(昭和 36 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

造船用鋼材の高応力疲れ試験 (第 2 報)

正員 高 橋 幸 伯*

Low Cycle Fatigue Tests of Ship Structural Steels, II

By Yukinori Takahashi, *Member*

Summary

To study the mechanism of crack propagation of low cycle fatigue of ship structural steel, from the rotatory bending tests, the crack length at the intermittent stages were read by heat tinted method.

For the same stress amplitude, the number of cycles of the crack propagation stage are not so scattered, and the rate of crack growth is proportional to the current crack length.

The fatigue strength of the cracked specimen are nearly equal to those of the mechanically notched V-notch specimens for the same nominal stresses. The notch effect of the fatigue crack is independent to the crack length and past stress cycles, and assumed to be the same order to that of the machined notch.

1 緒 言

波浪中の船体には、機会が少ないがきわめて高い Seaway load を受けることがある。造船用鋼材の高応力域における時間強度を求めるために、著者はさきに切欠丸棒の回転曲げ試験を行ない、数種の鋼材について応力-繰返数の一般的な関係、静的試験による機械的諸性質との関連、および破断面の性状などについて予備的観測を行なつた¹⁾。

前報において破断時のき裂の深さとそれまでの繰返数とが一定の関係にあることがわかつたので、今回は材料を 1 種に限定して、き裂の進行状況を調べてみた。

疲れき裂の伝播に関する研究は最近いくつか行なわれているが^{2~4)}、主として板状試験片におけるき裂の生長を論じたものが多く、しかもまだいずれも定性的議論の域を出ていない。実験的試験で主として用いられる丸棒状試験片ではき裂の生長についての正確な資料が得にくいためである。

船体その他の構造物では、数多くの応力不連続部や切欠きに相当する部分があり、実働荷重によつて疲れき裂の発生を避けられないこともある。実用上はき裂が発生してもそれが進行拡大しなければよいわけであるから、き裂の発生機構だけでなく、疲れき裂の伝播の機構を明かにすることはきわめて重要なことである。

そこで一般に広く用いられている丸棒試験片についてき裂進行の機構を解析する方法を求めるために、熱着色法で試験途中のき裂進行状況を求める方法を試みた。まだ十分な理論的解明を得るに至っていないが、計測結果を簡単に報告する。

2 試験片および試験方法

試験材は軟鋼 SS-41 (前報における A 材と同一ロール) で、降伏点 $\sigma_S = 27.5 \text{ kg/mm}^2$ 、抗張力 $\sigma_B = 45.0 \text{ kg/mm}^2$ 、真破断応力 $\sigma_T = 94 \text{ kg/mm}^2$ である。試験片も同じく、平行部直径 10 mm の丸棒に半径 0.75 mm の半円形環状切欠きを入れたもので、片持式回転曲げ試験を行なつた。回転数は 1~1300 rpm の間で何段階か変えたが、主として 550 rpm を用いた。

き裂の進行状況を見るため、試験片中のあるものは試験途中で一度休止し、約 280°C で 2 時間加熱してき裂部

原稿受付 昭和 35 年 12 月 20 日

* 東大生産技術研究所

Fig. 1 Notations

No. 51 $\sigma = 23 \text{ kg/mm}^2$
 $N_1 = 85,120$ $c_1 = 0.43 \text{ mm}$
 $N_2 = 32,040$ $c_f = 2.42 \text{ mm}$
 $N = 117,160$

No. 73 $\sigma = 23 \text{ kg/mm}^2$
 $N_1 = 74,000$ $c_1 = 2.08 \text{ mm}$
 $N_2 = 100$ $c_f = 2.60 \text{ mm}$
 $N = 74,100$

Fig. 2 Fractured section

ほとんど一致しており、連続試験したものの方が若干ばらつきが多い傾向はあるが、休止および加熱による影響はないものと考えて差し支えないようである。すなわち、 N_1 および N_2 の2段階荷重で破断したものは、連続試験した場合でも $N = N_1 + N_2$ で破断するものと考えことにする。

を熱着色したのち、再び試験を続行して破断に至らしめた。Fig. 1 に示す通り、第1段の繰返数を N_1 回、第2段を N_2 回、破断までの総繰返数を $N = N_1 + N_2$ とし、破断後断面を顕微鏡観測して、 N_1 および N 回までのき裂の深さ c_1 および c_f を測定した。破断面の所見例を Fig. 2 に示す。

3 試験結果

(1) 熱着色の影響

途中1度休止して加熱したことが疲れ寿命に影響するかどうかを確かめるため、同じ応力で破断まで一気に連続して繰返荷重を与えたものと、途中休止して熱着色したものとの2グループについて、それぞれ繰返数に対する破断の頻度を求め確率紙にプロットすると Fig. 3 のようになり、いずれも大体正規分布に近い。

各グループとも約 20 本ずつでやや数が少ないうらみはあるが、50% 破断の繰返数は

Fig. 3 Comparison of fatigue life of the heat tinted specimens and continuously tested ones

(2) き裂の状況

熱着色した試験片に第2段の荷重をかけないで縦断面をとり、顕微鏡撮影を行なったものが Fig. 4 である。き裂はほぼ応力最大の方に直角に進んでいるが、途中相当折れ曲つたり枝分れをしていることがわかる。き裂は必ずしも結晶粒界だけでなく、結晶を横切つているところも非常に多い。

この観測によるき裂長さの値と、これを折曲げてき裂面で破断させ、破断面の熱着色された深さから読ん

Fig. 4 Crack line (No. 88, $\sigma=23 \text{ kg/mm}^2$, $N_1=62800$)

裂深さとは、 0.02 mm の精度で一致している（これはほぼ結晶粒1箇の寸法に相当する値である）。すなわち、破断後の熱着色部の深さの読みは、 N_1 回までのき裂深さ c_1 と正確に一致するものであることが確かめられた。

(3) σ - N 線図

曲げ応力 $\sigma=23, 35, 51, 70 \text{ kg/mm}^2$ の各段階で、それぞれ16~40本ずつの試験を行ない、Fig. 3の例にならって各グループの破断の確率を図示するとFig. 5が得られる。ここでは繰返し速度の影響はないものとして一括処理した（次項参照）。これから破損確率50%の繰返数をとるとFig. 6に示す平均の σ - N 曲線が得られる。図中には破断しない確率5, 95%の線も併記した。また上記4段階の応力以外の点はそれぞれ試験片1本ずつに対応する点である。

(4) 繰返速度の影響

低応力疲れ試験では、常温の疲れ強度は試験片の温度上昇が問題とならぬ限り、5~6000 cpmの範囲ではほとんど繰返速度の影響がないことが数々の実験で確かめられている。公称応力が弾性限を越えるような高応力疲れ試験では、材料の降伏点に影響を与えるような歪速度となる高速の場合、またクリープが問題となるような低速の

Fig. 5 Frequency of survivals

Fig. 6 $\sigma-N$ curve

Fig. 7 Effects of loading cycle speed

場合に当然影響があるものと考えられる。今回の試験では試験機の制約から 1~1300 rpm の範囲の試験しかできなかつたが、各応力段階における繰返速度と寿命の関係を Fig. 7 に示す。550 rpm において○印をつけた値は多数の試験片の平均値である。図に見る通り、繰返し速度の影響はほとんど認められないようである。繰返し速度の低い場合はある程度の時間強度低下が予想されるが、低速で熱放散が大きく温度上昇が少ないことと、これが相殺するというものも考えられる。同一条件における試験数も少なく、温度計測も行なっていないので、今後さらに詳しい検討を必要とするが、ここでは一応繰返し速度の影響はないものと考えた。

(5) き裂の進行

前報において、疲れ破断面のき裂の深さ c_f (または最終破断部分の半径 r') と繰返数 N との間には大体一定の関係があることを述べたが、さらに多数の試験結果を加えて図示すると Fig. 8 が得られる。図中 (+) 印で示した点は前報に示した値である。上向きの矢印を付した点は、熱着色によつて求めた試験途中のき裂深さ c_1 を示すもので、 $c=0.01$ mm の線上の点はいずれも $c_1=0$ と測定されたものに相当する。

Fig. 8 c-N curve

4 試験結果に対する考察

(1) 疲れの段階

疲れ試験開始から破断までの寿命は次の4段階に分けることができる⁵⁾。

1. 試験開始後加工硬化が完了するまでの期間、繰返数 N_I
2. 加工硬化完了後微規的クラック発生までの期間、繰返数 N_{II}
3. このき裂が生長している期間、この間は一種の平衡を保っており、巨規的な変形は認められない。繰返数 N_{III}
4. き裂がある深さ以上になつて上記の平衡が破れ急激に破断に至る過程。繰返数 N_{IV}

全寿命 $N = N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV}$ のうち、第1期 N_I はきわめて短い期間で、そのばらつきもあまり大きくないと考えられる。第3, 4期は Fig. 8 に見る通り同一の応力振幅に対しては大体同じき裂の伸長率を示しており、ばらつきはあまりない。しかるに全寿命 N は Fig. 5 または Fig. 8 にみる通り大きいばらつきが認められ、どの応力振幅の場合でも2倍以上も相違していることがある。これは主として第2期 N_{II} のばらつきによるもので、その原因も単に試験片寸法、表面仕上状態の不整や試験方法の相違などによつてだけ説明できるものではなく、むしろ疲れ破壊に固有な本質的な性質で、確率論的研究を要するものであることがいわれている。ここでは第3期以後についてだけ考えることにする。

(2) き裂の進行速度

応力振幅 23, 35, 51 kg/mm² のグループについて、Fig. 8 から破断面のき裂深さ c_f の平均値 c_m をそれぞれ求め、縦軸に各試験片の $[c_m - (c_f - c_i)]$ をとり、横軸に第2段の繰返数 N_2 を破断点から逆算してとると Fig. 9 が得られる。これはき裂の生長過程（第3期）における $c-N$ 線図で、右端付近のき裂生長の激しい部分が第4期に相当する。第2期と第3期の境界は、微規的な initial crack の長さをどう取るかによるが、現在のところではき裂発生をの時期を正確におさえることはできない。

Fig. 9 に見る通り各応力振幅のグループごとに $\log c$ と N とは直線関係にあり、

$$\log(c/c_0) = kN \quad (1)$$

$$\frac{dc}{dN} = kc \quad (2)$$

となり、き裂の伝播速度はその時のき裂の深さに比例している。これは Frost⁴⁾ たちが平板の引張圧縮の疲れ試験で得た結果と一致している。き裂が進行しても全体の応力場が変わらないと考えられる範囲として、板幅の 1/8 程度までの長さのき裂について求めた結果と、今回のような応力状態の変化の大きい小形の丸棒試験片で、しか

Fig. 9 Rate of crack growth

も半径の 1/2 以上もあるき裂について試験結果と共通していることは興味ある問題である。き裂伝播速度と応力との関係については、理論的にも実験的にもさらに検討を要する点が多いが、これは次回に譲ることとする。

(3) Cracking Line

Fig. 9 の $c-N$ 曲線を Fig. 8 に移すと、各グループの平均的なき裂伸長曲線として図示のような斜めの 3 曲線が得られる。き裂の発生する繰返数は initial crack の長さによつて変るが、読取りの精度や完全には同心円的でないき裂の周上の平均値をとつていることなどを考えて、かりに 0.1 mm までき裂が生長したときをき裂発生時と考えて cracking line を Fig. 6 に入れてみた。全寿命の約 1/2 程度の繰返数で 0.1 mm のき裂を生じている。さらに検出の困難な微規的き裂として、結晶粒の大きさ程度の 0.02 mm とすれば、全寿命の 10% 程度となり、全寿命の 90% 以上の間き裂が存在していることになる。この N_{II}/N の比率は応力振幅の大きい程小さくなつていく。これはまた、確率現象と考えられる第 2 期の繰返数 N_{II} は、応力依存度が小さくなり、繰返し回数への依存度が大きくなる傾向にあることを示している。

(4) き裂試験片の疲れ強さ

疲れき裂による応力集中がどの程度であるかをみるために、き裂試験片の第 2 段の試験 (σ_2-N_2) を第 2 段開始時の未き裂断面についての公称応力で整理してみる。この場合、き裂部も圧縮に対しては相当応力を受持つと考えるのが適当と思われるので、かりに圧縮には 100% 働くと仮定すると Fig. 11 のようになる。き裂先端の繰返応力は、き裂の伝播とともに振幅 σ_r の増加よりも平均値 σ_m の増加の方が大きく、ある程度以上き裂が進むと引張りだけの片振り状態になることがわかる。すなわち、き裂先端の最大応力を σ_{max} 、最小応力を σ_{min} とすると、状態 (b) 以後は σ_{min} が正となつて片振りとなる。

いまこのような応力分布を考えて、き裂の深さ c_1 のき裂試験片の第 2 段荷重による公称応力 σ_m および σ_r を計算し、簡単のために修正 Goodman 法則ができるとして、これと等価な両振り(平均応力零)の応力振幅 $\sigma_R = \sigma_r / [1 - (\sigma_m / \sigma_B)]$ を求め、き裂試験片についてその σ_R-N_2 関係をプロットすると Fig. 10 となる。これは図中に実線で示した鋭い切欠(先端半径 < 0.05 mm)の V 形切欠試験片の、処女材の $\sigma-N$ 線図と大体一致している。すなわち、き裂による応力集中は機械加工した切欠のそれと同程度であると考えられる。

また図中プロットした点は、開始時のき裂深さが $c_1 = 0.05 \sim 2.0$ mm と非常に広範囲にわたつていますが、き裂による切欠効果がそのき裂の長さにはほぼ無関係であることがわかる。

また変動荷重 (σ_2 vs σ_1) の試験結果も併記したが、これらの点も大体同じ線上にあり、荷重経歴もあまり関係しないことがわかる。ただ $\sigma_2 < \sigma_1$ の場合はいくらかき裂材の時間強度が低下する傾向が見られる。

Fig. 10 σ - N curve of cracked specimen

Fig. 11 Ratio of nominal stresses of cracked specimen

5 結 論

以上を要約すると

1. 疲れ寿命に影響をおよぼすことなく、熱着色法によつて丸棒試験片の試験途中のき裂深さを求めることができる。
2. 1~1300 rpm 程度の範囲では繰返速度の影響はほとんどない。
3. 同じ応力振幅に対しては、き裂伝播過程の繰返数はほぼ等しく、き裂伝播速度はそのときのき裂深さに比例する。
4. き裂発生までの繰返数は確率的現象と考えられきわめてばらつきが大きい、応力依存性は弱くなる傾向がある。
5. 疲れき裂のある試験片の切欠効果は、き裂深さ、荷重経歴などに無関係で、機械加工した鋭い切欠のある試験片のそれとほぼ等しい。

き裂材における応力分布状態、き裂伝播機構の解析など、まだまだ検討すべき点が多いが、これまでの試験結果に対する一般的考察を終ることにする。

本試験に対して御援助御指導を賜つた、八幡製鉄(株)建設用鋼材研究委員会の諸氏、東京大学吉識雅夫教授、運輸技研秋田好雄部長に心から感謝する次第である。

文 献

- 1) 高橋幸伯; 造船協会論文集, 108 号, 昭 35, p.239-245.
  - 2) A. K. Head; *Phil. Mag.*, Vol. 44, No. 356, 1953, p. 925-938.
  - 3) J. A. H. Hult; *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 6, No. 1, 1957, p. 47-52.
  - 4) N. E. Frost & D. S. Dugdale; *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 6, No. 2, 1958, p. 92-110.
  - 5) 横堀武夫; “材料強度学”, 技報堂, 昭 33.
-