

# 鋼の疲労課程における組合せ応力の影響\* (第1報)

関川三男\*\*・芳賀 武\*\*\*

## 1. 緒 言

金属の疲労過程中的組織変化およびクラックの進展過程等については多くの理論<sup>1)2)</sup>や実験結果<sup>3)~5)</sup>の報告がなされており、また組合せ応力における疲労破壊過程についてもかなり報告されている。

本研究は0.3% C鋼材を使用し、回転曲げ疲労実験をおこない、あらかじめS-N曲線を作成し、鋼材の疲労限界を求め、低および高応力振巾疲労に対し、疲労破壊以前に疲労実験を中断し、引張実験および衝撃実験をおこない、その機械的性質の値と電子顕微鏡観察を対比させ、機械的性質である引張強さ、降伏点、破断強さおよび衝撃値との関係を調べ、疲労現象から破壊への機構を推察するとともに組合せ応力下の影響を調べた結果を報告する。

## 2. 試料および実験方法

### 2-1 試 料

試料の化学成分を Table 1 に示す。これを Fig. 1 に示す形状と寸法に機械加工し、その後930°Cで1時間真空焼鈍をおこない、その後エメリー研磨紙および酸化クロムで表面仕上げをほどこし、硝酸アルコールおよびピクリン酸アルコールで腐食した。その時の粒度は8番であった。

Table 1 Chemical Composition

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.31	0.24	0.15	0.02	0.02	0.08	0.01	0.034

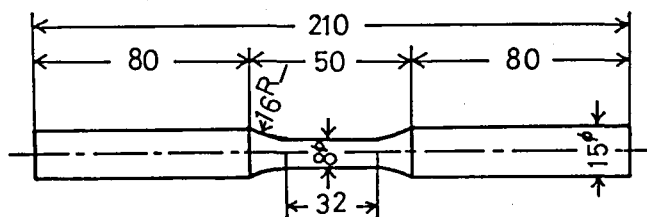


Fig. 1 Shape and Size of a Specimen

\* 日本機械学会北陸信越支部，長野地方講演会において発表  
\*\* 機械工学科教授 \*\*\* 機械工学科助手  
原稿受付 昭和50年9月30日

## 2-2 実験方法

疲労実験は小野式回転曲げ疲労試験機を使用し、あらかじめS-N曲線を作成し、疲労限界を求め、低および高応力振巾疲労をおこない、疲労実験を途中で中断し、引張実験および衝撃実験をおこなった。

なお、引張試験機はリーレータイプの50 t 万能試験機を使用し、衝撃実験はシャルピー衝撃試験機を使用した。破断面の観察は2段レプリカ法により、破断面の外周部と内部とに分け電子顕微鏡観察をおこなった。衝撃実験は Fig. 2 に示すように、表面より3 mm の深さのノッチを入れ衝撃をおこなった。

## 3. 実験結果

0.3 % C 鋼材の疲労実験、引張実験および衝撃実験の主な機械的性質の値を Table 2 に示す。疲労実験は低応力振巾 ( $\sigma \approx 25.5 \text{ kg/mm}^2$  とする) および高応力振巾 ( $\sigma \approx 30 \text{ kg/mm}^2$  とする) の2種類について実験をおこなった。繰返し数は  $N = 2 \times 10^4$ ,  $N = 2 \times 10^5$  および  $N = 1 \times 10^6$  で中断し、それぞれ実験をおこなった。Table 2 は疲労実験および疲労実験の程度に応じて実験をおこない、その後引張実験および衝撃実験をおこなったものである。

Fig. 3 は疲労実験から求めたS-N曲線で、疲労限界は  $\sigma \approx 25 \text{ kg/mm}^2$  である。Table 2 の疲労実験、引張実験および衝撃実験の機械的性質の値を疲労程度に応じてグラフ化したものが Fig. 4 および Fig. 5 に示す。

Fig. 4 は疲労実験後、引張実験をおこなった結果である。 $\sigma_u$  は引張強さ、 $\sigma_r$  は破断強さおよび  $\sigma_y$  は降伏点の値とする。高応力振巾  $\sigma \approx 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N = 2 \times 10^4$  で疲労実験後、引張実験をおこなったとき、 $\sigma_u$  および  $\sigma_r$  は低応力振巾  $\sigma \approx 25.5 \text{ kg/mm}^2$  の実験に比べて著

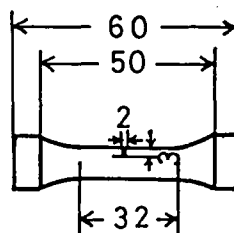


Fig. 2 Form and Dimensions of Impact Test

Table 2 Mechanical Property of Test Material

	Stress Amplitude $\sigma$ : kg/mm <sup>2</sup>	Number Cycle N	Yield Point $\sigma_y$ : kg/mm <sup>2</sup>	Tension Strength $\sigma_u$ : kg/mm <sup>2</sup>	Rupture Strength $\sigma_r$ : kg/mm <sup>2</sup>	Impact Value UE : kg-m/cm <sup>2</sup>
1	—	—	23.16	58.45	47.79	—
2	—	—	—	—	—	8.865
3	27.25	$2 \times 10^4$	—	44.73	33.74	—
4	29.33	$2 \times 10^4$	—	—	—	1.315
5	25.10	$2 \times 10^5$	31.32	58.12	46.48	—
6	25.64	$2 \times 10^5$	—	—	—	7.292
7	25.21	$1 \times 10^6$	32.43	60.88	49.94	—
8	25.32	$1 \times 10^6$	—	—	—	2.820

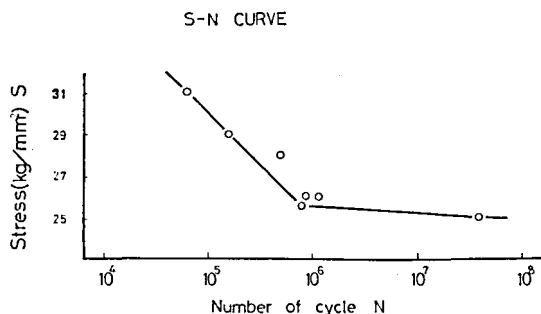


Fig. 3 S-N Curve of Fatigue Test

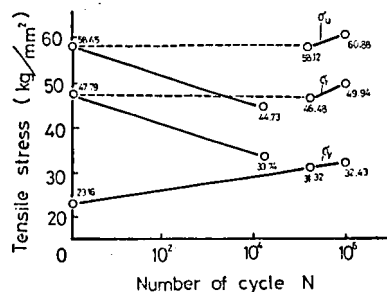


Fig. 4 Relation between Tensile Strengths and Number of Cycles

しく減少する。

また低応力振巾  $\sigma \approx 25.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N = 2 \times 10^5$  および  $N = 1 \times 10^6$  で疲労実験をおこない、その後引張実験をおこなった場合、繰返し数の増加とともに  $\sigma_u$ ,  $\sigma_r$  および  $\sigma_y$  の値はすべて上昇した。

Fig. 5 は疲労実験後、衝撃実験をおこなった結果である。衝撃値を Fig. 4 と同様に横軸に繰返し数  $N$  をとり、縦軸に衝撃値  $U_E$  をとったものである。その結果衝撃実験のみおこなった場合に比べて、高応力振巾  $\sigma \approx 30 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N = 2 \times 10^4$  では衝撃値は極端に低下する。

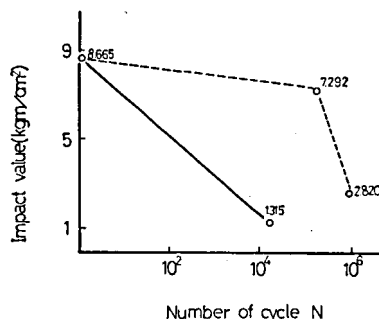


Fig. 5 Relation between Impact Values and Number of Cycles

また低応力振巾  $\sigma \approx 25 \text{ kgmm}^2$ ,  $N = 2 \times 10^5$  では衝撃実験のみおこなった値に比べて、ほとんど変化は見られず、低応力振巾  $\sigma \approx 25.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N = 1 \times 10^6$  に繰返し数を増加すると衝撃値は急激に減少する。

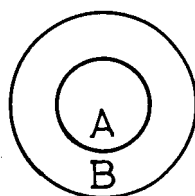


Fig. 6 A and B Sides of Fracture Surfaces

つぎに電子顕微鏡観察の結果を Photo. 1~Photo. 4 に示す。主な破面観察は Fig. 6 に示す2つの部分に分け、観察をおこなった。なおA部およびB部の境界は中心より直径4mmの円周上の部分である。

Photo. 1 のA部は延性による破壊の様相を現わし、等軸 Dimple が現われ、B部はせん断による破壊と延性による破壊が組合さった軸長 Dimple が観察される。

Photo. 2 は衝撃実験のみおこなった破断面の電子顕微鏡観察である。

Photo. 2 (a) はA部でぜい性破壊を示す典型的なへき開破面が観察される。またへき開破壊が進行する際、き裂が伝ばするにつれて合流する大きなき裂の様相、すなわち river pattern も観察される。

Photo. 3 は疲労実験 ( $\sigma \approx 25.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N = 1 \times 10^6$ ) 後、引張実験をおこなった電子顕微鏡観察である。Photo. 3 (a) はA点で疲労のために生じた Striation が観察され、引張実験による Dimple も観察される。Photo. 3 (b) B部で疲労特有の Striation が生じている。この結果、疲労によるクラックの進行は試験片の表面の部分から生じ、中心部に向かって進行していることが分かる。しかし低応力振巾疲労のため完全に中心部まで達していないものと考えら

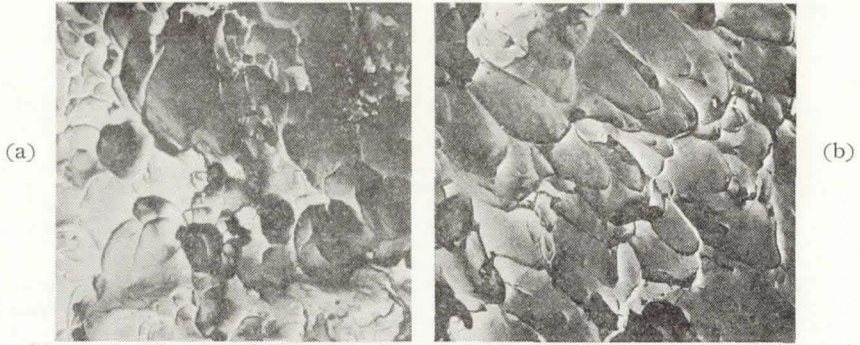


Photo. 1 Changes of Electron-micrograph Produced by Tension Test ( $\times 1950$ )

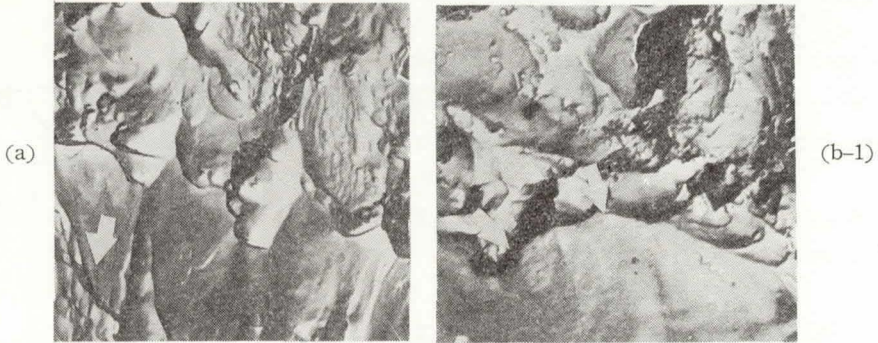


Photo. 2 Changes of Electron-micrograph Produced by Impact Test ( $\times 1950$ )

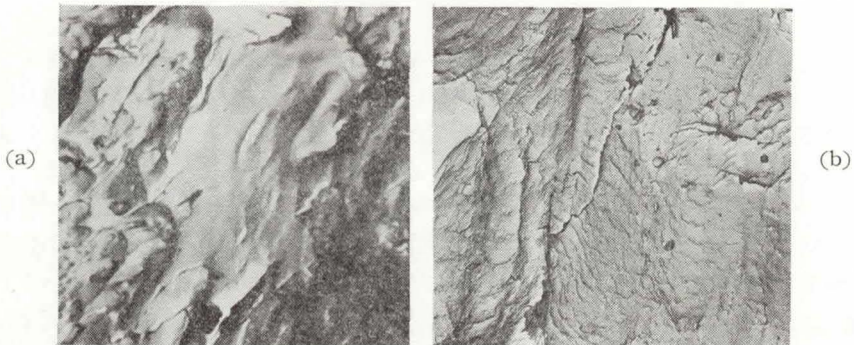


Photo. 3 Changes of Electron-micrograph produced by Fatigue and Tension Test ( $\times 1950$ )



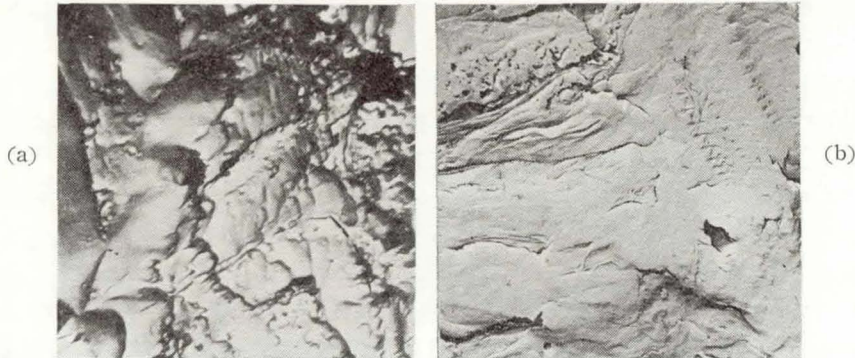


Photo. 4 Changes of Electron-micrograph Produced by Fatigue and Impact Test ( $\times 1950$ )

れ、このことは Fig. 4 の機械的性質の値と対応して考えてみると Fig. 4 の機械的性質の値は上昇している。また Photo. 3 (a) すなわち A 部に Dimple が観察されることにより完全に疲労の進行がおこなわれていないことが推察される。

Photo. 4 は疲労実験 ( $\sigma = 25.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $N = 1 \times 10^6$ ) 後、衝撃実験をおこなった電子顕微鏡観察である。Photo. 4 (a) は A 部で疲労によりクラックが進行し、Striation と介在物が破面をひっかくために発生する Tire track も観察される。Photo. 4 (b) は B 部で粒界ぜい性破壊およびぜい性破壊を示すへき開破壊が観察される。

これらの主な巨視的破壊形状を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 (A) は単純引張実験の破断形状である。この場合、中心部の平坦部は延性破壊の様相を示し、Photo. 1 の A 部に相当する。Fig. 7 (B) は高応力振巾疲労後、引張実験をおこなったときの破断形状である。表面に近い部分にぜい性破壊の状態が観察され、中心部にわずかに延性による Dimple が観察され、疲労実験のみで破壊したものに比べて中心部に平坦な部分がなく、すべてぜい性破壊の様相を示している。また Fig. 7 (C) および (D) は低応力振巾疲労後、引張実験のときの破断形状である。Fig. 7 (C) は  $N = 2 \times 10^5$ 、Fig. 7 (D) は  $N = 1 \times 10^6$  である。(C) と (D) を比較すると、表面に近い部分のぜい性破壊の割合は (D) > (C) で、繰返し数  $N$  の上昇にしたがい増加している。

#### 4. 考 察

Fig. 3 より疲労限界は 8 種類の応力について疲労実験をおこなった結果、約  $25 \text{ kg/mm}^2$  と成りやや小さめである。Fig. 4 より高応力振巾疲労後の引張実験について、引張強さと破断強さが単軸引張りより著しく小さく、特に破断強さは約  $1/2$  である。これは疲労によってすべりおよびすべり帯が急激に進行し、その後 micro-crack が発生し、さらに macro-crack と

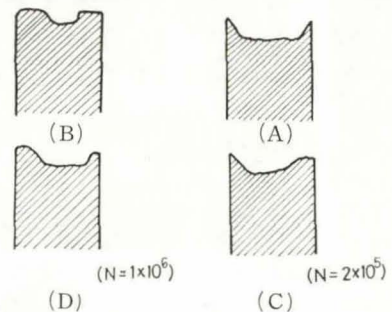


Fig. 7 Changes of Macro-structure Produced by Fracture

- (A) Tension (B) High Stress Amplitude Fatigue  $\rightarrow$  Tension  
(C) (D) Low Stress Amplitude Fatigue  $\rightarrow$  Tension

なる現象が低応力振巾疲労に比べて速く進行するために、低繰返し数 $N$ において crack が発生し、この原因によって Striation が進行し、Fig. 4 の繰返し数  $N=2 \times 10^4$  において、すでに micro-crack が進行しているために引張強さと破断強さが減少するものと考えられる。したがって  $N=2 \times 10^4$  では降伏点は確認できなかった。また低応力振巾疲労の場合は繰返し数が増加するとともに降伏強さ、引張強さおよび破断強さのすべてが増加している。特に降伏強さの増加においては、試験片の表面に近い部分は疲労中に転位が増殖され、増殖がある部分に固着するために力学的に応力集中がその場所におこり、この応力集中が大きくなり試験片が硬化するために疲労後の引張強さ、破断強さも上昇するものと考えられる。顕微鏡観察においては破断面の Photo. 3 の (A) 部は引張りによる Dimple が、(B) 部は疲労による Striation および tire-track が観察された。Fig. 5 より高応力振巾疲労後の衝撃値は極端に小さい、低応力振巾疲労後の衝撃値も減少し、特に繰返し数  $N=1 \times 10^6$  では約1/3に減少している。この理由として考えられることは繰返し数が増加するとすべりが発生し、すべり帯が発生し、表面に intrusion や extrusion が形成され、その後 micro-crack となるため、この進行過程によって衝撃値が変化するので、この結果から  $N=1 \times 10^6$  ではすでに micro-crack や crack が発生しているため衝撃値は小さく、 $N=2 \times 10^5$  ではまだ micro-crack や crack が発生せず、この繰返し数ではすべりなどの発生段階と考えられるため衝撃値が変化しないものと思われる。

## 5. 結 論

疲労過程後の組合せ応力下の影響について研究した結果、たとえば低応力振巾疲労実験において、繰返し数 $N$ が増加すると Striation が発生することおよび衝撃値が低下するという事実より、実際使用されている鋼材などの回転物体にはこのような状態で使用されている場合がしばしばあり、衝撃値の低下は危険であるので注意すべきである。

また引張実験およびねじり実験などの残留応力をあらかじめ与えた後の疲労実験をおこなう、その組合せ応力下の影響を調べることにより破壊現象をさらに具体的に推察することができるものと思われる。

## 参 考 文 献

- (1) W. A. Wood, e. g., phil. Mag., 3, 692 (1958)
- (2) N. Ye. Potakhin and Yu. S. Terminasov, phys. Met. and Metallog., 16, No. 1, 86 (1963)
- (3) C. Minamisawa, M. Sekikaw and T. Haga, Proc. 15th. Japan conr. on Materials Research, 22 (1972)
- (4) R. C. Boettner, Trans. AIME, 239, 1030 (1967)
- (5) T. Haga, H. Yokouchi and M. Ishida, Proc. 16th. Japan conr. on Materials Research, 168 (1973)