論文

鋼の疲労の統計的性質および疲労強度と非金属介在物*

横堀 武夫** 前川 一郎*** 是川 誠一****

The Influence of Non-metallic Inclusions on the Fatigue Strength and the Statistical Nature of Steel

by

Takeo YOKOBORI, Ichiro MAEKAWA and Seiichi KOREKAWA
(Faculty of Engineering, Tohoku University)

Three series of specimens were specially prepared so that they may contain various degrees of MnS non-metallic inclusions, other parameters being kept constant especially the amount of manganese in solution as much as possible. Fatigue tests were carried out with a rotating bending fatigue machine.

The results obtained are as follows:

- (1) The definite relationship could not be recognized between the inclusion ratings and the statistical nature of fatigue life of steel, which is in accordance with the previous work by one of the present authors, but contrary to the result by Epremian and Mehl.
- (2) The ferrite grain size is a predominant metallurgical factor in the statistical nature of fatigue fracture of steel.
- (3) For the same stress amplitude, the scatter of fatigue life increases and the probability of fracture decreases with the decrease of grain size.
- (4) For the equivalent stress amplitude, the scatter of fatigue life appears not to be affected by inclusion ratings and ferrite grain size.
- (5) The longitudinal fatigue strength of carbon steel is not so much affected by the content of MnS as inclusions. The effect by ferrite grain size or other statistical parameters may also be large.

(Received Nov. 8, 1962)

1. 緒 言

他の条件を同一に保って、同一材について介在物の量だけを変えて疲労強度を系統的に調べた研究はいまだほとんど知見しない。著者の一人はさきに種々の炭素鋼の疲労破壊の統計的性質¹⁾と介在物およびフェライト結晶粒度との関係を調べた。ここでは化学成分など他の条件はできるだけ同一に保って(例えば固溶 M_n の量をほぼ等しく保つようにした)、 M_n と S の量の配合を変えることによって介在物としての $M_n S$ の量を微量からきわめて多量の範囲に至るまで変えて(S の含有量を 0.010~0.340 % まで変えて)調製された炭素鋼(S15C)について疲労の統計的性質および疲労強度を調べた結果を述べる。この調製の際、フェライト結

晶粒度も多少変わったのであるが、その影響も調べてある。なお、 $M_n S$ 介在物の疲労強度に及ぼす影響の研究としては、英国鉄鋼協会の介在物小委員会が中心となった研究²⁾があるが、そこでは S 含有量を 0.04 % まで増すことによって $M_n S$ 介在物の数量を増したものであり、 $M_n S$ の数量の範囲は、われわれの場合、英国鉄鋼協会介在物小委員会の研究よりもはるかに広範囲である。

2. 供試材料および試験片の準備

供試材料は本研究のために特に三菱鋼材(株)内山道良氏(当時研究部長)によって調製されたものである。すなわち、Table I^{*}に示すように他の条件はできるだけ同一に保って M_n と S の含有量のみを変えた 3 種の

* 原稿受付 昭和37年11月8日

** 正員 東北大学工学部 *** 東北大学工学部

**** 現在東北大学教育教養部

* 固溶 Mn の量の推定値は、S のすべてが一応 $Mn S$ となっているという仮定の下に求めたものである。実際はこの推定値よりは小さいことは当然であるが、3 種の材料の固溶 Mn 量の比較のおおよその尺度とはなるであろう

炭素鋼(S15C)が調製された。なお、溶解、造塊、圧延等試験片採取に至るまでの処理操作については別の報告に譲る。試験片は鍛造方向(鍛造比は200)に軸方向が一致するように採取された。試験片加工前に900°Cにて30分焼準された。各材の介在物分布状況は Photo. 1 に示すとおりである。内山氏による介在物測定結果(JISGO 555 ならびに ASTM B法による判定結果)を Table 2 に示す。E材は介在物微量、D材は中間程度、J材はきわめて多量のものであることがわかる。各材のフェライト結晶粒度測定結果も Table 2 に示した。

3. 実験結果と考察

疲労試験には小野式回転曲げ試験機を用いた。繰返速度は毎分1400である。各材について得られたS-N曲線を Fig. 1 に示した。実験データの一部を Table 3 および 4 に示した。

Fig. 1 S-N diagram of each steel

(I) 疲労強度

Fig. 1 に示すように疲労強度はD材、E材、J材の順に高くなっている。介在物 rating の順とは一致していない。この理由については次のような原因が考えられよう。一つは、D材、E材、J材の順にフェライト結晶粒の大きさが小さくなっていることである。(Table 2) フェライト結晶粒の小さくなるほど疲労強度が高くなることは実験的にもたしかめられており、理論的にも示されている。しかし、介在物のもっとも多いJ材がもっとも疲労強度が高いということは、この程度の結晶粒の大きさのちがいでだけによるものとは考えにくいと思う。すなわち、J材の場合には、D材、E材よりも、固溶 M_n の推定量が大である (Table 1 参照) ことも疲労強度増大にきいているものと考えられよう。その理由は次のとおりである。固溶 M_n の量の疲労限におよぼす影響についての研究がまだ知見されないものであるが、鋼材の降伏点におよぼす影響についての研究によれば、固溶 M_n 量が約0.5%程度以上になると、その増加とともに転位の摩擦力 σ_i が増加して降伏点が増加することが実験的にたしかめられている。一方、疲労破壊の理論によれば σ_i の増加は同時に疲労限の増加となって現われるからである。したがって、次のように説明されるであろう。

(1) E材とD材とを比べると、D材の方が介在物量も多く、しかも結晶粒が大いのでE材よりも疲労強度が低い。(E材とD材の固溶 M_n 量の相違もあるが、このきき方よりも介在物および結晶粒大さの重量

Table 1 Chemical composition of steels tested (%)

Composition Steel	C	Si	Mn	P	S
E	0.16	0.31	0.56 (Solid solution Mn~0.54)	0.013	0.010
D	0.13	0.17	0.88 (Solid solution Mn~0.57)	0.013	0.183
J	0.15	0.23	1.17 (Solid solution Mn~0.59)	0.022	0.340

Photo. 1 Typical photographs of non-metallic inclusions in longitudinal section of each steel

Table 3 Fatigue life of each steel at stress amplitude of $\pm 33.8 \text{ kg/mm}^2$

E-steel				
試片記号	ν	$1-\nu/n+1$	寿命 N_t	$\log_{10} N_t$
EA 16	1	0.952	0.985×10^5	4.9934
EA 4	2	0.905	0.994 "	4.9974
EA 17	3	0.857	1.046 "	5.0195
EA 18	4	0.810	1.058 "	5.0245
EA 21	5	0.762	1.114 "	5.0469
EA 10	6	0.714	1.220 "	5.0864
EA 19	7	0.667	1.243 "	5.0945
EA 13	8	0.619	1.256 "	5.0990
EA 2	9	0.571	1.270 "	5.1038
EA 7	10	0.524	1.298 "	5.1133
EA 6	11	0.476	1.315 "	5.1189
EA 14	12	0.429	1.338 "	5.1265
EA 9	13	0.381	1.384 "	5.1411
EA 20	14	0.334	1.422 "	5.1529
EA 3	15	0.286	1.435 "	5.1569
EA 11	16	0.238	1.472 "	5.1679
EA 24	17	0.190	1.532 "	5.1853
EA 5	18	0.143	1.562 "	5.1937
EA 12	19	0.095	1.609 "	5.2066
EA 1	20	0.048	1.734 "	5.2390

J-steel				
試片記号	ν	$1-\nu/n+1$	寿命 N_t	$\log_{10} N_t$
J 40	1	0.909	1.439×10^5	5.1581
J 39	2	0.818	1.954 "	5.2909
J 38	3	0.727	2.392 "	5.3788
J 19	4	0.636	2.517 "	5.4009
J 37	5	0.545	2.539 "	5.4047
J 32	6	0.455	3.087 "	5.4895
J 34	7	0.364	3.297 "	5.5181
J 36	8	0.273	3.332 "	5.5227
J 23	9	0.182	4.349 "	5.6384
J 35	10	0.091	6.225 "	5.7941

D-steel				
試片記号	ν	$1-\nu/n+1$	寿命 N_t	$\log_{10} N_t$
D 24	1	0.875	1.75×10^4	4.2430
D 21	2	0.750	1.78 "	4.2504
D 26	3	0.625	1.99 "	4.2989
D 25	4	0.500	2.24 "	4.3502
D 20	5	0.375	2.24 "	4.3502
D 23	6	0.250	2.33 "	4.3674
D 22	7	0.125	2.71 "	4.4330

効果の方が大きいとめと考えられよう)。

(2) また, J 材は介在物の量はもっとも多いけれども, 結晶粒がもっとも小さく, しかも, 固溶 M_n の量が E 材, D 材のいずれよりも多くて, 転位の摩擦力を増大させるということの双方の原因によって, 疲労強度がもっとも高くなっているものとして説明される。

(II) 疲労の統計的性質

(i) 同一応力振幅での寿命のばらつき Table 2 から $S=33.8 \text{ kg/mm}^2$ での E 材, D 材および J 材の寿命のばらつき (標準偏差 σ_N) を計算した結果を Table 2 に示した。すなわち, 次の関係がある (有意水準 1

Table 4 Fatigue life of each steel at equivalent stress amplitude

J-steel (at $S=34.4 \text{ kg/mm}^2$)				
試片記号	ν	$1-\nu/n+1$	寿命 N_t	$\log_{10} N_t$
J 11	1	0.952	1.120×10^5	5.0492
J 1	2	0.905	1.149 "	5.0603
J 16	3	0.857	1.268 "	5.1031
J 18	4	0.810	1.298 "	5.1133
J 6	5	0.762	1.353 "	5.1313
J 13	6	0.714	1.377 "	5.1389
J 12	7	0.667	1.441 "	5.1587
J 10	8	0.619	1.443 "	5.1593
J 3	9	0.571	1.450 "	5.1614
J 7	10	0.524	1.469 "	5.1670
J 17	11	0.476	1.542 "	5.1881
J 5	12	0.429	1.572 "	5.1964
J 15	13	0.381	1.734 "	5.2390
J 8	14	0.334	1.779 "	5.2502
J 9	15	0.286	1.973 "	5.2951
J 14	16	0.238	2.041 "	5.3098
J 4	17	0.190	2.157 "	5.3339
J 2	18	0.143	2.449 "	5.3890
J 20	19	0.095	2.569 "	5.4098
J 21	20	0.048	2.597 "	5.4145

D-steel (at $S=28.2 \text{ kg/mm}^2$)				
試片記号	ν	$1-\nu/n+1$	寿命 N_t	$\log_{10} N_t$
D 14	1	0.900	1.893×10^5	5.2772
D 16	2	0.800	2.321 "	5.3657
D 15	3	0.700	2.361 "	5.3731
D 17	4	0.600	2.573 "	5.4104
D 13	5	0.500	2.784 "	5.4447
D 10	6	0.400	2.792 "	5.4459
D 7	7	0.300	2.813 "	5.4492
D 12	8	0.200	2.860 "	5.4564
D 18	9	0.100	3.276 "	5.5153

For E-steel (at $S=33.8 \text{ kg/mm}^2$), see Table 3

%) ことがわかる。

$$\sigma_{NJ33.8} > \sigma_{NE33.8} > \sigma_{ND33.8} \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_{NJ33.8}$ 、 $\sigma_{NE33.8}$ および $\sigma_{ND33.8}$ はそれぞれ J 材、E 材および D 材の $S=33.8 \text{ kg/mm}^2$ における寿命の標準偏差を現わすものとする。一方、介在物 rating の方は、

$$I_{RJ} > I_{RD} > I_{RE} \quad (2)$$

の順になっている。ただし、 I_{RJ} 、 I_{RD} および I_{RE} はそれぞれ J 材、D 材および E 材の介在物 rating を現わすものとする。(1)式、(2)式を見ると σ_N と I_R の間には一定の関連性が認められない。

一方、フェライト結晶大きさの方は Table 4 から

$$G_{NJ} > G_{NE} > G_{ND} \quad (3)$$

である。ただし、 G_{NJ} 、 G_{NE} および G_{ND} はそれぞれ J 材、E 材および D 材のフェライト結晶粒度番号を現わすものとする。すなわち、(1)式と(3)式とを比べてみると、結晶粒の細かいほど疲労寿命のばらつき¹⁾が大きくなっていることがわかる。これは前報の結果と全く同様である。また、破壊の確率が結晶粒の小さいほど小さくなること (Fig. 2) もこれまでの結果と同様である。なお、E 材、D 材ならびに J 材とも結晶粒は小さいのであり、このように結晶粒の小さいものでは疲労寿命の頻度分布曲線が正にひずむ^{*} (繰返数の

Fig. 2 Survivorship functions

大きい方にひずんでいる) こと (Fig. 2) もこれまでの研究結果と一致する。

(ii) 等価応力 (耐久限度に対する応力比の等しい応力) 振幅での統計的性質 次に、等価応力比 (応力振幅/耐久限) として、これまでの研究のシリーズとほぼ等しい比の値として、ここでも 1.24 となるような応力振幅のところでの統計的性質を調べてみる。

a) 寿命の対数のばらつき (標準偏差) ($\sigma_{\log N}$) と介在物 rating

$\sigma_{\log N, E}$ と $\sigma_{\log N, D}$ とは 50% 有意水準にて、 $\sigma_{\log N, J}$ と $\sigma_{\log N, D}$ とは 10% 有意水準にて有意差はない。

$\sigma_{\log N, J}$ と $\sigma_{\log N, E}$ とは 2% 有意水準にて有意差がない程度である。

ただし、 $\sigma_{\log N, E}$ 、 $\sigma_{\log N, D}$ および $\sigma_{\log N, J}$ はそれぞれ E 材、D 材および J 材の寿命の対数の標準偏差を現わすものとする。すなわち、 $\sigma_{\log N}$ と介在物 rating との間には一定の関連性が認められない。この結果は、介在物の多いほど $\sigma_{\log N}$ が大きいという Epreman たち

* 同一応力振幅 33.8 kg/mm^2 の疲労寿命の頻度分布曲線に対して正規分布からのひずみを比較するために相加平均のまわりの 3 次のモーメント μ_3 を計算すると、D 材、E 材ならびに J 材に対してそれぞれ $+0.94 \times 10^{-10}$ 、 $+0.94 \times 10^{-12}$ ならびに $+2.50 \times 10^{-12}$ が得られる。したがって結晶粒が小さいものほど正にひずんでいることがわかる。ここで、Fig. 2 の横軸には繰返数をとっており、各材とも同種の単位であるから普通の意味のひずみ度は採らなかった。

** 等価応力における場合、試験片数が相違した。このために有意差検定に過誤を生じないかどうかを調べるために E 材および J 材からそれぞれ 9 本ずつを無作為抽出した場合の検定も行ってみた。その結果は次のとおりである。

(a) 寿命の対数のばらつき

$\sigma_{\log N, E}$ と $\sigma_{\log N, D}$ とは 50% 有意水準にて有意差なく、 $\sigma_{\log N, J}$ と $\sigma_{\log N, D}$ とは 20% 有意水準にて有意差がない。 $\sigma_{\log N, J}$ と $\sigma_{\log N, E}$ とは 20% 有意水準にて有意差がない。

(b) 寿命のばらつき

$\sigma_{N, J}$ と $\sigma_{N, D}$ とは 50% 有意水準にて有意差がなく、 $\sigma_{N, E}$ と $\sigma_{N, D}$ とは 5% 有意水準にて有意差がない。 $\sigma_{N, E}$ と $\sigma_{N, J}$ とは 5% 有意水準にて有意差がない。

したがって、この場合にも介在物 rating と $\sigma_{\log N}$ または σ_N との間に関連性はやはり認められないといつてよいであろう

Table 2 Summary of test data

Steel (Symbol)	Ferrite grain size ASTM No.* G_N	Inclusion ratings		Number of specimen tested	Stress level S (kg/mm ²)	Fatigue limit S_e (kg/mm ²)	Ratio of stress level to fatigue limit S/S_e	Average fatigue life N_f	Standard deviation of fatigue life σ_N	Standard deviation of the logarithm of fatigue- life $\sigma_{\log N}$	Coefficient of variation σ_N/N_f	$N_f c/N_f^{**}$
		JIS GO 555* I_R	SAE									
E	8.5	dA 60×400=0.07 dB 60×400=0.05 dC 60×400=0.05	dt 2.3-1 ⁵⁵ -A	20	33.8	27.3	1.24	1.314×10 ⁵	2.04 ×10 ⁴	0.0685	15.5	0.750
D	8.0	dA 60×400=0.63 dB 60×400=0.09 dC 60×400=0.07	dgt 1404 5.7-1-D	7	33.8	22.8	1.48	0.215×10 ⁵	0.313×10 ⁴	0.0629	14.6	0.814
				9	28.2		1.24	2.630×10 ⁵	3.76 ×10 ⁴	0.0649	14.3	0.720
J	9.0	dA 60×400=1.10 dB 60×400=0.11 dC 60×400=0.08	dgt 9 084 6-1-D	10	33.8	27.8	1.22	3.113×10 ⁵	12.9 ×10 ⁴	0.169	41.4	0.462
				20	34.4		1.24	1.689×10 ⁵	4.49 ×10 ⁴	0.110	26.6	0.663

* For each steel, suffixes such as G_{NE} and I_{RD} are used corresponding to steel E and steel D respectively.

** c=Incubation cycles

の結論に対して否定的であることも前報同様で注目すべきことである。

b) 寿命のばらつき (標準偏差) (σ_N) と介在物 rating

$\sigma_{N,J}$ と $\sigma_{N,D}$ とは 50% 有意水準にて, $\sigma_{N,E}$ と $\sigma_{N,D}$ は 1% 有意水準にてそれぞれ有意差なく, $\sigma_{N,E}$ と $\sigma_{N,J}$ とは 1% 有意水準にて有意差がある^{**}。この 3.(II) (ii) の (b) の結果は等価応力振幅にて一般にばらつきはほぼ等しいという前報の結論と同様である¹⁾。

4. 結 論

(1) 低炭素鋼の縦方向材の回転曲げ疲労の統計的性質と本実験範囲程度の介在物 rating との間には従来の結論に反して一定の関係が認められない。

(2) 鋼の疲労破壊の統計的性質にはフェライト結晶粒の大きさが影響をもつと考えられる。

(3) 同一応力振幅にては結晶粒が小さくなるほど、

(i) 疲労寿命のばらつきは大きくなり、

(ii) 疲労寿命の頻度分布曲線は正にひずんでくる (N の大きい方にひずんでくる)

(iii) 破壊の確率は減ってくる。

(4) 等価応力振幅に対しては疲労寿命のばらつきは介在物 rating やフェライト結晶粒大きさに関せず

ほぼ等しいようである。

(5) 低炭素鋼の縦方向材の疲労強度は介在物としての M_nS の量がかかなり多くなってもそれほど影響を受けない。フェライト結晶粒の大きさなど本体 (matrix) の組織 (structure) の影響もかなり大きい。

なお、本研究は総合研究「金属材料の各種介在物と疲労に関する研究」の一部として行なわれたものであり、試作材の調製、試料準備および介在物判定を担当いただいた三菱鋼材(株)内山道良部長に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) たとえば, T. Yokobori, Proc. 2nd Jap. Cong. Test. Mat., p. 10 (1959)
- 2) P.H. Frith, J. Iron and Steel Inst., 180 p. 26 (1955)
- 3) 総合研究「金属材料の各種介在物と疲労」(未発表)
- 4) H. Hendus and G. Kraus, Z. Metkde, Vol. 46, 716 (1955)
- 5) 横堀, 前川, 日本機械学会第 38 期通常総会講演前刷 (1961)
- 6) 横堀, 日本機械学会誌, 65, 523, 1076 (1962), 65, 524, 1206 (1962)
- 7) J. Heslop and N.J. Petch, Phil. Mag., 12, 649 (1957)
- 8) たとえば, 横堀, 材料試験, 6, 45, 378 (1957), 7, 58, 371 (1958)
- 9) E. Epremian and R.F. Mehl, ASTM STP, No. 137 p. 25 (1953)
- 10) 横堀, 森田, 高橋 (未発表)

外国文献紹介

金 属 材 料

イタリアにおける実物疲労試験の歴史的背景

Historical Background of Full-Scale Fatigue Testing in Italy, V. Villa, "Full-Scale Fatigue Testing of Aircraft Structures," Edited by F.J. Plantema and J. Schijve Pergamon Press (1961)

1940 年以来, 第 2 次世界大戦中およびその直後数年間にイタリアで行なわれた実物航空機構造の疲労試験の傾向を紹介したものである。

この試験の主たる目的は, 構造の中疲労に弱い部分の検出と, 耐空性保証のための耐久性の立証である。

試験方法としては繰返変位を与えるか, 共振を利用するか, 非共振状態で荷重を繰返すかのどれかを採用することになる。

同一の構造について共振試験結果と繰返荷重試験結果とはよく一致している。もし付加質量の分布がうまくいき, 動的変位およびひずみに対し正確な測定ができるなら, 共振法の利用価値はきわめて大であろう。

ある場合には結果は実際の荷重分布に必ずしも一致

しないことがあり, 一方, 疲労を受けやすい部分の検出という点ではクラックの発生する場所も破損を生ずる場所もいずれも, またクラックの進展速度も, 外力のレベルに依存することが多かった。(関 護雄)

ダメージを受けた構造物の引張強さ-関連試験データを用いての解析法

The Ultimate Strength of Damaged Structure-Analysis Methods with Correlating Test Data, W.J. Crichtow "Full-Scale Fatigue Testing of Aircraft Structures," Edited by F.J. Plantema and J. Schijve Pergamon Press (1961)

この論文は直接疲労試験には関係ないが, よくいわれる fail-safe などに関連して, ダメージを受けた実験的には始めからクラックの存在する構造物がどれだけの静的強度を持っているかということを調べたものである。クラックの進展を止めるために, 補強材を入れたり, 重ね継手にしたりすることの影響が広く論ぜられている。

(関 護雄)

(445 頁へ)