

衝撃ねじり荷重下での疲労強度および
疲労き裂進展特性に関する研究⁺
On Fatigue Strength and Crack Growth Characteristics
in Fully Reversed Torsional Impact Fatigue

能瀬 春雄* 坂本 勇* 中山 英明**
Haruo Nose Isamu Sakamoto Hideaki Nakayama

Abstract

In order to investigate the fatigue behavior under fully reversed impact torsional load, a vibro-moter type impact fatigue testing machine with high loading rate was newly developed. By using this testing machine, a series of experiments were carried out on a structural alloy steel JIS. SCM435.

The following characteristics in impact torsional fatigue were revealed: (1) The fatigue strength of the plain specimen in impact fatigue is higher than that in non-impact fatigue over the entire range of this experiment; (2) the growth rate of cracks propagating from a hole notch in impact fatigue is almost the same as that in non-impact fatigue. Such fatigue behavior in torsional impact indicates that the difference in S-N data as above mentioned depends on the originating stage of early fatigue small cracks.

1. 緒 言

実機構造部材の破損原因の大部分は疲労破壊であるが、そのうちでも衝撃荷重の作用によるものがかなりの割合を占めていると考えられ、このことから衝撃荷重を実働荷重の一環として捉え、広範囲の荷重様式下での、また各種材料の衝撃疲労データを収約し、衝撃荷重を考慮した疲労設計基準を確立することは重要である。

現在までの衝撃疲労研究において、(1)金属材料の衝撃疲労強度は通常の疲労強度を下回ること、および(2)衝撃疲労き裂進展挙動は通常の荷重下でのそれを上回ることなど、衝撃荷重下での疲労現象は主要な側面において危険側の挙動を呈することが一般的特徴として明らかにされてきている¹⁾²⁾しかし、こうした衝撃疲労特性は軸方向および曲げ荷重下での結果での結果に基づくものであり、ねじり荷重下での報告は比較的低繰返し数域に限定されるものが数例あるにすぎず、また、衝撃ねじり疲労試験結果にみられる諸特性は上述した強度傾向と必ずしも一致しない³⁾⁴⁾⁵⁾

さらに、上述の衝撃疲労特性を明らかにしてきた衝撃引張りもしくは衝撃引張り圧縮疲労試験の形態をみると、そこでの衝撃応力波形は使用した試験機の構造、特性に依存して種々の形態に及んでいることから、得られたデータは使用した試験機に固有のものとして把握する必要

+ 昭和63年4月20日原稿受理

* 大阪産業大学工学部交通機械工学科

** 大阪産業大学短期大学部

があり、このことは衝撃疲労現象の総合的、定量的評価を阻害している。

以上のことより、衝撃疲労研究の到達点をふまえた当面の研究課題は次に挙げる諸点に要約されると考えられる。先ず(1)現在まで蓄積された各種応力波形下での衝撃疲労データを総合的に評価するため、例えば応力保持時間、応力立ち上がり時間等の基本応力パラメータの衝撃疲労強度への寄与を明らかにすることが必要であり、併せて、広い繰返し数範囲でこのことを可能ならしめる試験機の開発もまた急務である⁶⁾⁷⁾次いで、(2)衝撃疲労データの絶対量、特に曲げおよびねじり荷重下のデータが少ないことから、衝撃疲労強度の全容を把握するために、簡潔な応力波形下で各種負荷様式下での衝撃疲労データを蓄積していく必要がある。さらに、(3)衝撃荷重を実働荷重の一環として捉え、その効果を調べる立場から、正弦波荷重との干渉効果についても検討を加えておく必要がある⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

本研究は、上述した課題の内の(2)の観点に立つものであり、衝撃ねじり荷重下での疲労研究を体系的に調べることを目的として振動モータ式の完全両振り衝撃ねじり疲労試験機を試作し、さらにこれを用い、構造用合金鋼 S C M 435 を供試材料として行われた一連の衝撃ねじり疲労試験の結果に関するものである。

本研究の結果、試作した試験機は良好な運転特性を有すること、また、衝撃ねじり荷重下での疲労限度は通常のねじり疲労限度を上回り、さらに衝撃ねじり荷重下でのき裂進展速度は通常のねじり荷重下より相対的に低いことなどが観察されたので以下に報告する。

なお、本論文の概要は既に別報に記載済みであるが¹¹⁾本研究が一通り終結したので、この場をかりて全体的取りまとめを行なった。

2. 供試材料および試験片

本実験に供試材として用いたのは Cr-Mo 合金鋼 JIS. SCM435 であり、その化学成分を表 1 に、熱処理条件および静的引張り試験での機械的性質を表 2 にそれぞれ示している。材料は

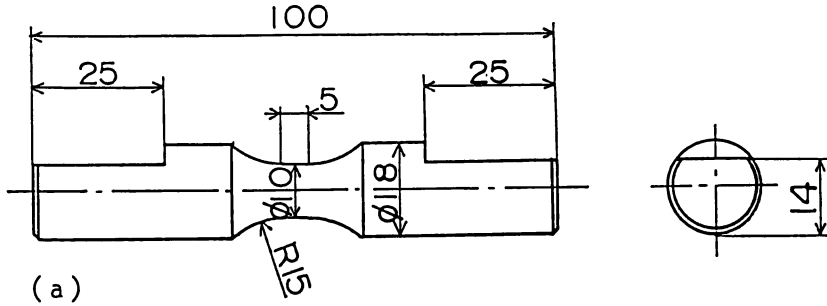
表 1 供試材料の化学成分

Material	Chemical composition (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM435	0.37	0.26	0.74	0.02	0.02	0.01	0.02	1.07	0.18

表 2 熱処理条件および機械的性質

Heat treatment	Ultimate tensile strength σ_B MPa	Breaking strength on final area σ_T MPa	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ MPa	Elongation δ %	Reduction of area ϕ %
870°C, 30min. A.C	1081	1592	748	11.8	26.9

すべて $\phi 20$ の熱間圧延鋼として供給されたものであり、所定の熱処理を施したのち、図 1 (a) に示す試験片の形状、寸法に機械加工し、実験に供した。なお、試験片の最小断面部に 1 個の小穴切欠きを有する試験片を作成し、これにより疲労過程での疲労き裂の発生、進展挙動も併せて調べたが、この場合の小穴切欠き部の詳細図を図 1 (b) に示している。以下では小穴を有さない試験片を平滑試験片、小穴を有するものを小穴切欠き試験片と呼ぶことにする



Details of a hole notch

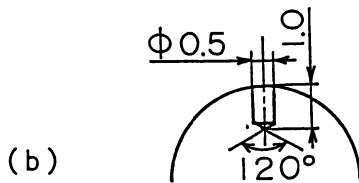


図1 試験片の形状および寸法

3. 実験装置および実験方法

本研究の目的は高サイクル領域までの疲労試験を容易にし得る衝撃ねじり疲労試験機を試作し、これを用いて広い繰返し数範囲にわたる両振り衝撃ねじり荷重下での疲労強度および疲労き裂進展挙動を調べ、その特徴を明らかにする点にある。先ず、本研究で開発した試験機の構造および特性について述べる。

3-1 試作した試験機の構造

現在までの衝撃ねじり疲労研究においては重錘落下式衝撃ねじり疲労試験機（以下、落下式と呼ぶ）がもっぱら用いられているが、この種の試験機はその構造上、試験機の高速度化が困難であり、破断繰返し数が 10^7 回までの疲労試験を実際上遂行し得ないことが欠点となっている³⁾⁴⁾⁵⁾

上述のことより、本研究においてはまず、特に運転速度の高速度化に重点を置き、振動モータ式衝撃ねじり疲労試験機（以下、振動モータ式試験機と呼ぶ）を試作、開発したが、その原理図を図2に、構造図を図3にそれぞれ示している。本試験機は筆者らの一人が従来より引張り圧縮衝撃疲労試験を行なう際に用いてきた振動モータ式衝撃疲労試験機の構造、特徴を骨子とするものであり、¹²⁾¹³⁾図2に見るように回転軸の両端にそれぞれ2個の偏心質量を取り付けた回転速度が約1750rpmの振動モータを荷重源としている。

本試験機の作動機構について簡単に説明する。荷重源となる振動モータの駆動により生じる偏心質量の遠心力垂直方向成分はモータを両側で支持している板バネにより吸収され、水平方向振動のみが取り出され、この振動により二個の衝撃端子はねじり負荷棒に固定された回転翼と交互に衝突を繰り返し、ここで生じた衝撃荷重が荷重伝達棒を伝ばし、試験片に両振り衝撃ねじり荷重を負荷する。

衝撃荷重発生部では直接衝撃による衝突個所部品の摩耗損傷を生じることから、回転翼側に

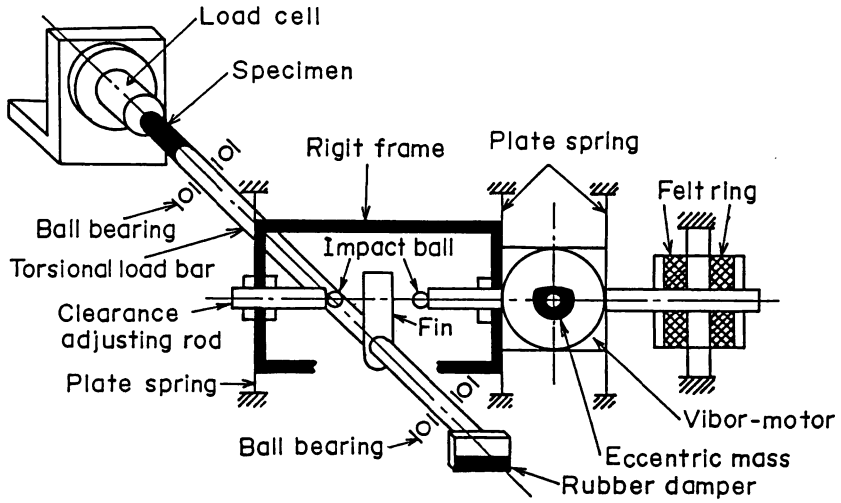


図2 振動モータ式衝撃ねじり疲労試験機の原理図

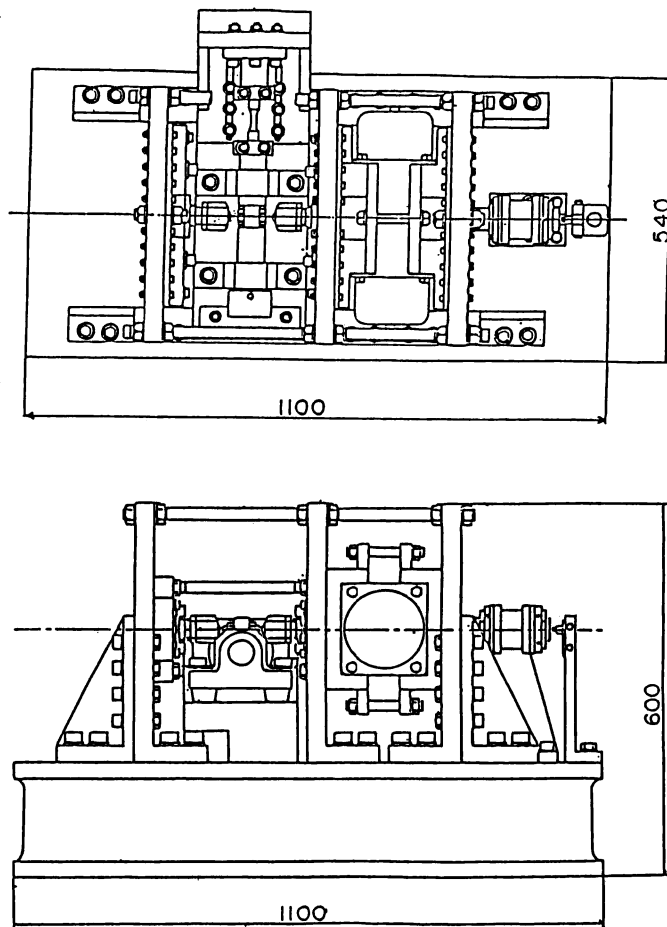


図3 振動モータ式衝撃ねじり疲労試験機の構造図

は高張力ボルト、衝撃端子側には玉軸受用の鋼球をそれぞれ交換部品として組み込み、適宜交換した。また、衝突後の回転翼に生じる減衰振動を吸収するため、ねじり負荷棒端部に硬質ゴムを敷いた。

一方、すきま調節棒を回転翼に締め付け、回転翼と剛性棒が衝撃端子を介して一体化した場合には上記部材間の衝突現象は生ぜず、試験片には振動モータの回転による正弦波荷重が作用する。荷重の大きさは数種の偏心質量より適当な2種を選び、それらを適当な角度で組み合わせさせて回転軸に取り付けることにより任意に設定できるようになっている。

以上述べたように、通常のねじり疲労試験から衝撃ねじり疲労試験までを1台の試験機により行い得る点も本試験機の特徴となるところである。

3-2 試験機の運転性能および応力波形

疲労試験を行うに際しては、実験期間中の荷重安定が重要である。このことを確認するため、本試験機を用いて疲労試験を行う過程において、ほぼ等間隔の繰り返し数で荷重の計測を行ったが、その結果を寿命比 n/N に対して示しているのが図4である。図より衝撃応力の大きさは実験繰返し数全域でほぼ一定に保たれていることが観察される。ここで n は測定時の繰返し数、 N は破断繰返し数である。また、本試験機により得られる応力波形の一例を図5に示しているが、図に見るように応力立上り時間が約4 msecの完全両振り衝撃ねじり荷重となっている様子が観察される。

3-3 実験方法

上にその構造、特性を示した衝撃ねじり疲労試験機を用いて、両振り衝撃ねじりおよび通常のねじり疲労試験を行なったが、荷重の検出には試験片のφ18の肩部に貼付したひずみゲージを用い、これからの出力を応答周波数域DC~50KHzの直流増幅機で増幅した後、デジタルメモリスコープにより測定を行った。

小穴切欠き試験片を用いた疲労試験においては、疲労強度とともに小穴からの疲労き裂の発生、進展挙動も調べたが、き裂長さの測定はアセチルロース・フィルムを用いた簡易レプリカ法によった。き裂長さ l としては、図6にその例を示すように、小穴から2方向に進展するき裂長さの小穴径を含む全長の平均値を採用した。さらに、き裂進展速度を評価するに際して、

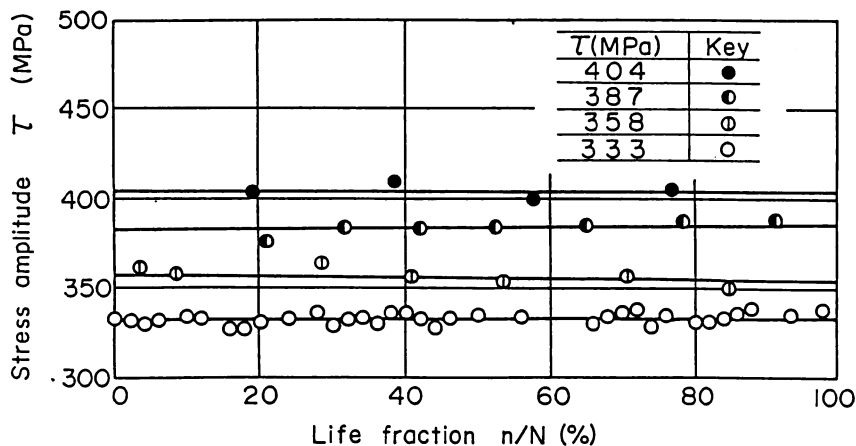


図4 試験過程での荷重の安定性

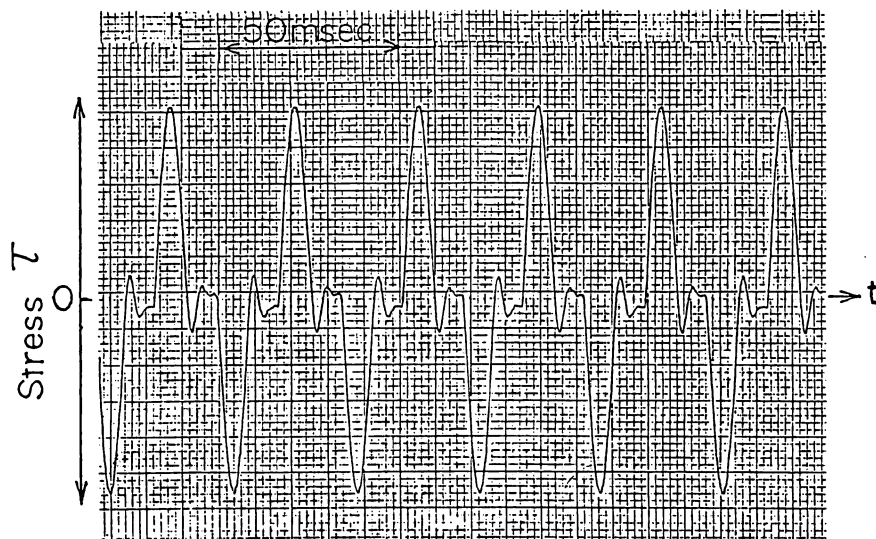


図5 応力波形の例 (振動モータ式試験機)

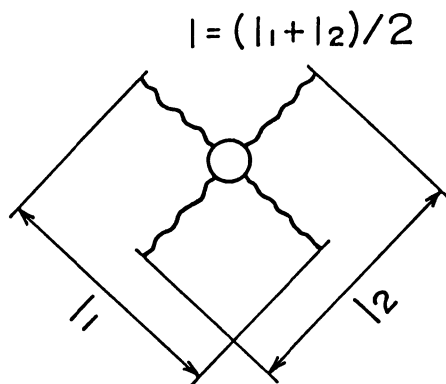


図6 き裂長さの定義

応力拡大係数対応量として $\tau \sqrt{e}$ を用いた。

なお、次章に述べる実験結果では先に報告した落下式衝撃疲労試験機を用いて得られた実験結果を併せ示しているが、この落下式試験機により得られる衝撃応力波形の一例を図7に示している⁵⁾。この場合の応力立上り時間は約1 msec、荷重繰り返し速度は約2.5Hzである。衝撃ねじり応力の大きさ τ としては衝撃ねじり応力の变化幅 $\Delta\tau$ の1/2を採用し、1回の両振り衝撃ねじり応力の作用をもって応力1サイクルとカウントした。

5. 実験結果および考察

5-1 衝撃ねじり荷重下での疲労強度

本研究で開発された振動モータ式衝撃ねじり疲労試験機の特長評価も兼ねて、SCM435合金鋼よりなる平滑試験片および小穴切欠き試験片を用いて一連の疲労試験を行なったが、図8に

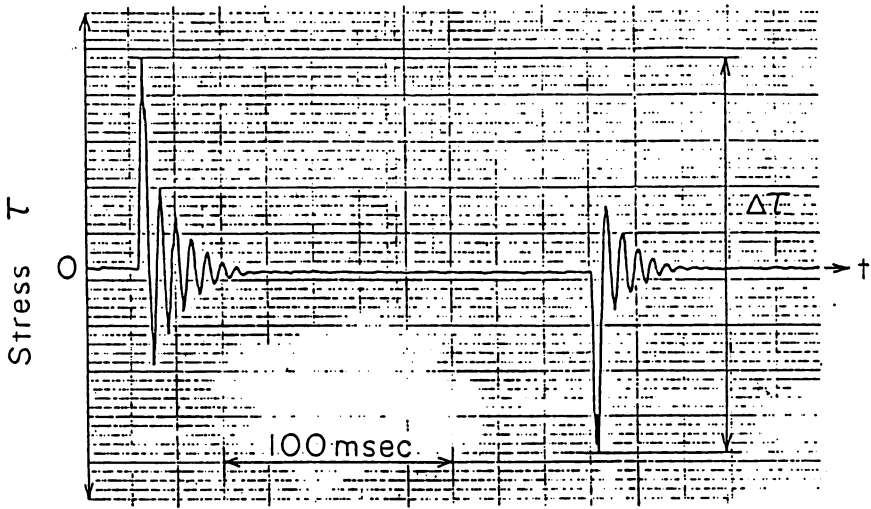


図7 落下式衝撃ねじり疲労試験機で得られる応力波形の例

小穴切欠き試験片による結果も含めたS-N特性をまとめて示している。なお、本研究と同様の材料を用いて落下式試験機により得られた衝撃ねじり疲労試験結果を図中に実線（図中にImpact (2.5Hz) と付記）で併せ示している⁵⁾

まず、図中の平滑試験片により得られた衝撃ねじり疲労データの特徴について述べる。本実験においては打ち切り繰返し数を 10^7 回とし、同一の試験機で通常のねじり疲労および衝撃ねじり疲労試験を行っているが、図にみるように通常のねじり疲労限度として約320MPaをとることができる。一方、衝撃ねじり疲労強度をみると実験繰返し数全域で通常のねじり疲労強

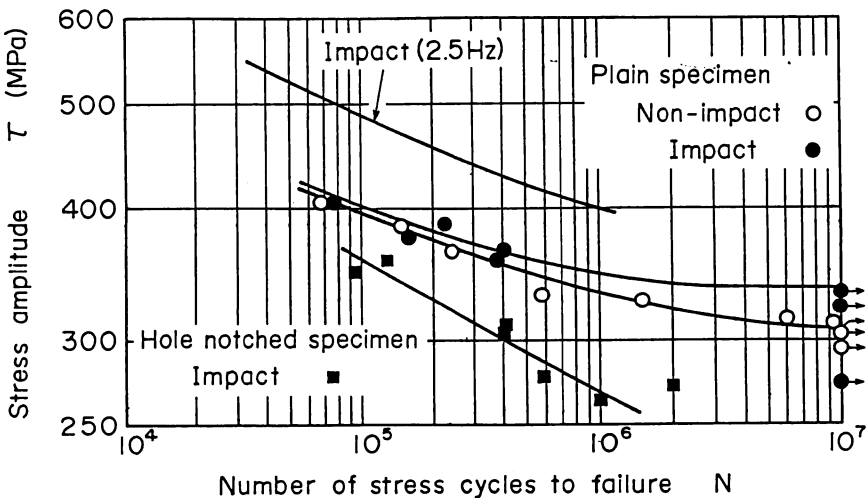


図8 平滑および小穴切欠き試験片によるS-Nデータ

度を下回ることなく、その疲労限度は約340MPaであり、通常のそれを幾分上回ることが観察される。

ここで、振動式および落下式試験機による衝撃ねじり疲労強度を比較すると、後者の試験機による結果が実験繰り返し数全域で相対的に高強度を示すことが観察される。こうした試験機の相違による衝撃ねじり疲労強度の差異は応力波形における応力立ち上がり時間、応力変動中の休止時間等、図5および図7に示した作用応力の形態、衝撃応力を構成するパラメータの相違によるものである。両試験機で得られる応力波形を比較すると落下式試験機における方が特に応力立ち上がり速度が高いなど、相対的に厳しい衝撃ねじり応力波形となっている。このことから、図8にみられる強度傾向は強衝撃ねじり応力下ほど疲労強度は上昇し、衝撃の度合いが緩やかになるにつれて通常のねじり疲労強度に接近することを示唆している。

本研究で得られたSCM435合金鋼の衝撃ねじり疲労強度の高低を判断するため、「金属材料疲労強度データ集」¹⁴⁾より過去に行われたSCM435の通常のねじり疲労試験結果を抽出し、これらとの対応で本実験の結果を示したものが図9である。ここで、図の縦軸にはねじり応力振幅を引張り強さで正規化した τ_a/σ_B をとっている。図にみるように、本研究での結果も含めて通常のねじり疲労限度は引張り強さ比 $\tau_a/\sigma_B=0.3$ を中心に図中に2本の破線で示すように比 $\tau_a/\sigma_B=0.1$ 程度のバラツキ幅の中に収まる。一方、衝撃ねじり疲労限度は通常のねじり疲労限度のバラツキ幅の中に位置するものの、いずれも比 $\tau_a/\sigma_B=0.3$ を上回っている。すなわち、衝撃ねじり疲労強度は通常のねじり疲労強度を下回らず、したがって、衝撃ねじり荷重の作用を受ける構造部材の設計に際しては通常のねじり疲労データを安全側の値として使用し得る。

緒言で述べたように軸方向および曲げ応力下での衝撃疲労試験結果においては総じて通常の疲労強度を下回ることが明らかにされており、本研究にみるように衝撃荷重下において高繰り返し数域まで高強度が保たれることはねじり荷重下における特徴的強度特性である。

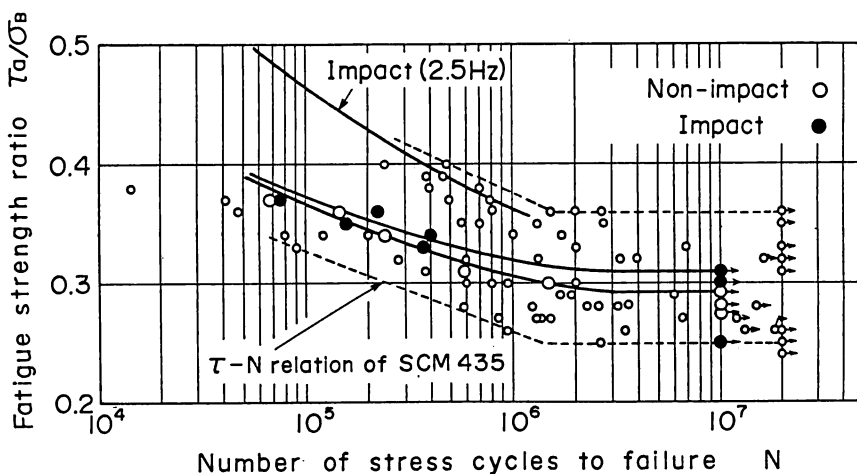


図9 SCM435合金鋼によるねじり疲労データとの対応

5-2 疲労き裂進展特性

小穴切欠き試験片による疲労試験の過程での小穴からのき裂の発生および進展の様子を観察し、測定された $l-N$ 曲線より接線法でき裂速度 dl/dN を求め、これを応力拡大係数対応量 $\tau\sqrt{l}$ に対して示したものが図10、11である。なお、一般的にねじり荷重を受ける丸棒試験片のき裂進展を評価するパラメータの誘導は困難であることから、ここでは便宜的に $\tau\sqrt{l}$ を用い、衝撃応力の大きさ τ は寿命比80%までの平均値を採用した。

通常のねじり荷重下での疲労き裂進展速度を示す図10より、実験応力の大きさに依存してわずかにき裂進展速度が高くなる様子が観察されるが、こうした実験応力依存性は明確でなく、実験結果は一本の曲線の周辺に比較的良好に集まっている。

次いで、図11に衝撃ねじり荷重下での $dl/dN-\tau\sqrt{l}$ 関係を示しており、図中の実線は通

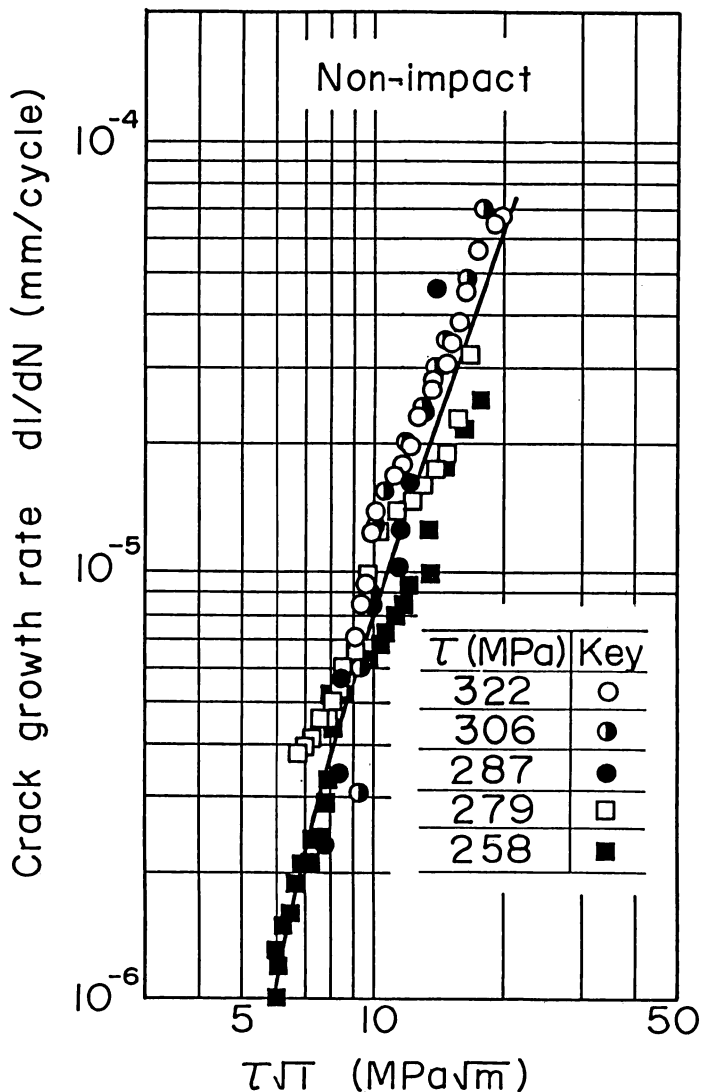


図10 通常のねじり荷重下での疲労き裂進展速度曲線

常のねじり荷重下での結果である。図より、通常のねじり荷重下でわずかにみられた $dl/dN - \tau \sqrt{l}$ 関係の実験応力依存性は衝撃ねじり荷重化でも観察されるが、かなり広範囲にとられた実験応力下でのすべての結果が通常のねじり荷重下での結果と同等、もしくはそれを下回っている。また、図中に実線で併せ示す落下式試験機による結果（図中、Impact (2.5Hz)）は振動式試験機による結果とよく一致している。図8に示したS-N線図上での結果とは異なり、疲労き裂進展速度に対しては衝撃応力波形効果は観察されなかった。

軸方向衝撃荷重下での疲労き裂進展挙動に関しては、特にき裂進展速度の比較的高いこと、およびき裂開口挙動が通常の荷重下のそれと異なるなどのいくつかの特異性が明らかにされているが、^{13)15)~20)} 本研究の結果より衝撃ねじり荷重下での疲労き裂進展挙動は従来から明らかにされてきた特性とは異なる傾向を示すことが明らかにされた。

以上述べてきた一連の実験結果は、衝撃ねじり荷重下での相対的高強度は疲労初期裂の発生

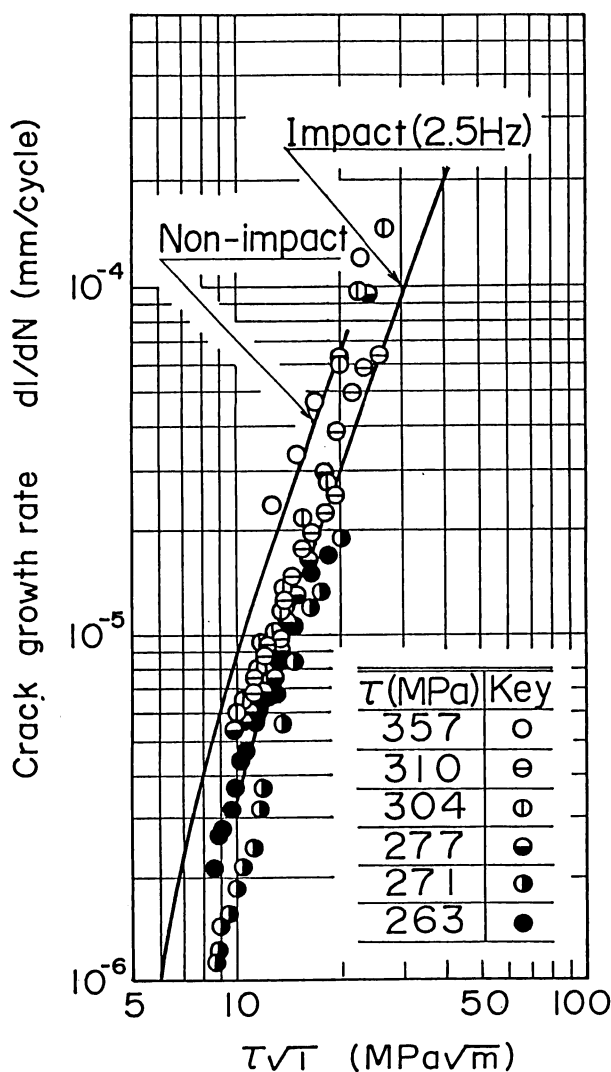


図11 衝撃ねじり荷重下での疲労き裂進展速度曲線

時期に起因する可能性を示唆している。この点についてより詳細な検討を加えるべく、現在衝撃ねじり荷重下での初期き裂生成状況の観察を計画している。この結果と併せて、き裂開閉口の問題なども含め、衝撃ねじり荷重下での疲労破壊進行過程の全体的様相について評価を行なう予定である。

6. 結 言

本研究は長寿命範囲までにわたる衝撃ねじり荷重下での疲労特性を体系的に把握することを目的とするものであり、先ず、このことを可能ならしめる性能、特性を有する振動モータ式の両振り衝撃ねじり疲労試験機を試作、開発した。次いで、この試験機によりSCM435合金鋼よりなる試験片を用いて衝撃ねじり荷重下での疲労強度および疲労き裂の発生、進展挙動を調べた。

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 平滑試験片による両振り衝撃ねじり疲労試験の結果、衝撃ねじり疲労強度は通常のねじり疲労強度を上回ることが認められた。また、強衝撃ねじり応力下ほど疲労強度は上昇し、衝撃の度合いが緩やかになるにつれて通常のねじり疲労強度に接近することが観察された。
- (2) 平滑試験片によるS-Nデータと過去のSCM435による通常のねじり疲労データとの比較を試みると衝撃疲労データは通常の疲労データのばらつき範囲内に収まっており、また、その平均的強度を下回らないことが観察された。したがって、衝撃ねじり荷重の作用を受ける構造部材の設計に際しては従来の通常のねじり疲労データを安全側の値として使用し得る。
- (3) 小穴切欠き試験片を用いて小穴からの疲労き裂の発生、進展挙動を調べた結果、応力拡大係数対応量 $\tau\sqrt{a}$ を比較パラメータとしてみた場合には、衝撃ねじり荷重下で疲労き裂進展速度は通常のねじり荷重下での結果と実験範囲全域で同程度、もしくは幾分かこれを下回ることが観察された。

参考文献

- 1) 総説として、田中道七、中山英明、材料、23、678(1974)。
- 2) 講座として、中山英明、田中道七、材料、34、1483(1985)。
- 3) 岡部永年、矢野利行、内田猛、森忠夫、日本機械学会論文集、50、41(1985)。
- 4) 前川一郎、日本機械学会誌、84、448(1981)。
- 5) 能瀬春雄、坂本勇、中山英明、大阪産業大学論集(自然科学編)、73、1(1986)。
- 6) 田中道七、中山英明、森忠夫、藤井勉、木下賢一郎、日本機械学会論文集(A編)、53、1412(1987)。
- 7) 田中道七、木下賢一郎、中山英明、日本機械学会材料力学講演会(東北大学、昭和63年11月)にて講演予定。
- 8) 中山英明、兔沢健三、平野明彦、材料、34、411(1985)。
- 9) Nakayama, H., Tozawa, K. and Hirano, A., Intern. J. Fatigue, 9, 163(1987)。
- 10) Nakayama, H. and Tozawa, K., Proc. 30th Japan Congr. Mater. Res., 55(1987)。
- 11) 能瀬春雄、坂本勇、中山英明、材料システム、6、181(1987)。
- 12) 田中道七、中山英明、日本機械学会論文集、39、1082(1973)。
- 13) 中山英明、金山幸雄、式田昌弘、田中道七、日本機械学会論文集(A編)、49、1036(1983)。
- 14) 日本材料学会編、金属材料疲労強度データ集(全3巻)
- 15) 中山英明、金山幸雄、田中道七、日本機械学会論文集、49、10(1983)。
- 16) 中山英明、金山幸雄、式田昌弘、田中道七、日本機械学会論文集(A編)、50、560(1984)。
- 17) Tanaka, T., Nakayama, H. and Kimura, K. Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., 8;13(1985)。
- 18) Nakayama, H. and Tanaka, T., Intern. J. Fracture, 26, R19(1984)。
- 19) Tanaka, T., Kinoshita, K. and Nakayama, H., Intern. J. Fracture, 29, R39(1985)。
- 20) 田中道七、木下賢一郎、中山英明、材料、36、992(1987)。