高張力鋼の疲労過程における残留応力の挙動 (I)*

神 崎 文 暁** 縄 田 望*** 北 川 孟**

The Residual Stress Behavior in Fatigue Process of
High Tensile Strength Steels (No. 1)

by

Fumiaki KANZAKI, Nozomi NAWATA and Hajime KITAGAWA

(Chiba Research Laboratory, Kawasaki Steel Co., Ltd., Chiba)

The pulsating tension test by means of a Losenhausen type fatigue machine, (where maximum tensile stress is 35 kg/mm², and minimum tensile stress is 4 kg/mm²) was performed of the 50 kg/mm² high tensile strength steel. And we measured surface residual stress at $N=10^5$, 2×10^5 , 3×10^5 , 4×10^5 , 5×10^5 , 7.5×10^5 , 10^6 , 2×10^6 , 3×10^6 , breakdown, (where N means the cycles to fracture)

To determine the surface residual stresses, we used parallel beam X-ray diffraction method.

As our result, at the center of the specimen, the behavior of the surface residual stress relating to stress repetitions showed the resembled inclination as reported before by other authors using other fatigue machines.

The relations between the surface residual stresses and the stress repetitions of other grade of high tensile strength steels (especially, the tempered high tensile strength steels) remain to be confirmed hereafter.

(Received Sep. 5, 1966)

1 緒 言

日本材料学会X線材料強度部門委員会の共同研究である、「疲労のX線的研究とそれによる疲労寿命の予見，ならびに破壊事故原因に関する共同研究」の研究(B)において，高張力鋼の疲労過程のX線の解析を行なっている。

本来，70，80 kg/mm²級の調質鋼の疲労過程のX線の挙動が，大いに興味のあるところであるが，この研究は，その第1報として，50 kg/mm²級の鋼板について解析した。

X線の解析条件としては，平行ビーム・ディフラクトメータ法であり，照射面積などに従来と異なるこ

ろがあるが今まで見受けられるものは，ほとんど細束X線技術を用いた写真法であると思われる。「本解析条件で行なった場合の結果」として報告し，「共同研究」の主旨に沿いたい。

2 実 験 条 件

2・1 材料の種別および名称

(分類) 高張力鋼の疲労過程
(種別) 50 kg/mm²高張力鋼
(規格) KH-36

2・2 化学組成

Table I に示す。

Table I. Chemical composition.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Cu	Ni	Mo	Al
≤0.20	≤0.15	≤1.50	≤0.35	≤0.040	≤0.30	≤0.010	—	—	—	—

2・3 材料の状態と材質

Nb-Cr 系セミキルド鋼

10mm厚の圧延のまま

2・4 機械的性質

Table II に示す。

Table II. Mechanical properties of the specimen.

	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)	Bend test (R=1.5t)	Sharp (kg-m/cm ²)
Spec.	≥36	≥50	≥17			$E_0 \geq 3.5$
Sample						
L	43.6	55.7	20	78	Good	13.8
C	44.3	55.1	21	80	Good	8.9

* 原稿受理 昭和41年9月5日

** 正 会 員 川崎製鉄(株)技術研究所 千葉市川崎町

*** 川崎製鉄(株)技術研究所 千葉市川崎町

2・5 試験片の形状, 寸法, 仕上

Fig. 1 に示す.

Fig. 1. Specimen (Thickness; 10mm).

なお表面は, 研摩してスケールを除去した後, 仕上研摩まで行ない, 10%硝酸アルコールで腐食した.

2・6 疲労試験機の種類, 名称, 形式, 容量, および運転速度

「引張り-圧縮型疲労試験機」

ロウゼンハウゼン LUR 型 60t/40t

静的最大荷重: 60 t

動的最大荷重: 40 t

運転速度: 666 rpm

2・7 試験温度: 室温

周囲ふん囲気: 大気中

2・8 S-N 線図

Fig. 2 に示す. ただし, この図は, 黒皮のまま (圧延

Fig. 2. S-N Curve of the specimens.

スケールを除去しない状態) の試料についてとったものである.

2・9 実験方法

上記の試験片で, 公称 $35 \text{ kg/mm}^2 \leftrightarrow 4 \text{ kg/mm}^2$ の片振疲労試験を行ない,

$N=10^5, 2 \times 10^5, 3 \times 10^5, 4 \times 10^5, 5 \times 10^5, 7.5 \times 10^5,$

$10^6, 2 \times 10^6, 3 \times 10^6$, 破断,

の各時点で, Fig. 3 に記入してある位置の残留応力の測定を行なった.

Fig. 3. Radiation area in measurement of residual stress.

なお, 設定荷重は, 平行部 (図中, (2)および(3)の点) における値であり, 同図中, (1)および(4)の点の実測荷重は, それぞれ,

$$\sigma_{(1)} = 30.5 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{(4)} = 30.5 \text{ kg/mm}^2$$

である.

2・10 X線実験

平行ビーム・ディフラクトメータ法

ターゲット: Cr, line-focus

電圧および電流: 35kVp, 7.5mA

(211) 面回折線

照射面積: 8 mm × 7 mm

試料は揺動せず

残留応力は $\sin^2 \phi$ 法 ($\phi=0^\circ, 15^\circ+\eta^\circ, 30^\circ+\eta^\circ, 45^\circ+\eta^\circ$ の4点) より決定.

測定時のふん囲気温度: 25°C.

3 結果の整理

試験条件の明細を, Table III に示す.

繰返し数: N に対する各点の残留応力の変化の模様を, Fig. 4 に示す.

Table III. Fatigue test condition.

Speed N (Schedule)	10^5	2×10^5	3×10^5	4×10^5	5×10^5	7.5×10^5	10^6	2×10^6	3×10^6	Break down
333rpm	$N=1800$	$N=102600$	$N=202300$	$N=301500$	$N=401800$	$N=502000$	$N=752400$	$N=1001830$	$N=2002200$	$N=3002000$
Arrival at settled load	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
500rpm	8000	103900	204200	303700	403800	504250	753500	1003250	2004500	3003150
666rpm	100000	200000	300000	400000	500000	750000	1000000	2000000	3000000	4138580
Stop	100550	200560	300610	400590	500590	750620	1000680	2000580	3000600	"

Fig. 4. Relation between residual stress and stress repetitions.

4 考 察

Fig. 4 の上の図を見ると、平行部においては、疲労初期に圧縮残留応力が発生し、その後、 $N=5 \times 10^5$ 近傍より圧縮残留応力が、その絶対値を急激に減じ、疲労破壊寸前に若干圧縮残留応力の増加が見られる。

テーパ部の中央においては、平行部ほど顕著な傾向は見られないが、やはり疲労初期において若干の変動が見られる。

平行部における残留応力の挙動に若干の考察を加える。

Chalmers¹⁾によると、一方向負荷と違って、繰返し負荷の場合は、ひずみ硬化が、全疲労寿命の数パーセント以内に飽和することが、いままでの研究における共通の特徴であると報告されている。Bullen²⁾らによると、繰返し負荷の場合、一方向負荷と違って表面と内部とのすべり帯に差がある。まず、すべりは不均質であり、塑性変形の増加とともにバンドの数は結晶表面をおおうように増加し、その中から、あるバンドが強くなる。Alden と Backofen³⁾は、すべり帯の強化の始まりと、急速なひずみ硬化が止まる段階とが一致することを見いだした。Wood⁴⁾らの報告によると、 10^6 サイクルの次数の低応力疲労においては、intrusion (はいり込み)が、密なすべり帯に沿って伝ばし、割れ発生とみなされるところの single-grain slip band cracks は疲労寿命の最初の10%以内で現われる。疲労寿命の10%から90%までで、これらの初期割れは、grain から grain に成長し、最後の10%において、巨視的割れを形成するまでつながる。

割れ発生の機構および割れ伝ばの機構に関しては、

種々の仮説が設けられているが⁵⁾、われわれの場合の疲労過程における残留応力の挙動は以下のように説明される。

まず、疲労初期における圧縮残留応力の発生は、急激なひずみ硬化に起因しているものと思われる (この試験は、引張片振疲労であり、一方向引張試験のとき、表面には圧縮の残留応力が発生することからも推定される)。それに続く圧縮残留応力の急激な減少は、表面の intrusion の発達によるマイクロクラックの発生によるものであろう。このことは、すでに、平、本田⁶⁾らによって報告されている。

さらに、疲労破壊後において、若干、圧縮残留応力が増加することは、引張塑性変形の影響であろう。

5 総 括

本試験は、50キログラム高張力鋼をロウゼンハウゼン型疲労試験機で、引張片振疲労を行ない、平行ビーム・ディフラクトメータ法で、残留応力の測定を行なった。

応力の小さいテーパ部においては、顕著な傾向を示さなかった。しかし、疲労破壊をした平行部の残留応力は、繰返し数 N に対し、従来からみられる他の疲労試験の結果と、同様な傾向を示した。

しかし、この傾向が普遍のものかどうかを確認するには、一方では、他の鋼種について試験し、残留応力の測定を行なうことと、他方では、割れ発生や、割れ伝ばの機構を微視的に研究する必要がある。

最終的には、この手段による疲労寿命の予知が可能かどうか問題となる。

(昭和41年7月14日 日本材料学会第5回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Chalmers, B., Progress in Materials Science, The Fracture of Metals Pergamon Press 38 (1963).
- 2) Bullen, F.P., A.K. Head, and W.A. Wood, Proc. Roy. Soc. A216 (1953).
- 3) Alden, T.H., and W.A. Backofen, Acta Met., 9 (1961).
- 4) Wood, W.A., Fracture, (1959), John Wiley & Sons, New York.
- 5) Kennedy, A.J., Processes of Creep and Fatigue in Metals, 331 (1963), John Wiley & Sons, New York.
- 6) 平修二, 本田和男, 材料試験, 11, 699 (1962).