

ラインパイプ用鋼板の塑性挙動におよぼす 繰返し加工の影響について

Effect of Cyclic Straining on the Stress-Strain Behavior of Line Pipe Steel

高 田 庸*

Isao Takada

杉 江 英 司*

Eiji Sugie

Synopsis:

To clarify the stress-strain behavior of material in the processes of UOE pipe manufacturing, the Bauschinger effect during cyclic straining is investigated.

The Bauschinger stress in the prestrain range of less than 1% has no relation with the amount of prestrain but has the linear relation with prestress. This result is explained by dividing the prestress into two terms: one is σ_d independent of the direction of deformation and another σ_b which causes the Bauschinger effect.

1. 緒 言

UOE鋼管の成形工程で、材料は曲げ、曲げもどし、圧縮、および拡張などの複雑な引張と圧縮のくり返し加工を受ける。ここでAPI 5LX X60とX65のUOE成形におけるひずみ履歴の一例をTable 1に示す。管外表面は最初のUプレスにおいて約2.0%の引張ひずみを受けたのち、Oプレス、拡張、平板化および引張試験の際に4回の

引張と圧縮の交番ひずみを受ける。これに対し管内表面はUプレスで2.0%の圧縮ひずみを受けたのち、Oプレス、圧縮、および拡張の際3回の交番ひずみを受け、平板化と引張試験の過程では引張ひずみを連続して受ける。

UOE鋼管はこのように位置により異なった加工履歴を経て製造されるので、その位置によっても機械的性質に差を生じ、また鋼管の機械的性質は素材のそれと異なる。とくに加工硬化およびバウシinger効果の影響を直接受ける降伏強度の変

Table 1 Examples of strain history of outer and inner surfaces in UOE pipe : measured at location of 180° from weld seam

Grade	Pipe dimension (mm)		U-ing (%)	O-ing and shrink (%)	Expansion (%)	Specimen flattening (%)	Tensile test
API 5LX X60	1 016×13.0	Outer surface	+2.0	-0.7, -0.3	+1.3	-1.3	+
		Inner surface	-2.0	+0.7, -0.3	+1.3	+1.3	+
API 5LX X65	1 016×9.5	Outer surface	+1.6	-0.7, -0.3	+1.3	-0.9	+
		Inner surface	-1.6	+0.7, -0.3	+1.3	+0.9	+

* 技術研究所鋼材研究室主任研究員

化が大きい。したがってこの降伏強度の変化を知り、また、これを予知することは造管用鋼板の品質設計上不可欠なことである。

材料のパウシニング効果については種々の面から研究されており¹⁻⁷⁾、また加工硬化やパウシニング効果を考慮して鋼管の強度変化を推定する試み⁸⁻¹⁰⁾も行われているが、素材の降伏強度から鋼管のそれを精度よく推定する方法はまだ確立されていない。この原因としては、降伏伸びより小さい逆方向ひずみを与えた場合や、微小ひずみの引張と圧縮加工を交互に与えた際の塑性挙動について不明な点が残されているためと考えられる。

ここではこれら二点を明らかにするために以下の実験を行った。

2. 実験方法

供試材としては、厚さ20および25mmの圧延のままの厚板材を用いた。それらの化学組成および機械的性質を Table 2 に示す。Nb-V 系の鋼種 A は API 5LX X60 で、他の Nb-V 系の鋼種

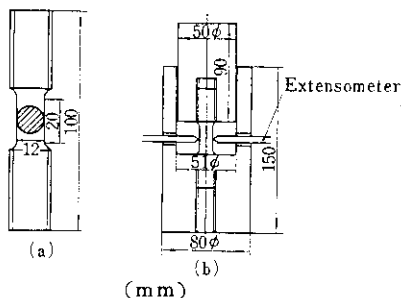


Fig. 1 Dimensions of specimen (a) and compression test fixture (b)

B, Nb-V-Ni 系の鋼種 C, および Nb-V-Mo 系の鋼種 D は X65 である。A, B および C はフェライト+パーライト組織で、Mo を含有する D のみはフェライト+ベイナイト組織である。また A, B および C では変形の際約 2% の降伏伸びを示すが、D では降伏現象は認められず、なめらかな応力-ひずみ曲線を示す。

これらの素材から Fig. 1 (a) に示す棒状試験片を切出し、圧縮の際の挫屈を防止するため、Fig. 1 (b) に示す治具を用いて 50 t のアムスラー試験機に取付け、圧縮または引張を行った。この際直径変化から軸方向のひずみを計算し、真応力-真ひずみ曲線を求めた。

降伏伸びより小さい圧縮ひずみ後の引張塑性特性を調べるため、A~B 3 鋼種の素材に 0.5%, 1%, および 2% の圧縮ひずみを与えたのち引張を行った。

つぎに、鋼種 B と D に下記の引張と圧縮の微小ひずみ (1% 以下) を交互に与え、応力-ひずみ曲線の挙動を調べた。

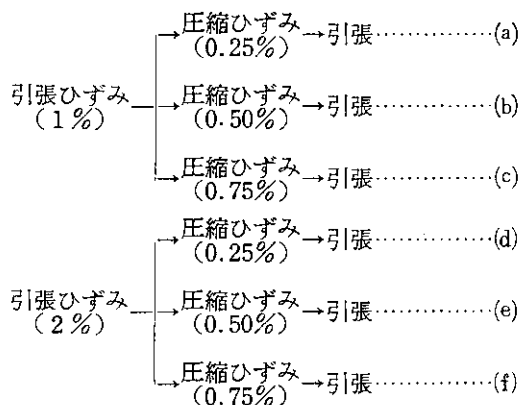


Table 2 Chemical compositions and tensile properties of base plates

Base plate	Grade	Thickness (mm)	Chemical compositions (%)										Tensile properties*		
			C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ni	Mo	Al	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
A	X60	20	0.13	0.24	1.35	0.016	0.008	0.028	0.017	—	—	0.021	44.4	55.2	47
B		25	0.10	0.27	1.52	0.010	0.004	0.043	0.036	—	—	0.021	47.1	57.2	52
C	X65	20	0.11	0.21	1.40	0.006	0.004	0.036	0.043	0.34	—	0.035	52.5	58.5	48
D		20	0.08	0.26	1.40	0.007	0.004	0.036	0.033	—	0.21	0.026	46.5	59.6	41

* Tensile properties were determined transverse to rolling direction according to API specification with the gauge length of 2in

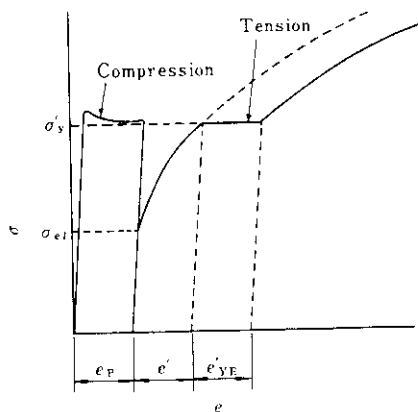
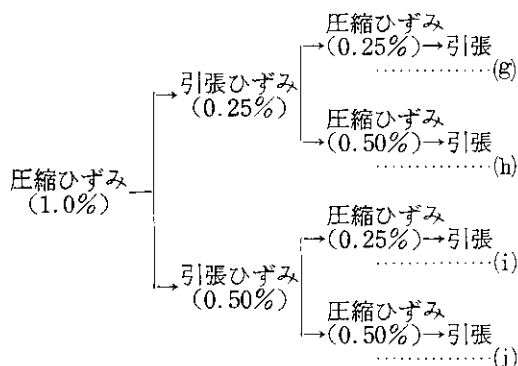


Fig. 3 Schematic stress-strain curve of specimen subjected to compressive prestrain

3. 実験結果と考察

3-1 降伏伸びより小さい圧縮予ひずみを与えた試片の引張塑性挙動

降伏伸びを有する鋼種 A, B および C に, 0.5%, 1% および 2% の圧縮予ひずみを与えたものの引張応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。

また Fig. 3 に示すように, 圧縮後の引張の場合, 予ひずみを e_p , 塑性変形開始時の応力 (比例限応力) を σ_{el} , 降伏開始時 (Fig. 2 に矢印で示す) の応力を σ_y' , そのときのひずみを e' , 降伏

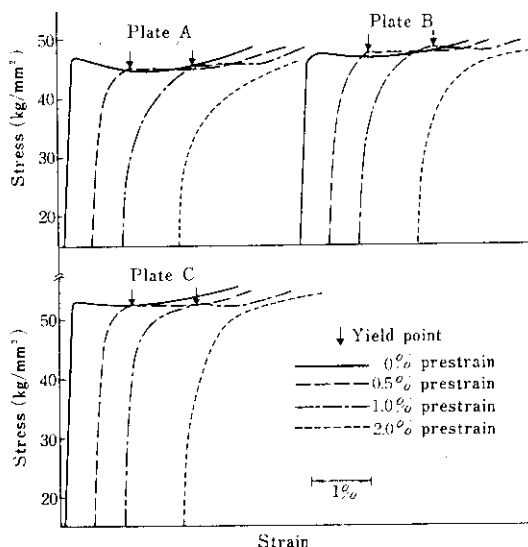


Fig. 2 Tensile stress-strain curves of specimens subjected to compressive prestrain which is less than yield elongation

開始から終了までのひずみを e'_{YE} , そして素材の降伏応力を σ_{YS} , 降伏伸びを e_{YE} とし, これらの数値を Fig. 2 から求めて Table 3 に示す。

これらの数値から, つぎの現象が認められる。

(1) 素材の降伏応力より低い応力で塑性変形がはじまり, その応力 σ_{el} は圧縮予ひずみ e_p によらず鋼種ごとにはほぼ一定値を示す。

(2) 塑性変形がある程度進行すると降伏現象があらわれるが, この降伏開始時の応力 σ_y' は素材の降伏応力 σ_{YS} にほぼ等しい。

(3) 降伏開始時のひずみ e' は e_p に比例する。

(4) 圧縮予ひずみと引張時の降伏伸びの和 ($e_p + e'_{YE}$) は素材の降伏伸び e_{YE} にほぼ等しい。

ここで最初の圧縮時の変形を考えてみる。圧縮予ひずみ e_p が素材の降伏伸び e_{YE} より小さいときには, 試片は均一に変形しておらず, 塑性変形部 (リュースダース帯, P部) と未塑性変形部 (E部) とに分けて考えることができる。圧縮予ひずみの増加とともに P部領域は拡大するが, そのひずみは変化しない。さらに圧縮ひずみが増加し降伏伸びに等しくなると, P部が試片全体に拡大して, E部が消失し, 試片全体が加工硬化を開始する。したがって圧縮予ひずみが素材の降伏伸びよりも小さいときには, P部のひずみは変化せず降伏伸びに等しい。試片の標点間距離に対する P部の割合 r は e_p/e_{YE} で表わされる。

Table 3 Stress-strain behavior of specimens subjected to compressive prestrain

Base plate	σ_{YS} of base plate (kg/mm ²)	e_{YE} of base plate (%)	e_P^* (%)	σ_{cl}^* (kg/mm ²)	$\sigma_{y'}^*$ (kg/mm ²)	e'^* (%)	e'_{YE}^* (%)	$e_P + e'_{YE}$ (%)
A	46.0	2.3	0.5	25.7	45.0	0.5	1.7	2.2
			1.0	24.5	46.0	1.1	1.2	2.2
B	47.5	2.0	0.5	28.0	47.5	0.5	1.5	2.0
			1.0	27.5	48.0	1.1	1.1	2.1
C	53.0	1.9	0.5	30.5	52.5	0.5	1.4	1.9
			1.0	30.5	52.0	1.1	0.8	1.8

 σ_{YS} Yield strength of base plate (0.5% under load) e_{YE} Yield elongation of base plate

* See Fig. 3

このようなP部とE部からなる試片を引張ると、P部はバウシinger効果によって素材の降伏応力より低い応力で塑性変形ははじめ、ひずみの増加につれて加工硬化により flow stress は上昇し、素材の降伏応力 σ_{YS} に等しくなると、E部が塑性変形を開始する。つまりE部が塑性変形を開始する応力は圧縮予ひずみの有無にかかわらず素材の降伏応力 σ_{YS} に等しい。

このように圧縮予ひずみ後の引張の際、降伏開始までの塑性変形に寄与するのはP部だけであり、P部のみの引張応力-ひずみ曲線は、圧縮予ひずみ e_{YE} の試片の引張応力-ひずみ曲線に等しい。いま後者の引張ひずみ e_1 のときの応力を σ_1 ($< \sigma_{YS}$) とすると、圧縮予ひずみ e_P ($< e_{YE}$) の試片を引張ったとき、応力 σ_1 に相当する試片の引張ひずみは $e_1 \times e_P / e_{YE}$ になり、 e' は e_P に比例する。したがって圧縮予ひずみ e_{YE} の試片の引張応力-ひずみ曲線がわかれば、圧縮予ひずみ e_P ($< e_{YE}$) を与えた試片の、降伏開始までの引張応力-ひずみ曲線が求められる。

後続の引張の際の降伏伸び e'_{YE} は、リユース帯がE部にはじめて発生し、それがE部全体に拡大するのに必要なひずみであるから、 e'_{YE} は素材の降伏伸び e_{YE} から圧縮予ひずみを差引いたものに等しい。換言すれば、 e'_{YE} と圧縮予ひずみの和 ($e_P + e'_{YE}$) は素材の降伏伸びに等しい。

3.2 微小な圧縮ひずみと引張ひずみを交互に与えたときのバウシinger効果

降伏伸びを示す鋼種Bおよび降伏現象の認められない鋼種Dの素材に、2節で示した(a)~(j)の微小ひずみを与えたときの応力-ひずみ曲線を Fig. 4 (a)~(j)および Fig. 5 (a)~(j)に示す。

0.5%以下の微小なひずみを与えるときには、従来のバウシinger効果係数 $BEF_{0.5}$ (Fig. 6 参照) を用いると誤差が大きいため、ここでは直前の逆方向予ひずみ時の flow stress (以下 prestress という) から、後ひずみの際の比例限応力 (Fig. 4 および Fig. 5 に矢印で示す) を差引いた値 (以下バウシinger応力といい σ_B で表示する) でバウシinger効果を表わす。

直前の逆方向予ひずみ e_P と σ_B との関係を Fig. 7 に示す。一般にいわれているように、 e_P が小さいほど σ_B は低下するが、 e_P が小さいとき、 σ_B のバラツキが大きく、明らかな関係が認められない。これは Fig. 4 (g), (i) または Fig. 5 (i) のように圧縮 C_1 後、微小ひずみの引張 T_1 、つづいて T_1 より小さいひずみの圧縮 C_2 を加えたのち、さらに引張 T_2 を与えると、予ひずみの大きい T_1 と C_2 との間の σ_B よりも、予ひずみが小さい C_2 と T_2 との間の σ_B が大きい現象が認められるからである。

Fig. 8 に prestress σ_P と σ_B との関係を示す。

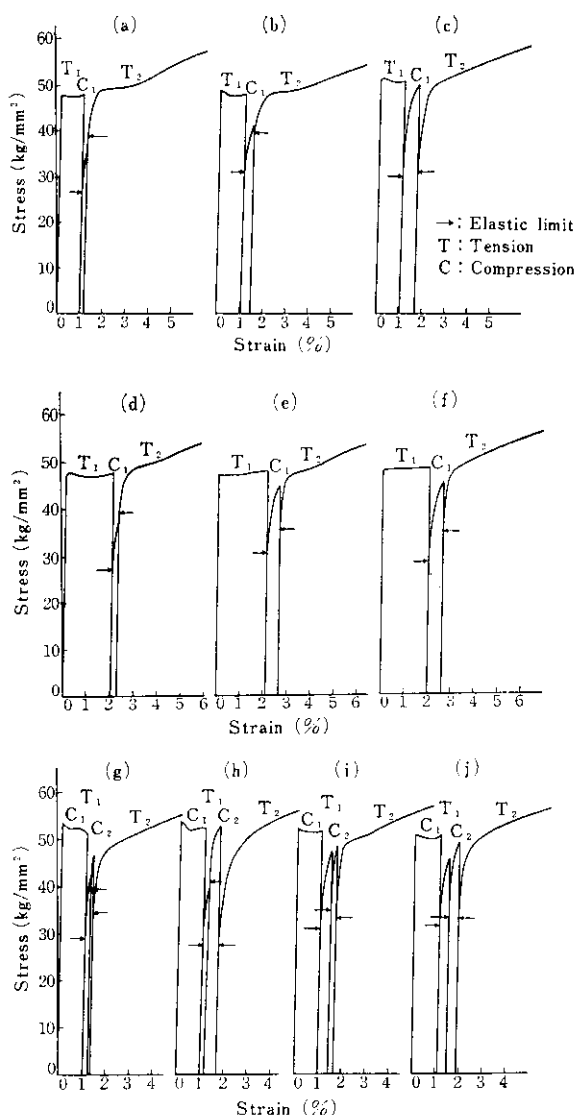


Fig. 4 Stress-strain curves of specimens strain-cycled cyclically (Plate B)

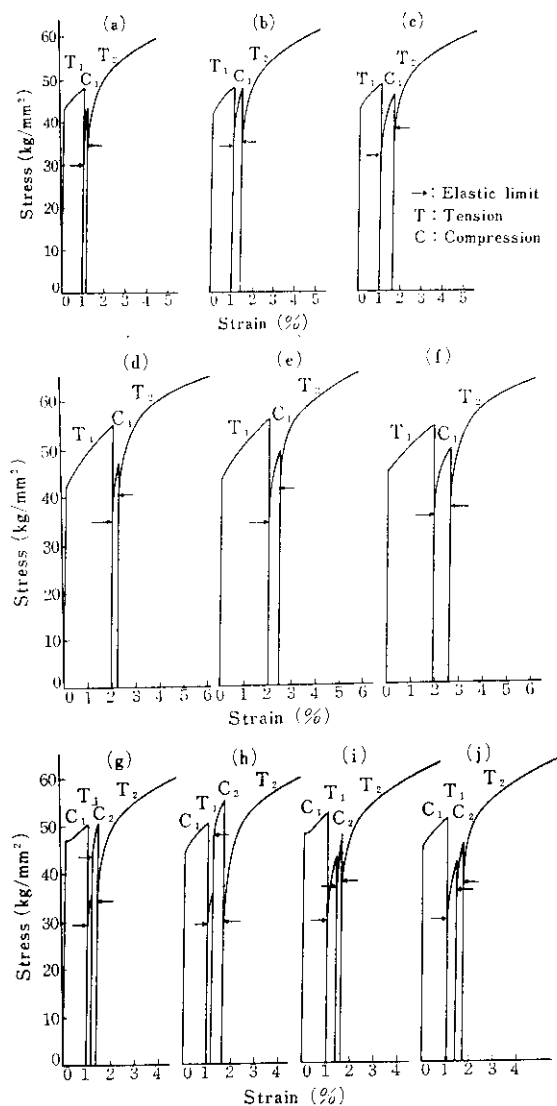


Fig. 5 Stress-strain curves of specimens strain-cycled cyclically (plate D)

鋼種 B, Dとも交番ひずみの回数または引張、圧縮の別を問わず σ_P が大きくなれば σ_B は増大し、 σ_P がある値以下のときには σ_B は負になる。このように予ひずみが小さいときには、バウシinger 応力は予ひずみ ϵ_P よりむしろ prestress σ_P に依存する傾向がある。

ここで引張または圧縮変形時における flow stress σ_F を、変形方向に無関係な成分 σ_d と変形方向に依存する、すなわちパイルアップした転位

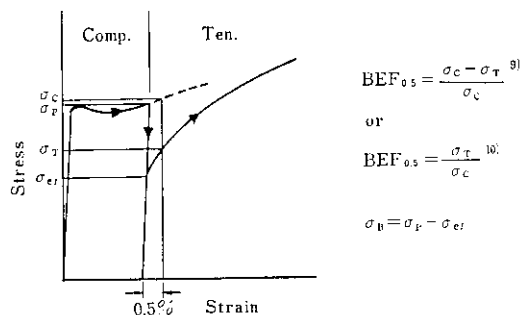


Fig. 6 Definition of Bauschinger effect factor and Bauschinger stress σ_B

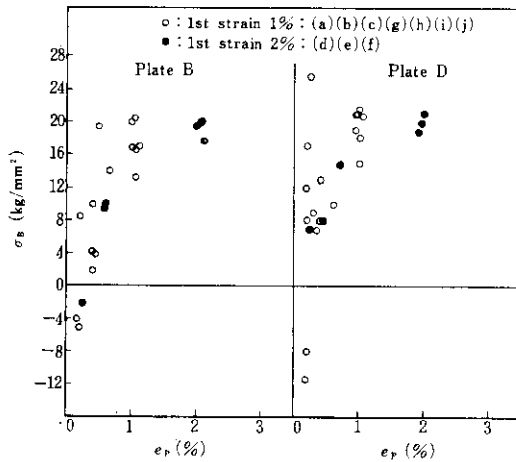


Fig. 7 Relation between prestrain ϵ_p and Bauschinger stress σ_B (See Figs. 4 and 5)

のバックストレスによる応力 σ_b とに分けて考える¹⁾。Fig. 9 に示すように最初のひずみ ϵ_1 における引張応力を σ_{F0} とし、この変形方向に無関係な成分を σ_{d0} 、バウシinger効果に寄与する成分を σ_{b0} とすると、次式の関係が成立する。

$$\sigma_{F0} = \sigma_{d0} + \sigma_{b0}$$

ここでいったん除荷し、つぎに圧縮応力を加えたときの比例限応力を $|\sigma_{R0}|$ 、このときのバウシinger応力を σ_{B0} とすると、

$$|\sigma_{R0}| = \sigma_{d0} - \sigma_{b0} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sigma_{B0} = \sigma_{F0} - |\sigma_{R0}| = 2\sigma_{b0} = 2(\sigma_{F0} - \sigma_{d0}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

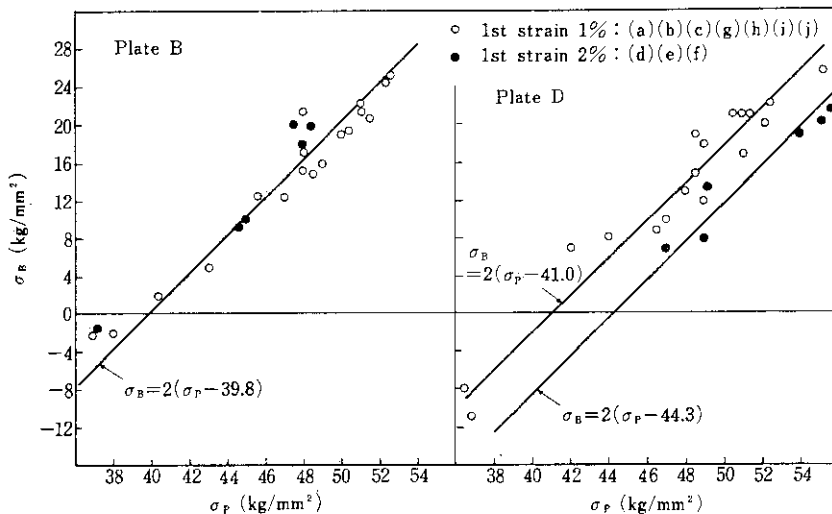


Fig. 8 Relation between Bauschinger stress σ_B and prestress σ_P (See Figs. 4 and 5)

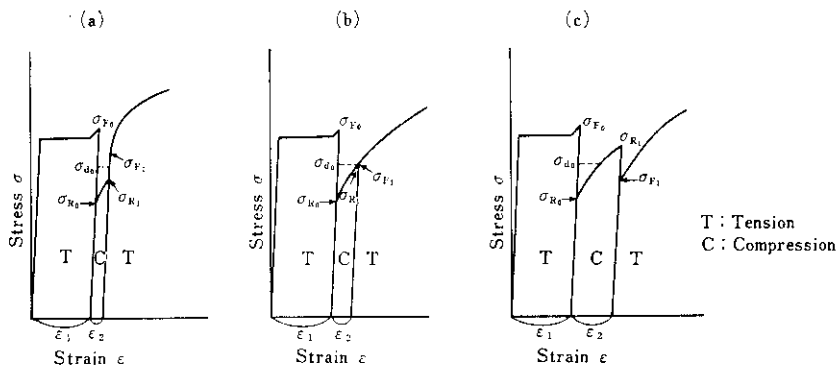


Fig. 9 Schematic stress-strain curves of specimens strained cyclically

$$\sigma_{d0} = 1/2 (\sigma_{F0} + |\sigma_{R0}|) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。つぎに圧縮ひずみ ϵ_2 のときの応力を $|\sigma_{R1}|$ とし、このときの変形方向に無関係な応力を σ_{d1} 、バウシinger効果に寄与する応力を σ_{b1} とすると(1)式と同様に

$$|\sigma_{R1}| = \sigma_{d1} - \sigma_{b1}$$

であらわされる。本実験のように ϵ_2 が小さい範囲では σ_{d1} は変化しない ($\sigma_{d1} = \sigma_{d0}$) と仮定すると、次式が得られる。

$$|\sigma_{R1}| = \sigma_{d0} - \sigma_{b1}$$

σ_{b1} は $\epsilon_2 = 0$ のときには σ_{b0} に等しく、 ϵ_2 の増加とともに減少する。

ここで Fig. 9 (a) に示すように最初の引張ひずみによるバックストレスが存在する範囲 ($\sigma_{b1} > 0$, $\sigma_{R1} < \sigma_{d0}$) 内の ϵ_2 で除荷し、ふたたび引張ひずみを与えると、そのときの比例限応力 σ_{F1} は次のとおりである。

$$\sigma_{F1} = \sigma_{d1} + \sigma_{b1} = \sigma_{d0} + \sigma_{b1}$$

したがって $\sigma_{F1} > \sigma_{d0} > |\sigma_{R1}|$ となりバウシinger応力は負になる。先に述べた Fig. 4 (a), (d), (h) および Fig. 5 (g), (h) がこれに相当する。

ϵ_2 がさらに増加し Fig. 9 (b) に示すように $\sigma_{b1} = 0$, $\sigma_{R1} = \sigma_{d0}$ となるひずみ ϵ_2 で除荷して、つぎに引張ひずみを与えると、

$$|\sigma_{R1}| = \sigma_{d0} = \sigma_{F1}$$

$$\sigma_B = 0$$

となり、引張応力-ひずみ曲線は直前の圧縮応力-ひずみ曲線の延長をたどる。Fig. 4 (b) がこの状態に近いと考えられる。

Fig. 9 (c) のように、 ϵ_2 が $\sigma_{b1} = 0$ となる圧縮ひずみよりさらに大きくなれば、転位の逆方向への新たなパイルアップが生じ、このときの応力 $|\sigma_{R1}|$ は

$$|\sigma_{R1}| = \sigma_{d0} + |\sigma_{b1}|$$

であらわされる。このとき、除荷して引張ると、その比例限応力 σ_{F1} は

$$\sigma_{F1} = \sigma_{d0} - |\sigma_{b1}|$$

で、 $\sigma_{F1} < \sigma_{d0} < \sigma_{R1}$ となり、 σ_B は正になってバウシinger効果が認められる。上記のように σ_d が変化しない場合 ($\sigma_d = \sigma_{d0}$)、(2)式より一般に σ_B と prestress σ_P との関係は次式で表わされる。

$$\sigma_B = 2(\sigma_P - \sigma_d) \quad \dots\dots\dots (4)$$

つぎに(3)式から σ_d , σ_P および σ_R の関係は、一般に

$$\sigma_{di} = 1/2 (\sigma_{Fi} + |\sigma_{Ri}|) \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (5)$$

であらわされるので、Fig. 4 および Fig. 5 の応力-ひずみ曲線から σ_d を求め Table 4 に示す。降伏伸びが存在する鋼種 B では、第一段階の引張 T_1 または圧縮 C_1 がすべて素材の降伏伸び以下であるので、ひずみ増加による flow stress の増加はない。鋼種 B の σ_d は試片によって 37.3 kg/mm² ~ 41.2 kg/mm² の範囲にばらつくが、第一段階のひずみの差による有意差はない。

一方、降伏伸びが認められない鋼種 D では、Fig. 5 に示すように第一段階の flow stress は 1% ひずみで 49.5 kg/mm²、2% ひずみで 54.2 kg/mm² であり、後者は前者に比べて約 5 kg/mm² 高い。また第一段階のひずみが 2% のときの σ_d は 1% ひずみのそれに比して約 3 kg/mm² 高いが、鋼種 D の σ_d も第一段階のひずみが一定であれば、鋼種 B と同様にほぼ一定値を示す。

ここで(4)式において σ_d に、鋼種 B では Table 4 のすべての平均値 39.8 kg/mm² を、鋼種 D では第一段階のひずみが 1% のときの平均値 41.0 kg/mm²、および 2% の平均値 44.3 kg/mm² を代入すると、Fig. 8 の直線が得られ、実測の σ_B とよく一致している。鋼種 B では第一段階またはその後のひずみによっても σ_d は変化せず、また鋼種 D の σ_d は第一段階のひずみによって異なるが、後続の微小ひずみによっては変化しないと考えてさしつかえない。さらに鋼種 D では、第一段階のひずみが 1% のときの σ_d は 2% の場合よりも 3.3 kg/mm² 低いので、同一の σ_P に対して σ_B は 6.6 kg/mm² 大きくなる。

上述のように、微小な引張ひずみと圧縮ひずみを交互に与えたときの塑性挙動は、材料の flow

Table 4 Values for σ_d during cyclic straining

Base plate		1st strain (%)	1st $\rightarrow$ 2nd		2nd $\rightarrow$ 3rd		3rd $\rightarrow$ 4th	
			Process	σ_d (kg/mm ²)	Process	σ_d (kg/mm ²)	Process	σ_d (kg/mm ²)
B	(a)	1	T $\rightarrow$ C	37.3	C $\rightarrow$ T	37.5		
	(b)		"	39.5	"	40.0		
	(c)		"	40.3	"	40.5		
	(d)	2	"	37.5	"	38.0		
	(e)		"	39.0	"	40.0		
	(f)		"	38.5	"	40.0		
	(g)	1	C $\rightarrow$ T	40.0	T $\rightarrow$ C	40.5	C $\rightarrow$ T	40.3
	(h)		"	40.0	"	40.2	"	39.9
	(i)		"	41.2	"	40.9	"	41.0
	(j)		"	40.8	"	39.3	"	41.0
D	(a)	1	T $\rightarrow$ C	39.0	C $\rightarrow$ T	39.0		
	(b)		"	41.0	"	41.5		
	(c)		"	40.0	"	42.0		
	(d)	2	"	45.0	"	43.5		
	(e)		"	45.0	"	45.0		
	(f)		"	44.5	"	43.0		
	(g)	1	C $\rightarrow$ T	40.0	T $\rightarrow$ C	40.5	C $\rightarrow$ T	42.5
	(h)		"	40.0	"	42.0	"	42.5
	(i)		"	41.2	"	40.0	"	43.0
	(j)		"	40.5	"	39.0	"	41.5

T ; Tension

C ; Compression

stress σ_F を変形方向に無関係な成分 σ_d とバウシinger 効果に寄与する成分 σ_b とに分けて、第一段階のひずみによって σ_d がきまり、以後の微小ひずみによって σ_d は変化しないと考えると、定性的に説明することができる。

バウシinger 効果は本質的に prestress に依存するものであるが、一般に材料の応力とひずみは一義的關係にあるので、工学的にはバウシinger 効果は予ひずみとの関係で表示されることが多い。しかし本実験のように、微小な圧縮ひずみと引張ひずみを交互に与えたときには、prestress は予ひずみと必ずしも対応しないので、バウシ

nger 効果を予ひずみと対応させて考えるのは妥当でなく、prestress の関数として表わすことが必要である。

4. 総 括

UOE 成形過程における材料の塑性変形挙動を明白にするために、降伏伸びより小さい圧縮予ひずみを与えた材料の引張応力-ひずみ曲線の挙動と、微小な引張ひずみと圧縮ひずみを交互に与えたときのバウシnger 効果を検討し、つぎの結論を得た。

(1) 降伏伸びより小さい圧縮ひずみを与えた材料を引張ると、素材の降伏応力より低い応力で塑性変形がはじまるが、素材の降伏応力近傍で降伏現象が起こり、この降伏開始時の引張塑性ひずみは圧縮ひずみに比例する。また圧縮ひずみと引張変形時の降伏伸びとの和は素材の降伏伸びにほぼ等しい。

これは降伏伸びより小さい圧縮ひずみによって、試片内に降伏伸びに等しいひずみの塑性変形部と未塑性変形部が存在し、つぎの引張試験の際には塑性変形部がバウシinger効果によって低応力で均一に塑性変形し、その部分の応力が素材の降伏応力に達して、はじめて圧縮時の未塑性変形部が塑性変形を開始するためである。

(2) 圧縮ひずみまたは引張ひずみを与えたの

ち、比較的小さい引張ひずみと圧縮ひずみを交互に与えたときには、そのバウシinger効果の大きさはひずみに依存せず、直前のひずみ付加時の flow stress (prestress) と直線関係にある。

この現象は、材料の flow stress σ_F を変形方向に無関係な成分 σ_d と、バウシinger効果に寄与する成分 σ_b とに分け、 σ_d は材料ごとに第一段階のひずみに応じて一定値をとると考えることによって、定性的に説明できる。

バウシinger効果は本質的に prestress に依存するので、ひずみと prestress が必ずしも対応しないときには、バウシinger効果をひずみと対応させて考えるのは妥当でなく、prestress の関数として表わす必要がある。

参考文献

- 1) 五弓, 岸: 塑性と加工, 10 (1969) 12, 863
- 2) 五弓, 岸, 和田: 日本金属学会誌, 34 (1970) 2, 154
- 3) 熊倉: 日本機械学会誌, 70 (1967) 9, 1287
- 4) 鶴戸口, 岡村: 材料試験, 10 (1961) 99, 72
- 5) R. M. Jamieson and J. E. Hood: JISI, 209 (1971) 1, 46
- 6) T. C. Harrison, R. T. Weiner, and G. D. Fearneough: JISI, 210 (1972) 5, 210
- 7) K. J. Pasco: Journal of Strain Analysis, 6 (1971) 3, 167
- 8) 長谷部, 京極, 古賀, 北川, 岡沢: 住友金属, 23 (1971) 7, 18
- 9) 中島, 菊間, 水谷, 松本: 製鉄研究, (1973) 277, 91
- 10) T. Taira, T. Osuka and Y. Ishida: Mechanical Working and Steel Processing XI (Proceeding of 15th Mechanical Working and Steel Processing Conference), (1973), 33