

高強度鋼の疲労強度に及ぼす 非金属介在物の化学組成の影響

村上 敬宜*・鳥山 寿之*・子安 善郎*²・西田 新一*³

Effects of Chemical Composition of Nonmetallic Inclusions
on Fatigue Strength of High Strength Steels

Yukitaka MURAKAMI, Toshiyuki TORIYAMA, Yoshiro Koyasu and Shin-ichi NISHIDA

Synopsis: It is well known that the fatigue strength of high strength steels are strongly influenced by the existence of nonmetallic inclusions. It is said that the effects of nonmetallic inclusions on the fatigue strength of high strength steels depend on their size, shape, chemical composition and locations where they exist. Therefore, nonmetallic inclusions are likely to cause a large scatter in fatigue strength.

A firm opinion that hard inclusions are more detrimental than soft inclusions for fatigue strength, has prevailed for long years.

In the present paper, this opinion is proved incorrect by detailed investigations of the chemical composition and size of inclusions observed at fracture origin, i. e., the chemical composition of inclusions is not crucial factor controlling fatigue limit, even if the chemical composition influences the rigidity of inclusions and the residual stresses around inclusions.

On the contrary, it is verified that two crucial factors which control the fatigue strength are the Vickers hardness of matrix (HV) and the square root of projection area of inclusion ($\sqrt{\text{area}}$). It is shown that the lower bound of large scatter in fatigue strength can be successfully predicted by the statistics of extreme values ($\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$) of inclusions contained in many specimens.

Key words: fatigue; fatigue strength; high strength steel; nonmetallic inclusion; chemical composition; projection area of inclusion ($\sqrt{\text{area}}$); Vickers hardness (HV); statistics of extreme values.

1. 緒言

高強度鋼はその静的強度のわりには疲労強度が低く、そのばらつきの幅も大きいことが知られている。その原因として非金属介在物を起点とした疲労破壊が指摘されているが、介在物の位置、形状、寸法、化学組成など多くの因子が複雑に絡み合うため、疲労強度の定量的な予測は困難とされてきた。

著者らの一人は一連の研究^{1)~3)}において、「疲労限度に及ぼす介在物の影響は微小欠陥や微小き裂と力学的に等価である」という概念を提案してきた。この概念に基づくと、微小欠陥や微小き裂を有する材料の疲労限度を推定する予測式を介在物の問題に適用することができる。すなわち、基地組織のビッカース硬さHVと介在物の投影面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ を用いて介在物が疲労破壊起点となる疲労限度 σ_w を予測することができる。実際に、提案した予測式により高強度鋼中の介在物の位置^{2)~4)}、寸法^{2)~4)}、形状⁴⁾が疲労強度に

及ぼす影響を定量的に分析し、提案した概念が妥当であることを明らかにしてきた。

本研究では、自動車用ばね鋼SAE9254について、介在物軟質化処理を行った材質(S材)と通常の材質(N材)の2種類を製造し、疲労強度に及ぼす化学組成の影響を明らかにする。疲労限度の予測式の応用を目的とした力学的観点からは、介在物の化学組成の影響は本質的ではなく、代表寸法 $\sqrt{\text{area}}$ が決定的な役割を果たすことが予想されるが、介在物の寸法と化学組成の両者について十分注意深く検討した研究は見当たらないようである。また、最大介在物の寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の極値統計分布⁵⁾と疲労限度の予測式を組み合わせ、高強度鋼特有の疲労強度のばらつきの幅の上下限値を推定し疲労試験結果との比較を行う。

2. 使用材料および実験方法

疲労試験に供した材料は、自動車用ばね鋼SAE9254であ

平成4年10月26日受付 平成5年2月4日受理 (Received on Oct. 26, 1992; Accepted on Feb. 4, 1993)

* 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku Fukuoka 812)

* 2 新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 (Muroran R&D Lab., Nippon Steel Corp.)

* 3 佐賀大学理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Saga University)

Table 1. Chemical compositions. wt(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	O
N: Normal grade	0.52	1.43	0.71	0.023	0.005	0.723	0.001
S: Softened inclusion	0.58	1.47	0.69	0.014	0.003	0.693	0.002

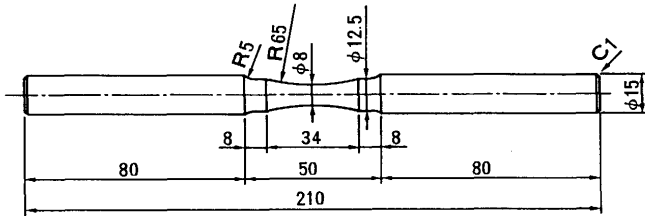


Fig. 1. Shape and dimension of specimen (Rotating bending test specimen).

る。Table 1 に 2 種類の材質の化学成分を示す。一つは通常の材質であり、もう一つは製鋼プロセスの過程で介在物の軟質化処理を行っている。以下では、通常材をN材、介在物軟質化材をS材と称し区別する。試験片は、圧延丸棒から軸方向に直径17mmの丸棒を切り出した後、油焼入れを行い、焼戻しにより 2 水準の硬さ (HV=565, 675) に調質した。その後、Fig. 1 の形状に機械加工した。X線により試験片最小断面部表面の残留応力を測定したところ、試験片の種類や硬さにかかわらず約500MPaの圧縮残留応力が存在した。試験片の表面層を電解研磨により約20 μ m除去すると、これらの残留応力はほぼ消失した。そこで、本研究ではこの範囲の残留応力分布を直線で近似し、破壊起点がこの残留応力の分布範囲に含まれる場合は、残留応力を平均応力と等価とみなして予測疲労限度を求めた。使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機 (容量98Nm, 回転数2400rpm) である。

3. 介在物、微小欠陥を含む高強度鋼の疲労限度の予測式

一般に、鉄鋼材料の疲労限度は、き裂が発生する限界の応力ではなく、発生したき裂が基地組織中をわずかに伝ばした後、停留する限界の応力で決まることはよく知られている⁶⁾⁷⁾。この概念は、介在物が疲労限度に及ぼす影響を考える場合に重要である。介在物が破壊の起点になる場合、最初に介在物と基地組織の界面にき裂が形成されるか⁸⁾⁹⁾、介在物自体が割れてき裂となり、これが基地組織中を伝ば拡大する過程を経る^{10)~12)}。この場合も疲労限度は、これらのき裂が基地組織中をわずかに伝ばした後、停留した状態と考えることができる。この状態では介在物の応力は解放されているため、力学的には微小欠陥や空洞が存在している状態と等価である¹⁾。以上のような考察に基づき、村上らは、基地組織のビッカース硬さHV、介在物、微小欠陥の最大主応力方向への投影面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ 、応力比Rを用い

て、次に示す疲労限度 σ_w の予測式を提案した¹³⁾。

[介在物が自由表面上に存在する場合]

$$\sigma_w = 1.43 (HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot [(1-R)/2]^{\alpha} \dots\dots (1)$$

[介在物が自由表面に接して存在する場合]

$$\sigma_w = 1.41 (HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot [(1-R)/2]^{\alpha} \dots\dots (2)$$

[介在物が内部に存在する場合]

$$\sigma_w = 1.56 (HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot [(1-R)/2]^{\alpha} \dots\dots (3)$$

ここで各量の単位と定義は、疲労限度 σ_w :MPa, HV:kgf/mm², $\sqrt{\text{area}}$: μ m, 応力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, $\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$ である。

4. 実験結果と考察

4・1 疲労試験の結果とその定量的評価

疲労限度の予測式 式(1), (2), (3)は、一定の基地硬さHVに依存するある限界値 $\sqrt{\text{area}_c}$ 以上の値を持つ介在物に対して有効であり、それ以下の寸法の介在物が存在しても疲労強度上無害である⁶⁾⁷⁾。介在物寸法がある限界値 $\sqrt{\text{area}_c}$ 以下の場合には、基地組織の硬さに固有な疲労限度の上限値 σ_{wu} が得られ、その値は経験的に次式で求められる¹⁴⁾¹⁵⁾。

$$\sigma_{wu} \approx 1.6HV \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_{wu} : \text{MPa}, HV : \text{kgf/mm}^2$$

近年、我が国の鋼の清浄度は著しく改善されたが、市販の高強度鋼に含まれる介在物の代表寸法 $\sqrt{\text{area}}$ の最大級のものは $\sqrt{\text{area}_c}$ よりも大きい。そのため、高強度鋼は静的強度が高いわりには疲労強度が相対的に低いのである。

Fig. 2 に通常材と介在物軟質化材のS-N曲線を示す。N材, S材ともに疲労寿命と強度のばらつきが大きく、一つのグループの実験結果を一本の曲線で整理するのは困難であ

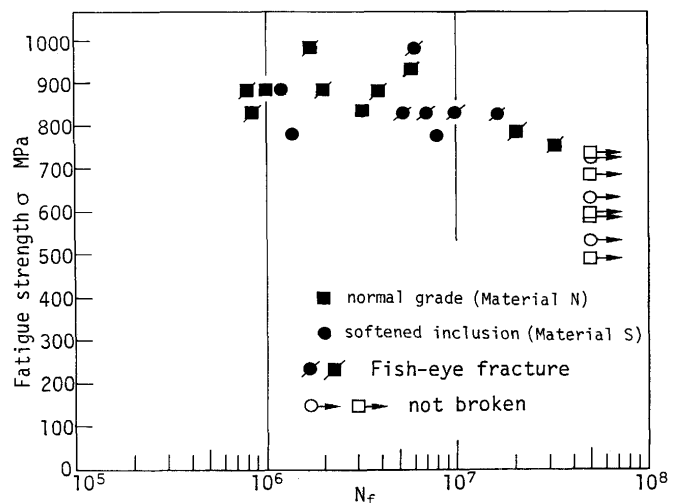
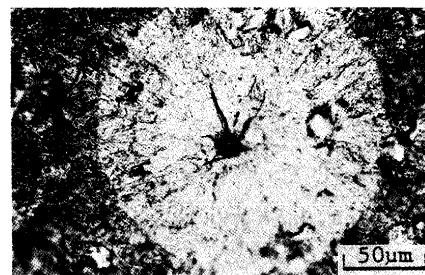


Fig. 2. S-N Curve (Material N and Material S).

る。疲労破面の観察によれば、N材、S材の疲労破壊の起点のほとんどが試験片内部の介在物であった。Fig.3およびFig.4にN材とS材の疲労破壊面に現れたフィッシュ・アイの例を示す。Fig.5およびFig.6は、それぞれFig.3およびFig.4に示したフィッシュ・アイの中心に存在する介在物のSEM写真である。Fig.5およびFig.6の図中(a)、(b)は、破断した試験片の両側の疲労破面を表している。(a)は約半分の界面で剥離した介在物が一方の疲労破面に残った状態を示し、(b)は他方の疲労破面に残された空洞状の介在物界面の剥離部分を表している。これより、疲労き裂は介在物と基地組織の界面に発生したことが分かる。Fig.5およびFig.6は、界面き裂が発生した状態では、介在物は空洞と力学的に等価であるという考え方の妥当性を示すものである。

Table 2に破壊起点となった介在物の中心位置に作用した公称応力 σ' と式(3)によるその位置での推定疲労限度 σ_w' を比較したものを示す。また、EPMA分析による介在物の化学組成も合わせて示している。 σ_w' の値は破断した各試験片について、破壊起点近傍の試験片表面の硬さ、起点となった介在物の位置、大きさ($\sqrt{\text{area}}$)、破断起点位置での残留応力を式(3)に代入して求めた。また、破断しなかった試験片については、起点になる介在物の位置と大きさが不明であるので、 σ_w' の値を推定できない。そこで、その後さらに同じ試験片を用いて負荷応力を上げて再試験を行い、破断させて致命傷となる介在物を同定した。このようにして、その試験片の σ_w' を求め、 σ' との比較を行った。Table 2よ

り疲労破壊した試験片については全て $\sigma'/\sigma_w' > 1.0$ であり、実際に推定疲労限度以上の応力が介在物部分に加わって破



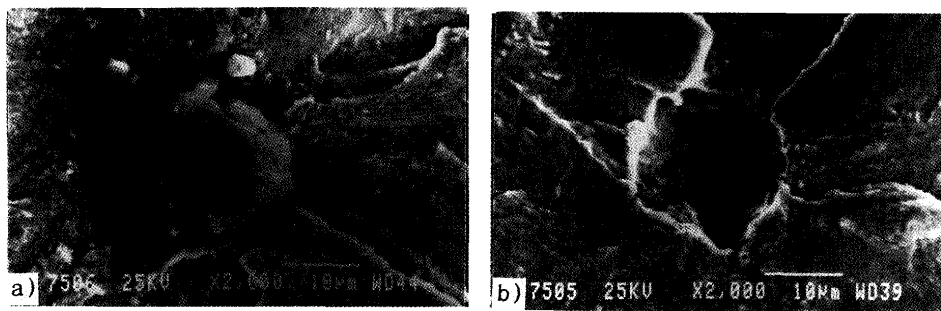
HV=641, $\sigma=980\text{MPa}$, $N_f=1.69 \times 10^6$, $\sqrt{\text{area}}=17.9\mu\text{m}$
Distance from surface=138 μm
Chemical composition: Al-Ca-Mg-O

Fig. 3. Typical example of fish-eye (Material N).



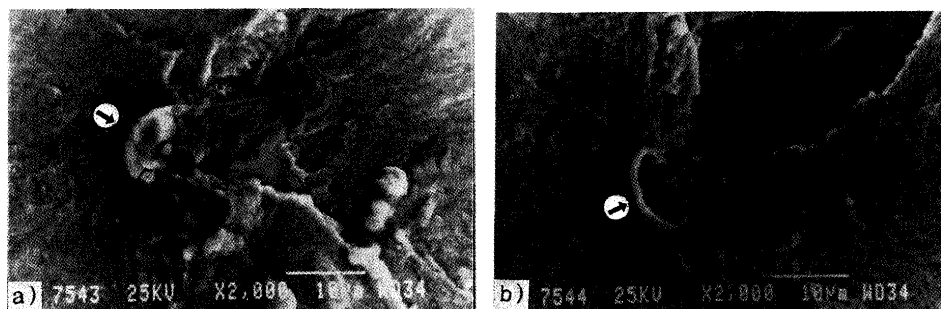
HV=675, $\sigma=980\text{MPa}$, $N_f=6.91 \times 10^6$, $\sqrt{\text{area}}=9.8\mu\text{m}$
Distance from surface=93 μm
Chemical composition: Ti-Mn-C-S

Fig. 4. Typical example of fish-eye (Material S).



Chemical composition: Al-Ca-Mg-O

Fig. 5. SEM photograph of inclusion observed at the center of fish-eye in Fig. 3.



Chemical composition: Ti-Mn-C-S

Fig. 6. SEM photograph of inclusion observed at the center of fish-eye in Fig. 4.

Table 2. Fatigue test results, size, location and chemical composition of inclusions and fatigue limit predicted by Eq. (3).

(a) Normal grade specimen

Specimen	HV	σ	Nf	$\sqrt{\text{area}}$	h	Shape of Inclusion	Chemical Composition	σ'	$\sigma_w'(R)$	σ'/σ_w'
N-1	640	600 931	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 6.85×10^6	18.2	115		Al-Ca-Mg-S-O	564 875	731(-1)	0.772 1.20
N-2	640	882	3.83×10^6	21.2	81		Al-Ca-Mg-O	859	712(-1)	1.21
N-3	641	588 980	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 1.69×10^6	17.9	138		Al-Ca-Mg-O	568 927	734(-1)	0.774 1.26
N-4	610	833	3.22×10^6	16.4	25		unknown	810	715(-1)	1.13
N-5	636	735 882	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 1.97×10^6	19.3	96		Al-Ca-Mg-O	715 859	720(-1)	0.994 1.192
N-6	522	490 637 735 833	$5 \times 10^7 \rightarrow$ $5 \times 10^7 \rightarrow$ $5 \times 10^7 \rightarrow$ 8.52×10^5	26.3	215		Al-Ca-Mg-O	460 598 690 782	576(-1)	0.799 1.04 1.20 1.36
N-9	589	784	2.10×10^7	17.6	120		Al-Ca-Mg-O	755	686(-1)	1.10
N-10	620	539 735 882	$5 \times 10^7 \rightarrow$ $5 \times 10^7 \rightarrow$ 8.25×10^5	26.6	150		Al-Ca-Mg-O	519 708 849	720(-1)	0.833 1.14 1.36

HV: Vickers hardness number, σ : Nominal stress at surface (MPa)

Nf: Cycles to failure,

 $\sqrt{\text{area}}$: Square root of projection area of inclusion (μm),h: Distance from surface (μm), σ' : Nominal stress at inclusion (MPa), σ_w' : Fatigue limit predicted by Eq.(3) (MPa), R: Stress ratio

(b) Softened inclusion specimen

Specimen	HV	σ	Nf	$\sqrt{\text{area}}$	h	Shape of Inclusion	Chemical Composition	σ'	$\sigma_w'(R)$	σ'/σ_w'
S-1	573	600 833	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 1.10×10^7	11.6	90		Ti-O	578 765	719(-1)	0.755 1.07
S-2	675	980	6.91×10^6	9.8	93		Ti-Mn-C-S	944	766(-1)	1.23
S-3	566	833	1.63×10^7	6.4	55		X-O	812	786(-1)	1.03
S-4	582	539 882	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 1.20×10^6	17.7	34		Si	528 864	613(-1)	0.861 1.41
S-5	565	735 833	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 7.25×10^5	6.7	45		Ti-Mn-C-S	718 814	779(-1)	0.921 1.04
S-6	669	600 833	$5 \times 10^7 \rightarrow$ 5.31×10^5	15.8	132		Ti-Mn-S	576 800	777(-1)	0.742 1.03
S-8	644	882	4.23×10^6	7.5	78		Ti-Mn-C-S	869	852(-1)	1.02
S-10	666	784	2.39×10^6	16.1	20		X-C	780	772(-1)	1.01

HV: Vickers hardness number, σ : Nominal stress at surface (MPa)

Nf: Cycles to failure,

 $\sqrt{\text{area}}$: Square root of projection area of inclusion (μm),h: Distance from surface (μm), σ' : Nominal stress at inclusion (MPa), σ_w' : Fatigue limit predicted by Eq.(3) (MPa), R: Stress ratio

壊したことが分かる。

ただし、N材の試験片No.6と10は、応力の低いところから、 5×10^7 回の繰り返しに耐えるごとに負荷応力を徐々に上げていったところ、 $\sigma'/\sigma_w' > 1.0$ の条件に到達しても破断

しない場合(No.6は1.04と1.20, No.10は1.14)があった。両試験片の共通点として、比較的深いところに存在した介在物が破壊起点になったことや、応力の低いところから負荷応力を徐々に上げていったことがあげられる。したがって、

疲労限度近くでの極めて遅いき裂伝ばの影響やコーキング効果の影響が考えられるが、その理由は明確にできなかった。しかしながら、最終的に破断した試験片は全て $\sigma'/\sigma_w' > 1.0$ を満たしており、 $\sigma'/\sigma_w' < 1.0$ で破断した例はないことから、予測式による推定は妥当であると考えてよいであろう。

4・2 疲労強度におよぼす介在物の化学組成の影響

Table 2 に示すように破壊の起点になった介在物の化学組成は、N材では良く知られた硬質のAl-Ca-Mg-O系酸化物とAl-Ca-Mg-S-O系の酸化物、硫化物である。一方、S材ではTi-Mn-S-C系の炭化物、硫化物、Ti-Mn-S系の硫化物、Ti-O系の酸化物、Si系の介在物、の4種類であった。S材でもTi系の介在物が破壊の起点になる場合があり、S材であっても全ての介在物が軟質介在物ということではなく、硬質介在物が含まれていることを示している。また、N材では、介在物が疲労破面から脱落していたため、介在物の化学組成を特定できない場合(No.4)があった。さらに、S材では、破壊起点に介在物が認められるものの、EPMA分析で化学組成の全てを明らかにできない場合があった。そのため、EPMA分析で断片的に明らかにされた化学組成を用いてX-O(No.3)やX-C(No.10)のように表し、これらが酸化物系および炭化物系の介在物であることを示した。

Fig. 7 は、Table 2 に示したデータを介在物の化学組成で分類し、縦軸に疲労限度に相対的な応力 σ'/σ_w' 、横軸に破断繰返し数 N_f をとりプロットしたものである。 σ'/σ_w' が大きくなると N_f が小さくなる傾向があり、特別の組成を有する介在物が他の介在物に比べて特に疲労強度に強く影響する傾向はみられない。 σ_w' は介在物の化学組成ではなく寸法($\sqrt{\text{area}}$)と基地組織の硬さ(HV)によって決まっているから、Fig. 7 の傾向から判断して、疲労強度は介在物の化学組成ではなく、基地硬度HVと介在物の代表寸法 $\sqrt{\text{area}}$ により決まっていると結論できる。

軟質介在物は圧延によって引き伸ばされるので、圧延方

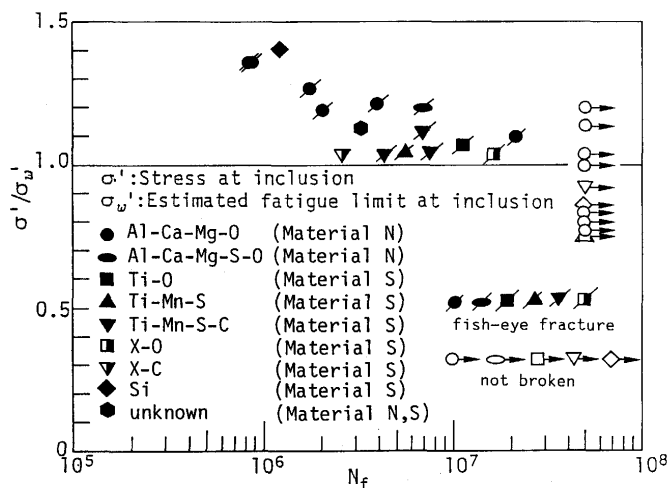


Fig. 7. Effects of chemical composition of inclusion on fatigue strength.

向に垂直な面で観察される寸法は圧延の強さに比例して小さくなる。一方、Al-Ca-Mg-O系の酸化物やTi系などの硬質介在物は圧延など塑性加工によってもほとんど変形しない。そのため、圧延材で圧延方向に応力が作用する場合には寸法が相対的に大きい硬質介在物が破壊の起点になり易くなるのである。したがって、硬質介在物が疲労破壊の起点になり易い真の原因は寸法が大きいからであり、その化学組成が疲労き裂の発生原因として寄与しているのではない。このように、疲労強度を支配する介在物のパラメータは、代表寸法の $\sqrt{\text{area}}$ であり、化学組成の影響は本質的ではない。これらの結果は、荒木らの報告と符合する¹⁶⁾。

4・3 疲労限度のばらつきの幅の下限値の予測

村上らは、一定体積に含まれる最大介在物の代表寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の分布の推定に極値統計⁵⁾を利用し、疲労限度の予測式と組み合わせることにより多数の試験片の疲労限度のばらつきの幅の下限値を予測する方法を提案している³⁾。ここでは、その方法を本供試材に適用する。

Fig. 8 は、圧延方向に垂直な面の基準面積 $S_0 (=0.0309 \text{ mm}^2)$ における顕鏡検査から得られた最大介在物の代表寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ を極値確率紙にプロットしたものである。 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$

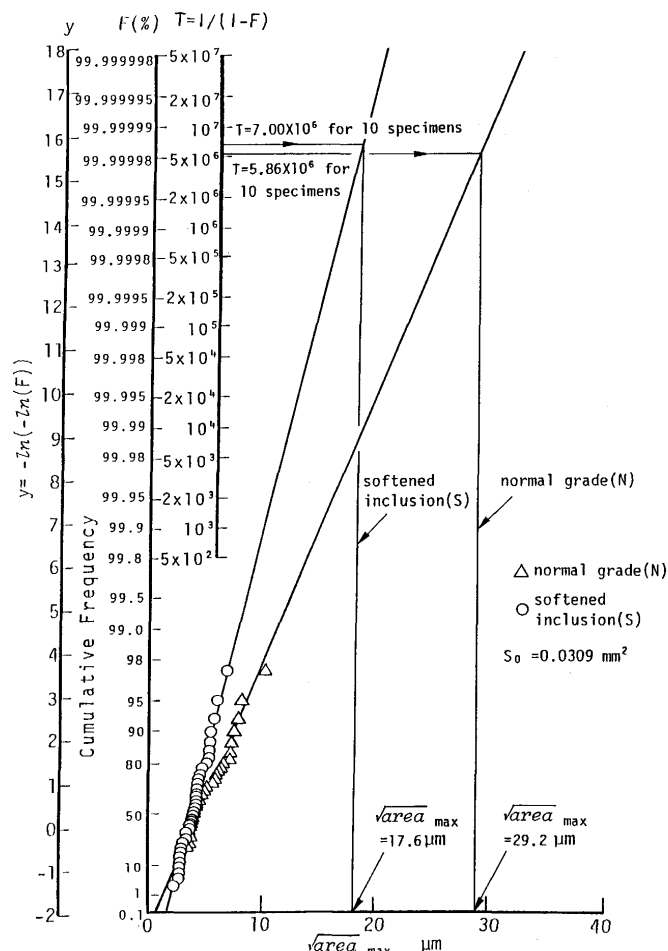


Fig. 8. Cumulative frequency of the extreme values of inclusions.

の分布はほぼ直線であり、極値統計に従うと考えてよい。N本の試験片に含まれる $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ の値は、試験片の危険体積 V を考慮することにより推定できる。Fig. 1の砂時計形回転曲げ試験片の場合、経験的に公称応力 σ_0 の90%が作用する部分を危険体積 V に選べばよい¹⁷⁾。それを計算すると $V \approx 89.8 \text{ mm}^3$ となる。

介在物検査基準体積 V_0 は S_0 に微小な板厚 h をかけた量として定義する($V_0 = S_0 \times h$)。 h は著者らの経験¹⁸⁾¹⁹⁾に基づけば、介在物検査で得られた $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ の平均値を取ればよい。それに従うと、N材では $h = 4.96 \mu\text{m}$ 、S材では $h = 4.15 \mu\text{m}$ である。

V_0 の値が決まると、N本の試験片に対する再帰期間は $T = NV/V_0$ で求められる。Table 3は、N材、S材の試験片1, 10, 100本に対する再帰期間 $T(N)$ と、含まれることが予想される最大介在物の $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ の値をまとめたものである。N材およびS材の10本の試験片に含まれることが予想される最大介在物の $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ は、それぞれ、 $29.2 \mu\text{m}$ と $17.6 \mu\text{m}$ であり、実際に今回の疲労試験(N材で10本、S材で9本使用)で破壊起点となった介在物の最大値 $\sqrt{\text{area}}$ (N材: $26.6 \mu\text{m}$ 、S材: $17.7 \mu\text{m}$)と良く対応している。

ところで、平均応力 $= 0$ (応力比 $R = -1$)のときの多数の試験片の疲労限度のばらつきの幅の下限值 σ_{w1} は、最大介在物が表面に接するように存在している場合を想定すると、次式により推定できる³⁾²⁰⁾。

$$\sigma_{w1} = 1.41(HV + 120) / (\sqrt{\text{area}_{\text{max}}})^{1/6} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)に基地組織の硬さHVとN本の試験片に含まれることが予想される最大介在物の寸法 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ を代入すれば、N本の試験片の疲労限度の下限値を求めることができる。

Fig. 8およびTable 3から分かるように、S材の方がN材に比べて最大介在物の寸法 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ が小さいため、疲労限度の下限値はS材の方が高い。例えば、10本の試験片の疲労限度の下限値は、S材のほうが、N材に比べて約8%上昇する。Fig. 9とFig. 10はそれぞれN材とS材の疲労限度の下限値と実験結果の比較である。図中には、式(4)による疲労限度の上限値 σ_{wU} も示してある。両材ともに破断、非破断の試験片が、疲労限度の上限値 σ_{wU} と下限値 σ_{w1} の間にばらついて分布しており、下限値の予測は妥当であるといえる。

以上の結果から、製鋼プロセスにおいて介在物を制御し、

Table 3. Expected value of maximum inclusion size ($\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$).

Materials	Test volume V (mm ³)	Number of specimens	Return period T	$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}} (\mu\text{m})$
Normal grade (N)	89.8	1	5.86×10^5	25.5
		10	5.86×10^6	29.2
		100	5.86×10^7	32.9
Softened inclusion (S)	89.8	1	7.00×10^5	15.6
		10	7.00×10^6	17.6
		100	7.00×10^7	19.7

材質の品質管理や高強度鋼の疲労強度向上を達成する一つの方法として、介在物寸法 $\sqrt{\text{area}}$ の極値統計分布曲線を参考にするのが有効と思われる²⁰⁾。

介在物寸法の分布はほぼ指数分布をすることが知られて

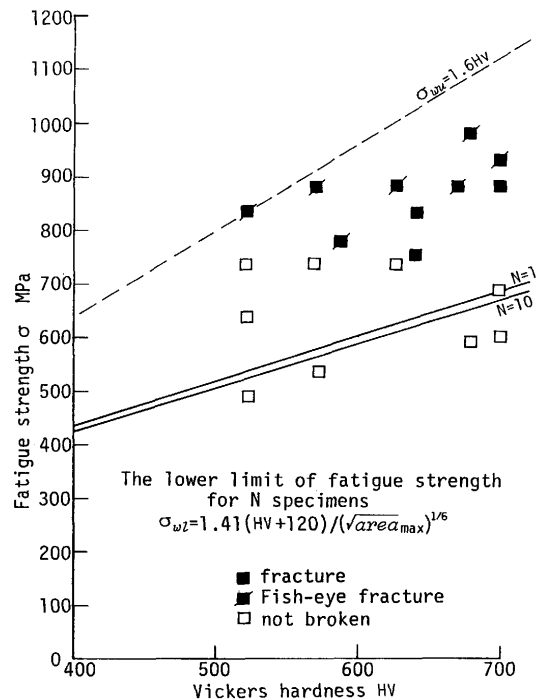


Fig. 9. Comparison of the predicted lower limit of fatigue strength with the experimental results (Normal grade specimen).

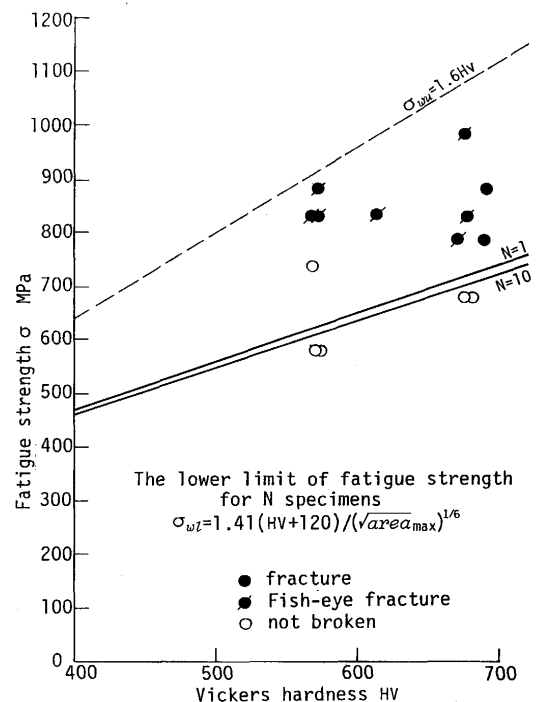


Fig. 10. Comparison of the predicted lower limit of fatigue strength with the experimental results (Specimens with softened inclusions).

いるか^{21)~24)}、極めて小さい寸法の介在物が多く存在しても疲労強度には影響がない²⁵⁾。介在物の数が少なくても大寸法の介在物が1個でも存在すれば、その部分の疲労限度は低下する。このような理由から介在物寸法の極値統計データが意味を持つのである。

介在物の数や形状をカウントする方法²⁶⁾、JIS点算法²⁷⁾あるいはASTM法²⁸⁾などの介在物評価法は、介在物が疲労強度に及ぼす影響を評価する方法としては合理的でないことは、すでに多くの研究で指摘されているとおりである²⁵⁾²⁹⁾³⁰⁾。

5. 結言

介在物の化学組成が疲労強度に及ぼす影響を明確にする目的で、通常材と介在物軟質化材の2種類の自動車用ばね鋼SAE9254の回転曲げ疲労試験を行い、次の結論を得た。

(1) 高強度鋼の疲労強度を支配するパラメータは、基地組織のビッカース硬さHVと、介在物の代表寸法 $\sqrt{\text{area}}$ である。介在物の化学組成は、硬質介在物か軟質介在物かにより圧延等の塑性変形における変形の度合いに影響を及ぼすので、結果的に介在物の寸法に影響する。そのため、一見したところ疲労強度に及ぼす影響として介在物の化学組成が注目されがちになるが、化学組成そのものは直接的影響因子ではない。本研究はその実験的証拠を示した。これまでの研究でも圧延方向に直角に採取した試験片では、引き伸ばされた軟質介在物が疲労破壊の起点になることが示されているが、内容的には同じことを意味している。

(2) 鋼中の最大介在物の寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ は極値統計に従う。極値統計により推定した最大介在物の寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ と疲労限度の予測式を組み合わせ推定した多数の試験片の疲労限度のばらつきの下限値は、実験結果のばらつきの下限値とよく対応している。

(3) 製鋼プロセスにおいて介在物を制御し、材質の品質管理や高強度鋼の疲労強度向上を達成する一つの方法として、介在物寸法 $\sqrt{\text{area}}$ の極値統計分布曲線を参考にするのが有効である。これに対して、介在物の数をカウントする方法、JIS点算法、あるいはASTM法などの介在物評価法は介在物が疲労強度に及ぼす影響を合理的に評価する方法ではない。

文 献

- 1) 村上敬宜, 遠藤正浩: 日本機械学会論文集A, **49**(1983), p.127
- 2) 村上敬宜, 児玉昭太郎, 古沼静代: 日本機械学会論文集A, **54**(1988), p.688
- 3) 村上敬宜, 宇宿尚史: 日本機械学会論文集A, **55**(1989), p.213
- 4) 村上敬宜, 川上勝巳, W.E.Duckworth: 鉄と鋼, **77**(1991), p.163
- 5) E.J.Gumbel著, 河田龍夫, 岩井重久, 加瀬滋男訳: 極値統計学, (1963), p.1 [広川書店]
- 6) 村上敬宜, 福田四郎, 遠藤達雄: 日本機械学会論文集(第1部), **44**(1978), p.4003
- 7) Y.Murakami and M.Endo: The Behavior of Short Fatigue Cracks, EGF Pub.1, ed.by K.J.Miller and E.R.de los Rios., **1**(1986), p.275 [Mech. Eng. Pub.]
- 8) J.Lankford: Engng. Fract. Mech., **9**(1977), p.617
- 9) N.M.A.Eid and P.F.Thomason: Acta Metall., **27**(1979), p.1239
- 10) 角田方衛, 内山 郁, 荒木 透: 鉄と鋼, **57**(1971), p.335
- 11) T.Araki: Proc. Int. Symp. on Inclusions and Their Influence on Material Behavior, Chicago, Illinois, (1988), p.147 [ASM]
- 12) W.L.Morrie: Metal. Trans. A, **9A**(1978), p.1345
- 13) 村上敬宜, 上村裕二郎, 夏目喜孝, 宮川 進: 日本機械学会論文集A, **56**(1990), p.54
- 14) M.F.Garwood, M. Gensamer, H.H.Zurburg, J.T.Burwell, M.A. Erickson and F.L.La Que: Interpretation of Tests and Correlation with Service, (1956), p.1 [ASM]
- 15) 西島 敏: 材料, **29**(1980), p.24
- 16) 荒木 透, 石 滋宜, 佐川竜平: 鉄と鋼, **57**(1971), p.182
- 17) 村上敬宜, 鳥山寿之: 極値統計による介在物の評価とその利用の手引き, (1990), p.6 (私信)
- 18) 村上敬宜, 上村裕二郎, 川上勝巳: 日本機械学会論文集A, **55**(1989), p.58
- 19) 上村裕二郎, 村上敬宜: 日本機械学会論文集A, **56**(1990), p.162
- 20) 大小森義洋, 北川幾次郎, 篠塚啓吾, 松田健次, 村上敬宜, 鳥山寿之: 鉄と鋼, **77**(1991), p.438
- 21) 岩倉清悟, 清水真佐男, 川崎一博: 日本機械学会論文集A, **54**(1988), p.1826
- 22) 石川 登, 藤盛紀明: 鉄と鋼, **71**(1985), p.893
- 23) 千野 淳, 岩田英雄, 井樋田陸: 鉄と鋼, **77**(1991), p.2163
- 24) G.F.Vander Voort and R.K.Wilson: Nonmetallic Inclusions and ASTM Committee E-4, ASTM Standardization News, (1991), p.28
- 25) J.Monnot, B.Heritier and J.Y.Cogne: ASTM STP 987, (1988), p.149
- 26) M.J.Atkinson: J.Iron Steel Inst., **195**(1990), p.64
- 27) JIS G0555-1977, 鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法, (1977), p.1 [日本工業規格]
- 28) ASTM Standard E45, Standard Practice for Determinating the Inclusion Content of Steel, (1990), p.221 [Annual Book of ASTM Standards]
- 29) 足立 彰, 莊司英雄, 桑原純夫, 井上義幸: 電気製鋼, **46**(1975), p.176
- 30) 阿部 力, 奈良井弘, 古村恭三郎: NSK Technical Journal, **652**(1992), p.1