研 究

鋼の加工軟化とバウシंगा効果*

—加工軟化の研究(第2報)—

飯 田 喜 介** 山 下 菊 丈***

Study of Work Softening (2nd Report)

—Work Softening of Steel and Bauschinger Effect—

Kisuke IDA, Kikujo YAMASHITA

Work softening of steel prestrained as compression and tension at room temperature was reported already. This report describes work softening obtained from deformation by compression, tension and torsion for steels prestrained by drawing with 4 rollers and torsion. Evident difference between work softening and Bauschinger effect was obtained from the experiment of torsion forward and reverse direction. The decrease of Rockwell superficial hardness number in the experiment was up to 8.1% from compressed steel prestrained by drawing.

1. 緒 言

前報¹⁾において、鋼の単純変形における加工軟化を加工の方向性から検討した結果を報告した。本報はひきつづいて、鋼の加工軟化を予変形として2軸引抜圧延を行い二次変形として圧縮、引張り、ねじりを行ったときのかたさの変化を変形抵抗とともに検討し、二次加工が圧縮およびねじり変形の場合に加工軟化することを確認した。

一般に加工硬化・加工軟化は、変形抵抗またはかたさで論じられている。前者は、バウシंगा効果の場合の降伏応力の低下として知られているが、かたさの低下による加工軟化とバウシंगा効果との関連は明らかではない。バウシंगा効果における変形抵抗の変化とかたさの変化がどのように対応するかを検討するため、従来のバウシंगा効果の実験に用いられている正方向および逆方向のねじり試験を組合わせて行い、かたさと変形抵抗の関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 実 験

実験は、前述のように予変形が2軸引抜圧延およびねじり変形で二次変形を圧

縮、引張り、ねじり変形とし、ひずみの増加によるかたさと変形抵抗の変化を検討したもので、本文では予変形を「一次加工」、その後の変形を「二次加工」とした。表1は、本報での一次加工と二次加工の関係を示したものである。まず、予変形を行わない場合の圧縮[A]とねじり[E]変形によって従来から認められている加工硬化を確認し、次に一次加工が2軸引抜圧延の場合の二次加工は表に示すように、圧縮[B]、引張り[C]、ねじり[D]の三つの場合を、一次加工がねじりの場合はねじり[F]の場合について実験を行った。

図1(a)は、一次加工が2軸引抜圧延の場合の二次試験片のとり方を示したものである。丸棒の素材を2軸引抜圧延後、図の斜線に示したように圧延方向と平行に試験片を取り、図1(b), (c), (d)に示すように加工してこれを二次加工用試験片とした。圧縮試験片は、図1(b)に示すもので形状比(直径/高さ)1.0を使用した。寸法効果の影響を検討する場合は、直径は10 mmにし、高さを5 mm, 10 mm, 15 mmとして形状比それぞれ0.66,

表1 実験条件 (S45C)LP, SP

一次加工	非加工	2軸引抜圧延			非加工	ねじり(+)
二次加工	圧縮	圧縮	引張り	ねじり	ねじり	ねじり(-)
検討事項	かたさ 変形抵抗 寸法効果 潤滑	かたさ 変形抵抗 寸法効果 潤滑	かたさ	かたさ 変形抵抗	かたさ 変形抵抗	かたさ 変形抵抗
記 号	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]

SP: 球状パーライト, LP: 層状パーライト, (+) (-)は方向が逆

* 原稿受付 昭和49年3月15日。昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和48年10月9日)にて発表。

** 正会員 明治大学工学部(川崎市多摩区生田5158)

*** 学生会員 明治大学工学部

図1 試験片形状とかたさ測定

図2 2軸引抜圧延後のかたさ分布

1.0, 2.0の実験を行った。

引張りの場合は、図1(c)に示すものを、ねじりの場合は図1(d)に示すものを用いた。

2.2 変形方法

一次加工としての2軸引抜圧延は、図1(a)に示す4個のローラをもつ圧延装置により、アムスラ型万能試験機で引抜圧延を行った。圧延速度は、1~2 mm/minの低速とし、1回の圧延で所定の減面率になるように行った。

圧縮および引張変形には、アムスラ型万能試験機を用いた。変形中の加工熱の影響を避けるため変形速度は、1~2 mm/minときわめて低速で行った。圧縮は無潤滑で行ったが圧縮端面摩擦の影響を吟味するため潤滑剤を用いた場合の実験も行った。

ねじり変形の場合は、ねじり試験機(20 kg·m)を用い手動により低速で変形させた。

2.3 応力とひずみ

変形抵抗は、公称応力の荷重と試験片直径より求めた。

ひずみは、2軸引抜圧延の場合は断面積の減少率(減面率)をそのひずみ量とし、圧縮の場合は高さの減少率を平均圧縮ひずみとし、引張りの場合は減面率をひずみ

図3 焼鈍材の圧縮変形におけるかたさと変形抵抗[A]

量とした。ねじりの場合は、試験片の平行部に変形前と後にけがいた平行線のねじれ角からせん断ひずみを求めた。

2.4 被加工材

被加工材には S 45 C を用いた。従来の研究^{2), 3)}では、バウシナ効果には組織依存性があることが報告されているので、本報ではこれら組織の影響について検討するため熱処理によって層状パーライト(LP)と球状パーライト(SP)にしたものを使用した。

2.5 試験片の作製とかたさの測定

一次加工材から二次加工用試験片を作製する場合は、切削と研削によって行ったが加工の影響が試験片に及ばないよう切削熱や加工層の生成などに十分な考慮をした。

2軸引抜圧延の場合は、図2に示すように引抜圧延後S断面のかたさを測定した(図に示すように中央部 D_0 のかたさが均一な部分を試験片として採取して一次変形でのかたさの不均一な部分避けることにした)。

かたさの測定は、前報と同様にロックウェルスーパーフィシャル型硬度計30 Nスケール($H_R 30 N$)を用いた。ねじり変形の場合のみ15 Nスケール($H_R 15 N$)を用いた。

測定面は、研削盤で加工した後800番までの研摩紙数種を用いて加工層を十分取り除くように最終仕上げを行った。これら加工の影響が及んでいないことを、 $H_R 15 N$, $H_R 30 N$ でのかたさ測定によって確認した。

かたさは、図1(b), (c), (d)に示すような矢印の方向に測定した。測定点の数は、ねじりの場合のみ5点で、その他は10点とり、これを平均してかたさ値とした。

3. 結 果

3.1 一次加工のない場合

図3は、[A]の場合で焼鈍材の圧縮ひずみに対するか

図4 一次加工材のかたさと二次ひずみ〔B〕

図5 かたさでの硬化率、軟化率と二次圧縮ひずみ

図6 組織(LP, SP)の相違による変形抵抗とひずみの関係〔A〕,〔B〕

たさ、変形抵抗の変化を示したものである。いずれも加工度の増加するに従って、かたさも変形抵抗も単調増加し加工硬化してゆく。SP の場合は、LP よりかたさ、変形抵抗が小さく、加工硬化率はほぼ同じである。また、試験片の表面と中心部でかたさの差が現れたのは、表面と中心部では端面摩擦の影響により変形度が異なったためである。以上のことから、本実験に用いた材料の加工硬化の状態は、従来から知られているものと同様で特殊な挙動を示すものでないといえることができる。

3.2 一次加工が2軸引抜圧延の場合

図4は、〔B〕で一次加工が2軸引抜圧延の後二次加工として圧縮変形したときの二次ひずみに対するかたさの変化を示したものである。(a)は一次加工の減面率3.7%の場合で加工硬化を示し、(b)は一次加工の減面率8.0%の場合で表面および中心で加工軟化し、(c)は一次加工の減面率18.8%の場合で加工軟化を示している。

図5は、図4での二次ひずみに対する加工硬化率および軟化率を示したものである。一次加工3.7%では単調増加の加工硬化を示すのみであるが、8.0%以上では極小値を示すような加工軟化があり、それより一次加工度が大きいものは二次加工による顕著な軟化が現れてい

図7 〔B〕,〔C〕のかたさとひずみ

る。この加工軟化には、組織による差異はみられない。

図6は、二次ひずみに対する変形抵抗の変化を示したものである。(a)はSPについて、(b)はLPについて示したものである。変形抵抗曲線は、一般的な単調増加を示し、その増加率は一次加工度によって変化し、一次加工の大きい方がやや増加率が小さい。変形抵抗は、かたさの低下にみられるような下に凸な曲線を示さず、すべて単調増加であり、かたさで示される加工軟化と変形抵抗の変化を直接結びつけることはできない。組織による変形抵抗の相違は、一次加工度によって異なってくるが、同一ひずみではLPの方がSPより大きい。

2軸引抜圧延後、二次加工として引張・圧縮変形した場合の結果が図7で、一次加工の減面率8.0%の場合である。引張変形の場合は、図にみられるように単調増加の加工硬化曲線を示し、圧縮の場合のような加工軟化は現れない。したがって、二次加工の変形方法により加工

図8 圧縮変形における寸法効果 [A], [B]

硬化する場合と加工軟化する場合のあることを示している。

3.3 圧縮変形における寸法効果

図8(a), (b)は、焼鈍材と一次加工材の試験片を圧縮変形した場合の寸法効果の結果である。いずれも形状比(D_0/L_0)が大きい場合に試験片の表面と内部のかたさの差が小さい。

3.4 圧縮変形における潤滑

均一な圧縮変形をするには、いろいろな方法⁴⁾があるが、十分な潤滑をすればかなり均一な変形ができる。本研究では無潤滑と潤滑剤3種を用いて圧縮変形でのたる形比とかたさの分布を吟味した。

3.4.1 たる形比(D_{max}/D_{min})

変形後の形状の変化をたる形比 R_V で表した。図9に[B]の場合の結果を示す。潤滑した場合は、無潤滑に比べかなりたる形比は小さい。

3.4.2 かたさ分布

潤滑と無潤滑で圧縮変形した試験片の円筒端面を1mmずつ研摩してかたさ分布を求めたものが図10である。(a)は[A]の焼鈍材の場合で、表面と内部および潤滑の有無によって加工硬化の状態が異なるのがわかる。(b)は[B]の場合で加工軟化から加工硬化に変わってゆく過程を無潤滑と潤滑の場合について示したものである。加工軟化は、ある二次ひずみ量(加工度)において飽和し、それ以上では加工硬化に移ってゆくことを明らかに示している。

図9 たる形比と潤滑の関係 [B]

図10 圧縮試験後のかたさ分布 [A], [B]

3.5 ねじり変形の場合

3.5.1 一次加工のない場合

図11は、[E]の場合で焼鈍材にせん断ひずみを与えた場合のかたさおよび変形抵抗の変化を示したものである。焼鈍材では、3.1項に述べたように圧縮と同様に加工硬化を示し、従来から知られている結果と同様である。

3.5.2 一次加工を与えた場合

図12は、[D]で一次加工として2軸引抜圧延(18.8%)

図 11 焼鈍材のねじり [E]

図 12 一次加工材のねじり [D]

を行い、二次加工としてねじり変形を与えた場合のせん断ひずみに対するかたさおよび変形抵抗（せん断応力）の変化を示したものである。SP、LP ともにかたさにおいては明らかに軟化がみられるが、変形抵抗はかたさの低下にみられるような下に凸な曲線ではなく単調増加の加工硬化曲線を示している。図 13 (a), (b) は、[E][F] で一次加工としてねじり変形を与え二次加工として逆方向にねじり変形を与えた場合である。図 13 (a) に示したように一次加工度が大きくなると二次加工で軟化が現れてくる。図では一次ひずみ 11.7% 以上で軟化が現れている。図 13 (b) の応力-ひずみの関係は、一次加工のない場合より若干低くなっている程度で、一次加工の大きさによる差はあまりみられない。この応力のわずかな低下がバウシング効果であるが、この応力の低下にはかたさにみられるような明りょうな一次加工度の差が現れず、また、かたさとの関係を結びつけるのは困難である。図 14 (a), (b) は、[E][F] の図 13 と同様な実験を SP について行った結果を示したものである。LP と同様に一次加工度の増大に従って二次加工でのかたさは、硬化から軟化を示している。図 14 (b) では、一次加工をした場合の変形抵抗が一次加工のない場合より低い値となっているのは、一次ひずみ 3.4%、7.0%、11.7% の場合で、18.7% の場合は大きくなっている。しかし、図 14 (a) に示すかたさ

図 13 LP の一次、二次加工がねじりの場合のかたさと変形抵抗 [E], [F]

図 14 SP の一次、二次加工がねじりの場合のかたさと変形抵抗 [E], [F]

では、一次ひずみ 7.0% 以上のものにはすべて加工軟化が現れている。このように、かたさの低下と応力の低下は、かたさが低下したからといって必ずしも応力が低下するという関係にはなく、かたさの低下と応力の低下は同一の傾向を示していない。

熊倉の研究²⁾によると、バウシング効果は SP より LP の場合に大きく現れることを述べている。本報での SP と LP を変形抵抗で比較すれば、LP の二次加工での変形抵抗は一次ひずみ 0% の場合よりすべて低くなっており、SP では上述のようにすべてが低くはならないがバウシング効果は現れている。

本研究で得られた加工軟化と加工硬化の定量的結果は表 2, 3 に示すとおりである。

4. 考 察

4.1 加工軟化と一次加工の加工硬化

一次加工によって加工硬化した後に二次加工で軟化がみられることから、二次加工での軟化は一次加工の硬化

表2 表1の〔A〕〔B〕の軟化と硬化(%)

形 状	比 較	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.66	1.0	2.0	0.66	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
		LP	LP	LP	LP	SP	SP	SP	SP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
一次加工度		0	3.7	8.0	18.8	0	3.7	8.0	18.8	0	0	0	18.8	18.8	18.8	0	18.8	0	18.8	18.8	0	18.8	0	18.8	0	18.8	
潤滑剤		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	J	J	T	C	N	N	T	T	C	C	J
数 化	有 無			○	○			○	○			○	○	○		○		○	○	○		○		○		○	○
	最大軟化率	表中		5.6 5.0	7.6 8.1			5.4 7.3	7.3 7.9				3.7 3.2	7.6 8.1	6.8 6.2		7.6 8.1		4.1 5.1	7.6 7.4	7.1 5.3		5.2 4.9		6.0 7.6		7.6 6.8
	二次ひずみ	表中		14.8 5.2	20.8 4.7			10.1 4.9	10.3 10.3				29.4 9.9	20.8 4.7	9.8 9.8		20.8 4.7		15.4 15.4	18.9 18.9	14.8 14.8		15.3 4.4		15.3 8.7		12.4 12.4
	軟化範囲	表中		△ 10	△ 22			19 10	△ 23				△ 15	△ 24	27 23		△ 23		30 22	30 28	△ 21		△ 15.5		24.5 23		21.5 19
硬 化	有 無	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	硬化率	表中	44.6 63.5	26.1 38.5	△ 19.8	△ 5.0	64.2 114.5	16.8 35.4	6.3 19.5	△ 5.8	39.9 53.7	44.6 63.5	50.3 51.5	△ 13.5	△ 5.0	1.3 3.6	44.6 63.5	△ 5.0	46.5 54.8	△ 7.4	0.3 29	△ 3.7	64.2 114.5	△ 9.8	91.5 95.5	4.4 7.6	3.5 7.9
	ひずみ表・中		30.0 30.9	30.9 29.4	30.0 30.0	29.4 30.0	29.9 29.4	29.4 30.0	30.0 30.0	29.4 30.0	30.0 29.0	30.0 30.0	29.4 30.0	30.0 29.0	30.0 30.0	29.7 29.5	29.7 29.7	29.7 29.7	29.4 28.7	28.7 31.5	31.4 31.4	30.0 29.8	29.8 28.0	30.2 30.2			
	一次かたさ		29.1	36.7	38.3		28.5	36.8	38.1				38.5	38.3	38.5		38.3		39.1	38.0	38.0		36.7		36.7		36.7
素材かたさ		27.4				19.9				28.0	27.4	28.0			27.4		27.8					19.9		19.9		19.9	
一次加工度: 減面率, N: 無潤滑, J: ショーンソン#111, T: テフロン, C: セロハンテープ, 表: 表面, 中: 中心, ○: 軟化, ●: 硬化, △: 二次ひずみ30%まで軟化のみ, かたさ: $H_R 15 N$																											

表3 表1の〔D〕〔E〕〔F〕の軟化と硬化(%)

組	織	SP	SP	SP	SP	SP	LP	LP	LP	LP	LP	SP	SP	LP	LP
一次加工		0	3.4	7.0	11.7	18.7	0	3.2	5.0	11.7	18.2	0	18.8	0	18.8
軟	有				○	○				○	○		○		○
	最大				0.8	1.7				0.6	0.6		2.9		2.4
化	軟化率				5.9	10.0				10.3	10.9		2.4		2.4
硬	有	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	硬化率	10.0	4.7	3.5	0.5	0.2	9.1	5.4	3.0	0.3	0.1	9.0	0.4	7.5	2.4
化	二次	18.7	16.6	16.6	16.9	16.3	18.2	16.6	15.9	14.9	17.0	16.0	16.3	15.8	20.6
一次材たさ			59.2	60.5	62.0	63.1		59.0	60.2	61.8	63.4		61.0		62.9
素材たさ		57.4					58.2					58.6		60.5	

* 一次加工 (18.8% 2 軸引拔圧延), かたさ: $H_R 15 N$

量と関連して考えなければならない。図 15(a), (b) は、このような点から加工硬化した量と最大軟化量の比を 2 軸引拔圧延とねじりの場合について検討したものである。

図 15 (a) は、一次加工の 2 軸引拔圧延のかたさの加工硬化量と二次加工が圧縮の場合の最大軟化量の比を、2 軸引拔圧延の減面率を一次加工度としてその関係を表したものである。これによれば、減面率が大きいほど二次加工での軟化量は大きい。また、図 15 (b) はねじり変形の効果をかたさでみた場合である。この場合は一次加工がねじり変形で図の (a) の場合とは変形方法が異なるが、同様に一次加工度が大きいほど軟化量が多い。

4.2 バウシング効果との関係

a) 予ひずみ

変形抵抗からみるバウシング効果は、予ひずみの小さい場合が大きい⁵⁾。しかし、4.1項に述べたように加工

(a) [B], SP

(b)(F), SP

図 15 二次変形における軟化と一次加工の関係〔B〕,〔F〕

軟化は予ひずみが大きいほど軟化量が大きく、予ひずみの影響がバウシンガ効果とは逆である。

b) ひずみの方向性

バウシंगा効果には、予変形方向と逆方向の場合だけでなく同方向の再荷重による変形抵抗の低下も含まれる。変形方向が予変形とある角度をもつ場合および負荷の除荷過程にも類似の現象がみられている⁶⁾。このようなバウシंगा効果に対して、本研究での加工軟化は一次加工と二次加工の組合せによってかたさが低下することであり、すでに述べたように変形抵抗の低下とかたさの

図16 圧縮変形によるかたさと変形抵抗の関係 (log-log)

異なる。したがって、バウシング効果による軟化とこのような変形での軟化を同一に考えることはできない。

c) ひずみ量

バウシング効果は、二次ひずみが微小ないわゆる遷移軟化領域の降伏応力の低下をもって定義されている。降伏応力は、そのひずみが0.1~0.2%の微小な場合のものであるが、本研究での加工軟化の最大値を示すひずみはバウシング効果での遷移軟化または永久軟化よりはるかに大きな二次ひずみ領域で起こる。二次ひずみが微小ひずみ領域の変形では加工軟化あるいは最大軟化量を示さないで、バウシング効果とは異なる。

d) 材料の組織

バウシング効果は、球状パーライト組織 (SP) をもつものが層状パーライト組織 (LP) の炭素鋼より小さく現れ³⁾、このことについては正および負のねじり変形の実験結果からも確認した。しかし、2軸引抜圧延後の圧縮およびねじり変形の場合の加工軟化においては組織による差は認められなかった。

以上、バウシング効果と加工軟化との顕著な相違点について考察を加えてきたが、バウシング効果が降伏応力の低下によって定義され、これとのかたさが一致するものでないことは明らかで、このようなことからバウシング効果と加工軟化は異なるものであるといえる。

4.3 かたさと変形抵抗

かたさと変形抵抗には、ほぼ比例関係があることはビッカースかたさやブリネルかたさでよく知られている^{7), 8)}。前報において、加工軟化はビッカースかたさで測定した場合もロックウェルス—パフィシャルかたさとは同様の傾向を示すことを確認したが、本報ではロックウェルス—パフィシャルかたさと変形抵抗にどのような関係があるか検討した結果、次のことがわかった。予変

低下は一致しない。バウシング効果は、実験的にはねじり変形後さらに逆ねじり変形した場合にみられる現象である。2軸引抜圧延したものを圧縮あるいはねじり変形する場合は、単純な正および負の逆方向の変形ではなく、その変形の応力状態も

形を受けていない焼鈍材の圧縮変形の場合は、図16(a)に示すようにかたさは変形抵抗のほぼ1/3乗に比例し、次のようになる。

$$H_R 30 N = c\sigma^{1/3}$$

圧縮変形では、表面と中心部では定数 c は異なるが指数には変わらない。これはすでに述べたように無潤滑による表面と中心部のかたさの差によるものである。

図16(b)は、予変形材のかたさと変形抵抗の関係で一次加工として2軸引抜圧延(18.8%)し、二次加工として圧縮変形した場合である。この場合、かたさと変形抵抗には比例関係がない。この場合は二次加工によって加工軟化を示し、かたさには極小値が現れるが、変形抵抗は単調増加だけでかたさの低下に相当する変形抵抗の低下がみられないからである。したがって、かたさと変形抵抗の関係が一定であるのは焼鈍材についてであり、予変形材では一定な関係は成立しない。

5. 結 論

鋼 (S45C) の層状パーライト (LP)、球状パーライト組織 (SP) を用いた実験から次のような結論を得た。

- (1) 一次加工が2軸引抜圧延の場合は、二次加工の変形方法によって加工硬化する場合と加工軟化する場合があり、二次加工が引張りの場合は加工硬化し、圧縮およびねじり場合は加工軟化する。
- (2) 本報の加工軟化には、組織 (LP, SP) による差は認められない。
- (3) 一次加工が2軸引抜圧延およびねじり変形のととき、一次加工量が大きいほど二次加工での加工軟化量は大きい。
- (4) 圧縮変形の場合、潤滑剤を使用することにより無潤滑の場合よりも均一なかたさ分布が得られる。
- (5) 本報での最大軟化率は、 $H_R 30 N$ で8.1%であり、このときの一次加工は2軸引抜圧延(18.8%)で二次加工は圧縮変形(4.7%)であった。
- (6) バウシング効果と本研究の加工軟化は異なったものである。
- (7) 本報での実験の定量的な結果は、表2、表3に示す。

参 考 文 献

- 1) 飯田喜介, 青木 勇: 鋼の加工軟化, 精密機械, **39**, 4 (1973) 441.
- 2) 熊倉重典: 炭素鋼のバウシング効果, 日本機械学会誌, **70**, 584 (1967) 1287.
- 3) 五弓勇雄, 岸 輝雄: バウシング効果に及ぼす金属学的因子の影響, 塑性と加工, **10**, 107 (1969) 863.
- 4) W. Johnson & P. B. Mellor: Plasticity for Mechanical Engineers (1962) 78 (培風館).
- 5) 五弓勇雄, 岸 輝雄ほか: バウシング効果に及ぼす予歪および結晶粒径の影響, 日本金属学会誌, **34**, 2 (1970) 154.
- 6) 熊倉重典: 金属材料のバウシング効果, 日本金属学会第IV総合分科シンポジウム予稿 (1971-12) 1.
- 7) 寺沢正男: わが国のかたさの研究, 日本機械学会誌, **72**, 600 (1969) 21.
- 8) 古沢武男ほか: かたさの材料力学的意義, 日本機械学会誌, **64**, 513 (1961) 1453.