部分除荷法による高強度鋼材の切欠き疲労強度の改善†

中 佐 啓 治 郎* 木 戸 光 夫** 武 井 英 雄***

Improvement of Notched Fatigue Strength of High Strength Steel by Partial Unloading Method

by

Keijiro NAKASA

(Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima)

Mitsuo KIDO

(Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima)

and Hideo TAKEI

(Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima)

The effect of prestressing, such as partial unloading and perfect unloading, on the fatigue crack initiation life was investigated on the notched or precracked specimens of JIS SNCM 439 steel quenched and tempered at 473 K.

The crack initiation life and the lower limit mean stress, under which the crack initiation does not occur within 10^7 cycles at a given stress range, was markedly increased by these two prestress methods, especially by the partial unloading method. The increase in lower limit mean stress by the partial unloading method was large when the range of cyclic stress was middle. The reason why the fatigue crack initiation life was increased by both of the prestress methods could be explained by the decrease of surface tensile stress at the notch root.

(Received Oct. 30, 1981)

キー・ワード：部分除荷法，高強度鋼，切欠き疲労強度，疲労き裂発生寿命

1 緒 言

繰返し荷重を受ける機械構造物では，溶接部，切欠き部，断面不連続部などの応力集中部での疲労き裂の発生と伝ばをいかにして抑制するかが，疲労破壊を防止する上での一つの重要な課題である。このような問題に対処するには，使用材料の化学組成や熱処理の改善がまず考えられるが，高周波焼入れやショットピーニングなどの表面硬化法および適用範囲に限界はあるけれども，部材に予荷重を与える方法も疲労強度を向上させるのに有効であることが知られている。著者らは前報¹⁾で，種々の予荷重法がき裂または切欠きを有する高強度鋼材の遅れ破壊強度の向上にどのように役立つかを調べ，その結果から破壊じん性値または切欠き強度に近い荷重まで負荷したのち完全に除荷しないで，ある荷重だけ部分的に除荷して試験を行う方法（これを部分除荷法と名づけた）が非常に有効であることを

明らかにした。そこで本研究では，この部分除荷法がき裂または切欠きを有する高強度鋼材の疲労強度改善法として適用できるかどうかを調べた。

2 実 験 方 法

2・1 供試材および試験片

実験に供した材料は市販の Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM 439) であり，その化学組成を Table I に示す。これを Fig. 1 に示すような形状・寸法に機械加工したのち熱処理 [1 153 K (880℃) 1 800 s (30 min) 加熱後油焼入れ，473 K (200℃) 3 600 s (1 hr) 焼もどし] を施して試験片とした。試験片は片側に曲率半径 $\rho = 0.3$ mm の U 形切欠きをつけたもの (Fig. 1 (a)) と，切欠き底から約 2 mm の疲労予き裂をつけたもの (Fig. 1 (b)) の 2 種類としたが，切欠きは焼もどし処理後，薄形砥石によってつけ，疲労予き裂は実験に用

Table I. Chemical composition of specimen (wt. %).

Mark	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
SNCM 439	0.42	0.29	0.78	0.012	0.005	1.79	0.82	0.19	Bal

† 原稿受理 昭和56年10月30日

* 正 会 員 広島大学工学部 広島市西条町下見

** 正 会 員 広島工業大学 広島県佐伯郡五日市町三宅

*** 広島大学工学部 広島市西条町下見

Fig. 1. Shape and size of fatigue specimen.

いたのと同じ疲労試験機（後述）を使用してつけた。ただし、疲労予き裂導入時の応力拡大係数 K の変動幅 ΔK は $18 \text{ MN/m}^2/\sqrt{\text{m}}$ とし応力比 $R=0$ とした。なおこの試料の熱処理後の引張諸性質（平行部幅 15 mm 、厚さ 4.5 mm 、標点間距離 60 mm の平滑試験片による）は降伏強度 1520 MN/m^2 (155 kgf/mm^2)、引張強さ 1890 MN/m^2 (193 kgf/mm^2)、破断伸び 8.1% であった。

2・2 疲労試験および予荷重法

実験は、曲げ疲労試験機（Upton-Lewis 型）を用いて試験片に予荷重を与えたのち、繰返し速度 $f=6.7 \text{ Hz}$ として、所定の繰返し曲げモーメント M を Fig. 1 に示す矢印方向に加えて行った。切欠き材の実験結果は公称曲げ応力 σ （曲げモーメントを切欠きがないとしたときの断面係数で割った値）を、また予き裂材のそれは次式から計算される応力拡大係数 K をそれぞれ用いて整理した。

$$K = \frac{4.12 \left\{ \left(\frac{1}{\alpha^3} \right) - \alpha^3 \right\}^{1/2}}{BW^{3/2}} M \quad \alpha = 1 - \frac{a_0}{W}$$

ここで W は試験片の幅、 B は厚さ、 a_0 は予き裂の長さ（切欠きの長さを含む）である。

切欠き材の切欠き底および予き裂材のき裂先端からの疲労き裂の発生（または進展開始）時期は、前報⁹⁾と同じく試験機のアームのたわみが増加し始める時点、すなわち Fig. 2 の矢印 A 点とした。このとき切欠き底（または予き裂先端）に発生した疲労き裂の長さは、繰返し応力の大きさや予荷重の有無などにより多少の違いはあったがほぼ $0.2 \sim 0.6 \text{ mm}$ であったので、本研究における疲労き裂発生時期は、切欠き底および予き裂先端から板幅方向に約 0.4 mm ほど疲労き裂が生

Fig. 2. Relation between deflection and number of cycles.

Fig. 3. Schematic diagram indicating various prestressing methods.

長した時点ということになる。

Fig. 3 は本研究で行った切欠き材についての予荷重法とそれに続く疲労試験の手順を表す説明図であるが、予き裂材の場合には図中の公称応力 σ を応力拡大係数 K で置きかえて考えれば良い。Fig. 3 の(I)は予荷重を与えない通常の疲労試験の場合の応力-繰返し数曲線であり、平均応力 σ_m に変動幅範囲が $\Delta\sigma$ の繰返し応力が重畳されていることを示している。同図(II)は応力を一度所定の予荷重応力 σ_p にまで増加したのち、 σ_a だけ部分的に応力を低下させて σ_m に保ち（ $\sigma_m = \sigma_p - \sigma_a$ ）、その後変動範囲が $\Delta\sigma$ の繰返し応力を重畳させて疲労試験を行う方法であり、このような予荷重法を著者らは部分除荷法と名づけた。同図(III)の方法は、応力を σ_p に上昇させたのち荷重を0にして完全に除荷し、その後所定の応力 σ_m まで負荷して疲労試験を行う方法で、これを完全除荷法と名づけた。なお(II)および(III)の予荷重法において、いずれの場合にも疲労試験をする前に予荷重応力 σ_p から試験応力 σ_m まで σ_a だけ除荷しているので、以後 σ_a を除荷応力と呼ぶことにする。

本研究では予荷重応力 σ_p （または K_p ）を一定にし、部分除荷または完全除荷したのち試験応力 σ_m （または

K_m) および、疲労試験時における繰返し応力の変動幅 $\Delta\sigma$ (または ΔK) を種々に変化させて実験を行った。

3 実験結果

3・1 切欠き材の場合

焼入れ後 473K (200℃) で焼もどした SNCM 439 材の切欠き試験片 ($\rho=0.3$ mm) について、まず予荷重を与えない通常の疲労試験を行い、平均曲げ応力 σ_m とき裂発生繰返し数 N の関係に及ぼす繰返し応力の変動幅 $\Delta\sigma$ の影響を調べた。その結果を Fig. 4 に示す。この図より所定の $\Delta\sigma$ に対して繰返し数が 10^7 回を経過しても切欠き底よりき裂が発生しない最大の平均曲げ応力、すなわち下限界平均応力 (以下 σ_{ml} と略称する) は $\Delta\sigma$ が大きい場合 ($\Delta\sigma \geq 196$ MN/m²) には存在しないが、 $\Delta\sigma$ が小さい場合 ($\Delta\sigma \leq 98$ MN/m²) には存在し、 σ_{ml} は $\Delta\sigma$ が小さいほど大きいことがわかる。

Fig. 4. Effect of range of cyclic stress on the relation between mean bending stress and number of cycles to crack initiation.

つぎに、この疲労き裂発生曲線 (σ_m - N 曲線) が、前述の部分除荷法または完全除荷法を施した場合にどのように変化するかを調べた。すなわち予荷重応力 σ_p を切欠き曲げ強度 $\sigma_N = 2060$ MN/m² (210 kgf/mm²) の約90%の値 1860 MN/m² (190 kgf/mm²) に選び、除荷応力 σ_a すなわち平均応力 (試験応力) σ_m ($\sigma_p - \sigma_a$) を種々に変化させ、平均応力 σ_m に重畳させる繰返し応力の変動幅 $\Delta\sigma$ を4種類に選んで疲労試験を行い、き裂発生繰返し数 N を求めた。その結果を Fig. 5 ($\Delta\sigma = 392$ MN/m² (40 kgf/mm²)), 6 ($\Delta\sigma = 196$ MN/m² (20 kgf/mm²)), 7 ($\Delta\sigma = 98$ MN/m² (10 kgf/mm²)), および Fig. 8 ($\Delta\sigma = 49$ MN/m² (5 kgf/mm²)) に示す。なおこれらの図には比較のため予荷重を与えない通常の疲労試験の結果 (Fig. 4 曲線) も再録してある。これらの図より明らかなように、部分除荷を与えた切欠き試験片の疲労き裂発生繰返し数は、予荷重を与えないもののそれよりかなり長くなり、しかも σ_{ml} は著しく上昇する。また完全除荷を与えた切欠き材の疲労き

Fig. 5. Relation between mean bending stress and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

Fig. 6. Relation between mean bending stress and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

Fig. 7. Relation between mean bending stress and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method

裂発生繰返し数、および下限界平均応力 σ_{ml} は予荷重を与えないもののそれらよりは大きい、部分除荷を施したもののそれよりはかなり小さい。

Fig. 9 は、部分または完全除荷法によって得られる下限界平均応力 σ_{ml} の上昇量 (図中に上向きの矢印の長さで示す) が、繰返し応力の変動幅 $\Delta\sigma$ によってどのように異なるかをまとめて表したものである。このように両予荷重法とも下限界平均応力 σ_{ml} を上昇させるが、その程度は部分除荷法の方が完全除荷法よりはる

Fig. 8. Relation between mean bending stress and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

Fig. 9. Relation between increase in lower limit mean stress and range of cyclic stress in partial or perfect unloading method.

Fig. 10. Relation between mean stress intensity factor and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

かに大きく、しかも $\Delta\sigma$ が中程度の大きさのときにその効果がとくに大きいことがわかる。

3・2 予き裂材の場合

Fig. 10 および 11 は、予き裂試験について、切欠き試験片と同様にして部分除荷法または完全除荷法を施し、疲労試験における応力拡大係数の変動幅 ΔK_m を 14 または 9 MN/m²√m としたときの平均応力拡大係数 K_m と疲労き裂発生繰返し数の関係を求めた結果である。これらの図より、部分除荷または完全除荷を与えたもののき裂発生繰返し数は、予荷重を与えないものよりかなり長くなり、しかも下限界平均応力拡大係数（所定の ΔK のもとで 10^7 回繰返しても予き裂先端よりき裂が発生しない平均応力拡大係数で、以下 K_{ml} と略称する）がかなり上昇すること、およびその程度は部分除荷法による方が大であることがわかる。なおこれらの試験で予荷重応力拡大係数 K_p を 50 MN/m²√m (161 kgf/mm²√mm) としたが、この値は以下の理由によって決定した。すなわち Fig. 12 は平均応力拡大係数 K_m を 18 MN/m²√m、応力拡大係数範囲 ΔK を 18 MN/m²√m と一定にしておき、予荷重応力拡大係数（または除荷応力拡大係数 K_a ）を種々に変化させて疲労き裂発生繰返し数 N を求めた結果であるが、これによると両荷重法の場合とも K_p の増加とともに N は大きくなり、約 50 MN/m²√m (161 kgf/mm²√mm) あたりで最大になっている。 K_p が 50 MN/m²√m を越えると、予荷重を付加した時点で予き裂先端から微小なき裂の進展が認められるので、 K_p の値としては 50 MN/m²√m が限度と考えられる。なお、き裂が不安定に伝ばするときの K の値（すなわち破壊じん性値 K_c ）は約 62 MN/m²√m であった。このように $K_p = 50$ MN/m²√m は、限定された条件下ではあるが、き裂発生寿命を最大にすることのできた予荷重

応力拡大係数である。このことは部分除荷法の場合に、予荷重応力 σ_p は試験片が破壊しない限度でなるべく大きくとる方が効果があるという前報の結果とも一致している。

つぎに $K_p = 50$ MN/m²√m および $K_m = 18$ MN/m²√m を一定にして予荷重を与え、 ΔK を種々に変化させて疲労試験を行った場合の結果を Fig. 13 に示す。これより、とくに部分除荷を与えたもののき裂発生寿命は、 ΔK が 25 MN/m²√m 以下であれば ΔK がいかに変化しても、予荷重を与えない場合のそれよりも長くなり、また下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} も部分除荷を与えたもののがもっとも高いことがわかる。

4 考 察

上述のように部分除荷法または完全除荷法

Fig. 11. Relation between mean stress intensity factor and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

Fig. 12. Effect of preload stress intensity factor on the number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

Fig. 13. Relation between range of stress intensity factor and number of cycles to crack initiation in partial or perfect unloading method.

を施した場合には、予荷重を与えない場合に比べ、切欠き試験片または予き裂試験片の疲労き裂発生寿命がかなり増加する。その程度はいずれも部分除荷法の方が完全除荷法より大である。著者らは前報において、両予荷重の付与によって切欠き材の遅れ破壊き裂発生寿命や 100 時間遅れ破壊強度 σ_{100} がかなり上昇すること、およびその主な理由として両予荷重法により切欠き底表面の応力が減少することが考えられることを述べた。また、切欠き試験片の切欠き底のひずみをひずみゲージによって直接測定して、試験開始直前の応力（本研究では $\sigma = \sigma_m$ ）における切欠き底表面のひずみが部分除荷したものでもっとも大きく、完全除荷したもの、予荷重を与えないものの順に小さいこと、したがって切欠き底表面の応力は上記の順に逆になくなることを示した。したがって本研究の場合にも、疲労試験を開始する直前の切欠き底表面の応力は、部分除荷を与えたものがもっとも小さく、ついで完全除荷を与えたもの、予荷重を与えないものの順に大きくなっており、そのためとくに部分除荷法で疲労き裂の発生寿命が長くなったものと思われる。すなわち、これら予荷重を付与することにより、実質上の平均応力が低下し切欠き底の繰返しすべりが抑制されたものと思われる。

Fig. 14 は、付図に示すように切欠き底曲率半径 $\rho = 15$ mm の切欠き試験片の切欠き底にひずみゲージを貼って、応力繰返しによって ($\sigma_m = 784$ MN/m², $\Delta\sigma = 392$ MN/m²) 軸方向引張ひずみの値がどのように変化するかを調べたものである。これによると、繰返し初期のひずみの大きさは前述のとおり部分除荷法、完全除荷法、予荷重を与えないものの順に小さくなり、しかもこれらの値はかなりの繰返し数を与えたのちもあまり変化しないが、 $N = 5 \times 10^5$ あたりからそれぞれのひずみがわずかに大きくなり（すなわち軟化が生じ）さらに繰返し数が多くなると再び小さくなっている。なお実験結果は省略するが、予荷重応力 $\sigma_p = 2450$ MN/m²、平均応力 $\sigma_m = 1470$ MN/m² と大きくした場合（ただし $\Delta\sigma = 392$ MN/m²）にも、ひずみの変化の様子は Fig. 14 とほとんど同じ傾向を示した。このように三者の場合とも、切欠き底のひずみはかなりの応力繰返しを経たのちでさえ初期のひずみとあまり変わらず、初期の状態が繰返し過程で

Fig. 14. Relation between number of cycles and mean strain at notch root surface in various prestress methods.

もほぼ安定に保たれていることがわかる。なおひずみの測定に用いた切欠き試験片と本研究で用いた切欠き試験片とでは、切欠き底半径 ρ がかなり大きく異り、 ρ が小さい場合には切欠き底での疲労軟化または硬化がより大きく生じられるので、上述のひずみの測定結果をそのまま本実験で用いた切欠き疲労試験片にあてはめて考えることはできないが、定性的には同じ傾向になり、少なくとも三者のひずみの大小関係に大きな変化はないものと思われる。このように、疲労き裂発生寿命は繰返し初期の切欠き（またはき裂）底表面の応力（実効）に支配され、切欠き底表面の応力をもっとも小さい部分除荷法を施した試験片で疲労き裂発生寿命が著しく長くなったものと思われる。

5 結 言

焼入れ後 473K で焼もどした SNCM 439 材の切欠き試験片および予き裂試験片に部分除荷法および完全除荷法で予荷重を与えたのち疲労試験を行い、その

ときのき裂発生繰返し数を調べ、両予荷重法の疲労強度の改善効果を検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 部分および完全除荷法、とくに部分除荷法により、切欠き試験片または予き裂試験片のき裂発生繰返し数および下限界平均応力がかかなり増加する。その程度は疲労試験における繰返し応力の変動幅が中程度のときにとくに大きい。

(2) 予荷重によって疲労き裂発生寿命が上昇する理由は、予荷重によって切欠き底表面の応力が低下し、繰返しすべりが抑制されるためと思われる。

(昭和54年4月4日 日本金属学会春期講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 日本材料学会編, “金属の疲労”, 190 (1964) 丸善
- 2) R. B. Heywood, IUTAM Colloquium on Fatigue., 92 (1955).
- 3) J. Schijve, Full Scale Fatigue Testing Aircraft Structures., p. 41 (1961) Pergamon Press
- 4) 戸根恵郎, 安藤善司, 松田芳治, 日本機械学会論文集, **46**, 13 (1980) .
- 5) 中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄, 鉄と鋼, **64**, 578 (1978).
- 6) K. Nakasa, M. Kido and H. Takei, Engineering Fracture Mechanics, **11**, 733 (1979).
- 7) 中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄, 鉄と鋼, **66**, 1542 (1980).
- 8) J. A. Kies, H. L. Smith, H. E. Romine and H. Bernstein, Fracture Testing of Weldments., ASTM STP., **381**, 334 (1965).
- 9) 中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄, 日本金属学会誌, **40**, 744 (1976).