論 文

定ひずみねじり疲労強度と定ひずみ引張圧縮 疲労強度との比較*

楠 本 韶** 竹 内 守**

Comparison of Constant Strain Fatigue Tests by Torsion and by Tension-Compression

by

Shō KUSUMOTO and Mamoru TAKEUCHI

(Hitachi Research Laboratory Hitachi Ltd., Hitachi)

The constant strain fatigue tests by tension-compression and by torsion were carried out in room temperature with the use of 18Cr-8Ni stainless steel and mild steel cylindrical hollow specimens, in which the relations between the effective stress range, the effective strain range and the cycles to crack were studied.

No essential influence was found on these relations resulting from the difference of the two test methods, torsion and tension-compression. Similar results were obtained as to the relations between the strain range and the cycles to crack when the maximum shear strain range was used instead of the effective strain range.

The effect of the thickness of the specimens on the cycles to crack was also studied in the torsional constant strain fatigue tests in which the cycles to crack N_f were judged from the sudden reduction of the torque range. The results show that the N_f increase with the thickness of the specimens when the outer diameters were kept constant (16mm), and that the N_f of the cylindrical solid specimen is almost doubled in comparison with that of the hollow specimen of thickness 1 mm under the same strain range.

(Received May 8, 1964)

1 緒 言

多軸応力下の定ひずみ疲労や熱疲労が問題となることはしばしばあり、その際の強度については有効ひずみを用いれば単軸応力下の疲労破壊法則がそのまま適用されると一応考えられるが¹⁾、これを実験的に確かめた例は非常に少ないので、是非確かめておく必要がある。また、実験設備や実験技術の面からみた場合に定ひずみ疲労あるいは熱疲労の実験を単軸荷重よりも、ねじりによって行なうほうが便利ことがある。以上の理由から筆者らは引張圧縮とねじりの定ひずみ疲労試験を行なって、有効ひずみを用いて結果を比較検討すると同時に、塑性域での問題を取り扱う場合の要素の一つである最大せん断ひずみによる整理も行なうこととし、その第1段階として室温での実験を行なったので、結果を報告する。なお、高温での定ひずみねじり疲労試験では試験片表面の酸化や微細な凹凸のために初期き裂を試験片表面の観察によって発見するのが困難な場合があり、その際にはき裂発生をトルク変化から判定するのが便利と思われるが、このときに試験片の肉厚がき裂発生繰返数に及ぼす影響につ

いても実験的にたしかめたのであわせて報告する。

2 ひずみと応力

2・1 有効ひずみと有効応力

有効ひずみと有効応力はよく知られているように次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{有効応力} \\ \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ \text{有効ひずみ} \\ \epsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \\ \text{有効塑性ひずみ} \\ \epsilon_{pe} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{p1} - \epsilon_{p2})^2 + (\epsilon_{p2} - \epsilon_{p3})^2 + (\epsilon_{p3} - \epsilon_{p1})^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: 主ひずみ

$\epsilon_{p1}, \epsilon_{p2}, \epsilon_{p3}$: 主塑性ひずみ

単軸応力およびねじりの場合の σ_e, ϵ_{pe} は次のようになる。

(a) 単軸応力

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_e = \sigma_1 \\ \epsilon_{pe} = \epsilon_{p1} = \ln \frac{S_0}{S} \end{array} \right. \quad (2)$$

* 原稿受理 昭和39年5月8日

** (株)日立製作所日立研究所 日立市幸町

に直径が内孔より約0.2mm 小さい丸棒を挿入した。引張圧縮の多くはⅡ型試験片を用いて行なったが、ひずみがとくに大きい場合にはⅣ型試験片を用いた。Fig. 3 に示すようにⅣ型試験片では試験片のつかみ部が角鋼に丸穴をあけてつくった治具に滑合された状態で試験されるので圧縮の際に座屈が起こりにくい。同試験片の引張りは同図に示すように、つかみ部にねじ込んだボルトを介して行なった。

3・2 ひずみの測定

ねじり試験では Fig. 4 のように標線位置の一つに目盛をつけ、他の一つに取り付けた指針の目盛上での動きから標線間のねじれ角 θ を測定した。また、引張

Fig. 4. Attachment to measure torque angle.

圧縮試験では標線間の長さ変化を望遠鏡で読み取ってひずみを算出した。ただ、ひずみが大きいⅣ型試験片では局所的な直径変化が生じてひずみ分布が軸方向に一樣でなくなるので、サイクル中の直径変化が最も大きい断面での直径をマイクロメータで測定してひずみを求めた。

3・3 材 料

材料は SS 41 および SUS 27 を用いた。化学成分および、熱処理条件は Table I I 機械的性質は Table

Ⅱに示すとおりである。材料の異方性については検討しなかった。

4 実験結果と検討

4・1 繰返数と応力

Fig. 5 は SS 41 および SUS 27 についての繰返しねじり試験および引張圧縮試験における繰返数 N と

Fig. 5. Variation of $|\sigma_e|_{\max}$ during the tests. 応力との関係である。これらの図では $N=1/4, 3/4, 5/4, \dots$ に対応する応力、すなわちひずみと応力との関係を示す Fig. 6 において引張りあるいは圧縮のひずみが極大となる点 A, B, C, $\dots$ における有効応力の絶対値 $|\sigma_e|_{\max}$ を片振幅として縦軸にとってある。なお、たとえば $1/4 \sim 3/4$ の間の有効応力および有効

Table I. Chemical composition* and conditions of heat treatment.

Material		C	Si	Mn	P	R	Cu	Ni	Cr	Heat treatment
SS 41	C	0.25	0.16	0.49	0.013	0.037	0.11	Tr	0.02	880°C, 30min F.C.
SS 41	E	0.15	0.21	0.43	0.029	0.018	0.29	0.01	0.13	890°C, 30min F.C.
SUS 27	B	0.22	0.49	0.16	0.032	0.006	—	8.94	19.27	1 050°C, 2hr W.Q.
SUS 27	C	0.09	0.69	1.22	0.029	0.003	—	9.10	18.6	1 050°C, 2hr W.Q.

* %

Table II. Tensile test results.

Materials		Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	True breaking strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
SS 41	C	30.0	48.6	91.1	31.8	49.5
	E	Upper 29.3 Lower 27.5	44.3	83.9	39.7	61.1
SUS 27	B	25.5	60.3	—	68.8	77.3
	C	23.6	61.9	210.0	63.9	80.4

Fig. 6. Strain-stress relationship (Schematic).

ひずみの変化の絶対値を $N=1/4 \sim 3/4$ に対応する応力全振幅および有効塑性ひずみ振幅としてそれぞれ $\Delta\sigma_{e/1/4 \sim 3/4}$, $\Delta\epsilon_{pe/1/4 \sim 3/4}$ と書くことにする。Fig. 5 に示されるように SS 41, SUS 27 とともに N の増加に従って、少数の点を除いて、応力振幅は増加し、 N の増加による応力振幅の増加の割合は塑性ひずみ振幅が大きほど大きかった。塑性ひずみ振幅が小さければ少数回の繰返しによって応力振幅は安定して、比較的大きな回数での変化は小さい。

4・2 ひずみ振幅と応力振幅

塑性ひずみ振幅と応力振幅との関係を示したのが Fig. 7 である。ひずみ振幅が大きい場合には応力振

Fig. 7. Relation between $\Delta\epsilon_{pe}$ and $\Delta\sigma_{e/1/4 \sim 3/4}$.

幅がサイクルとともに急激に変化するので、どの N に対する値を取るかによってこの図の関係も大きく変化するが、Fig. 7 では $N=1/4 \sim 3/4$ での値が示されている。これらの図からわかるように SS 41 では両対数グラフ上での $\Delta\epsilon_{pe/1/4 \sim 3/4}$ と $\Delta\sigma_{e/1/4 \sim 3/4}$ との関係が直線的であって次の(9)式で表わされるが、SUS27では直線関係は成立していない

$$\Delta\sigma_e = A \Delta\epsilon_{pe/1/4 \sim 3/4} \quad (9)$$

SS 41, C 材に対する値は $A=155\text{kg/mm}^2$, $n=0.23$ であった。Fig. 7 では塑性ひずみ振幅と応力振幅との関係だけを示したが弾性ひずみと塑性ひずみとを含ん

だ全ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_r$ と応力振幅 $\Delta\sigma_e$ との関係は弾性係数がわかれば Fig. 7 の結果から求められるのでここでは省略する。

4・3 ひずみ振幅とき裂発生繰返数

Fig. 8 は有効塑性ひずみ振幅とき裂の発生が認め

Fig. 8. Relation between $\Delta\epsilon_{pe}$ and N_f .

られるまでの繰返数(き裂発生繰返数)との関係である。き裂発生繰返数は肉眼による観察および記録紙上での荷重またはトルクの減少の過程から判断した巨視的なものである。Fig. 9 は最大せん断ひずみ振幅とき裂発生繰返数との関係である。

Fig. 9. Relation between $\Delta\gamma_{pmax}$ and N_f .

軸荷重のときのき裂は軸と直角方向に発生したが、ねじりの場合にはき裂が軸方向のみ軸と直角方向のみ、あるいは両方向に生ずる場合があつてははっきりした傾向は判断できなかった。

Fig. 8 および Fig. 9 に示される結果はいずれも直線関係であつて、次式が成立する。

$$N_f^a \Delta \epsilon_{pe}^{1/4-3/4} = K \quad (10)$$

$$N_f^{a'} \Delta \gamma_{pmax}^{1/4-3/4} = K' \quad (11)$$

これらの図に示される直線について a, a', k, k' の値を求めると次のようになる。

$$\text{SS 41, C 材では } a=0.64 \quad k=0.66$$

$$a'=0.60 \quad k'=1.21$$

SUS 27, B 材および

$$C \text{ 材では } a=0.63 \quad k=0.65$$

$$a'=0.59 \quad k'=1.21$$

SS 41 と SUS 27 との間では a, a', k, k' の値に事実上差がないと思われる。 $\Delta \epsilon_r$ と N_f との関係はこれらの結果から計算できるので省略する。

引張圧縮試験は常に圧縮から開始した。これは引張りから始めると、とくに、ひずみ振幅が大きい場合に、断面が局部収縮を起こしたりして細くなるため次の圧縮の過程で座屈するおそれがあるためであつた。

このようにすることによって、Fig. 3 の治具を使用すれば SS 41 では座屈を防ぐことができたが、SUS 27 では Fig. 10 に例を示すように座屈を生ずる

Fig. 10. Tested specimens.

ことがあり、このために試験片が屈曲して局部的には断面積の変化から計算したよりも大きなひずみが、発生したが、Fig. 8 および Fig. 9 ではこのような

ひずみの集中を無視して破断面でのひずみの平均値が用いられている。

4・4 ねじり試験結果に及ぼす肉厚の影響

緒言でも述べたように、高温でのねじり疲労ではき裂の発生を肉眼で見出すことが困難な場合があり、このときには N_f をトルクの急激な減少の様子から判断するのが便利であるが、同じ外径の試験片に同じ深さのき裂が発生しても肉厚が厚ければねじり強さの減少の割合が小さいのでトルクの減少の状況から判断される N_f の値は肉厚の大きい場合ほど大きくなりがちで内径を有する。この点を数値的に確かめるためにⅢ型試験片で内径 0～14mm 間の種々の値にして定ひずみねじり疲労試験を行なった。Fig. 11 はその際のトルクの

Fig. 11. Variation of torque during tests of specimens with various thickness.

繰返に従つて変化であつて、外表面での有効塑性ひずみ振幅 $\Delta \epsilon_{pe}$ が付記してある。 $\Delta \epsilon_{pe}$ はできるだけ一定としたが、ある程度の差はまぬかれなかつたので、肉厚が異なっても $\Delta \epsilon_{pe}$ と N_f との関係が(10)式の形で表わせてしかも a には肉厚の影響がないものとして $\Delta \epsilon_{pe}^{1/4-3/4}$

Fig. 12. Effect of thickness of specimen to N_f .

$s_4=0.017$ に対する値に補正して N_f を求め、内外径の比と N_f との関係を図示すると Fig. 12 のようになった。同図上の両者の関係は直線的であって、中実試験片の N_f は肉厚が 1 mm 程度のときの約 2 倍である。

5 結 言

以上の結果をまとめると次のことが言える。

- (1) 実験の範囲では、塑性有効ひずみ ϵ_{pe} を用いればねじりと引張圧縮いずれの定ひずみ疲労試験における応力振幅、ひずみ振幅、き裂発生繰返数間の関係も試験方法に関係なく共通に整理できることが確認された。
- (2) 最大せん断塑性ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_{pmax}$ と N_f の間にも塑性ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_{pe}$ と N_f との関係式(10)に類似した(10)式が試験方法と関係なく成立することが認められた。
- (3) 室温で行なった本実験の範囲では $\Delta\epsilon_{pe}$ もしくは

$\Delta\epsilon_{pmax}$ と N_f との関係で示される強度について SS 41 と SUS 27 との間に差はほとんど認められなかった。

- (4) 定ひずみねじり疲労試験でトルクの減少によって N_f を判定する場合には試験片の肉厚の影響がかなり、あるので注意しなければならない。

最後に本研究を行なうにあたって多大のご助力をいただいた日立製作所日立工場の各位、当所大内田主任研究員に厚くお礼を申し上げるとともに実験を遂行された照沼、津村両氏に心から謝意を表する次第である。

(昭和38年11月8日、塑性疲労および熱疲労に関する座談会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば, Monson, S.S., Machine Design, 142 (1960).
- 2) Nada, A., "Theory of Flow and Fracture of Solids," Chapt. 12, (1950) McGraw-Hills.