3%Ni-Mo-V 鋼の機械的性質におよぼす 硫化物系介在物の影響

渡 辺 十 郎*

Jūro Watanabe: Effects of Sulfides on the Mechanical Properties of 3% Ni-Mo-V Steels.

Effects of sulfides on the tensile, notch impact and fatigue properties of twelve samples of 3% Ni-Mo-V steels, having four different sulfur contents and three forging rates, were investigated. The test results were as follows; (i) the decrease of transverse ductility is proportionale to the forging rate and sulfur content; (ii) the effect of small amount of sulfur on the longitudinal notch toughness is remarkable; (iii) the anisotropy of endurance strength increases with the sulfur content, and the transverse strength of the most dirty (0.090%S) steel is 73% of the longitudinal strength; and (iv) no general relationship could be established between the mechanical properties and the inclusion counts by the usual method.

(Received March 18, 1961)

I. 緒 言

鋼中に含まれる介在物が、鋼の機械的性質に及ぼす影響については、かなり多くの研究がなされている。たとえば介在物の種類や製鋼法については、上野⁽¹⁾、Frith⁽²⁾、Johnson ら⁽³⁾の研究があり、介在物の大きさ、形状や量の

影響については、横堀⁽⁴⁾、Stulen⁽⁵⁾、Ransom⁽⁶⁾などの研究がある。

しかしながらこの問題にはまだ多くの未解決点が残されており、機械材料の強度判定に際し議論が分れる場合が多い。そこで本報では、タービン発電機用軸材や蒸汽タービン用軸材として広く用いられている 3%Ni-Mo-V 鋼について、硫化物系介在物の量と形状を変えた試験材の、引張、衝撃、疲労性質を求め、その結果と実物のシャフトから採

* 日本製鋼所室蘭製作所

(1) 上野：日本機械学会誌，**59**(1956)，891。
(2) P.H.Frith：J.Iron and Steel Inst.，**180**(1955)，26。
(3) R.F.Johnson and J.F.Sewell：J.Iron and Steel Inst.，**196**(1960)，414。

(4) 横堀：日本機械学会前刷集，No.17(1960)，19。

(5) H.N.Commings, F.B.Stulen and W.C.Schulte Trans. ASM, **49**(1957)，482。

(6) J.T.Ransom：Trans.ASM, **46**(1954)，1254。

取した試験材の強度⁽⁷⁾とから、この種低合金鋼の機械的性質に及ぼす介在物の影響を包括的に求めることとした。

やはり面積率であるが、400 倍で点算法によつて求められており、それらの結果は、鍛造比 5.6 および 11.2 ではほぼ

Table 1 Chemical composition.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
1	0.27	0.28	0.52	0.016	0.005	3.00	0.06	0.45	0.09
2	0.27	0.29	0.52	0.015	0.015	3.02	0.06	0.45	0.09
3	0.28	0.28	0.59	0.015	0.048	3.00	0.06	0.45	0.09
4	0.30	0.28	0.66	0.015	0.090	3.02	0.06	0.45	0.09

II. 試 験 材 料

3%Ni-Mo-V 鋼を 6 t 塩基性電弧炉で溶解し、鋳込みの際の操作によつて、Mn および S 含有量の異なる 4 種の鋼塊を得た。すなわち、取鍋に取つた溶鋼を試験材 No.1 は鋳型に直注し、No.2, 3 および 4 は FeS および FeMn のそれぞれ適当量を懸張で添加し、産出鋼塊の S と Mn の量を調節した。各鋼塊とも重量約 1.5 t で、鋼塊底端側の外層部から採取した試料の化学分析結果は Table 1 の通りである。なお分析の結果、鋼塊内外および頂底の成分差は小さいことが判つたので、Table 1 の成分をもつて、これら試験材の成分を表わすものとする。これらの鋼における Mn 含有量は、S 含有量 O の場合の Mn 含有量を 0.51 % とし、添加された S がすべて MnS になりうるような割合でさらに Mn を加えるようにしたものである。

これらの鋼塊を水圧プレスで鍛造し、230×230×2,200 mm の鍛材とした。鍛錬成形比は 1/2U, 2.8S である。そしてこれらの鍛材を長さ方向に 8 等分し、最も頂端側のものから 2 箇を、それぞれ鍛錬成形比 1/2 U, 11.2 S および 1/2 U, 22.4 S に鍛伸した。

これらの 12 種の試験材から、引張、衝撃、疲労試験片を若干の削代を残して採取し、850°C×2hr O.Q., 640°C×4hr O.Q. の熱処理を施した後機械仕上げをして試験片とした。なおこれらの試験片は鍛造比 1.4 (230mm 角)、鍛造比 5.6 (115mm 角) および鍛造比 11.2 (80 mm 角) の場合について、それぞれ外側から 35mm, 20 mm および 20 mm の範囲から採取され、採取位置の内外差によつて生ずる影響をできるだけ小さくした。

12 種の試験片の縦断面に現われている介在物は Photo. 1 のごとくで、ほとんどすべての介在物が、鍛造によつて粘性変形をした、しかも硫化物系の介在物である。これを学振法⁽⁸⁾の第 1～第 3 法によつて測定すれば Table 2 のごとき結果が得られ、これを S 含有量との関係でプロットしたのが Fig. 1 である。同図中の (a) は、第 1 法の測定結果すなわち(長さ 0.1mm 以上の介在物の平均長)×(1mm² 当りの介在物個数)の積と S 量との関係で、鍛造比によつて 3 本の曲線が得られ、当然鍛造比が大きいものほど同一 S 量に対し大きい介在物長を示している。(b) の第 2 法は標準図と比較して求めた介在物面積率で、(c) の第 3 法も

(7) 渡辺：本誌(投稿中)

(8) 日本学術振興会編：鋼と非金属介在物，(1957) (山海堂)

一致しているが、鍛造比 1.4 の場合、第 2 法では過小な値を示している。これは小さな介在物を見落しているためで

Table 2 Inclusion content measured by the J.S.P.S.R.*method.

S (%)	Forging rate	1st method	2nd method A_{20}	3rd method $dA_{60 \times 400}$
0.005	1.4	I (II) (A) = 0	0.03	0.04
	5.6	I (II) (A) = 0.12mm $\times$ 0.013	0.03	0.05
	11.2	I (II) (A) = 0.22mm $\times$ 0.082	0.05	0.06
0.015	1.4	I (II) (A) = 0	0.04	0.09
	5.6	I (II) (A) = 0.12mm $\times$ 0.027	0.03	0.06
	11.2	II (III) (A) = 0.22mm $\times$ 0.230	0.12	0.10
0.048	1.4	II (III) (A) = 0.15mm $\times$ 0.185	0.11	0.27
	5.6	III (IV) (A) = 0.11mm $\times$ 1.065	0.27	0.28
	11.2	III (IV) (A) = 0.18mm $\times$ 1.153	0.25	0.30
0.090	1.4	IV (IV) (A) = 0.14mm $\times$ 0.785	0.22	0.50
	5.6	IV (IV) (A) = 0.15mm $\times$ 2.160	0.46	0.45
	11.2	IV (IV) (A) = 0.16mm $\times$ 3.500	0.42	0.53

* The Japan Society for the Promotion of Scientific Research (Gakushin)

Fig.1 Inclusion content measured by the J.S.P.S.R. method. (a) 1st method, (b) 2nd method and (c) 3rd method.

III. 試験結果とその検討

1. 引張試験成績

12 種の試験材から縦横方向に各 3 本の試験片を採取した。試験片の直径は 7mm、標点距離 25mm である。試験結果のうち、降伏点および引張強さには 12 種の鋼にほとんど差がなく、それぞれ 82~87 kg/mm² および 90~95 kg/mm² の範囲内にあつた。しかしながら、伸びおよび絞りの値には S 量および鍛造比の影響が著しく、Fig.2 は絞りの値を S 含有量および鍛造比との関係で示したものであ

る。縦方向絞りは鍛造比の小さい間は S 量の影響があるが、鍛造比が大きくなるとともに改善されて、その影響は小さくなる。しかし横方向絞りは鍛造比を増すほど、また S 量が大きくなるほど低下し、鍛造比および S 含有量についての一次式—(1) 式—で示される。

$$\Psi (\%) = 55.8 - 1.05 \times (\text{F.R.}) - 350 \times (\text{S} \%) \quad (1)$$

ここに Ψ : 横方向絞り, F.R.: 鍛造比

鍛造比の増加にともなう横方向延性の低下については多くの研究が発表されているが、たとえば Coupette⁽⁹⁾ や, Loria⁽¹⁰⁾ による結果と (1) 式が示す鍛造比の影響を比較すれば、(1) 式の示す低下度は比較的低い。この試験に用いた試験材は、S 含有量の多いものを含んではいるが、いずれも

Fig.2 Relation between sulfur content and reduction of area.

小型鋼塊の表層部で結晶偏析も比較的軽微であり、さらに介在物も数は多くても小さく分散していることに留意する必要がある。大型鋼材で介在物含有量の多いことが問題となる場合には、介在物のみならず他の合金元素も偏析している場合も多く介在物も大きいので、鍛造比の影響が著しくなる場合が考えられる。また (1) 式が示すように、S 含有量すなわちこの場合には介在物の総量が、横方向延性に影響することが知られた。

2. 衝撃試験成績

縦横方向に各 3 本の V ノッチシャルビー衝撃試験片を採取し、25°C で試験した。Fig.3 は試験結果を S 含有量および鍛造比についてまとめたものである。縦方向衝撃値は鍛造比とともに上昇し、横方向靱性は逆に低下する。この傾向は前述の延性と同様であるが、この靱性の場合には、S 含有量が 0.015% から 0.005% に減少することによつ

(9) W.Coupette: Stahl u. Eisen, **61**(1941), 1013, 1036.

(10) E.A.Loria: Trans. ASM, **42**(1950), 486.

て、衝撃値は急に大きくなり、その傾向が縦方向に著しい。このことは介在物が影響をおよぼす機構が、延性と靱性では異なることを示唆するものと考えられる。

Fig.3 Relation between sulfur content and V-notch charpy impact value at 25°C.

疲労試験はS含有量が0.005、0.048および0.090%で、鍛造比が1.4および11.2の6種の試験材についてのみ行なつた。試験機は小野式回転曲げ疲労試験機で、試験片直径は鍛造比1.4のものは10mmであり、鍛造比11.2のものは7mmである。すべて平滑試験片で、旋削後エメリーペーパーで仕上げた。

Fig.4は耐久限度をS含有量についてまとめたものである。

Fig.4 Relation between sulfur content and endurance limit.

Table 3 Endurance limit and dimension of inclusion.

S (%)	Forging rate	Mean width of inclusion a (1/100mm)	Mean length of inclusion b (1/100mm)	b/a	Endurance limit (kg/mm ²)		σ_L/σ_T
					Long. σ_L	Trans. σ_T	
0.005	1.4	0.64	2.9	4.5	52.5	45.0	1.17
	11.2	0.18	8.4	46.6	57.7	51.0	1.13
0.048	1.4	0.73	6.6	9.1	52.5	43.0	1.22
	11.2	0.20	34.4	17.2	56.1	49.0	1.14
0.090	1.4	0.92	7.9	8.6	52.5	38.0	1.38
	11.2	0.22	31.1	14.1	57.0	42.2	1.37

る。鍛造比1.4の試験材では、縦方向ではS含有量の影響は不明確で、3種の鋼とも同じバラツキの範囲内にある。これに対して横方向ではS含有量すなわち介在物量の影響

は顕著で、S含有量が多くなるほど耐久限度は低下し、バラツキも大きくなっている。鍛造比11.2の場合には縦横方向ともS含有量の影響が明らかで、特に横方向で著しい。

鍛造比1.4のものと11.2のものでは、縦横両方向とも後者の方が強いが、これは鍛造そのものの影響か、試験片の寸法効果か、あるいは熱処理時の質量効果が明らかではないので、ここでは縦横の異方性について考察を加えることとし、Table 3の右端の欄に縦横の耐久限度の比を示した。

これによると、いずれのS含有量の場合でも鍛造によつて異方性が大きくなる傾向は認められず、前述の延性や靱性の場合と異なっている。鍛鋼の機械的性質の異方性は介在物のみに起因するものではなく、結晶偏析が整列してできた繊維組織にも影響されるであろうが、介在物が疲労強度に影響を及ぼす機構も、延性、靱性などとまた異なつたものと推測される。

疲労試験に用いた横方向試験片の中から1種類3本の試験片を取り出し、その横断面内の各10視野で、最も大きい介在物の長さ幅を測定し、その平均値をTable 3に示した。鍛造によつて1箇の介在物が2箇以上に分断される場合もあるので、介在物の長さは鍛造比の倍率で大きくはなつておらず、したがつて介在物の幅と長さの比も鍛造比に相当するものより幾分小さいが、それでも鍛造比1.4から11.2に増すことによつて、介在物は非常に細長いものになつている。しかしながら耐久限度の異方性は増しておらずかえつて減少するかのごとくである。S量が0.005%から0.090%に増加することによつて、横方向延性、靱性はなほだしく低下することは前述のとおりであるが、回転曲げ耐久限度は、その異方性がわずか20%増加するに過ぎず、この点は注目される。

4. 介在物含有量と機械的性質の関係

Table 2とFig.1に示された学振法による介在物測定成績と、前述の諸機械的性質との関係を検討する。Fig.5は、学振法第1法および第3法による介在物測定値と、横

方向絞りの関係を示す。この図によると、いずれの場合にも鍛造比が一定の場合にのみ、介在物測定値の大小が横方向性質の良否を表わしている。しかも絞り値と衝撃値とは介在物測定値に対して異なつた関係を示す。

またこの試験の範囲内では、疲労強度の異方性は鍛造比

(11) J.M.Hodge, R.H.Frazier and F.W.Boulger: Trans. AIME, 215 (1959), 745.

には関係せず、S量の大小で定まるような結果が得られており、したがって学振第1法による介在物測定値よりも、

について新しい介在物測定法を提案している。

IV. 結 言

タービン発電機や蒸汽タービンの回転軸として広く用いられている3%Ni-Mo-V鋼について、4種のS含有量、3種の鍛造比で、合計12種の試験材をつくり、引張り、衝撃、疲労性質に及ぼす硫化物系介在物の影響を求めた。その結果を要約すれば、

(1) 降伏点および引張強さは介在物含有量によつてほとんど影響されない。

(2) 横方向織りとS含有量および鍛造比の間に次の関係が求められた。

$$\Psi(\%) = 55.8 - 1.05 \times (\text{F.R.}) - 350 \times (\text{S}\%)$$

ここに Ψ :横方向織り, F.R.:鍛造比

(3) 衝撃値もS含有量と鍛造比に影響されるが、縦方向衝撃値がわずかのS含有量で著しく低下する点が注目される。

(4) これらの試験材においては、S含有量が多くなるほど平滑回転曲げ耐久限度の異方性が大きくなるが、鍛造比の影響は小さかつた。Sを0.090%含み、したがって硫化物の非常に多い鋼で、横方向耐久限度は縦方向の約73%である。

(5) 学振法第1～第3法による介在物測定成績と、各種機械的性質の間に、一般的関係を求めることはできなかった。個々の製品の問題となる性質について、目的になつた介在物の測定法を定めるべきものとする。

本研究の一部は文部省総合研究「介在物と疲労」(代表者横堀武夫教授)の一部として行なわれたものである。終りに本論文の発表を許可された株式会社日本製鋼所に謝意を表わし、また同社室蘭製作所研究所長下田秀夫博士の御指導と同研究所各位の御協力に御礼中上げる。

Fig.5 Relation between inclusion content and transverse reduction of area.

第3法による測定値によつて介在物の影響が判定できるかのように思われる。しかしこれは比較的介在物の多い、しかも細長い介在物の場合について得られた関係で、一般的な結論と考える方が妥当であろう。

これらの諸点から見ると、介在物測定結果と種々の機械的性質の間に、一般性のある定量的な関係を求めることは困難なことを考えられるので、狭い範囲の製品の、しかも最も問題となる性質について合目的な介在物の測定法を求めることが賢明であろう。その場合硫化物のみならずけい酸塩、酸化物などの介在物の種類や、材料のかたさなども考慮に入れるべきことはいうまでもない。Atkinson⁽¹²⁾やJohnsonとSewell⁽³⁾は、それぞれ超高張力鋼や軸受鋼に

(12) M. Atkinson: J. Iron and Steel Inst., **195** (1960), 64.