

機械構造用炭素鋼板（S45C）における疲労き裂の定量評価と破壊強度に関する研究

材料技術部 ○相山 英明, 田中 大之, 宮腰 康樹
高橋 英徳, 中嶋 快雄

Quantitative Evaluation of Fatigue Crack and Fracture Strength on Carbon Steel (S45C)

Hideaki AIYAMA, Hiroyuki TANAKA, Yasuki MIYAKOSI
Hidenori TAKAHASI, Yosio NAKAJIMA

抄 録

き裂の定量評価を行うため、機械構造用炭素鋼板（S45C：圧延材）に半楕円状の疲労き裂を導入し、磁気検査（録磁探傷法）、超音波検査（TOFD法）及び電位差法により、疲労き裂の測定を行った。その結果、電位差法が最も良い相関が得られた。また、S45Cの疲労限、き裂進展速度及び破壊靱性値の測定を行った。その結果、疲労限は約 300 N/mm²、き裂進展速度は $da/dN = 4.1 \times 10^{-10} (\Delta K)^{1.8}$ 、破壊靱性値は 3500 N/mm^{3/2}であった。これより、本研究で用いた試験片では、300N/mm²（疲労限）の静荷重が加わった場合、き裂深さが板厚の30%を超えると破断に至ることがわかった。

キーワード：疲労き裂, S45C, 録磁探傷法, TOFD超音波法, 電位差法, き裂評価

Abstract

In order to quantitative evaluation of a crack depth, the half-ellipse-like fatigue crack was introduced into the carbon-steel for machine structural use (S45C), and the fatigue crack depth was measured by the Magnetic record method, TOFD Ultrasonic method and Potential-difference method. From these results, the most sufficient correlation was obtained by the potential-difference method.

Moreover, measurement of the fatigue limit of S45C, crack growths rate, and destructive toughness value was performed. It was found that fatigue limit was 300 N/mm², crack growths rate was $da/dN = 4.1 \times 10^{-10} (\Delta K)^{1.8}$ and destructive toughness value was 3500 N/mm^{3/2}.

According to the above experiments, it may be concluded that fracture occurs in the case of the crack depth exceeded 30% of steel thickness, and the static loads of 300 N/mm² was applied to the the specimens.

KEY-WORDS : fatigue crack, S45C, Magnetic record method, TOFD Ultrasonic method, Potential-difference method, crack evaluation

1. はじめに

事業名：一般試験研究
課題名：疲労き裂の定量評価と破壊強度に関する研究

これまで道内の各企業においては保有する機器・設備等の保守・点検に際して、き裂等が確認されない場合や通常稼働

に支障を及ぼさない程度のわずかなき裂が検出された場合においても、安全性・信頼性保持の面から耐用年数に関わらず早期に更新を行ってきた。しかし、最近の社会情勢から、各企業においては機器・設備の更新はできるだけ耐用年数を延長しようという傾向にある。そのため、機器・設備の保守点検においてき裂の評価が重要な問題となっている。き裂の測定には、種々の非破壊検査方法が用いられているが、本研究では、機械構造用炭素鋼板 (S45C：圧延材、以下 炭素鋼板) に半楕円状の疲労き裂を作製し、磁気検査 (録磁探傷法)、超音波検査 (TOFD 法) 及び電位差法により、疲労き裂の測定を行い、それぞれの特性を検討した。

また、炭素鋼板について、疲労限、き裂進展速度及び破壊靱性値を求め、き裂を有する場合の材料強度評価を行った。

2. 試験方法

2.1 疲労き裂試験片の作製

炭素鋼板 (長さ 300 × 幅 40 × 厚さ 12mm) の中央に外径 ϕ 75mm, 厚さ 0.5mm のメタルソーで深さ 3mm の予き裂を作製し、繰り返し引張荷重をかけ、疲労き裂を進展させた。き裂導入の疲労試験条件は、最大荷重 56kN (5.7ton), 最小荷重 0.98 kN (0.1ton), 繰り返し周波数 30 Hz である。また、疲労き裂を導入した後、予き裂面を削除し、疲労き裂のみを残した試験片を作製した。3mm の予き裂を削除したので、実際の試験片の厚さは 9mm である。この試験片について、それぞれの非破壊試験を行った。

2.2 疲労き裂の測定

2.2.1 各非破壊試験におけるき裂の測定条件を以下に示す。

1) 録磁探傷試験

記録用磁性体：磁気テープ (カセットテープ)

再生装置：カセットデッキ, オシロスコープ

磁化方法：携帯型交流極間法 (交流)

磁化電圧：20 ~ 100V (20V 間隔)

2) 超音波検査 (TOFD 法)

探傷器： μ Tomoscan

探触子：縦波斜角探触子 6MHz, 15MHz

広帯域型垂直探触子 (音速測定用)

探傷感度：ラテラルウェーブ (表面近傍を伝搬する波) を 80%, ノイズレベル 5% 以下

接触媒質：マシン油

3) 電位差法

周波数：0.3 kHz

電流：2A

探傷感度：90dB

探触子間距離：10mm

探傷ピッチ：1mm

2.2.2 破面の観察及びき裂深さの測定

非破壊試験によってき裂深さを測定した試験片を 400°C, 30 分間, 大気中にて加熱し, 疲労き裂面を酸化, 着色した後, 疲労き裂の面と直交方向 (試験片長手方向) に引張荷重をかけ破断させた。その破断面を写真撮影し, 拡大写真 (拡大率 5 倍程度) から, き裂の最大深さを実測した。

2.3 き裂深さと破壊強度の評価

2.3.1 疲労限の測定

疲労限の測定は, 炭素鋼板 (長さ 300 × 幅 25 × 厚さ 3mm) の試験片の中央部を幅 10mm, 平行部 30mm の砂時計型に加工したものを使用した。材料試験機により, 最大引張り荷重を求め, 徐々に荷重を小さくし, 最大 1×10^7 回までの測定を行った。

2.3.2 き裂進展速度の測定

き裂進展速度の測定は炭素鋼板 (長さ 300 × 幅 40 × 厚さ 12mm) の側面中央部に深さ 7mm の直線状予き裂を入れ, 最大負荷応力 120N/mm², 100N/mm², 80N/mm², 最小荷重 2N/mm² の 3 つの荷重により, 疲労き裂を進展させ, き裂深さとくり返し回数との関係を求めた。き裂深さの測定は約 10 倍の拡大鏡を使用し, 0.5mm おきに測定し, そのときのくり返し回数を求めた。くり返し回数の測定は疲労き裂の導入開始時点をスタートとして, そこからの回数を測定した。

2.3.3 破壊靱性値

破壊靱性値の測定はき裂進展速度の測定に用いた試験片と同じ試験片を用い, き裂深さが 8, 13, 18, 23, 28mm (予き裂を含む) の 5 種類の試験片を作製し, それを, 強制破断したときの破断荷重とき裂深さから下記の応力拡大係数の式¹⁾により求めた。

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} F(\xi)$$

ここで, σ : 破断応力

a : き裂深さ

$F(\xi) = 0.265(1 - \xi)^4 + (0.857 + 0.265\xi) / (1 - \xi)^{3/2}$ である。

3. 結果および考察

3.1 き裂深さの測定

3.1.1 破断による疲労き裂深さの測定

図 1 に疲労き裂の破断面の写真を示す。破断面は鮮明に着色されており, 疲労き裂の境界が明瞭に認められる。試料のき裂先端に一部分酸化色のついていないカ所が見られるが, ここの走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察により疲労破面であることが確認された。この写真より疲労き裂の深さを測定した。その結果を表 1 に示す。

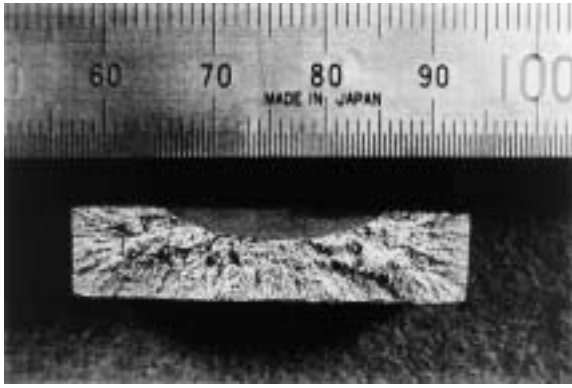


図1 疲労き裂の破断面写真

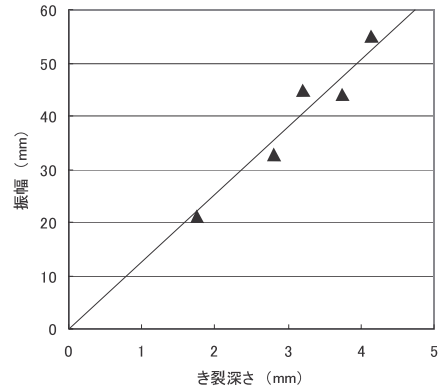


図3 録磁探傷法によるき裂深さの測定結果

表1 き裂深さの実測値 (mm)

試料 No.	1	2	3	4	5
き裂深さ	1.75	2.80	3.20	3.75	4.15
試料 No.	6	7	8	9	10
き裂深さ	4.35	4.40	6.50	7.00	7.10

3.1.3 TOFD 超音波法

図4にTOFD超音波試験の探傷画面の一例を示す。左側が探傷の生データであり、横軸は時間、縦軸は超音波の受信波形である。右側が、それをコンピュータ処理したものである。図5にTOFD超音波試験の結果を示す。横軸はき裂深さの実測値で、縦軸はTOFD超音波法による測定値である。相関係数は0.912と比較的良好な値を示しているが、測定値は実際の値より約1mm短めに測定されている。これは、炭素鋼板の疲労き裂の先端はほとんど密着状態に近いいため、その部分を超音波が透過したためと考えられる。このことから、TOFD超音波法で炭素鋼板の疲労き裂を測定する場合は、約1mmの補正を行う必要があることがわかった。

3.1.2 録磁探傷法

録磁探傷法による探傷結果を図2に示す。横軸は磁化電圧で、縦軸は探傷波形（オシロスコープ）の振幅の大きさである。これより、き裂深さの小さい試験片（1.75mm）では、磁化電圧と探傷結果（き裂深さ）がほぼ比例していることがわかる。き裂深さが2.8mmの試験片では電圧によらずほぼ一定値となっている。この理由はまだ解明できていないが、炭素鋼の交流磁束の表皮効果による表皮厚さが2～3mmであることと関係があると思われる。また、それ以上のき裂深さになると電圧の上昇と共に探傷波形も上昇しているが60Vを超えると飽和の傾向が認められる。これは録磁媒体が磁気飽和したためと考えられる。そこで、磁化電圧60Vの場合の値を探傷結果として用いた。図3は横軸にき裂深さの実測値を、縦軸に磁化電圧60Vの場合の探傷波形の振幅を示したものである。これによると、き裂深さと録磁探傷結果は良い相関を示していることがわかる。相関係数は0.95である。

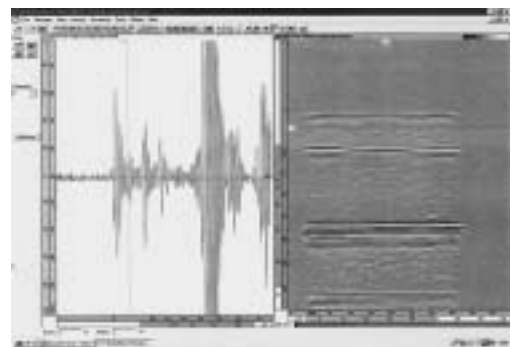


図4 TOFD 超音波試験の探傷画面

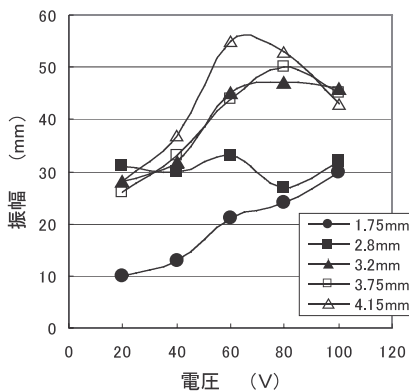


図2 磁化電圧と探傷振幅の関係

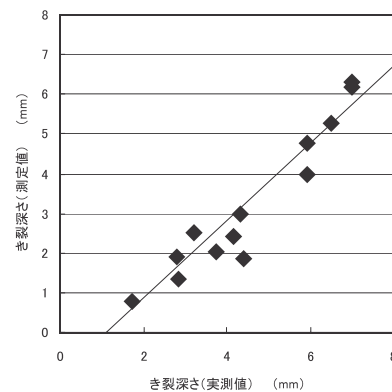


図5 TOFD 超音波法によるき裂深さの測定結果