

ピーニングによる構造用材料の表面欠陥無害化技術の開発

横浜国立大学大学院工学研究院
准教授 高橋宏治
(平成 19 年度奨励研究助成 AF-2007037)

キーワード：ショットピーニング，表面欠陥の無害化，疲労強度向上，圧縮残留応力，応力拡大係数，停留き裂

1. 研究の目的と背景

省エネルギーおよび環境問題の観点から，自動車用部品の軽量化が求められている．そのために，これらの部品の疲労強度向上に対する要求が年々高まってきている．一般的には，疲労強度向上のためには高硬化が有効である．しかし，高硬化により欠陥感受性が増加することが知られている．自動車用部品等においては，非金属介在物のほかに，製造工程等に生じる表面欠陥が存在する可能性がある．表面欠陥を有する材料にショットピーニングを施すことにより，疲労強度の向上，さらには表面欠陥を無害化することができれば，部材の信頼性の大幅な向上および部材の低コスト化を達成できると考えられる．

近年，ショットピーニングを施すことにより，微小ドリル穴を有する鋼の疲労強度を向上できるとともに，表面欠陥を無害化できることが明らかにされている^{1), 2)}．また，レーザーピーニングによる疲労き裂進展遅延現象が報告されている³⁾．しかし，き裂状の表面欠陥を有する材料にショットピーニングを行った後，疲労強度の評価を行った例は極めて少ない⁴⁾．

そこで，本研究では，表面に種々の寸法の半円スリットを導入した後にショットピーニングを施した鋼を用いて，平面曲げ疲労試験を行った．これにより，き裂状表面欠陥を有する鋼の疲労強度向上に対するショットピーニングの効果を明らかにした．さらに，ショットピーニングによって，疲労強度上無害化できるき裂状表面欠陥の寸法を破壊力学的に評価した．

2. 実験方法

2-1 供試材

供試材として，ばね用のマンガンクロム鋼 SUP9A を用いた．供試材の化学成分を表 1 に示す．試験片の形状を図 1 に示す．き裂状の表面欠陥を導入することを目的として，図 2 に示すような半円スリットを放電加工により導入した．半円スリットの深さ a は 0.1，0.2 および 0.3 mm であり，試験片の最小断面部の表面に，長手方向に対して垂直に導入されている．なお，スリット幅 w は約 0.03 mm であり十分に小さい．その後，焼入れおよび焼戻しを行った．熱処理後の硬さは 470HV である．続いて，無欠陥材および半円スリット材に対して次節で述べる条件でショットピーニングを施した．

表 1 SUP9A の化学成分 (wt.%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SUP9A	0.57	0.25	0.86	0.022	0.019	0.2	0.11	0.82

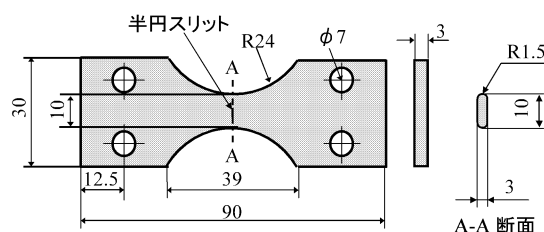


図 1 試験片の形状と寸法

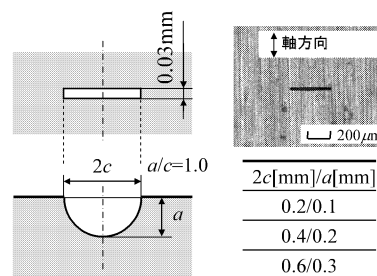


図 2 半円スリットの形状と寸法

2-2 ショットピーニング条件および残留応力分布

表 2 にショットピーニング条件を示す．ショットピーニング用の装置として，直圧方式の空気式ピーニング装置を使用した．投射材として，粒径約 $\phi 0.67$ mm，硬さ 600HV のコンディションド・カットワイヤを用いた．

本研究では，試験片に予引張応力を負荷した状態でショットピーニングを行なう応力ショットピーニングも実施した．予引張応力は 4 点曲げにより負荷した．試験片にひずみゲージを貼付し，4 点曲げ治具を用いて表面の予引張応力を 1250 MPa とした状態でショットピーニングを行った．以下では，通常のショットピーニングを SP，応力ショットピーニングを SSP と呼ぶ．

2-3 残留応力分布

SP および SSP により得られた残留応力分布を図 3 に示す．図 3 より，SSP により導入された圧縮残留応力の値は，SP の場合よりも大きくて深いことがわかる．この理由は，予応力を除荷する際に弾性変形で回復する圧縮応力が負荷されたためである．

2-4 実験方法

上記の試験片を用いて，室温・大気中にて平面曲げ疲

疲労試験を行なった。負荷条件は、応力比 $R=0$ 、繰返し周波数 20 Hz、応力波形は正弦波である。また、応力は、試験片の最小断面部の表面における公称応力である。 10^7 回の繰返しに耐えた最大の応力振幅として疲労限度を定義した。試験片の破面観察には、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた。

表2 ショットピーニング条件

ピーニング装置	直圧式
圧力	0.62MPa
ショット材の直径	0.67mm
ショット材の硬さ	600HV
ショット時間(片側)	40sec
ショット距離	100mm
カバレッジ	300%
アークハイト	0.50mm(A)

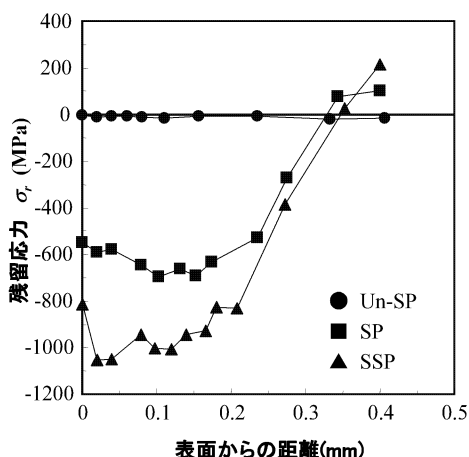


図3 残留応力分布

3. 実験結果および考察

3-1 疲労試験結果

代表例として、半円スリット材($a = 0.3 \text{ mm}$)のS-N線図を、図4に示す。図4において、●印はSP無し材を、■印はSP材を、▲印はSSP材を示している。図4には、各試験片の疲労限度も併記している。欠陥無し材および半円スリット材のいずれにおいても、SPおよびSSPを施すことによって疲労限度が大幅に向上した。

図5に、各試験片について、未SP材に対するSP材およびSSP材の疲労限度向上率を示す。未ショット材に対して、SP材では9~157%、SSP材では41~329%疲労限度が向上した。SSPを施した半円スリット材では、極めて高い疲労限度向上率を示した。特に、 $a=0.3\text{mm}$ の半円スリット材にSSPを施した場合には、329%と極めて高い疲労限度向上率を示した。この疲労限度向上の理由に関する考察は3.5節で述べる。

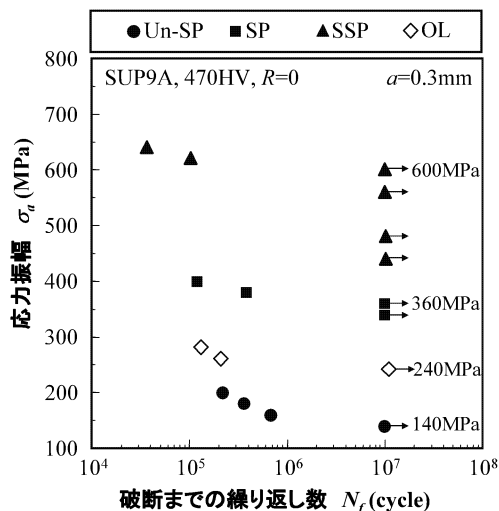


図4 半円スリット材のS-N線図($a=0.3\text{mm}$)

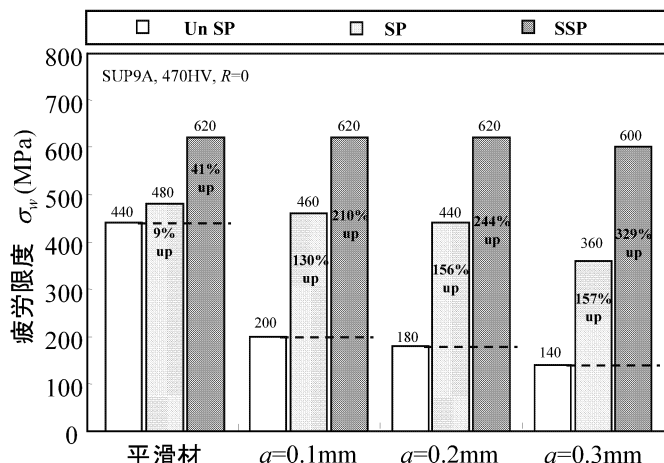


図5 疲労限度向上率の比較

3-2 ショットピーニングによるき裂状表面欠陥の無害化

図6に、Un-SP(未ショット)材、SP材およびSSP材のそれぞれについて、負荷応力振幅 σ_a と半円スリットの深さ a の関係を示す。図6において、黒塗りは破断した試験片を、白抜きは 10^7 回の繰返しにおいて非破断の試験片を示す。非破断の試験片において、最大の応力振幅が疲労限度に相当している。

図6中にアスタリスクを付した試験片は、半円スリット以外から破断したことを示している。SP材およびSSP材では、スリット深さが0.2 mm以下であれば、一例を除き、すべての試験片が半円スリット以外から破断した。したがって、これらの試験片の疲労限度は、SPおよびSSPを施した無欠陥材の疲労限度と等価と考えることができる。すなわち、SPおよびSSPを施すことによって、深さが0.2 mmまでの半円スリットを無害化できることが明らかとなった。

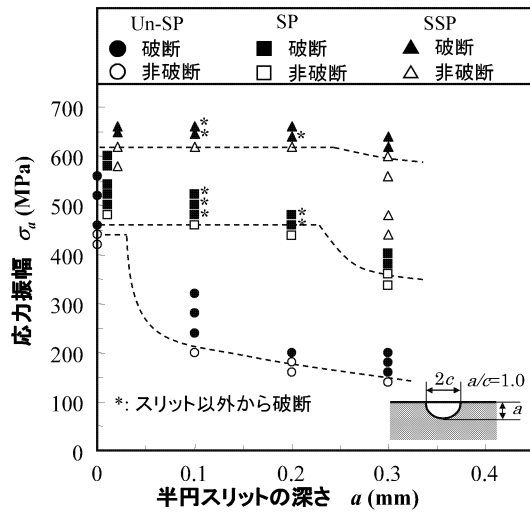


図6 半円スリット深さと応力振幅の関係

点としていた。図7(h)および(i)に示すように、SPおよびSSP後の半円スリットの形状は、ショットが直接接触する表面近傍を除いて、Un-SP材とほとんど変わらないことが分かる。したがって、SPおよびSSPによる半円スリット材の疲労限度向上の要因は、圧縮残留応力によりき裂前縁に作用する応力拡大係数が低下したためと考えられる。

3・4 停留き裂の観察

停留き裂を観察するため、疲労限度における試験片を加熱着色した後、高応力を負荷して破断させた。最大級のもので深さ約0.16mmの停留き裂が観察された。図8に停留き裂の一例を示す。停留き裂は、破面に複数確認されたが、全て半円スリット以外の平滑部を起点として発生していた。この結果から、深さが0.2mmまでの半円スリットを有する試験片に対してショットピーニングを施した場合には、疲労限度は生地組織から発生したき裂の停留条件によって決まることが明らかとなった。

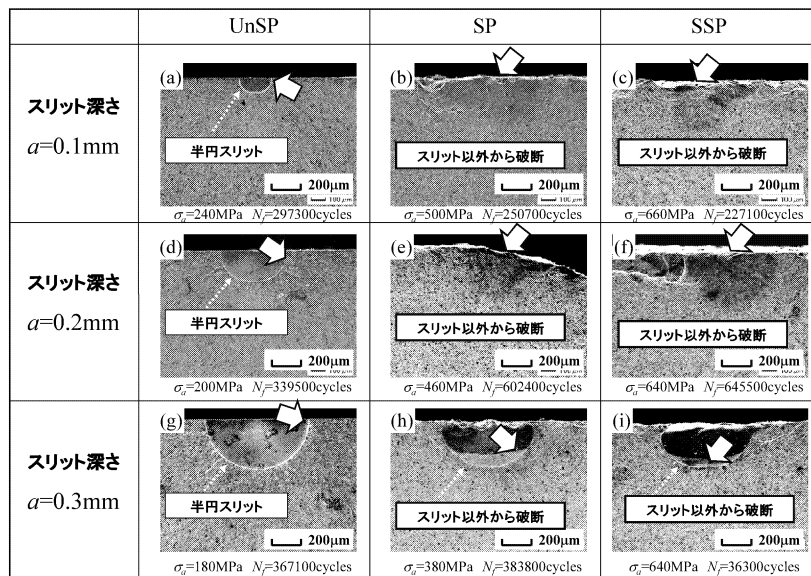


図7 疲労破面のSEM観察結果

3・3 疲労破断面の観察

図7は疲労破面のSEM観察結果を示している。図中の矢印は疲労破壊起点である。 $a=0.2\text{mm}$ 以下の半円スリット材において、Un-SP材では図7(a)および7(d)のように半円スリットを起点として疲労破壊したが、SP材およびSSP材では、図7(b),(c),(e)および(f)のように、半円スリット以外の表面を起点として疲労破壊した。

これに対して、 $a=0.3\text{mm}$ の半円スリット材においては、図7(g),(h)および(i)のように、全ての試験片が半円スリットを起点として疲労破壊した。Un-SP材では、半円スリットの表面を起点としているのに対し、SP材およびSSP材では半円スリットの底および表面よりやや深い所を起

3・5 過大荷重効果による半円スリット材の疲労限度向上

3.1節で述べたように、 $a=0.3\text{mm}$ の半円スリットにSSPを施した場合には、疲労限度向上率は極めて高い値となった。この理由を考察するために、 $a=0.3\text{mm}$ のスリット材に予引張応力1250MPaを負荷した後、ショットピーニングは行わずに平面曲げ疲労試験を行った。疲労試験結果を図4に◇印で示す。図4に示すように、予引張応力を負荷した試験片の疲労限度は240MPaであり、SP材やSSP材に対しては低いものの、Un-SP材の140MPaに比べて、71%向上することがわかった。

以上の結果から、半円スリットを有するSSP材の疲労限度の向上に対しては、(1)ピーニングにより導入された

圧縮残留応力に加え、(2)予引張応力によりスリット先端近傍に導入された局所的な圧縮残留応力が寄与したと判断できる。

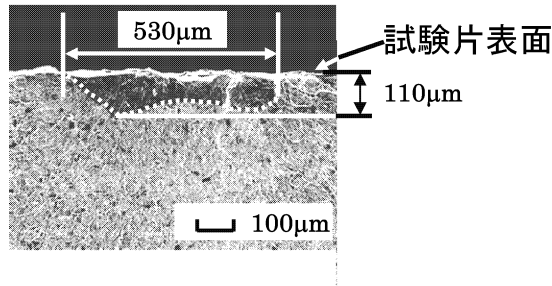


図8 停滞き裂 ($a = 0.1 \text{ mm}$, SP, $\sigma_a = 460 \text{ MPa}$).

3-6 無害化可能な最大欠陥寸法の破壊力学的検討

半円スリットを半円き裂と等価と仮定し、その応力拡大係数に着目することにより、無害化可能な最大欠陥寸法の検討を行った。本研究では、応力拡大係数の正値が疲労き裂伝ばに寄与するとして、以下の式を用いて計算される ΔK_T に着目して破壊力学的検討を行った。

$$\Delta K_T = K_{\max} + K_R \quad (1)$$

ここで、 K_{\max} は最大荷重時の応力拡大係数であり、Raju-Newmanの式⁵⁾を用いて評価した。 K_{\max} を評価する際の負荷応力としては、無欠陥SP材および無欠陥SSP材それぞれの疲労限度に相当する最大負荷応力 σ_{\max} を用いた。一方、 K_R は残留応力による応力拡大係数であり、API-579の簡易解⁶⁾を用いて、図3に示したSPおよびSSP材の残留応力分布を4次多項式近似して評価した。

図9(a)および(b)に、それぞれSP材およびSSP材における半円き裂の ΔK_T とき裂深さ a の関係を示す。 $\Delta K_{T,A}$ および $\Delta K_{T,C}$ は、それぞれ半円き裂の最深点および表面点の ΔK_T に相当している。 ΔK_{th} は、El Haddadらの式⁷⁾を用いて計算した。 ΔK_T と ΔK_{th} の交点から無害化可能な最大欠陥寸法 a_{\max} を推定できる。

図9より、 a_{\max} は、SP材では $a_{\max} = 0.24 \text{ mm}$ 、SSP材

では、 $a_{\max} = 0.27 \text{ mm}$ と推定できる。これは、SPおよびSSPによって $a = 0.2 \text{ mm}$ の表面欠陥が無害化でき、 $a = 0.3 \text{ mm}$ の表面欠陥が無害化に至らなかった実験結果と一致する。よって、SP条件(残留応力分布)が異なっても、無害化可能な最大欠陥寸法を評価することができた。

4. 結言

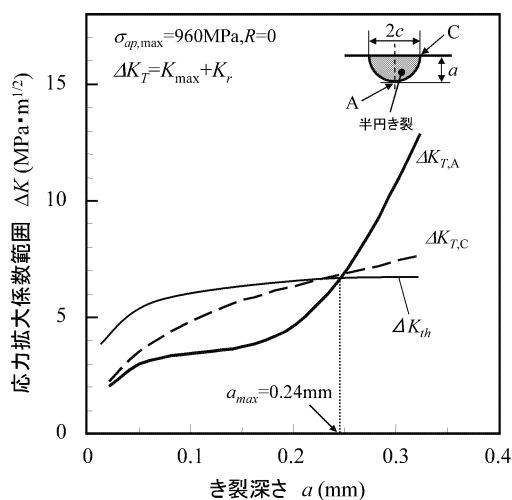
深さが $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ の半円スリットを導入した後にショットピーニング(SP)および応力ショットピーニング(SSP)を行ったばね鋼を用いて、平面曲げ疲労試験を行った。SPおよびSSPを行なうことにより疲労限度は大幅に向上し、深さが 0.2 mm までの半円スリットを無害化できることが明らかとなった。さらに、SPおよびSSPにより無害化可能な最大欠陥寸法を破壊力学的に評価する方法を提案した。

謝辞

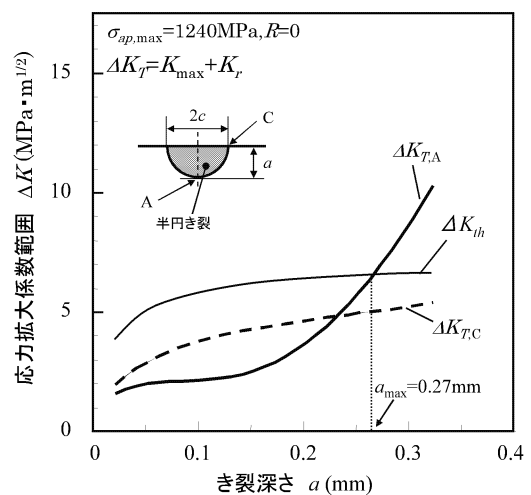
本研究の実施にあたり、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の奨励研究助成を賜りましたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋宏治, 天野利彦, 宮本貴正, 安藤柱, 高橋文雄, 丹下彰, 岡田秀樹, 小野芳樹, ばね論文集, **52**, 9 (2007).
- 2) ばねの許容欠陥寸法に関する研究委員会報告, ばね論文集, **53**, 57 (2008).
- 3) 政木清孝, 越智保雄, 熊谷洋平, 松村隆, 佐野雄二, 内藤英樹, 材料, **55**, 706(2006).
- 4) 高橋文雄, 丹下彰, 安藤柱, ばね論文集, **51**, 9 (2006).
- 5) J.C Newman Jr, I.S. Raju, Eng. Fract. Mech. **15**, 185 (1981).
- 6) API(American Petroleum Institute), RP579, C2.2(2000).
- 7) M.H.El Haddad et.al., Eng. Fract. Mech., **11**, 573 (1979).



(a) SP 材



(b) SSP 材

図9 無害化可能な表面き裂寸法の予測