539.43.01

18-8 ステンレス鋼の被害曲線について*

河 本 実**, 住 広 克 巳***

On the Damage Line of the 18-8 Stainless Steel

by Minoru KAWAMOTO and Katumi SUMIHIRO

French's damage line, which shows the degree of the damage by overstress on the fatigue limit, has little significance when we discuss the damage on the fatigue life.

So one of the authors proposed a new damage line for fatigue life aiming the investigation of the fatigue damage, and obtained some examples with carbon steels. Consequently, the new damage line proved to be very different from French's one in shape.

In this study, we obtained the same damage line for fatigue life of 18-8 stainless steel as of carbon steels, and found that the damage line for fatigue life was nearly equal to French's damage line except near the judging stress.

1. 緒 言

従来の被害曲線は French によって提唱されたいわゆる French の被害曲線であって、これは一次応力を過大応力、二次応力を疲れ限度応力とした二段二重重複繰返し応力疲れ試験においてある一次応力を材料に与えた場合、疲れ限度に対し被害を生じない一次応力繰返し数の限界を求め $S-N$ 線図上に描いたものである。しかしながら機械部品の設計が半永久的な使用から限定された時間内における使用を対象とするようになってきた現在、疲れ限度に対する被害の有無を示す被害曲線よりも、疲れ寿命に対する被害の有無を示す被害曲線のほうが疲れ被害を考えるのに意義をもつものと思われる。この観点より先に筆者らの1人は任意の応力の疲れ寿命に及ぼす被害の有無を示すところの新しい被害曲線を提案するとともに軟鋼、半硬鋼、硬鋼を用い 10% 過大応力の疲れ寿命に対する被害曲線を求めた結果を発表した⁽¹⁾。その結果によると疲れ寿命に対する被害曲線は、判定応力の所で鋭い角をもつ曲線となった。ことに注意すべきは一次応力が判定応力である二次応力より大きくても、二次応力の疲れ寿命に被害作用ではなく強化作用を及ぼす一次応力繰返し数の領域が存在することである。

従来の炭素鋼や若干の特殊鋼について行なわれてきた二段二重重複繰返し応力疲れ試験に関する研究のほ

とんどは、一次応力が二次応力より大きい場合には一次応力は二次応力の疲れ寿命に対し被害作用を及ぼすという説を出しているが、上記の結果はこのような説が一般に成立するものではなく、一次応力の繰返し数比が小さい場合には、二次応力の疲れ寿命に対し強化作用を与えると考えるほうが妥当であることを示している。先の論文は炭素鋼についての研究結果であり、このような結果が特殊鋼についてもいえるか否かを調べるために、18-8 ステンレス鋼を用いて 10% 過大応力の疲れ寿命に及ぼす被害の線図を求めたのが本研究である。また、同時に French の被害曲線を求め、疲れ寿命に対する被害曲線との関連において注目すべき事実を見出した。

2. 供 試 材 料

実験に供した材料は 18-8 ステンレス鋼でその化学成分を第1表に、機械的性質を第2表に示した。なお材料は 1100°C で水焼入れをしてあるが、これは購入先で行なっており、入手後の熱処理は行っていない。

第1表 供試材料の化学成分(%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08	0.75	1.26	0.022	0.012	9.95	18.72

第2表 供試材料の機械的性質

引張強さ kg/mm ²	真破断力 kg/mm ²	伸 び %	絞 り %
62.7	158.3	58.0	71.1

* 昭和 37 年 10 月 30 日 第 40 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 39 年 6 月 18 日。

** 正員、京都大学工学部。

*** 正員、広島大学工学部（広島市千田町 3 丁目）。

3. 実 験 方 法

実験に用いた試験機は小野式回転曲げ疲れ試験機であり、その繰返し速度は毎分 1 800 回である。試験片の形状寸法は第 1 図に示す。なお、試験片は 00 # 研摩紙で表面仕上を行なっている。実験には番号 1, 2, 3 で示す 3 本の素材棒より得た試験片を用いたが、各素材棒について一定応力振幅疲れ試験を行なって S-N 曲線を求め、それぞれの素材棒についての二段二重重複繰返し応力疲れ試験における二次応力の大きさ、その繰返し数比の決定および試験結果の考察の基礎とした。これは 3 本の素材棒はいずれも一つの鋼塊

第 3 表 一定応力振幅疲れ試験結果
(素材棒番号 1)

試験片番号	繰返し応力 σ kg/mm ²	破断繰返し数 N (→印は破断せず)
102	30.1	5 900
104	30.0	6 000
105	29.5	8 200
108	29.0	9 600
120	28.0	11 900
103	27.0	15 000
110	26.0	112 400
107	25.5	$10^6 \rightarrow$
115	25.0	$5 \times 10^6 \rightarrow$

疲れ限度 $\sigma_w = 25.5$ kg/mm²

第 4 表 一定応力振幅疲れ試験結果
(素材棒番号 2)

試験片番号	繰返し応力 σ kg/mm ²	破断繰返し数 N (→印は破断せず)
212	30.0	7 500
208	29.0	10 600
213	28.65	10 600
214	28.0	13 400
221	27.0	16 700
218	27.0	21 600
209	26.5	38 900
204	26.0	66 300
217	25.5	128 000
203	25.0	$10^6 \rightarrow$
222	25.0	$10^7 \rightarrow$

疲れ限度 $\sigma_w = 25.0$ kg/mm²

第 5 表 一定応力振幅疲れ試験結果
(素材棒番号 3)

試験片番号	繰返し応力 σ kg/mm ²	破断繰返し数 N (→印は破断せず)
317	29.5	9 800
301	29.0	12 700
305	28.0	16 700
319	27.0	29 800
314	26.0	112 600
302	25.5	$10^6 \rightarrow$
308	25.5	$2 \times 10^6 \rightarrow$

疲れ限度 $\sigma_w = 25.5$ kg/mm²

より製作されたものであるが、これらの素材棒より製作された試験片の疲れ強さに関してある程度の大小があり、共通の S-N 曲線を得ることができなかったためである。

4. 実験結果およびその考察

一定応力振幅疲れ試験の結果を第 3~5 表および第 2~4 図に示す。また、二段二重重複繰返し応力疲れ

第 1 図 試 験 片

第 2 図 応力-破断繰返し数線図
(素材棒番号 1)

第 3 図 応力-破断繰返し数線図
(素材棒番号 2)

第 4 図 応力-破断繰返し数線図
(素材棒番号 3)

試験結果を第 6~8 表および第 5~7 図に示す。第 6~8 表中の記号の説明は次のとおりである。

記号の説明

σ_1 : 一次繰返し応力 kg/mm^2

σ_2 : 二次繰返し応力 kg/mm^2

n_1 : 一次応力繰返し数

n_2 : 二次応力繰返し数

N_1 : 一次応力における破壊までの繰返し数

N_2 : 二次応力における破壊までの繰返し数

σ_w : 疲れ限度

$D=1-n_2/N_2$: 二次応力の疲れ寿命に対する被害度

第 2~4 図における白丸は一定応力振幅疲れ試験結果であり、実線はこれらの白丸を連らねて得た S-N 曲線であって疲れ限度は素材棒 1, 3 において 25.5 kg/mm^2 , 素材棒 2 において 25 kg/mm^2 , 限界繰返し数はいずれの S-N 曲線においても 10^6 であった。

第 5 図に示すのは、10% 過大応力の疲れ寿命に対する被害曲線のうち、一次応力が判定応力である 10% 過大応力よりも大きい部分である。図中、細い実線は第 2 図における S-N 曲線である。黒丸は被害曲線を求めるために行なった二段二重重複繰返し応力疲れ試験結果を横座標に一次応力の繰返し数、縦座標に一次

第 6 表 二段二重重複繰返し応力疲れ試験結果 (素材棒番号 1)

試験片 番 号	一 次 応 力					二 次 応 力					$D=1-\frac{n_2}{N_2}$
	σ_1	σ_1/σ_w	n_1	N_1	n_1/N_1	σ_2	σ_2/σ_w	n_2	N_2	n_2/N_2	
109	29.962 5	1.175	2 200	6 600	0.33	28.05	1.1	11 400	11 600	0.98	0.02
113	"	"	1 400	"	0.21	"	"	12 800	"	1.10	-0.10
121	29.325	1.15	2 700	9 000	0.30	"	"	6 200	"	0.53	0.47
116	"	"	2 100	"	0.23	"	"	10 200	"	0.88	0.12
111	"	"	1 800	"	0.20	"	"	12 400	"	1.07	-0.07
117	28.687 5	1.125	3 100	10 300	0.30	"	"	8 500	"	0.73	0.27
112	"	"	2 000	"	0.19	"	"	12 300	"	1.06	-0.06
106	28.368 75	1.112 5	2 000	11 000	0.18	"	"	9 700	"	0.84	0.16
119	"	"	1 500	"	0.14	"	"	10 500	"	0.91	0.09
114	"	"	1 000	"	0.09	"	"	12 600	"	1.09	-0.09

第 7 表 二段二重重複繰返し応力疲れ試験結果 (素材棒番号 2)

試験片 番 号	一 次 応 力					二 次 応 力					$D=1-\frac{n_2}{N_2}$
	σ_1	σ_1/σ_w	n_1	N_1	n_1/N_1	σ_2	σ_2/σ_w	n_2	N_2	n_2/N_2	
223	26.875	1.075	10 000	25 000	0.40	27.5	1.1	6 800	16 600	0.41	0.59
205	"	"	5 000	"	0.20	"	"	11 200	"	0.67	0.33
210	"	"	1 500	"	0.06	"	"	17 900	"	1.08	-0.08
219	26.25	1.05	20 000	45 000	0.44	"	"	6 600	"	0.40	0.60
201	"	"	15 000	"	0.33	"	"	4 200	"	0.25	0.75
215	"	"	10 000	"	0.22	"	"	19 700	"	1.19	-0.19
206	25.625	1.025	20 000	104 000	0.19	"	"	11 700	"	0.70	0.30
220	"	"	15 000	"	0.14	"	"	12 400	"	0.75	0.25
216	"	"	10 000	"	0.10	"	"	18 400	"	1.11	-0.11
211	25.0	1.0	10^7	$>10^6$	<10	"	"	21 200	"	1.28	-0.28
202	"	"	10^6	"	<1	"	"	17 400	"	1.05	-0.05

第 8 表 二段二重重複繰返し応力疲れ試験結果 (素材棒番号 3)

試験片 番 号	一 次 応 力					二 次 応 力					破断の有無
	σ_1	σ_1/σ_w	n_1	N_1	n_1/N_1	σ_2	σ_2/σ_w	n_2	N_2	n_2/N_2	
312	26.687 5	1.125	8 800	13 200	0.67	25.5	1.0	12 700	$>10^6$	<0.013	破断
304	"	"	6 000	"	0.45	"	"	81 300	"	<0.081	"
306	"	"	4 000	"	0.30	"	"	10^6	"	<1.00	破断せず
320	28.05	1.1	11 000	17 000	0.65	"	"	26 900	"	<0.027	破断
315	"	"	7 000	"	0.41	"	"	10^6	"	<1.00	破断せず
318	"	"	3 000	"	0.18	"	"	10^6	"	<1.00	"
321	27.412 5	1.075	11 500	23 500	0.49	"	"	18 000	"	<0.018	破断
311	"	"	10 000	"	0.43	"	"	10^6	"	<1.00	破断せず
310	26.775	1.05	24 100	37 000	0.65	"	"	29 400	"	<0.029	破断
313	"	"	22 000	"	0.59	"	"	10^6	"	<1.00	破断せず
316	26.137 5	1.025	34 400	85 000	0.40	"	"	32 200	"	<0.032	破断
307	"	"	25 000	"	0.29	"	"	10^6	"	<1.00	破断せず

応力をとって表わしたもので、かたわらに示す数字は $D=1-n_2/N_2$ なる関係によって示される被害度 D を示している。ここに N_2 は $S-N$ 曲線から得た 10% 過大応力における破断繰返し数であり、 n_2 は二次応力の繰返し数である。実験すべき一次応力は 4 段階として正の被害を示す実験点および負の被害を示す実験点をいずれも被害度の絶対値が小さい範囲で求め、これらの実験点より被害零の点が補間法により得られるようにした。したがって、正または負の被害のみを示す実験点から被害零の点を外そうするというようなあいまいさは避けることができた。

これらの被害零の点を結んで得たのが太い実線で示される被害曲線である。実験結果は第 2 図に示す一定応力振幅疲れ試験結果と同様にばらつきが非常に少なく、このステンレス鋼に関しては判定応力を 10% 過

第 5 図 疲れ寿命に対する被害曲線 (判定応力 $\sigma_2=1.1\sigma_w$, $\sigma_1>\sigma_2$)

第 6 図 疲れ寿命に対する被害曲線 (判定応力 $\sigma_2=1.1\sigma_w$, $\sigma_1<\sigma_2$)

第 7 図 French の被害曲線

大応力とした場合、一次応力が判定応力より大きくても負の被害作用、すなわち強化作用を与える一次応力繰返し数の領域が明らかに存在し、かつ、この負の被害領域と正の被害領域を区切る被害曲線は、 $S-N$ 曲線および判定応力を表わす直線などが意味する境界条件⁽¹⁾を満たしながらなめらかな曲線として存在することがわかった。この負の被害領域が存在することは、従来の二段二重重複繰返し応力疲れ試験結果において一次、二次応力がともに過大応力でかつ、一次応力が二次応力よりも大きい場合、一次応力は材料の二次応力における疲れ寿命に被害を与えるといわれてきたが、一次応力の繰返し数いかによっては強化作用を与えることを示している。この事実は静応力で予加工した材料が加工硬化のため、疲れ強さを向上せしめられることがあることと考え合わせればむしろ当然のことと思われる。ここで被害曲線の形が材料および判定応力などの条件によって異なるのは疲れの性質上、自明のことである。

第 6 図に示すのは、10% 過大応力に対する被害曲線のうち一次応力が判定応力である 10% 過大応力よりも小さい部分である。図中、細い実線は第 3 図における $S-N$ 曲線である。この場合にも各応力段階で正の被害を表わす実験点および負の被害を表わす実験点を求めたが、その結果に関しては第 5 図の場合と異なりいくぶん、ばらつきが見受けられる。これは一般に一定応力振幅疲れ試験において、応力が疲れ限度に近づくにつれ疲れ寿命のばらつきが大きくなることと考え合わせれば理解できる。太い実線で示す曲線が以上の点を考慮して描いた被害曲線である。二重丸は疲れ限度の応力を 10^6 回および 10^7 回繰返した試験片に 10% 過大応力を繰返して破断させたもので、かたわらの数字はやはり被害度 D を表わしている。本図の $S-N$ 曲線からわかるように、限界繰返し数を 10^6 と考えると疲れ限度の応力を 10^6 回繰返した場合の被害度は -0.05 であるのに対し、 10^7 回繰返した場合の被害度は -0.28 で、二次応力の疲れ寿命におよぼす強化の程度がかなり異なっている。このことは炭素鋼で一次応力を疲れ限度応力または疲れ限度に近い過小応力とした場合、一次応力の繰返し数を限界繰返し数内で増加させると、二次応力の疲れ寿命に対する強化作用は増すが、限界繰返し数を越えるあたりから強化作用は一定の大きさに収束してくるという結果⁽²⁾と考え合わせると、過小応力の影響が炭素鋼と 18-8 ステンレス鋼ではかなり変わってくることを予想させる。

第 7 図に示すのは、疲れ限度応力に対する被害曲線図、すなわち、いわゆる French の被害曲線図である。

第8図 応力および繰返し数を無次元化する被害曲線

図中, 細い実線で示す曲線は第4図における S-N 曲線である。白丸および黒丸は French の被害曲線を求めるために行なった二段二重重複繰返し応力疲れ試験結果であって, 白丸は縦座標によって示される一次応力を横座標によって示される繰返し数だけ受けた試験片を疲れ限度応力で疲れ試験したところ, 限界繰返し数に達しても破断しなかったことを示し, 黒丸は破断したことを示す。太い実線で示す曲線はこれらの点から疲れ限度応力に被害を及ぼさない一次応力繰返し数の限界として描いた French の被害曲線である。

このようにして求めた疲れ寿命に対する被害曲線と French の被害曲線の間にいかなる関係があるかを知るために, 第5, 6, 7図の被害曲線を応力および繰返し数を無次元化して一つの図にまとめたのが第8図である。ただし, 第5, 6, 7図の被害曲線を第8図に移すに当たって用いた一次応力の繰返し数は, 被害曲線上の一次応力繰返し数であって, 実験点より得た被害零の点の繰返し数ではない。第8図からわかるように疲れ寿命に対する被害曲線は French の被害曲線より一次応力繰返し数の小さい所で存在し, かつ, 判定応力より遠ざかるにつれ French の被害曲線に漸近している。このことは疲れ限度に被害を及ぼさない一次応力の繰返し数領域と, 二次応力の疲れ寿命に被害を及ぼさない一次応力の繰返し数領域はおおよそ一致し, その差は疲れ寿命に対する被害曲線の判定応力の影響を受ける範囲にとどまるということを示していると考えられる。第9表は French の被害曲線を求めるために行なった二段二重重複繰返し応力疲れ試験において, 破断しなかった試験片をさらに 10% 過大応力の下で

第9表 三段三重重複繰返し応力疲れ試験結果 (素材棒番号 3)

試験片 番号	三 次 応 力					$D' = 1 - \frac{n_3}{N_3}$
	σ_3	σ_3/σ_w	n_3	N_3	n_3/N_3	
306	28.05	1.1	18 300	17 000	1.08	-0.08
315	"	"	21 500	"	1.26	-0.26
318	"	"	19 000	"	1.12	-0.12
311	"	"	19 600	"	1.15	-0.15
313	"	"	19 900	"	1.17	-0.17

疲れ試験し破断させた結果であって, 表中の D' は $D' = 1 - n_3/N_3$ なる関係で示される三次応力の疲れ寿命に対する被害度を表わしている。ここに N_3 は 10% 過大応力における疲れ寿命であり, n_3 は三次応力としての 10% 過大応力の繰返し数である。

今, D' の値を検討してみるといずれも負の被害を示し, しかもその絶対値は疲れ限度応力を限界繰返し数だけ繰返した後, 10% 過大応力の下で疲れ破断させた場合の被害度 $D = -0.05$ よりも大きい。したがって, 今, 二次応力である疲れ限度応力が一次応力とは独立に, 三次応力の疲れ寿命に影響を及ぼすと仮定すれば, 第9表に示す被害度 D' はいずれも一次応力の影響による強化作用が現われていることを示す。すなわち, この事実からも French の被害曲線図において負の被害領域に属する点は, 疲れ寿命に対する被害曲線図においてもやはり負の被害領域に属するといえるように思われる。ここで注意すべきは一次応力, 三次応力がともに 10% 過大応力の場合にも被害度 D' の絶対値は -0.05 よりも大きくなっていることである。この場合には前の仮定のみでは説明できないが, さらに, 一次応力が判定応力と等しい場合の特殊性も一次応力と判定応力たる三次応力の間でこれらと異なる大きさの二次応力が繰返されることにより, とり除かれるという仮定を加れば説明し得る。

5. 結 論

French の被害曲線に対して新しく提唱した疲れ寿命に対する被害曲線が, 炭素鋼のみならず 18-8 ステンレス鋼のごとき特殊鋼についても存在することを示し, あわせて疲れ寿命に対する被害曲線は判定応力なる境界条件を除けば, ほぼ French の被害曲線に等しくなるという事実を見出した。

文 献

- (1) 河本, 材料試験, 8-68 (昭 34), 405.
- (2) JSTM 疲労部門委員会, 材料試験, 8-72 (昭 34), 683.