 軸応力状態においては、Hu ら (1995, Mat. Trans.) が実施している。これらの研究では、材料に作用する応力成分は 1 または 2 成分のみであり、実際の複雑な応力状態とは大きく異なる。多軸応力を受ける実験手法の研究としては、Kuwabara ら (1998, J Mat. Proc. Tech.; 2005, 2007, IJP) が薄板や円管に 2 軸応力を作用させ、その応力成分をサーボ制御によって自在にコントロールできる試験機を開発した。しかし、このような実験方法では常に異方性主軸と応力の主軸が固定されているという短所がある。

これに対し、2 方向に引張応力成分および 1 つのせん断応力成分を発生させることができれば、多軸応力状態において異方性主軸と応力主軸を任意に変化させることが可能となる。これによって従来の実験研究に比べて現実の変形状態へより一層近づく。さらに、これら 3 種類の応力比を制御することができれば、多様な材料試験を精密に実施できる。しかしながら、実験装置の開発および実験の技術の困難さのため、このような特殊な実験装置に関する研究は極めて少ないのが現状である。3 種類の応力成分を自在にコントロールしながら負荷できる試験機が開発されれば、結晶塑性理論を精密に検証することが可能である。

2. 研究の目的

本研究では、結晶塑性理論をはじめとした材料構成則の検証を実施するための実験データを測定することを目的として、円管に軸力-内圧-ねじりの 3 種類の負荷を自在に制御しながら負荷できる試験装置を開発する。そして、3 応力成分を試験片に発生させ、実現象に類似した複雑な応力状態での塑性変形挙動を観察できる試験方法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

既存の軸力-内圧-ねじり試験機を改良し、試験片に作用する応力状態を任意に制御できるようにする。図 1 に本研究で導入する制御回路の概略を示す。試験機をコントロールするために PC にはリレーボードを組み込んでいる。また、測定値の取り込みのために動ひずみアンプおよび AD 変換ボードを導入する。PC 内では測定値を基にその瞬間に試験片に作用している応力値を算出する。その応力値および応力の指令値をコンピュータからリレーボードを介して電磁弁の開閉を操作して油圧シリンダへの作動油の流量を制御する。この一連の作業を 0.1 秒間隔で行う。これによって、試験片の応力を所望の値に精密にすることが可能となり実験の精密化へとつながる。

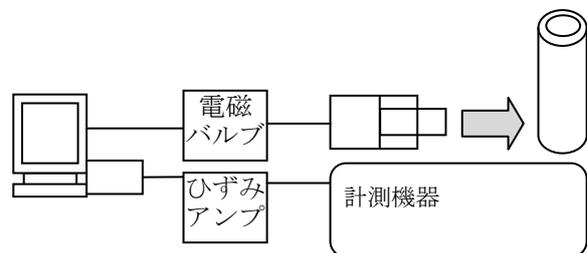


図 1 電磁バルブを使用した油圧制御回路

4. 研究成果

(1) 応力の算定式

はじめに、軸力—内圧—ねじりを薄肉円管に作用させた場合に試験片に作用する応力成分の算定方法を示す。円管の軸方向、半径方向の力のつり合い、および管軸回りのトルクのつり合いをもとに、軸方向応力 σ_{11} 、円周方向応力 σ_{22} 、せん断応力 σ_{12} を算定する。管の軸方向に作用する外力は、軸力 F と円管内表面（両端を含む）に作用する内圧 P による力である。外力を見積もった後に、円管の肉厚を肉厚中央に縮退させて膜と仮定する（応力の肉厚方向勾配は無視している）。内力と外力のつり合いより軸方向応力を算定する。

軸方向の力のつり合い

$$F + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \pi P = \sigma_{11} D_M \pi t$$

軸方向応力

$$\sigma_{11} = \frac{F + (D_1/2)^2 P}{\pi D_M t}$$

ここで、 D は外径、 D_1 は内径（ $= D - 2t$ ）、 $D_M = D - t$ は肉厚中央の直径、 t は肉厚である。

微小要素に対して半径方向の力のつり合いをもとに円周方向応力を算定する。半径方向の外力は、円管内表面が圧力を受けることによって生じる力のみである。ここでも、肉厚を肉厚中央に縮退させた膜を仮定して、内力と外力の力のつり合いを導く。

円周方向応力

$$\sigma_{22} = \frac{D_1 \rho_1 P}{2 \rho_M t} - \sigma_{11} \frac{D_M}{2 \rho_M}$$

ここで、 ρ_M は肉厚中央における軸方向曲率半径であり、外表面の曲率半径 ρ_s より $\rho_M = \rho_s - t/2$ として与えられる。 $\rho_1 = \rho_s - t$ は内表面の曲率半径である。

トルクのつり合いをもとにしてせん断応力を求める。微小要素の面積は、 $dA = (D_M / 2\beta) d\beta$ である。微小要素のせん断応力 σ_{12} より、せん断力（内力）は $\sigma_{12} dA$ となる。微小要素のねじりモーメント、つまり、トルクは $\sigma_{12} dA$ である。これを全体で積分して、外力によるトルク T とのつり合い式を導

く。

トルクのつり合い

$$T = \int \frac{D_M}{2} \sigma_{12} dA = \int_0^{2\pi} \frac{D_M^2 t \sigma_{12}}{4} d\beta = \frac{\pi}{2} t D_M^2 \sigma_{12}$$

せん断応力

$$\sigma_{12} = \frac{2T}{\pi t D_M^2}$$

本研究では微小変形領域のみを対象とするので軸方向の曲率半径 ρ_s が極めて大きいと仮定できる。その時、円周方向応力 σ_{22} の右辺第2項は無視でき、 $\rho_M = \rho_1$ となるので、円周方向応力は次式で与えられる。

$$\sigma_{22} = \frac{D_1 P}{2t}$$

(2) 試験結果

電磁バルブを用いて応力を指令値に追従するように制御回路を構築し試験機を開発した。はじめに、制御回路および試験機のシステムの動作を検証するために、応力の増加速度を既定して単軸引張りを行った。その結果を図2に示す。応力速度は0.5 (MPa/s)と規定した。試験機が縦型であり、チャックなどの自重が原因となって試験開始時に既に軸方向応力が発生している。しかしながら、その後は、電磁バルブを用いた制御回路が正常に機能して、一定の応力速度にて試験片を単軸引張ることができていることが確認できる。

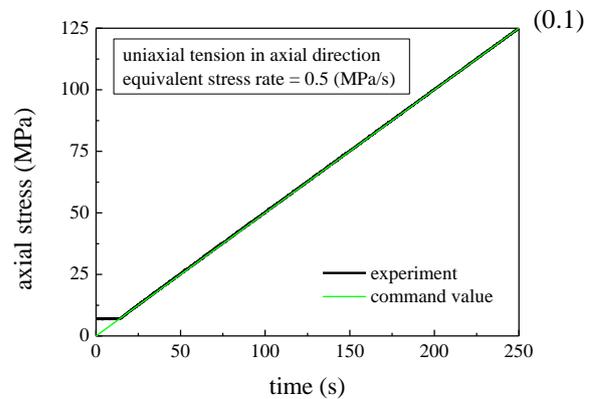
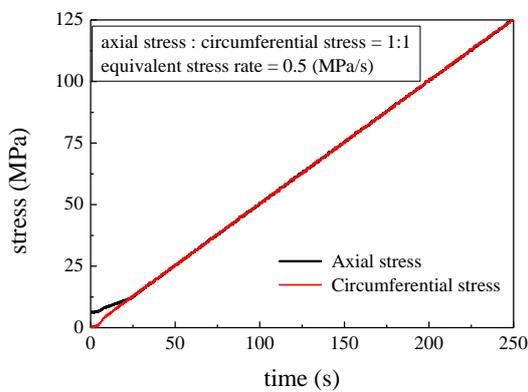
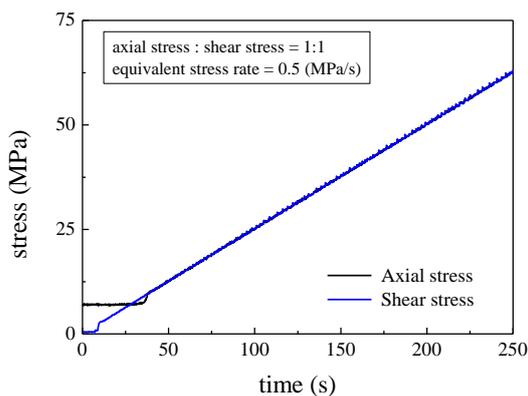


図2 単軸引張 σ_{11} ，応力速度 0.5 (MPa/s)

次に、軸力と内圧、または軸力とトルクを同時に負荷させて 2 軸応力状態を作り出し、同様の制御回路を構築して応力制御試験を実施した。図 3 にその結果を示す。ここでは、 $\sigma_{11}:\sigma_{22} = 1:1$ および $\sigma_{11}:\sigma_{12} = 1:1$ の 2 通りの結果を示している。負荷を与えるアクチュエータが 2 種類に増えており、制御する応力成分も 2 種類に増加した。どちらの実験条件においても、2 種類の応力成分の比率が 1:1 に保たれたまま応力が増加していることが確認できる。



① 2 軸応力状態 $\sigma_{11}:\sigma_{22} = 1:1$
相当応力速度 0.5 (MPa/s)



② 2 軸応力状態 $\sigma_{11}:\sigma_{12} = 1:1$
相当応力速度 0.5 (MPa/s)

図 3 2 軸応力制御試験

次に、軸力、内圧、トルクを作用させて 3 軸応力成分を発生させ、それらを制御する

実験を実施した。図 4 には $\sigma_{11}:\sigma_{22}:\sigma_{12} = 1:1:1$ の条件における試験結果を図示している。このように各応力成分の比率が指令値通りに $\sigma_{11}:\sigma_{22}:\sigma_{12} = 1:1:1$ を維持しつつ、試験片に負荷を加えることができています。

このように本研究において、3 軸応力成分を自在に制御しながら塑性変形挙動を計測できる試験機を構築することに成功した。本試験機を利用して多軸応力状態での塑性変形挙動を測定することで、材料構成則の妥当性検証に貢献することが期待できる。

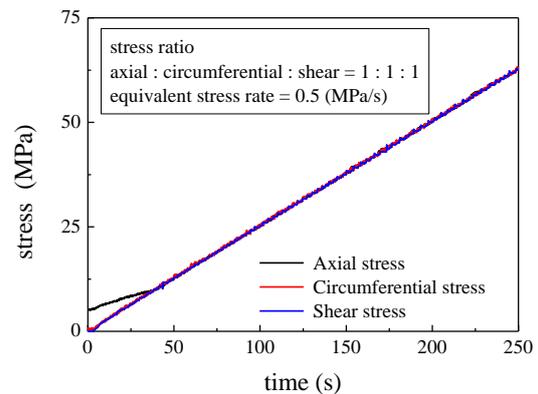


図 4 3 軸応力状態 $\sigma_{11}:\sigma_{22}:\sigma_{12} = 1:1:1$,
相当応力速度 0.5 (MPa/s)

5. 主な発表論文等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 健吾 (YOSHIDA KENGO)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70436236