金属材料の引張疲労変形*

河 本 実** 田 中 道 七** 福 井 洵***

Tensile Fatigue Deformation of Metals

by

Minoru KAWAMOTO, Tsuneshichi TANAKA and Jun HUKUI
(Kyoto University)

One of the authors has reported previously on the fatigue deformation of various steels under repeated bending and torsion. In this report some experiments about the tensile fatigue deformation of the mild steel and 6:4 brass were carried out.

Results obtained are as follows:

(1) Fatigue deformation grows rapidly and reaches certain amount of value at the beginning of stress repetition, and thereafter the continuous increase of deformation can hardly be observed for both materials. But sometimes the discontinuous increase of deformation takes place after considerable repetition of stress cycles under the stress near the endurance limit or above it, and this phenomenon is observed markedly for the mild steel.

(2) For the mild steel which has the apparent yield point in static test, the fatigue yield limit agrees with the static lower yield point. While for the brass which has no such yield point in static test, the fatigue yield limit does not agree with static ones, and is considerably less than it.

(Received Sep. 27, 1958)

1. 緒 言

種々の鋼材の曲げおよびねじり疲労変形についてはさきに報告したが、本研究では、静試験において明瞭な降伏点を有する材料として軟鋼を、明瞭な降伏点を示さない材料として黄銅を用いて引張疲労変形に関する実験を行い、疲労によるこの種の材料の変形機構を調べ、また、疲労降伏限度を求めて静降伏点との関係を明らかにした。

2. 実験材料および実験方法

実験に供した材料は0.21%炭素鋼および6:4黄銅の2種類であって、これらの化学成分をTable 1に、熱処理および機械的性質をTable 2に示した。

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)は軟鋼、(b)は黄銅試験片で、それぞれ寸法は異なるが、試験部分は互に相似な形状を有している。なお、試験片は熱処理後機械仕上げした。

使用した試験機は Haigh 式引張圧縮疲労試験機で繰返速度は約1800rpmである。

試験片の伸びの測定は Fig. 2 に示す装置を用いておこなった。すなわち、試験片3に図のように金具1および2を取り付け、金具1に取り付けられた距離棒

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Symbol	Chemical composition (%)				
		C	Si	Mn	P	S
Mild steel	ヒ-2796	0.21	0.25	0.58	0.030	0.042

Material	Symbol	Chemical composition (%)				
		Cu	Zn	Sn	Pb	Fe
Brass	—	59.74	36.95	1.06	1.82	0.43

Table 2 Heat treatment and mechanical properties of materials

Material	Symbol	Heat treatment	Upper yield point σ_{su} (kg/mm ²)	Lower yield point σ_{sl} (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 ψ (%)	Young's modulus E (kg/mm ²)
Mild steel	ヒ-2795	875°C 1hr Anneal	28.7	26.8	52.1	87.9	55.0	28.9	2.14×10^4
brass	—	600°C $\frac{1}{2}$ hr Anneal	20.9*	—	44.2	54.3	26.6	21.4	1.02×10^4

* 黄銅の降伏点は0.2%の永久ひずみを生ずる応力である。

* 原稿受付 昭和33年9月27日

** 正員 京都大学工学部

*** 川崎重工業株式会社

Fig. 1 Test specimens

Fig. 2 Measuring apparatus

4の下端と金具2に引いた標線との相対的な位置を読取顕微鏡5で測定することにより求めた。なお、こうして得た測定値より試験片のひずみを算出する際、金具1および2を取り付けた段つきの部分のひずみは無視した。

実験は、軟鋼については両振および片振の場合のほか、応力振幅 σ_a を18, 15, 10 kg/mm²とし、平均応力を種々に変化させた場合、および平均応力 σ_m を10 kg/mm²とし、応力振幅を種々に変化させた場合の全部で6種類、黄銅については両振および片振の場合のほか、 σ_a を14, 12, 8, 4 kg/mm²とし、平均応力を種々に変化させた場合の6種類について行った。また、疲労変形は両振の場合を除いたすべての試験片について測定した。

3. 実験結果およびその考察

軟鋼および黄銅について疲労試験の結果、得られたS-N線図を両振、片振および平均応力 σ_m を一定とした部分両振の場合について示すと、それぞれFig. 3およびFig. 4のようになる。ただし、縦軸には応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の和である最大応力 σ_{max} をとっている。

また、前述のように軟鋼および黄銅について、両振の場合を除いた、それぞれ5種類の応力状態に関して疲労変形を測定した結果を、縦軸に永久ひずみ ϵ_p を%でとり、横軸に応力繰返数 N を対数でとって示すとFig. 5~9およびFig. 10~14のようになる。

これらの図からわかるように、一定の平均応力のもとで応力振幅を与えた場合、試験片に生ずる永久変形は軟鋼および黄銅のいずれの材料に対しても耐久限度の上下を問わず、疲労のごく初期に急激に起り、繰返数 N で約 5×10^3 以前にすでにある一定値に近づいてそれ以後は連続的な増加はほとんど見られない。しかし、応力が耐久限度付近あるいはそれ以上の場合には、

Fig. 3 S-N diagram for mild steel

Fig. 4 S-N diagram for brass

Fig. 5 ϵ_p - N diagram for mild steel ($\sigma_a = 18 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 6 ϵ_p - N diagram for mild steel ($\sigma_a=15\text{kg/mm}^2$) Fig. 7 ϵ_p - N diagram for mild steel ($\sigma_a=10\text{kg/mm}^2$) Fig. 8 ϵ_p - N diagram for mild steel ($\sigma_m=10\text{kg/mm}^2$) Fig. 9 ϵ_p - N diagram for mild steel ($\sigma_a=\sigma_m$) Fig. 10 ϵ_p - N diagram for brass ($\sigma_a=14\text{kg/mm}^2$)

上に述べたような初期に起る変形以外にある繰返数で不連続的に変形が増加する現象が見られ、その場合の変形は初期における変形の2倍以上に達することが多い。この現象は軟鋼のねじり疲労の場合にもすでに見られたものであるが、Fig. 10 および Fig. 11 を見ると、黄銅のように明瞭な降伏点をもたない材料でも軟鋼ほど顕著ではないが、やはり観察されることがわかる。

以上の実験結果をもとにして、縦軸に疲労試験の際の最大応力を取り、横軸には破断した試験片については破断直前の、破断しなかった試験片については $N=10^7$ 付近の最終ひずみ測定時における最大ひずみをとって、疲労試験の際の応力とひずみの関係を静試験において求めた応力-ひずみ線図と比較すると Fig. 15 および Fig. 16 のようになる。ただし Fig. 15 は軟鋼、Fig. 16 は黄銅に関するもので、いずれも応力振幅をパラメータとした場合についてのみ示した。

Fig. 15 より明らかなように、軟鋼については疲労試験の際の最大応力が静試験における降伏点に達するまでは疲労による降伏は起らないが、最大応力がそれ以上に大きくなると疲労による変形はもはや最大応力のみではきまらず、応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の組み合わせによって異ってくる。そして応力振幅が小さくなるに従ってしだいに静試験における応力-ひずみ線図に近づく傾向が見られる。また、疲労変形は一般に静試験における変形よりも大きい、応力振幅の高い場合には降伏点に近いところで、かえって疲労変形が静試験における変形より小さい場合も見られる。

いっぽう、黄銅の場合には Fig. 16 を見ると、応力振幅の大なる場合には軟鋼に比べると同様に、疲労試験の際の応力-ひずみ線図が一部分静試験における応力-ひずみ線図の上になる場合があるが、それ以外では、疲労変形はすべて静試験における変形よりも大きく、また、静降伏点よりも低い最大応力で疲労による降伏が起っていることがわかる。

そこで、これらの図から軟鋼については $\epsilon_p=0.2\%$ 、 1.0% および 3.0% 、黄銅については $\epsilon_p=0.2\%$ 、 0.5% および 1.0% の永久ひずみを生ずる最大応力 σ_{max} を求め

Fig. 11 ϵ_p - N diagram for brass ($\sigma_a=12$ kg/mm²)

Fig. 12 ϵ_p - N diagram for brass ($\sigma_a=8$ kg/mm²)

Fig. 13 ϵ_p - N diagram for brass ($\sigma_a=4$ kg/mm²)

Fig. 14 ϵ_p - N diagram for brass ($\sigma_a=\sigma_m$)

Fig. 15 Tensile stress-strain diagram in static and fatigue test for mild steel

Fig. 16 Tensile stress-strain diagram in static and fatigue test for brass

Table 3 Maximum stress yielding the constant permanent strain of the mild steel for the static and fatigue tests

	Stress amplitude σ_a (kg/mm ²)	Maximum stress		
		$(\sigma_{max})0.2\%$ (kg/mm ²)	$(\sigma_{max})1.0\%$ (kg/mm ²)	$(\sigma_{max})3.0\%$ (kg/mm ²)
Fatigue test	18	26.7	29.2	32.6
	15	27.1	28.0	32.7
	10	27.0	27.5	34.5
	0	26.8	26.8	37.1

Table 4 Maximum stress yielding the constant permanent strain of the brass for the static and fatigue tests

	Stress amplitude σ_a (kg/mm ²)	Maximum stress		
		$(\sigma_{max})0.2\%$ (kg/mm ²)	$(\sigma_{max})0.5\%$ (kg/mm ²)	$(\sigma_{max})1.0\%$ (kg/mm ²)
Fatigue test	14	21.1	22.4	24.1
	12	19.4	22.0	23.9
	8	18.9	21.6	23.5
	4	18.7	21.2	22.8
Static test	0	20.9	22.6	24.9

Fig. 17 Diagram of endurance limit and fatigue deformation for mild steel

Fig. 18 Diagram of endurance limit and fatigue deformation for brass

て疲労試験と静試験の場合を比較すると Table 3 および Table 4 のようになる。

Fig. 17 および Fig. 18 は軟鋼および黄銅について、Table 3 および Table 4 をもとにして、一定の永久ひずみを生ずる応力振幅 σ_a および平均応力 σ_m を耐久限度線図上に示したものである。なお、これらの図で黒丸は Fig. 3 および Fig. 4 に示した S-N 線図から求めた耐久限度の値である。

さて、変形に対しては永久ひずみ $\varepsilon_p = 0.2\%$ を生ずるときを実際に使用することのできる極限とすれば、これらの図において、両軸と耐久限度線および $\varepsilon_p = 0.2\%$ の曲線で表わされる疲労降伏限度線によって囲まれた部分が、それぞれの材料の安全使用範囲を決定することになる。ところで、この疲労降伏限度線は、静試験において明瞭な降伏点を有する軟鋼では静的な下降伏点を示す横軸上の点をとって 45° の傾斜をな

す直線となるに対し、このような降伏点を持たない黄銅では、静降伏点をとって 45° の傾斜をなす直線とは一致せず、安全使用範囲を狭める側をとっていることがわかる。ゆえに、曲げおよびねじり疲労に関する先の報告をも考慮すれば^{1,2)}、すべての応力状態に対して、後者のような材料の使用に際しては、その安全使用範囲の決定にあたって耐久限度線と同様に疲労降伏限度線を求めておくが必要である。

4. 結 言

本研究により得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 平均応力を伴う引張疲労試験において発生する疲労変形は、軟鋼および黄銅のいずれの材料に対しても、繰返数のごく初期に急激に起り、それ以後は連続的な増加はほとんど見られない。しかし、応力が耐久限度付近あるいはそれ以上の場合には、上のような変形以外にある繰返数で不連続的に変形が増加する現象が見られる。そして、この現象は軟鋼の場合に特に顕著であるが、黄銅の場合においてもやはり観察することができる。

(2) 静試験において明瞭な降伏点を有する軟鋼では、疲労試験の際の最大応力が静試験における下降伏点以下の場合には疲労による降伏は起らず、疲労降伏限は静試験における下降伏点に一致する。しかし、最大応力がこの降伏限を越えている場合は、疲労変形はもはや最大応力のみによってはきまらず、応力振幅と平均応力の組み合わせによって異なり、応力振幅が小さいほど静試験における変形に近づいてくる。いっぽう、静試験において明瞭な降伏点を示さない黄銅においては、疲労降伏限は静降伏点よりも低くなる。また、軟鋼および黄銅のいずれにおいても、疲労変形は一般に静試験における変形よりも大きい、応力振幅の高い場合にはある範囲で、逆に静試験における変形よりも小さい疲労変形を示すことがある。

(3) 以上の結果および先の曲げおよびねじり疲労に関する報告より、明瞭な降伏点を示さない材料の使用に際しては、すべての応力状態に対して疲労降伏限度について充分注意を払う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 河本実, 西岡邦雄, 材料試験, 3, 14, 260—265
- 2) 河本実, 伊藤尚, 岩村幸祐, 材料試験, 5, 31, 217—222