高温疲労における運転休止および荷重変動の影響*

遠 藤 吉 郎**

The Effects of Rest and Change of Stressing on the High Temperature Fatigue Life

by

Kichiro ENDO

(Faculty of Engineering, Kyoto University)

Rotary bending fatigue tests were conducted at 500°C, using annealed 0.54% C-steel, to investigate the effects on fatigue lives by rest in the midst of a run and also changing of stress level in two steps. The fatigue lives are prolonged by twenty hours' rest at 500°C at various cycle ratios R . Especially, when the rest is given at $R=70\%$, the fatigue life is made longer as much as 37% than the case where the fatigue damage is considered to be fully recovered by annealing effect during the rest, the specimen being equalized to the virgin material. This may be due to the partial recovery of fatigue damage and aging effect during the rest period at high temperature. The results of varying stress tests do not obey the Miner's criterion, the life ratio, or the so-called cumulative cycle ratio, L being larger or smaller than unity at different cycle ratio R . However, the damage ratio D for tests in which lower stress is applied first is always less than the one where higher stress is applied first. The relation of cycle ratios *vs.* life ratios and damage ratios show similar figure for both the rest test and varying stress test, and the difference of the damage ratios between each test corresponds to the strengthened rate during the rest period.

(Received May 20, 1961)

1. 緒 論

高温疲労の研究は相当に進められているが、実験室の試験結果と実際の差は室温におけるよりはなはだしいと考えられる。室温においては一般に応力繰返速度や運転休止の疲労強度に及ぼす影響はほとんど認められないが、高温においては繰返速度が大きい影響をもつことが知られている。したがって、運転休止も影響をもつことが考えられるが、この問題についての研究は少ない。

Berry, その他は析出の効果をもたない純 Al を用いて回転曲げ試験を行ない、室温での疲労試験の途中、高温で運転休止することによって寿命は延びるが、高温疲労試験の途中、室温で運転休止することによって¹⁾は寿命の変化が認められなかった。平, その他は 0.15% C 炭素鋼(焼なまし)について、高温における定ひずみ回転曲げ疲労試験を行ない、途中その温度のままで運転休止をした結果、450°C においては運転休止の影響は認められず、350°C にて運転休止により寿命がわず²⁾か延長している。また同氏は 13Cr 鋼に対して同

様な試験を 450°C で行なって、耐久限度には運転休止は影響を示さないが、寿命は著しく増加することを認め、前記炭素鋼においては高温疲労による材質の強化が少なかったが、13Cr 鋼においてはこの強化が大きいことが、結果の相違となって現われたとしている。

筆者らは 0.14% C 炭素鋼(焼ならし)について、500°C で回転曲げ疲労試験を行ない、その途中でその温度のまま運転休止を行ない、寿命が著しく増加する結果を得た。また運転休止を室温で行なったときも、冷却、加熱の時間中、相当に高温にさらされているので、程度は小さくなるが、やはり寿命が延びている。また寿命の 1/2 ごとに高温運転休止を繰り返す試験を行ない、これらの結果に対して、硬度変化で表わされる時効との関係で説明を試みた。

このように、高温疲労における運転休止の影響については、まだ充分に研究されていないので、ここでは 0.54% C 炭素鋼について同様な試験を行ってみた。

変動荷重または重複荷重における疲労強度については、室温の試験は数多く行なわれてきているが、高温疲労においてはほとんど手がつけられていない。しかし、室温で研究が必要であったのと同じ理由で、高温においても研究されるべきである。SAE 4130 鋼につ

* 原稿受付 昭和36年5月20日、当協会第10期総会(創立10周年記念)講演会にて講演(昭36.5)

** 正員 京都大学工学部

いて試験を行ない、Miner 説あるいは Henry 説との比較を行なっている研究がみられるが、筆者らは前記運転休止の試験と同一の材料について重複荷重の高温疲労試験を行ない、これらの結果を総合して高温疲労における被害について考察した。

2. 試験方法および試験結果

試験に用いた材料は S55C を 800°C で 1 時間焼なましたものである。その化学成分を Table 1 に示す。試験片は運転休止、変動荷重の各試験ごとにそれぞれ 1 本の 5 m 棒材から採取したものであって、その室温における機械的性質を Table 2 に示す。疲労試験片の形状は Fig. 1 に示すものであって、20R の最小断面部はエンドレスのサンドベルトを用いて軸方向に研磨し、円周方向には切削痕を残さないようにした。

運転休止の試験には片持はり回転曲げ疲労試験を用い、試験片両端には耐熱鋼製のチャックを介して試験機に取りつける。回転速度は 1890 rpm である。変動荷重の試験にはチャック部を耐熱鋼で改造した小野式回転曲げ疲労試験機を用い、回転速度は 2030 rpm である。

温度調整は試験片の温度分布および試験片表面と熱電対先端の距離による温度変化を検定したのち、試験片表面より 3 mm の距離にアルメルクロメル熱電対を位置させて、電位差計式温度調節器を用いて行なった。電気炉の加熱を開始して 2 h で試験温度の 500°C に達したのち、30 min 空転を行なって温度を安定させ、その後荷重をかける。

片持回転曲げ試験における S-N 曲線を Fig. 2 に示す。称応力 $\sigma = 23 \text{ kg/mm}^2$ における寿命の対数平均値として $N = 9.62 \times 10^5$ が得られた。この寿命の 25, 50, 70 % の繰返数 n_1 に達したとき試験機を停止し、500°C で 20 h 休止したのち、再び同一荷重で運転を開始して破壊までの繰返数 n_2 を求めた。両繰返数の和 $(n_1 + n_2)$ を Fig. 2 に示す。なお、試験結果を Table 3 に表示した。同表の $\log N$ および $\log(n_1 + n_2)$ の標準偏差をみると、この種の試験としては相当な

精度をもっていることが知られる。

小野式回転曲げ試験における S-N 曲線を Fig. 3 に示す。Fig. 2 の S-N 曲線と比較すると、少しずつれているが、この原因は素材丸棒の材質の差のほか、試験機の相違、試験速度、応力勾配、温度分布の差異などによるものと考えられる。称応力 $\sigma_1 = 25 \text{ kg/mm}^2$ における寿命の対数平均値として $N_1 = 8.96 \times 10^5$ が得られた。この寿命の 30, 50, 70 % の繰返数 n_1 において、引きつづいて 2 次応力として $\sigma_2 = 30 \text{ kg/mm}^2$ に変化させて破壊までの繰返数 n_2 を求める試験を行なう。また $\sigma_1 = 30 \text{ kg/mm}^2$ における寿命の対数平均値 $N_1 = 9.15 \times 10^4$ の 30, 50, 70 % の繰返数 n_1 において引きつづいて 2 次応力として $\sigma_2 = 25 \text{ kg/mm}^2$ に変化させて破壊までの繰返数 n_2 を求める試験を行なう。これらの試験結果を Table 4 に示した。

3. 試験結果の考察

運転休止の試験結果を繰返数比 R に対し、寿命比 L 、被害率 D によって示すと、Table 5 が得られ、Fig. 4, 5 の実線曲線ようになる。ここに寿命比とは運転休止したときの破壊までの総繰返数 $(n_1 + n_2)$ と、連続運転における破壊繰返数 N との比 $L = (n_1 + n_2)/N$ であって、運転休止による寿命の延びの割合を示す。また

Fig. 1 Test specimen

Fig. 2 Fatigue lives of rest tests at 500°C

Table 1 Chemical composition of the material (%)

Material	C	Si	Mn	P	S
S55C	0.54	0.25	0.80	0.016	0.029

Table 2 Mechanical properties at room temperature of the material annealed at 800°C for 1 h

Test specimen	σ_{so} (kg/mm ²)	σ_{su} (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	σ_T (kg/mm ²)	δ (%)	ψ (%)
For rest test	34.8	34.0	65.9	108.0	30	49
For varying load test	35.2	34.5	67.0	109.2	27	47

被害率とは休止後再試験を行なうまでの履歴による休止後の寿命の減少の割合 $D=(N-n_2)/N=1-n_2/N$ である。Fig. 4 において、 45° の直線は運転休止によってそれまでの疲労被害が完全に回復し、処女材と同じになった場合を示す。試験点は3点であるが、繰返数比0%および100%においては運転休止がないことに一致するので、寿命比は当然100%であり、図の実線のような曲線が求められる。その他の繰返数比に対

Table 3 Results of rest tests at 500°C

Test No.	σ (kg/mm ²)	N	$\log N$
R-11	23	8.27×10^5	5.918
R-12	"	5.47×10^5	5.738
R-13	"	1.69×10^6	6.228
R-14	"	1.12×10^6	6.049
Logarithmic mean value		9.62×10^5	5.983
Standard deviation			0.179

Test No.	σ (kg/mm ²)	n_1	Cycle ratio $n_1/N(\%)$	n_1+n_2	$\log (n_1+n_2)$
R-16	23	2.40×10^5	25	4.90×10^5	5.690
R-17	"	"	"	3.27×10^6	6.515
R-19	"	"	"	9.85×10^5	5.993
R-25	"	"	"	8.71×10^5	5.940
R-26	"	"	"	1.19×10^6	6.076
R-28	"	"	"	1.63×10^6	6.212
R-32	"	"	"	1.67×10^6	6.223
Logarithmic mean value				1.24×10^6	6.093
Standard deviation					0.240
R-21	23	4.81×10^5	50	1.23×10^6	6.090
R-24	"	"	"	1.72×10^6	6.236
R-27	"	"	"	1.04×10^6	6.017
R-31	"	"	"	1.18×10^6	6.072
R-37	"	"	"	1.51×10^6	6.179
Logarithmic mean value				1.32×10^6	6.119
Standard deviation					0.077
R-20	23	6.73×10^5	70	3.47×10^6	6.540
R-29	"	"	"	1.59×10^6	6.202
R-30	"	"	"	1.14×10^6	6.057
R-33	"	"	"	2.45×10^6	6.389
R-35	"	"	"	2.00×10^6	6.301
R-36	"	"	"	2.03×10^6	6.308
Logarithmic mean value				1.99×10^6	6.299
Standard deviation					0.149

しては、寿命比は100%以上であり、運転休止によって寿命が延長されている。特に $R=70\%$ においては顕著であって、運転休止によってそれまでの被害が完全に回復したと考えるよりも、更に36.8%強化されていることがみられる。Fig. 5 によっても、かえって負の被害を生じていることが明らかに知られる。

この結果の信頼性を統計的に検討してみると、Table 6 のようになる。対数正規分布としての等分散性の検定は

$$F = \frac{n_i}{n_i - 1} S^2 / \frac{n}{n - 1} S^2 \geq F_{\alpha, n_i - 1}^{n - 1}$$

により、また平均値の差の検定は

$$t = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}}{\sqrt{n_i S_i^2 + n S^2}} \sqrt{\frac{n_i n (n_i + n - 2)}{n_i + n}} \geq t_{\alpha, n_i + n - 2}$$

による。ここに S^2 は標本分散、 n は標本の大きさ、 $\bar{x}$ は標本平均値であって N あるいは $(n_1 + n_2)$ の対数値の平均である。運転休止したものについては i なるサフィックスを付す。Table 6 に見るように $\alpha=0.05$ の有意水準で、連続運転したものとの間に等分散性をもち、 $R=70\%$ にては $\alpha=0.05$ の有意水準で平均値に差のあることが認められた。

変動荷重による試験結果を Table 7 に表示し、低応力より高応力に荷重増大させた場合を Fig. 4, 5 の一点鎖線で、高応力より低応力に荷重降下させた場合を同図の点線で示す。ここで1次応力のみの寿命を N_1 、2次応力のみの寿命を N_2 とし、1次応力を n_1 回繰り返したのち2次応力が n_2 回繰り返されて破壊したとき、寿命比は $L = n_1/N_1 + n_2/N_2$ で、いわゆる累積繰返数比のことである。被害率とは荷重変動までの繰返しによる荷重変動後の破壊繰返数の減少の割合 $D=(N_2 - n_2)/N_2 = 1 - n_2/N_2$ である。

これらの曲線は運転休止の場合と全く似た傾向を示している。Fig. 4 の $L=100\%$ の横軸は Fig. 5 では 45° 傾いた直線で示され、 $\sum n_i/N_i = 1$ で破壊するという Miner の説を示しているが、いまの高温疲労の

Fig. 3 S-N curve of the material for varying load tests at 500°C

場合、この考え方は成立していない。一般に室温の変動荷重試験でいわれていることであり、また高温においても R_{ey} によって述べられているのは、荷重降下のときは累積繰返数比、あるいは寿命比 L が 1 より小さく、荷重増大のときは L が 1 より大きい。筆者らの試

験でも大体そのような傾向は認められるが、繰返数比 R によってはそうならない範囲もある。しかし、荷重増大のときは荷重降下のときより寿命比 L が大きく、したがってまた被害率 D が小さいことは明らかに見られる。

Table 4 Results of varying load fatigue tests at 500°C

Test No.	σ (kg/mm ²)	N	$\log N$
M-6	25	9.41×10^5	5.974
M-9	"	5.35×10^5	5.728
M-10	"	7.50×10^5	5.875
M-12	"	1.71×10^6	6.233
Logarithmic mean value		8.96×10^5	5.953
Standard deviation			0.184

Test No.	σ (kg/mm ²)	N	$\log N$
M-13	30	6.94×10^4	4.841
M-14	"	1.20×10^5	5.080
Logarithmic mean value		9.15×10^4	4.961
Standard deviation			0.120

Test No.	1st stress				2nd stress				
	σ_1 (kg/mm ²)	N_1	n_1	n_1/N_1 (%)	σ_2 (kg/mm ²)	N_2	n_2	$\log n_2$	n_2/N_2 (%)
M-19	25	8.96×10^5	2.69×10^5	30	30	9.15×10^4	3.69×10^4	4.567	
M-20	"	"	"	"	"	"	6.08×10^4	4.784	
M-22	"	"	"	"	"	"	7.77×10^4	4.890	
M-31	"	"	"	"	"	"	3.31×10^4	4.520	
M-33	"	"	"	"	"	"	1.25×10^5	5.097	
M-35	"	"	"	"	"	"	1.12×10^5	5.050	
M-41	"	"	"	"	"	"	6.48×10^4	4.811	
M-43	"	"	"	"	"	"	2.45×10^4	4.389	
Logarithmic mean value							5.80×10^4	4.764	63.3
Standard deviation								0.237	
M-58	25	8.96×10^5	4.48×10^5	50	30	9.15×10^4	3.69×10^4	4.567	40.3
M-29	25	8.96×10^5	6.28×10^5	70	30	9.15×10^4	3.24×10^4	4.510	
M-30	"	"	"	"	"	"	2.83×10^4	4.452	
M-34	"	"	"	"	"	"	2.00×10^5	5.301	
M-46	"	"	"	"	"	"	1.91×10^5	5.281	
Logarithmic mean value							7.70×10^4	4.886	84.1
Standard deviation								0.405	
M-16	30	9.15×10^4	2.74×10^4	30	25	8.96×10^5	7.82×10^5	5.893	
M-23	"	"	"	"	"	"	1.32×10^6	6.120	
M-37	"	"	"	"	"	"	1.51×10^5	5.179	
M-39	"	"	"	"	"	"	0.87×10^4	3.939	
Logarithmic mean value							1.92×10^5	5.283	21.4
Standard deviation								0.850	
M-55	30	9.15×10^4	4.58×10^4	50	25	8.96×10^5	1.69×10^4	4.228	
M-56	"	"	"	"	"	"	2.87×10^4	4.458	
Logarithmic mean value							2.20×10^4	4.343	2.5
Standard deviation								0.115	
M-15	30	9.15×10^4	6.40×10^4	70	25	8.96×10^5	1.18×10^6	6.072	
M-17	"	"	"	"	"	"	2.13×10^4	4.328	
M-18	"	"	"	"	"	"	5.40×10^5	5.732	
M-38	"	"	"	"	"	"	5.11×10^5	5.708	
Logarithmic mean value							2.88×10^5	5.460	32.1
Standard deviation								0.619	

変動荷重の試験では、荷重変動時に運転休止をしていないので、Fig. 5 で示される被害率はそのまま高温疲労における被害と強化との差を示していると考えられる。1次荷重と2次荷重の大小の順序によって被害率が異なって現われているが、同一レベルの荷重が引続いてかかるときは、被害率はこの両者の中間にあると考えられる。

高温疲労においては試験中、表面酸化、疲労被害の

Table 5 Summary of rest tests under $\sigma=23 \text{ kg/mm}^2$, life of continuous test $N=9.62 \times 10^5$

Cycle ratio $R=n_1/N$ (%)	n_2	n_2/N (%)	Life ratio $L=(n_1+n_2)/N$ (%)	Damage ratio $D=(1-n_2)/N$ (%)
25	1.00×10^6	104.0	128.9	-4.0
50	8.39×10^5	87.1	137.2	12.9
70	1.32×10^6	137.2	206.8	-37.2

Fig. 4 Life ratio L vs. cycle ratio R curves

蓄積および試験温度の焼なまし作用による被害の一部の回復と軟化，ならびに時効による硬化とが同時に進む。この進み方には遅速があり，比較的初期には疲労被害の進み方のほうが強化より大きい，後期においては逆になる範囲があると考えれば，この曲線の説明

Fig. 5 Damage ratio D vs. cycle ratio R curves

Table 7 Summary of varying load fatigue tests $N=8.96 \times 10^5$ at $\sigma=25 \text{ kg/mm}^2$, $N=9.15 \times 10^4$ at $\sigma=30 \text{ kg/mm}^2$

1st stress		2nd stress		Life ratio $L=(n_1/N_1 + n_2/N_2)$ (%)	Damage ratio $D=(1 - n_2/N_2)$ (%)
σ_1 (kg/mm^2)	n_1/N_1 (%)	σ_2 (kg/mm^2)	n_2/N_2 (%)		
25	30	30	63.3	93.3	36.7
25	50	30	40.3	90.3	59.7
25	70	30	84.1	154.1	15.9
30	30	25	21.4	51.4	78.6
30	50	25	2.5	52.5	97.5
30	70	25	32.1	102.1	67.9

Table 6 Significance tests for logarithmic mean values between lives of continuous test and rest tests

Test	n_i	$\bar{x}_i$	S_i^2	F	F_0 $\alpha=0.05$	t	t_0	
							$\alpha=0.05$	$\alpha=0.3$
Continuous test	4	5.983	0.0322					
Rest at 25 % of N	7	6.093	0.0578	1.58	8.94	0.72	2.26	1.10
Rest at 50 % of N	5	6.119	0.0059	5.80	6.59	1.35	2.37	1.12
Rest at 70 % of N	6	6.299	0.0223	1.60	5.41	2.70	2.31	1.11

はできるであろうが、室温の変動荷重の試験でも同じような結果がよくみられ、まだ充分にわかっていないというべきであろう。運転休止中は疲労被害の蓄積が止められ、それまでに蓄積された被害のうち一部は回復し、しかも時効は速度が遅くなるかもしれないが、続けられている。この運転休止による改善が、Fig. 5に見られた変動荷重と運転休止の両試験の被害率 D の差であり、運転休止試験における曲線が変動荷重試験の曲線とよく似た形をしていたことが説明される。また運転休止によっても回復しない被害がこの被害曲線と似た形をもっており、かつ材質の強化が単調に飽和していくと考えると、前報で説明したのと同様にFig. 6の影を施した部分を Fig. 4 の 45° の直線に重ねることによって、運転休止による疲労寿命の増加の状態が説明される。

運転休止試験における試験片表面層のマイクロビッカ

Fig. 6 Schematic diagram of increase of strength and damage unrecoverable in annealing

Fig. 7 Variation of hardness of surface layer of test pieces during rest tests

ース硬度の変化状態を Fig. 7 に示す。実線は連続試験における硬度変化であって、点線は運転休止による硬度変化および運転休止後再試験中の硬度変化を示す。これらの測定点はそれぞれ別の試験片を用いて、縦断面内で表面より 0.5 mm 内部において測定されたものである。各試験に対して破断後の硬度にはほとんど差が認められないが、連続運転においては硬度が一度増大したのち、 $R=70\%$ で軟化している。このことは室温の疲労試験にもみられることであるが、運転休止により再び硬度が増大し、その後あまり変化していない。 $R=50\%$ での運転休止によつては硬度低下がみられ、また $R=25\%$ での運転休止ではほとんど硬度が変化していない。このような硬度の変化は運転休止試験の被害率 D の変化と対応しているようであるが、連続運転による硬度変化などは前報の低炭素鋼による測定結果と比べると小さいものであって、硬度変化だけを問題にすることは無理がある。

4. 結 論

0.54% C炭素鋼の焼なまし材について、 500°C で回転曲げ疲労試験を行ない、途中運転休止および応力段階を変化させて寿命の変化を測定した。 500°C で20 h運転休止することによって、寿命は常に延びるが、特に繰返数比 $R=70\%$ で運転休止したときは、運転休止することによって被害が完全に回復し処女材にかえったと考えたときより更に37%も寿命が延びている。これは運転休止中の疲労被害の一部回復と時効によるものと考えられる。変動荷重試験にては Miner の説に従わない。寿命比、すなわちいわゆる累積繰返数比 L は荷重変動時の繰返数比 R によって1より大になったり、小になったりする。しかし、小荷重より大荷重に変化させたときは、大荷重より小荷重に変化させたときより常に被害率 D が小さい。 L および D と R との関係は運転休止の場合とよく似た傾向にあり、変動荷重試験の D は高温における疲労被害を表わすものと考えられるので、それと運転休止試験の D との差は、運転休止中の改善に相当することがわかる。

この研究を行なうにあたって寺山成明、丸川琢磨の両君の実験に負うところが多い。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J.W. Berry, NASA MEMO, 11-21-58 W, p. 20 (1958)
- 2) 平, 村上, 小寺沢, 機械学会論文集, 25, 159, 1 070 (1959)
- 3) 平, 村上, 小寺沢, 材料試験, 9, 85, 606 (1960)
- 4) K. Endo, Proc. 3rd Japan Congress on Testing Materials, p. 64 (1960)
- 5) W.K. Rey, NACA TN, 4 284, p. 1 (1958)
- 6) 河本, 中川, 藤原, 材料試験, 10, 91, 294 (1961)