Paper
論説

切欠き材のねじり疲れ特性に及ぼす 高周波焼入深さの影響

松村康志*, 紅林 豊*

Effect of Induction-Hardened Depth on Torsional Fatigue Strength of Notched Specimens

Yasushi Matsumura and Yutaka Kurebayashi

Synopsis

The effect of induction-hardened depth on torsional fatigue strength of notched specimens were investigated. The results are as follows.

(1) Induction-hardened specimens shows the best torsional fatigue strength when the effective case depth / radius ratio is about 0.5.

(2) In the case of shallow case depth, the cracks initiate at the hardened / unhardened boundary. On the other hand, the fracture of deeply hardened specimen originates from the surface.

1. 緒 言

自動車の動力伝達駆動系部品であるシャフト類の多くは高周波焼入れを施して実用に供されているが、近年、小型軽量化や部品の統合化を狙った高強度化（ねじり疲労強度）のニーズが高くなりつつある。

高周波焼入材の最適疲労強度は平滑材では硬化層比0.5程度、切欠き材では硬化層比0.3程度で得られると報告されている¹⁾。また、さらに良好な疲労強度を得るためには高硬度の硬化層の性質が重要であると報告されている²⁾。このように高周波焼入材の疲労特性についての研究は従来から多く行われており、主に曲げ応力に対する疲労強度と金属組織、硬さ、硬化層深さ、残留応力、切欠きなどとの関係が明らかにされている^{3)~6)}。

一方、実用的にはシャフト類などのようにねじり負荷を受ける部材に高周波焼入れを適用するケースは多く、負荷形式の違いから、曲げとは異なった疲労挙動を示す可能性があるが、ねじり負荷を受ける場合についての解析例は平滑材についてわずかに報告されているのみであり、高周波焼入れされた切欠き材の疲労特性は十分には明らかにされていない状況である^{7)~9)}。

そこで本報では、シャフト類などの実体部を想定し、切欠き材のねじり疲れ特性に及ぼす高周波焼入深さの影響を検討したので報告する。

1995年10月31日受付

* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development, Daido Steel Co., Ltd.)

Table 1 Chemical composition of specimen.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	s-Al	s-B
0.41	0.07	0.70	0.017	0.022	0.07	0.04	0.12	0.017	0.0015

Fig. 1. Geometry of torsional fatigue test specimen.

2. 実験方法

供試材の化学成分をTable 1に示す。本研究では、高周波焼入れで安定した硬化層深さが得られるように焼入れ性の高いボロン鋼を用いた。このボロン鋼のピレットを熱間鍛造により径40mmの丸棒を作製した後、1,123Kで3.6ks保持の焼ならし処理を実施した。さらに機械加工によりFig. 1に示すような環状切欠きを有するねじり疲労試験片を作製し、ねじり疲労試験を行った。なお、応力集中係数(αk)はNeuberの三角則より求めた。

ねじり試験片は機械加工後に高周波焼入れを行ったが、高周波焼入れ条件は周波数10kHz、送り速度6.3~12.5mm/sec、水冷、最高加熱温度1,000℃とし、硬化層比(t/R)が0.3、0.5、0.7、1.0の4水準となるように送り速度を調整した。ここでの硬化層比(t/R)は、切欠き底半径(R)に対する表層から400HVになるまでの距離(有効硬化層深さt)の比である。

ねじり疲労試験は、容量15kNmの油圧式ねじり疲労試験機を用いて、完全両振り、周波数2Hzで破断まで行った。負荷トルク3水準で試験を行い、破断繰返し数 2×10^5 回に対応する公称せん断応力をねじり疲労強度とした。

Fig. 2. Hardness distribution of specimens.

3. 実験結果および考察

3.1 組織および硬さ

Fig. 2に試験片切欠き部縦断面の半径方向における硬さ分布を示す。いずれのねじり疲労試験片においてもt/Rは0.3、0.5、0.7、1.0と狙い通りの硬化層が得られており、試験片の表層硬さはいずれも680HV程度の値であった。一方、心部硬さは硬化層深さが深くなるに従って上昇する傾向にあり、t/Rが0.3では180HVを示すのに対し、t/Rが0.7では280HVと100HV程度の硬さ上昇が認められる。

また、Fig. 3にαkが1.42の試験片について、各硬化層比における光学顕微鏡組織を示す。いずれの試験片も表層組織はマルテンサイト組織を呈している。一方、心部組織はt/Rが0.3ではフェライト+パーライト、t/Rが0.5および0.7では熱影響を受けたフェライト+パーライト、t/Rが1.0ではマルテンサイト組織を呈している。

3.2 破壊形態

ねじり疲労における破壊形態は、疲労現象を検討する上で重要な因子と考えられるため、ねじり疲労試験後の破面についての調査を行った。破壊形態は、いずれの応力集中係数においても硬化層の浅いt/Rが0.3の場合には内部起点破壊、t/Rが0.5以上の硬化層の深い領域では表面起点破壊を示していることを確認した。t/Rが0.3では、焼き境近傍にき裂が発生し、軸方向へき裂が伝播した後、主応力方向である45°に遷移し破断に至る。一方、t/Rが0.5以上では切欠き底の表面を起点とし、円周方向にき裂が伝播した後、45°方向に遷移し破断に至る。

Fig. 3. Microstructure of test specimens.

Fig. 4. Relationship between stress concentration factor and shear fatigue crack length.

き裂の伝播挙動を見ると、 t/R が0.5以上においてFig. 4に示すように、応力集中係数の増加にともない切欠き底のせん断応力方向のき裂長さが長くなっていることがわかる。これは、応力集中係数が高いほど切欠き底半径が小さくなるため、き裂伝播の方向が円周方向に制約されるためと考えられる。 t/R が0.3では応力集中係数が変化しても初期に発生する内部の軸方向き裂にはほとんど差はみられない。これは、 t/R が0.3では内部起点であり、切欠き形状の影響を受けないためと考えられる。

Fig. 5. Relationship between effective case depth and residual stress.

3.3 硬化層比と残留応力の関係

Fig. 5に硬化層比と残留応力の関係を示す。残留応力の測定はねじり疲労試験前にX線応力測定装置によって行った。測定位置は、試験片平滑部の軸方向および円周方向における応力値を測定した。従来から言われているように硬化層が浅いほど、圧縮残留応力は軸方向および円周方向ともに大きい値を示している⁹⁾。また、 t/R が1.0においても圧縮残留応力が存在している。特に、円周方向ではかなり大きな圧縮残留応力が存在している。

Fig. 6. Relationship between effective case depth and fatigue strength.

Fig. 7. Relationship between stress concentration factor and fatigue strength.

3.4 ねじり疲労強度に及ぼす硬化層深さの影響

Fig. 6 に応力集中係数をパラメータとしてねじり疲労強度と硬化層深さの関係を示す。いずれの応力集中係数においても t/R が 0.3 では内部起点、 t/R が 0.5 以上では表面起点になっている。また、ねじり疲労強度は、内部起点から表面起点に移移する t/R が 0.5 において極大を示している。しかし、 t/R が 0.5 を越えると逆にねじり疲労強度は低下する傾向を示している。

破損起点が表面部である t/R が 0.5 以上の領域では、硬化層深さが増加するのにもなって圧縮残留応力の絶対値が低下するため、疲労強度も低下したと考えることができる。一方、硬化層の浅い t/R が 0.3 では圧縮残留応力の絶対値は高いものの残留応力の作用しない内部を起点とするため、疲労強度は向上しなかったものと考えることができる。

Fig. 8. Schematic illustration of torsional fatigue fracture for smooth and notched specimens.

3.5 ねじり疲労強度に及ぼす応力集中係数の影響

Fig. 7 に硬化層比をパラメータとしてねじり疲労強度と応力集中係数の関係を示す。 t/R が 0.3 では、応力集中係数の増加にともない、わずかにねじり疲労強度も上昇している。これは、応力集中係数の増加にともない、切欠き底表面の応力値は上昇するが、逆に内部での応力値が低下するためである。

一方、 t/R が 0.5 以上では αk が 1.42 においてねじり疲労強度は最大を示すが、応力集中係数の増加にともないねじり疲労強度は低下し、 αk が 2.01 以上では、ほぼ一定値を示している。

従来の報告では切欠きを有する高周波焼入材においても回転曲げ疲労試験で停留き裂が観察され、停留き裂の伝播限界応力で評価すると、分岐点が存在し、ある応力集中係数以上では疲労限度が一定値となることが確認されている¹¹⁾。今回のねじり疲労試験では、疲労限度で評価していないが、時間疲労強度においても疲労限度で評価した場合と同様な傾向が観察されたといえる。

3.6 高周波焼入材の疲労強度モデル

ねじり疲労試験の結果から、高周波焼入材の疲労起点は硬化層深さの影響を受けることが明らかになったが、さらに、この原因についての検討を行った。

高周波焼入材の疲労強度モデルを Fig. 8 に示す¹¹⁾。部材にねじりトルクが負荷がされた場合、平滑材においては図中 A で示される応力が作用する。一方、切欠き材では B のように双曲線型の応力分布となり、表面部で応力

Fig. 9. Fracture origin of smooth and notched specimens.

集中係数に応じた最大応力が作用することになる。また、内部の応力は急速に減少し、応力集中係数によっては平滑材よりも低い応力となる場合がある。

鋼の疲労強度は硬さとはほぼ直線関係を有することから、硬さから部材各位置における強度を求めることができる。高周波焼入れ材のように表面から内部に向けて硬さ分布を有する場合には、疲労強度も硬さ分布と同様の分布曲線となり、図中の $\tau_b(x)$ で示されるような強度が与えられる。

さらに、残留応力が疲労強度に影響を与えることから、この影響を考慮する必要がある。高周波焼入れ時の残留応力分布は $\sigma_r(x)$ として与えられ、特に、表面近傍では疲労強度の向上に寄与していると考えられる。

以上から、高周波焼入れ材の疲労強度分布 $\tau_m(x)$ は、硬さ分布から決定される $\tau_b(x)$ と残留応力 $\sigma_r(x)$ から決定される $\tau_r(x)$ によって求めることができる。

次に、本モデルによって疲労破壊の発生有無を考えると、部材の強度分布 $\tau_m(x)$ と応力分布 $\tau(x)$ の大小関係によって決定されることが分かる。

$\tau_m(x)$ が $\tau(x)$ より上側にある場合には破壊は生じない

が、 $\tau_m(x)$ と $\tau(x)$ に交点がある場合には、交点の位置を疲労起点として破壊が生ずることになる。

ここで、同一の硬さ分布を有する平滑材と切欠き材 ($a/k=201$) について、起点および疲労強度を比較すると Fig. 9 (a) に示すように、硬化層深さが浅い場合は両材ともに内部に交点を有しており、内部起点で破壊することが分かる。これに対して、(b) のように硬化層深さが深い場合は、平滑材の交点が内部なのに対して切欠き材では表面部に交点が遷移していることが分かる。このように、同一の硬化層であっても切欠き形状に応じて起点位置は変化し、平滑材では比較的深いところまで内部起点となるが、切欠き材では応力勾配、表面残留応力などの影響のために平滑材に比べて硬化層深さの浅い領域で表面起点へ変化すると考えられる。

3.7 疲労強度予測

先述の疲労強度モデルに基づいて、本研究で利用した切欠き試験片の応力分布と疲労強度分布を求めた。ここで、応力分布は有限要素法によって計算したが、 a/k が 2.01 以上の場合には切欠き底近傍は塑性域に達しているため、弾塑性解析によって試験片に作用する応力分布を計算した。

部材の疲労強度の分布曲線は式(1)を用いて、硬さから 2×10^5 回における疲労強度を算出した¹²⁾。

$$\tau_w = 1.35317HV - 28.6102 \cdots \cdots (1)$$

[τ_w : 2×10^5 回ねじり疲労強度(MPa), HV: ビッカース硬さ(HV)]

残留応力の効果については、従来の回転曲げなどの場合には疲れ強さを向上させると報告されているが¹¹⁾⁻¹³⁾、ねじりの場合、き裂がせん断応力方向に発生しているため、疲労強度に及ぼす残留応力の効果はほとんどないという報告もある⁹⁾。そこで、今回は、負荷形態がねじりであるために残留応力の効果はほとんどないものとして試験片の有する疲労強度分布には残留応力分を考慮せずに算出した。

Fig. 10, 11 に応力分布と疲労強度分布の計算結果を示す。Fig. 10 は公称応力 650 MPa で r/R が 0.3 の場合であるが、 a/k が 1.42 の場合には強度曲線と応力曲線の交点は 4.5 mm 深さ程度の位置に存在し内部起点を生ずることが分かる。一方、 a/k が 2.01 以上の場合には表面と内部の両方に交点が存在し、表面および内部のいずれも起点となることがわかる。

Fig. 10 Relationship between applied stress and fatigue strength ($t/R=0.3$).

Fig. 11. Relationship between applied stress and fatigue strength ($t/R=0.5$).

また、 t/R が0.5の場合にはFig.11に示したように、試験範囲の応力集中係数では表面起点となることが計算された。

Fig. 12 に疲労強度の実測値と予測値を示す。尚、Fig.10,11で示した応力分布と疲れ強度分布の関係より計算した。予測値は t/R が0.3の場合を見ると、予測値と実測値はほぼ一致しており、比較的に高精度で強度予測することができた。一方、 t/R が0.5の場合を見ると、応力集中係数が大きくなるにしたがって実測値と推定値の差異が増大する傾向にあり、十分な精度を得ることはできなかった。

ここで、 t/R が0.3の試験片について、Fig. 13 に試験前と試験後の切欠き表面部の観察結果を示す。 t/R が0.3ではいずれの応力集中係数においても最終破壊は内部起点であるが、 α が2.01以上の試験片では切欠き底にき裂が確認された。また、これらのき裂は破断寿命の20%以下の繰返し数において発生していることを確認した。応力分布と疲労強度分布においても見られるように、 t/R が0.3で α が2.01以上の試験片では、切欠き底の表面および内部の2ヶ所からき裂が発生するが、切欠き底に

Fig. 12. Result of calculated fatigue strength.

発生したき裂は最終破壊に至らず、停留または遅延現象を生じたものと考えられる。また、内部から発生したき裂は定常的なき裂進展の後に破断に至ったと推定される。このように、切欠き底でき裂が発生しても、内部における応力分布はさほど変化しないために、破断起点である内部において応力分布と疲労強度分布の関係より求めたねじり疲労強度予測値は実験値と良く一致したと考えられる。

また、表面起点についても、同様に切欠き底の観察を行った結果、破断寿命の20%以下の繰返し数において、切欠き底にき裂は観察された。今回の試験結果は、従来の回転曲げなどで停留き裂が観察され、疲労限度が一定値となることと類似した傾向を示した。切欠き材の切欠き底近傍のき裂伝播は高応力下では弾塑性効果が支配的となり、低応力下では主にき裂の開口効果によって支配されるといわれており、今回のように応力集中係数が高い場合、塑性域の存在によってき裂伝播挙動が遅延する傾向を示したと考えられる。

本研究のねじりではせん断応力方向き裂が発生し主応力方向に遷移し破断に至っているが、この時の切欠き底のせん断応力方向のき裂はFig. 4 に示したように応力集中係数の増加にともない長くなっている。これは、応力集中係数の増加にともないき裂がせん断応力方向から主応力方向へ遷移しにくい状態にあると考えられ、このことは回転曲げでの切欠き底に生じる塑性変形に起因する弾塑性的な加速が切欠きから離れるに従って低下し、その結果、き裂の伝播速度が低下するという効果と同じと考えられる。一方、高周波焼入材の疲労き裂進展挙動およびき裂開口挙動についての報告もされているが⁴⁾、今後さらに詳細調査が必要である。

今回の表面起点の試験片の疲労強度予測では、以上の影響を考慮すると、予測値はき裂発生強度に対応してい

Fig. 13. Observation of cracks at notch roots.

200 μ m

ると考えられるが、環状切欠きを有する部材のねじりの場合において破断疲労強度を予測するためには、せん断方向き裂が伝播する過程、せん断応力方向き裂が主応力方向に遷移する過程およびき裂が主応力方向に伝播する過程の三つの過程をさらに考慮することが必要である。

4. 結 言

切欠き材のねじり疲れ特性に及ぼす高周波焼入深さの影響について調査した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 高周波焼入れした切欠き材の疲労強度は、いずれの応力集中係数においても硬化層比が約0.5で最高となる。これより小さい硬化層比の場合には内部起点、大きい場合には表面起点となる。
- (2) 応力集中係数が2.01以上で硬化層比0.3の試験片では、最終破損起点は内部であるが、切欠き底表面において停留き裂が観察された。

(文 献)

- 1) 古川 徹、小沼静代、鈴木賢治、若林 豊：材料，**37**(1988)，178
- 2) 小沼静代、古川 徹：材料，**38**(1989)，1128
- 3) 中村 宏：高周波焼入と疲労強度，(1963)，[日刊工業新聞社]
- 4) 材料強度部門委員会，強度設計委員会：材料，**23**(1973)，50
- 5) 林 健吉、夏目喜孝：材料，**18**(1969)，1100
- 6) 夏目喜孝：材料，**20**(1971)，1307
- 7) Gregory A. Fett：METAL PROGRESS，(1985)，49
- 8) 内藤武志、花井圭介、植田秀夫、菊池雅男：材料，**32**(1982)，64
- 9) 吉武博之：材料，**25**(1975)，34
- 10) 西谷弘信：疲労強度学，(1985)，[オーム社]
- 11) 児玉貞喜、丹下 彰：機械設計，**13**(1982)，81
- 12) 金属材料技術研究所：疲労データシート資料，(1989)
- 13) 大路清嗣、小倉敬二、大久保好二：機械，**42**(1976)，643
- 14) 菅田 淳、城野政弘、吉村 哲：材料，**43**(1993)，1475