

超音波伝ば速度による疲労亀裂の検出

長谷川 武 司・小笠原 淳

Estimation of Fatigue Cracks by Ultrasonic Wave Velocity Change

Takeshi HASEGAWA and Jun OGASAWARA

(昭和63年10月31日受理)

The accurate measurement of velocity change of ultra-sonic wave was performed to estimate fatigue cracks for S35C specimens. In proportion as fatigue cycle increases, ultra-sonic wave velocity decreases. Fatigue cracks, cause to decrease the wave velocity, were found out directly on the broken surface image magnified by micro-scope with CCD camera. These cracks also affect the reflecting power of the surface.

1. はじめに

部材の疲労強度を求めることは、設計のための重要なステップであり、最も一般的な手法は疲労試験を実施することである。しかし、これは多大なコストと時間を要する欠点をもち、非破壊的かつ迅速に材料の降伏現象を検出する手法が望まれている。

ところで疲労強度に関する多くの研究によれば、負荷状態にある部材内部に発生、もしくは初めから存在する微小な空孔や亀裂周囲の応力集中が、亀裂を進展させ最終破断に至らしめること、疲労強度は負荷応力および疲労回数の関数であるが最終破断の予測はバラツキが大きく難しいこと、など明らかにされている。このため、亀裂の生成に伴うA E波測定のような受動的⁽¹⁾方法、超音波を材料内部に照射し亀裂からのエコーによりその長さを推定するような能動的⁽²⁾方法など各種の非破壊的検査法が試みられ一部は実用化されてきた。ところが、多くの非破壊的検査法は測定環境の整備、すなわち外乱雑音の少ない場で行なうことが必要とされ、部材の降伏現象を実時間で評価し対策を講じていく必要のある工場や現場の要求を必ずしも満たしていない。

本研究は、材料内に存在する微小な介在物が巨視的弾性定数を変化させ、その内部を伝ばする弾性波速度を減少させること⁽³⁾に着目し、コンパクトな装置で降伏現象の実時間的評価を行う方法を目指す。

このため、本報告では環状切り欠きをつけた丸棒の試料に対し回転曲げ疲労試験を行ない、棒中を伝

ばする縦波速度の変化と、切り欠き付近を脆性破壊させた時の破断面に見られる亀裂の評価を行なうことにした。

2. 実験方法

(1) S35C材の回転曲げ疲労試験

本研究に用いられた供試材料は、市販のS35C材（丸棒）である。これを、860°Cに保持した電気炉中において1時間焼ならしした後、自然空冷させ、図1に示す形状、寸法に機械加工した。材料の化学成分および機械的性質については、表1および表2に示してある。

疲労試験に用いられた試験機は、試料つかみ軸の回転数1860rpm、試料力点における負荷容量25kgfで、本研究のために製作された。

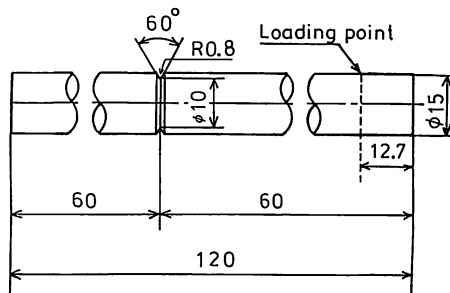


図1 試験片の形状

今回の疲労試験では、疲労の進行による縦波速度変化を調べるのであるから、相当回転数まで破断しない応力値を選ぶ必要がある。このため、同一条件で作成された試料によるS-N曲線、図2を参照し、切り欠き部における応力値を157MPaに固定した。用いられた試料は全部で17本である。

試料内を伝ばする縦波速度の測定は、図3に示すとおり、試験機から取外した試料を送波器および受波器で挟み、さらにこの全体を横バイスで固定して行なわれる。送・受波器としては、固有振動数2MHzの厚み振動型PZTを用い、それぞれは直径18mmの当て金中にエポキシ系の接着材で固定されている。送波器に加えられた電圧は、立上り時間0.5μs、波高値15V、繰返し周波数1kHzの矩形波である。S35C材の縦波速度は約4km/sであるから、送出された縦波の波長が約2mmとなり、試料直径に比較し十分短いため実体波として受波器まで伝わるはずである。一方、受波器側はカットオフ周波数100kHzのHPFをもつ増幅器によって40dbの増幅を行ない、シンクロスコープで到達した縦波の初動を読みとった。

(2) 切り欠き部断面の観察

応力集中の起こる切り欠き部に生じた亀裂を評価するため、疲労試験後の試料を液体チッソにより急冷した後、脆性破断面を作った。ところで、このようにして作られた破断面の形は必ずしも一様でない。このため、顕微鏡による目視観察で極端な凸凹のない試料のみを対象として、6本が選ばれた。また疲労試験を行っていない試料についても比較のため破断面が作られた。ここで用いられたシステムは、図4に示すように平行光線の投射装置、光学顕微鏡に

セットされたCCDイメージセンサーおよびイメージプロセッサーである。イメージプロセッサーのモニター上には、約3mm四方が横512、縦480の画素で表示される。輝度の階調は8ビットであるが、実際はイメージセンサーのダイナミックレンジ40dbで制約される。

亀裂の評価としては、破断面全体にわたる目視観察および輝度の頻度分布を調べるの2方法がとられた。

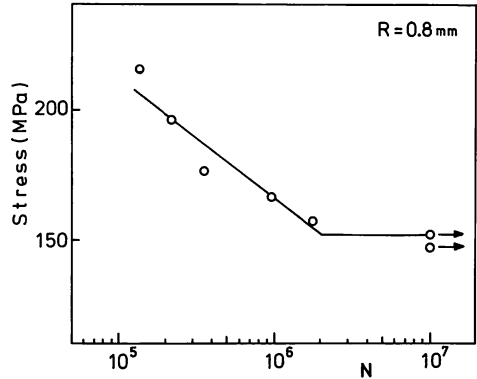


図2 供試材料のS-N曲線

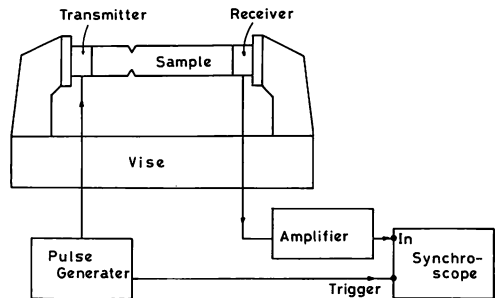


図3 縦波速度測定装置のブロック図

表1 供試材料の化学成分 (重量%)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
0.360	0.681	0.255	0.022	0.016	0.079	0.098
Mo	Cu	Ti	Al			
0.023	0.142	0.002	0.026			

表2 供試材料の機械的性質

上降伏点	下降伏点	引張強さ	伸び	絞り
405MPa	385MPa	586MPa	31%	56%

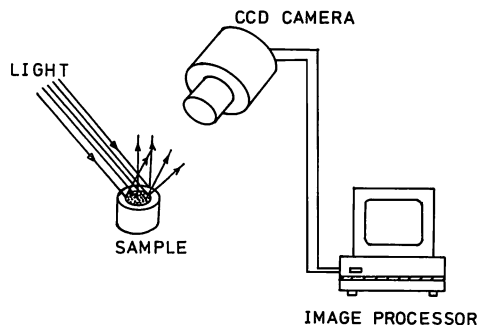


図4 脆性破壊された切り欠き部破断面観察システムの構成

超音波伝ば速度による疲労亀裂の検出

3. 実験結果および考察

(1) 回転曲げ疲労試験による試料の速度変化

縦波速度の変化は、疲労試験前の速度 V_0 に対する N 回転後の速度 V_N の比で調べるようにした。これは、試料によって絶対速度に差があるためである。実験方法の節で述べたように、速度測定は試料を試験機から取外して行なう。ところが測定前後における試料応力の再現性および試験機の安定性の調整に予想外の労力を必要とした。このため、5本の試料については 10^4 、 2×10^4 、 4×10^4 、 8×10^4 、 16×10^4 、 32×10^4 、 64×10^4 、 128×10^4 回の8段階、12本の試料については 64×10^4 、 128×10^4 回の2段階で縦波速度を測定した。これによると、いずれの試料も回転数の増加に伴う縦波速度の減少がみられた。図5は、その結果を表わすものである。図で縦軸は、比 V_N/V_0 、横軸は回転数 N を表わす。白丸は 32×10^4 回転までは5本の試料の平均値、 64×10^4 回転以降は17本の平均値を示し、縦線は標準誤差である。この速度変化について、最小2乗法を用いてまとめると、

$$V_N/V_0 = 1.12 - 0.034 \log_{10}(N)$$

が得られ、縦波速度が回転数の対数に比例し低下すると言える。この変化は、試料内部に発生し進展する亀裂によるものと考えられるが、前述の関数形から次のような経過をたどると思われる。即ち、

- I) 疲労試験の開始による微小亀裂の急速な生成が起こる。従って縦波速度の変化率が大きい。
- II) 微小亀裂がゆっくり進展する。従って、縦波速度の変化率は小さい。この段階では破断に至らない。

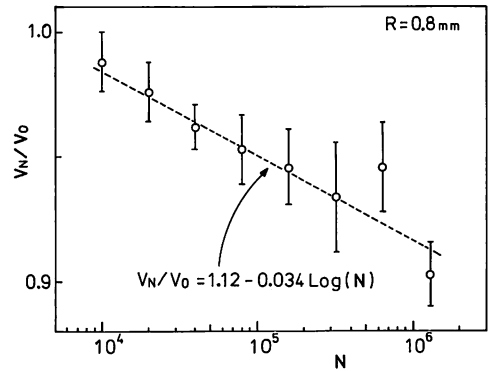


図5 N回転後の縦波速度 V_N の変化。縦軸は初期速度 V_0 で正規化してある。縦線は標準誤差である。

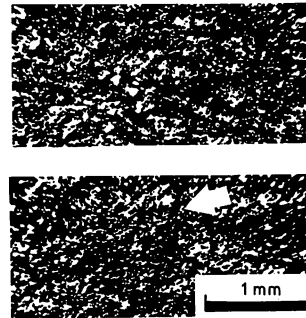


図6 切り欠き部の脆性破壊面。上の写真は疲労試験を行っていない試料であり、下の写真は疲労試験後のものである。矢印は亀裂とみられるリニアメントを指している

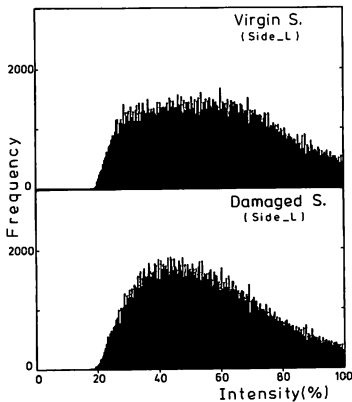


図7 (L) 図6の画像における光強度分布。横軸は CCDカメラの飽和値で正規化した相対強度、縦軸は強度の頻度である。

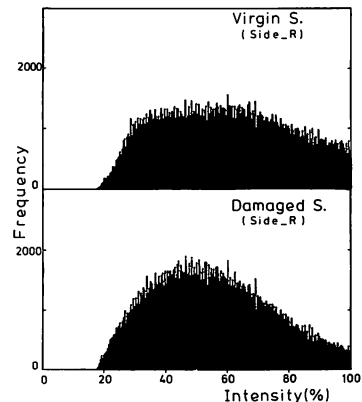


図7 (R) 図7 (L) と反対側の破断面における光強度分布。

Ⅲ) 破断に至る。

のⅠ～Ⅲ段階である。今回の測定ではⅡの段階までであるが、破壊が多くの場合急激に成長する亀裂によると考えられ、Ⅲの段階に入る直前の試料で得ること自体困難かもしれない。

(2) 切り欠き部断面について

図6に破断面写真を示す。上の写真は、疲労試験を行っていない試料であり、下の写真は疲労試験後の試料である。モニター画面の目視観察によれば後者には下の写真に矢印で示したような1mm程度の暗い筋が2及至3本認められる。しかし、疲労試験を行っていない試料では、このような筋が認められず、ランダムな凸凹面が観察されるのみである。そこで破断面解析の簡易法として次のような方法をとってみた。即ち、疲労試験を行っていない試料の破断面には特定のパターンが存在せず、面上の凸凹の波長は、ランダムに分布しているが、疲労試験後の試料には亀裂の存在により破断面の凸凹の波長のランダム性が失なわれていると仮定する。この仮定によって、破断面の反射光強度分布は前者がほぼ一様であることが期待され、後者は低強度側に分布が偏ると考えられる。事実、反射光強度の分布を調べてみると、図7(L)および(R)に示されるように、疲労試験後の試料に存在する亀裂が影響を与えていることが判る。統計的な量を用いてこの特性を表わすため、疲労試験後の試料に関する反射光強度分布より、疲労試験前の試料に関するそれを差し引く操作を行なうと、図8の分布が得られる。これは前述した亀裂の存在による反射光強度分布の低強度側における差異を強調した結果となっている。

破断面観察の可能であった6試料について、図8に得られたような低強度側の分布の平均値および比 V_N/V_0 の最終値をプロットすると図9の結果が得られる。データが少なく、一概には言えないが亀裂の存在が反射光強度分布を低強度側にシフトさせ、一方縦波速度の減少にも影響を与えていると解釈される。

4. おわりに

本報告では、環状切り欠きをもつS35C焼ならし材に対し回転曲げ疲労試験を行ない、

- (1) 疲労の進行と共に試料内を伝ばする縦波速度が減少すること。
- (2) 縦波速度の減少は、回転数の対数に比例すること。

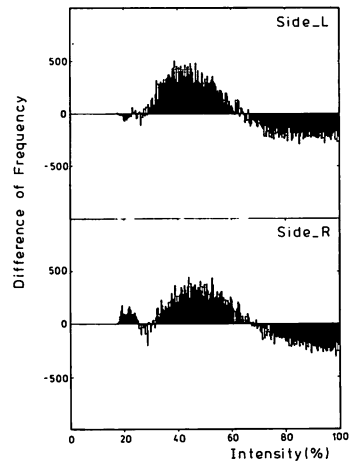


図8 疲労試験を行なった試料の光強度分布より、疲労試験を行っていない試料のそれを差し引く操作を行なって得られた頻度分布。これにより疲労試験後の反射光が低強度側にずれる様子が分る。

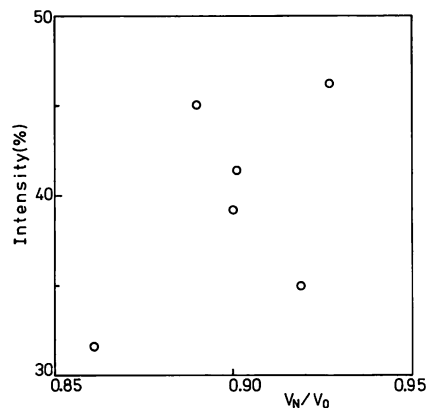


図9 図8の低強度側の分布に関し、その平均値と減少した縦波速度との関係。

- (3) 脆性破壊された切り欠き部の破断面観察により、疲労試験後の試料には亀裂が存在すること。
- (4) 亀裂の評価に破断面の反射光強度分布が使えること。
- (5) 疲労試験による縦波速度変化は、試料内に生成し進展する亀裂と関係づけられること。等を明らかにした。今後、これらの結果を降伏現象の実時間的評価へ結び付けるためには、測定ネックとなった試料の取り外しが不用であるセンサーおよび測定系の開発、速度変化値と亀裂密度の関係を明らかにすることが必要となるであろう。

超音波伝ば速度による疲労亀裂の検出

謝 辞

本研究の方向づけに種々の御助言をいただいた本
小学校長の島田平八先生，供試材料の加工，試験機の
製作及び実験に対し終始協力いただいた機械工学科
杉沢久雄技官，機械工学科卒業生五十嵐敬喜氏，舩
谷悟志氏の各位に深く感謝の意を表します。

本研究費用の一部としてリケン工業株式会社によ
る奨学寄付金（代表者：小笠原 淳）を使用した。
記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 例えば，桐原誠信他，A E計測法によるクリー
プき裂進展監視の基礎検討，材料，33，371，pp 1109
—1113，1984
- (2) 例えば，小林英男，破壊力学試験におけるき裂
進展の測定（IV），材料試験技術，28，4，pp 275
—278，1983
- (3) Yamamoto, K., 東北大学理学部学位論文，pp
1 — 199，1981