

欠陥を有する高強度鋼のショットピーニング処理による疲労強度向上

都城工業高等専門学校 助教授 永野茂憲
平成 15 年度奨励研究助成 (A F - 2003023)

キーワード：疲労，ショットピーニング，切欠き

1. 緒言

マルエージング鋼は高強度鋼の中で最も高い強度と靱性を有し、しかも加工性や熱処理が容易であること等の実用上の優れた特性を持つ材料である。しかしこのマルエージング鋼は、耐久限度比（疲労限度 / 引張強さ）が低いので、疲労強度を上げる工夫が求められる。著者らは超強力鋼であるマルエージング鋼にショットピーニングを施すと著しく疲労強度が向上することを報告してきた^{(1) - (3)}。これまでの研究で平滑材の場合では、表面付近の圧縮残留応力の低下が少ない小粒のショット粒でピーニングした場合が最も高い疲労強度を示した。しかし、切欠き材では平滑材に比べ、き裂先端からの初期き裂発生が容易であり、平滑材のように極表面でき裂の進展を押えることは困難であることから、幾分き裂が成長した段階でき裂進展に対する抵抗が大きい方が疲労強度向上に有利と考えられる。

そこで本研究では、深い切欠きを有するマルエージング鋼にショットピーニング処理した場合の疲労強度を調査し、深い切欠き材への適切なショット条件を検討した。疲労試験は回転曲げ疲労試験機を用い、繰返し数 $N = 10^8$ 回の長寿命域まで行った。

2. 材料および実験方法

2.1 供試材料および熱処理

用いた材料は、市販の 18%Ni マルエージング鋼である（表 1）。溶体化処理は、真空中に 1123K で 5.4 k s 保持後、空冷して行った。時効処理には、ソルトバスを用い時効条件としては、亜時効状態である 753K - 48 k s を選定した。この条件を選定したのは、十分高硬度であるとともに、最高レベルの疲労強度が得られ、しかも顕著なショット効果が得られたためである。この時効処理によって得られた機械的性質を表 2 に示す。

図 1 に疲労試験片の形状及び寸法を示す。時効後中央部はペーパー仕上げをした。特に切欠き材の場合には、切欠き先端の形状を 50 倍の投影機で確認し、ペーパーきずを取るため 45 μ m 程度電解研磨した後、ショットピーニング処理を行なった。また疲労試験はショット材と非ショット材の疲労強度の比較をするため、同じ条件で時効した材料を直径で

Table 1 Chemical composition (mass%)

Grade	C	Si	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Fe
300	0.005	0.05	18.72	5.0	8.94	0.92	0.12	Bal

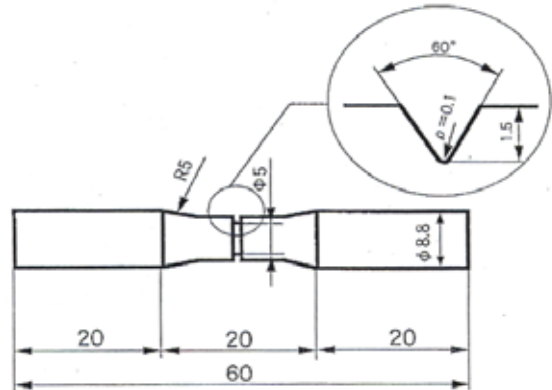


Fig.1 Shape and dimensions of specimen

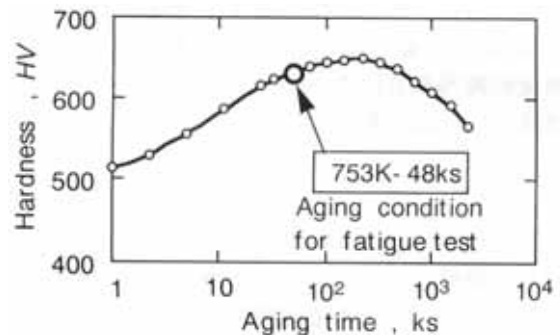


Fig.2 Change in hardness with aging time

Table 2 Mechanical properties.

0.2% Proof strength $\sigma_{0.2}$, MPa	Tensile strength σ_B , MPa	Hardness HV	Elongation δ , %	Reduction of area ϕ , %
2065	2151	634	8.5	47

45 μ m 程度電解研磨した試料についても行った。

2.2 ショットピーニング条件

時効処理の後、疲労試験中央部へショットピーニング処理を施した。表 3 にショットピーニング条件を示す。

ショット粒は、硬さ H700 のショット鋼粒を使用した。投射方式は、空気式とし、圧力 0.3MPa、カバレッジ 300%

Table3 Shot peening treatment condition

Blasting equipment		Air type				
Shot	size, mm	material			Hardness	
		$\phi 0.05, \phi 0.3, \phi 0.6, \phi 1.1, \phi 1.7$	steel			HV=700
Blasting	size	$\phi 0.05$	$\phi 0.3$	$\phi 0.6$	$\phi 1.1$	$\phi 1.7$
	Almen intensity	0.19 mmA	0.23 mmA	0.43 mmA	0.73 mmA	0.345 mmC
	Time, sec	6	6	6	12	21
	Distance	180mm				
	Pressure	0.3MPa				
	Coverage	300%				

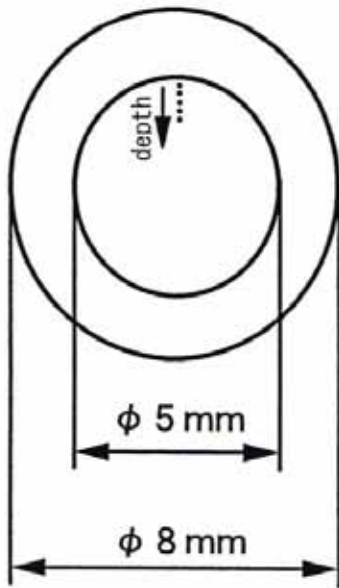


Fig3 Noth root cross section.

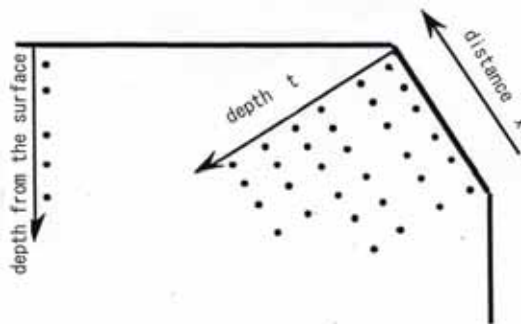


Fig4 Plastic region measurement.

とした。ショット粒径は 0.05, 0.3, 0.6, 1.1, 1.7mmの5種類を用いた。

2.3 表面性状の測定

図3に示すように、ショットピーニング効果を判定するため、平滑材では表面からの深さ方向の硬さ分布、切欠き材では試料の切欠き底からの深さ方向の硬さ分布を求めた。測定範囲は、硬さ変化がなくなる程

度、つまりショット効果が出ない深さまで測定する必要がある。また、微小領域で数多くの点をとる必要がある為、荷重として0.5kgfを用いた。

試験片長手方向で切断した切欠き部周辺の塑性域測定は、図4に示すような方法で測定した。図中の距離Xは切欠き部先端から傾斜に沿ってショット加工面に向かう距離のことであり、深さtとは切欠き傾斜から垂直に向かう深さのことである。また塑性域を調べるため、ショット加工面から軸方向への深さの硬さも測定した。この塑性域測定の場合、荷重として1kgfを使用した。

2.4 疲労試験と破面観察

疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機（容量15 N・m、繰返し速度約50Hz）を用いて室温、大気中で行った。打ち切り繰返し数は、長寿命域までの疲労強度を調べるため、 $N = 10^8$ 回とした。

ショットピーニング処理表面と停滞き裂の観察はSEMで行い、疲労破面はすべての試験片について観察しフラクトグラフィ的検討に供した。

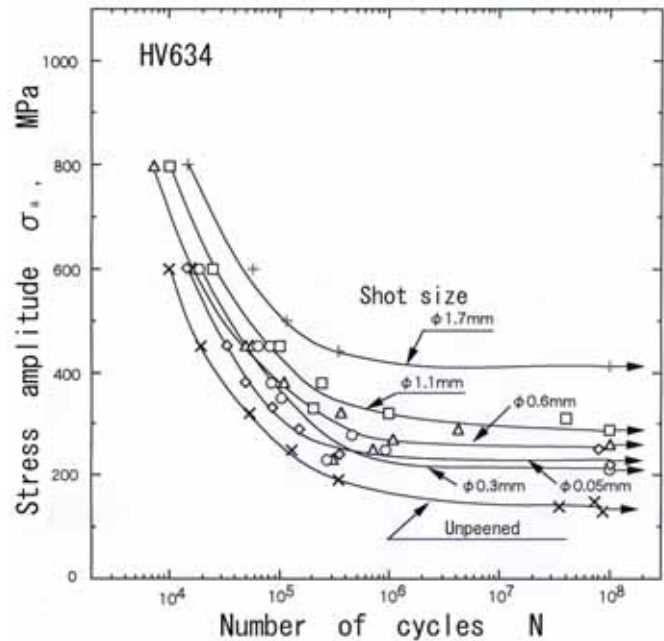


Fig5 S - N curves

3. 実験結果および考察

3.1 S-N曲線

図5に深い切欠き材にショットピーニング処理していない場合と、深い切欠き材にショット粒径 0.05, 0.3, 0.6, 1.1, 1.7mmでショットピーニング処理した場合のS-N曲線を示す。ショットピーニング処理を施すことで、非ショット材より短寿命域から長寿命域に至るまで疲労強度は高くなっており、1.7mm粒径が特に疲労強度の向上が著しいことが分かる。0.05, 0.3,

0.6mm粒径の場合についてはあまり大きな差は見られないが、ショット粒径が大きいほど疲労強度が向上している。

3.2 切欠き部周辺の塑性域

疲労強度向上に影響する因子は、加工硬化と圧縮の残留応力層が考えられる。残留応力測定は、切欠き部が微小領域のため測定が困難であるため、本研究では硬さ分布を求めた。図6・図7は、切欠き部周辺の塑性域を示したものである。ショット粒径が大きいほど最大硬さ値は高く、深い分布を示している。これは、ショット粒径が小さく投射エネルギーの小さなショット粒が直接切欠き底部まで達して作用するよりも、ショット粒が切欠き先端に直接接触していないにもかかわらず、ショット粒径の大きい投射エネルギーのより大きなショット粒径が作用する効果の大きいことを示している。

ここで、なぜ深い切欠き材に対しショット粒径が大きいものほど、硬さ分布に対してよい影響を与えたのかを考察する。図8に実際の進入深さを切欠き断面上に示す。また、実際の切欠き部のショット進入状況を図9と図10にショット粒径0.05と1.7mmの場合を示す。

本研究で使用した深い切欠き材の切欠き底の曲率半径は $= 0.1\text{mm}$ である。つまり、実際に先端までショット粒

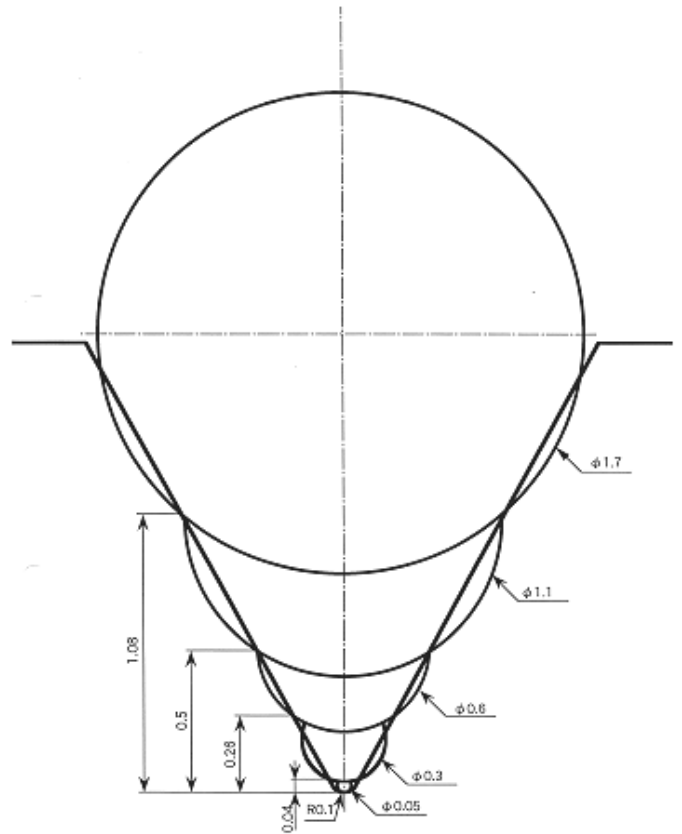


Fig.8 Sectional view of invasion situation of the shot grain.

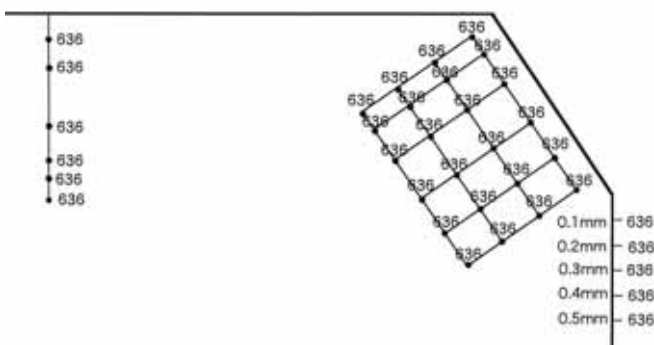


Fig.6 Hardness distribution around the notch (Shot size: 0.05mm)

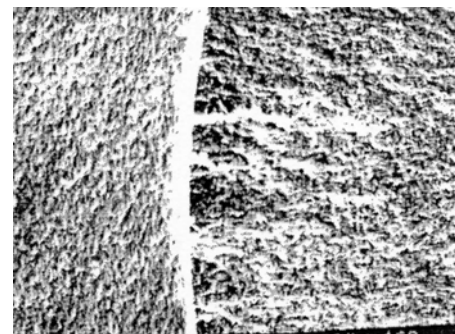


Fig.9 Sectional view of invasion situation of the shot grain. (Shot size 0.05mm)

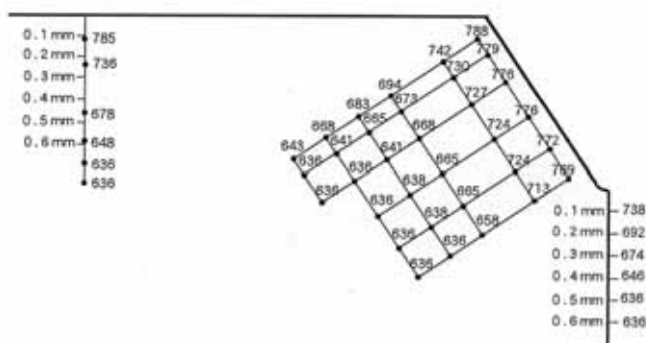


Fig.7 Hardness distribution around the notch. (Shot size: 1.7mm)

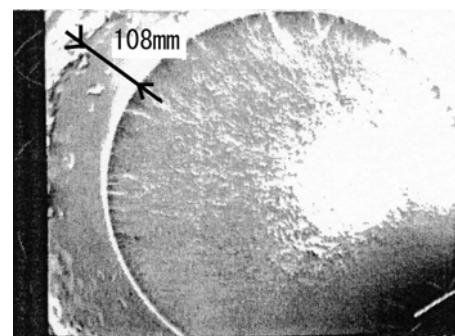


Fig.10 Sectional view of invasion situation of the shot grain. (Shot size 1.7mm)

が達しているのはショット粒径 0.05mmだけとなる。しかし、ショット粒径 0.05mmはすべてのショット粒径の中で最も低い値を示しており、切欠き底までショット粒が達しているにもかかわらず硬化層の深さも浅い。ショット粒径 0.05mmは径が小さいため、ショット粒は到達するが、傾斜部に当たった粒の跳ね返りで切欠き底に直接向かっている粒を遮る粒も増加し、わずかな粒しか到達していないことも上記の原因である。このことはSEM表面観察で 0.05mm粒の圧痕の数が極めて少なくなっていたことから推測される。

切欠き底まで達しないショット粒径の大きいものは、径が大きくなるにつれて切欠き底から遠く離れるが、投射エネルギーは大きくなる。ショット粒が直接接していなくても、切欠き底に深い加工硬化層と圧縮残留応力が形成されている^{(4)・(5)}のは、ショット粒径の大きいものほど、深い残留応力層が得られ、硬さ分布により影響を与えたものと考えられる。



Fig.11 Around the notch root. (Shot size : 1.7mm)

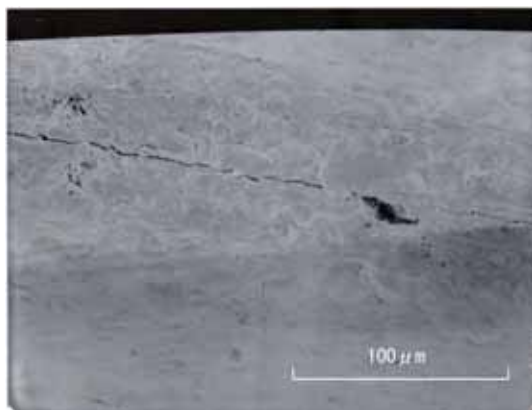


Fig.12 Notch root division.

(1.7mm, $w = 550\text{MPa}$, $N = 10^8$)

3.3 停留き裂観察

ショット粒径 1.7mm, 疲労試験 $w = 550\text{MPa}$, 繰返し数 10^8 回での試験片の切欠き底周辺部写真を図 11 に、同条件の切欠き底部を図 12 に示す。この条件では試験片は破断せず、切欠き底を詳細に観察すると停留き裂を確認できた。これは表面からき裂が発生しても内部まで硬化しているため、き裂の進行が止まり、疲労強度改善に影響を与えたことを示している。

以上のように、本研究の結果は平滑材の結果とは逆に、ショット粒径の大きなものが高い疲労強度を示した。それは、平滑材に比べき裂発生が容易であり、初期のき裂伝ばも容易に進展すると考えられるので、停留き裂長さも長くなる。平滑材では、極表面付近の圧縮残留応力が高い方が、疲労強度を高くすることが報告されているが^{(1)~(3)}、切欠き材の場合は、上述のように、停留き裂が長いことが影響して、極表面の圧縮残留応力よりも、深い残留応力と深い加工硬化層が、き裂の停留条件を作ることになり、ショット粒径の大きい場合が疲労強度向上に寄与するものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、深い切欠きを有するマルエージング鋼にショットピーニング処理した場合の疲労強度を疲労試験、硬さ試験によって調査し、深い切欠き材への適切なショット条件を検討した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 深い切り欠き材の場合は、ショット粒径が大きいほど、疲労強度を上昇させる効果がある。それは、切欠き効果により初期き裂が容易に発生するため、極表面での高い圧縮残留応力より、深い圧縮残留応力層と加工硬化層が必要であるためである。
- (2) ショット粒径が大きいほど、硬さ・塑性域分布は大きくなる。
- (3) 深い切り欠き材の停留き裂は、極表面の加工変質層よりも、深い部分の加工変質層の影響を大きく受ける。

5. 謝 辞

本研究を行うにあたり、(財)天田金属加工機械技術振興財団により奨励研究助成(AF-2003023)を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Takanori Nagano, Michihiko Moriyama, Norio Kawagishi, Surface Treatment (CABrebbia 編), WIT Press 2003 pp.223 - 232
- (2) 森山三千彦, 永野茂憲, 皮籠石紀雄, 高木節雄, 材料, 第 50 巻, 第 10 号, pp.1126 ~ 1132
- (3) 森山三千彦, 永野茂憲, 皮籠石紀雄, 高木節雄, 長島悦一, 日本機械学会論文集(A), 第 67 巻, 第 656 号, pp.711 ~ 718
- (4) 小林幹和, 松井利治, 村上敬宣, 日本機械学会論文集(A) 63 巻 610 号, pp.1226 ~ 1230
- (5) 小西寛, 村上敬宣, 小林幹和, 松井利治, 日本機械学会論文集(A) 66 巻 650 号, pp.1847 ~ 1854