

# 高強度低合金鋼板のせん断および曲げ加工性について

大森宮次郎\*, 神戸 仁,\*\* 山崎 明\*

(昭和55年9月4日受理)

## Workabilities of High Strength Low-Alloy Steel Sheet for Shearing and Bending

MIJAJIRO OHMORI, JIN KANBE and AKIRA YAMAZAKI

**Abstract**— High strength low-alloy (HSLA) steel sheets with a tensile strength level over  $100 \text{ kg/mm}^2$  were made by modified ausforming, and workabilities of them for shearing and bending have been studied. A well-known relationship,  $\tau_b = k \sigma_b$  was confirmed between the shearing resistance  $\tau_b$  and the ultimate tensile strength  $\sigma_b$ , where  $k=0.6-0.7$  being obtained. Sheared surface consisted of smaller burnish surface and larger fracture surface, but smaller fracture angle and less burr height generally brought flat sheared surface. Then, the HSLA sheets showed higher bending load, greater spring back and bending limit value, and thus workability of them for bending was not always good.

### 1. 緒 言

自動車の省エネルギーに対する有効な対策として車体の軽量化があげられ、これまでに多くの努力が払われてきた。車体への高強度鋼板の利用はその1つと言えよう。現在、抗張力が約  $40\sim 50 \text{ kg/mm}^2$  級の高強度鋼が部分的に利用されており、その使用範囲は次第に拡大されつつある。自動車産業界では、必要に応じ抗張力  $100 \text{ kg/mm}^2$  級の高強度鋼の利用も積極的にとり入れようという機運になってきている。<sup>(1)~(3)</sup>

筆者の一人は、鋼の強化やじん性の改善が、ひいては自動車等においては省エネルギーあるいは性能向上につながるということを考慮しつつ、加工熱処理による鋼の強じん化を試みてきた。そして、ばね鋼のような低合金鋼においては、改良オースフォームなる加工熱処理が、その工程や性能改善からも有利な方法であることを示してきた。<sup>(4),(5)</sup> 改良オースフォームを施した鋼は、延性やじん性の低下が少なく、降伏強さや引張強さが向上するので強度と延性、じん性の組み合わせが優れた材料となる。<sup>(6)</sup> また、疲れ限度が改善されるとともに疲れ寿命も著しく延長される。<sup>(7)</sup>

しかし、改良オースフォーム材のこのような優れた性質が今なお利用される段階に至っていない。その理由の1つとして、その利用方法に関する検討がなされていないことがあげられよう。改良オースフォームを施した後の鋼の加工性についてはいろいろ問題があろう。筆者らは、高強度鋼板の積極的利用が進められつつある自動車産業界の現状を考慮し、改良オースフォーム材の利用をはかるため、その材料の温間ならびに冷間(室温)での加工性について調査を進めてきた。本報告では、改良オースフォーム材の室温でのせん断加工性ならびに曲げ加工性について調査した結果を報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試鋼と熱処理

実験にはNi-Cr-Mo強じん鋼(SNCM8)に次のような熱処理を施して使用した。直径32mmの棒鋼を熱間圧延により所要の寸法にして後、不活性ガス(N<sub>2</sub>)中にて焼なましを行った。

これらの鋼片を温度880℃に30分間保持して十分にオーステナイト化し、その温度から圧延加工を開始し、加工後ただちに油冷してマルテンサイト変態を生ぜしめ

\* 茨城大学工学部機械工学科(日立市中成沢町)

\*\* ヤマハ発動機(株)(磐田市新貝)

た。これが改良オースフォームのプロセスであり、加工度は圧下率で30%および50%で、いずれも1パスで圧延加工を行った。また、上述のオーステナイト化温度からただちに油焼入れを行った通常熱処理試片も作製した。

焼もどしは、温度500℃および600℃の2種とし、1時間の保持で行い、焼もどし後は試片を水冷した。焼もどしを行ってから厚さ2mm、幅6mm、標点距離14mmの板状引張試片を圧延方向およびそれに直角方向に採取し、引張特性を測定した。その結果をTable 1に示す。抗張力がおよそ100kg/mm<sup>2</sup>以上のレベルになるように試片を作製してある。

Table 1 Mechanical properties of test specimens

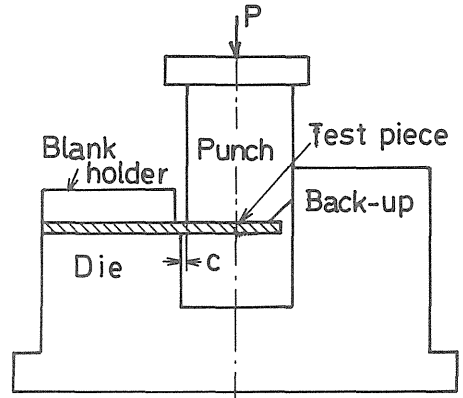
Heat treatment	Reduction in thickness	CHT	30% MA		50% MA	
			Orientation to R.D.	0°	90°	0°
500°C x 1h	Yield strength, kg/mm <sup>2</sup>	—	—	—	—	—
	Tensile strength, kg/mm <sup>2</sup>	131	135	140	138	131
	Elongation, %	14.3	13.0	12.2	12.2	11.0
600°C x 1h	Yield strength, kg/mm <sup>2</sup>	101	106	99	110	101
	Tensile strength, kg/mm <sup>2</sup>	111	113	117	115	107
	Elongation, %	17.2	16.5	16.5	15.9	16.8

2.2 試験片および試験方法

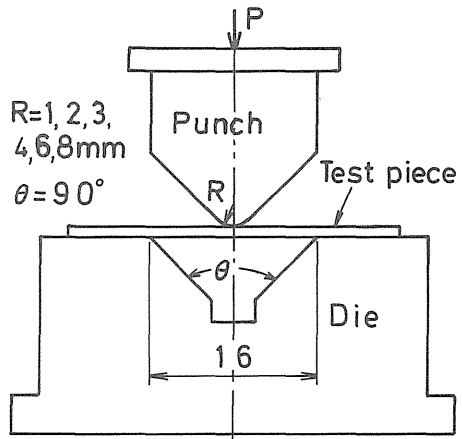
せん断および曲げ加工用の試片は、厚さ2mm、幅10mm、長さ40mmの長方形である。試片は圧延方向およびそれに直角方向に採取し、研削仕上げを行っている。

試験装置の概略をFig. 1に示す。(a)はせん断加工装置であり、本実験では片刃せん断法により試験した。ポンチの刃長は30mm、ダイの刃長は70mmである。実験条件としてポンチとダイのクリアランスCを板厚の0~15%の範囲に変化させてせん断試験を行った。片刃せん断であるので側圧によってポンチが逃げ、クリアランスを所定の寸法に維持するのが困難となるため、図のように側圧を支えるバック・アップを配置した。せん断試験は、せん断するポンチの刃が材料の圧延方向およびそれに直角な方向になるように配置して行い、せん断抵抗やせん断加工面の性質を調査した。

同図(b)は曲げ装置であり、本実験では90°V型曲げ法を用いた。ポンチ先端半径は図に示されているように1~8mmに変化させた。曲げ試験も材料の圧延方向およびそれに直角な方向に曲げて行い、曲げ荷重、スプリングバックおよび曲げ限界等を調査した。



( a )



( b )

Fig. 1 Test apparatus.  
(a) Shearing apparatus  
(b) Bending apparatus

せん断および曲げ試験は、容量5 tonの万能材料試験機を用いて行った。また、せん断加工面の性質やスプリングバックの測定には工場顕微鏡を用い、さらに必要に応じて金属顕微鏡も使用した。

3. 実験結果と検討

3.1 せん断加工性

3.1.1 せん断抵抗

Fig. 2および3に圧延方向およびそれに直角方向のせん断抵抗を示す。せん断抵抗は、最大せん断荷重をせん断面積で割った値である。また、図中の記号CHTは通常熱処理、MAは改良オースフォームを表わし、数字

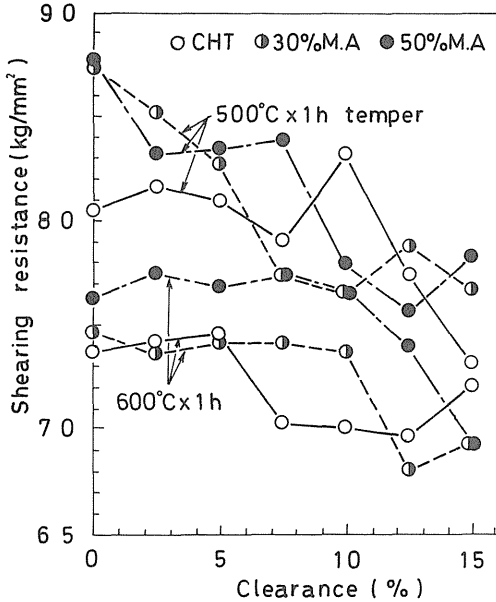


Fig. 2 Shearing resistance as a function of blade clearance. (Shearing orientation: parallel to rolling direction)

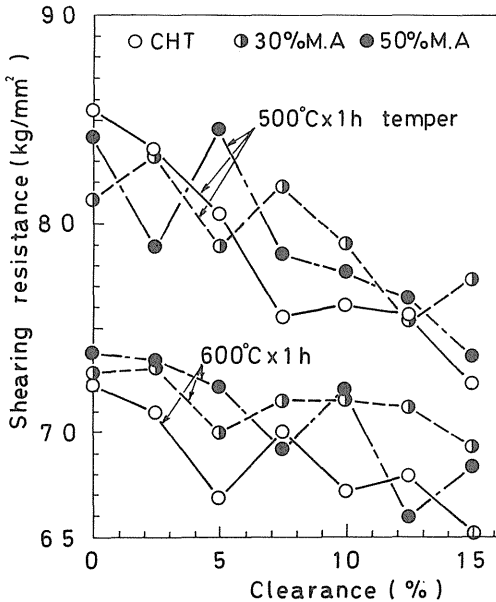


Fig. 3 Shearing resistance as a function of blade clearance. (Shearing orientation: perpendicular to rolling direction)

は加工度を意味する。クリアランスが0のとき、せん断抵抗が最も大きくなる傾向を示しており、曲げ影響が消失するためとみられる。また、圧延方向とそれに直角方向のせん断抵抗を比較した場合、圧延方向にせん断するときの方がせん断抵抗が概して高くなる傾向を示している。クリアランス0の場合のせん断抵抗 $\tau_b$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )は、引張強さを $\sigma_b$  ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )とすると、通常熱処理材および改良オースフォーム材ともに $\tau_b = k\sigma_b$ の関係で表わされ、 $k \approx 0.6 \sim 0.7$ なる値が得られた。この $k$ の値は、通常の鋼板では $0.7 \sim 0.8$ 程度であるのに比べて幾分低いことがわかる。

### 3.1.2 せん断加工面の性質

せん断加工面の性状は、二次成形における成形限界や疲れ強さ等に影響をおよぼすので、その性質について十分に調査しておく必要がある。せん断加工面を模型的に示すとFig. 4のようにだれ (penetration)、せん断面 (burnish surface)、破壊面 (fracture surface)

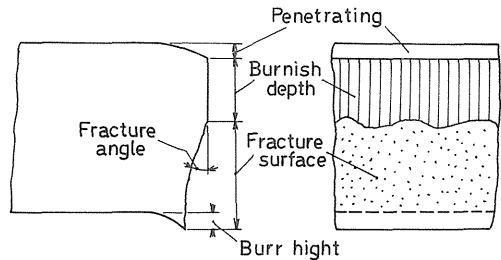


Fig. 4 Schematic representation of sheared surface.

およびかえり (burr) から構成され、せん断法や材料によってそれらの割合が変化する。Fig. 5および6は、せん断面の寸法のクリアランス増加による変化を示したものである。クリアランスが増加してもせん断面の大きさはほとんど変化せず、その値は板厚の約10%程度であることがわかる。しかし、圧延方向に直角にせん断する場合に比べ圧延方向にせん断の方が、せん断面が多少大きくなる傾向を示している。せん断面の大きさは、通常の軟鋼板では板厚の約25~50%程度であるから、高強度鋼板ではせん断面が著しく小さいことがわかる。

次にFig. 7にクリアランスの増加による破壊角の変化を示す。破壊角は、クリアランスの増加とともにわずかに増加する傾向を示しているが、その角度は約 $10^\circ$ 未満であり必ずしも大きいとは言えない。図は圧延方向に直角にせん断した場合のデータであるが、圧延方向の場合もほぼ同様の値を示した。

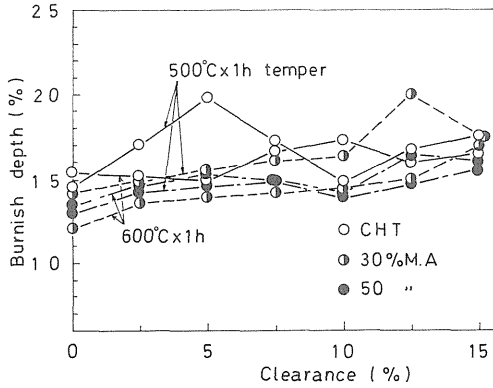


Fig. 5 Burnish depth as a function of blade clearance. (Shearing orientation: parallel to rolling direction)

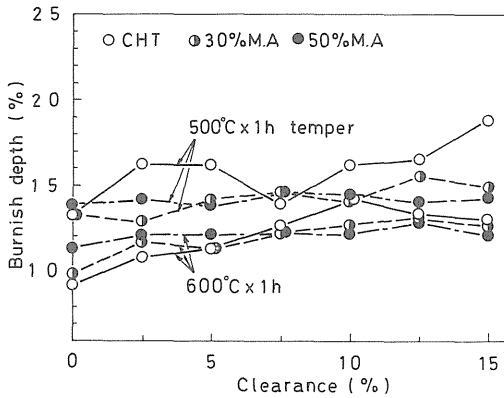


Fig. 6 Burnish depth as a function of blade clearance. (Shearing orientation: perpendicular to rolling direction)

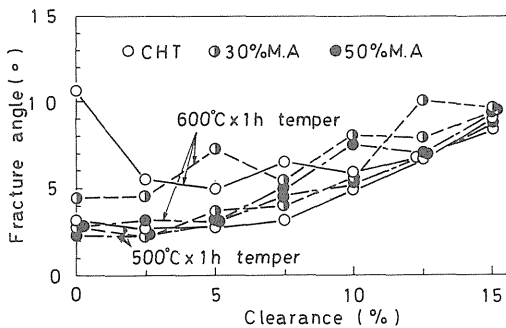


Fig. 7 Relation between blade clearance and fracture angle. (Shearing orientation: perpendicular to rolling direction)

また、かえりは加工品における大きな問題を含んでいるが、高強度鋼の場合、Fig. 8に示すようにかえりは板厚の約1%未満であり、ほとんどかえりが出ていないとみてよいであろう。しかし、圧延方向にせん断した場合、

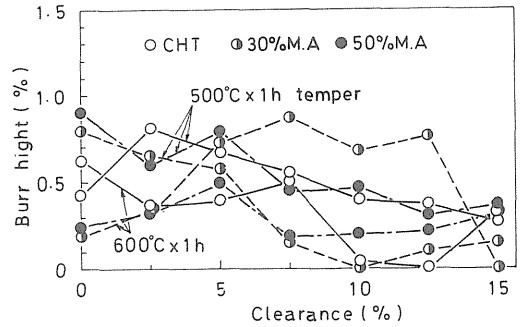


Fig. 8 Relation between blade clearance and burr height. (Shearing orientation: perpendicular to rolling direction)

それに直角方向にせん断した場合のかえり高さの約2倍の値となることがわかった。

以上のように、改良オースフォームにより強化し、抗張力  $100 \text{ kg/mm}^2$  以上のレベルに焼もどした高強度鋼板のせん断加工面は、せん断面の大きさは軟鋼板より小さく劣るが、かえりがほとんど出ないという特徴がある。したがって破壊面が板厚の約90%を占めることになるが、破壊角も比較的小さくなるという良い性質がある。また、これらのせん断加工面の各成分の板厚に対する割合は、通常熱処理材と改良オースフォーム材で大きく相違することはなく、大同小異であった。したがって、せん断抵抗およびせん断加工面の性質の両傾向から考え、このような高強度鋼板に対するクリアランスの値は、一般の硬鋼板と同様に板厚の約12%程度が上限と考えてよいであろう。

### 3.1.3 き裂発生状況の観察

上述のように、せん断面の大きさが、圧延方向にせん断したときとそれに直角にせん断した場合でわずかに異なる傾向がみられたので、両方向でき裂発生状況が異なるものと考え、ポンチ先端におけるき裂の発生状況を観察した。Fig. 9および10にその観察例を示す。ほぼ同じポンチ押し込み量に対し、圧延方向に直角にせん断する場合の方が、き裂が早期に発生するのが明瞭に観察されるであろう。ポンチ押し込み深さとき裂発生の有無を調査した結果をTable 2に示す。改良オースフォーム材の場

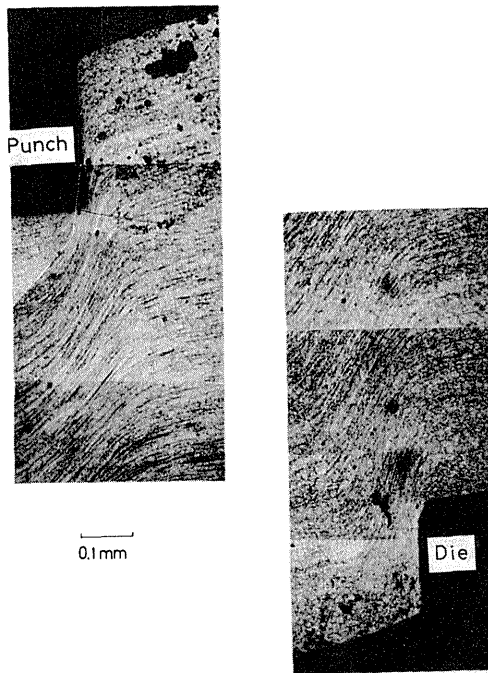


Fig. 9 Observation of crack nucleation ahead of blade tip. (Shearing orientation: parallel to rolling direction)

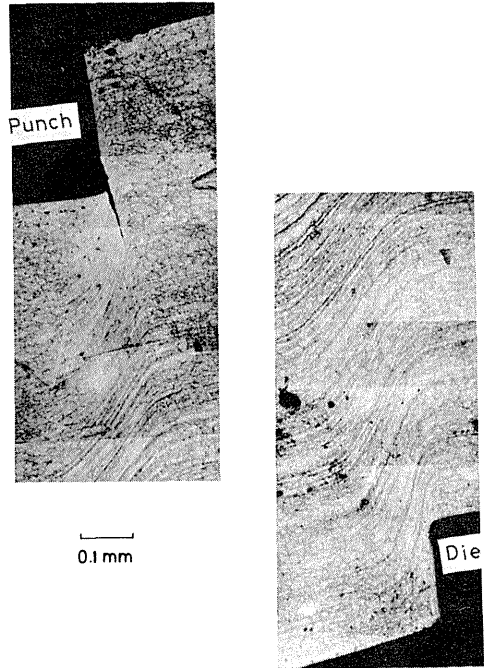


Fig. 10 Observation of crack nucleation ahead of blade tip. (Shearing orientation: perpendicular to rolling direction)

Table 2 Relation between punch penetration and crack length

Heat treat.	Shearing direction to R.D.	Punch stroke (mm)	Crack length (mm)
CHT	0°	0.36	0
	90°	0.46	0
30% MA	0°	0.32	0
	90°	0.24	0.18
50% MA	0°	0.33	0
	90°	0.21	0.25

合, 圧延方向に直角方向のせん断では, ポンチ押し込み量が小さいにもかかわらずき裂発生がみられるのに対し, 通常熱処理材では押し込み量が多いのにき裂発生はみられない。改良オースフォーム材では, せん断によるき裂は圧延方向に直角にせん断するときの方が発生しやすいことがわかる。

### 3.2 曲げ加工性

#### 3.2.1 曲げ荷重

V型曲げにおける板の変形過程は, 一般にポンチ下降によりポンチ先端近傍の板の曲率半径が減少し, 徐々に板が型内に押込まれて行くと, 板が初めに型の斜面に接触し, さらにポンチが下降するとポンチ斜面にも板が接触するようになり, 曲げ返し現象が生ずるようになる。このような曲げ変形過程におけるポンチストロークと曲げ荷重は, Fig. 11 に示すようにA→D→B→Cをたどり, D部は曲げ返しに対応することが知られている<sup>(12)</sup>。しかし, 本実験で用いた高強度鋼では, 曲げ荷重は実線で示すA→B→Cという経路をたどって上昇し, 曲げ返し部があらわれなかった。B点は自由曲げが終了して板が型およびポンチ斜面に密着し始める状態の荷重を意味し, この点を過ぎると板が圧縮され荷重は急激に上昇する。本実験では, 曲げ荷重としてB点の荷重をもって表わした。曲げ荷重は, ポンチ先端半径の増大によりわずかに上昇する傾向を示したが, ポンチ先端半径R=8mmの場合の曲げ荷重の例をFig. 12に示す。改良オースフォー

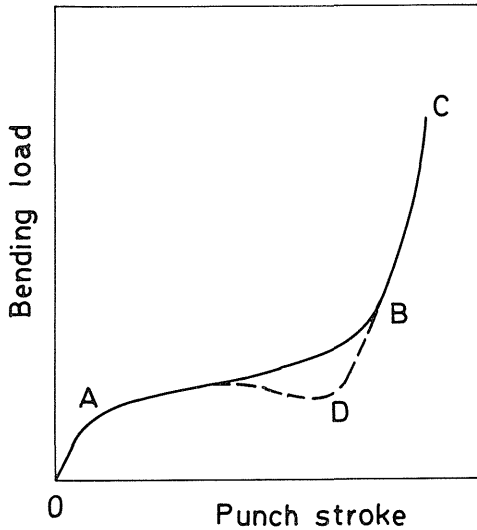


Fig. 11 Schematic diagram of bending load-Punch stroke.

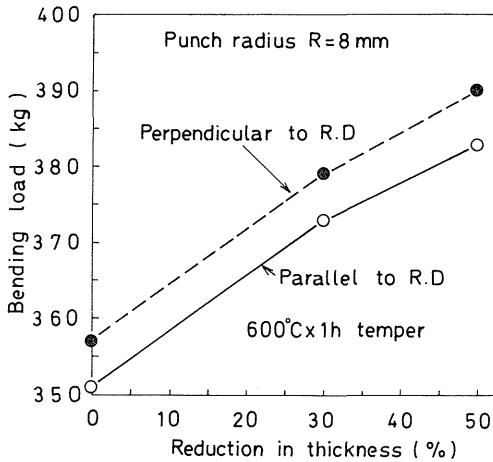


Fig. 12 Effect of modified ausforming on bending load.

ムによる降伏強さの向上に対応して曲げ荷重が増大する。このように改良オースフォームによって曲げ荷重が増大する傾向があるけれども、曲げ加工においては、曲げ荷重の大小よりも形状凍結性や曲げ加工限界等が重要な問題となろう。

### 3.2.2 スプリングバック

スプリングバックは、曲げ加工における厄介な問題であり、本実験で使用しているような高強度鋼ではかなり大きなスプリングバックを示すことが予想される。スプリングバックは、Fig. 11のB点の曲げ荷重まで板材を曲げ、次いで除荷したときのね返り角  $\Delta\theta$  を測定し、

曲げ角  $\theta=90^\circ$  との比率で示すことにした。Fig.13および14にその結果を示す。曲げ半径と板厚の比  $R/t$  の

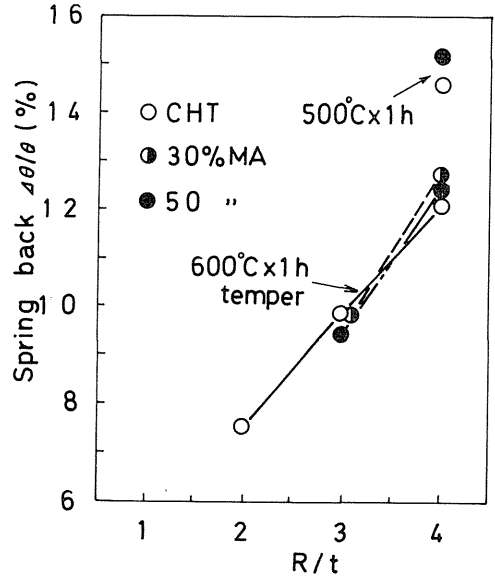


Fig. 13 Effect of punch radius on spring back. (Bending axis: parallel to rolling direction)

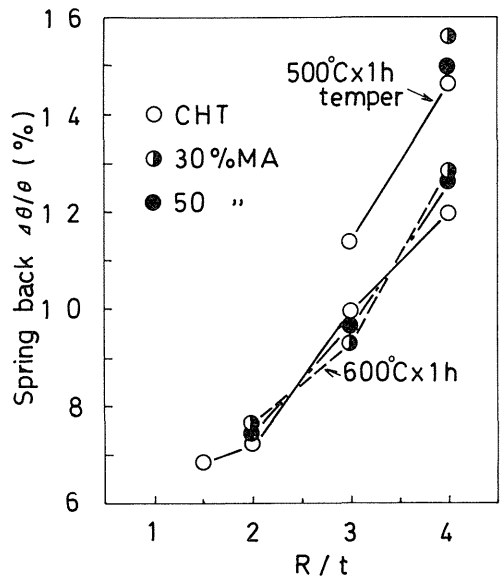


Fig. 14 Effect of punch radius on spring back. (Bending axis: perpendicular to rolling direction)

値が増大すると, スプリングバック  $\Delta\theta/\theta$  は急激に大きくなる傾向を示す。通常熱処理材と改良オースフォーム材を比較すると,  $R/t \leq 3$  の範囲では両処理材間にスプリングバックに大差はみられないが,  $R/t=4$  では降伏強さの高い改良オースフォーム材の方がスプリングバックが大きい値を示している。一般に硬鋼では, スプリングバックは約 5~10% 程度<sup>(13)</sup> であるのに比べて高強度鋼では  $R/t$  の大きな範囲でスプリングバックは硬鋼より大きいと言えよう。なお, 図には  $R/t < 1.5$  の範囲のデータが示されていないのは, 曲げの引張応力側に微細な割れが生じ, 曲げ限界を越えてしまったためである。

### 3.2.3 最小曲げ半径

曲げ加工においては, 製品に割れ等の欠陥の生じないことが重要であり, したがって使用材料について最小どの程度の半径まで曲げ加工が可能であるかを知っておくことは, 製品設計上からも不可欠と言えよう。曲げ加工における限界は, 通常最小曲げ半径で表わし, 曲げ加工品の引張応力側に微細な割れが生ずる曲げ半径を板厚で割った値である。本実験の結果を Fig. 15 に示す。改良オースフォームにおける加工度と  $R_{min}/t$  の関係で示してある。通常熱処理材に比べ改良オースフォーム材の  $R_{min}/t$  の値は高くなる傾向を示している。 $R_{min}/t$  の値が小さいほど曲げ加工性がよい材料であるから, 改良オースフォーム材の曲げ加工性は低いと言えよう。半硬鋼の  $R_{min}/t$  の値が 1~1.5 程度<sup>(14)</sup> であることを考えると, 本実験で用いた高強度鋼の曲げ加工性はかなり劣ることがわかる。

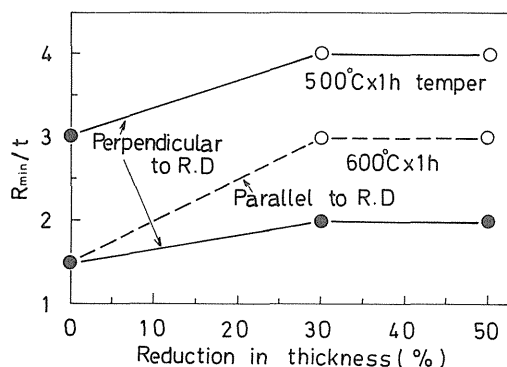


Fig. 15 Effect of modified ausforming on bending limit.

## 4. 結 論

Ni-Cr-Mo 鋼の SNCM 8 鋼を供試材とし, それに改良オースフォームを施し, 抗張力  $100 \text{ kg/mm}^2$  以上のレベルに焼もどしを行った材料のせん断加工性および曲げ加工性を調査した。おもな結果をまとめると次のようになる。

- (1) せん断抵抗  $\tau_b$  は, 引張強さ  $\sigma_b$  と  $\tau_b = k\sigma_b$  なるよく知られた関係で表わされ,  $k \approx 0.6 \sim 0.7$  なる値が得られた。このような高強度鋼のせん断加工におけるクリアランスは, 通常の鋼板と同様と考えて差支えない。
- (2) せん断加工面の性質のうち, いわゆるせん断面(バーニッシュ面)およびかえりが, 通常の鋼板に比べてかなり小さい。したがって破壊面が大となるが, 破壊角が比較的小さいので全体として平坦なせん断加工面が得られる。
- (3) 曲げ加工では, 曲げ荷重, スプリングバックおよび最小曲げ半径が, 改良オースフォーム材で多少高い値を示し, 曲げ加工性は必ずしも良いとは言いがたい。

以上のように, 改良オースフォームにより製造された抗張力  $100 \text{ kg/mm}^2$  級の高強度鋼板は, 室温でのせん断加工性および曲げ加工性は必ずしも良いとは言えない。温間における加工性の検討が必要になるであろう。今後は是非検討したい。

## 参 考 文 献

- (1) 丸山正明: 日経メカニカル, 64 (昭 55 年 6 月), P. 66.
- (2) 岩崎誠夫ほか 5 名: 塑性と加工, 17-190 (昭 51 年 11 月), P. 930.
- (3) 吉田清太: 塑性と加工, 21-229 (昭 55 年 2 月), P. 86.
- (4) 大森宮次郎: 材料, 20-216 (昭 46 年 9 月), P. 1024.
- (5) 大森宮次郎: 黒木剛司郎, 材料, 20-217 (昭 46 年 10 月), P. 1101.
- (6) 大森宮次郎, 川又清弘: 機械学会論文集, 43-371 (昭 52 年 7 月), P. 2404.
- (7) 大森宮次郎, 横川秀穂, 山崎明: 機械学会論文集 46-411A (昭 55 年 11 月), P. 1166.
- (8) 西山卯二郎ほか 7 名: 塑性加工学, 第 6 版, 養賢堂

- (昭51年), P.106.
- (9) R. Pearce and A. A. Mazhar, *Metals Technology*, 3-7 (1976-6), P. 338.
- (10) 文献(7)のP.105.
- (11) 文献(7)のP.104.
- (12) 益田森治: 薄板の曲げ加工, 第2版, 誠文堂新光社 (昭37年), P.136.
- (13) 前田禎三ほか4名: 塑性加工概論, 初版, 日刊工業新聞社(昭41年) P.55.
- (14) 文献(7)のP.117.