鋼の衝撃疲労と通常疲労の比較研究*

前川 一郎^{*1}, 田辺 裕治^{*2}, 西田 新一^{*3}
芦沢 隆利^{*4}, 小川 博文^{*5}

Comparative Study of Impact Fatigue with Usual Fatigue

Ichiro MAEKAWA, Yuji TANABE, Shin-ich NISHIDA,
Takatoshi, ASHIZAWA and Hirofumi OGAWA

Impact Fatigue and usual fatigue experiments were carried out by using carbon steel and high-manganese steel specimens. Impact fatigue lives for crack initiation at the notch roots and for fracture were unfavorable compared with usual fatigue. Although crack propagating periods under pulsated and repeated loadings were comparable in the case of usual fatigue, difference of such a loading condition influenced on both crack initiation and propagation period in the case of impact fatigue. According to the result of measuring of the dislocation density in terms of the X-ray method, plastic zone size near a crack was estimated to be small in the case of impact fatigue compared with that of usual fatigue. Similar results were obtained for high manganese steel, and the influence of rolling direction was not observed.

Key Words: Steel, Impact, Loading Velocity, Fatigue, Crack Initiation, Dislocation Density, Hardness

1. 緒 言

衝撃力による鋼の破壊挙動は静的破壊挙動とかなり異なることがある。著者らは、その理由としてまず第一に衝撃力によって生じる応力波が高速で伝ばして複雑な応力状態を形成するからであることを、衝撃疲労の実験を行って示してきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかしさらに、衝撃疲労の特性を通常の疲労強度と比較してその関連性を明らかにすることは機械設計の基礎的知識としても有用であり、破壊に対する繰返し高速負荷の効果を解明していく上にも重要な意味を持つものと考えられる。そのような試みとしては衝撃疲労と通常疲労とを同一疲労試験機で行うように工夫して行われた研究^{(3)等(4)}もあるが、材料の疲労には応力の大きさと作用方向が時間的に変化するということが他の負荷形式と本質的に異なった挙動をもたらすことを考えると、これらの負

荷特性の効果についてさらに詳細な研究を行うことが望まれる。

そこで本研究では、応力の方向の効果については炭素鋼試験片の衝撃片振りと衝撃引張り-衝撃圧縮の両振り疲労実験とを行い、通常疲労の片振りと両振りの実験の結果と併せて比較検討した。また、応力の時間的変化の効果については応力の立上り速度を変えた通常疲労実験を行って衝撃疲労の特性を考察した。その考察のために両種の疲労に伴ってき裂近傍に生じた塑性域に関する X 線のおよび硬さの測定を行った。なお、結晶構造の相違による差をみるために、炭素鋼と高マンガン鋼の試験片を用いた。

2. 試験片の準備と実験方法

供試材には市販の S45C 鋼と 25 % Mn-5 % Cr-1 % Ni 鋼を用いた。後者を以後簡単に高マンガン鋼と呼びその機械的性質を表 1 に示す。

試験片は図 1 のように加工し、各試験片にはき裂の発生を観察しやすくするために切欠きをつけた。両鋼材の試験片は、板厚が 3 mm および 2 mm であり、切欠きの深さはそれぞれ 1 mm および 1.5 mm とした。このように高マンガン鋼試験片の切欠底の有効断面積をやや小さくしたのは、この鋼が低温用に開発された

* 平成元年 11 月 8 日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年 4 月 21 日。

*¹ 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

*² 正員、新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐 2 の町 8050)。

*³ 正員、新日本製鉄(株)中央研究本部八幡技術研究部 (〒805 北九州市八幡東区枝光町 1-1)。

*⁴ 准員、三菱金属(株) (〒100 東京都千代田区大手町 1-5-2)。

*⁵ 日本電装(株) (〒443 刈谷市昭和町 1-1)。

ものであり、低温において強度が増大することから今後の低温実験に際して試験片の強さが試験機的能力以内に収まるように考慮したためである。

衝撃実験は、S45C 鋼に対しては茶谷式衝撃疲労試験機⁽⁵⁾を改良してスライダの往復運動の両端にストッパを取付け、衝撃引張りのほかに衝撃圧縮も作用させるようにして用いた。繰返し速度は毎分 162 回であった。この場合の負荷波形の例を図 2 (a), (b) に示す。これらのひずみ波形は、同図(c)に示すように試験片の中心線上で、両切欠底を結ぶ線との交点から試験片の固定端側へ 5 mm の位置にひずみ計を貼付けて測定したものである。同図(a)では最大波高の後にもひずみの山が現れているが、衝撃力が材料強度に及ぼす影響はその最大値と最大値に至るまでの立ち上がり速度が支配的であろうとみて、それ以降の小さい波についてはここでは考慮しないことにした。(a)(b)両図の波形を比べてみると最大値と最大値に達するまでの平均ひずみ速度約 2 strain/s とはそれぞれ同一値になっているので、衝撃引張りと衝撃圧縮力は、絶対値をとれば同一振幅で繰返されたものと考えた。

高マンガン鋼は圧延比 7.3 で製作されたことがわかっているため、その影響をみるために圧延方向およびそれと直角方向に試験片を採取して、それぞれ L および C 試験片と呼ぶこととした。この鋼は延性に富み試験片の板厚も薄く製作したため、衝撃圧縮実験が困難となり、衝撃引張りの片振り疲労実験のみを行った。そのために高マンガン鋼の衝撃疲労実験には図 3 に示

した疲労試験機を自作して用いた。この方式はカムで圧縮されたバネの復元力を利用して衝撃引張りを作用させるものである。この試験機の衝撃繰返し速度は毎分 60 回であった。その波形の例を図 4 に示す。この最大ひずみも平均ひずみ速度も図 2 の場合と同じ値になっている。

なお、き裂近傍における材質的变化の考察のために X 線測定を行う都合上、S45C 鋼に対しては真空中において 1250 K に 10 h 保持した後 20 K/h の冷却速度で 900 K まで徐冷して平均結晶粒径 100 μm の粗大結晶径の試験片も準備した。通常の疲労に対しては油圧サーボ疲労試験機を用いて、5~10 Hz の正弦波状負荷を作用させた。

3. 実験結果と考察

3.1 S45C の衝撃疲労と通常疲労の比較検討

引張りだけの片振り衝撃と圧縮も含めた両振りの疲労実験を行った結果、き裂発生までの応力繰返し数と破断寿命とに対する S-N 線図を図 5 (a) にそれぞれ一点鎖線と実線で示す。縦軸にはひずみ波形の最大値から換算した応力 σ_{max} を示す。図中の $\bar{N}_t'$, $\bar{N}_t$, $\bar{N}_c'$ およ

図 2 引張り-圧縮疲労実験の波形(S45C 鋼)

表 1 高マンガン鋼の機械的性質

E(GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	$\delta(\%)$ 2mm
210	379	734	61.9

図 1 試験片寸法

図 3 衝撃引張疲労試験機(高マンガン鋼)

び $\bar{N}_i^A$ において $\bar{N}_i$ はき裂発生までの繰返し数を意味し、 $\bar{N}_f$ は破断寿命を意味する。また、右肩の P あるいは A は片振りか両振りかを示す。この結果をみると、き裂の発生にも破断に対しても両振りのほうが寿命は低下しており、逆方向荷重の作用は明らかに寿命を低下させている。応力が高いとその差はほとんどみられないが応力レベルが低くなるとその差が大きく開いている。

次に、通常疲労の結果を同図(b)に示す。この図中の N_i^P , N_f^A 等は衝撃の場合と同様に片振り引張りおよび両振りの場合のき裂発生までの繰返し数と破断寿命を意味する。図中には(a)の $S-N$ 線図も比較のために記入してあるが、衝撃疲労のほうがき裂発生時期は早く破断寿命も短いことがわかる。この結果においても両振りのほうがき裂発生までの繰返し数、破断寿命ともに減少していて、逆方向負荷は疲労寿命を低下させることが示されている。ただし、破断寿命については応力振幅が 270 MPa あたりでは片振りと両振りの $S-N$ 線図が交差していて、それより低応力振幅になると両者の差が開いている。そうして衝撃疲労の場合と異なり、き裂発生までの繰返し数 N_i はまだ本実験の範囲ではかなり応力振幅が大きくなっても片振りと両振りとの間に差がある。

そこで、疲労き裂発生とき裂の伝ばに対する衝撃力の効果をもう少し詳しく区別してみるために、ここではき裂が発生した後破断に至るまでのき裂伝ば期間の応力繰返し数を衝撃疲労と通常疲労に対してそれぞれ $\bar{N}_p$ と N_p として横軸にとり応力振幅を縦軸に取って示すと図6のようになる。この図において、通常の疲労の場合には片振りでも両振りでもほぼ同一の $S-N$ 線図によって表されている。すなわち、通常疲労の場合はき裂伝ば期間の応力繰返し数には逆方向応力の影響はほとんどみられない。これに対して衝撃疲労の場合には、実験点のばらつきもあるが、両振りの場合のき裂伝ば期間の繰返し数 $\bar{N}_p^A$ のほうが片振りの $\bar{N}_p^P$ より明らかに低下している。

したがって、通常疲労の破断寿命が両振りの場合に片振りよりも低下したのは、主にき裂発生に対する影響が大きく効いているものと考えられる。それに対し

図4 衝撃引張波形の例(高マンガン鋼)

て、衝撃疲労ではき裂の発生と伝ばの両方に応力逆転の影響が現れていることになる。

そこでさらに、き裂発生に対する影響を両疲労について比較してみるために衝撃疲労の応力最大値と通常疲労の振幅とともに $\sigma_{\max}$ と表して、き裂発生までの繰返し数 N_i の破断寿命 N_f に対する比 N_i/N_f をとつ

(a) 衝撃疲労実験結果

(b) 通常疲労実験結果

図5 S45C 鋼の疲労実験結果

図6 両疲労のき裂伝ば期間

て両疲労についてまとめて示すと図7のようになる。この図によれば同一応力振幅に対して、衝撃疲労では片振りの場合の $\bar{N}_f^m/\bar{N}_f^m$ に比べて両振りの $\bar{N}_f^m/\bar{N}_f^m$ の方がやや低下しているが、通常疲労の場合には N_f^m/N_f^m に比べて N_f^m/N_f^m は大きく低下している。すなわち、衝撃疲労では前図の結果とあわせて両振りの効果はき裂の発生と伝ばの両方を低下させるが、通常疲労ではむしろき裂の発生に大きく効いていることがわかる。

3・2 応力立上り速度の影響 衝撃疲労の方が通常疲労よりも寿命が低下した実験結果には負荷速度の相違が重要な要因になっていることが考えられるので、応力立上り速度を変えた通常疲労実験を行った。単調引張りのもとでは、ひずみ速度が相当に大きくなると金属材料の変形抵抗は増すことが知られている⁶⁾。本衝撃実験の場合のひずみ速度は図2、4に示した波形からみるとあまり大きいものではないが、応力が繰返しして作用する場合には、荷重速度の影響が現れることも考えられる⁷⁾。そこで引張応力の立上り速度を変えた三角応力波を繰返し作用させて通常疲労実験を行った。応力波形の振幅に達するまでの立上り時間 t_r に対するき裂発生までの繰返し数と破断寿命との関係を図8に示す。この結果によれば、応力立上り時間を短くして応力を急上昇させると、き裂発生も破断も早期に起こっている。特に、高速になると破断寿命が低下している。このことは高速負荷の繰返しのもとでは、き裂の伝ば期間が短くなることを意味しており、図4においてみられたように衝撃疲労の場合にはき裂の発生ばかりでなく伝ばにも影響することに対応している。

3・3 き裂近傍の過剰転位密度 次に、衝撃疲労の場合にはき裂伝ば期間にも片振りと両振りの差がみられた理由を考察するために、粗大結晶粒としたS45C鋼の試験片を用いて、両側切欠きから伸びたき裂の長さの和が0.4 mmに達したときのき裂先端近傍の過剰転位密度⁷⁾ D を測定した結果を図9に示す。図の縦軸にはき裂先端から試験片の長手方向に0.1 mmごとに4箇所の点を選んで測定した D 値を示した。横軸はき裂先端からの距離 X を示す。結晶内に塑性域が生ずれば転位密度も増加するはずであり、き裂近傍の D 値の分布は塑性域分布の目安になると考えられる。そうすると、衝撃疲労の場合のき裂近傍の塑性域の深さは片振りの場合も両振りの場合もほとんど同様であり、かつ通常疲労に比べて約半分程度に浅いことになる。また、き裂先端からその進展方向に0.1 mm前方向の点Pをみても同様なことがいえる。ただ、両振りのほうが転位密度は増えている。このことから

き裂進展の前方には、特に両振りの場合にはすでにすべりが進行していることが推察される。

以上をまとめてみると、衝撃疲労においては通常疲労の場合よりも寿命を低下するが、すべりによる塑性変形は通常疲労の場合よりも小さいことから、衝撃力の繰返しによって生じるすべりは塑性変形を残すよりはむしろき裂の発生とその成長に対して効果を持った

図7 両疲労のき裂発生繰返し数の比較(S45C)

図8 応力立上り速度の疲労寿命に及ぼす影響(S45C)

図9 き裂先端の過剰転位密度(S45C)

ものと考えられる。

3・4 高マンガン鋼の衝撃疲労と通常疲労 前節の S45C は bcc 結晶構造をもつ鋼材であり、高速破断や低温度における破断は脆性的になる。これに対して fcc 結晶構造の材料は低温において必ずしも脆性とならないことが知られている。そこで繰返し衝撃負荷に対する両結晶構造の挙動の差を比較するために高マンガン鋼の衝撃疲労および通常疲労実験を行った。この鋼はオーステナイト組織をもつ fcc 結晶構造材料である。その実験結果を図 10 に示す。同図 (a), (b) はそれぞれ衝撃疲労および通常疲労の実験結果である。(b) 中には比較のため (a) の実験点を結ぶ線と併せて破線で記入してある。図中下付きの L と C は L および C 方向材を意味する。これらの結果をみると、L, C 方向材間にはいずれも差異がほとんどみられない。通常疲労に対して衝撃疲労のほうがき裂発生までの応力繰返し数も破断寿命も低下しているのは S45C の場合と同様である。そうして破断寿命の S-N 線図と、き裂発生までの繰返し数の線図とは試験片採取方向によら

ずほぼ平行している。

また、衝撃疲労のほうが通常疲労よりも寿命が低下した理由についても考察するため、き裂先端付近の硬さ分布をマイクロビッカース硬度計により測定した結果を図 11(a), (b) に示す。すなわち、き裂近傍に塑性域が生じた場合、ひずみ硬化により硬さが増すことが予想されるので、き裂近傍における硬さの分布を測定して塑性域の分布状態の比較を行うこととした。そのために、破断した試験片の側面上で切欠底から 0.1 mm 離れた試験片の長手方向線に沿って距離 X だけ離れた点の硬さを測定して、破面からの深さ方向の分布とみなし、き裂から十分に離れた位置における硬さで無次元化して $\Delta H_v = H_v(x)/H_v(x=\infty)$ として示した。図中の矢印の位置までのき裂面からの距離 r_p は $\Delta H_v = 1$ となるところ、すなわちき裂発生に伴う硬化がみられなくなるところまでのき裂面からの距離を示す。この図は応力振幅 $\sigma_{\max} = 230$ MPa に対するものであるが、 $\sigma_{\max} = 260$ MPa のもとでも同様な傾向がみられ、 r_p 値も同程度の値であった。この結果によれば塑性変形による硬化は通常疲労のほうが深くまで及んでいることになる。このことは S45C 材に対して X 線的に測定した図 9 の結果と同様である。また、試験片の採取方向による差はみられなかった。

なお、疲労き裂進展の様相を破面のストライエーションについてみた結果は、L, C 試験片ともに衝撃疲労

(a) 衝撃疲労実験結果

(b) 通常疲労実験結果

図 10 高マンガン鋼の疲労実験結果

(a) L specimen

(b) C specimen

図 11 き裂近傍の硬さ変化の分布(高マンガン鋼)

のほうが通常疲労の場合よりも若干大きい、特に際だった差異はみられなかった。

4. 結 言

本研究の結果をまとめると次のようになる。

まず S45C については、

(1) 衝撃疲労は通常疲労に比べてき裂発生までの応力繰返し数も破断寿命も低下したが、片振りと両振りの結果を比較すると、き裂の伝ば期間は衝撃疲労の場合には差がみられたのに対して通常疲労の場合には差がみられなかった。このことから、逆方向応力を作用させた効果は、通常疲労の場合にはき裂の発生時期を早めたのに対して、衝撃疲労の場合にはき裂の発生と伝ばの両方を低下させる効果を持ったことになった。

(2) 応力の立上り速度を速めると、き裂の発生も破断寿命も早められたが、き裂伝ば期間も短くなった。このことから衝撃疲労のように負荷速度が速い場合にはき裂の発生と伝ばの両方に効果を及ぼすことが推察される。

(3) き裂面からの深さ方向における過剰転位密度 D の分布を測定した結果は衝撃疲労のほうが通常疲労よりも D 値は小さくその範囲も狭かった。このことから、衝撃疲労はすべり転位密度を増加させるよりもき裂の発生に効果的であったと考えられる。

次に、高マンガン鋼については、

(4) 衝撃疲労のほうが通常疲労よりも寿命が低下

することは S45C の場合と同様であった。S-N 線図には母材圧延方向に対する試験片採取方向の差はみられなかった。

(5) き裂面から深さ方向に硬さの分布を測定した結果は、衝撃疲労のほうが硬さ値は小さくその分布範囲も狭くなっていた。これは衝撃疲労によってき裂近傍に生じた塑性域が通常疲労の場合よりも狭いことを意味するものと考えられ、上述の S45C の X 線測定結果と併せて考えると、この傾向は結晶構造によらないことになる。

本研究で用いた高マンガン鋼は新日本製鉄(株)からの提供を受けた。特に、同社の末宗賢一郎主任研究員にいろいろのご援助をいただいたことを感謝する。また、実験に当たっては小川原凱紀技官の助力を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 前川, 機誌, 84-750 (1981), 448.
- (2) Maekawa, I., ほか 2 名, *Proc. Int. Conf. Eng. Materi. Strength*, 2 (1986), 347.
- (3) 田中・ほか 1 名, 機論, 39-320 (1973), 1072.
- (4) 村上・ほか 1 名, 材料, 31-346 (1982), 690.
- (5) 茶谷, 機講論, No. 737-1 (1973), 33.
- (6) Kanninen, M. F., ほか 3 名, *Mech. Behavior of Materials under Dynamic Loads*, (1967), 77, Springer-Verlag, Berlin.
- (7) Maekawa, I., ほか 2 名, *Proc. of Third APES, Yokohama*, (1987), 569.
- (8) 日本材料学会編, X 線材料強度学, (1981), 522, 養賢堂.

討 論

〔質問〕 村 上 理 一〔徳島大学工学部〕

衝撃疲労強度についての詳細な検討に敬意を表す。次の点にご教示願いたい。

(1) 図 5 の表示で、 $\sigma_{\max}$ の代わりに応力振幅 σ_a を使って表示すると、どのようになるか。疲労強度は片振りと両振りで逆転するはずである。これらは、圧縮応力の効果よりも平均応力効果として議論すべきだと思うが、いかがか。

(2) 衝撃力によるすべりの局所化がき裂発生とその成長に影響を与えると考えるが、衝撃力がすべりによる塑性変形を小さくするしくみはどのようなものと考えているか。

〔回答〕 (1) 図 5 の縦軸の $\sigma_{\max}$ は、衝撃疲労の場合は波形のピーク値であり、通常疲労の場合は応力振幅を示している。 $\sigma_{\max}$ とは別に $\sigma_{\text{amplitude}}$ と記せば

よかったかもしれない。したがって、本研究では平均応力はいずれの場合も零である。

(2) 衝撃疲労の場合、図 9, 11 に基づいて、お説のとおり局所的にすべりが進行したもので、少数の転位だけが大きく動いて破壊につながったものと考えている。

〔質問〕 中 山 英 明〔大阪産業大学短期大学部〕

実験遂行に多くの困難を伴う衝撃疲労試験を系統的に行われていることに敬意を表す。下記の点につきご教示いただきたい。

(1) 衝撃疲労試験機は衝撃荷重発生個所に浮動部分を有する場合が多く、これの振動により試験片に曲げ応力を生じる場合がある。曲げ応力検定は行われたか。また、その値はどの程度か。

(2) 衝撃荷重下での疲労強度の低下を三角波応力

を用いた通常疲労での荷重速度効果から検討を加えている。この点について、まず図2と図8の応力立上り時間が大きく異なっているが問題はないか。次いで、本研究に用いた切欠材の場合のみならず平滑材の場合でも衝撃疲労強度が低下することが明らかにされており、一方で繰返し周波数が5 000 cpm以上の高速疲労では疲労強度が上昇するという一般的知見がある。本研究の議論に矛盾はないか。

〔回答〕 (1) 面内曲げについてはすべて両側切欠底からき裂が発生して同様に進展したので、實際上曲げは効いていないと考えている。面外曲げについては、最初に試験片の板厚中心線が衝撃力の作用方向からずれないように慎重に取付けた。ご質問により念のため、改良茶谷式試験機の場合、試験片中央部の上下面にひずみ計を貼って衝撃引張りと圧縮のそれぞれについて、上と下の面のひずみ波形を比べたところ、ピーク値の平均値 120 MPa に対して $\pm 2\%$ の差があった。この差は本研究の所論に影響ないものと考えている。

なお、図3の試験機は現在他のテーマ用に若干改装

して実験中のため検討していないが、本論文で用いた高マンガ鋼試験片の板厚は薄く、衝撃引張りのみを行っており、中心線の合致に留意していたので上述と同様に曲げの影響はないものと考えている。

(2) 図2は衝撃疲労、図8は通常疲労の波形であるが、両疲労において応力波形の立上り速度が大きく異なることが両疲労挙動の差をもたらしたものと考えている。

また、通常疲労では15 000 cpmまで繰返し速度の影響はみられない^(付1)、常温ではクリープ現象が現れない材料では繰返し速度の影響はあまりない^(付2)、100 c/s (6 000 cpm) までほとんど影響はない^(付3)といわれているが、さらに高繰返し速度では温度上昇の影響などが出てくることが考えられる。しかし、本研究の衝撃疲労では周期が永いため昇温はなかったもので、特に修正なしで両疲労の結果を比較できるものと考えた。

(付1) 河本, 金属の疲労, (1962), 63, 朝倉書店。

(付2) 日本材料学会編, 金属の疲労, (1964), 342, 丸善。

(付3) 河本, 機械工学大系金属の疲れと設計, (1972), 81, 111頁。