



(a) Microcracks initiated from Al_2O_3 -type inclusions. 1.9×10^6 cycles
 (b) Microcracks initiated from MnS-type inclusion fractured brittle. 1.16×10^4 cycles
 (c) No microcracks initiated from MnO-type inclusions deformed ductile, where the rolling direction is transverse to the long axis of the specimens. 10^5 cycles

Photo. 1. Microcracks.

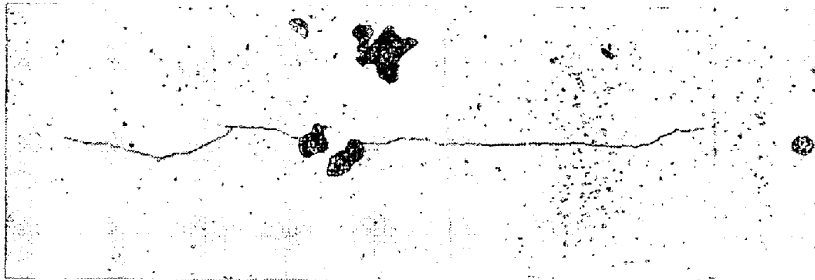


Photo. 2. Microcracks initiated from MnO-type inclusions fractured brittle. 10^6 cycles. $\times 400$ (1/2)

ている割れ数および割れ長さに関する確率的統計的値を導き出し、それを比較することにより知ることができることを明らかにした。

文 献

- 1) 角田, 内山, 荒木: 鉄と鋼, 4 (1966), p. 651
- 2) G. J. McMAHON, Jr and Morris COHEN: Acta. Met., 13 (1965), p. 591
- 3) N. E. FROST and D. S. DUGDALE: J. Mech. Met., Phys. Solids, 6 (1958), p. 92
- 4) 石橋, 真武, 蒲原; 日本機械学会講演前刷集, 37 (1961~64), p. 107

一 討 論

[質問] 鉄鋼短大 岩井彦哉

供試の各種介在物の変形挙動(脆性破壊あるいは塑性変形)と微小割れ発生状況との関係はあるのか。

[回答] 介在物からの疲労割れ発生は介在物周辺への応力の集中が原因であるゆえ、割れ発生への介在物の影響の度合はその形状により異なると考えられる。

各種介在物の疲労割れ発生への影響の度合を確率的に扱い、数量を用いて比較した結果を本文の Fig. 3 に示した。その図によると、粘性的に変形している MnO 系介在物の影響が最も小さく、そして圧延によりほとんど変形しない FeO および Al_2O_3 系介在物の影響が最も大きいようである。また脆性的に変形している SiO_2 系介在物の影響はほとんど変形しない FeO 系介在物などの影響より小さくなっている。 Al_2O_3 , MnS および MnO 系介在物と微小割れとの関係と Photo. 1 (a), (b) および (c) に示す。本実験で使用した MnO 系介在物は粘性的に変形しているが、組成がわずかわると圧延により変形しない複雑な形をした介在物となる。そのような FeO 系介在物は Photo. 2 に示すように割れ発生に対して影響をおよぼしている。

Fig. 3 における影響の大きさの順序は絶対的なものではなく、介在物と基地鉄との密着性、介在物の大きさ、その他の条件が変われば当然変わることが予想される。さらにデータを集積しそしてそれを多角的に分析することにより、介在物からの割れ発生に影響をおよぼすと考えられる多くの因子に関する詳細な情報が得られると思われる。しかしながら、いずれにせよ介在物の微小割れ発生への影響の度合はその変形能により異なることは明白である。

著者の介在物の変形挙動に関する報告¹⁾によると一部の介在物は圧延温度の高低によりその変形挙動を異にする。すなわち、圧延温度が高い場合、粘性的に変形するが、一方圧延温度が低い場合、脆性的に破断するかあるいはほとんど変形しないようである。このように圧延温度のみの相違により全く異なつた形状を呈する介在物を有する試料を用いて疲労試験を現在行なつている。この結果については別の機会に報告する予定です。

文 献

- 1) 内山, 角田: 鉄と鋼, 51 (1965) 9, p. 1624

620.192.45:539.622
:669.14.018.24

(230) 軸受鋼の寿命におよぼす非金属介在物の影響

八幡製鉄光製鉄所

太田隆美・岡本一生・〇仕幸三郎

Effect of Non-Metallic Inclusion on the Fatigue Life of Bearing Steel

Takayoshi Ota, Kazuo Okamoto and Saburō Shikō

1. 結 言

軸受鋼のころがり疲労寿命におよぼす非金属介在物の影響について、従来から酸化物系介在物が寿命に悪影響をおよぼすといわれているが、疲労破壊の起点に酸化物の量的な因子が関係するならば鋼中の炭化物も何らかの影響をおよぼすと考えられる。しかし炭化物量は酸化物量の100倍程度の多さにあることから、単に介在物の量で鋼の寿命を律することには疑問があり、また炭化物についてはマトリックスとの濡れ性などを考えなくてはならない。そこで非金属介在物の寿命におよぼす影響をとりあげるに際しては、介在物の量のみならず種類、形

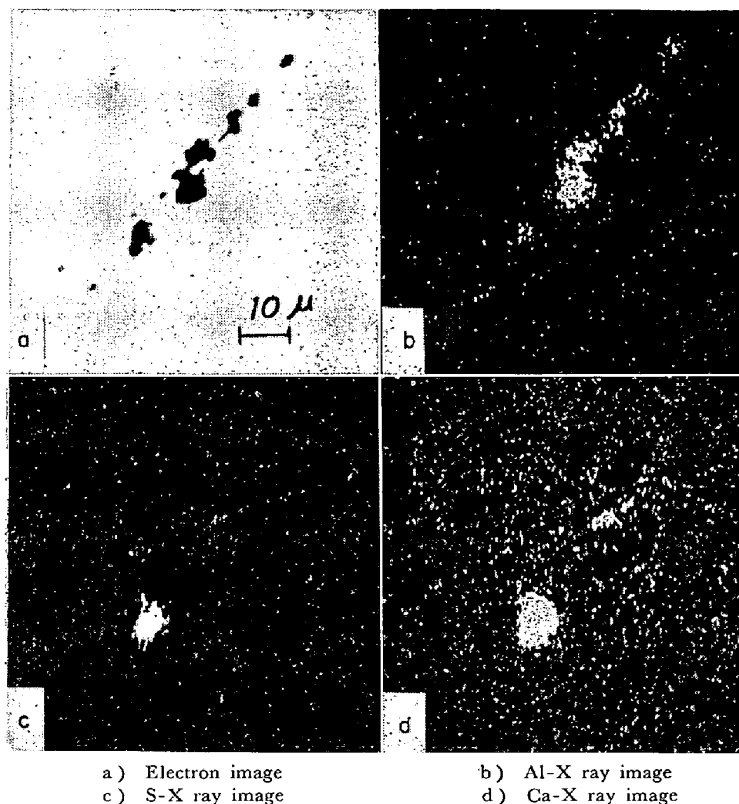


Photo. 1. Electron microprobe scans in type B inclusion.

態などに注目する必要があると考え熱間押し製軸受鋼管についての調査を行なった。

2. 調査方法

軸受鋼 (JIS-SUJ 2) の熱間押し製鋼管生産材について、鋼管を切開いて板状とし歪取り焼鈍を行なつか焼入れ焼もどしを行ない、 H_{RC} 硬さ 62~63 の寿命試験片を作成し、スラスト型寿命試験機²⁾による寿命試験 ($P_{max}=500 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-2}$) を鋼管外表面側について行なった。

非金属介在物の測定には寿命試験が終了した寿命試験片で各試験番号で5枚をとり、フレーキングの生じた近傍を顕微鏡観察し ASTM-E5-62T (A法) に準じた方法で測定した。すなわち1試料 161 mm^2 面について100倍率で100視野を ASTM-A 法での4種類の介在物に分類して測定し各評点を平均し、さらに試料5個の平均値で示した。なお、100倍率での測定に先だち、400倍率で介在物の種類をよく観察する一方、組成はX線マイクロアナライザー、X線回折および化学分析などで確認して各種介在物が100倍率でもより正確に認定できるよう測定者を訓練した。また、寿命に悪影響をおよぼすと考えられる酸化系介在物については 161 mm^2 全視野中で幅 3μ 以上のB型介在物の長さの総和を、大型酸化物は同視野中で直径 10μ 以上の個数の総和を測定した。

3. 結果および考察

3.1 非金属介在物の種類、形態

ASTM-A 法に準拠し、非金属介在物を次の4種類に分類した。1) A型：硫化物が粘性変形したもので MnS が主体。2) B型：熱間加工により融点の高い介在物が砕かれて断続分布したもので、一例として Photo. 1 に示されるように Al_2O_3 が主体となつている。3) C型：

断続ないし粘性変形した珪酸塩系が主体。4) D型：球状およびランダム分布の酸化物で Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $-\text{FeO}$, $-\text{MnO}$ などが含まれる。これらの介在物はいずれもX線マイクロアナライザー、X線回折および酸化物化学分析で確認している。たとえばヨウ素アルコール法による酸化物分析結果ではC型介在物の多い試料では SiO_2 が、B型では Al_2O_3 が比較的少量に分析されているが、 SiO_2 については A. B. KUSLISKII³⁾ の報告にもあるように試料 No. 9 を除き EPMA で Si が全く検出されておらず顕微鏡観察においてもほとんどみられなかつた。

また、酸化物系介在物に関し鋼中酸素量の分析結果では Al_2O_3 の多かつた材料で 30ppm 程度、非脱ガス材で普通程度の介在物量のもので 20~30 ppm 程度であり、脱ガス材で酸化物系介在物の少ないもので 10~20ppm 程度であつたが、使用した真空溶融マイクロアルザット法による酸素分析法では 20ppm 以下で分析精度に問題があるようである。

3.2 寿命試験結果

各種非金属介在物の代表的な試料を各介在物型につき、1試料 No. が試験片 10~50 枚で4試料群の寿命試験を行ない、各試料群のデータをまとめて Weibull 函数図にプロットし Fig. 1 に示した。また Table 1 には寿命試験結果での L_{10} (10% 破損寿命)、 L_{50} (50% 破損寿命) および非金属介在物測定結果での ASTM 評点、大型酸化物、B型介在物長さ

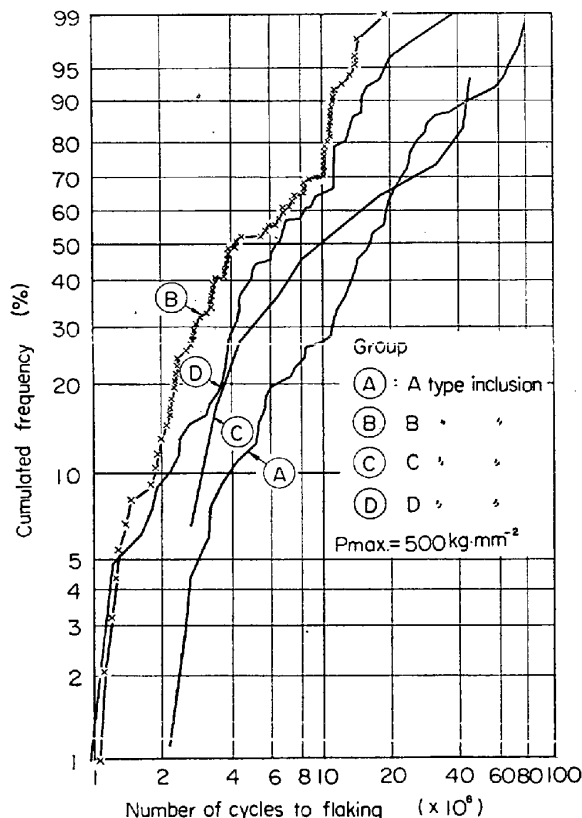


Fig. 1. Results of bearing life test.

Table 1. Non-metallic inclusions vs. bearing life.

| Group | Sample No. | Non-metallic inclusions | | | | | | Bearing life ($\times 10^6$) | |
|--------------------|------------|-------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| | | ASTM-A method | | | | Total length of B-type (mm) | Amount of massive oxides (mm) | L ₁₀ | L ₅₀ |
| | | A-type | B-type | C-type | D-type | | | | |
| A | 1 | 0.34 | 0.01 | 0 | 0.03 | 0.22 | 0.14 | 3.0 | 17.0 |
| | 2 | 0.31 | 0.01 | 0 | 0.35 | 0.83 | 0.27 | 7.8 | 17.0 |
| | 3 | 0.43 | 0 | 0 | 0.16 | 1.60 | 0.22 | 7.6 | 16.3 |
| | 4 | 0.85 | 0.02 | 0 | 0.09 | 0.60 | 0.15 | 14.0 | 21.5 |
| B | 5 | 0.05 | 0.10 | 0 | 0.27 | 11.91 | 0.42 | 1.1 | 2.6 |
| | 6 | 0.05 | 0.08 | 0 | 0.28 | 4.95 | 0.17 | 1.8 | 5.2 |
| | 7 | 0.01 | 0.16 | 0 | 0.12 | 6.45 | 0.31 | 1.4 | 5.9 |
| | 8 | 0.02 | 0.15 | 0.01 | 0.13 | 4.30 | 0.23 | 1.7 | 6.9 |
| C | 9* | 0 | 0.01 | 0.92 | 0.20 | 1.05 | 0.37 | 2.0 | 13.0 |
| D | 10 | 0.05 | 0.03 | 0 | 0.33 | 3.45 | 0.40 | 1.7 | 9.0 |
| | 11 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.27 | 2.50 | 0.56 | 1.2 | 5.5 |
| | 12 | 0.12 | 0.01 | 0 | 0.38 | 1.26 | 0.48 | 2.5 | 7.1 |
| | 13 | 0.06 | 0.01 | 0 | 0.27 | 3.46 | 0.44 | 1.6 | 7.4 |
| Various type mixed | 14 | 0.18 | 0.04 | 0 | 0.36 | 4.41 | 0.37 | 1.6 | 4.3 |
| | 15 | 0.21 | 0.03 | 0 | 0.31 | 4.13 | 0.25 | 1.3 | 5.2 |
| | 16 | 0.24 | 0.06 | 0 | 0.32 | 5.32 | 0.39 | 2.3 | 8.1 |
| | 17 | 0.16 | 0.03 | 0 | 0.18 | 3.10 | 0.17 | 2.9 | 12.0 |

* 0.42% Si in steel

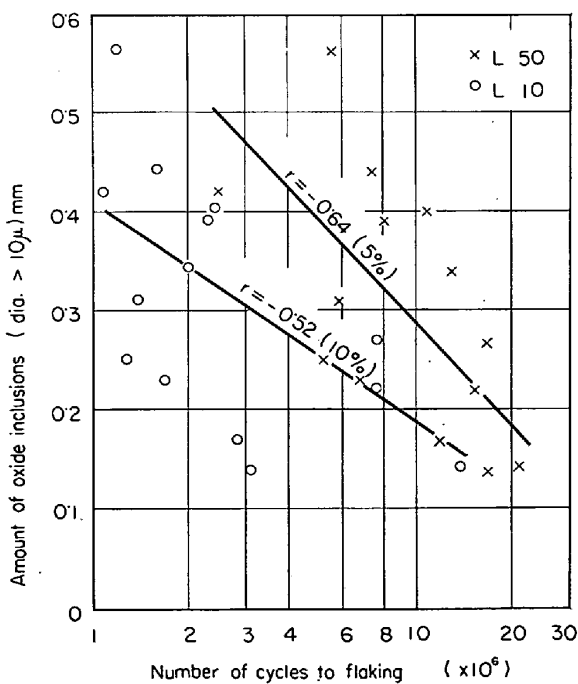


Fig. 2. Relation between massive oxide inclusions and bearing fatigue life.

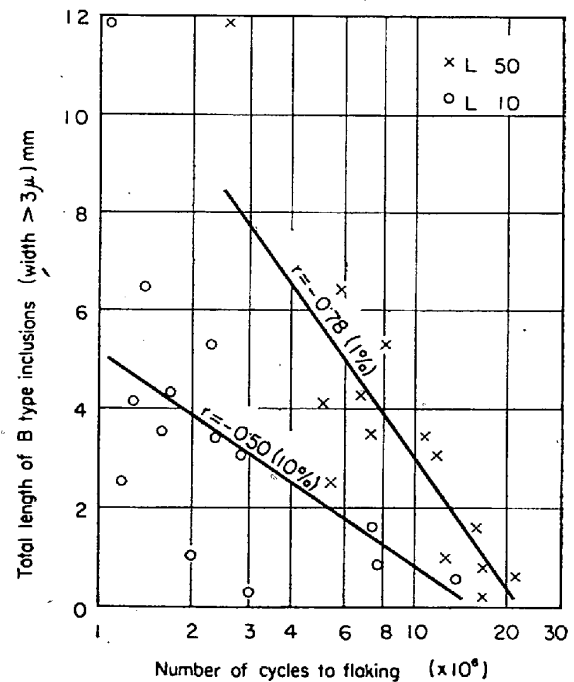


Fig. 3. Relation between total length of B type inclusion and bearing fatigue life.

を示した。

A型介在物が多い場合には寿命が最も長い側にあり、B型介在物の多い場合には寿命が最も短い側にある。C型介在物が主体の材料は特殊製造法による外国製材であり試料数が少ないが寿命はやや長い側にある。D型介在物および各介在物型混合の材料は同程度の結果であり

B型介在物とC型介在物材料の中間程度の寿命を示している。

3.3 非金属介在物と寿命に関する考察

酸化物系介在物が寿命に悪影響をおよぼす点で L. O. UHRUS¹⁾は 30μ 以上の大型酸化物を測定しており、また曾田²⁾は 15μ 以上になると寿命への悪影響が顕著に

なるとしているが、著者らの調査した試料中には 30μ 以上の酸化物がほとんどなかつたので大型酸化物は 10μ 以上を対象にした。Table 1に示される 10μ 以上の酸化物総数と寿命との関係をまとめるとFig. 2のようになつて大型酸化物量の多いほど寿命は低下しその相関は L_{50} の場合に5%の有意水準で有意である。ところがB型介在物の総長さについて寿命との相関をみるとFig. 3のように L_{50} の場合に1%の有意水準で高度に有意であることがわかる。すなわち大型酸化物は寿命に悪影響をおよぼすが、その程度はB型介在物の悪影響にはおよばないことが知られる。

次にB型介在物と寿命との関係について考えてみると寿命試験でフレーキングが生ずるということは、ころがり疲労を受けた部分の軌道面および軌道直下での介在物などからマイクロクラックが発生しやすくなりこれが伝播してフレーキングにいたると考えられる。すなわちマイクロクラックが伝播しやすいような介在物などの分布が問題になつてくる。各種介在物中で酸化物系介在物がフレーキングの起点になりやすいことに異論はないが、酸化物量が同程度とするならば分布の仕方がランダムであるよりも断続分布の場合の方がよりマイクロクラックは伝播しやすいと考えられる。

4. 結 言

軸受鋼のころがり疲労寿命におよぼす非金属介在物の影響を熱間押し製軸受鋼管を主体にしスラスト型寿命試験機による寿命試験を行ない調査した結果、寿命に悪影響をおよぼすのは酸化物系介在物であるが、特にアルミナが断続分布した場合に著しいことがわかつた。

フレーキング機構を非金属介在物原因で説明するには十分とはいえないが、マイクロクラックの伝播のしやすさである程度説明しえた。

文 献

- 1) L. O. UHRUS: Clean Steel Special Report, 77, The Iron & Steel Inst., (1963), p. 105
- 2) 上野, 他: 鉄と鋼, 46 (1960) 10, p. 1378
- 3) A. B. KUSLITSKII, et al.: Stal in English, (1965) 2, p. 135
- 4) 曾田: 岩波全書・軸受, (1964), p. 158 [岩波書店]

一 討 論

[質問] 山陽特鋼 小柳 明

1. 試料は脱ガスしたものか大気溶解のものか。
2. スラスト型寿命試験片はパイプを切り開いて平らにしたと言われるがパイプの外面か内面かそれとも中心部か。
3. 硫化物は酸化物を包んでマイクロクラックの発生を抑止する効果があるといわれるが必ずしも硫化物の中に酸化物が含まれるとは考えられず、端にくつついたり側面にくつついたりした場合もありこの点をどう考えるか。
4. 軸受鋼のスラスト寿命におよぼす介在物の影響については国内国外種々の説があるが、その最大公約数をとれば純粋なしかも thin なA型介在物のみが寿命にさほど悪影響をおよぼさないが、他のB, C, Dの各型はやはり悪影響をおよぼすとされている。スラスト型寿命

試験はバラツキが非常に大きく余程数多くのデータをとらないとなかなか簡単には結論は出ないと思うがどう考えるか。

[回答]

1) 脱ガス材および非脱ガス材のいずれをも供試材としており、各材料は非金属介在物の内容別に分類している。

2) 軸受鋼管は切り開いて板状としたのち、歪取り焼鈍を行なつて素管の外表面より 1.0mm 前後に相当する深さまで平面研削し、焼入れ焼もどしを行なつて外表面側について寿命試験を行なつている。

3) 硫化物系介在物の量を異にする試料につき酸化物系介在物を調査したところでは、Table 1のように酸化物は硫化物にほとんど左右されず、単独に存在する場合は多い傾向にある。

また、いわれるように酸化物系介在物が硫化物と共存する場合でも全てが硫化物中に包まれてしまうものでもない。これらの介在物の分布形態とフレーキングの起点との対応を調査することはきわめて困難であり、まだデータが少ないために推測の域を出ないのであるが、酸化

Table 1. Oxide inclusions in bearing steel tubes (%).

| Samples | Oxides | Amount of total oxides | Oxides induced in sulphides |
|-------------------------------------|--------|------------------------|-----------------------------|
| With much quantity of sulphides | | 0.0225 | 0.0085 |
| With not much quantity of sulphides | | 0.0443 | 0.0055 |

($\times 400$, 300 fields; average of 10 charges)

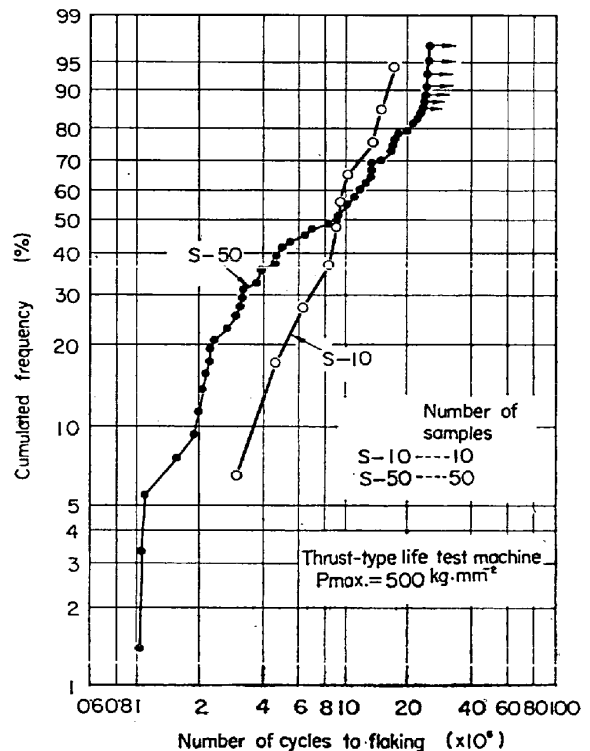


Fig. 1. Bearing life in relation to number of samples.

物が硫化物の端や側面にくつついた場合には単独で存在する酸化物と同じように、寿命には悪影響をおよぼすものと考えている。

4) スラスト型寿命試験機によるデータのばらつきの因子は少なくないといわれており、筆者のところでも種々の因子に関する経験もある。そこで試験条件はできうるかぎりすべて同一条件とし Weible 函数図にプロットして解析した結果では、1例が Fig. 1 のように試料数が 10 枚程度でも L_{50} 値は 50 枚試料の場合とほぼ同一の値を示すが、 L_{10} 値では deviate しやすいようであつて、各試料群間の寿命特性を比較するには10枚程度の試料数でもよいと思う。したがつて早期破損寿命を問題とするような場合には試料数をできるだけ多く（少なくとも30枚以上）し、各試験片の寿命が L_{50} を越える値になつた時その試験片での寿命試験を中止するようにすれば、比較的試験時間は短かくてすむと考える。

文 献

- 1) たとえば、日本学術振興会ほか：ころがり軸受寿命ところがり疲れに関する講演会資料、(1966)2, 15.

669.14.018.292

(239) 非調質型高張力鋼に関する検討
(低合金鋼の諸特性に影響をおよぼす因子について—II)

日本鋼管技術研究所

久保田広行・大須賀立美・〇城戸 弘
" 本社

太田 正矩・堀内 好浩

Normalized High Strength Steel

(On the factors which affect mechanical properties of low alloy steels— I)

Hiroyuki KUBOTA, Tatsumi ŌSUKA
Hiroshi KIDO, Masanori ŌTA
and Yoshihiro HORIUCHI

1. 緒 言

鋼の機械的諸特性を化学成分によつて推定しようとする研究は古くからなされてお^{1)~3)}、いくつかの式によつてあらわされているが、いまだ十分だとはいえない。最近になつて、これらの関係を統計的手法を用いて整理検討しようとするところみがなされ⁴⁾、当研究室においては、前報において電子計算機を用いた重回帰分析によつて、調質型高張力鋼の諸特性値におよぼす化学成分の影響について検討した結果を報告したが⁵⁾、今回は非調質型高張力鋼について同様の手法を用いて検討した結果を報告する。

非調質型高張力鋼について三好ら⁶⁾はMo-B系の主にベイナイト組織の鋼に対して、実験計画法にもとづき鋼の特性値と化学成分の関係を検討しているが、本報では主にフェライトパーライト組織の焼準鋼に対し重回帰分析をおこなつて、これらの関係を多元素にわたつて検討した。

2. 実験方法

重回帰分析をおこなうにあつて、要因としては化学成分 (C, Si, Mn, P, S, Cu, Ni, Cr, V, Nb, sol. Al, total N, 計12元素) を考え、その他の因子はできるだけ一定の水準に保つた。特性値としては、降伏点、引張り強さ、伸び、絞り、2mm Vノッチシャルピー衝撃試験における 0°C の衝撃値、および 50% 脆性破面遷移温度の6種をとつた。解析に用いたデータとしては、高周波電気炉によつて溶製した約 80 チャージの 50 kg 鋼塊を小型圧延機にて 20 mm 厚に圧延し、900°C で焼準処理後におこなつた各種試験結果を用いた。Table 1 に溶製した供試鋼の化学成分範囲を示す。フェライトパーライト鋼においてフェライト粒度は鋼の機械的性質に大きく影響をおよぼす要因であるが、本実験では、供試鋼にフェライトパーライト組織のほかごく一部にベイナイト混在組織のものがみられたので、同一要因として取り扱うには不相当と考え要因から除いて検討した。引張り試験片には平行部径 9 mm φ, ゲージ長さ 32 mm の試験片を用い、衝撃試験片には 2 mm V ノッチシャルピー試験片を用いた。全ての試験片は板厚中心部の圧延方向より採取した。

3. 実験結果

Table 2 に供試鋼の引張り試験および衝撃試験結果の上限値と下限値を示す。また Table 3 は重回帰分析をおこなつた結果を示したもので、各合金元素の 1 wt% 添加当たりの特性値におよぼす効果係数およびその有意性の検定結果、特性値の平均値 (\bar{y})、寄与率 (r^2)、標準偏差 (σ_E)などを記した。各特性値は Table 3 の各合金元素の係数の影響を1次加算的と考えると次式で表わすことができる。

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i$$

y: 特性値

β_0 : 定数項

β_i : 合金元素 1% 増加によつて生じる特性値の変化

x_i : 合金元素 i の鋼中含含有量 (wt%)

降伏点、引張り強さおよび伸びに関しては、かなり多くの要因が有意であり、寄与率も高く、ほぼ信頼できる式を得たといふことができる。絞りおよび衝撃特性については有意とみとめられる元素も少なく、また全般に寄与率も低いいため、式の信頼度は十分でない。Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 に降伏点、引張り強さおよび衝撃値について計算値と実測値の関係を図示する。これらの図から

Table 1. The range of chemical composition of steels (%).

| C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | V | Nb | Sol. Al | T. N |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|
| 0.13 ~0.19 | 0.12 ~0.75 | 1.00 ~1.70 | 0.014 ~0.033 | 0.004 ~0.021 | 0.06 ~0.36 | 0.01 ~0.74 | 0.02 ~0.57 | 0.01 ~0.11 | 0.00 ~0.11 | 0.002 ~0.077 | 0.0053 ~0.0201 |