回転曲げおよび繰返しねじりによる低炭素鋼の
疲労限度に及ぼす過大応力の影響*

戸 梶 恵 郎** 安 藤 善 司**
牛 田 雅 己*** 朝 原 力****

Effect of Overstressing on Fatigue Limit of Low Carbon Steel
under Rotating Bending and Torsion

by

Keiro TOKAJI, Zenji ANDŌ, Masami USHIDA
(Faculty of Engineering, Gifu University, Kagamigahara)
and Chikara ASAHARA
(Gifu Prefectural Metal Research Institute, Seki)

The main objectives of the present study are to investigate the effect of overstressing on fatigue limit and then to make clear the effect of strain aging in such case.
For these purposes, by using two kinds of low carbon steels, Al-killed and rimmed steel having different strain-aging abilities, fatigue tests were carried out under rotating bending and torsion. The slip line and crack initiation curves, as well as the *S-N* curves, and the damage curves were drawn for each case. The variations of hardness and temperature on the surface of the specimens during stress cycling were measured.
The most important result obtained from these experiments is that the damage curve for the rimmed steel with higher strain-aging ability lies relatively in the side of shorter life as compared with that of the Al-killed steel with lower strain-aging ability. Therefore, it seems that the strain aging during stress cycling is not effective to the damage on fatigue limit caused by overstressing.
(Received Feb. 16, 1976)

1 緒 言

鋼にはひずみ時効¹⁾のあることが知られており、疲労限度の存在について、降伏点やひずみ時効と関連させて研究が行なわれているが、疲労限度に及ぼすひずみ時効の影響は必ずしも明確でないように思われる。

本研究は疲労限度に及ぼす過大応力の影響を調べ、その場合のひずみ時効の影響について知ることが主な目的である。

そこで、熱処理によってひずみ時効能を抑えたアルミキルド鋼と、逆に高めたリムド鋼の2種類の低炭素鋼試験片を用い、回転曲げと繰返しねじりのもとで、まず一定応力振幅試験を行ない、続いて過大応力の疲労限度に及ぼす影響として被害曲線を求め、両材料について比較検討すると同時に、著者らが前に指摘した

ように³⁾、回転曲げと繰返しねじりとでは異なる挙動を示すことが考えられるので、両者の相違についても検討した。

2 供試材料および試験機

使用した材料はアルミキルド鋼 (CH10A) とリムド鋼 (CH10R) で、それらの化学成分、熱処理条件および所定の熱処理後の機械的性質を Tables I, II および III に示す。Table II に示した熱処理は、CH10A 材に対してはできるだけひずみ時効能を抑え、CH10R 材に対しては逆に高めるように、かつ両材料の結晶粒径がほぼ等しくなるように選んだものである。平均フェライト粒径は CH10A 材で 24 μ 、CH10R 材で 26 μ

Table I. Chemical composition of materials (%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Al
CH10A	0.09	0.03	0.46	0.013	0.016	0.031
CH10R	0.11	0.01	0.39	0.016	0.018	

* 原稿受理 昭和51年2月16日
** 正 会 員 岐阜大学工学部 各務原市那加門前町
*** 学生会員 岐阜大学大学院 各務原市那加門前町
**** 正 会 員 岐阜県金属試験場 関市小瀬

Table II. Conditions of heat treatment of materials.

Materials	Before machining	After machining
CH10A	920°C・1 hr. → 350°C・3 hr. → R.T. Furnace cooling Furnace cooling	700°C・1 hr. → R.T. Vacuum annealing
CH10R	920°C・1 hr. → R.T. Air cooling	700°C・1 hr. → R.T. Water quenching

Table III. Mechanical properties of materials.

Materials	Tension						Torsion			Vickers hardness
	Upper yield point (kg/mm ²)	Lower yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Breaking strength on final area (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Upper yield point (kg/mm ²)	Lower yield point (kg/mm ²)	Torsional strength (kg/mm ²)	
CH10A	29.8	20.8	33.1	82.2	43	75	16.6	11.8	34.2	115
CH10R	23.5*		43.0	105.8	16	73	21.3**		41.6	155

* 0.2% proof stress

** 0.3% proof stress

Fig. 1. Test specimens.

である。Fig. 1 に疲労試験片の形状寸法を示す。表面観察を容易にするため表面を電解研磨により約10 μ 除去し鏡面に仕上げた。なお、CH10R 材の試験片については、時効の進行を抑えるために疲労試験に供するまで-16°Cで保存した。

使用した疲労試験機は、容量 10 kg・m の小野式回転曲げ疲労試験機および容量 10 kg・m の共振型曲げ-ねじり疲労試験機で、繰返し速度はそれぞれ約 3 420 rpm および 2 000 rpm である。

3 実験方法

まず、回転曲げおよび繰返しねじりのもとで、一定応力振幅試験を行ない、破断繰返し数、すべり線およびき裂発生繰返し数を求めた。すべり線およびき裂発生繰返し数は疲労試験の途中の適当な繰返し数で、光学顕微鏡により観察し決定した。なお、厳密にき裂発生繰返し数を求めることは困難で、本研究ではき裂と判別できる長さを CH10A 材では 0.05~0.1 mm, CH10R 材では 0.1~0.2 mm としてき裂発生繰返し数を求めた。

つぎに、応力繰返しに伴う試験片表面温度およびかたさの変化を測定した。温度の測定はクロメル・アル

メル熱電対を用いて行ない、かたさの測定はビッカース微小硬度計を用いて試験片表面上で10点の測定を行ない、その平均値をとった。測定荷重は 1 000 g, 荷重保持時間は約15秒である。

最後に、被害曲線を求めたが、これは三つの過大応力で、ある繰返し数を与えたのち、続いて疲労限度の応力で繰返し、破断するか否かの境界の繰返し数を求めて決定した。

4 CH10A 材と CH10R 材のひずみ時効能

ひずみ時効能をチェックするために、所定の熱処理を行なった試験片に4%の予ひずみを与えたのち、60°C・20時間の時効処理を行ない、続いて静引張試験を行なって、次式によりひずみ時効能を求めた。

ひずみ時効能＝

$$\left(\frac{\text{時効後の下降伏点の応力}}{\text{4\%の予ひずみを与えたときの応力}} - 1 \right) \times 100(\%)$$

これによると、ひずみ時効能は CH10A 材で8.6%, CH10R 材で24.9%となり、後者の方が著しくひずみ時効能が高くなっていることがわかる。

5 実験結果およびその考察

5・1 すべり線およびき裂発生曲線とS-N曲線

紙数の関係上、すべり線、き裂発生およびS-N曲線の実験点を記入した図は省略したが、それらについては参考文献を参照されたい。なお、それらの曲線のみは、後述する被害曲線とともに示してある。

Table IV に疲労限度とすべり線およびき裂発生限界応力の関係を示す。疲労限度は回転曲げにおいても繰返しねじりにおいても、CH10R 材がかなり高く、S-N 曲線のこう配も CH10R 材が大きい。さらに、いずれの場合も両材料とも S-N 曲線の折れ点の位置および疲労限度は明確でないので、炭素鋼の明りょうな疲労限度の存在とひずみ時効能とは、必ずしも直接

Table IV. Relation between fatigue limit and critical stress of slip line and crack initiation.

Materials	Rotating bending			Torsion		
	Fatigue limit σ_w (kg/mm ²)	Critical stress of crack initiation σ_{crack} (kg/mm ²) (σ_{crack}/σ_w)	Critical stress of slip line initiation σ_{slip} (kg/mm ²) (σ_{slip}/σ_w)	Fatigue limit τ_w (kg/mm ²)	Critical stress of crack initiation τ_{crack} (kg/mm ²) (τ_{crack}/τ_w)	Critical stress of slip line initiation τ_{slip} (kg/mm ²) (τ_{slip}/τ_w)
CH10A	16.5	16.0 (0.97)	11.0 (0.67)	9.0	9.0 (1.00)	6.0 (0.67)
CH10R	24.0	23.0 (0.96)	18.0 (0.75)	17.0	13.0 (0.76)	11.0 (0.65)

 (a) CH10A $\sigma=24.0$ kg/mm², $n=14\,000$ ($N_f=77\,800$)
 (b) CH10R $\sigma=38.0$ kg/mm², $n=7\,000$ ($N_f=50\,900$)

Fig. 2. Fatigue slip line by rotating bending.

 (a) CH10A $\tau=14.0$ kg/mm², $n=10\,000$ ($N_f=93\,000$)
 (b) CH10R $\tau=26.0$ kg/mm², $n=10\,000$ ($N_f=39\,500$)

Fig. 3. Fatigue slip line by torsion.

関係があるとは考えられない。

回転曲げにおいて、すべり線の発生は CH10A 材で疲労寿命の約 2～4%，き裂の発生は約 40～60% であり，CH10R 材ではそれぞれ約 0.5～1.0% および 20～40% である。それに対して，繰返しねじりではすべり線の発生は CH10A 材で 0.5～1.3%，き裂の発生は 30～50% であり，CH10R 材ではそれぞれ約 0.7% および 12～23% である。すべり線の発生時期が，回転曲げでは相対的に CH10R 材が早い，繰返しねじりではほぼ同程度である。このことは，繰返し応力とそれぞれの材料の降伏応力との比を比較するとき，回転曲げでは CH10R 材のそれが CH10A 材より高く（曲げ降伏応力は，CH10A 材で 34.5 kg/mm²，CH10R 材で 40.2 kg/mm² である），繰返しねじりでは，それが両材料ではほぼ同程度であることに関係しているものと思われる。き裂発生時期が回転曲げにおいても繰返しねじりにおいても，CH10R 材の方が相対的に早いのは，すべり線の発生時期が早いことに関係していることは当然であるが，のちに示すような CH10R 材に含まれている介在物の影響も無視できない。

回転曲げと繰返しねじりの結果を比較すると，すべ

り線およびき裂の発生ともに繰返しねじりが相対的に早い。このことは，すべり線の発生や初期き裂の発生には最大せん断応力が支配的であり，最大せん断応力は回転曲げより繰返しねじりが相対的に大きいことにより，またき裂発生後のき裂進展期間は，最大せん断応力面に作用する垂直応力が寄与して，回転曲げの方が相対的に短くなるものと考えられる。

Figs. 2 および 3 に回転曲げおよび繰返しねじりのすべり線の形態を示す。回転曲げでも繰返しねじりでも，CH10A 材は非常に密にすべり wavy な形態を示すのに対して，CH10R 材は粗く鋭いすべり線を示している。しかし，CH10R 材のすべり線の形態は，応力レベルに依存するようで，繰返し応力が疲労限度あるいは疲労限度以下のような場合は，比較的 CH10A 材に似たすべり線の形態を示すようになる。D. V. Wilson と B. Mintz⁵⁾ は低温焼入後時効処理を施した試験片のすべり線が非常に鋭いことを報告している。このことから，CH10R 材のすべり線が高い応力で鋭くなるのは，応力繰返しにより急激にひずみ時効が進行したためであろう。言い換えると，疲労限度近傍よりも高応力側でひずみ時効の影響が大きいことが推察

される。

Figs. 4 および 5 に回転曲げおよび繰返しねじりの停留き裂を示す。回転曲げでは、両材料ともに疲労限度で停留き裂が認められるが、それ以下の応力では認められない。それに対して、繰返しねじりの場合は CH10A 材では疲労限度においても停留き裂は認められないが、CH10R 材では疲労限度の約77%の応力まで停留き裂が認められる。これらのことから、CH10R 材の繰返しねじりの場合を除いて、停留き裂の存在は疲労限度と関連するものと思われる。CH10R 材に疲労限度以下でも長い停留き裂が存在するのは、ひずみ時効がき裂の発生よりも進展を抑える効果をもつことを意味するように思われる。

Fig. 6 に介在物から発生したき裂の一例を示す。このように、CH10R 材では介在物がき裂の発生源とな

Fig. 4. Non-propagating crack under rotating bending.

Fig. 5. Non-propagating crack under torsion.

る場合があるので、介在物の影響は無視できない。

5.2 応力繰返しに伴う試験片表面の温度とかたさの変化

Figs. 7 および 8 に回転曲げおよび繰返しねじりの応力繰返しに伴う試験片表面の温度変化を示す。温度上昇は塑性変形の尺度であり、またひずみ時効を促進させることが考えられる。回転曲げでは、同一破断寿命に対して CH10A 材の温度上昇が高い。繰返しねじりでは、高い繰返し応力においてはほぼ同程度であるが、低い繰返し応力においては CH10A 材が高い。また、いずれの場合も繰返し初期の温度上昇を生じる繰返し数は、ほぼすべり線の発生繰返し数と一致する。このような温度上昇は、表面で観察されるすべり線の状態に関係があり、CH10A 材が CH10R 材よりも塑性変形を生じやすく、同一破断寿命に対して塑性ひずみが大きいことを示している。回転曲げよりも繰返し

Fig. 6. Fatigue crack initiated from inclusion (Torsion: CH10R, $\tau = 26.0 \text{ kg/mm}^2$, $n = 6000$, $l = 0.362 \text{ mm}$).

Fig. 7. Variations of temperature at surface of specimen during stress cycling under rotating bending.

Fig. 8. Variations of temperature at surface of specimen during stress cycling under torsion.

ねじりの方が温度上昇が大きいのは、最大せん断応力の大きさおよび発生箇所の差異によるものと思われる。

応力繰返しの間にひずみ時効が進行すれば、それによるかたさ上昇を生じていることが考えられる。Figs. 9 および10に回転曲げおよび繰返しねじりの応力繰返しに伴うかたさの変化を示す。回転曲げでも繰返しねじりでも、同一破断寿命に対してはCH10A材よりもCH10R材の方がかたさの上昇は大きいことがわかる。

Fig. 9. Variations of hardness during stress cycling under rotating bending.

Fig. 10. Variations of hardness during stress cycling under torsion.

CH10A材のかたさ上昇は、主に繰返し応力による加工硬化であるが、CH10R材ではそれに加えてひずみ時効の影響が大きいことを示している。このことは、CH10A材の方が塑性変形の尺度となる温度上昇の高いことから推察できる。

5・3 被害曲線

Fig. 11に回転曲げの被害曲線を示す。まず、明らかなことは、両材料とも被害曲線とすべり線発生曲線とは全く無関係なことである。すなわち、過大応力のすべり線の発生繰返し数は、疲労限度を低下させることはなく、被害として影響しない。しかし、き裂の発生とは関係があり、CH10A材ではき裂発生曲線と非常によく一致している。また、CH10R材では被害曲線はき裂発生曲線よりわずかに短寿命側に位置しているが、この材料では発達したすべり線とき裂との区別が明確にできないので、この点を考慮すれば被害曲線とき裂発生曲線とはほぼ一致すると考えてよい。CH10A材とCH10R材との比較では、明らかにCH10R材の被害曲線が相対的に短寿命側に位置している。

Fig. 12に繰返しねじりの被害曲線を示す。CH10A

Fig. 11. Damage curves under rotating bending.

Fig. 12. Damage curves under torsion.

材において興味あることは、実験の範囲内では被害曲線が定まらないことである。過大応力の疲労寿命の85%の繰返し数まで実験を行なったので、CH10A 材の被害曲線は繰返し数比85%の繰返し数と S-N 曲線との間に位置することになる。当然、すべり線やき裂発生には全く無関係である。過大応力の疲労寿命の85%も繰返ししたときの試験片表面には、いたるところにき裂が認められ、長いものでは数 mm もある。それでも疲労限度が低下しない理由は、現時点では必ずしも明確でないが、後述する CH10R 材との比較から、過大応力によって加工硬化を生じてもかたさの絶対値は低く、き裂に対してあまり敏感にならないこと、き裂長さに比してその深さが比較的浅いことおよび同一き裂長さに対する応力集中度が回転曲げより繰返しねじりが低いことなどによると考えられる。CH10R 材の被害曲線は回転曲げの場合と同様に、すべり線の発生には無関係であるが、き裂の発生曲線とはほぼ一致している。繰返しねじりにおいても回転曲げの場合と同様に、CH10R 材の被害曲線は相対的に短寿命側にある。回転曲げと繰返しねじりとの比較において、回転曲げの場合の被害曲線は両材料とも比較的敏感にき裂の発生と一致するが、繰返しねじりの場合は必ずしもそうではなく、ひずみ時効能の高い CH10R 材が一致する。このように、回転曲げが材料にかかわらず繰返しねじりよりもき裂に敏感なのは、前述したように、最大せん断応力面に作用する垂直応力によると思われる。同時に、繰返しねじりでも CH10R 材の被害曲線がき裂発生曲線と一致するのは、低温焼入れにより著しく硬化し、繰返し応力による加工硬化や繰返し間の急速なひずみ時効によりさらに硬化するので、き裂に対して敏感になることも考えられるし、Fig.6 に示したような介在物の影響も無視できない。これらのこ

とは、回転曲げの CH10R 材についても同様にいえることである。

以上のように、材料が高いひずみ時効能を有していても、被害曲線の位置に関しては有利とはいえず、繰返し間のひずみ時効が過大応力の疲労限度への被害に対して必ずしも効果的であるとは言えない。

6 結 言

熱処理によって時効能を抑えたアルミキルド鋼と、逆に高めたリムド鋼を用いて、回転曲げおよび繰返しねじりのもとで一定応力振幅試験を行ない、続いて疲労限度に及ぼす過大応力の影響として被害曲線を求めた。これらの実験結果および考察から、得られた主な結論は次のようである。

(1) 回転曲げにおいても繰返しねじりにおいても、すべり線およびき裂の発生は CH10A 材より CH10R 材が早い、疲労限度は CH10R 材が著しく高く、しかも S-N 曲線のこう配は大きい。

(2) 回転曲げでは、両材料ともに疲労限度において停留き裂が認められ、それ以下の応力では認められないが、繰返しねじりにおいては CH10A 材では疲労限度でも認められず、CH10R 材では疲労限度はもちろん疲労限度の77%の応力まで停留き裂が認められる。

(3) 応力繰返しに伴う試験片表面の温度は、回転曲げでも繰返しねじりでも同一破断寿命に対して、CH10A 材が CH10R 材より高い。このことは、繰返しされる塑性ひずみが大きいことを意味する。また、応力繰返しに伴うかたさの上昇は、同一破断寿命に対して CH10R 材が CH10A 材より大きく、これは繰返し間のひずみ時効の結果である。

(4) 回転曲げの被害曲線は、両材料ともすべり線の発生には無関係であり、き裂の発生とは比較的良好に一致する。それに対して、繰返しねじりの被害曲線は、CH10A 材ではすべり線の発生およびき裂の発生には関係なく、S-N 曲線にきわめて近いところに位置するが、CH10R 材ではほぼき裂の発生と一致する。

(5) ひずみ時効能の高い CH10R 材の被害曲線が、回転曲げにおいても繰返しねじりにおいても、CH10A 材より相対的に短寿命側に位置し、き裂の発生と一致するのは、含まれている介在物の影響と低温焼入れによる著しい硬化、それに加えて繰返し応力による加工硬化および繰返し間のひずみ時効による硬化のためにき裂に対して敏感になることが考えられる。それゆえ、材料が高いひずみ時効能を有していても、被害曲線の位置に関しては有利とはいえず、繰返し間のひずみ時効が、過大応力の疲労限度への被害に対して効果的であるとはいえない。

終わりに、本研究についてご討論いただいた京都大学山田敏郎教授に感謝の意を表します。また、本研究

の実施にあたり，卒業研究として協力された当時岐阜大学学生箕浦弘雄君に感謝します。

(昭和50年11月21日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば, Levy, J.C., and G.M. Sinclair, Proc. ASTM, **56**, 866 (1955).
- 2) Oates, G., and D. V. Wilson, Acta Metallurgica, **12**, 21 (1964).
- 3) 安藤善司, 戸梶恵郎, 中嶋正男, 材料, **23**, 765 (1974).
- 4) 日本材料学会, シンポジウム「疲労における最近の諸問題」講演論文集, 156 (1975).
- 5) Wilson, D V., and B. Mintz, Acta Metallurgica, **20**, 985 (1972).
- 6) 西谷弘信, 西田新一, 日本機械学会論文集, **39**, 1385 (1973).
- 7) 日本材料学会, シンポジウム「疲労における最近の諸問題」講演論文集, 71 (1975).
- 8) 清家政一郎, 北岡征一郎, 高 行男, 日本機械学会論文集, **40**, 1819 (1974).