鋼の引張・圧縮・ねじり応力下における変態塑性挙動の実験的検討

引田直樹^{*1}, 寒河江秀太^{*1}, 小室裕貴^{*2}, 長岐 滋^{*3}, 大下賢一^{*3}Experimental Investigation of Transformation Plastic Behavior
under Tension-Compression-Torsion Stress in SteelNaoki HIKIDA^{*4}, Shuta SAGAE, Hiroki KOMURO,
Shigeru NAGAKI and Kenichi OSHITA^{*4}Tokyo University of A&T Dept. of Mechanical Systems Engineering,
2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588 Japan

The elastic-plastic constitutive equation with the stress-dependent effect on phase transformation is proposed, but there are few experimental examples to verify the accuracy of the equation. Therefore, the transformation induced plasticity (TRIP) strain during pearlite reaction of S45C was measured when the hollow specimen was subjected to tension-compression-torsion uniaxial stress. TRIP strain was identified from experimental results, which are reproducible results about torsional strain. In the case of axial strain, some results had variability under same stress condition. Then we found that the constitutive equation disagree with TRIP strain under tension-compression-torsion uniaxial stress.

Key Words : Transformation Plasticity, Phase Transformation, Tension, Compression, Torsion

1. 緒言

鋼の相変態時に応力が負荷されると変態が促進され、変態塑性ひずみが生じることが知られている。相変態と応力の関係を熱処理シミュレーションに導入するため単軸応力下における実験をもとに構成則が提案されてきたが、これが多軸応力下に適用できるかは検討を要する。大塚ら⁽¹⁾、長岐ら⁽²⁾は曲げ変形による変態塑性係数の同定を試みている。しかし、実験が困難であるため多軸応力下については研究報告が少なく⁽³⁾、変態塑性に関する構成則の妥当性の評価は不十分である。本研究では引張・圧縮・ねじり応力下において、S45C材のパーライト変態過程で生じる変態塑性ひずみを計測し、構成則の妥当性について検討する。

2. 理論

相変態する材料の全ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ は

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^T + \dot{\epsilon}_{ij}^{ph} + \dot{\epsilon}_{ij}^{tp} \quad (1)$$

となる。ここで上添え字 e は弾性、 p は塑性、 T は熱膨張、 ph は変態膨張、 tp は変態塑性によるひずみ速度成分を示す。変態塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{tp}$ は Mises 型の構成則に従うものとする。

分を示す。変態塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{tp}$ は Mises 型の構成則に従うものとする。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{tp} = 3K(1 - \xi)\sigma'_{ij}\dot{\xi} \quad (2)$$

と表わされる。ここで σ'_{ij} は偏差応力、 ξ はパーライト変態の進行を表わす新相の体積分率、 K は変態塑性係数を示す。Mises 型の相当応力、相当変態塑性ひずみ速度をそれぞれ $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}^{tp}$ として式 (2) を整理すると

$$\bar{\epsilon}^{tp} = 2K(1 - \xi)\bar{\sigma}\dot{\xi} \quad (3)$$

となり、負荷応力が相変態の生じる過程で一定であるとして、変態開始 $\xi = 0$ から変態終了 $\xi = 1$ まで積分すると

$$\bar{\epsilon}^{tp} = K\bar{\sigma} \quad (4)$$

の関係が得られる。この式によって変態塑性挙動が表現されたとした場合、多軸応力下で応力比が異なる場合でも相当応力が等しければ、相当変態塑性ひずみは等しくなり変態塑性係数は応力比に依存しない。これについて実験的に確かめた例は少なく、本研究で実験的に検討することで構成式の妥当性について検討する。

^{*1} 東京農工大学大学院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

^{*2} 三菱重工業株式会社

^{*3} 正員, 東京農工大学工学研究院

Email: 50012643050@st.tuat.ac.jp

3. 実験の概要

実験に用いた試験片を図 1 に示す。形状は外形 12mm，内径 10mm のダンベル状で，標点間距離は 16mm である。本試料に用いた S45C の化学組成を表 1 に示す。

Fig.1 Specimen

Table 1. Chemical composition of S45C(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.46	0.16	0.83	0.14	0.17	0.04	0.03	0.15

実験装置の全体図を図 2 に示す。この実験装置では任意の引張・圧縮・ねじり荷重を負荷することが出来る。本研究では，S45C の相変態時に応力を負荷し，その際の試験片の標点間変位と温度の関係を測定する。赤外線加熱炉を用いて試験片を 800℃ 以上に加熱した後，錘による一定応力負荷の下で任意の冷却速度で冷却する。試験片の標点間変位は，レバー式変位計の測定子を試験片標点に押しあて，支点を介して炉外に伝えその動きをレーザ寸法測定器で測定する。また温度の測定には試験片に溶着した K 熱電対を用いる。

Fig.2 Top view of testing system

本実験では試験片を 5 分間で 800℃ まで加熱した後，

3 分間の一定温度保持によりオーステナイト化した。その後，加熱炉の電源を切り自然冷却によりパーライト変態させ，冷却過程の温度-ひずみ線図を取得した。

図 3 は実験に用いた試料と成分の近い材料の CCT 線図⁽⁴⁾に，実験の冷却経路を重ねたものである。応力条件を図 4 に示す。無負荷とミーゼス型の相当応力が 12.0MPa，24.0MPa の 7 条件で行った。無負荷では 5 回，単軸引張・単軸圧縮では 3 回，単軸ねじりでは 2 回ずつ計測した。

Fig.3 CCT diagram

Fig.4 Stress condition

4. 実験結果

実験結果の例を図 5 と図 6 に示す。図 5 は冷却過程の軸方向の温度 - ひずみ線図である。冷却開始からパーライト変態点までは温度の低下による熱収縮で軸方向ひずみは減少し，670℃ 付近のパーライト変態点での変態膨張及び応力の増加に伴う変態塑性ひずみ量の増加を確認できる。変態終了後は熱収縮により再びひずみは減少していく。図 6 は冷却過程のねじり方向の温度 - ひずみ線図である。冷却開始からパーライト変態点までは体積変化のためのせん断ひずみは変化せず，670℃ 付近のパーライト変態点で応力の増加に伴う変態塑性ひずみ量の増加を確認できる。変態終了後は体積変化のためのせん断ひずみは変化しない。

Fig.5 Temperature-Axial strain diagram

Fig.6 Temperature-Torsional strain diagram

5. 考察

パーライト変態で生じたひずみから無負荷状態で生じたひずみを差し引くことで変態塑性ひずみを算出した。単軸引張、単軸圧縮、単軸ねじり応力の負荷方向ごとに相当応力と相当変態塑性ひずみの関係をまとめたものが図7である。プロットした点は同一の応力条件での実験値の平均値で、最大値と最小値をエラーバーで示している。図7より軸方向ひずみの測定結果のばらつきが大きいことが確認できる。また、それぞれの近似直線の傾きが変態塑性係数となる。それぞれの負荷方向における変態塑性係数を表2に示す。これから負荷方向により変態塑性係数が異なることがわかる。本研究で変態塑性挙動が負荷方向に依存することを確認した。

Fig.7 Equivalent stress-Equivalent TRIP strain diagram

Table 2. TRIP coefficient K

	Tension	Torsion	Compression
$K(10^{-5}\text{MPa}^{-1})$	11.2	8.06	5.94

6. 結言

構成式の妥当性を検討するために引張・圧縮・ねじり単軸応力下の変態塑性挙動を計測した。図7から変態塑性挙動が負荷方向に依存することを確認した。しかし、軸方向のひずみの測定結果のばらつきが大きいので、この点については改善が必要だと言える。今後は引張・ねじり、圧縮・ねじり二軸応力下で実験を行い、構成式について検討する。

参考文献

- (1) Otsuka, T., Inoue, T., Identification of Transformation Plasticity Coefficient by Four-Point Bending Tests and Some Data under Pearlite Transformation, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.52, No.10 (1996), pp.1198-1203.
- (2) Nagaki, S., Asaoka, S., Morozumi, K., Ohshita, K., Determination of Coefficient for Transformation Plasticity in Terms of Three Point Bending System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.69, No.684 (2003), pp.1230-1235.
- (3) Coret, M., Calloch, S., Combescure, A., Experimental study of the phase transformation plasticity of 16MND5 low carbon steel under multi-axial loading, *International Journal of plasticity*, Vol.18, No.12 (2002), pp.1707-1727.
- (4) The Japan Institute of Metals and Materials, *Metal Data Book*, (2004), pp.475, Maruzen.