高温高速回転曲げ疲労*

河本 実** 田中道七*** 田淵修造****

High Frequency Fatigue Test at Elevated Temperatures

by

Minoru KAWAMOTO, Tsuneshichi TANAKA and Shuzō TABUCHI
(Kyoto University) (Ritsumeikan University) (Sumitomo Electric Industries Ltd.)

It is generally admitted that, at the elevated temperatures, the fatigue strength of materials is affected more or less by the frequency of stress reversals, and numerous investigations have been made in this respect. The experimental results indicate that, at the temperature where the creep phenomenon of materials is predominant, the number of stress cycles before failure increases, as the frequency becomes higher. However, the investigations have been conducted usually in the range of frequency up to 3000 cpm, and none of them exceeding a frequency of 10 000 cpm.

The purpose of this study is to obtain the fatigue strength of steels at elevated temperatures in a high frequency range of 7 500~15 000 rpm. The materials used here are 0.21 % carbon steel and Cr-Mo-V steel. Cantilever type rotating bending fatigue test was conducted at room temperature, 300°C and 500°C.

Experimental results obtained are as follows :

At room temperature, the fatigue strengths indicate no difference for both frequencies of 7 500 and 15 000 rpm, but at the temperature of 300°C and 500°C, the discrepancy of the fatigue strength based on the different frequencies of 7 500 and 15 000 rpm is observed distinctly for both steels, and the frequency of 15 000 rpm causes a smaller number of stress cycles before failure than that of the frequency of 7 500 rpm.

This results have a different tendency against those obtained by past investigations carried out at comparatively low frequencies of stress reversals.

In conclusions, the fatigue strength of materials at elevated temperatures does not increase in proportion to the frequency of stress reversals, but decreases rather for high frequencies as adopted in the present investigation.

Together with the experiments mentioned above, the deflection of specimens in the course of the fatigue test was observed with the micro-scope. The observation shows no large alteration of the deflection for most of the fatigue life except for the case of high stress level. But as the temperature increases, the estimated plastic strain occurring to the specimen reduces gradually, and in particular, for 0.21 % carbon steel the plastic strain is almost eliminated at the temperature of 500°C, and the fatigue failure is seemed to be fairly brittle (Received July 8, 1960)

1. 緒 言

常温および高温を通じて、荷重の繰返速度が材料の疲労強度に及ぼす影響については、従来より数多くの研究が行なわれている。常温においては繰返速度が変わっても、同じ応力振幅に対して破壊までの繰返数はあまり変化しないのに対して、高温になると繰返速度によって破壊までの繰返数に著しい差異が現われ、一般に低速度のほうが高速度におけるよりも小さい繰返

数で破壊すること、言いかえると疲労強度は常温におけるように繰返数のみによって決まらず、応力の負荷時間が大きな影響をもつことが報告されている。^{1)~6)}

しかしながらこのように高温疲労強度に及ぼす繰返速度の影響を調べた従来の実験においては、最高の繰返速度は普通 2 500 cpm 以下であり、特に繰返速度をめ高た場合においても 8 000 cpm が限度であって、10 000 cpm を越える繰返速度における高温疲労試験はまだ行なわれていない。

本研究はこのような繰返速度の高い範囲における高温疲労試験を実施し、材料の高温疲労強度がこの種の

* 原稿受付 昭和35年7月8日
** 正員 京都大学工学部
*** 正員 立命館大学理工学部
**** 住友電気工業株式会社

高速域において、繰返速度によってどのような影響を受けるかを明らかにするために行なったものである。材料としては0.21% C 炭素鋼と Cr-Mo-V 鋼の2種類を使用し、常温、300°C および 500°C の温度で 7500~15000 rpm の繰返速度で片持回転曲げ疲労試験を行なった。

一方、繰返速度のみならず、材料の疲労強度に及ぼす種々の因子の影響を調べる場合には、それらの条件の下において材料に応力を負荷してより破壊に至るまでの過程を詳細に観察することは後の解析に対しても重要な知識を提供することがさくおる多い。

この点に関して筆者らはさきに報告したように、高温および常温において疲労試験中、試験片に生ずるひずみの測定を行ない、応力1サイクル中に試験片に生ずる塑性ひずみが疲労強度と密接な関係のあることを論じてきた。^{8)~10)}

したがって、本実験においても疲労試験中、試験片先端のたわみの測定を行ない、その破壊までの変化のもようを調べ、またそれらに及ぼす温度や繰返速度の影響についても論じた。

2. 実験材料および実験方法

実験に使用した材料は0.21% C 炭素鋼と Cr-Mo-V 鋼の2種類であって、これらの化学成分を Table 1 に、熱処理および常温における機械的性質を Table 2 に示す。

試験片の形状および寸法は Fig. 1 に示すとおりであって、(a) および (b) は 0.21% C 炭素鋼の試験片で、(a) は常温において、(b) は主として高温における疲労試験に用いたものである。また (c) は常温および高温を通じて、Cr-Mo-V 鋼の試験に使用した試験片である。いずれにおいても試験片にはテーパをつけ、この部分の表面の曲げ応力が軸方向になるべく一様であるようにした。なお試験片は熱処理後機械仕上げし

た。

使用した試験装置を Photo. 1 に示す。試験機は高速片持回転曲げ疲労試験機で、写真中(1)がその駆動用交流変速電動機であり、(2)が増速装置、(10)が潤滑油および冷却水ポンプである。この試験機によって、7500~15000 rpm の任意の試験速度を得ることができる。(3)が試験片加熱用電気炉でニクロム線を用いた1次巻線、2次巻線および補助の加熱装置を内蔵し、1次巻線には常時電流を流し、2次巻線には横河電機製作所製の EK 23 型温度調節装置をそう入している。この装置はクロメル、アルメル熱電対を検出

Fig. 1 Test specimens

Photo. 1 Out view of the testing equipment

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical composition (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.21% carbon steel	0.21	0.25	0.58	0.030	0.042	—	—	—	—	—
Cr-Mo-V steel	0.34	0.24	0.88	0.017	0.014	0.14	1.06	1.13	0.21	0.21

Table 2 Heat treatments and mechanical properties of materials

Material	Heat treatment	Yielding point σ_s (kg/mm ²)	Ultimate strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength on final area σ_T (kg/mm ²)	Elongation ϕ (%)	Reduction of area ϕ (%)
0.21% carbon steel	875°C 1 hr anneal	28.7	51.1	87.1	38.4	54.0
Cr-Mo-V steel	1000°C A.C., 720°C A.C.	63.2	78.8	143.3	29.6	63.1

部とし、電位差計の原理に基づいた不平衡電圧を増幅して差動電動機を駆動し、on-off 方式によって温度制御を行なうものである。(4)は1次および2次巻線の電流を調節する主変圧器であり、(6)は補助の加熱装置の電流を調節する補助変圧器である。試験片の温度測定はクロメル-アルメル熱電対の起電力を高温温度計(7)で読むことによって行ない、(5)はその際の零接点である。(9)は試験片先端のたわみを測定するためのカセットメータで、試験片先端の荷重方向およびそれに直角な水平方向のたわみをそれぞれ測定した。

以上の装置を用いて、0.21% C 炭素鋼については常温、300°C および 500°C の3種類の温度で Cr-Mo-V 鋼については常温および 500°C の2種類の温度で、7500 rpm および 15000 rpm の繰返速度で疲労試験を行ない、更に常温以外の温度においては、上の中間の 11000 rpm の速度における試験も行なった。また上に述べたカセットメータにより、ほとんどの試験片について試験中の垂直および水平方向のたわみの測定を行なった。

この種の高温疲労試験においては、試験片に与えられる荷重は重錘を使用しているためきわめて正確であるが、一方試験中の試験片の温度測定は多少の困難を免れない。本実験においては、試験片の試験部分中央、表面より半径方向に 3 mm 離れた炉内空気温度を測定および制御の基準として使用し、この点に熱電対の先端をおいて静止および運転時におけるこの点の温度と試験片表面の温度との差を充分に検定しておくことにより試験片表面の温度を推定することとした。このような方法による場合、特に繰返速度を変えたときに測定点の温度が同一でも、試験片表面の温度が異なってくるのが考えられるが、この点に関して行なった実験結果の一例を Fig. 2 に示す。図は Cr-Mo-V 鋼を例にとって、この材料の繰返数 $N=10^7$ における疲労強度に近い $\sigma=30 \text{ kg/mm}^2$ の応力を負荷して、500°C の温度で実験した場合で、横軸に試験片の半径方向、表面からの距離をとり、縦軸に試験片表面との温

Fig. 2 Temperature difference vs. distance from surface, Cr-Mo-V steel, 500°C, $\sigma=30 \text{ kg/mm}^2$

度差をとったもので、試験片表面の温度は試験機を急停止させて測定したものである。この図より 7500 rpm と 15000 rpm の繰返速度における炉内の軸直角方向の温度分布にはほとんど差がみられず、表面より 3 mm 離れた点における炉内温度を一定にしておけば試験片表面の温度を所定の値に保ちうることがわかる。

3. 実験結果およびその考察

(I) 応力-繰返数線図

2種の材料について、それぞれの温度および繰返速度で疲労試験を行ない、得られた結果を 0.21% C 炭素鋼については Table 3 に、Cr-Mo-V 鋼については Table 4 に示す。

また、この結果を縦軸に応力 σ をとり、横軸に破壊までの繰返数 N をとって応力-繰返数線図に図示したのが Fig. 3 および Fig. 4 である。ただし、応力 σ はすべて弾性式に基づいた公称応力である。

まず、Fig. 3 の 0.21% C 炭素鋼の場合をみると、常温においては 7500 rpm と 15000 rpm で疲労強度に全く差がみられず、従来のこの程度の速度範囲を含む実験結果と同様、疲労強度は繰返数のみによって決まることを示している。しかるに 300°C になると図より明らかなように、青熱ぜい性のために疲労強度が全

Fig. 3 Stress vs. number of stress cycles to failure 0.21% carbon steel

Fig. 4 Stress vs. number of stress cycles to failure Cr-Mo-V steel

Table 3 Fatigue test results of 0.21 % carbon steel

Temperature T (°C)	Frequency C (rpm)	Stress σ (kg/mm ²)	Number of stress cycles to failure N
R.T.	7 500	36.0	124×10 ³
		34.0	153
		32.0	210
		30.0	807
		28.0	4 710
		27.0	10 000 →
	15 000	32.0	282
		30.0	567
		28.0	5 150
		26.0	6 350 →
300	7 500	43.7	5.5
		42.6	6.6
		41.5	122
		39.3	297
		38.3	455
		37.2	620
		37.2	1 640
		36.6	955
		35.0	10 000 →
		32.8	10 000 →
	11 000	38.0	322
		36.0	547
		34.0	1 300
		32.0	1 750
	15 000	39.3	8.6
		39.3	11.0
		38.3	18.9
		37.0	148
		36.1	738
		35.0	2 130
		33.9	787
		32.8	1 460
		31.7	2 480
		30.6	10 000 →
500	7 500	28.5	25.1
		27.0	39.0
		26.0	531
		25.1	3 550
		24.0	4 370
		23.0	4 480
		22.0	14 500 →
	11 000	27.0	38.1
		25.0	2 270
		23.0	5 490
		22.0	11 200 →
	15 000	28.0	25.4
		27.0	17.8
		25.0	50.5
		23.0	547
		21.0	1 700
		20.0	14 000 →

→ Run out

体として常温より高くなると同時に、繰返速度による疲労強度の差は明瞭に現われ、高い繰返速度におけるほうが少ない繰返数で破壊しており、 $N=10^7$ における疲労強度で比較すると、15 000 rpm と 7 500 rpm で約 4.5 kg/mm² の差を有している。また 11 000 rpm における結果は上の二つの繰返速度のほぼ中間の強度を示している。このような 300°C 付近における低炭素鋼の疲労強度に関する従来の研究結果をみると、繰返速度が高くなるに伴ない、破壊までの繰返数が減少するという結果と、逆に増加するという結果の両方の実験結果がある。また Levy と Sinclair はひずみ時効

Table 4 Fatigue test results of Cr-Mo-V steel

Temperature T (°C)	Frequency C (rpm)	Stress σ (kg/mm ²)	Number of stress cycles to failure N
R.T.	7 500	52.0	46.3×10 ³
		50.0	54.5
		48.0	863
		46.0	651
		44.0	624
		42.0	6 900
		41.0	10 400 →
	15 000	50.0	213
		48.0	388
		46.0	160
		44.0	1 960
		42.0	17 200 →
500	7 500	50.0	2.7
		40.0	26.2
		38.0	253
		35.0	6 190
		34.0	20 900 →
		33.0	11 700 →
	11 000	40.0	51.1
		38.0	84.7
		36.0	803
		36.0	172
		35.0	2 170
		34.0	20 000 →
	15 000	40.0	19.4
		38.0	27.6
		36.0	200
		34.0	1 100
		32.0	1 140
		31.0	5 790 →

→ Run out

の点から最大の破壊までの繰返数¹³⁾を与えるある繰返速度が存在することを論じている。もちろん本実験におけるような高い繰返速度に対しては比較すべき実験結果はないわけであるが、Fig. 3 に見るように、明らかに高速度における強度が低いことから従来の実験結果も含めて、やはりある繰返速度で最大の強度を与える点の存在することが予想される。しかしこの最大の疲労強度がどの程度の繰返速度で起こるかはいまのところ明らかでない。次に 500°C においては疲労強度は全体として常温より低下するが、やはり繰返速度の影響ははっきりと現われる。この場合 7 500 rpm と 11 000 rpm の結果にはほとんど差は認められないが、15 000 rpm になると、図のように破壊までの繰返数は減少し、 $N=10^7$ においては 7 500 rpm に比べて約 2.5 kg/mm^2 の低下を示している。このような高温における従来の実験結果は既に述べたように、更に低い繰返速度においてではあるが、繰返速度が増すにつれて破壊までの繰返数の増加を示しており、本実験の結果と逆の傾向を有している。

一般に耐久限度を越える応力においては試験片に多少の塑性ひずみが生じ、その結果いわゆる弾性履歴現象が現われ、蓄積されたエネルギーが熱となって放散するために試験片の発熱を引き起こす。この種の発熱による試験片の温度上昇は本実験におけるように、繰返速度の高い場合には、著しいものがあることが予想され、事実常温における実験でもかなりの発熱がみられている。このことは当然高温においても考えられるわけであるが、高温における実験には温度制御装置を使用していること、後に述べるようにこの発熱の原因となる塑性ひずみが、高温においては常温に比べて著しく小さいと考えられることなどのために、特に応力の高い場合を除き、この発熱に基づく温度上昇は大きくないと考えられる。事実、前節の Fig. 2 において説明したとおり、 $N=10^7$ における疲労強度に近い応力のもとで速度を変えて行なった温度測定結果はこのことを裏づけている。

以上の結果を考慮すれば、500°C においても、繰返速度が増した場合、疲労強度がそれに伴ってどこまでも上昇するものではなく、このような高速度域においては逆に疲労強度の低下をもたらすことがわかる。

次に Fig. 4 の Cr-Mo-V 鋼の場合をみると、常温においては、実験点の多少のばらつきにもかかわらず、疲労強度に差は認められない。しかし 500°C においては、0.21% C 炭素鋼の場合と同様に繰返速度によって疲労強度は異なり、やはり繰返速度が高くなるにつれて、破壊までの繰返数は減少し、 $N=10^7$ における疲労強度は 15 000 rpm と 7 500 rpm の場合で約 3 kg/mm^2 の差を示している。

結局以上の実験結果より、高温における疲労強度は特に 500°C 付近において繰返速度が増すにつれて、どこまでも増加するものではなく、上の実験結果の示すように、10 000 rpm を越すような繰返速度においては逆に減少する傾向にあり、この点に関して、蒸気タービンその他の高温高速諸機械の強度を従来行なわれてきた比較的速度の低い場合の実験結果から推定することは決して安全側ではないことがわかる。

(II) 応力-たわみ線図

試験片に生ずるたわみの測定は、前節で説明した装置を用いて上の疲労試験中、ほとんどすべての試験片について行なった。Fig. 5 および Fig. 6 は 0.21% C 炭素鋼および Cr-Mo-V 鋼について、各温度における試験片の荷重方向のたわみの変化のようを繰返速度 15 000 rpm の場合を例にとって示したものである。これらの図を比較してみると、いずれの場合においても、特に応力の高い場合やその他一、二の例外を除けば、試験片のたわみは試験中ほとんど変化しないことがわかる。ただ 0.21% C 炭素鋼と Cr-Mo-V 鋼を比較した場合、後者のほうが前者に比べて、たわみが繰返数とともに少しずつ増加し、破断前のたわみの増加が比較的早く始まっているようである。このことはこの Cr-Mo-V 鋼の 500°C における結果に特に顕著に現われて

Fig. 5 Deflection vs. number of stress cycles
0.21% carbon steel

いる。その他の点に関しては、特に温度によってたわみの変化のようが著しく変化するという現象は認められない。他の繰返速度の場合についても同様である。

Fig. 7 および Fig. 8 は上のたわみ測定の結果より全寿命の 50 % におけるたわみを読み取り、この値を各試験片が疲労試験中に示すたわみの代表値とみなしてこれを横軸にとり、縦軸に応力をとって応力-たわみ線図に示したものである。この場合、前節の Fig. 1 に示したように、本実験では 3 種の若干形状の異なる試験片を使用しているため、この種の表示方法によ

って厳密な比較を行なうことはできないが、このことを考慮しても、なおかつ、それぞれの条件の下における応力-たわみ線図の間の傾向を十分に観取することができる。なお図中の直線は疲労試験に先だって行なった、段階的に増加させた繰返荷重試験の結果より求めた弾性線である。まず Fig. 7 の 0.21 % C 炭素鋼の場合をみると、常温においては応力が増すにつれて弾性線からのずれが大きくなっており、試験片表面にかなりの塑性ひずみが生じていることがわかる。しかし、高温になるにつれてこの弾性線からのずれはしだいに小さくなり、500°C においてはほとんど実験点は弾性直線の上ののってしまっている。すなわちこの温度では試験片表面にほとんど塑性ひずみが生じていない状態で破壊に至っているわけで、この点に関してさらに 1860 rpm の速度で小野式回転曲げ疲労試験機によって行なった、同温度でのひずみの測定結果とかなり異なる傾向を示しており、本実験におけるような高い繰返速度の下での高温疲労破壊は非常にぜい性的であると言える。高温において、繰返速度の差に基づくたわみの差はほとんどみられないようであるが、一般に繰返速度の高いほうがごくわずかに少ないたわみを示しているようである。Fig. 8 は Cr-Mo-V 鋼に対する結果であるが、2 種の温度における実験点の弾性直線からのずれはいずれも小さく、常温と高温で 0.21 % C 炭素鋼の場合のような明瞭な差は認められない。なおこれら 2 種の材料に対して、このような塑性ひずみと疲労強度の関係については、特に常温においてくわしい研究を行なったが、その結果については別途報告したとおりである。

また前節で述べたように、試験片のたわみについて

Fig. 6 Deflection vs. number of stress cycles Cr-Mo-V steel

Fig. 7 Stress vs. deflection 0.21 % carbon steel

Fig. 8 Stress vs. deflection Cr-Mo-V steel

上述の荷重方向のたわみと同時に、それに直角な水平方向のたわみの測定も行なったが、この種のたわみは試験片に生ずる塑性ひずみに基づいており、この塑性ひずみの値は、上のように 0.21 % C 炭素鋼の常温の場合を除き、きわめて小さく十分な精度が得られなかったため省略することとする。

4. 結 言

0.21 % C 炭素鋼および Cr-Mo-V 鋼の2種類の材料を用いて、常温、300°Cおよび500°Cの温度で、従来より行なわれていなかった、7500~15000 rpm の高速度範囲で片持回転曲げ疲労試験を行ない、これらの材料の高温疲労強度がこのような高速度範囲において、どのような繰返速度の影響を受けるかを調べた。また同時に試験片のたわみが試験中いかなる変化を示すかについても観察を行なった。

実験の結果、常温においては従来の実験結果と同様、繰返速度の影響は認められないが、高温になると、いずれの材料においても繰返速度が増すにつれて、破壊までの繰返数が減少するという結果が得られた。特に500°Cにおけるこのような結果は、従来より行なわれてきた比較的低速度の高温疲労試験において、繰返速度の高いほうが大なる疲労強度を与えるという結果と反対の傾向を示しており、結局、繰返速度が増した場合、疲労強度はそれに伴ってどこまでも上昇するものではなく、本実験におけるような高い繰返速度では、逆に疲労強度の低下をもたらすことがわかる。

また試験片のたわみの測定結果からは、試験中の試験片のたわみには、特に応力の高い場合を除き、大きな変化はみられないが、Cr-Mo-V 鋼のほうが、0.21

%C 炭素鋼に比べて応力繰返数 n に対する増加の割合が多少大きいようである。このような結果を応力-たわみ線図に図示してみると、特に 0.21 % C 炭素鋼においては温度が高くなるにつれて、応力-たわみ曲線の弾性線からのずれはしだいに小さくなり、500°Cではこれがほとんど弾性直線と一致することから、このような高温および高速度の下での疲労破壊は塑性ひずみをほとんど伴わないぜい性破壊であることが明らかとなった。

最後に本実験に使用した Cr-Mo-V 鋼は日本製鋼所室蘭製作所研究所の下田、渡辺両氏の御好意により、御提供いただいたものであることを記し、心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) H.F. Moor & N.J. Alleman, Proc. ASTM, 31, p. 114 (1931)
- 2) Report of Committee E-9 on Fatigue, Proc. ASTM, 49, p. 522 (1949)
- 3) P.G. Forrest & H.J. Tapsell, Proc. Inst. Mech. Engr., 168, p. 763 (1954)
- 4) 河本, 石田, 覚前, 材料試験, 5, 30, 161 (昭31)
- 5) 平, 小寺沢, 機械学会論文集, 25, 195, 1064 (昭34)
- 6) Dolan, Metal Progress, p. 55 (Mar. 1952)
- 7) P.R. Toolin & N.L. Mochel, Proc. ASTM, 47, p. 677 (1947)
- 8) 河本, 田中, 赤松, 堀川, 材料試験, 8, 74, 837 (昭34)
- 9) 河本, 田中, 機械学会論文集 (昭35)
- 10) 河本, 田中, 日本材料試験協会第9期総会講演会前刷集, 27 (昭35)
- 11) 西原, 村瀬, 機械学会論文集, 17, 61, 107 (昭26)
- 12) N.P. Allen, P.G. Forrest, Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, p. 327 (1956)
- 13) J.C. Levy & G.M. Sinclair, Proc. ASTM, 55, p. 866 (1955)