中村康治先生につつしんで謝意をあらわします。

文 献

(1) 川口, 日本金属学会誌, 8-10 (昭 19), 578.

(2) G. Sachs, *Z. Metall-kde.*, 19 (1927), 352.

(3) J. Frish & E.G. Thomson, *Trans. ASME*, 73 (1951), 337.

(4) Discussion by M.C. Shaw, *Trans. ASME*, 73 (1951), 343.

620.178.74:539.422:669.14-134

炭素鋼鍛造物の衝撃曲げ破壊挙動について (I)*

(i) 鍛造方向の影響, (ii) 熱処理の影響

稲 田 貞 俊**

On the Destructive Behavior of Carbon Steel Forgings Due to Impact Bending (I)

(i) Effect of Forging Direction, (ii) Effect of Heat Treatment

by Sadatoshi INADA

To study of the behaviors of destruction of carbon steel forgings at impact bending, we have designed the impact testing machine of drop hammer type. The drop hammer fell freely without any initial velocity. The ratio out put/input of the amplifier used was 100 % through the range of frequency 100~20000 c/s. In order to study the effect of forging direction on the behaviors of destruction of S55C forgings by impact bending five kinds of test pieces were prepared from forgings. According to our experiments, the directionality of forgings at the impact bending was remarkably strong, compared with the directionality at the static bending. The behaviors of normalized test pieces were superior in the resistance to impact bending to the behaviors of annealed test pieces. The forging directionality by impact bending was diminished by normalizing of test pieces.

1. 緒 論

鍛造物として用いられる種々の材料のうちで、普通一般に最も多く使用されている炭素鋼について研究した。本論文は衝撃曲げをうける炭素鋼鍛造物の破壊挙動について研究した。このために落錘式衝撃試験機を試作した。落錘を取換えることによって同じ衝撃エネルギーで衝撃速度がかえられるようにした。本論文では、ひずみゲージを試験片支持はりにはりつけ、ひずみゲージのひずみ量を抵抗力に換算した。S55C 鋼材の鍛造加工による結晶粒子の並びを第 1 図に示す。静引張り、静曲げによる引張強さ、伸び率および降伏点は、伸び率において認められた多少の差異のほか、方向性が鍛造物の機械的性質におよぼす影響はほとんど認められなかった。これに反し衝撃曲げの場合では明らかにその影響を認めた。このほか炭素鋼鍛造物の衝

撃曲げ破壊挙動に影響をおよぼすものとして、含有炭素量、熱処理、鍛造比および衝撃速度の影響がある。炭素鋼鍛造物については二、三の研究をみるだけであって、炭素鋼鍛造物の衝撃曲げ破壊挙動におよぼす鍛造方向の影響および熱処理の影響を研究することは鍛造方法に関して、また鍛造物の熱処理に関して実用上有用であると考え。なお本論文で破壊とは降伏を含

第 1 図 鍛造方向に並んだ結晶粒 (S55C) (マクロ腐食による)

* 昭和 35 年 11 月 3 日 第 38 期全国大会講演会および昭和 36 年 11 月 12 日 第 39 期全国大会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 36 年 7 月 25 日。

** 正員, 徳島大学工学部 (徳島市南常三島町 2)。

めて降伏後の曲げおよび破断の現象の意味である。

2. 試作した落錐式衝撃試験機の概要

この試験機の全高約 5 m, 試験片と落錐との間隔は最大 3.200 m, 落錐重量は 12.5, 25 および 50 kg である。落錐の頭部に取付けたモールステーパシヤクをソケットとにはめ込み, 落錐の落下は油圧によって行なうようにした。その構造を第 2 図に示す。

3. 試 験 片

実験に用いた炭素鋼鍛造物の化学成分を第 1 表に示す。鍛造のままの状態の組織を第 3 図に示す。第 1 図に示す結晶粒の流れより第 4 図に示すような模型を考

第 1 表 S55C 鋼材の化学分析表

C %	Si %	Mn %	P %	S %
0.55	0.33	0.48	0.020	0.019

C: 油圧室, S: モールステーパシヤク,
P: 上下動ピストン, H: つめ

第 2 図 モールステーパシヤク
(落錐側)とソケットの構造説明図

第 3 図 鍛造のままの組織

え, これより第 5 図に示す A, B, C, D および E 種類の試験片を切り出した。試験片の形状および寸法を第 6 図に示す。

4. 試験片支持はり

試験片と試験片支持はりとの関係位置を第 7 図に示す。ひずみゲージ A.G. はひずみ測定のためのものであり, ひずみゲージ D.G. は温度補償用のものである。これらによりブリッジを構成する。増幅器, 記

第 4 図 鍛造物の結晶流れを示す模型図

第 5 図 各種試験片における結晶粒の
流れ, φ は結晶粒の流れ方向と衝撃
力の働く方向とのなす角

第 6 図 試験片の形状および寸法

第 7 図 試験片と試験片支持
はりの関係位置を示す図

録部を含めた測定状態における測定装置の周波数特性を第 8 図に示す。

5. 測定方法⁽¹⁾

落錘重量 W kg が試験片より H m の高さから落下し試験片に衝突する瞬間の速度を v_0 m/s, 試験片破断直後の落錘の速度を v_1 m/s とする。試験片に働く衝撃力 $P(t)$ に対して, $W(v_0 - v_1)/g = \int_0^T P(t)dt$ なる関係式から成り立つものとする。ただし落錘が試験片に衝突した瞬間を $t=0$ とし, 試験片は T s 後に破断したものとする。試験片と試験片支持はりの曲げのかかった状態における接触点から, ひずみゲージの中心までの距離 l' , 試験片支持はりの断面係数 Z_0 を知れば, $P(t) = EZ_0 \epsilon(t)/l'$ となる。すなわち, 測定値 $\epsilon(t)$ より衝撃力 $P(t)$ を求めることができる。衝撃曲げと同じ条件で静曲げの荷重 kg とひずみとの関係を第 9 図に示す。

$P(t) = C_1 \epsilon(t)$ とおいて, C_1 の値は静曲げのとき得られる値を衝撃曲げにおいても用いた。したがって

$$\int_0^T P(t)dt = \frac{EZ_0}{l'} \int_0^T \epsilon(t)dt = C_1 C_2 A$$

第 8 図 測定状態における測定装置の周波数特性線図

第 9 図 静曲げ荷重とひずみとの関係線図

ただし, A は衝撃曲げにおける現象波形と衝撃力が働いていないときに示される基準線とで囲まれる面積 mm^2 である。 C_2 は現象波形の縦軸の長さ mm をひずみ値に換算した係数と, 横軸の長さ mm を時間 s に換算した係数との積である。

5.1 鍛造方向の影響 5.1.1 実験結果

炭素鋼鍛造物の衝撃曲げ破壊挙動の一例を第 10 図に示す。これより第 11 図に示す現象波形の模型を考えた。図にて, A 点は静曲げの場合の降伏点に相当するものである。これを h_1 と示す。この点のひずみ量は標準ひずみと比較して測定する。標準ひずみ 1000×10^{-6} の一例を第 12 図に示す。 BC 間で塑性曲げが起る。 C 点

第 10 図 炭素鋼鍛造物の衝撃曲げ破壊挙動の一例, 上部の 1 目 = $1/5000$ s

第 11 図 衝撃曲げ現象波形の模型図

第 12 図 標準ひずみ 1000×10^{-6} の一例

の高さは塑性曲げの抵抗力を表わすもので、これを h_2 と示す。第 11 図において OE は衝撃破断時間を表わし、これを T と示した。実験に用いた落錘は 25 kg で衝撃エネルギーは 20, 30, 40 および 60 kg m である。前述の各試験片について衝撃エネルギー WH と吸収エネルギー U との関係、破断所要時間 T との関係、衝撃曲げ降伏点 h_y との関係および衝撃曲げ抵抗力 h_2 との関係を第 13~16 図に示す。次にこれらの各試験片のうちから結晶粒の並びの方向と衝撃力の作用する方向とのなす角 φ が 0° , 45° および 90° の場合に相当する A, E および C 種試験片について角 φ と吸収エネルギー U および破断所要時間 T との関係を第 17, 18 図に示す。

5.1.2 実験結果に対する考察 衝撃曲げ破壊挙動の鍛造方向依存性のうち、衝撃曲げ降伏点についてのべる。降伏点はひずみ速度が増すと一般に高くなる^{(2)~(4)}。本実験について平均ひずみ速度を次式によ

って求め、

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{Pl}{4EZt_Y} \quad s^{-1}$$

$\dot{\epsilon}_E$ と衝撃エネルギー WH との関係を各試験片について求めて見ると第 19 図に示すようになった。ただし、 Z : はりの断面係数 282 mm^3 , l : 試験片支持間隔 150 mm , P : $0.6 h_Y \text{ kg}$, E : 弾性係数 $2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, t_Y : 衝撃開始より降伏までの時間 s 。

第 15 図にて衝撃曲げ降伏点 h_y が衝撃エネルギーの

第 16 図 炭素鋼鍛造物の各種試験片に関する衝撃エネルギー 20, 30, 40 および 60 kg m のときの曲げ抵抗の値

第 13 図 炭素鋼鍛造物の各種試験片に関する衝撃エネルギー WH 20, 30, 40 および 60 kg m のときの吸収エネルギー U の値

第 14 図 炭素鋼鍛造物の各種試験片に関する衝撃エネルギー WH 20, 30, 40, 60 kg m のときの破断所要時間 T ms の値

第 15 図 炭素鋼鍛造物の各種試験片に関する衝撃エネルギー WH 20, 30, 40, 60 kg m のときの衝撃曲げ降伏点 h_y の値

第 17 図 衝撃エネルギー別、角 φ と吸収エネルギー U との関係

第 18 図 衝撃エネルギー別、角 φ と破断所要時間 T との関係

第 19 図 衝撃エネルギーと平均ひずみ速度との関係

増加とともに高くなることについてはひずみ速度が増加するためと考えてよい。次に A, B, C 試験片と D, E 試験片とで $h\tau$ の値が明らかに異なっている点について組織学的考察を次のように行なった。鍛造物は A₃ 点以上の温度オーステナイト状態で鍛造されるから、オーステナイト結晶粒界に存在する非金属介在物も鍛伸され、これらは鍛造方向にならぶ。この非金属介在物の周囲にはフェライトの晶出が期待される(第 3 図参照)。このような鍛造組織が試験片の切欠き底部にあると、各試験片において、組織上の方向性が考えられる。第 20 図は説明のため選んだ切欠き部における三方向 S, R および T 方向

第 20 図 切欠き部に説明のため選んだ三方向 S, R および T 方向

第 21 図

× 28.5

第 22 図 鍛造のままの組織

× 28.5

第 23 図 応力除去焼なまし組織

R および T 方向を示し、第 21 図は切欠き底部に現われる非金属介在物とフェライトのさやに働く引張りを示す説明図である。図によって明らかになったように、各試験片において応力集中が異なり、D, E 試験片において降伏点が、A, B, C 試験片の降伏点より高くなることが判明する。

5.2 熱処理の影響 5.2.1 試験片および実験方法

鍛造方向の影響をみた同一試験片について熱処理の影響について実験した。E 種試験片について応力除去の焼なましを行なった。温度 $630^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ で 1 時間保持し後炉中冷却した。焼ならし処理は温度 $830^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ で 1 時間保持し後空冷した。この二とおりの熱処理の結果得られた試験片について、鍛造のままの状態と、衝撃曲げ破壊にどのような相違があるかを研究した。同時に鍛造方向性に対する熱処理の効果をみるために A および C 種試験片について焼ならしを行なった。鍛造のまま、焼なまし後および焼ならし後の組織を第 22 図より第 24 図までに示す。落錘重量 25 kg を用い、衝撃エネルギーは 20, 40 および 60 kg m とした。試験片寸法は 5.1 鍛造方向の影響の場合と同

である。

5.2.2 実験結果 E種試験片に関する鍛造のままの状態(E), 焼なましした場合(EA)および焼ならしした場合(EN)について, 衝撃エネルギーと, 破断所要時間との関係および吸収エネルギーとの関係を第25図に示す。衝撃エネルギーと衝撃曲げ抵抗力との関係および降伏点との関係を第26図に示す。鍛造のままの

第24図 焼ならし組織

第25図 (上図)鍛造のまま(E), 焼なまし(EA)および焼ならし(EN)試験片に関する衝撃エネルギーと破断時間との関係。(下図)衝撃エネルギーと吸収エネルギーとの関係

第26図 鍛造のまま(E), 焼なまし(EA)および焼ならし(EN)試験片に関する衝撃エネルギーと(上図)降伏点との関係, (下図)曲げ抵抗力との関係

状態と焼ならしした場合について角 φ と吸収エネルギー, 破断所要時間, 曲げ抵抗力および降伏点との関係を第27, 28図に示す。

5.2.3 実験結果に対する考察 焼ならしした試験片については明らかに吸収エネルギーは高く, 鍛造のままの状態より耐衝撃性は向上する。破断所要時間についても同様である。衝撃曲げ抵抗力についても鍛造のままの状態より向上している。降伏点については鍛造のままの状態と大差ない。焼なましした場合, 吸収エネルギーおよび破断所要時間は鍛造のままの状態よりやや向上している。全般的に見て鍛造物の機械的性質の向上に対して焼ならし処理が焼なまし処理よりすぐ

第27図 鍛造のままと焼ならしした場合における角 φ と吸収エネルギー U および破断所要時間 T との関係

第28図 鍛造のままと焼ならしした場合における角 φ と衝撃曲げ抵抗力 h_2 および降伏点 h_Y との関係

れている。方向性に対する焼ならし処理は h_2 および h_Y に対しては幾分均等化される点でよい。吸収エネルギーおよび破断所要時間と角 φ との関係は、そのまま焼ならしした場合にも残っている。

6. 結 論

炭素鋼鍛造物の衝撃曲げ破壊挙動におよぼす鍛造方向の影響と熱処理の影響について結論を述べる。

(i) 各試験片のうち、C 種試験片が衝撃曲げに対する挙動は最も好ましい。(ii) 衝撃曲げをうける炭素鋼鍛造物の降伏荷重は静曲げの降伏荷重の 2 倍ないし 5 倍に達する。(iii) 鍛造物の鍛造方向の影響は衝撃エネルギーが増せば、はげしく表われる。(iv) 鍛造物の機械的性質を向上させるため焼ならしをすることは焼な

ましをすることより有効である。焼なましした場合と鍛造のままの状態では、焼なましした場合がややまさる。(v) 焼ならしによって衝撃曲げ抵抗力および降伏点におよぼす鍛造方向の影響は幾分緩和される。しかし吸収エネルギーおよび破断所要時間におよぼす鍛造方向の影響はだいたいそのまま残っている。

本研究にあたって終始御指導を賜った恩師 横瀬教授ならびに大阪大学 美馬教授に深く感謝いたします。

文 献

- (1) 稲田, 材料試験, 10-94 (昭 36), 553.
- (2) J.D. Campbell, *Act. Met.*, 1 (1953-11), 706.
- (3) M.J. Manjoine, *J. Appl. Mech.*, 11-4 (1944), A-211.
- (4) 中川, 機械学会論文集, 25-151 (昭 34-3), 115.

討

〔質問〕 各所で衝撃破壊の研究が行なわれているが、それらはひずみ速度あるいは衝撃速度でデータを整理しているのので、この研究も他との比較対照するためにそのような整理方法をとられたらどうか。

(中 沢 一)

〔回答〕 本研究においてもひずみ速度あるいは衝撃速度でデータを整理してよいが、次報以下において落錘重量をかえたい場合を考慮して、落錘の重量に無関係に衝撃速度だけを指定すればよいかという点に関して問題があるように思われるので、衝撃エネルギーでデータを整理している状態である。

もっとも本報においては $WH=20, 40$ および 60 kg m に $W=25 \text{ kg}$ を入れて H を知り、自由落下として衝撃速度を求めることはできる。落錘重量一定ならば問題ないわけである。

衝撃速度でデータを整理した場合も落錘重量が変わった場合、これを区別することが必要であろうかと思う。また第 33 期通常総会講演発表の際は有効高さ H および衝撃速度の両方でデータを発表した。

〔質問〕 方向依存性を非金属介在物にかかる応力集中から脱落、さらにこれらの欠陥部の連絡という説明は興味深いものがある。軸受鋼で実験された黒田氏

論

の疲れはく離に関する実験では、非金属介在物を A 形と B 形に分けて、A 形 (硫化物, けい酸物) は鍛造によって変形するので、疲れはく離にはあまり影響しないが (本論文の説明は A 形についてのように見受けられる), B 形 (酸化物) は鍛造の際変形しないので、鍛造時にこの種の非金属介在物と周囲のフェライトとの間に何らかの欠陥を生じ、これがはく離に影響するように述べられている。

もちろん力のかかり方や機構についても差異があり、一概には述べられないが、著者の実験ではこの 2 種の非金属介在物について何か差異が認められなかったか。

(栗 野 泰 吉)

〔回答〕 本論文でいう非金属介在物とは、質問の A 形についてである。いわれるとおり、A 形は鍛造によって変形するので、本論文で述べたような考察がなされたのであるが、B 形は鍛造によって変形しないので、鍛造による方向依存性に及ぼす B 形の影響は考えられないと思う。しかしながら B 形についてもその形態とか、配置と力のかかり方との間の問題等が考えられるが、本実験では B 形についてはいちおう考慮しなかった。