過小応力を含むプログラム荷重下 における低炭素鋼の疲労寿命*

山田 敏郎** 幡 中 憲 治**
近 藤 幸 夫*** 河 合 宏****

Fatigue Life of Low Carbon Steel under Programmed Loading Including Stress Lower than Fatigue Limit

by

Toshiro YAMADA, Kenji HATANAKA, Yukio KONDO
(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)
and Hiroshi KAWAI
(Nippon Kokan Ltd., Shimizu)

The manifold repeated rotating bending fatigue tests are carried out at two stress levels on three low carbon steels, which are rimmed, Si-killed and Al-killed steels having the different ageing abilities. These tests constitute a characteristic feature that the cumulative frequency of programmed loading cycles is mainly occupied by the understress lower than the fatigue limit.

The fatigue life under programmed loading is plotted against the equivalent stress, which is estimated on the basis of the modified Miner's law, both on log-log and semi-log diagrams. All experimental points of rimmed steel fall on the right side of the straight line extrapolated from the linear part of $S-N$ curves on both diagrams. Those of Si-killed and Al-killed specimens seem to lie mostly around the above extrapolated straight line, but some experimental points in the longer life range tend to deviate from the straight line toward the shorter life direction on log-log diagram.

The cumulative cycle ratios based on Miner's law are mostly larger than one in rimmed steel, while in Si-killed and Al-killed steels the greater part of these values are less than one. These facts indicate that in the former the understress contributes to the increase of fatigue strength for the higher stress above the fatigue limit, while in the latter it gives fatigue damage to the specimen.

The results of surface structure observation and hardness measurement in the fatigued specimen suggest that the strain ageing gives a remarkable effect on fatigue strength. The fatigue test results mentioned above can be explained along this line.

(Received Feb. 17, 1976)

1 緒 言

一般の機械構造物に作用する繰返し応力は疲労限度以下の応力（過小応力）が大部分で疲労限度を越える応力（過大応力）の繰返しは少ないのが普通である。多段多重疲労試験結果は過小応力の繰返しが多い場合にはこれが疲労寿命を短くしたり、長くしたりする場合の^{1)~3)}あることを示している。また繰返し応力は被害と強化の両作用をもっており、試験条件により被害が大きければ材料は破壊し、強化作用が大きければ破断に

はいらないものと考えられる。他方、疲労過程中のひずみ時効や加工硬化は coxing 効果として知られており、これは疲労強度にかなり大きな影響を与える。とくに疲労限度は繰返し応力中のひずみ時効による⁴⁾ところが大きく、またひずみ時効が疲労強度を増加させる⁵⁾等の現象が明らかにされている。

したがって過小応力の効果に材料の時効性が影響することが予想されるので、本研究では時効性の異なる3種の低炭素鋼を用いて二段多重プログラム疲労試験を行ない、過大応力と過小応力が疲労強度に及ぼす影響について検討したのでその結果を報告する。

2 試料および実験方法

供試材は、リムド鋼、Si-キルド鋼およびAl-キル

* 原稿受理 昭和51年2月17日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

**** 日本鋼管(株) 清水市三保

Table II. Condition of heat treatment for test materials.

Materials	Heat treatment
Rimmed steel	920°C×1 hr.→ Room temp.→ 700°C×1 hr.→ Keep at -77°C (Air cooling) (Heating) (Water quenching)
Si-killed steel	920°C×1 hr.→ Room temp. (Air cooling)
Al-killed steel	920°C×1 hr.→ 350°C×5 hr.→ Room temp. (Furnace cooling) (Furnace cooling)

Table I. Chemical composition of materials used.

Materials	C	Si	Mn	P	S	Al
Rimmed steel	0.11	0.01	0.39	0.016	0.018	—
Si-killed steel	0.12	0.24	0.42	0.022	0.015	0.006
Al-killed steel	0.09	0.03	0.46	0.013	0.016	0.031

Table III. Mechanical properties of materials used.

Materials	Lower yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fracture ductility (%)	Area contraction (%)
Rimmed steel	23.7	41.4	31.5	135.6	74.2
Si-killed steel	25.6	40.0	35.5	126.5	71.8
Al-killed steel	21.3	33.1	40.3	135.8	74.3

Fig. 1. Shape and sizes of test specimen.

ド鋼で疲労部門委員会の共同研究用として準備されたものである。その化学成分を Table I に示す。一般に時効性はリムド鋼, Si-キルド鋼, Al-キルド鋼の順に大であるがさらにその傾向を大にするため, また結晶粒径を揃えるために Table II に示す熱処理を施した。各材料の機械的性質を Table III に示す。試験片は機械加工後, 熱処理を施し, その表面を 0/5 エメリー紙にて研摩後, 電解研摩により鏡面に仕上げた。なおその形状・寸法を Fig. 1 に示す。

疲労試験は小野式回転曲げ試験機 (3000 r. p. m.) に荷重変動装置を設置して行なった。荷重変動プログラムは二段多重とし (Fig. 2), 一次応力 σ_1 として過小応力 (それぞれの材料の疲労限度の 90, 70, 50 および 30%), 二次応力 σ_2 として過大応力 (それぞれ繰返し数 $N_f \cong 4 \times 10^5$ で破断すると考えられる応力で, リムド鋼: $1.18\sigma_w$, Si-キルド鋼: $1.25\sigma_w$, Al-キルド鋼: $1.33\sigma_w$) を採用した。 n_1, n_2 は過小応力, 過大応力の 1 ブロック中の繰返し数である。これらの値を Table IV に合わせて示す。

Fig. 2. Stress pattern for programmed loading.

Table IV. Values of σ_1, σ_2, n_1 and n_2 in programmed loading fatigue test.

	Rimmed steel				Si-killed steel				Al-killed steel				
σ_1 (kg/mm ²)	6.6	11	15.4	19.8	6	10	14	18	4.5	7.5	10	13.5	18
σ_2 (kg/mm ²)	26				25				20				
n_1	3.569×10^5												
n_2	8.9×10^8												

3 実験結果および考察

3・1 3種の材料の時効性

これらの材料の時効性を, 実際に降伏点の回復能力により調べた。4%の予ひずみ (引張応力 σ_Y) を与えた後, 60°C×72時間の時効処理を行ない, 時効処理後の降伏点を σ , そして $\sigma - \sigma_Y = \Delta\sigma_Y$ とするとき, 式 $R = \Delta\sigma_Y / \sigma_Y$ によって求めた R の値は, リムド鋼の場合 0.16, Si-キルド鋼で 0.12 そして Al-キルド鋼では 0.06 になった。これよりこれらの材料はリムド鋼, Si-キルド鋼, Al-キルド鋼の順にひずみ時効性が大きく, これら 3 種の材料は本研究の目的に適するものである。

3・2 疲労試験結果

Fig. 3 は一定繰返し応力下で得られた $S-N$ 曲線および変動荷重疲労試験結果を次式に示す等価応力 σ_{eq} を用いて整理し, それぞれ, (a) 片対数グラフ上, (b) 両対数グラフ上に整理した結果である。この σ_{eq} はいずれも修正マイナー則により算出されたものであって $\sum n/N = 1$ で破壊する場合は, $(\sigma_{eq} \cdot N_f)$ の点は元の $S-N$ 曲線の直線部の延長線上に乗る。この場合の総繰返し数は過小応力および過大応力の繰返し数を加えた総繰返し数 $\sum n_i$ で表わした。

片対数表示の場合

Fig. 3. S - N curves and σ_{eq} vs. Σn plot of test results under programmed loading.

$$\sigma_{eq} = a \ln \frac{\sum \sigma_i \sigma_i / a \cdot n_i}{\sum n_i}$$

ただし、 S - N 曲線の直線部を $\sigma = -a \ln N + b$ で表示する。

両対数表示では

$$\sigma_{eq} = \sqrt[n_2]{\frac{\sum \sigma_i^m \cdot n_i}{\sum n_i}}$$

ただし、 S - N 曲線の直線部を $\ln \sigma = -(1/m) \ln N + C$ で表示する。

ここで σ_i は各荷重変動レベルでの応力振幅、 n_i は荷重変動の 1 ブロック中の σ_i の繰返し数である。

一定繰返し応力下で得られた S - N 曲線を比較すると顕著な時効性を示すリムド鋼の限界繰返し数は時効性の小なる Si-キルド鋼および Al-キルド鋼のそれより小さいことがわかる。

変動荷重疲労試験には一組の疲労試験に対して 3～5 本の試験片を用いた。またリムド鋼の場合、過大応力 $1.18\sigma_w$ 、過小応力 $0.7\sigma_w$ で繰返し数 $N=2.2 \times 10^7$ 以上および同じ過大応力で過小応力 $0.5\sigma_w$ で $N=6 \times 10^7$ で破断しなかったものはその時点で疲労試験を中止した (図中に矢印で示す)。破断時の応力レベルは過大応力の場合もあり過小応力の場合もあって必ずしも一定していない。しかし過小応力の低下につれて過大応力の繰返し中に破断する傾向が増大した。

Fig. 3 (a), (b) より、いずれの材料についても過小応力が $0.9 \sim 0.5\sigma_w$ の範囲内では過小応力の減少につれて破断までの総繰返し数 (Σn_i) は増加するが、過小応力が $0.3\sigma_w$ の場合には総繰返し数は減少することがわかる。

リムド鋼の変動荷重疲労試験結果 (以下これを試験寿命という) はすべて片対数表示、両対数表示いずれの表示法に対しても元の S - N 曲線の直線部①よりも長寿命側にずれることが明らかである。また Si-キルド鋼および Al-キルド鋼の場合には過小応力 σ_1 が $0.9 \sim 0.5\sigma_w$ の範囲内では、片対数表示による試験寿命はほぼ上記直線部②、③に乗り、いわゆる修正マイナー則が成立するようである。そして両対数表示ではこれらの試験寿命は短寿命側にずれる傾向がある。また過小応力が $0.3\sigma_w$ の場合には試験寿命はいずれの表示法に対しても計算寿命より短寿命となっている。

疲労試験結果を修正マイナー則を用いた等価応力により両対数グラフ上に整理する場合、過小応力が $0.7 \sim 0.3\sigma_w$ の範囲内では等価応力値は非常に接近する。これは過小応力の効果が充分にとり入れられていないことを示しており、このような場合には両対数表示は適当ではないことを示している。

上記変動荷重下の疲労試験結果について修正マイナー則による累積繰返し数比 ($\Sigma n_i/N_i$) を計算し、これを Table V に示す。累積繰返し数比は、リムド鋼ではすべて 1 以上、一方、Si-キルド鋼および Al-キルド鋼では大半が 1 以下である。これより過小応力による被害はリムド鋼よりも Si-キルド鋼および Al-キルド鋼において顕著である。

Si-キルド鋼、Al-キルド鋼で過小応力が $0.3\sigma_w$ のとき、試験寿命が計算寿命よりも短くなったことより、過小応力の繰返しによる材料の強化作用に対しては、過小応力であってもあるレベル以上の応力の繰返しが必要であることがわかる。 $0.3\sigma_w$ はこのレベル以下の応力に対応していたことに起因していると思われる。またこれより変動荷重の場合は過大応力により被害が与えられると過小応力でも被害が発生することがわかる。

一方、マイナー則により求めた累積繰返し数比 ($\Sigma n_2/N_2$) は、リムド鋼では過小応力が $0.9\sigma_w$ の場合を除いてほとんど 1 以上となり、これは過小応力が $0.7 \sim 0.3\sigma_w$ の範囲内では過小応力の繰返しにより材料は強化されたことを示す。他方 Si-キルド鋼、Al-キルド鋼では累積繰返し数比の大部分が 1 以下となり、過小応力による被害が生じることを示している。

また、変動荷重疲労試験 (過小応力がそれぞれ $0.3\sigma_w$ で、過大応力がリムド鋼: $1.18\sigma_w$ 、Si-キルド鋼: $1.25\sigma_w$ 、Al-キルド鋼: $1.33\sigma_w$) の後、試験片表

Table V. Test results under programmed loading

Specimen number		$\frac{\sigma_1}{\sigma_w}$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_w}$	In the case of Fig.3(a)		In the case of Fig.3(b)		In the case of Fig.3(a)		In the case of Fig.3(b)	
				$\Sigma \frac{n_1}{N_1} + \Sigma \frac{n_2}{N_2}$	Mean value of $\Sigma \frac{n_1}{N_1} + \Sigma \frac{n_2}{N_2}$	$\Sigma \frac{n_1}{N_1'} + \Sigma \frac{n_2}{N_2'}$	Mean value of $\Sigma \frac{n_1}{N_1'} + \Sigma \frac{n_2}{N_2'}$	$\Sigma \frac{n_2}{N_2}$	Mean value of $\Sigma \frac{n_2}{N_2}$	$\Sigma \frac{n_2}{N_2'}$	Mean value of $\Sigma \frac{n_2}{N_2'}$
Rimmed steel	1-47	0.9	1.18	2.48		1.80		0.48		0.46	
	1-50	0.9	1.18	1.62		1.17		0.29		0.28	
	1-58	0.9	1.18	2.47	1.93	1.78	1.39	0.46	0.36	0.44	0.35
	1-60	0.9	1.18	1.49		1.08		0.27		0.26	
	1-61	0.9	1.18	1.59		1.15		0.29		0.28	
	1-42	0.7	1.18	1.58		1.04		0.86		0.82	
	1-45	0.7	1.18	2.61		1.71		1.42		1.36	
	1-51	0.7	1.18	1.71	2.02	1.12	1.32	0.92	1.09	0.89	1.05
	※1-52	0.7	1.18	4.02<		2.65<		2.19<		2.11<	
	1-53	0.7	1.18	2.18		1.42		1.17		1.13	
	※1-57	0.7	1.18	2.95<		1.94<		1.60<		1.54<	
	1-71	0.5	1.18	2.02		1.68		1.73		1.66	
	1-78	0.5	1.18	4.18	3.10	3.48	2.58	3.58	2.65	3.45	2.56
	※1-79	0.5	1.18	5.12<		4.26<		4.38<		4.22<	
	1-73	0.3	1.18	2.10		1.96		2.03		1.96	
	1-80	0.3	1.18	2.40	2.05	2.24	1.91	2.33	1.98	2.24	1.91
	1-89	0.3	1.18	1.64		1.52		1.58		1.52	
Si-killed steel	2-28	0.9	1.25	1.30		0.96		0.47		0.43	
	2-30	0.9	1.25	1.22		0.90		0.42		0.39	
	2-31	0.9	1.25	1.39	1.29	1.03	0.94	0.49	0.45	0.45	0.41
	2-33	0.9	1.25	1.22		0.80		0.38		0.34	
	2-35	0.9	1.25	1.33		0.98		0.47		0.43	
	2-20	0.7	1.25	0.65		0.49		0.49		0.45	
	2-22	0.7	1.25	1.38		1.05		1.06		0.97	
	2-23	0.7	1.25	0.68	0.89	0.52	0.68	0.52	0.68	0.47	0.62
	2-24	0.7	1.25	0.82		0.62		0.62		0.57	
	2-27	0.7	1.25	0.91		0.73		0.73		0.67	
	2-72	0.5	1.25	0.88		0.76		0.83		0.76	
	2-77	0.5	1.25	0.64	0.72	0.56	0.62	0.61	0.68	0.56	0.62
	2-76	0.5	1.25	0.63		0.55		0.60		0.55	
	2-73	0.3	1.25	0.57		0.52		0.57		0.52	
	2-78	0.3	1.25	0.60	0.57	0.55	0.50	0.60	0.57	0.55	0.62
	2-83	0.3	1.25	0.54		0.49		0.54		0.49	
Al-killed steel	3-32	0.9	1.33	1.61		1.34		0.54		0.53	
	3-33	0.9	1.33	1.15		0.96		0.38		0.37	
	3-34	0.9	1.33	2.07	1.34	1.73	1.12	0.69	0.45	0.68	0.44
	3-35	0.9	1.33	1.27		1.06		0.43		0.42	
	3-37	0.9	1.33	0.60		0.50		0.20		0.20	
	3-25	0.7	1.33	1.30		1.02		0.87		0.86	
	3-27	0.7	1.33	0.86		0.68		0.58		0.57	
	3-28	0.7	1.33	1.34	1.16	1.05	0.91	0.90	0.78	0.88	0.76
	3-29	0.7	1.33	0.97		0.76		0.65		0.64	
	3-31	0.7	1.33	1.31		1.03		0.88		0.86	
	3-73	0.5	1.33	1.83		1.62		1.64		1.61	
	3-74	0.5	1.33	1.30	1.29	1.16	1.14	1.16	1.15	1.14	1.13
	3-77	0.5	1.33	0.73		0.65		0.65		0.64	
	3-72	0.3	1.33	0.23		0.22		0.22		0.22	
	3-84	0.3	1.33	0.58		0.55		0.56		0.55	
	3-85	0.3	1.33	0.53	0.40	0.51	0.38	0.51	0.39	0.51	0.38
	3-86	0.3	1.33	0.41		0.39		0.40		0.39	
	3-89	0.3	1.33	0.25		0.24		0.25		0.24	

※ Unfailure

 N_1 and N_2 are number of cycles to failure at σ_1 and σ_2 on $S-N$ curve plotted on semi-log basis. N_1' and N_2' are number of cycles to failure at σ_1 and σ_2 on $S-N$ curve plotted on log-log basis.

面の硬度をマイクロ・ビッカース硬度計（測定荷重 100 g，保持時間 30 秒）にて測定した。その結果，時効性の大きいリムド鋼の場合には硬度が最初 111 あったものが 207 に，Si-キルド鋼では 117 から 149 に，Al-キルド鋼では 94 から 106 へとそれぞれ硬度が上昇した。この事実は過小応力を含む変動荷重下の材料の強化が，その材料の時効性に影響を受けることを示しており，これはまた Fig. 3 の実験結果に対する本論文の考察を裏付けるものである。

3・3 光学顕微鏡による表面観察

Fig. 4 は変動荷重疲労試験結果の一例で，それぞれ過小応力が $0.7\sigma_w$ の場合である。なおこの場合の荷重変動パターンは次のようにした。すなわち 1 ブロックを σ_1 の $10n_1$ 回と σ_2 の $10n_2$ 回とから構成した。そして写真撮影は繰返し数 $N=0, 10n_1, 10n_1+10n_2, 20n_1+10n_2, 20n_1+20n_2$ ($0, 3.569 \times 10^6, 3.658 \times 10^6, 7.227 \times 10^6, 7.316 \times 10^6$ 回) の五つの疲労過程に対して行なった。Fig. 4 (a), (e) に示すようにリムド鋼，Al-キルド鋼ともに 1 回目の過小応力の繰返し ($10n_1$ 回) ではすべり線は発生しない。1 回目の過大応力を負荷する ($10n_1+10n_2$ 回) ことによりすべり線が発生する。

2 回目の過小応力の繰返し ($20n_1+10n_2$ 回) ではすべり線の増加はほとんど認められない。そして 2 回目の過大応力を負荷する ($20n_1+20n_2$ 回) と，時効性を示すリムド鋼ではすべり線の状態にはほとんど変化は認められなかったが，時効性の小さい Al-キルド鋼ではすべり線は増加した。また Si-キルド鋼は Al-キルド鋼とほぼ同様のすべり線の形態の変化を示した。これは顕著な時効性を示すリムド鋼では 2 回目の過小応力の繰返し中に過大応力により発生したすべり線部分に存在する転位が時効硬化により次第に固着され強化されるためと考えられる。

この表面観察の結果と 3・2 節の変動荷重疲労試験後の硬度測定の結果を合わせて考えると顕著な時効性を示すリムド鋼では，過小応力の繰返し中にひずみ時効，加工硬化による材料の強化が起こる。そしてこのことは Table V における修正マイナー則による累積繰返し数比が 1 より大きくなることと対応するものと考えられる。一方時効性の小さい Al-キルド鋼では過小応力の繰返し中に上記強化が起こりにくいため，Fig. 4 (h) に示すようなすべり線の増加が認められ，かつ Table V から明らかなように過小応力は被害作用

Fig. 4. Surface structure changes during programmed loading.

Fig. 5. Crack observed in rimmed steel specimens which survived under programmed loading.

を有するものと考えられる。

Fig. 5 は変動荷重疲労試験を行なった際の未破断のリムド鋼試験片 (a)過小応力: $0.7\sigma_w$, $N=3\times 10^7$, (b)過小応力: $0.5\sigma_w$, $N=6\times 10^7$, いずれも過大応力 $1.18\sigma_w$ の表面を電解研磨により $2\sim 3\mu$ 除去した後、観察されたき裂である。Fig. 4 で示した表面のすべり線の観察結果では2回目の過大応力ではすべり線形態の変化はほとんど認められなかった。しかし Fig. 5 に示すように多数回の過大応力の繰返しによりかなり大きいき裂 ((a)約 0.25 mm , (b)約 0.5 mm) が発生することがわかる。したがってこれらの試験片はさらに繰返し応力を付与することにより破断にいたるものと考えられる。

4 結 言

大頻度の過小応力を含む二段多重プログラム疲労試験を時効性の異なる3種の軟鋼材について実施し、過大応力および過小応力が疲労強度に及ぼす影響について検討した。

(1) 一定繰返し応力下で得られた $S-N$ 曲線を比較すると限界繰返し数は顕著な時効性を示すリムド鋼で最も小さく、この結果はいわゆる疲労限度の存在にひずみ時効が顕著な役割を果たしていることを暗示している。

(2) 変動荷重疲労試験結果について修正マイナー則を用いて寿命を計算し、これを等価応力を用いて表示した。リムド鋼の場合、実験点は片対数表示でも両対数表示でも一定繰返し応力下で得られた $S-N$ 曲線の直線部分の延長線より長寿命側に位置する。Si-キルド鋼、Al-キルド鋼の片対数表示による結果はほぼ上記延長線上に乗り、修正マイナー則が成立する。これは過小応力による疲労被害が前者よりも後者において

顕著であることを示している。

(3) 両対数表示において修正マイナー則を用いた等価応力値は過小応力が $0.7\sim 0.3\sigma_w$ の範囲内ではほとんど接近する。これは過小応力の効果が充分にとり入れられていないことを示しており、両対数表示はこの場合妥当ではないことを示している。

(4) Si-キルド鋼、Al-キルド鋼では過小応力が小さくなると ($0.3\sigma_w$)、試験寿命が計算寿命より短くなる。これは材料の強化作用に対しては過小応力であってもあるレベル以上の応力の繰返しが必要であることを示している。

(5) 変動荷重を受けた試験片の表面観察結果および繰返し応力による硬度の測定結果は疲労過程にひずみ時効が顕著な影響を与えることを示しており、これよりひずみ時効の観点から変動荷重疲労試験結果を定性的に説明することができる。

(6) とくに長寿命域における試験結果の整理に際しては片対数表示法の方が両対数表示法より安全側の寿命予測を与える。

(昭和50年11月21日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) 川田雄一, 三沢啓志, 材料, **17**, 123 (1968).
- 2) 河本 実, 伊吹幸彦, 石川 浩, 材料, **17**, 97 (1968).
- 3) 長寿命疲れ強さ, 日本機械学会関西支部シンポジウム資料, **1** (1972).
- 4) Lipsitt, H. A., and G. T. Horne, Proc. ASTM, **57**, 587 (1957).
- 5) 西谷弘信, 西田新一, 機械学会論文集, **39**, 1385(1973).
- 6) 中村 宏, 堀川 武, 鎌田敬雄, 山地新一, 機械学会論文集, **39**, 472 (1973).