

# 炭素鋼の二段二重重複繰返し衝撃引張試験 について (第2報)

齋藤 葆・宮野 泰治・山崎 保輔

Study on Repeated Tension Impact Test under Double Repeated Energy in  
Two Impact Energy Levels. (2nd Report)

Shigeru SAITO, Taiji MIYANO and Yasusuke YAMAZAKI

(昭和46年10月21日受理)

## 1. 緒言

繰返し衝撃引張試験において単一衝撃引張試験による衝撃値 ( $N=1$ ) に始まる衝撃疲労曲線は、高エネルギー範囲の塑性疲労曲線と低エネルギー範囲の真の疲労曲線とに区分され、両曲線間には不連続点<sup>1) 3)</sup>が存在する。

著者らは前報にて繰返し数が $10^4 \sim 10^5$ 以上の真の疲労域において硬鋼と軟鋼試験片について二段二重重複繰返し衝撃引張試験を行って累積疲労被害を調べ Miner の法則<sup>4) 5)</sup>を適用しうるかどうかについて考察した。その結果軟鋼については近似的に Miner の法則に従い、硬鋼では従わないことを明らかにした。

本報においては塑性疲労域について特に破壊までの繰返し数が数100回以下の高エネルギー範囲において軟鋼材料の累積疲労被害を調べるため、二段二重重複繰返し衝撃引張試験を行い、Miner の法則の適用性を検討し、合わせて真の疲労域における場合との関連性を調べた。また繰返し衝撃引張試験においては真の疲労域においても塑性変形が少くないので、塑性変形の挙動が累積疲労被害の機構に何か関連しているのではないかとこの予想のもとに、伸び、絞りについても検討した。以下にその結果を報告する。

## 2. 実験方法および供試材料

実験はシャルピー式衝撃試験機の衝撃引張試験装置を使用した。容量は $30\text{kg}\cdot\text{m}$ でハンマー持上げ角度によって、毎分衝撃回数、衝撃速度は $9 \sim 26$ 回、 $2.2 \sim 0.6\text{m}/\text{sec}$ に変化したが、その影響は考慮しなかった。なお単一衝撃の場合衝撃速度は $5.15\text{m}/\text{sec}$ である。

供試材料として軟鋼 (S S41) を供給状態のまま用いたが、その機械的性質は表1に示す通りである。試験片の形状と寸法を図1に示した。試験片直径は $6\text{mm}$ であり

機械仕上後表面にエメリーペーパー #0000まで研摩仕上げを施した。

表1 機械的性質

上降伏点 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	下降伏点 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )	伸び (%)	絞り (%)
36.3	31.8	46.0	35.0	68.3

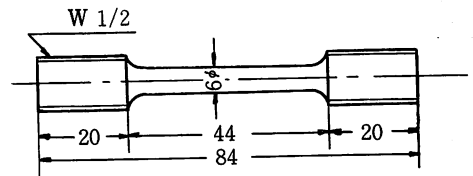


図1 試験片形状

絞りの測定には万能投影器を用い、伸びについては試験片表面に $5\text{mm}$ 間隔の標点を7区間、対応する二面に取り、測定顕微鏡にて測定した。破断までの各区間の伸びの挙動を調べる場合には試験機から試験片を取りはずさずに測定出来るような簡単な装置を作って行なった。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 処女材料の衝撃疲労曲線

処女材料の塑性疲労域に属する衝撃疲労曲線すなわち E-N 曲線を図2に示した。図より単一衝撃引張強さ  $E_0$  は約 $62\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$ で、これから衝撃エネルギー  $E = 3\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$  破断繰返し数  $N=40$  付近までは直線的に変化し、これより  $E = 1\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$  の衝撃エネルギーの範囲まではやや曲線的な変化を示し、 $E = 1\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{mm}^2$  を境にして急激に繰返し数は増加し、これ以下のエネルギー範囲にお

表2 実験結果

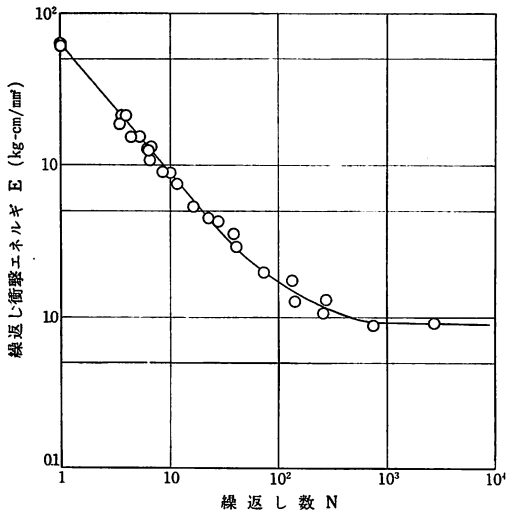


図2 処女材料の衝撃疲労曲線

けるE-N曲線を正確に得ることは、シャルピー式のような振子式では曲げ作用が強く影響してきて困難であった。

図2の直線的变化の部分の実験式を求めてみれば、 $E = E_0/N^k$  で表わされる。ここに $E_0$ は単一衝撃強さ、 $k$ は定数で本実験の場合にはそれぞれ  $62\text{kg-cm/mm}^2$ 、 $0.83$ である。

また $N=10$ 以内の繰返し数で破断する場合には、破断時のハンマー振上り角 $\beta$ を測定して、ハンマー持上げ角 $\alpha$ との間に  $(\cos\beta - \cos\alpha) / \cos\alpha$  を計算し、この値を小数点以下の回数として考慮した。

3・2 二段二重重複繰返し衝撃による衝撃疲労曲線

一次衝撃エネルギー $E_1$ の選定は図2においてE-N曲線が直線的变化をしている中間付近の $7.90\text{kg-cm/mm}^2$ と、さらに繰返し数が急激に増加し始める点の $1.08\text{kg-cm/mm}^2$ を選んだ。それぞれの予想破断繰返し数 $N_1$ は図2より12および360である。なお実際には一次衝撃エネルギー $E_1$ は供試試験片の直径の仕上げ寸法によって、それぞれ $7.90\text{kg-cm/mm}^2$ および $1.08\text{kg-cm/mm}^2$ の前後にばらついたが、その場合にも予想破断繰返し数はすべて12および360として検討し、一次と二次エネルギーの $E/E_1$ は実際のエネルギー値を用いて計算した。しかしこの $E_1$ のばらつきは $7.90\text{kg-cm/mm}^2$ の場合ではあまり影響はないが、 $1.08\text{kg-cm/mm}^2$ の付近ではわずかな $E_1$ の違いで破断回数が急激に変わるところであるから $E_1$ のばらつきの影響による誤差はかなり重要なものであることは予想されることである。

試験片番号	一次衝撃		二次衝撃			累積繰返し数比 $\Sigma(n/N)$
	衝撃エネルギー $E_1$ ( $\text{kg-cm/mm}^2$ )	繰返し数比 $n_1/N_1$	衝撃エネルギー $E_2$ ( $\text{kg-cm/mm}^2$ )	繰返し数 $n_2$	繰返し数比 $n_2/N_2$	
43	8.05	0.25	11.47	4.3	0.58	0.83
49	8.02	"	15.43	4.58	0.83	1.08
50	7.96	"	20.56	3.8	0.79	1.25
51	8.02	"	10.26	7.5	0.83	1.12
54	8.04	"	13.02	6.4	0.96	1.21
44	8.03	"	5.63	14	0.78	1.03
45	8.04	"	3.27	21	0.58	0.83
46	7.98	"	2.27	36	0.58	0.83
47	8.01	"	7.04	8.6	0.61	0.86
48	8.03	"	1.54	155	1.19	1.44
52	7.98	"	4.52	20	0.87	1.12
53	8.01	"	2.81	21	0.46	0.71
23	7.90	0.50	8.90	5	0.50	1.00
24	7.89	"	10.07	4.82	0.53	1.03
25	7.88	"	13.76	2.66	0.42	0.92
26	8.07	"	12.77	3.52	0.51	1.01
27	7.76	"	14.87	2.31	0.41	0.91
28	8.18	"	17.89	2.20	0.48	0.98
29	7.94	"	19.60	2.11	0.51	1.01
30	7.90	"	21.07	1.94	0.52	1.02
31	7.81	"	22.41	1.84	0.53	1.03
32	7.77	"	24.73	1.73	0.58	1.08
33	8.00	"	29.83	1.37	0.55	1.05
35	8.50	"	7.43	4.95	0.39	0.89
36	8.11	"	5.67	7.90	0.44	0.94
37	7.84	"	4.26	12	0.48	0.98
38	7.35	"	3.31	28	0.78	1.28
39	7.74	"	2.83	35	0.74	1.24
40	7.95	"	2.02	41	0.53	1.03
41	7.83	"	1.28	107	0.50	1.00
62	7.85	0.75	9.62	1	0.12	0.87
65	7.88	"	8.94	1.99	0.19	0.94
59	7.86	"	2.00	39	0.49	1.24
60	7.98	"	3.59	4.38	0.18	0.93
61	7.85	"	5.49	3.36	0.19	0.94
63	7.86	"	2.87	11	0.25	1.00
64	7.84	"	6.85	1.92	0.14	0.89
68	7.85	"	2.27	16	0.23	0.98
70	7.87	"	2.20	36	0.46	1.21

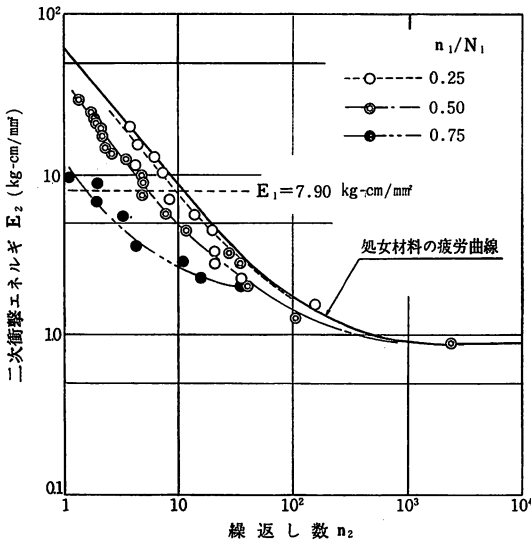


図3 二次衝撃による衝撃疲労曲線 ( $E_1 = 7.90 \text{ kg-cm/mm}^2$ )

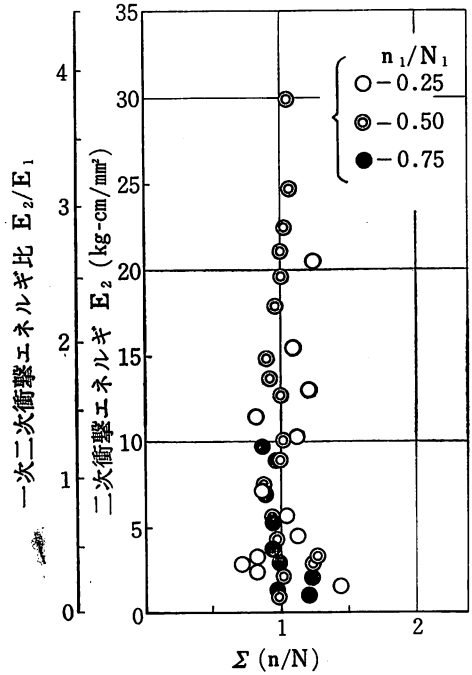


図5  $\Sigma (n/N)$  と衝撃エネルギーの関係 ( $E_1 = 7.90 \text{ kg-cm/mm}^2$ )

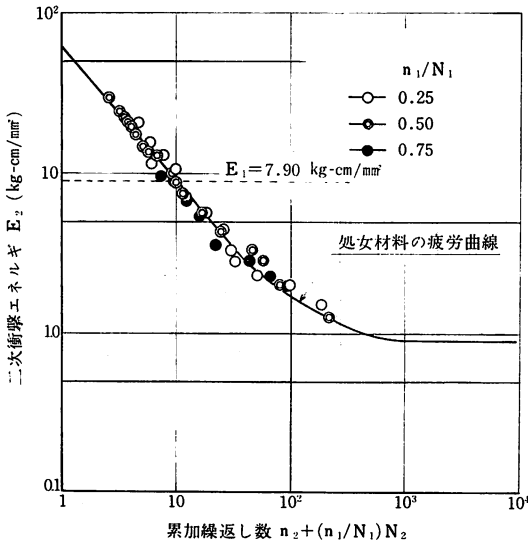


図4 累加衝撃疲労曲線 ( $E_1 = 7.90 \text{ kg-cm/mm}^2$ )

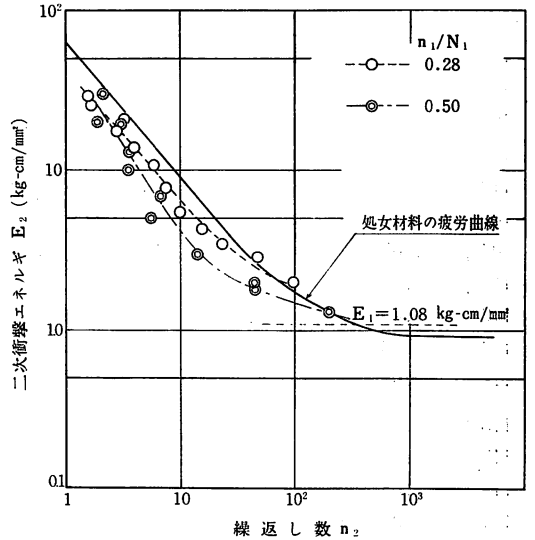


図6 二次衝撃による衝撃疲労曲線 ( $E_1 = 1.08 \text{ kg-cm/mm}^2$ )

3.2.1  $E_1 = 7.90 \text{ kg-cm/mm}^2$  の場合 一次衝撃エネルギー  $E_1 = 7.90 \text{ kg-cm/mm}^2$  を一次衝撃破断繰返し数  $N_1$  の25%、50%および75%の繰返し数だけ加えて、これに二次衝撃エネルギー  $E_2$  を破断まで繰返し与えて得たる結果を表2に示した。E.を予め与えた試験片を処女材料としてプロットすれば図3のようになる。また図4は  $n_1/N_1$  と等しい繰返し数の二次衝撃を与えたとして、それに実験

による二次衝撃の破断繰返し数  $n_2$  を加えた累加衝撃繰返し数をプロットしたものである。前述したように衝撃エネルギーが1に近いところでは直径のばらつきにより生ずるわずかな衝撃エネルギーの違いが破断繰返し数の大きさ

に強く影響を与えるところであるからこの付近については今回は実験を行なわなかった。

図4から明らかなように累加衝撃繰返し数は $E_2$ の $E_1$ に対する大小にも、また $n_1/N_1$ の値にもあまり関係なくすべて処女材料の疲労曲線の付近にプロットされ、そのばらつきの程度も図2にかなりよく似ていることがわかる。

$\Sigma(n/N)$ と $E_2$ および一次二次衝撃エネルギー比 $E_2/E_1$ との関係を図示すれば図5のようになる。表2および図5より $\Sigma(n/N)$ は $E_2$ の $E_1$ に対する大小と $n_1/N_1$ の値によつてはっきりと異なる傾向はみられずすべて1に近い値でその前後に散らばっているが、わずかに $E_2$ が1  $kg\text{-cm/mm}^2$ に近くなると1より大きくなるようである。ばらつきの程度は $n_1/N_2$ が0.25と0.75が0.5の場合に比してやや大きいようである。しかしほとんどMinerの法則に従っているとみることができる。

真の疲労域においても軟鋼を供試材料として実験を行った結果によれば $\Sigma(n/N)$ は近似的には1に近い値で

表3 実験結果

試験片 番号	一次 衝撃		二次 衝撃			累積繰返し数比 $\Sigma(n/N)$
	衝撃エネルギー $E_1$ ( $kg\text{-cm/mm}^2$ )	繰返し数比 $n_1/N_1$	衝撃エネルギー $E_2$ ( $kg\text{-cm/mm}^2$ )	繰返し数 $n_2$	繰返し数比 $n_2/N_2$	
105	1.08	0.28	13.71	3.94	0.65	0.92
106	1.09	"	21.12	3.28	0.89	1.16
107	1.07	"	28.97	1.54	0.60	0.88
108	1.09	"	25.14	1.68	0.56	0.84
109	1.08	"	17.26	2.82	0.60	0.88
110	1.08	"	10.63	5.96	0.73	1.01
103	1.07	"	3.51	23	0.70	0.98
104	1.07	"	7.82	7.55	0.62	0.90
111	1.08	"	5.51	10	0.54	0.83
112	1.08	"	2.00	97	0.97	1.25
113	1.08	"	2.87	47	1.07	1.35
114	1.08	"	4.28	18	0.72	1.00
118	1.08	0.5	30.03	2.1	0.85	1.35
117	1.08	"	6.98	6.7	0.52	1.02
119	1.08	"	9.99	3.5	0.38	0.88
121	1.08	"	19.95	3.1	0.76	1.26
122	1.08	"	12.99	3.6	0.55	1.05
123	1.08	"	19.95	1.9	0.46	0.96
124	1.08	"	4.98	5.5	0.28	0.78
125	1.08	"	1.99	44	0.56	1.06
126	1.08	"	1.81	44	0.47	0.97
127	1.08	"	3.00	14	0.34	0.84
129	1.08	"	1.30	194	1.02	1.52

あるが、 $E_1 < E_2$ の場合は1の前後、 $E_1 > E_2$ の場合はすべて1より小さいという傾向があったが塑性疲労域の高エネルギーの範囲ではこのような傾向はみられない。

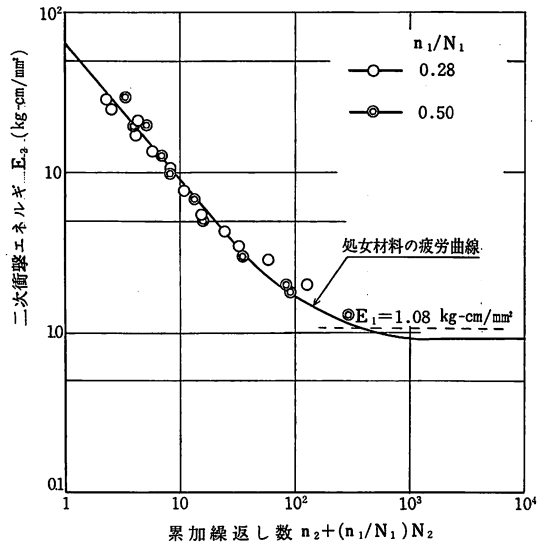


図7 累加衝撃疲労曲線  
( $E_1 = 1.08 kg\text{-cm/mm}^2$ )

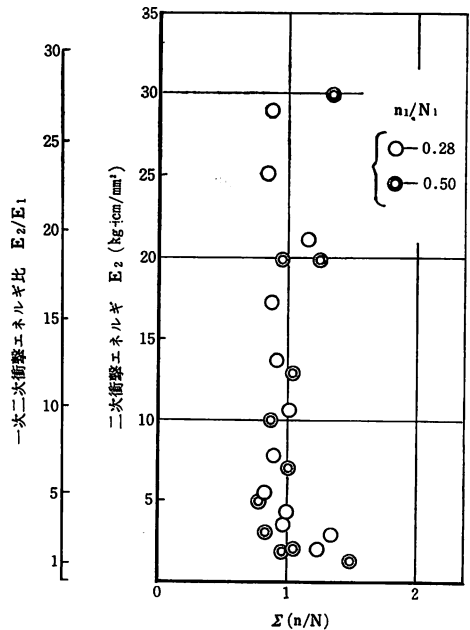


図8  $\Sigma(n/N)$ と衝撃エネルギーの関係  
( $E_1 = 1.08 kg\text{-cm/mm}^2$ )

3・2・2  $E_1=1.08\text{kg-cm/mm}^2$  の場合  $n_1/N_1$ を0.28, 0.50として $E_1=1.08\text{kg-cm/mm}^2$ を予め加えさらに $E_2$ を破断まで与えて得たる結果は表3に示す通りであり、図6は図3と同じ方法で表わしたものを示す。前述したように $1\text{kg-cm/mm}^2$ 付近からはわずかな $E$ の違いが大きく $N$ に影響し、 $N_1$ の75%すなわち $n_1=270$ は図2の処女材料の $E-N$ 曲線のばらつきの範囲内に入るので $n_1/N_1=0.75$ の場合については実験しなかった。また $E_2$ はすべて $E_1$ よりも大きい。

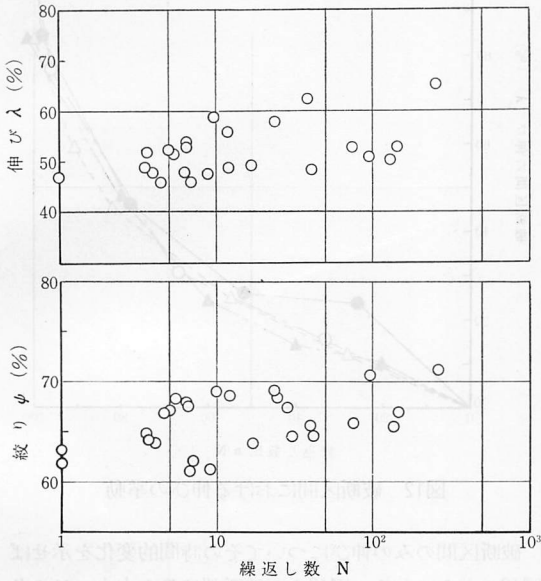


図9 伸び, 絞り, 繰返し数との関係

図7は図4と同じく累加衝撃繰返し数をプロットしたもので $E_1=7.90\text{kg-cm/mm}^2$ と同様処女材料の疲労曲線上にのる。

$\Sigma(n/N)$ と $E_2$ および $E_2/E_1$ の関係を示す図8にお

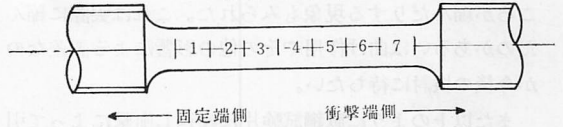
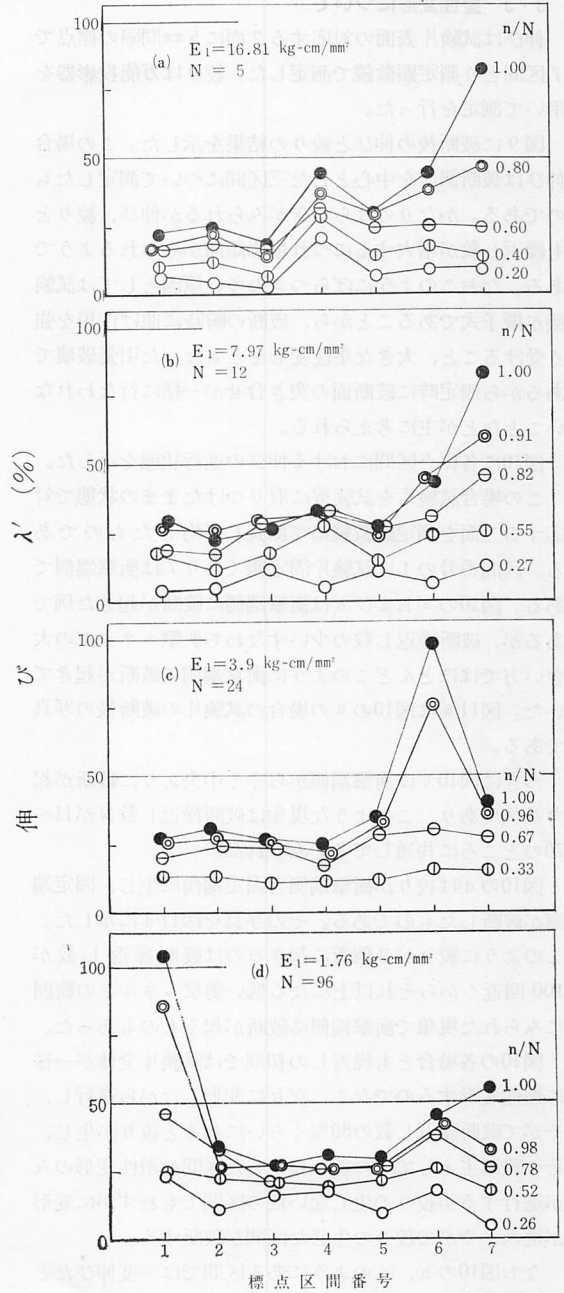


図10 各区間における伸びの挙動

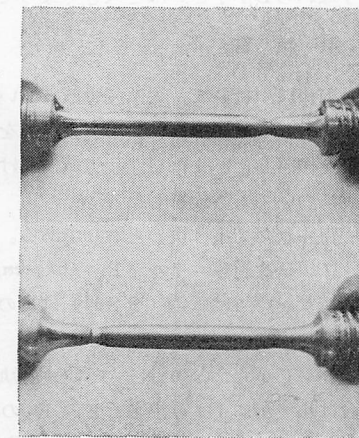


図11 破断箇所

いても、 $E_1 = 7.90 \text{ kg-cm/mm}^2$  の場合と同じく  $E_2/E_1$  の大小および  $n_1/N_1$  によるはっきりとした相違は現われず、 $\Sigma(n/N)$  が 1 の前後に散在する。 $E_2/E_1$  が 1 に近いところではばらつきがやや大きくなるようである。

### 3.3 塑性変形について

伸びは試験片表面の対応する 2 面に 5 mm 間隔の標点で 7 区間とり測定顕微鏡で測定した。絞りは万能投影器を用いて測定を行った。

図 9 に破断後の伸びと絞りの結果を示した。この場合伸びは破断個所を中心とした三区間について測定したものである。かなりのばらつきがみられるが伸び、絞りとも繰返し数が増大するにつれ増す傾向がみられるようである。なおこのようにばらつきの多い原因としては試験機が振子式であることから、破断の瞬時に曲げ作用を強く受けること、大きな塑性変形をともなった引張破壊であるから測定時に破断面の突き合せが一様に行なわれないことなどが主に考えられる。

図 10 に各標点区間における伸びの進行状態を示した。

この場合試験片を試験機に取りつけたままの状態に対応する二面を測定顕微鏡にて測長し平均したものである。区間番号の 1 は試験片固定側であり 7 は衝撃端側である。図 10 の (a) および (b) は衝撃端側に破断が起きた例であるが、破断繰返し数の少ないすなわち衝撃エネルギーの大きい方ではほとんどこのように衝撃端側に破断が起きていた。図 11 (a) は図 10 の (a) の場合の試験片の破断後の写真である。

つぎに図 10 (c) は衝撃端側からやや中央よりに破断が起きた例であり、このような現象は破断繰返し数  $N$  が 11 ~ 70 のところに共通して多くみられた。

図 10 の (d) は絞りが衝撃端側と固定端側に生じ、固定端側が破断したものである。その写真を図 11 (d) に示した。このように絞りが 2 個所に起きるのは破断繰返し数が 100 回近くからそれ以上になる低い衝撃エネルギーの範囲にみられた現象で衝撃端側に破断が起るものもあった。

図 10 の各場合とも繰返しの初期では試験片全体が一緒に塑性変形するのではなく、交互に変形しながら進行し、やがて破断繰返し数の 80% くらいになると絞りが生じ、その後は主としてその絞りの生じた区間の塑性変形のみが進行するが絞りの生じない他の区間でもわずかに変形が進み、やがて絞りの生じた区間が破断する。

なお図 10 の (b), (d) のようにある区間では一度伸びたところが縮んだりする現象もみられた。これは実際に縮んだのかあるいは曲げ作用やその他の影響による誤差なのか今後の検討に待ちたい。

また以上のように軟鋼試験片に繰返し衝撃によって引張変形が生ずる場合、 $N$  の大小すなわち  $E$  の大小で破断

個所が異なること、0.8 N の付近の繰返し数のところで破断個所の位置が決定すること、 $E$  が  $1 \text{ kg-cm/mm}^2$  に近づいてくると絞りが 2 個所にみられてくることなどのような塑性変形挙動は、累積疲労被害に関連するようであるがさらに多くの実験を待って検討する必要がある。

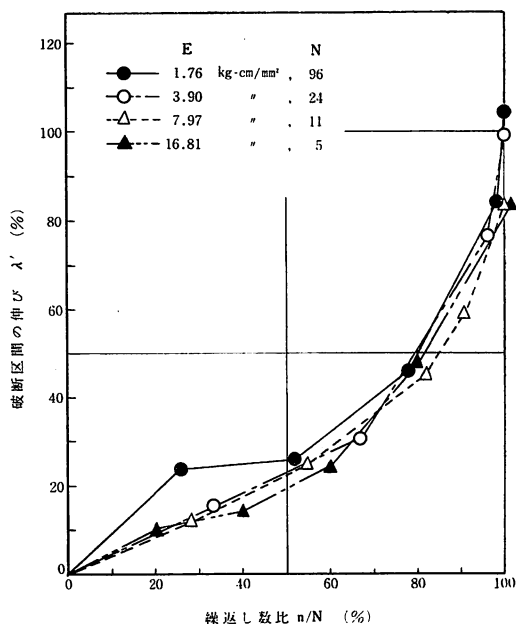


図 12 破断区間における伸びの挙動

破断区間のみの伸びについてその時間的変化を示せば図 12 のようになる。図 12 より破断部は  $E$  の大小、 $N$  の多少にかかわらず同じような傾向で、80% まではだいたい直線的に、80% 付近から急激に伸びが進行していく傾向にある。また破断部の最終的な伸びは  $N$  が大きいほどすなわち  $E$  が小さいほど大きくなっている。

## 4. 結言

4) 前報に引続いて、塑性疲労域において軟鋼 (S S 41) の二段二重重複繰返し衝撃引張試験を行って累積疲労被害を検討した。また塑性疲労域における伸び、絞りの挙動についても実験をした。

得られた結果は次のとおりである。

(1) 一次衝撃エネルギー  $E_1 = 1 \text{ kg-cm/mm}^2$  以上の塑性疲労域においては軟鋼 (S S 41) は真の疲労域の場合と同様 Miner の法則に近似的に従う。

(2) しかし、 $\Sigma(n/N)$  は真の疲労域では  $E_1 > E_2$  の場合はわずかに 1 より小さく  $E_1 < E_2$  の場合はわずかに 1 より大きいか 1 に近似するという傾向がみられたが塑性疲労域  $1 \text{ kg-cm/mm}^2$  以上の衝撃エネルギー範囲では、この

ような相違はみられなく1の前後になっている。

(3) 塑性疲労域では絞りおよび伸びは破断繰返し数の増大とともに増す傾向がある。

(4) 破断繰返し数の多少、すなわち衝撃エネルギーの大小によって破断個所の位置が異なり、破断繰返し数の80%付近から絞りが現われて、破断個所が決まるようである。

本論文では衝撃エネルギーが  $1 \text{ kg-cm/mm}^2$  以上についてのみ実験し考察したが  $1 \text{ kg-cm/mm}^2$  以下不連続点までの塑性疲労域については後報にゆずる。

以上の実験を行うにあたって協力して下さった本校技官、杉沢久雄氏ならびに当時学生、越中谷満、堀井文夫、戸松博、小林貢君等に感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 藤村, 斎藤, 材料試験 8, 71, 673 (1959)
- 2) 藤村, 斎藤, 材料試験 11, 109, 613 (1962)
- 3) 藤村, 斎藤, 材料 12, 119, 594 (1963)
- 4) 斎藤, 宮野, 秋田工業高等専門学校研究記要  
第6号, 9, (1971)
- 5) M, A, Miner, J. Appl. Mech., 12  
(1945), A-159.