焼入れ焼戻し鋼の衝撃圧縮による塑性域発生*

小 林 訓^{*1}, 前 川 一 郎^{*2}On the Plastic Region Produced by an Impact Compression
in a Quenched and Tempered Steel Specimen

Satoshi KOBAYASHI and Ichiro MAEKAWA

Steel prismatical specimens were struck by a falling weight of 5.19 kg under a constant drop height of 1 m in order to determine the effects of heat-treatment and length of specimens on the appearance of the plastic zone and plastic strain in a specimen of finite length by an impact compression. Length of specimens used were 20, 40 and 60 mm. All specimens were quenched after heating at 850°C for 0.5 hr and tempered at 400, 500, 600 and 700°C, or annealed at 650°C for 1.5 hr. The theoretical relation between the plastic zone length and plastic strain in a specimen were estimated based on the plastic wave propagation in a specimen, and the influences of specimen length and of strain hardening on plastic strain were discussed. The plastic strain values measured experimentally coincide well with the values calculated by the equation with the plastic zone length measured for a large strain hardening specimen. Swelling over the plastic zone and microhardness distribution along the centre line of the specimen surface were studied. According to the morphologic observation on the plastic zone which appeared on a specimen surface using a SEM, it was determined that there existed not only a slip in a ferrite grain but also a gap along the grain boundary between two pearlite grains near the top end of the annealed specimen.

Key Words: Impact Compression, Plastic Zone, Plastic Strain, Quenched and Tempered Steel, Annealed Steel

1. 緒 言

衝撃力の作用によって発生する塑性波の伝ばに関する研究は多いが^{(1)~(3)}, 実用上有用な有限体の塑性変形の研究は比較的少ない⁽⁴⁾. 著者らは軟鋼の有限長試験片を衝撃圧縮し, 試験片に発生した塑性域の大きさや表面状態を調べてそれらに試験片長さや接触面の影響がみられることを明らかにした^{(5)~(7)}.

これらの研究では同一の鋼を用いたが, 塑性波は試験片内の応力が降伏強度を越えた時に発生し, その伝ば速度や塑性変形を生じることによる減衰はひずみ硬化の影響を受ける. したがって応力-ひずみ関係の異なる材料では試験片に発生する塑性域の大きさやひずみも変化することが予想される. このことを確かめるために本研究では炭素鋼を焼入れし, 実用上使用頻度の多い温度範囲で焼戻しおよび焼なましを行った長さの異なる角柱試験片を衝撃圧縮した. そして試験片に発生する塑性域の大きさや試験片のひずみに及ぼす応力-ひずみ関係の影響を調べることにした.

ところで衝撃力を受けた部材に発生するひずみと塑

性域の大きさの関係が知られていれば機械や構造物の安全使用にも役立つものと思われる. それゆえ, 本研究では有限長試験片に塑性波が伝ばする時の応力状態から試験片のひずみと塑性域長さの関係を理論的に表した. そしてひずみと塑性域長さの关系到及ぼす前述の熱処理を施した各試験片のひずみ硬化係数や試験片長さの影響を考察した. さらに衝撃圧縮実験により生じた試験片のひずみと塑性域長さを実測して理論的な値との比較を行った.

次に, 鋼を熱処理すると結晶組織が変化するので, 衝撃力によって衝撃端や反射波の起こる端面から発生する塑性域⁽⁵⁾⁽⁶⁾のすべり変形にも影響を与えると思われる. そこで塑性域の変形状態に対する熱処理の効果を調べるために, 塑性域表面のはり出し量と微小硬度分布を測定した. さらに SEM を用いて塑性域表面のすべり帯を観察して, 衝撃力の作用によって生じるすべり変形に対する結晶組織の影響を考察した.

2. 試験片準備と実験方法

使用した材料は市販の S45C の帯板で, これより試験片を図 1 のように製作した. すなわち角柱試験片の幅, 厚さを一定にして長さを 20, 40, 60 mm の 3 種類とした. これらの試験片を真空中で 850°C に 30 分間保

* 昭和 63 年 11 月 17 日 第 945 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 63 年 3 月 31 日.

^{*1} 正員, 長岡工業高等専門学校 (〒940 長岡市西片貝町 888).

^{*2} 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉).

表 1 供試材料の機械的性質

Series	Heat Treatment		Yield Strength (MPa) (*0.2 % Proof Stress)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%) G.L.= 30 mm	Reduction of Area (%)
	Quenching	Tempering				
A	850°Cx0.5hr	400°Cx1hr	*1258.2	1311.8	16.5	38.3
B	850°Cx0.5hr	500°Cx1hr	995.1	1092.5	23.1	47.3
C	850°Cx0.5hr	600°Cx1hr	707.0	770.0	31.2	51.5
D	850°Cx0.5hr	700°Cx1hr	562.7	671.9	39.6	58.0
E	650°Cx1.5hr	Annealing	367.3	586.6	42.4	58.3

持して水焼入れを行った。すべての試験片は微小硬度を測定して焼入れ状態を確認した。その後 400, 500, 600 そして 700°C の各温度に 1 時間保持して焼戻しを行った。これらの焼戻し材との比較のために 650°C で真空中に 1 時間半保持して焼なましを行った試験片も用いた。以上の各試験片と同じ熱処理を行った平板材の静的引張試験によって得られた機械的性質を表 1 に示す。衝撃圧縮試験に使用した各試験片はすべての熱処理後表面を研磨して鏡面仕上げとした。

実験は前報⁽⁵⁾と同様に試作した衝撃圧縮試験装置を用いて行った。重錘の質量は 5.19 kg であり、試験片上端の初期応力を一定にするために落下高さはすべて 1 m とした。

3. 実験結果と考察

3.1 理論的考察 衝撃力による材料の塑性変形を研究する上では塑性波伝ばに基づいた考察が必要である。河田ら⁽⁸⁾は衝撃引張りにおける破断後の試験片のひずみと衝突速度の関係を解析している。本研究では衝撃圧縮の作用を受けた有限長試験片のひずみと塑性域長さの関係に対する試験片長さやひずみ硬化の影響を理論的に考察する。以下の文章、図中においては簡単のために衝撃圧縮による材料の降伏強度 σ_y 、衝突速度 V 、試験片のひずみ ε などはそれぞれ $|\sigma_y|$ 、 $|V|$ 、 $|\varepsilon|$ などを意味するものとする。

図 2 は長さ l の弾・直線硬化形材料の有限長試験片の左端 $x=0$ を時刻 $t \geq 0$ において V の速度で衝撃圧縮した場合の $x-t$ 線図である⁽⁹⁾。 V は $t=0$ でこの材料の降伏強度 σ_y 以上の応力を生ずるに足るものとする。この時、破線 01 は弾性波、実線 03, 14 などは塑性波伝ばの時間経過を表す。今、任意の時刻 ps において長さ l の試験片内には領域②③④の各応力状態が存在する。 pq, qr, rs の長さを s_1, s_2, s_3 とすれば試験片のひずみ ε は $\varepsilon = \sum_{i=1}^3 s_i \varepsilon_i / l$ で表される。この ε_i は各領域の応力から σ_y と除荷時の弾性回復分を減じて求められる各領域のひずみである。本研究では時刻 t までの両端面からの塑性波の伝ば距離 $x_1 = C_p t$, $x_2 = C_p t$

図 1 試験片寸法

図 2 有限長試験片の塑性波

$-l/C_e$ を使って s_i を表示して ε を求めることにする。ただし C_e と C_p は弾性波と塑性波の速度である。全面塑性域とならなければ x_1, x_2 は衝撃端および固定端からの塑性域長さとなる。 E_e と E_p をそれぞれ弾性係数とひずみ硬化係数、 ρ を材料の密度とすると各時刻の ε は $0 \leq t < l/C_e$ においては

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E_p} - \frac{1}{E_e} \right) \left(\rho C_p V - \sigma_y \frac{C_p}{C_e} \right) \frac{x_1}{l} \dots \dots \dots (1)$$

となる。 $l/C_e \leq t < l(C_e + C_p)/(2C_e C_p)$ においては次のようになる。

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E_p} - \frac{1}{E_e} \right) \left\{ \left(\rho C_p V - \sigma_y \frac{C_p}{C_e} \right) \frac{x_1}{l} + \sigma_y \frac{C_p x_2}{C_e l} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

x_2 を x_1 の関数として表すと、結局 $l/C_e \leq t < 2l/C_p$ + l/C_e については同一の

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E_p} - \frac{1}{E_e} \right) \left\{ \rho C_p V \frac{x_1}{l} - \sigma_r \left(\frac{C_p}{C_e} \right)^2 \right\} \quad \dots (3)$$

となる。次に以下の考察を容易にするために無次元量 $\sigma^* = \sigma_r / (\rho C_e V)$, $\varepsilon^* = \rho C_p V / E_p$, $E^* = E_p / E_e$, $x_1^* = x_1 / l$, $x_2^* = x_2 / l$ を導入すると式(1)~(3)は次のようになる。 $0 \leq t < l/C_e$ においては式(4)にて表せる。

$$\varepsilon = \varepsilon^* (1 - E^*) (1 - \sigma^*) x_1^* \quad \dots (4)$$

$l/C_e \leq t < l(C_e + C_p) / (2C_e C_p)$ では

$$\varepsilon = \varepsilon^* (1 - E^*) \{ x_1^* (1 - \sigma^*) + x_2^* \sigma^* \} \quad \dots (5)$$

となる。 $l/C_e \leq t < 2l/C_p + l/C_e$ では

$$\varepsilon = \varepsilon^* (1 - E^*) (x_1^* - \sqrt{E^*} \sigma^*) \quad \dots (6)$$

となる。これらの式から塑性域長さとひずみの関係が求められる。しかし本研究のように V が小さい場合には $\sigma_r \leq \rho C_e V$ とはならないので、弾性波の反射・重畳により応力が上昇して σ_r を越えると塑性波が発生する。この時も塑性波が発生すれば図2と同様になる。そしてこの場合 σ^* 中の σ_r は材料の降伏強度と塑性波が発生した端面での反射前の弾性応力との差と考えたほうがよいが、弾性波の減衰や散逸もあるので実際上この値は見積りにくい。そこでまず ε に対する σ^* の影響を考察する。

表2に計算に使用した値を示す。ひずみ硬化係数 E_p は降伏点における応力-ひずみ線図の傾きより求めた。衝撃力が作用する場合、材料特性は変化し速度効果も考慮すべきであるが、本実験では衝突速度が小さいため近似的に静的な値を使用した。図3は長さ40 mmの試験片Mの400, 600°C焼戻し材AとCおよび焼なまし材Eの x_1^* と ε の関係である。図から ε に対する σ^* の影響は比較的小さいが、材質の影響が大きい。すなわち、 E_p が大きい材料のほうが x_1^* が同じであっても塑性変形によるひずみ硬化が大きいために ε が低下する。

次に ε に対する試験片長さの影響を考察する。前報⁽⁵⁾の軟鋼の結果では試験片長さが長くなっても塑性域長さは大きくならない。したがって x_1^* よりも x_1 で表したほうが実際的な場合もあるので、図4に ε と x_1 の関係を示す。図からA, C, E材ともに短い試験片Sのほうが試験片M, Lに比べて ε の値は大きい。さらにひずみ硬化係数 E_p の小さいE材では x_1 が大きくなるとM, LとSの ε の差が広がっている。

以上は塑性域長さとひずみの関係を理論的に考察した。実際に有限長試験片に衝撃力が作用する時、応力波の接触面での反射・透過、散逸あるいは減衰もあり解析困難な因子も多い。そこで次に実験的に試験片の

ひずみと塑性域長さの関係を求めることにする。

3.2 塑性変形の実測 前節では有限長試験片に塑性波が伝ばして生ずる塑性域長さとひずみの関係を理論的に考察した。本節では理論的結果と比較するために前述の熱処理を行った各試験片に一定落下高さから衝撃力を作用させ、試験片に生じた塑性域長さとひずみの関係を考察する。

衝撃力により塑性域は各試験片の上下端面から発生し、それらの長さを干渉顕微鏡を使って測定した。塑性域長さの材質による影響をみるために図5に上下端面からの塑性域長さ l_{r1} , l_{r2} と降伏強度の関係を示す。長さ20 mmの試験片Sでは600, 700°C焼戻し材および焼なまし材は全面降伏となったので図から除いた。図において l_{r1} と l_{r2} の値を比較してみると前報⁽⁵⁾

表2 熱処理材のひずみ硬化係数

Series	A	B	C	D	E
E_p (MPa)	$\times 10^2$ 49.0	36.0	23.5	21.3	16.7

$E_e = 20.4 \times 10^4$ MPa, $V = 4.43$ m/s, $\rho = 7.84 \times 10^3$ kg/m³

図3 ひずみと塑性域長さの関係(試験片M)

図4 ひずみと塑性域長さの関係 ($\sigma^* = 0.2$)

の結果と同様に下端面のほうが上端面より接触状態が良好になって高応力となるために l_{Y2} が l_{Y1} より少し大きい。そして衝撃力による試験片内の応力が降伏強度を越えにくくなるために l_{Y1}, l_{Y2} は σ_Y の増加につれて減少する。特に、長い試験片の方が応力波の伝播中の減衰の影響が大きくなって A, B 材では試験片 L の l_{Y1}, l_{Y2} が大きく低下したと思われる。

図 6 は実測した試験片のひずみと降伏強度の関係である。塑性域長さと同様に各試験片のひずみも降伏強度の増加とともに減少する。しかし理論的結果のように σ_Y が小さく塑性域長さが大きいほうが試験片 L と M, S のひずみの差が大きくなっている。

実測した塑性域長さ l_{Y1}, l_{Y2} を用いて式(5)より求めた ε の計算値および実測した ε と塑性域長さ $x^* = x_1^* + x_2^*$ の関係を図 7 に示す。 E_p の大きい A, B, C 材では実測値のほうが少し大きい両値は比較的近い値を示す。一方, D, E 材においては計算値が大きく x^* の大きな範囲でその差が広がっている。これは理論式の誘導においてひずみ硬化係数を一定にしたことなどによるものと思われる。そこで次に塑性域の表面状態

図 5 塑性域長さと降伏強度の関係

図 6 ひずみと降伏強度の関係

を調べてみる。

3.3 塑性域の表面状態 以上述べた試験片の塑性域長さやひずみのほかに、塑性変形が生じれば面の凹凸も生じているはずであり、その現象は結局は材料の微視的すべりによるものである。これらに関連した表面状態の観察を行ってみる。

図 8 は干渉顕微鏡により測定した塑性域表面のほり出し量の分布である。横軸は上端面側の塑性域と塑性変形していない領域からの距離 x をとってある。図からひずみ硬化係数の大きい A, B 材のほり出し量は小さく, C, D, E 材は大きい。これは無限体内を伝播する塑性波の解析結果⁽³⁾⁽¹⁰⁾とも対応している。さらに, x が増加すると A, B 材に比べて C, D, E 材のほり出し量は単調に増加せず不連続的に変化しているの、すべりが大きくなっているものと考えられる。これらの領域ではひずみ硬化係数も変化するために前節のように D, E 材では計算値と実測値の差が大きくなったものと思われる。

次にすべりが大きくなれば加工硬化による硬度の変化が現れると考えて試験片表面の微小硬度を測定した。図 9 に試験片表面中央部の実験前後の測定値を示す。横軸は衝撃端からの距離 x である。両端面から発生した塑性波は減衰するので端面近くですべりが大きくなり H_v 値も高い。特に, E 材では端面近くの H_v 値の変化が大きく、不連続的に大きなすべりが生じていることが予想される。

衝撃力の作用下でのすべり変形をより微視的に明ら

図 7 ひずみと塑性域長さの関係 ($\sigma^* = 0.2$)

かにしていくために、試験片表面の塑性域をSEMを用いて観察した。図10(a), (b)はE材の衝撃力により塑性変形した試験片表面の写真である。衝撃端から離れた変形の小さい領域では図(a)のようにフェライト部にすべりが生じていた。しかし端面近くではこのほかに図(b)のようにパーライトとパーライトの粒界の一部にも段差が認められた。一方、同程度の静圧縮ひずみを与えた塑性域表面では荷重端面近くにおいても図(c)のようにフェライト部にすべりが観察されたが、パーライト粒界の段差は認められなかった。この原因は次のように考えられる。すなわち、試験片端面から発生した塑性波は伝ば中に減衰するため試験片中央部より端面近くのほうが塑性変形が大きくなり、図9のように端面近くでは H_v 値も高い。特に、E材は他の熱処理材に比べて図8のようにはり出し量が多いので試験片端面近くではいっそう変形が大きくな

ていると考えられる。したがって端面近くではフェライト部だけでなくパーライト部のすべりも大きくなり、さらに粒界面での塑性波の反射・重畳によってもすべりが増大すると考えられる。その結果、隣接するパーライトはそれぞれ結晶粒ごとにすべり方向が異なるためにパーライトとパーライトの粒界に段差が生じたものと思われる。

図(d)と(e)はそれぞれ600°C焼戻し材の衝撃圧縮および静圧縮によって変形したすべり帯の写真である。すべりはいずれもフェライト部に生じており、衝撃荷重の作用下では端面近くにおいて変形が大きくなるので図(d)のほうが図(e)に比べて顕著な溝状のすべりが存在している。このことは塑性域先端からの距離が大きくなるとはり出し量が不連続的に変化した図8のC材の結果とも対応している。

図8 塑性域のはり出し量 (試験片 M)

図9 試験片表面の硬度分布 (試験片 M)

	Series	Load	Strain (%)	X (mm)	Y (mm)
(a)	E	Impact	1.09	7.51	7.52
(b)	E	Impact	1.09	1.34	6.90
(c)	E	Static	1.04	2.16	7.01
(d)	C	Impact	0.57	1.85	7.35
(e)	C	Static	0.61	1.79	6.85
(f)	A	Impact	0.24	2.16	7.94

(a) 5μm (b) 5μm

(c) 5μm (d) 10μm

(e) 10μm (f) 10μm

図10 塑性域表面の電子顕微鏡写真 (試験片 S)

400°C焼戻し材のA材でも図(f)のようにフェライト部に溝状のすべりが生じている。しかしながらE材に比べて微細なフェライト結晶が分散しているために図(a)のような大きなすべりとはならない。したがって、図9のA材のように H_v 値は端面近くにおいても連続的に増大したものと考えられる。

4. 結 言

S45Cの炭素鋼を焼入れ焼戻しおよび焼なましした角柱試験片を落下重錘により衝撃圧縮した。そして試験片に生じた塑性域長さやひずみを塑性波の伝ぱに基づいて考察した。さらに塑性域表面のほり出し量や微小硬度分布を測定し、SEMによりすべりを観察した。それらの結果をまとめてみると次のようになる。

(1) 有限長試験片の塑性域長さとひずみの関係式を塑性波の伝ぱを考慮して理論的に求めた。その結果からひずみには材料のひずみ硬化の影響が大きく効き、ひずみ硬化係数が小さくなるとひずみが大きくなり、試験片長さが短くなると大きくなることを説明した。

(2) 衝撃圧縮により生じた試験片の塑性域長さとひずみは材料の降伏強度が上昇するため焼戻し温度が低いと小さくなった。また試験片内の応力波の減衰のために長い試験片のほうが塑性域長さやひずみは小さい。ひずみの実測値と理論値を比較すると、ひずみ硬化係数の大きい材料では両値は近い値となり、ひずみ硬化係数の小さい材料では実験値のほうが大きくなった。

(3) 塑性域先端近くのほり出し量はひずみ硬化係数の小さい材料が大きくなり、焼なまし材や焼戻し温

度が高い材料ではほり出し量の変化は単調ではなく不連続的になった。焼なまし材と400°C焼戻し材の試験片表面の微小硬度分布は試験片端面付近において大きくなり、特に焼なまし材の H_v 値は増減が大きくなった。

(4) 塑性域のSEMによる観察結果によると焼なまし材はフェライト部分のすべりのほかに、パーライトとパーライトの粒界にも段差が生じていた。これは衝撃荷重では試験片端面近くの変形が大きくなることなどによるものである。しかし静荷重によって塑性変形が生じた試験片ではフェライト部にのみ明確なすべりが観察された。一方、焼戻し材では変形が小さく、結晶組織が微細なためにフェライト部分のすべりは小さいが、600°C焼戻し材では静荷重より衝撃荷重のほうが大きな溝状のすべりが観察された。

文 献

- (1) Karman, T. V. and Duwez, P. J., *J. Appl. Phys.*, 21-10 (1950), 987.
- (2) Malvern, L. E., *J. Appl. Mech.*, 18 (1951), 203.
- (3) Kuriyama, S. and Kawata, K., *J. Appl. Phys.*, 44-8 (1973), 3445.
- (4) 日本機械学会編, 衝撃破壊研究分科会成果報告書I, (昭41), 207.
- (5) 前川・小林, 機論, 51-472, A (昭60), 2846.
- (6) 小林・前川, 機論, 52-478, A (昭61), 1559.
- (7) Kobayashi, S. and Maekawa, I., *Proc. 2nd Conf. Asian-Pacific Congr. on Strength Evaluation*, (1986), 239, Seoul.
- (8) 河田・福井・清野, 東大宇宙研報告, 1-4, A (昭40), 390.
- (9) Johnson, W., *Impact Strength of Materials*, (1972), 239, Edward Arnold.
- (10) Wood, E. R. and Phillips, A., *J. Mech. Phys. Solids*, 15 (1967), 241.