炭素鋼の衝撃引張疲労破面の様相*

近 藤 誠 治** 井 口 宏*** 本 田 久****

Fractography of Carbon Steel in Impact Tensile Fatigue Fracture

by

Seiji KONDO

(Faculty of Engineering, Nihon University, Kooriyama)

Hiroshi IGUCHI

(Faculty of Engineering, Niigata University, Nagaoka)

and Hisashi HONDA

(Daido Steel Co., Ltd., Tookai)

In order to investigate the behavior of metals on impact fatigue, the new-type universal impact fatigue testing machine suitable for the tests under various conditions of stress or impact velocity was devised. Then, the three tests under different load conditions, the impact tensile tests, the impact tensile fatigue and non-impact push-pull fatigue tests, have been carried out on 0.21%C steel circular notched specimens at room temperature. To understand the surface features on the impact fatigue fracture, each fractured surfaces were observed by means of scanning electron microscope. The main results obtained were as follows:

(1) The four features, the lamella pattern on stage I fractured surface, the striation pattern, the dimple pattern and the cleavage pattern, were observed on both impact fatigue and non-impact fatigue fracture surface. The appearances of lamella and striation pattern on the impact fatigue fracture surface were clearer than that on the non-impact fatigue fracture surface at the same stress level.

(2) And also, the striations with chasms were observed on the former surface, but not on the latter one. It can be considered that the existence of this topography is the individual features on the impact fatigue fracture surface due to the variation of stress at crack tip.

(3) According to the increase of mean stress level, the area of stage I fractured surface decreased and the area of dimple pattern increased consequently. Also, the striations had a tendency to disappear with the increase of mean stress.

(Received Sep. 16, 1975)

1 緒 言

衝撃疲労に関する研究は主として機械要素の強度を調べるために古くから行なわれていた。またさまざまな観点から材料の衝撃疲労特性を調べた研究も多く報告されている。筆者らも、さきにき裂に着目しその発生と進展挙動や結晶粒径との関係について報告した。しかし衝撃疲労の研究においては荷重波形など試験条件が報告者によって異なり、また結果の整理に衝撃応力や衝撃エネルギーを用いた報告など整理方法も違うな

ど各報告間の定量的な比較が困難であり、さらに資料として活用する際にも問題点が多い。それゆえ、より系統だった汎用性のある研究が必要である。

一方、破壊の様相という面から衝撃疲労をみると、その両極には一回の衝撃的荷重で破断する衝撃破壊と衝撃的要素の少ない正弦波荷重下での疲労（以下衝撃でない疲労と呼ぶことにする）破壊があると考えられる。したがって衝撃疲労特性を知るうえにはこれら相互の関係を明確には握することも重要と思われる。また破面観察結果と破壊の様相について記述した成書も多いが衝撃疲労についての報告は少ないようである。

本報は上述の観点から、衝撃疲労に関する一連の研究を行なう端緒として、種々の条件下での実験ができた衝撃疲労試験機を試作し、炭素鋼環状切欠き材の衝

* 本報を「金属の衝撃疲労強度に関する研究（第1報）」(Study on Impact Fatigue Strength of Metals, I) とする

原稿受理 昭和50年9月16日

** 正 会 員 日本大学工学部 郡山市田村町

*** 正 会 員 新潟大学工学部 長岡市学校町

**** 正 会 員 大同製鋼(株) 東海市元浜町

撃引張疲労破面を観察した。ついで、衝撃引張疲労破面にみられた様相を考察するため衝撃引張試験および衝撃でない引張圧縮疲労試験を実施しこれらの破面様相との関係を比較検討した。また、衝撃引張疲労破面の様相と引張平均荷重の関係についても検討した。

2 衝撃疲労試験機および実験方法

衝撃引張疲労試験には、一連の研究を行なうために今回試作したハンマ強制落下型衝撃疲労試験機を用いた。その原理を Fig.1 に示す。試験片下端の打撃台 A にハンマが衝突するときに発生する衝撃荷重が試験片に作用する。荷重の大きさは、ばね S、ハンマ重量およびカム の偏心量でそれぞれ変えうるが、本実験では打撃速度一定の試験とするためハンマの重量のみを変えて行ない、ハンマが打撃台に衝突する直前で実測した打撃速度が 1.8 m/sec になるようばね S を調整して用いた。平均荷重はばね K で負荷される。

Fig. 1. Schematic diagram of impact tensile fatigue testing machine.

本機では試験片に永久変形が生ずると打撃台の位置が変化し、結果として荷重が変わる。これを防ぐため 2 個のマイクロスイッチで伸びを検出し常に打撃台が一定位置にあるように自動調整している。その調整感度は 0.3 mm でハンマのリフトストロークの約 0.5 % である。またき裂の進展による試験片の剛性低下に伴い発生荷重が変化するが実験に用いた試験片では破断寿命の約 85 % までは ± 5 % の範囲で一定とみなせた。

このような機構で発生させた衝撃荷重波形の一例を Fig.2 に示す。本実験ではロードセルをモニタとして荷重はすべて試験片に貼付したストレングージから測定した。ハンマと打撃台の衝突時間間隔は 0.25 sec でそれまでにまえの衝突による荷重は完全に減衰して

Fig. 2. An example of impact load pattern obtained from strain gauge pasted on test specimen.

いる。最大引張荷重に達するまでの時間、引張荷重が作用している時間および最大引張荷重と最大圧縮荷重の比は、試験片や破断寿命比 N/N_f と異なるが、 $N/N_f < 0.80$ においてそれぞれ 0.36~0.40 msec, 0.88~0.92 msec および 2.42~2.67 であった。

衝撃でない引張圧縮疲労試験には回転重錘式万能疲労試験機（毎分 1000 回、島津製）を、衝撃引張試験にはシャルピ衝撃試験機を使用した。

試験片は Table I (a) に化学成分を示す S20C 材で、Fig.3 に示す形状に機械加工後 650℃、60 分の真空焼なましを行なった。機械的諸性質を Table I (b) に示す。また衝撃でない引張圧縮疲労および衝撃引張試験片の切欠き部寸法は衝撃疲労試験片 B および A と同一にした。いずれの試験も室温 ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) で実施した。

破面観察には X 線マイクロアナライザを用い二次電子線像として観察した。切欠き底より最終破断部を完

Table I. Chemical composition and mechanical properties of test material.

(a) Chemical composition (%)

Material	C	Si	Mn	P	S
S20C	0.21	0.24	0.47	0.024	0.021

(b) Mechanical properties

Yield strength	28.8 kg/mm ²
Tensile strength	42.4 kg/mm ²
Elongation	35.4%
Reduction of area	68.4%
Impact tensile strength of notched specimen	86.7 kg/mm ²

Fig. 3. Shape and dimensions of specimens.

全に走査するまで500倍, 必要に応じて1000~5000倍で写真撮影した。その後連続写真を作成し切欠き底からの破面様相の変化を順次検討した。様相の微細な変化部はネガフィルムを投影機で拡大して観察し計測した。

3 実験結果および考察

3・1 応力および繰返し数の表示とS-N線図

Fig. 2 に示したような減衰を伴う荷重が作用する本実験の結果を整理する際に応力と繰返し数の表示法が問題となる。本報では便宜上 Fig. 4 に示すように、ハンマが打撃台に衝突することにより試験片に作用する最大衝撃荷重および平均荷重負荷ばねで負荷した静荷重を切欠き底の原断面積で割った値をそれぞれ繰返し応力 σ_a , 平均応力 σ_m とした。またハンマが打撃台に衝突する回数を計数し応力繰返し数とした。つまり、減衰する荷重についての配慮はしなかった。

Fig. 4. Temporary definitions for stresses and stress cycles.

Fig. 5. S-N curves of impact fatigue and non-impact fatigue tests.

Fig. 5 はこの表示法に基づき作成したS-N線図で衝撃でない疲労試験の結果も一部合わせ示してある。衝撃疲労においては、応力の大きさだけでなくその保持時間も破断寿命に影響するという報告もあり、上述の応力および繰返し数の表示法の適否および衝撃疲労と衝撃でない疲労の強度面の関係についてはさらにデータの集積を重ねて検討したい。

以下で考察する衝撃および衝撃でない疲労破面の比較検討は、上述の表示法で整理すると破断寿命がほぼ同一レベルにあるという意味において、ひとまず第一近似として定性的な観点から試みた。

3・2 破面の様相

- (a) $\sigma_a=12.1 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=10.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=8.23 \times 10^5$
 (b) $\sigma_a=12.1 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=10.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=8.23 \times 10^5$, $l_0/d=0.195$
 (c) $\sigma_a=15.4 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=5.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=5.41 \times 10^5$, $l_0/d=0.494$
 (d) $\sigma_a=56.0 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=0.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=3.36 \times 10^5$, $l_0/d=0.367$
 (e) $\sigma_a=56.7 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=5.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=2.26 \times 10^5$, $l_0/d=0.317$
 (f) $\sigma_a=56.7 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=5.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=2.26 \times 10^5$, $l_0/d=0.417$

Fig. 6. The typical patterns on fracture surface. (The arrow indicates the direction of crack propagation.)

観察したすべての破面について、切欠き底から最終破断部までの様相を六つの領域に大別することができる。これを Fig. 6 (a)~(f)に示す。(a)は切欠き底近傍にみられた方向性をもつひだ状縞模様の存在する領域(以下領域Fと呼ぶ)、(b)は(a)に続く領域でひだ状縞模様とストライエーション状模様の混在する領域、(c)はストライエーション模様が支配的な領域(領域S)、(d)はストライエーションとディンプルが混在する領域、(e)は最終破断部近傍でほとんど全面にディンプルが出現している領域(領域D)、そして(f)は最終破断部でへき開模様を呈する領域(領域C)である。

これらの様相は衝撃でない疲労破面にも観察され、衝撃疲労破面に特有なものではないが両者の様相を個々に比較するといくつかの相違点が認められる。

Fig. 7. The lamella patterns on impact tensile fatigue fracture surface ($\sigma_a=15.4 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=5.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=5.41 \times 10^5$). (The arrow indicates the direction of crack propagation.)

領域Fのひだ状縞模様は、Fig. 7 に示すように、巨視的引張応力の作用面とほぼ 45° の角度をなし、かつき裂の進展方向とほぼ平行である。また結晶粒単位でその方向性が変わるなどすべり面依存性がありステージI型き裂の跡と考えられる。破断寿命の長い破面のこの領域には、破面形成後に破面相互の接触による摩擦で生成したと思われる酸化物が付着している箇所も多くその度合は衝撃疲労破面の方が多かった。また、衝撃疲労破面上のひだ状縞模様の方がより明りょうに形成されており、破面全体に占める割合も大きかった。これらの観察結果は両者の変形機構に差のあることを示唆するものとする。

領域Sで観察されたストライエーション状あるいはストライエーション模様の代表例を Fig. 8 (a)~(c)に示す。(a)はストライエーション状の円弧上に、円弧の進展方向とほぼ 45° をなす数本の平行縞が存在する模様で領域Sの初期に比較的多くみられた。応力レベルによらずすべての衝撃疲労破面に観察されたが衝撃でない疲労破面には全く観察できなかった。ぜい性ストライエーションの一種とも考えられるが平行縞が長くかつステップ状であるなど疑問な点も多い。ここでは本実験の範囲内で衝撃疲労にのみ観察されたという実験結果から、ひとまず衝撃疲労破面に特有な模様とみなすことにするが、その形成機構の検討や実験条件を変えてさらに衝撃でない疲労試験を行ないその存在の有無を確認する必要がある今後の問題としたい。(b)は延性ストライエーションの一例である。しかし衝撃疲労破面にこのような延性ストライエーションが長く続くことはまれであり Fig. 9 に示すような割れとストライエーションが混在する模様が多くみられた。この割れは σ_a , σ_m の増加に伴い発生しにくくなる傾向があった。また粒界に沿って割れていると思われる形状の割れが多くみうけられた。この割れとストライエーションの混在模様はき裂が不規則に進展した形跡であり、き裂先端の応力状態の複雑さに帰因する衝撃疲労破面に特有なパターンと考える。(c)は減衰を伴う衝撃

Fig. 8. Three types of striations ($\sigma_a=15.2 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=0.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=1.44 \times 10^6$).

Fig. 9. The striations with chasms on impact fatigue fracture surface ($\sigma_a=15.2 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=0.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=1.44 \times 10^6$).

荷重の減衰状態に対応して形成されたストライエーションの一例で、き裂長さの大きいところでしばしば観察された。ストライエーション間隔を計測することにより減衰する荷重比や個数の推定が可能であることを示唆するものと考えられる。

3・3 破面様相と引張平均応力の関係

前述の各領域の出現範囲と応力の関係を知るために切欠き底からのき裂長さ l_c と切欠き底直径 d の比 l_c/d をパラメータとして整理した結果を Fig. 10 に示す。図では1視野（実視野 $120 \times 100 \mu$ ）上に連続した平行縞ファセットが3個以上認められるところを領域S、視野の1/3以上がディンプルで占められるところを領域Dという基準で整理した。領域Sの初期は観察位置や測定者により異なるが定性的な傾向を把握するうえには支障がないものとする。

図より明らかなように、高応力および低応力レベル

Fig. 10. Variations of topography with crack ratio.

とも引張平均応力 σ_m の増加に伴い破面全体に占める領域Fの割合が減少し領域D, Cの割合が増加する傾向が認められた。一般に、領域Fはすべり分離、領域Dは引張分離破壊の形跡とされている¹²⁾。したがって引張平均応力はき裂先端における引張分離破壊の形成に寄与する度合いが大きいとみなせる。なお平均応力を負荷しなかった衝撃および衝撃でない疲労破面では、破断時の破面接触のため、領域Cの範囲を決定することは困難であったがへき開模様は観察された。

つぎにストライエーションに注目すると、その模様は衝撃でない疲労破面より衝撃疲労破面の方が鮮明であった。また両者とも σ_m の増加に伴いストライエーション模様は不鮮明になったがその度合いは衝撃でない疲労の方が大きかった。これは衝撃荷重によるき裂先端の特異性が衝撃でない荷重より大きいことを示唆するもので衝撃荷重のひとつの特性と考えられる。

また本実験において負荷応力が最大のもの、つまり $\sigma_a=56.4 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_m=10.0 \text{ kg/mm}^2$ で破壊した破面は切欠き底の変形が大きく領域Fを明確に識別することができなかった。破面にはストライエーションが全く観察されずディンプルとへき開模様が現出しており衝撃引張破面に類似の様相を呈していた。この破面と衝撃引張破面間の顕著な差は切欠き底の変形度とへき開領域の大きさでいずれも前者が大であった。この差の主たる原因は応力繰返しの影響であると考えられる。しかし両者間には衝撃速度の差も大きく定量的な検討が必要であるが定性的な傾向は把握できた。

4 結 言

新しいタイプの衝撃疲労試験機を試作した。つぎに、炭素鋼環状切欠き試験片を用いて衝撃引張疲労試験、正弦波荷重下の引張圧縮疲労試験、衝撃引張試験を行ない、三者の破面様相を比較検討し、衝撃引張疲労破面の様相をは握した。また破面様相と引張平均応力の関係について調べた。得られた結果を要約すると

(1) 衝撃引張疲労破面に特有な様相として、割れとストライエーションの混在する模様を指摘した。

(2) 破面のステージⅠ型き裂面にひだ状縞模様が観察された。この模様は正弦波荷重下の疲労破面のそれよりも明りょうな形成をなし、破面全体に占める割合も衝撃疲労破面の方が大きかった。ストライエーション模様も衝撃疲労破面の方が明りょうな形成をなしていた。この模様は引張平均応力の増加に伴い不鮮明となったがその度合は正弦波荷重下の疲労ほどではなかった。

(3) 引張平均応力はひだ状縞模様の形成を妨げディンプル、へき開模様の形成を促進させる傾向にあった。衝撃引張破面のへき開領域と切欠き底の変形度は低寿命の衝撃疲労破面のそれよりいずれも小さかった。

以上の観察結果は衝撃疲労下の変形挙動特性に帰因するものと考えられ今後この観点から定量的な検討を行なう必要がある。

最後に、衝撃疲労試験機の試作に熱心な協力をいただいた(株)日精樹脂 金沢良知氏(当時新潟大学学生)に厚く感謝する。

(昭和50年7月19日 第12回材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、会田俊夫、寺内喜男、材料試験, **5**, 553 (1956).
- 2) 田中道七、中山英明、材料, **23**, 678 (1974).
- 3) Kondo, S., and H. Iguchi, Proc. 15th Japan Congr. Mat. Res., 13 (1972).
- 4) Kondo, S., H. Iguchi, and T. Sato, Proc. 17th Japan Congr. Mat. Res., 79 (1974).
- 5) たとえば、秋園幸一、安宅 健、材料, **21**, 660 (1972).
- 6) たとえば、斉藤 葆、相馬真也、材料, **16**, 234 (1967).
- 7) たとえば、“Applications of Electron Microfractography to Material Research”, ASTM STP-495 (1971) ASTM
- 8) 中村 宏、田中真一、“機械の疲れ寿命算出法”(1972) 養賢堂
- 9) 茶谷明義、中沢 一、中原一郎、日本機械学会誌, **73**, 1508 (1970).
- 10) Forsyth, P. J. E., Proc. Crack Propagation Symp., Vol. I, 76 (1961).
- 11) 小寺沢良一、材料, **23**, 593 (1974).
- 12) Forsyth, P. J. E., Acta Metallurg., **11**, 703 (1963).