

623 高強度鋼の長寿命疲労き裂発生部の破面形態と縦断面観察

帝京大学理工学部 正 ○ 森 要 内山 晃 野崎 匡
岡 一輝 佐々木 修

1 緒 言

これまで高強度鋼や高硬度鋼の疲労挙動については、かなり研究されている^{1~5)}が、低強度鋼の疲労挙動と比べるとまだ、十分に解明されているとは言えない。特に、破断寿命が1千万回を越える長寿命領域あるいは1億回を越える超長寿命領域での疲労挙動、すなわち疲労限やき裂発生挙動に関して解明すべき点が多く残されている^{6,7)}。

著者らはこれまでに高強度鋼でも強度と硬さが異なる軸受鋼⁸⁾、ローター鋼⁹⁾、低合金鋼¹⁰⁾について長寿命領域にわたる疲労強度特性ならびに疲労き裂発生挙動に及ぼす表面処理の影響について報告してきた。

低合金鋼の結果は長寿命領域のデータが少ない中間報告であったので、本研究では、主に1億回を越える領域の超長寿命データを追加し、表面処理の影響を報告する。また、疲労破壊起点部の破面形態観察の内、Fisheye 破壊の機構を探る目的でその起点部の破面形態観察と縦断面観察を行ったので、その結果についても報告する。

2 供試材、実験方法

供試材は、材料学会疲労部門委員会構造組織分科会の共同研究材料、低合金鋼、SNCM439¹¹⁾である。850℃で焼準、焼入れ後、低温(160℃)で焼戻しされている。組織は典型的なマルテンサイト組織である。化学成分、熱処理条件、基礎的な機械的特性値、試験手順等は文献^{8~11)}を参照されたい。

図1は、上記共同研究に使用されている試験片の形状、寸法である。同一手順で一括採取、試験片粗加工(仕上げ寸法+0.1mm)、熱処理がなされ、#100研削仕上げが施された形で入手した。

表面処理の影響を見るために、入手したままの#100研削仕上げ、最終仕上げが#1500エメリー紙鏡面仕上げ、#240エメリー紙で仕上げた後、表1に示す3段階ショットピーニング処理を施した3条件の試験片を用意した。材料強度確率モデル研究会で共同研究用に特別に考案、試作された四連式片持

片持ち回転曲げ疲労試験機¹²⁾を用いて、試験速度は3130rpm、負荷応力は、ノッチの曲げ負荷に対する応力集中係数1.06を考慮し、重錘を加減して調節する。無負荷時の荷重端における試験片の偏芯量は、全て±0.01mm以内であった。

Fisheyeの破壊起点部直下の断面観察は、図2に示す手順で行った。まず精密切断機を使用して軸芯に垂直に破面を切断採取する。その切断面を図2(a)に示すように固定し、Fisheye部分を狙って、図2(b)のSEM像(イラスト)で環状切欠表面までの距離がX0(約0.2mm)の位置を垂直に切断する。その破面に対して垂直な切断面を基準面にとって軟鋼製の四角の型枠で囲み、銅粉末を混ぜ込んだ2液性のエポキシ樹脂を流し込み試料を固定する。その基準面側を精密研削盤のマグネットチャックで固定し、背面側を基準面に平行に研削加工する。以後は背面側を基準面に取り、段階的に研削加工を施し、所定の位置の断面を観察した。図2(b)に示すXfは前もってSEMで観察計測し、その位置に切断面がきた時の長さ(図2(b)に示す長さlf)を正確に計算しておく。断面観察で所定の長さlfに近づけた段階で鏡面に仕上げ、断面観察を光学顕微鏡とSEMで行う。最終的には5%ナイタールで軽くエッチングして起点部直下の断面観察を行った。図2(c)は基準面側をXf近傍まで研削加工した一例を示している。なお、磁力をアップするために四隅には軟鋼製雄ねじを埋め込んだ。

3 実験結果および考察

3.1 疲労強度に及ぼす表面処理の影響

図2は、S-N線図で整理した疲労強度試験結果である。オープンマークは疲労き裂が表面から発生・進展して破壊した結果を示している。ソリッドマークは疲労破壊の起点が内部にある場合で、いわゆるフィッシュアイ型で疲労き裂が発生・進展して破壊した結果を示している。まず、百万回を越える長寿命領域では表面処理の違いにかかわらずほとんどフィッシュアイ型で表面直下の内部から破壊している。

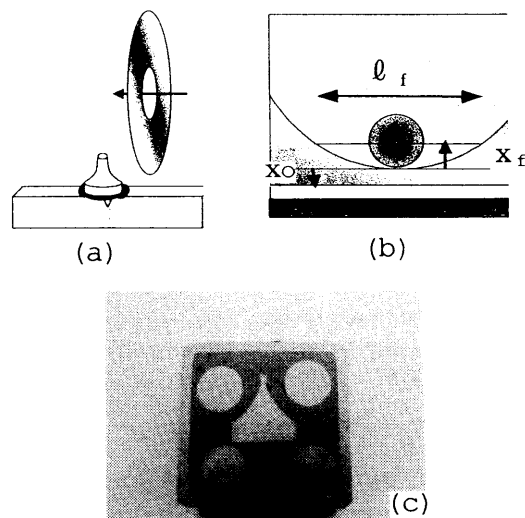


Fig.2 Cross section observation procedures.

Table 1 Shot peening condition.

Step	Type	Size (mm)	Exposure (min)
1st	Cut wire (SWRH80C)	φ 0.6x0.6	20
2nd	Cut wire (SWRH80C)	φ 0.25x0.25	20
3rd	Dry peening (glass beads)	#120 grit	5

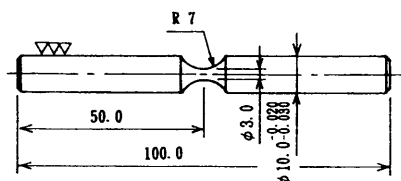


Fig.1 Specimen shape and size, in mm.

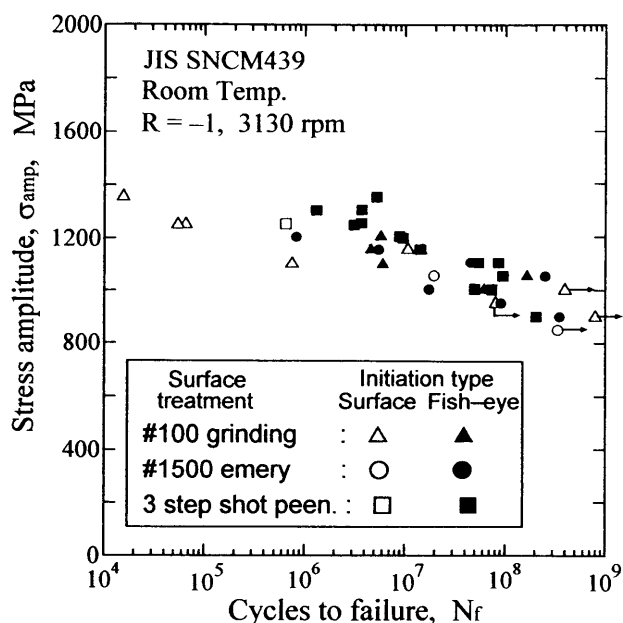


Fig.3 Effects of surface treatment on fatigue strength in low alloy steel.

高応力側では表面処理の影響が認められ、#100仕上げの結果は他の2つの表面処理と比較すると、表面の研削痕からき裂が発生、進展し、同一応力振幅の場合、明らかに破断寿命が短い。今回1億回を越えるデータをかなり追加して超寿命側での表面処理の影響を検討した。1億回を越える超長寿命領域では、疲労強度、破壊モードに表面処理の影響は認められない。このような低応力・超長寿命領域では#100研削仕上げの研削痕よりも表面直下の内部欠陥からの破壊発生が疲労破壊を律速している興味深い結果が得られている。ショットピーニング処理の効果は高応力側で著しく、同一負荷条件で明らかに他の表面処理材より寿命が長寿命側にシフトし、データのバラツキも小さい。3段ショットピーニング処理材の寿命向上と信頼性向上の主な要因は、ショットピーニングによる高い圧縮残留応力の付与によるものと考えている。X線法で計測した圧縮残留応力値は、#100研削仕上げの-440MPaから3段ショットピーニング処理材の-1185MPaへ約2.7倍も増加している。しかし、理由は良く解らないがこの圧縮残留応力効果は超長寿命領域では得られていない。

3.2 破壊起点のフラクトグラフィと断面観察

図4はショットピーニング処理した疲労き裂発生部破面形態の例で、フィッシュアイの疲労き裂発生部分をマッチング観察した結果である。5 μ m程度の角型介在物を起点として発生し、その周りに凹凸の著しい領域(粒状を呈している)でGA領域と呼ぶが観察される。マッチング観察を詳細に比較すると上下破面の凹凸が図5に示すように割れている場合が多い。起点部に観察される介在物はSNCM439鋼の場合アルミナが多いが、図4の介在物はEDSの解析結果でTiがヒットし、またその角張った形状からTiNと推定している。なお、ほとんどの場合、起点部には介在物が認められる場合が多いが、例外的に認められない場合も観察している。

図6はほぼ起点部(5 μ m以内)の断面観察結果の例である。この方法による断面観察は非常に手間を要し、難しいのでまだ観察例が少ない。起点部はマトリックスから剥離したように分離しており、この程度の観察倍率では、空隙等は観察されない。図6(a)に見られるように起点部からサブクラックが主破面から離れる方向にかなり進展しているのが観察され

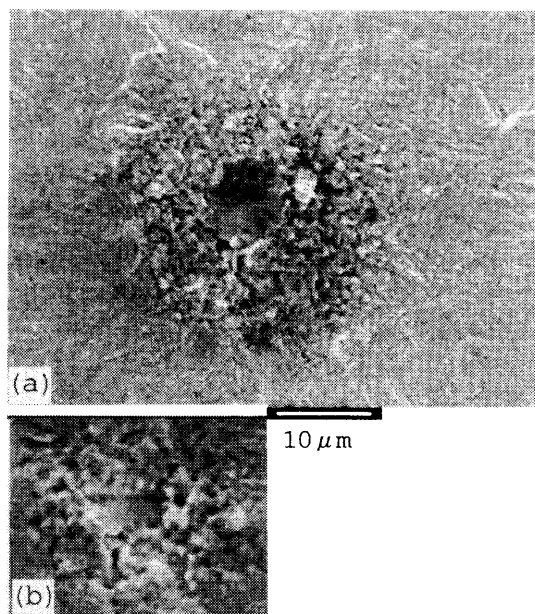


Fig.4 Fractography of crack initiation site in fish-eye.(b) Mating photo of corresponding site in (a) The image show inside out for comparison.

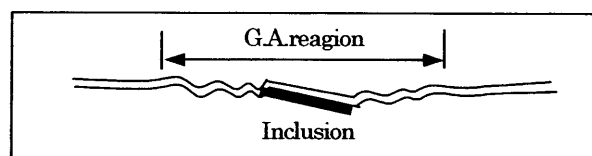


Fig.5 Cross section of crack initiation site presumed from mating fracture observation.

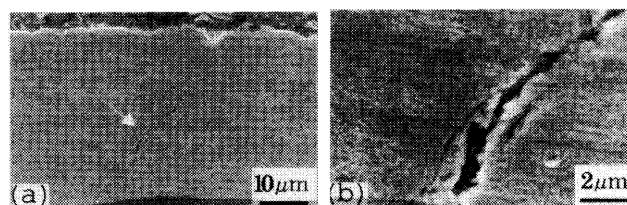


Fig.6 Example of cross section observation in fish-eye fatigue crack initiation site.(b) Higher magnification of portion showed arrow in (a).

た。図6(b)は(a)の矢印で示した部分の拡大写真である。き裂経路は凹凸を示しており、おそらく主破面に認められたGA破面を呈しているものと思われる。今後起点部直下の断面観察事例を積み上げることで、GAの形成機構解明に対して貢献できると考えている。回転曲げによる1億回を越える超長寿命領域の起点部のフラクトグラフィ的特長として破面の干渉によるラブマークも観察している。

4 結論 省略

[参考文献] 1) 日本金属学会強度委員会編, “金属材料の強度と破壊”, 383(1964), 丸善. 2) 渡辺十郎, 日本金属学会報, 1, 129(1962). 3) 横堀武夫, “材料強度学第2版”, 282(1974), 岩波. 4) S. Suresh, “Fatigue of Materials”, 119(1991), Cambridge. 5) 村上敬宜, “金属疲労微小欠陥と介在物の影響”, (1993), 養賢堂. 6) 江村秀樹, 浅見克敏, 機論A, 55, 45(1989). (1999). 7) 塩澤和章, 魯 連涛, 材料, 48, 1095(1999). 8) 森 要, 他2名, 材料学会第48期学術講演会論文集, 1(1999). 以下省略