

437 平面曲げ繰返し荷重下における高強度鋼の内部き裂発生挙動

Subsurface crack initiation of high strength steel under cyclic plane bending

○正 井藤賀 久岳 (中日本自動車短大)

正 戸梶 恵郎 (岐阜大工)

正 中島 正貴 (豊田高専)

正 高 行男 (中日本自動車短大)

Hisatake ITOGA, Nakanihon Automotive College, Sakahogi-cho, Kamo-gun, Gifu

Keiro TOKAJI, Gifu University

Masaki NAKAJIMA, Toyota College of Technology

Haeng-Nam KO, Nakanihon Automotive College

Key Words: Fatigue, Plane bending, High strength steel, Subsurface crack initiation,

1. 結 言

高強度鋼の破壊形態は高応力・短寿命域では表面起点型破壊、低応力・長寿命域では内部起点型破壊となり、これに起因して $S-N$ 曲線は 2 段に折れ曲がることが知られている。しかし、内部起点型破壊については未だ不明な点が多く残されている。特に、介在物からのき裂発生や内部のき裂進展挙動は、外部から直接観察が行えないため正確に理解されていない。

ところで、これまで高強度鋼の内部破壊に関する研究は多く行われているが、そのほとんどが回転曲げ荷重下、または軸荷重下の結果である。これらの荷重下では内部き裂発生・進展挙動を直接観察することは困難である。前者は応力勾配の存在のため表面から比較的浅い位置でき裂が発生するが、試験片が回転するため検出手段を講じ得ない。一方後者では、応力勾配が存在しないため、深部でき裂が発生することがあり、表面からの検出手段は意味をなさないことがあり得る。これに対して平面曲げ荷重下では、試験片が回転せず、応力勾配が存在し、かつき裂発生箇所が限定されるので、適切な手法を考慮することにより直接内部き裂発生・進展挙動を観察できることが考えられる。

本研究の最終的な目的は、内部き裂発生・進展挙動を直接観察により把握することである。本報ではそれに先立って、平面曲げ荷重下の内部起点型破壊挙動を把握するために、高強度鋼 SNCM439 を用いて室温大気中において疲労試験を行い、回転曲げ荷重下の結果と比較、検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

用いた材料は高強度鋼 SNCM439 で、その化学成分(wt.%) は C 0.38, Si 0.28, Mn 0.74, P 0.019, S 0.015, Cu 0.15, Ni 1.8, Cr 0.79, Mo 0.16 である。納入材に焼入れ (880℃・60 分保持後油冷)、焼戻し (200℃・60 分保持後水冷) の熱処理を施した。熱処理後の機械的性質は、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$: 1494MPa, 引張強さ σ_B : 1956MPa, ビッカース硬さ HV: 612 である。熱処理後、最小断面部直径 $\phi=6.0$ mm の砂時計型の試験片形状に機械加工した。その応力集中係数は $\alpha=1.04$ である。機械加工後、最小断面部周辺をエメリー紙で #2000 まで順次研磨を行ったのち試験に供した。

2.2 実験方法

疲労試験には共振型曲げ・ねじり疲労試験機 (繰返し速度 f : 33Hz) を用いて、室温大気中において両振り ($R=-1$) で実験を行った。砂時計型試験片を用いることにより、最大応力が作用する箇所は二箇所限定できるため、内部き裂の発生する領域もその近傍のみとなり、発生箇所の特定が容易であると考えられる。

実験後、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて破面様相を

詳細に観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労強度特性

平面曲げ荷重下の $S-N$ 曲線を図 1 に示す。なお図には比較のため、ほぼ同一材料を用いた片持ち回転曲げ荷重下の結果 (最小断面部直径 $\phi=3.5$ mm) も併記した。図に示すように、平面曲げ荷重下では破面観察の結果、高応力域においても内部起点型破壊が生じており、回転曲げ荷重下で観察されるような明瞭な 2 段折れ曲がり $S-N$ 曲線とはならなかった。回転曲げ荷重下では、最小断面部の表面全周がき裂発生箇所になる可能性があるのに対して、平面曲げ荷重下では、最小断面部の最大応力が作用している箇所付近のみが対象となる。そのため平面曲げ荷重下では、高応力域

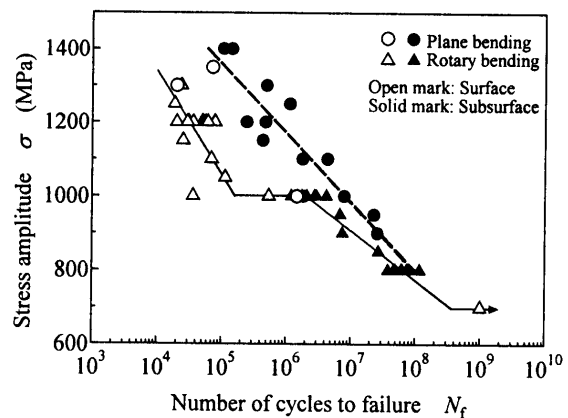
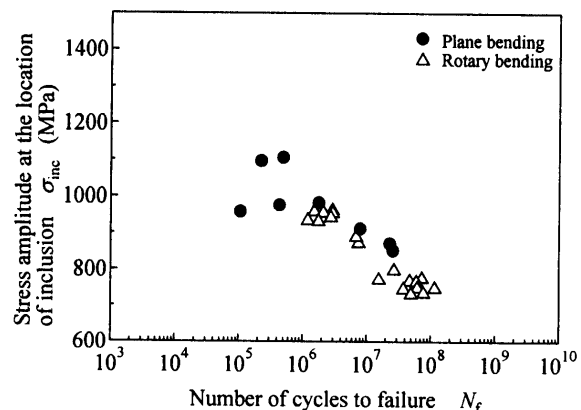
Fig. 1 $S-N$ diagram.

Fig. 2 Subsurface fatigue strength characterized in terms of stress amplitude at the location of inclusion.

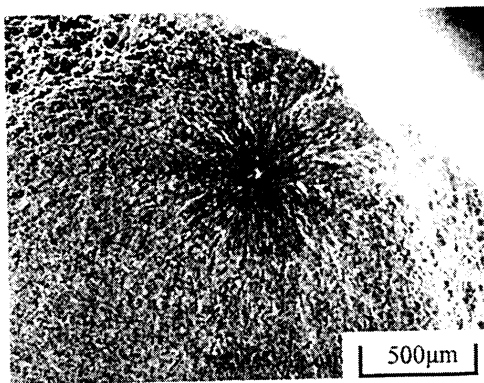


Fig. 3 SEM micrograph showing fish-eye ($\sigma = 1400 \text{ MPa}$, $N_f = 1.07 \times 10^5$).

においても試験片表面からのき裂発生が抑制され、内部起点型破壊が生じたと考えられる。

図 1 から明らかなように、回転曲げ荷重下の内部起点型破壊の結果に比べて、平面曲げ荷重下のほうが長寿命である。これは後述するように、き裂が発生した介在物の深さが、回転曲げ荷重下よりも平面曲げ荷重下のほうが深いためであると考えられる。両荷重下において表面の応力が等しければ、応力勾配のため破壊起点となった介在物の位置での応力は平面曲げ疲労試験のほうが低応力となる。したがって、表面の応力で表した図 1 では疲労寿命に差が生じたと考えられる。

そこで応力勾配を考慮して、介在物の位置での応力と疲労寿命の関係を図 2 に示す。図から明らかなように、両荷重下の疲労寿命はほぼ一致する。すなわち、荷重の種類や試験片寸法に関係なく、破壊起点となった介在物に作用する応力によって疲労寿命が決まることがわかる。

3.2 破面観察

内部起点型破壊の破面および介在物の SEM 写真を図 3 に示す。内部起点型破壊のすべての破面には fish-eye が確認された。平面曲げ荷重下で観察された fish-eye の特徴は、回転曲げ荷重下で生じたそれとほぼ同様の様相であった。すなわち、fish-eye はほぼ円形で試験片表面に内接しており、fish-eye の中心付近には破壊起点と考えられる介在物が存在していた。また破壊起点となった介在物の様相も、回転曲げ荷重下のものと顕著な差異は認められなかった。なお介在物の位置は、最大応力が作用する箇所近傍であった。

3.3 内部起点型破壊の定量的検討

破壊起点となった介在物について検討するために、介在物の大きさ $\sqrt{\text{area}}$ と試験片半径 r に対する最大応力箇所から介在物までの深さの比 d_{inc}/r の関係を図 4 に示す。なお、回転曲げ疲労試験の場合、介在物の深さは試験片表面からの最短距離とした。 d_{inc}/r はその箇所での応力勾配による応力の低下率でもある。すなわち、試験片直径に関係なく、その箇所に作用している応力が同等であることを表している。介在物の大きさ $\sqrt{\text{area}}$ は、平面曲げの場合若干大きいものが含まれるが、両荷重下ともほぼ同程度である。これは両試験にほぼ同一の材料が用いられているため、介在物の大きさやその分布に差異がないためと考えられる。また、回転曲げ荷重下では $\sqrt{\text{area}}$ に関係なく、介在物までの深さの比 d_{inc}/r は $0.031 \sim 0.085$ でほぼ一定である。これに対して、平面曲げ荷重下では d_{inc}/r は $0.054 \sim 0.316$ と回転曲げ荷重下と比べて非常に大きいものも含まれている。これは平面曲げ荷重下では、深い位置に大きな介在物が存在したため

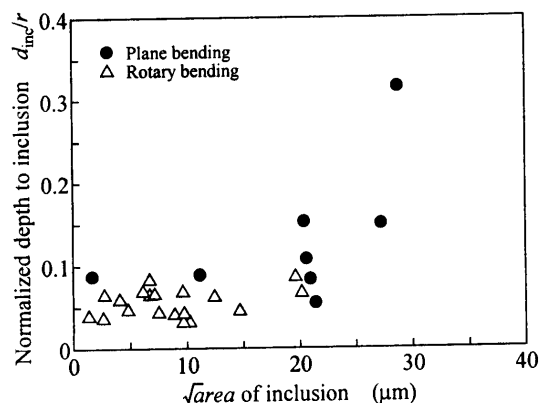


Fig. 4 Relationship between normalized depth to inclusion and inclusion size.

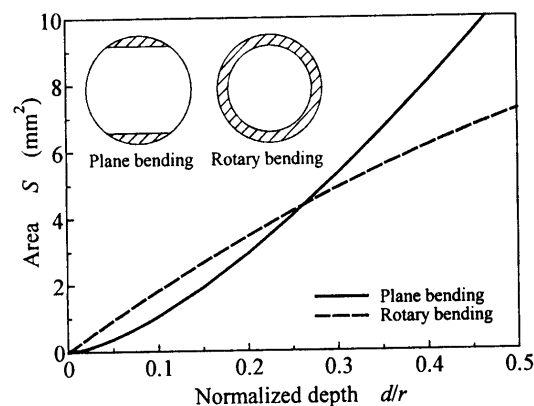


Fig. 5 Relationship between area and normalized depth.

あると考えられる。すなわち、深い位置では応力勾配によりそこに存在する介在物に作用する応力は表面に比べて低下するが、表面層に存在する介在物より大きなものがあれば、破壊起点となる可能性があるためである。

さらに、平面曲げと回転曲げ荷重下の d_{inc}/r の相違について検討するために、両試験片の表面からの深さ d/r の増加に伴う面積 S (図中の斜線部) の変化を図 5 に示す。図から明らかなように、平面曲げ疲労試験片の直径 ($\phi=6\text{mm}$) に比べて回転曲げ疲労試験片 ($\phi=3.5\text{mm}$) のほうが小さいにもかかわらず、 $d/r > 0.27$ では回転曲げ疲労試験片の面積のほうが大きい。平面曲げ荷重下では $d_{\text{inc}}/r < 0.054$ が破壊起点とならなかったのは、 $d/r=0.054$ のとき $S=0.4\text{mm}^2$ と非常に小さいので、そこに破壊起点となりうる介在物の含まれる確率が小さいためであると考えられる。ちなみに、回転曲げの場合、最も試験片表面に近い $d/r=0.031$ のとき $S=0.6\text{mm}^2$ である。一方回転曲げ荷重下で $d_{\text{inc}}/r > 0.085$ において破壊起点とならなかったのは、内部起点型破壊を生じる応力が 1000MPa 以下と小さいので、表面から深い位置ではそこに作用する応力がさらに小さくなり、き裂発生に至らなかったためであると考えられる。

4. 結 言

本報では、高強度鋼 SNCM439 について平面曲げ疲労試験を行った。その結果、回転曲げ荷重下の結果と異なり、全応力域で内部起点型破壊が生ずること、また介在物の位置の応力を用いると両荷重下の結果がほぼ一致することなどを明らかにした。

(参考文献省略)