計装化シャルピー衝撃試験による高硬さ鋼の動的強度*

侯 培 紅^{*1}, 茶 谷 明 義^{*2}
放 生 明 廣^{*2}, 立 矢 宏^{*2}Dynamic Strength of Hard Steels Measured by
Instrumented Charpy Impact Testing TechniquePeihon HOU, Akiyoshi CHATANI,
Akihiro HOJO and Hiroshi TACHIYA

A method for the determination of dynamic stress-strain relation of materials by means of instrumented Charpy impact testing technique was proposed and its validity was shown by some measured examples. The dynamic strengths of steels (S55C, SCM3, SUJ2, SK3) hardened from HV340 to HV890 by heat treatment were obtained from stress-strain relations measured by the present method. As a result, it was found that the yield strength of hard steels increases roughly linearly with increasing hardness and that under dynamic loading was 20~30% higher than that under static one. Those strengths are also found to become maximum in the vicinity of HV700.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Instrumented Charpy Impact Test, Dynamic Strength, Stress-Strain Relation, Hard Steels, Hardness, Strain Rate

1. 緒 言

計装化シャルピー衝撃試験法は材料の衝撃曲げ破壊抵抗を測定するために広く用いられ、荷重-時間関係から完全塑性挙動を仮定して動的降伏点が求められたことがある⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、測定された荷重-時間関係から材料の基本的な動的応力-ひずみ関係を知ることは困難で、通常はこのような動的応力-ひずみ関係を知るためには別の装置や試験方法によらねばならない。一方、計装化シャルピー衝撃試験法を用いた著者らの試み⁽³⁾⁽⁴⁾によれば、平滑試験片にひずみゲージを貼付して荷重-時間関係と同時にひずみ-時間関係を測定すれば、衝撃曲げ荷重のみならず衝撃曲げ荷重下の試験片の応力-ひずみ関係も容易に明らかにし得る可能性がある。この方法ははりの塑性曲げ理論に基づくために近似的なものであるが、計装化シャルピー衝撃試験法による動的応力-ひずみ関係の簡便測定法として有用と考えられる。

そこで本研究ではこのような著者らの試みに基づき、動的強度に関する資料が部分的にはあっても⁽⁵⁾少

なくしかし実用的な種々の高硬さ鋼を対象として基礎的な実験を重ねた。そして衝撃曲げによるこれらの材料の応力-ひずみ関係から動的強度を求め、高硬さ鋼の硬さと動的強度の関係を明らかにした。

2. 実 験 方 法

2.1 衝撃荷重の評価法 試験機として容量 294 J の計装化シャルピー衝撃試験機を、試験片としては後述のような各種焼入れ焼戻し鋼で長さ 50 mm、一辺が 8 mm の正方形断面の角棒材を用いた。図 1 は実験方法の概略を示したもので、支持台上に設置された試験片の中央をシャルピーハンマが打撃し、試験片が三点衝撃曲げを受けるようになっている。時間を t としてこのときの作用衝撃荷重 $P(t)$ はハンマのひずみゲージ G1 による出力 $e(t)$ と伝達関数 $G(t)$ を用いて次式で表される。

$$P(t) = \int_0^t G(t-\tau) \cdot e(\tau) d\tau \equiv P_b \cdots \cdots (1)$$

較正実験からあらかじめ $G(t)$ を求めておけば測定された $e(t)$ から上式により $P(t)$ が求められる。ただし、実際の計算は上式をフーリエ変換した次式より $\bar{P}(s)$ を求め、さらに、逆変換を施し $P(t)$ を求めた。

$$\bar{P}(s) = \bar{G}(s) \cdot \bar{e}(s) \cdots \cdots (2)$$

* 原稿受付 1996 年 8 月 23 日。

^{*1} 金沢大学大学院 (〒920 金沢市小立野 2 40 20)。^{*2} 正員、金沢大学工学部。

ここで s は変換パラメータ, $\bar{P}(s)$, $\bar{G}(s)$, $\bar{e}(s)$ はそれぞれ $P(t)$, $G(t)$, $e(t)$ のフーリエ変換形を表し, これらの変換と逆変換は高速フーリエ変換(FFT)法によった⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

なお, ハンマ内での応力波伝ば現象を考慮せず, ハンマ打撃部の荷重は $e(t)$ に比例すると仮定すれば, 定数を C として

$$P(t) = C \cdot e(t) \equiv P_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表され, 式(1)による P_b と区別して P_s とする.

2.2 曲げモーメントと応力の評価法 単純支持はりのスパン L の中央に衝撃荷重 P_b が作用するとき, 荷重点の曲げモーメント M は

$$M = P_b L / 4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表されると仮定する. 本実験の場合は試験機の都合上 $L = 40 \text{ mm}$ である.

次に, はりの塑性曲げ理論に基づく応力と曲げモーメントの関係式(Herbert の式)⁽⁸⁾ より, 材料の引張側と圧縮側で応力-ひずみ関係が等しいと仮定すれば, はり上下表面の応力 σ は曲げモーメント M , ひずみ ϵ を用いて次式で与えられる.

$$\sigma = \frac{2}{bh^2} \left(2M + \epsilon \frac{dM}{d\epsilon} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで b ははり断面の幅, h は高さであり, 本実験ではいずれも 8 mm である. 式(4), (5)は, はりの静曲げに適用されるべきものである. しかし, スパン L が小であれば短時間のうちに応力波が多数回繰返し伝ばし, 試験片内の応力状態は荷重のごく初期における弾性域を除き, はりの静曲げ理論によるものに近くなると考えられるので, 簡単のために図1のような衝撃三点曲げの場合にも近似的に適用する. なお, ひずみ ϵ は試験片に貼付されたひずみゲージ G2 より直接測

Fig. 1 Schematic testing setup by Charpy impact bending

定される.

2.3 試験片および測定条件 試験片には, 機械構造用炭素鋼 S55C, 強靱鋼 SCM3, 軸受鋼 SUJ2, 工具鋼 SK3 の 4 種類の丸棒材を用い, 長さ約 200 mm に切断後いずれも前述の断面寸法に研削仕上げした. これらを真空中にて約 1123 K (850°C) で 1 時間加熱後油焼入れし, 焼戻し温度を $393 \sim 773 \text{ K}$ ($120 \sim 500^\circ\text{C}$) と種々に変え, 種々の硬さの試験片を準備した. 材料の化学組成とビッカース硬さ HV の範囲を表1に示す. HV の測定は試験荷重 9.8 N のもとで行った. なお測定法の検討材料として市販の SS400 材で硬さ HV 120 の試験片も用いた.

測定条件として, 衝撃曲げの場合ハンマの初速度はすべて 5.1 m/s とした. 比較のために行った静曲げの場合は, 図1に類似の負荷装置を別に製作し, 定速形の材料試験機で負荷速度約 $3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ の範囲で実験した. なお試験片と支持台の間に潤滑剤を塗布することなく接触部の摩擦軽減には特に配慮しなかった.

2.4 測定波形例と本法の検討 図2および図3はそれぞれ, 試験片が SUJ2 で HV 700 の高硬さおよ

Table 1 Chemical compositions and Vickers hardness of materials

Materials	Chemical compositions (Wt %)							Vickers hardness HV
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	
S55C	0.57	0.19	0.71	0.018	0.008	----	----	340~700
SCM3	0.33	0.23	0.73	0.016	0.012	1.01	0.16	360~600
SUJ2	0.96	0.27	0.45	0.012	0.007	1.45	----	430~890
SK3	1.04	0.39	0.96	0.019	0.015	0.43	----	450~860

Fig. 2 Load time relation

びSS 400で低硬さHV 120である場合に関する波形測定例を示し、いずれもシャルピーハンマの初速度は前述のように5.1 m/sの場合である。図2中破線の結果 P_s は P_d に比較して波打ちが大きく、他の検討結果^{(6)~(8)}からみても、特にピーク値などは打撃点に作用している荷重を直接表していないと考えられるので、衝撃荷重としては P_d を採用している。なお図中の $\dot{\epsilon}_p$ は後述の塑性ひずみ速度で、この場合一般に一定にならないので図示中の塑性域での平均値を示している。

以上の結果と式(4)、(5)から σ - ϵ 関係を求めた結果が図4、5である。図中には比較のために静曲げによる場合と対応する静圧縮の結果を示す。なお、低硬さのSS 400の場合には衝撃曲げに対応する衝撃圧縮の結果(ホプキンソン棒法による結果)も示してある。両者はよく一致しているが、この他にS 55 C材でも同様に一致する結果を得ている。これらの結果より、いずれも衝撃曲げによる場合、ひずみが小さい弾性域内の負荷初期の結果を除けば、全体として多少の波打

ちが見られるものの、本法がほぼ妥当であると考えられる。

図6は、図4、5の衝撃の場合に対応する塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ を示したものである。ここで弾性係数を E とすれば塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ は次式で表される。

$$\dot{\epsilon}_p = d\epsilon/dt - d\sigma/dt \cdot 1/E \quad \cdots \cdots (6)$$

図6より、いずれも σ - ϵ 関係が直線からはずれ始めるひずみ以上で $\dot{\epsilon}_p$ が増加している。特にSS 400の場合とは異なり、明らかな降伏現象を示さないSUJ 2の場合は波打ちながらも比較的ゆるやかな増加がみられる。

3. 実験結果および考察

3.1 硬さとひずみ速度 各種高硬さ鋼について塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ を求めると図6から推測されるように塑性ひずみ ϵ_p が大きくなるにつれて $\dot{\epsilon}_p$ も大きくなる傾向にある。そこで、だいたいの目安として $\epsilon_p=0.2\%$ における $\dot{\epsilon}_p$ と硬さHVの関係を示せば図7

Fig. 3 Strain-time relation

Fig. 4 Stress-strain relation (SUJ 2 HV 700)

Fig. 5 Stress-strain relation (SS 400 HV 120)

Fig. 6 Plastic strain rate-strain relation

のようになる。鋼種ごとに傾向はやや異なるようであるが、概して硬さが高くなれば $\dot{\epsilon}_p$ は小さくなり 180~70 1/s の範囲にあることがわかる。高硬さによる高変形抵抗のため衝撃中のハンマの速度が減少することによって考えられる。

3・2 硬さと動的強度 動的、静的ともに得られた σ - ϵ 関係から $\epsilon_p=0\%$ の場合について硬さと強度の関係を示した結果が図8である。動的強度に対応する $\dot{\epsilon}_p$ の範囲は概ね 100~10 1/s にあり、静的な場合の $\dot{\epsilon}_p$ は後述の図9、10の場合も含めて 10^{-5} ~ 10^{-4} 1/s にある。 $\epsilon_p=0\%$ の場合は σ - ϵ 関係が弾性域の直線関係からはずれ始めた場合に相当する。したがって、精度よく強度値を決定することは困難であるが、だいたいの傾向を知るために図中実線で示した。全体として動的強度は静的強度より 20~30%程度大きく、鋼種による相違はやや見られるものの、HV 700 程度まで両強度はともに硬さの増加に従って増加する傾向にあ

る。しかし、この硬さ以上になると強度は増加せずかえって低下する場合もあり、ばらつきはあるが特定の硬さで最大強度に達することがわかる。このような傾向は熱処理鋼の疲労限度がある程度の硬さ以上になると低下する現象に類似しているが、今のところ硬さの定義と降伏強度の定義との対応は物理的にも明らかではなく、十分な説明ができない。なお図中には参考までに長い棒を用いた衝撃三点曲げ試験から得られた類似の材料による別の結果⁽¹⁰⁾を破線で示した。HV 800 程度まで本結果とほぼ一致している。

図9、10はそれぞれ $\epsilon_p=0.2\%$ 、 1% の場合の結果で、前図とほぼ同様な傾向を示している。動的な場合の $\dot{\epsilon}_p$ の範囲は $\epsilon_p=0.2\%$ の場合、図7のとおりで、 $\epsilon_p=1\%$ になると $\dot{\epsilon}_p$ はさらに大きく 500~120 1/s の範囲にある。なお、 ϵ_p が 1% の場合に高硬さ側の測定点が少なくなるのは試験片が破断したためである。

Fig. 7 Relation between plastic strain rate and Vickers hardness (case of $\epsilon_p=0.2\%$)

Fig. 9 Relation between strength and Vickers hardness (case of $\epsilon_p=0.2\%$)

Fig. 8 Relation between strength and Vickers hardness (case of $\epsilon_p=0\%$)

Fig. 10 Relation between strength and Vickers hardness (case of $\epsilon_p=1\%$)

Fig. 11 Relation between maximum load during bending and Vickers hardness

3・3 硬さと最大曲げ荷重 材料の最大曲げ抵抗の傾向を知るために最大曲げ荷重 $P_{\max}$ と硬さ HV の関係を示したものが図 11 である。これらの大部分ではひずみゲージによる測定ひずみの限界を越えているために応力を知ることができないが、この結果は $\varepsilon_p = 0, 0.2, 1\%$ の結果と類似の傾向を示している。また鋼種によってばらつきはあるが、 $P_{\max}$ が最大を示す硬さは HV 600～HV 700 と考えられ、動的のほうがやや高硬さ側にあるようである。

4. 結 言

計装化シャルピー衝撃試験を利用して衝撃三点曲げ

を受ける試験片の動的応力-ひずみ関係を簡便に求める方法を提案し、測定例に基づく検討を行い、本法の妥当性を示した。本法に基づき、熱処理で得られた各種の高硬さ鋼 S 55 C, SCM 3, SUJ 2, SK 3 の動的および静的応力-ひずみ関係を求め、これらの強度を明らかにした。その結果、鋼種による差はあるが、塑性ひずみ速度が 10^2 1/s 程度の動的強度はおおむね静的強度より 20～30%程度大きく、硬さの増加とともに強度も増加するが、HV 700 程度で最大となることがわかった。

文 献

- (1) 小林俊郎・高井耕一・間庭秀世, 金属学会誌, **30** 7(1966), 700-706.
- (2) 布村成具・中代雅士, 鉄と鋼, **64**-7(1978), 860-869.
- (3) 茶谷明義・放生明廣・立矢宏・侯培紅, 第4回材料の衝撃問題シンポジウム前刷集, (1993-5), 25-27, 材料学会.
- (4) Chatani, A., Hojo, A., Tachiya, H. and Hou, P., *Proc. Experimental and Theoretical Mechanics '93*, (1993), 304-308, Bandung.
- (5) Harding, J. (Blazynski, T. Z. 編), *Materials at high strain rates*, (1987), 133-186, Elsevier Applied Science.
- (6) 放生明廣・茶谷明義・上村文人, 機論, **55**-511, A(1989), 477-482.
- (7) 井上裕嗣・石田宏之・岸本喜久雄・渋谷寿一, 機論, **57**-534, A(1991), 424-429.
- (8) 益田森治・室田忠雄, 工業塑性力学, (1961), 43-45, 養賢堂.
- (9) 茶谷明義・放生明廣, 金属学会会報, **27**-9(1988), 726-728.
- (10) Chatani, A., Hojo, A. and Tachiya, H., *Proc. 6th Inter. Conf., Mechanical Behaviour of Materials 4*, **1** (1991), 301-306, Kyoto.