

繰返し衝撃引張荷重下における炭素鋼の き裂進展挙動に関する一実験

宮野 泰治

(昭和61年10月31日受理)

A Study on the Crack Growth Behavior of Carbon Steels under Repeted Impact Tensile Loads

Taiji MIYANO

Impact tensile fatigue test have been performed with new testing machine manufactured by our own.

Materials appllied to test were carbon steel (S15C,S35C) and specimen had a circular hole ($\phi 3\text{mm}$) at the center, where was fatigue crack initiation site. Microscopic crack growth behavior is discussed in relation to impact fatigue life.

1. 緒言

先に、高温および低温下での衝撃疲労の挙動を明らかにすることを目的に、衝撃疲労試験機を製作し報告した¹⁾²⁾。しかし、衝撃ハンマーと試験片に取付けられたフランジとの衝突の際 試験片が、わずかではあるが、横方向に振動するため、試験片上で観測される荷重波形が複雑な様相を呈するという問題があった。そこで、新たに試験機を製作し、これを用いて炭素鋼S15C材とS35C材の衝撃引張疲労試験を行い、衝撃疲労寿命と巨視的き裂進展挙動との関連を明らかにすることを試みた。本実験の範囲で得られた結果を以下に報告する。

2. 供試材および試験片

実験に供した材料は、市販の機械構造用炭素鋼S15CとS35Cで、その化学成分を表1に示す。試験片は納入のままの $\phi 22$ 丸棒から、図1に示すような形状寸法をもつ板状試験片に機械加工し、中央部にドリル加工の後、リーマ仕上げにより直径3mmの円孔を付した。これら機械加工の後にS15C材は920℃、S35C材は860℃で1時間の真空焼なましを施した。熱処理後の試験片の引張強さ σ_b および降伏点 σ_s の値は、S15C材で $\sigma_b = 396 \text{ MPa}$ および $\sigma_s = 252 \text{ MPa}$ 、S35C材で $\sigma_b = 554 \text{ MPa}$ および $\sigma_s = 269 \text{ MPa}$ であった。

表1 化学成分 (%)

材 料	C	Si	Mn	P	S
S 15 C	0.17	0.29	0.46	0.025	0.024
S 35 C	0.35	0.18	0.67	0.016	0.016

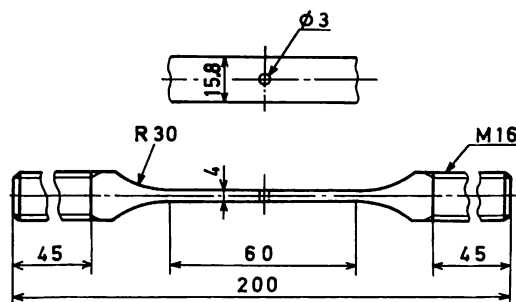


図1 試験片の形状および寸法

3. 実験装置および実験方法

本実験にあたって、製作した衝撃引張疲労試験機は、基本的には藤井式繰返し衝撃試験機³⁾を改良したものである。その概略図を図2に示した。図にみるように、一端にフランジを有す $\phi 27\text{mm}$ 、長さ300mmの鋼棒を、剛性の大きい試験機フレームに取付けられたシリンダーに組み込むことにより、試験片変位を軸方向のみに拘束し、衝撃の際の試験片の横方向の振動を防いだ。また、試験片のまわりは広く、開放型となっているので、高温、低温、荷重波形検

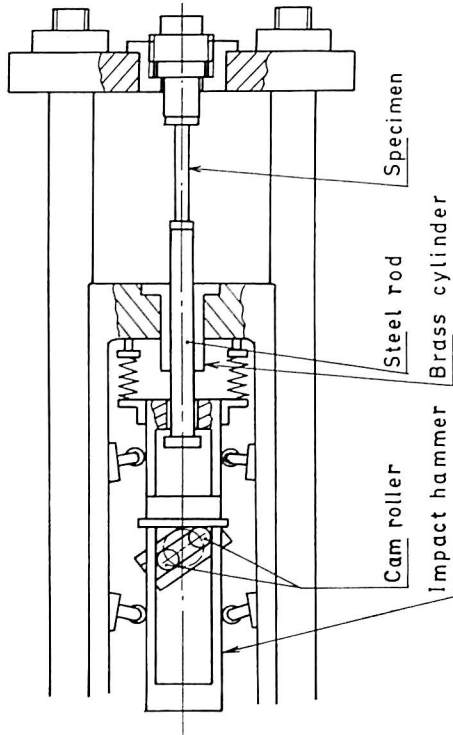


図2 衝撃引張試験機の構造

出等の各種試験装置が容易に取付けられるようになっているのが特徴である。衝撃エネルギーの変換，すなわち，ハンマー重量や衝撃速度の変換等は従来の藤井式の場合と同様の方式である。本実験における衝撃繰返し数は1分間に580回で約9.67 Hzである。

繰返し衝撃荷重の測定は，図3に示すような試験片中央部の円孔付近のA，B，Cの位置に貼付けられた，ひずみゲージ（型式；KFC-2-C1-11）で検出し，シグナルコンディショナを介してデジタルストレージオシロスコープ（型式；VP-5730 A）に記録し算出した。図3に示すA，B，Cそれぞれの位置でのひずみゲージから検出された荷重波形の一例を図4に示す。図にみるように，衝撃の初期1 msec間に最大引張荷重が，ついで，その20%程度の大きさの圧縮，引張荷重が続き，次第に減衰して約20 msecで零になるような形態となっていた。ここで，初期の最大荷重波形の様相は，それぞれの位置で若干異なっているものの，AとBの位置では，波形の最大値は，ほとんど同値とみなし得，Cの位置ではやや高めになっていた。前者の現象は，円孔切欠き部付近の応力波の伝播機構によるものであり，後者は衝撃ハンマーとフランジの衝突状態によるものと考えられる。これら荷重波形の様相は，試験片の破断寿命の80%程度まで，ほぼ安定しているものと

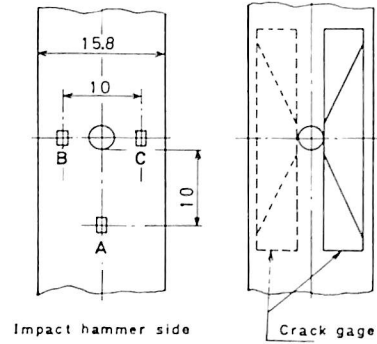


図3 ひずみゲージとクラックゲージの貼付位置

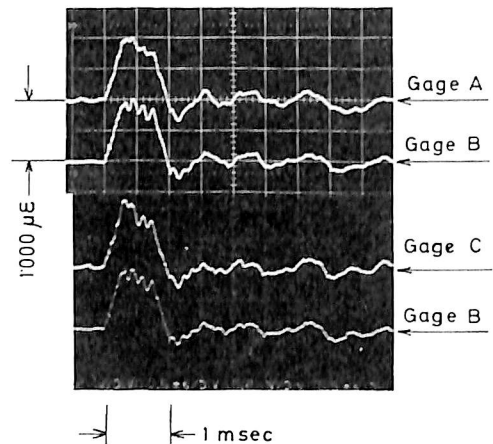


図4 衝撃応力波形の例

考えられた。

いま，A，B，C各位置は疲労き裂を検出するクラックゲージの貼付位置となるため，あらかじめ，試験を行なった各衝撃エネルギー条件で，Bのひずみゲージにより検出された荷重波形から，最大引張応力を算出しておき，これを公称衝撃応力として，実験結果を整理した。

疲労き裂の測定は，図3に示すように，円孔切欠きの両側にクラックゲージ（型式；KV-5 B）を貼り，その出力変化と時間をペンレコーダに記録して，衝撃回数とき裂長さを算出した。使用したクラックゲージでは，0.2 mmのピッチで5 mmのき裂進展長さを，試験を中断することなく測定し得る。

衝撃疲労破面の観察には走査型電子顕微鏡を用いた。

4. 実験結果および考察

繰返し衝撃引張荷重下でのき裂進展挙動について調べた試験片の疲労寿命曲線を図5に示す。ここで， $\sigma = 258 \text{ MPa}$ は降伏点の付近， $\sigma = 186 \text{ MPa}$ は降伏点以下の応力レベルである。

これら試験片の円孔切欠き部両側にクラックゲ-

繰返し衝撃引張荷重下における炭素鋼のき裂進展挙動に関する一実験

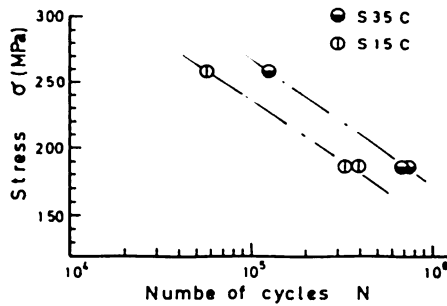


図5 S-N曲線

ジを貼って、試験を中断することなく、表面き裂の進展挙動を調べた。しかし、実験に用いたクラックゲージはピッチ0.2mmであるため、き裂の測定は0.2~0.4mm程度からのスタートとなった。また、S15C材、 $\sigma=258$ MPaの場合は、塑性変形が大きいため、き裂長さ1mm以上になると、クラックゲージでき裂長さを測定することは困難であった。したがって、S15C材、 $\sigma=258$ MPaの場合は、0.5~1mmの挙動と破断寿命 N_f のみ参考にした。

図6および図7に、 $\sigma=186$ MPaの場合のき裂伝ば曲線を示す。図中の○と●印および△と▲印は、円孔の向いあう各縁より発生した、それぞれのき裂進展挙動である。円孔切欠きの両側に、それぞれ、

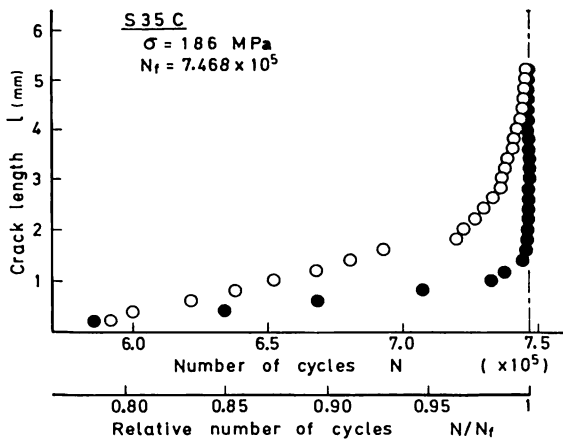


図6 き裂伝ば曲線

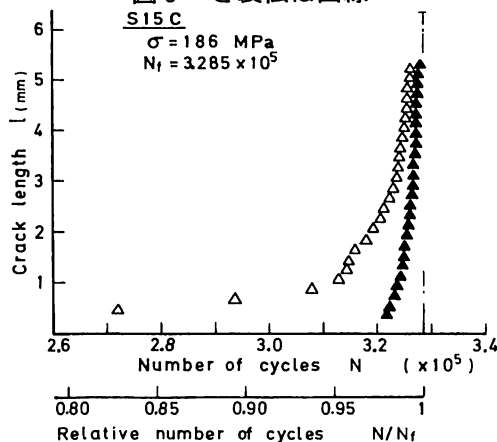


図7 き裂伝ば曲線

き裂が発生して進展して行くが、その際、S35C材の場合は、き裂が0.2mm程度になると、主として、一方の側のき裂のみが進展し、他方の側のき裂は、かなり遅れて進み、破断寿命 N_f に対する $0.98 N_f$ 程度を過ぎて急激に加速した。このときの両者のき裂長さの比は2:1以上になっている。S15C材の場合も同様な傾向で、遅れて進展するき裂が急激に加速し始める $0.98 N_f$ 付近では、それぞれのき裂長さは4:1程度となっていた。 $\sigma=258$ MPaの場合も、S35C材は同様な傾向を示し、定量的にき裂長さを調べられなかったS15C材でも、定性的には同様な傾向が認められた。

本実験条件で、円孔切欠きからのき裂進展に、このような挙動がみられた要因としては、試験機、試験片寸法、衝撃におけるき裂先端の応力状態の影響等が考えられるが、現象的には、円周切欠きを有す丸棒の一般の引張疲労試験等でも最終破断部が中心から片寄ることと対応しているものと思われる。

なお、試験片の寸法は、き裂進展結果を応力拡大係数Kで整理するための条件⁴⁾を満足していない。

したがって、本実験の繰返し衝撃引張荷重下で示された破断寿命は、こうした円孔切欠きの一方の側の、速い進展を示したき裂が主として破断寿命を決定した主き裂であるとして、以下に主き裂の進展挙動と寿命の関連を検討した。

き裂進展速度 dl/dN から求めた主き裂の $l=0.5$ mmに達した推定繰返し数 $N_{l=0.5}$ は、破断寿命 N_f に対して、S15C材は応力レベルに関係なく $0.83 \sim 0.85 N_f$ 、S35C材は応力の高低により異なり、低応力で $0.82 N_f$ 、高応力で $0.95 N_f$ であった。

図8は、横軸に繰返し数 $N-N_{l=0.5}$ をとった場合のき裂伝ば曲線を示したもので、これより、0.5mmのき裂が入った時点からスタートとしたそれ以後の

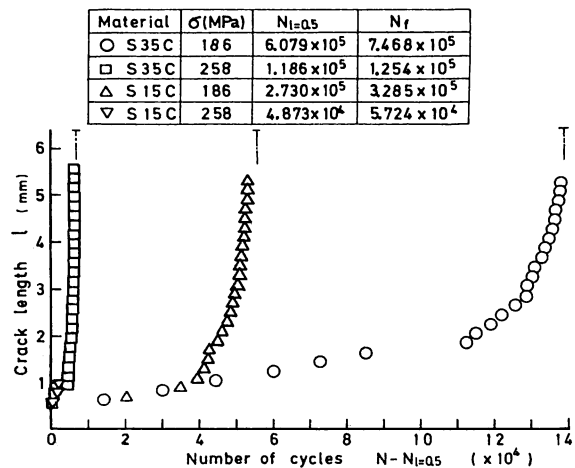


図8 $N_{l=0.5}$ からのき裂伝ば曲線

寿命と、その間のき裂の進展挙動が比較される。 $\sigma = 186 \text{ MPa}$ では、両材とも0.5 mmから1 mmまでのき裂の進展は、ほぼ同じような傾向であるが、それ以後は、材料の差異が明りょうにあらわれて、寿命に差が出ている。これに対し、降伏点に近い $\sigma = 258 \text{ MPa}$ の場合は、き裂0.5 mmからの寿命には大差が

ないようであった。

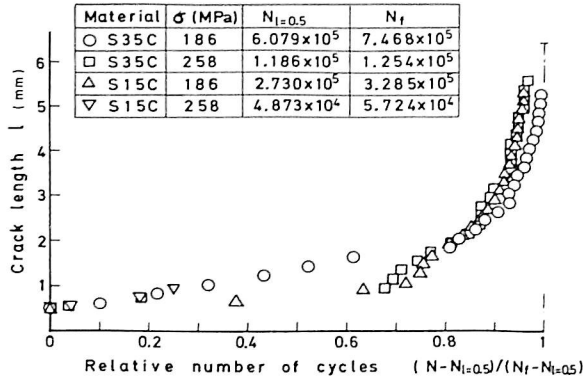


図9 l と $(N - N_{l=0.5}) / (N_f - N_{l=0.5})$ の関係

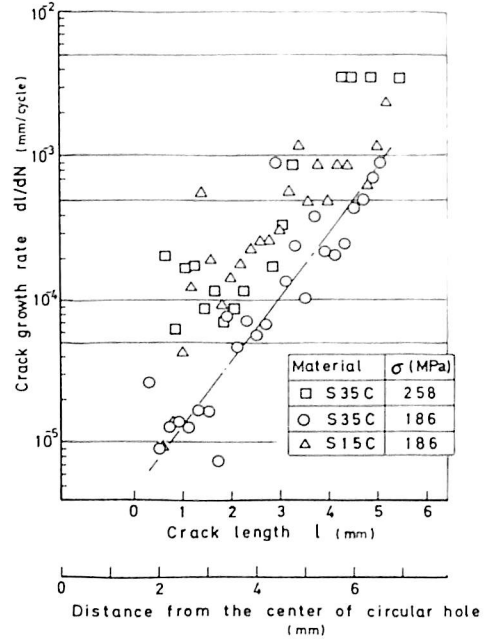


図10 き裂長さと dl/dN の関係

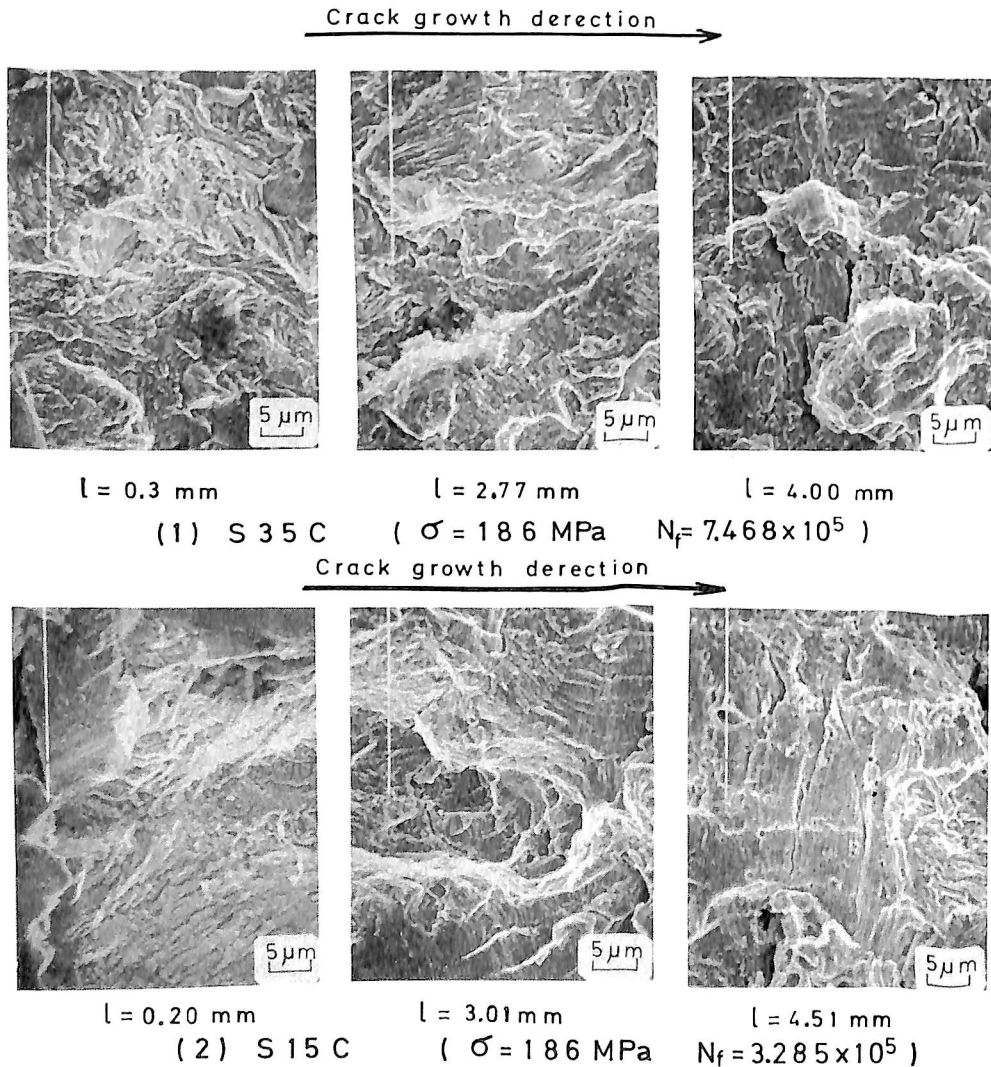


図11 破面の微視的様相 (SEM)

繰返し衝撃引張荷重下における炭素鋼のき裂進展挙動に関する一実験

図9に、 $(N - N_{l=0.5}) / (N_f - N_{l=0.5})$ の相対繰返し数比に対する、き裂伝ば曲線を示す。各場合ともほぼ同じような曲線上にのるとみなしてよいので、き裂0.5 mmからの破断寿命 $(N_f - N_{l=0.5})$ を基準にした相対繰返し数比で考えれば、応力レベルや、材質の差異に関係なく、同じ割合でき裂被害が進んで行ったと考えられる。降伏点より高い応力レベルでのS15C材の場合については、塑性変形挙動と衝撃疲労寿命との観点で検討する必要がある。

図10に、き裂長さ l とその時点でのき裂進展速度 dI/dN の関係を示した。ここで、 dI/dN はセカント法によって求めた。図にみられるように、ばらつきはかなり大きい、傾向的には $\log(dI/dN)$ と l は直線的な傾向にあり、同じき裂長さのところでは、応力レベルが高いほうが、またS15C材がS35C材よりも dI/dN が高くなっているようである。

dI/dN のばらつきが大きいのは、本実験のような衝撃引張疲労のき裂成長では、粒界破壊やディンプル破壊が、ストライエーション形成に対して著しく混入しており、その混入割合もまた、材質やき裂先端の応力状態等に関連して変化するためであろうと考えられる。

両材料の、 $\sigma = 186 \text{ MPa}$ での場合の微視的破面様相を、板厚の表面近傍と中央部で、き裂長さ l に沿って観察した。全体的には、凹凸が激しく、ひだ状縞模様や、ぜい性的な粒界、粒内割れが多くみられ、ストライエーションがみられてもそこには割れやディンプルも混在している様相を呈していた。これらの結果は、衝撃荷重下での、き裂先端の応力状態の複雑さを示唆するもので、上述の dI/dN のばらつきが大きい結果とも対応していると思われる。なお、ストライエーション模様がよく観察される領域は、き裂成長が急速に進展していく l の付近に対応しているようであった。また、S15C材のほうには延性ストライエーション模様が観察されたが、S35C材では明りょうでなかった。図11に、板厚中央部での、き裂長さ l に沿った微視的破面様相の特徴的なものを示した。破面形態については、衝撃でない疲労の場合とも対比して、今後検討する予定である。

5. 結 言

試作した衝撃試験機を用い、炭素鋼S15C材およびS35C材の、中央に円孔切欠きを有す板状試験片について、衝撃引張疲労試験を行ない、円孔から発生した、表面の巨視的き裂進展挙動と破断寿命 N_f

との関連を調べた。本実験の範囲内では、次のような結果を得た。

(1) 円孔縁の両側に発生したき裂は、0.2 mm程度になると、主として一方の側のき裂のみが進展していった。この主き裂が0.5 mmの長さ到達する推定繰返し数 $N_{l=0.5}$ は、S35C材では186 MPaで0.82 N_f 、258 MPaで0.92 N_f であったが、S15C材では応力レベルに関係なく0.83~0.85 N_f であった。両材ともに、0.96~0.97 N_f 付近で急激にき裂進展が加速し破断に至った。

(2) き裂0.5 mmからの寿命とき裂進展挙動の関係は、186 MPaでは、0.5~1 mmでは同じであるが、それ以後では材料の差異があらわれて寿命に差が出た。降伏点に近い応力258 MPaでは、0.5 mm以後の両材料の寿命に大差がないようであった。しかし、 $(N - N_{l=0.5}) / (N_f - N_{l=0.5})$ の相対繰返し数比で考えれば、応力レベルや材質の差異に関係なく、ほぼ同じような割合で、き裂被害が進んでいるものと考えられた。

(3) dI/dN は、かなりばらつきが大きかったが傾向的には $\log(dI/dN)$ と l は直線的傾向にあり、同じ l のところでは、応力レベルの高いほうが、また、S15C材がS35C材よりも dI/dN が上まわるようであった。

(4) 破面の微視的様相では凹凸が激しく、全体的には、ぜい性的な割れが著しく観察され、ストライエーション模様にも割れが混在していた。これらの結果は(3)の dI/dN のばらつきの大きい結果とも対応している現象と思われる。

終りにのぞみ、試験機製作に協力をいただいた本校文部技官奈良勝敏氏と実験に協力をいただいた当時学生工藤昌、長沢孝輝の両君に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 斎藤、宮野、ほか2名、秋田高専紀要 15, 1 (1980)
- 2) 斎藤、宮野、山崎、秋田高専紀要 17, 1 (1982)
- 3) 藤村、斎藤、材料試験 8, 71, 673 (1959)
- 4) 国尾、ほか4名、破壊力学実験法、朝倉書店 61 (1984)