鋼の弾性履歴現象と疲労強度*

河 本 実** 田 中 道 七***

Elastic Hysteresis Property of Several Steels under Fatigue Load

by

Minoru KAWAMOTO and Tsuneshichi TANAKA

(Faculty of Engineering, Kyoto University) (School of Science Engineering, Ritsumeikan University)

The authors have previously reported on the mirror extensometer which magnified the longitudinal elongation and the contraction of the specimen under axial fatigue load as much as 2000 times, and on some of the experimental results obtained of two kinds of steel.

In this paper, similar experiments were made on five kinds of carbon steel. The strain occurred on each specimen under completely reversed axial load was measured through the test. The plastic strain, by which we mean half the width of a hysteresis loop on the stress-strain diagram, was obtained from a simple calculation.

There was observed a difference between the behaviour of plastic strain of the low carbon steels and that of the high carbon steels. However, the variation of the plastic strain was moderate and converged to some final value. One exception was the case of 0.25% carbon steel. This steel showed a quite different and complicated behaviour of the plastic strain that offered us a subject of more detailed investigation in future. For the other steels, there exists a linear relationship between the plastic strain and the number of stress cycles to failure when plotted on a log-log paper. A similar relationship was found when the hysteresis energy was plotted instead of the plastic strain. Some discussions were also made on the stress-strain curves under fatigue load.

(Received Feb. 23, 1963)

1. 緒 言

材料が繰返荷重を受けると、耐久限度付近の応力においても、わずかながら塑性ひずみを生じており、そのため応力繰返しの各サイクルにおいて、応力-ひずみの履歴曲線をかいている。この曲線の面積として得られる弾性履歴エネルギーは外部から材料に加えられた仕事量であって、その一部分が材料中にたくわえられ、これが疲労の進行と密接に結びついているであろうことは誰しも予想するところである。また最近、熱疲労などとの関連において、非常に大きな応力を試験片に加え、大きな塑性変形を生ぜしめて、少ない繰返数で破断する、いわゆる塑性疲労に関する研究が盛んに行なわれている。そこでは加えた応力とならんで生ずる塑性ひずみ、および履歴曲線の形状などが議論の対称とされており、以上の分野においてはすでに数多くの研究^{1)~7)}がなされている。

筆者らは先に、材料に引張圧縮繰返荷重を加えた場合、試験片に生ずる変形を2000倍強に拡大する装置

を考案し、これを用いて疲労^{8,9)}の進行に伴って現われるひずみの変化を測定観察した。その結果、塑性ひずみ ϵ_p と破断繰返数 N の間には、熱疲労や塑性疲労でいわれているのと同様な関係 $\epsilon_p \cdot N^a = K$ がほぼ成り立つことが示され、また軟鋼と耐熱鋼を用いた実験からは、弾性履歴エネルギー w で整理すると、両材料に対する結果が一致するのが見られた。

本研究はこの点をさらに確めるために5種類の炭素鋼を用いて、引張圧縮の疲労試験を行ない、先に考案した装置によって試験片に発生するひずみの変化を追跡し、その挙動を調べたものである。観察結果としては、軟鋼と硬鋼で発生する塑性ひずみの大きさおよびその変化の仕方にかなり明確な相違があり、また材料によって非常に複雑なひずみ変化を示す場合があることがわかった。このような例外を除けば塑性ひずみ ϵ_p と破断繰返数 N の間には上に述べたのと同様な関係が成り立つ。しかし、履歴エネルギー w で整理しても多くの結果が一致するとはいえないことが示された。

2. 実験材料および実験方法

実験に使用した材料は5種類の炭素鋼で、そのうち3種類はほぼ軟鋼に属し、2種類は硬鋼の範囲に属し

* 原稿受付 昭和38年2月26日

** 正員 京大工学部

*** 正員 立命館大理工学部

ている。それらの化学成分を Table 1 に示す。

材料はすべて炉中冷却の焼鈍を行ない、のち機械仕上げて用いた。その時の焼鈍温度とその後の機械的性質を Table 2 に示す。

これらの材料は Table 1 に見るように、炭素量が異なる以外に、ほかの成分にも多少の不同があり、また焼鈍温度やその後の機械的性質にも炭素量と関連した一定の関係を示していないが、ここではできるだけ広範囲の材料について、疲労試験中のひずみ挙動を観察するのが目的であるため、これらの点については拘泥することなく使用した。

試験片の形状と寸法を Fig. 1 に示す。図中の平行部直径 d は 0.14 % 炭素鋼に対してのみ 4.5 mm、その他の 4 種類の鋼に対しては 5 mm である。

ひずみの測定装置については前報で詳しく述べたからここでは省略する。ただ、以下で塑性ひずみ ε_p というのは応力 1 サイクル中の履歴曲線のひずみ軸上の幅の半分、いいかえれば塑性ひずみ振幅のことであり、これは測定した全ひずみ振幅より弾性ひずみ振幅を差し引いて求めたものである。また履歴エネルギー w はそ

の時の応力振幅 σ と上の塑性ひずみ w_p より $w = 4\sigma \cdot \varepsilon_p$ として求めた値である。

使用した試験機は前報におけると同様 Haigh 引張圧縮疲労試験機で、繰返速度は 1800 rpm である。

3. 実験結果およびその考察

上述の 5 種類の炭素鋼について両振引張圧縮疲労試験を行ない、すべての試験片について試験中に発生するひずみの測定を行なったわけであるが、その際得られた応力-繰返数線図を Fig. 2 に示す。図のように、0.58 % 炭素鋼が最も強く、ついで 0.27 % 炭素鋼が強い。0.71 % 炭素鋼と 0.25 % 炭素鋼がかなり弱く、特に 0.25 % 炭素鋼の強度は予想外であり、このことは後述するような本材料のみに見られたひずみの特異な挙動と密接に結びついているものと考えられる。

疲労試験中に試験片に生ずる塑性ひずみの変化のものを 0.14 % 炭素鋼、0.25 % 炭素鋼、および 0.58 % 炭素鋼について示したのが Fig. 3, 4 および 5 である。ここで縦軸は塑性ひずみ ε_p 、横軸は繰返数 n を対数目盛でとっている。なお、図は省略するが、0.27 % 炭素鋼のひずみ挙動は Fig. 3 の 0.14 % 炭素鋼の場合と大きな差はなく、また 0.71 % 炭素鋼のそれは 0.58 % 炭素鋼の場合と大差はない。

Fig. 4 の 0.25 % 炭素鋼を除けば、一般に軟鋼では硬鋼に比べて試験の初期におけるひずみの変化が比較的大きく、最初増加して後減少し、しかる後にある一定の値に落ち着くといった変化を示す。このことは軟

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical composition (%)				
	C	Si	Mn	P	S
0.14% Carbon steel	0.14	0.29	0.54	0.015	0.013
0.25% Carbon steel	0.25	tr.	0.38	0.013	0.027
0.27% Carbon steel	0.27	0.26	0.65	0.046	0.029
0.58% Carbon steel	0.58	0.17	0.82	0.036	0.031
0.71% Carbon steel	0.71	0.28	0.20	0.024	0.006

Fig. 1 Test specimen

$d = 4.5$ for 0.14 % carbon steel
 $d = 5.0$ for the other carbon steels

Fig. 2 Stress vs. stress cycles to failure

Table 2 Heat treatments and mechanical properties of materials

Material	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)
0.14% Carbon steel	810°C 1hr. F.C.	25.8	23.6	40.1	93.8	44.9	71.0	2.11×10^4
0.25% Carbon steel	830°C 1hr. F.C.	27.7	21.2	37.8	73.3	20.1	62.3	2.14
0.27% Carbon steel	875°C 1hr. F.C.	33.4	28.7	51.1	87.1	38.4	54.0	2.14
0.58% Carbon steel	800°C 1hr. F.C.	34.6	34.2	71.2	98.1	25.0	32.9	2.03
0.71% Carbon steel	760°C 1hr. F.C.	31.9	30.4	65.4	100.0	22.6	36.8	2.10

鋼に関して前報に述べたとおりである。⁸⁾ また、あとにも述べるが Fig. 3 と Fig. 5 を比較することによって、硬鋼では軟鋼に比べて生ずる塑性ひずみがかなり大きいことがわかる。いずれの場合も応力が高いほどひずみの変化自体もしだいに大きくなることは明らかである。

次に 0.25% 炭素鋼であるが、この材料は炭素量からいえば軟鋼に属するにもかかわらず、ひずみの変化のもようはほかの 4 種の炭素鋼と全く異なっている。Fig. 4 に見るように、試験の初期においては生ずる塑性ひずみはきわめて小さい。例として Fig. 2 の応力-繰返数線図でほぼ 5.5×10^5 の繰返数で破断した試験片の初期のひずみを比較すると、0.25% 炭素鋼の塑性ひずみは 0.14% 炭素鋼のその約 1/8、また 0.58% 炭素鋼の塑性ひずみの約 1/14 の大きさである。しかる後、ひずみは繰返数とともにだんだん増加してくるが、その増加の仕方は決して一様に連続なものではなく、Fig. 4 に見るようにはなはだ複雑であり、増加の

Fig. 3 Plastic strain vs. stress cycles.
0.14% carbon steel

Fig. 4 Plastic strain vs. stress cycles.
0.25% carbon steel

Fig. 5 Plastic strain vs. stress cycles.
0.58% carbon steel

途中にわずかであるが、ある期間明らかに減少を伴うことがある。なお、Fig. 4 で $\sigma=16.0 \text{ kg/mm}^2$ の白丸に対する曲線はその先端を矢印で示しているが、これは繰返数約 3×10^4 において大きなひずみの増加を生じ、図に示し得ないため、その後の挙動は次の Fig. 6 に見るとおりである。

Fig. 6 は特に 0.25% 炭素鋼について、縦軸に塑性ひずみ ε_p を対数目盛でとり、横軸には測定時の応力繰返数 n の破断繰返数 N に対する比 n/N を一様目盛でとって Fig. 4 を書き直したものである。横軸上の $n/N=100\%$ が全寿命を表わしている。ただし、破断しなかったものについては、応力繰返数 $n=10^7$ を 100% と考えて図示してある。この図より、先の $\sigma=16.0 \text{ kg/mm}^2$ の場合は白丸で示すように、寿命の約 35% において約 0.09% の塑性ひずみに達し、その後少し減少してから破断まではほぼ一定の値を示す。Table 2 を見ると、この 0.25% 炭素鋼においては、ほかの 4 種類の炭素鋼よりも上昇伏点と下降伏点の差が大きく、このようなことと上述の疲労試験中のひずみの特異な挙動とが関連しているように考えられる。さらに本材料についてその組織を観察し、また変形機構などについて考察を加えれば多くの興味ある結果が得られるであろうが、それは別の機会にゆずることとする。

以上述べたように、0.25% 炭素鋼を除いた 4 種の炭素鋼においては、疲労試験中の塑性ひずみの変化はそれほど大きくなく、試験の初期にかなりの変化を示すものでも、その後の寿命の大半をつうじてほぼ一定の値に落ち着くのがふつうである。そこで前報における

Fig. 6 Plastic strain vs. cycle ratio. 0.25% carbon steel

と同様、寿命の50%における塑性ひずみ ε_p の値を図より読みとり、これをその試験片が試験中に示した塑性ひずみの代表値とみなすことにする。この ε_p を縦軸に取り、横軸に破断繰返数 N をとって、0.25%炭素鋼を除く4種の材料について両対数目盛に図示するとFig. 7が得られる。図に見るように、それぞれの材料について ε_p と N との関係は平行な直線で表わされ、硬鋼に属する0.58%炭素鋼と0.71%炭素鋼の結果は同一の直線上にのる。また、軟鋼よりも硬鋼の方が同じ寿命に対して発生する塑性ひずみが2~3倍大きいことも明らかである。この直線を表わす式として

$$\varepsilon_p \cdot N^{0.38} = K_1$$

Fig. 7 Plastic strain vs. stress cycles to failure

Table 3 Endurance limits and constants K_1 , K_2 (Capital)

Materials	Endurance limit σ_w (kg/mm ²)	K_1	K_2
0.14% Carbon steel	18.8	0.018	2.40
0.25% Carbon steel	14.0	—	—
0.27% Carbon steel	21.5	0.024	3.62
0.58% Carbon steel	22.5	0.050	8.05
0.71% Carbon steel	17.5	0.050	6.25

Fig. 8 Hysteresis energy vs. stress cycles to failure

なる関係が得られ、 N の乗数0.38は4種の材料について共通であり、 K_1 は材料によって異なる。この K_1 の値をTable 3の第3列に示す。同表の第2列はFig. 2から得られる各材料の耐久限度の値である。

Fig. 8は同じく4種の炭素鋼について、上で求めた寿命の50%における塑性ひずみ ε_p をもとにして履歴エネルギー w を求め、これと破断繰返数 N との関係を両対数目盛に図示したものである。ここでも各材料に対する結果は平行な直線によって表わされる。しかし、材料間の一致は見られない。このことは外部から加えられたエネルギーに対して、各材料内における蓄積の割合が異なること、またその組織に対する働き方や、疲労の進行に対する寄与の仕方がそれぞれの材料において異なっていることを示すものと考えられる。Fig. 8の直線の式としては、 N の乗数0.42を共通として

$$w \cdot N^{0.42} = K_2$$

が得られる。定数 K_2 は材料によって異なり、その値はTable 3の第4列に示すとおりである。

最後にFig. 9は両振引張圧縮荷重下の応力-ひずみ線図を5種類の炭素鋼について示したものである。縦軸は応力振幅、横軸はひずみ振幅で、図中の白丸は短時間に荷重を階段状に増加させ、そのつどひずみを読み取って求めたもの、また黒丸はすでに述べた一定荷重の疲労試験において、寿命の50%における塑性ひずみをもとにして図示したものである。0.25%炭素鋼については短時間の試験結果のみを示している。また図中の σ_w は応力-ひずみ線図上の耐久限度の位置を示す。

この図より繰返荷重を受けた時の応力-ひずみ線図は軟鋼と硬鋼で明らかに違っており、硬鋼では耐久限度以上の応力でかなり大きな塑性ひずみを生じ、この部分の応力とひずみの関係はほぼ直線に近い。そこでこの2種の硬鋼について、短時間の疲労試験より得られた応力-ひずみ線図を図の破線のように弾性線まで延長してみると、その交点は0.71%炭素鋼では耐久限度の応力に一致し、また0.58%炭素鋼では耐久限度に非常に近い値を与えている。したがって、硬鋼のように大きな塑性ひずみを生じ、その応力-ひずみ線

Fig. 9 Stress vs. strain

図が耐久限度付近で急激な折れ曲りを示す材料では、上のような方法でその耐久限度を決定する、いわゆる迅速決定法はかなり正確であるということが出来る。軟鋼のように生ずる塑性ひずみが小さく、その応力-ひずみ線図もゆるやかな湾曲を示すものではこのような迅速決定法は適用できないことは Fig. 9 から明らかである。

4. 結 言

5種類の炭素鋼について引張圧縮疲労試験を行ない、試験片に生ずるひずみを測定して、その挙動を観察しまたその結果より塑性ひずみと破断繰返数との関係、履歴エネルギーと破断繰返数との関係、および繰返荷重下の応力-ひずみ線図について種々の考察を加えた。

まず、疲労試験中に現われる塑性ひずみの大きさおよび変化のもようは、軟鋼と硬鋼でかなり異なっており、前者においては試験の初期における増減が比較的大きい。また、ひずみの大きさ自体についていえば、硬鋼の方が軟鋼より2~3倍大きい塑性ひずみを生ずる。

炭素量からいえば軟鋼に属する0.25%炭素鋼のみはほかの4種類と全く異なったひずみ挙動を示した。すなわち、初期のひずみはきわめて小さく、その後かなり増加するが、決して一様に連続した増加を示さず、局所的に減少を伴うきわめて複雑な変化を示した。この原因についてさらに深い研究を行なえば今後種々の興味ある結果が得られるものと思われる。

この0.25%炭素鋼を除くほかの4種の材料については、塑性ひずみと破断繰返数との関係は両対数目盛

で平行な直線で表わされる。同様のことは履歴エネルギーと破断繰返数との間にも成り立つ。しかし、この履歴エネルギーで整理しても、材料によってそれぞれの直線は異なっており、このことは試験中材料に加えられた外部エネルギーに対して、材料内での蓄積の度合が異なることや、そのエネルギーが組織に与える作用および疲労の進行に対する寄与の仕方が異なっていることを示している。

繰返荷重下での応力-ひずみ線図に関しては、その形状が軟鋼と硬鋼で明らかに異なるのがみられ、硬鋼では耐久限度以上の応力でかなり大きな塑性ひずみを生じており、塑性ひずみは応力が増すにつれてほぼ直線的に増加する。また、このような硬鋼においては、短時間の階段荷重疲労試験の結果より、その材料の耐久限度をかなり正確に予見することができる。

最後に本研究の実施にあたって終始実験に協力された立命館大学理工学部学生、中井亮作君と中村朝彦君に心から謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) B.J. Lazan and L.J. Demer, ASTM, Proc., **51**, 611 (1951)
- 2) P.G. Forrest and H.J. Tapscott, IME, Proc., **168**, 763 (1954)
- 3) J. Salokangas, IUTAM, 235 (1955)
- 4) P.G. Forrest, International Conference on Fatigue of Metals, Proc., 174 (1956)
- 5) F.E. Baldwin, G.J. Sokol and L.F. Coffin, ASTM, Proc., **57**, 568 (1957)
- 6) 菊川, 沼田, 機械学会第36期通常総会講演会前副集, No. 26, p. 11 (Apr. 1959)
- 7) 河本, 田中, 機論, **26**, 167, 963 (1960)
- 8) 河本, 田中, 材料試験, **10**, 88, 28 (1961)

外 国 文 献 紹 介

有 機 材 料

エポキシ樹脂中の水の拡散について (Über die Diffusion von Wasser durch Epoxyharz) by J. Bardeleben, Kunststoffe, Bd. 53 pp. 162~163 (1963)

純エポキシ樹脂および添加物を入れたエポキシ樹脂の円板をつかって水分の拡散係数を温度を変えて測定した。20°~70°の間で約50%の石英粉末を含むと拡散係数を10%減少する。また、2%のシリコン樹脂を含むと27%の減少がおこる。拡散の活性化エネルギーが計算されている。(奥田 聡)

ポリエチレン溶融物の流れ特性について (Über das Fließverhalten von Polyäthylen-Schmelzen) by G. Döring und H.J. Leugering, Kunststoffe, Bd. 53, Heft 1, pp. 11~18 (1953)

熱可塑性ポリマーの流動曲線は分子構造、分子量、分子量分布によって異なる。著者は非ニュートン溶融物の流動曲線の決定に関係する理論的および実験的条件を討議し、流動曲線の絶対的な決定に適した簡単な高圧管押し出し式粘度計について述べてある。

(奥田 聡)

(593頁へ)