

全連続式線材圧延機の粗圧延機の圧延圧力

および圧延トルクの測定*

豊島 清三**・坂本九州男***・安田 末正****・中島浩衛****

On Measurement of Rolling Pressure and Rolling Torque of
Roughing Stands in an All-Continuous Wire-Rod Mill.Seizō TESHIMA, Kusuo SAKAMOTO
Suemasa YASUDA and Koe NAKAJIMA

Synopsis:

The rolling pressure and the rolling torque were measured at the roughing stands of all continuous wire rod mill. When four billets of mild steel were rolled at once, the rolling pressure of each stand fell in the range of about 9~37 ton per billet.

The rolling pressure of oval rolling stands was considerably higher than that of square rolling stands. And the effect of back or front tension between stands on the rolling pressure was found at the threading or the delivering of billets.

The measured torque was considerably higher than the calculated torque from the measured pressure. The rolling efficiency of roughing stands was about 71%, which was derived from the measured rolling torque and motor torque. Moreover the load distribution of each stand to the main motor was obtained.

At the end of this paper the relation between the mean specific pressure and some factors of rolling was discussed.

I. 緒 言

八幡製鉄光製鉄所にドイツ Siemens 社製の全連続式線材圧延機が設置され、昭和 35 年 5 月より操業が開始されてからきわめて順調な生産を続けて現在にいたっている。

圧延される線材は径 5.0mm から 16mm までの普通線材および特殊線材である。本圧延機は従来の線材圧延機にくらべて圧延速度がきわめてはやく最高圧延速度は 24m/s (約 4800 ft/min) である。径の公差が小さく寸法精度がすぐれており、外観が美しく附着スケールの少ないことが特徴である。

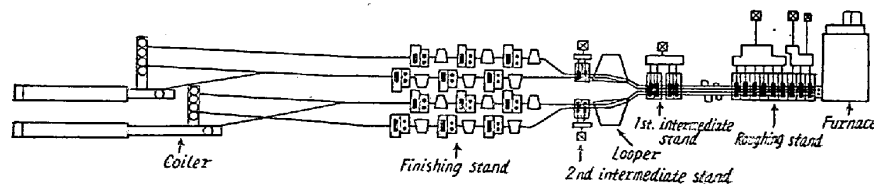


Fig. 1. Layout of all-continuous wire-rod mill.

本圧延機の圧延方式は¹⁾ Fig. 1 にしめすように 70 mm角, 9m 長さ, 重さ約 335kg の圧延用鋼片が重油燃新を用いた三带式加熱炉によつて連続的に加熱され、在炉時間約 1.5 時間である。加熱された鋼片は同時に 4

本の鋼片を圧延する能力をもつた連続式圧延機に送られる。

圧延機は全部で 21 台からなる圧延機列であり、粗圧延機は 9 台からなり、三つの駆動部にわかれ、そのうち No. 4~No. 9 の粗圧延機 6 台が 1 台の電動機 (1800IP) で駆動されている。粗圧延が終了するとダウンローパーにより第 1 中間圧延機群 (4 台) に導入され、ついで 2 本宛 2 列となつて第 2 中間圧延機群 (2 台) に入る。つぎに誘導管を経て 1 本宛 1 列となつて仕上圧延機を経て水冷管をとおつて捲とられる。仕上圧延機は垂直ロールと水平ロールが各 1 基ずつ 1 群となり 3 群をなしている。

圧延機の特徴として第 2 中間圧延機と仕上圧延機は下ロールのみが主電動機によつて駆動され、上ロールは Schlepp motor で駆動されており圧延中は下ロールの回転によつて従動する機構となつている。このような方式および水平ロールと垂直ロールとの組合せなどが圧延疵

* 昭和 35 年 10 月本会講演大会にて発表

** 八幡製鉄株式会社八幡製鉄所技術研究所 工博

*** 八幡製鉄株式会社八幡製鉄所戸畑製造所

**** 八幡製鉄株式会社八幡製鉄所技術研究所

の発生防止および精度の維持に役立っている。

本測定は上述の No. 4~No. 9 の粗圧延機群の圧延圧力および圧延トルクの測定を行なったものである。Fig. 1 にしめすように No. 4~No. 9 粗圧延機 6 台が 1 台の電動機によつて駆動されているため、各スタンドにかかるトルクの配分についても検討を行なった。

一般に板圧延の場合の圧延圧力、変形抵抗の算出に関する研究はかなり行なわれているが、孔形圧延の場合の変形抵抗に関しては現在のところはつきりとした考え方ができていないので本測定結果を用いて線材孔形形状と平均変形抵抗との関連性について考察を加えた。

II. 測定方法

1. 圧延圧力の測定方法

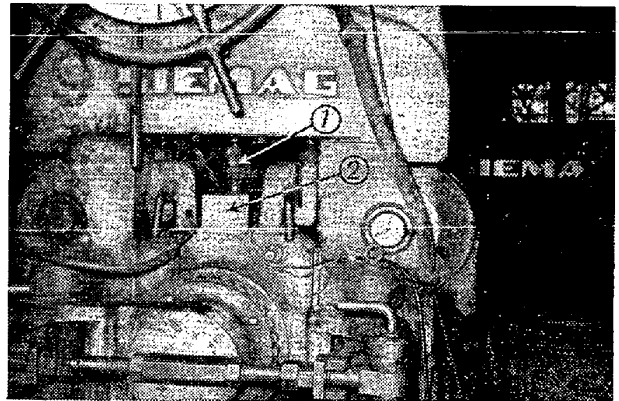
圧延圧力の測定にあつて各粗圧延機の両側の圧下スクリュー下の Fig. 2 にしめすように圧力臼を挿入して測定を行なった。SF 55 材で作つた圧力臼には抵抗線歪計(K22型)を貼りつけてあらかじめ荷重較正を行なつた。

歪計は共和無線研究所製の DM 型抵抗線歪測定装置を用い、電磁オシログラフに記録した。

測定は同時に 2 スタンドずつ行なつた。

2. 圧延トルクの測定方法

カムワルツと上下ロールを接続する 2 本のスピンドルの中央部表面の 1 部を研磨し抵抗線歪計 (KB 9 型) を 45° 方向に 4 枚貼りつけ、それぞれスリップリングによつて外部にとりだし圧延圧力の場合と同じ歪測定装置を用いて測定を行なつた。抵抗線歪計を貼りつけたスピンドルは測定前にあらかじめ 500 kg·m づつ最大 3000 kg·m までトルクの較正を行なつた。



① Housing screw ② Load cell

Fig. 2. Insertion of the load cell into the stand.

その他電動機負荷も同時に測定を行なつた。また圧延材料の温度は各スタンド間で光高温計を用いて測定を行ない、各スタンドにおける圧延材の断面積は圧延中嚙止めた材料を切断して直接測定を行なつた。

3. 圧延材料

圧延材料はいずれも軟鋼線材の場合であり、圧延圧力の測定用に SWRM 3 (リムド鋼) を用い、圧延トルクの測定用に SWRM 4 (キルド鋼, 蛇籠材), SWRM 4 (リムド鋼) SWRY 11 (熔接線材) の 3 種類を使用した。用いた各材料の化学成分を Table 1 にしめした。

4. 圧延条件

圧延条件は Table 2 にしめすように No. 4~No. 9 の粗圧延機のうち No. 4, 6, 8 の 3 スタンドが oval 圧延であつて No. 5, 7, 9 の 3 スタンドが square 圧延とよばれる圧延方式をとり、圧延は oval 圧延ついで square 圧延と交互に繰り返される。No. 4 スタンドから No. 5 に入るときは材料が 90° 反転し、No. 5

Table 1. Chemical composition of rolled steels.

Specification	C	Si	Mn	P	S	Remarks
SWRM 3	0.12	0.01	0.43	0.041	0.031	For measuring of rolling load For measuring of rolling torque
SWRM 4 (killed)	0.13	0.24	0.44	0.014	0.023	
SWRM 4 (rimmed)	0.20	0.01	0.30	0.014	0.030	
SWRY 11	0.08	0.01	0.60	0.009	0.015	

Table 2. Rolling conditions.

Stand No.	4	5	6	7	8	9
Section of rolled steel						
Roll diameter Dmm	30.8×59.9	37.1×35.6	18.8×43.2	23.2×23.4	11.8×28.5	17.2×17.2
Rolling speed Vu m/s	417.5	417.5	382	383	384	384.5
Rolling speed Vu m/s	0.24	0.34	0.43	0.76	1.16	1.62
Section area of rolled steel Amm ²	1820	1287	829	550	350	191
Reduction of section area ΔA/A×100%	28.4	29.4	35.6	36.7	36.4	23.0
Strain of section area lnA _{n-1} /A _n ×100%	24.9	25.7	30.3	31.2	31.0	20.7

から No. 6 の場合はそのまま、No. 6 から No. 7 の場合は 90°, No. 7 から No. 8 は 45°, No. 8 から No. 9 は 90° の反転を行なっている。

材料の抽出温度は 1240°C で電動機の回転数が 300 r.p.m の場合についてそれぞれ測定を行なった。鋼片の同時圧延本数は 1, 2, 3, 4 と逐次増して圧延を行なった。

III. 測定結果

1. 圧延圧力

Table 2 にしめす圧延スケジュールにしたがつて、炉からの抽出温度 1240°C で圧延を行なうとき No. 4~No. 9 の各粗圧延機における材料温度の測定結果を Fig. 3 にしめた。

圧延中の材料は頭部ほど温度がたかく、ついで中央部、尾部の順となつているが頭部と尾部間で約 20°C の差があつた。電動機の回転数は 300 r.p.m で4本とおし、4本とおしの圧延を行なったときの各スタンドにおける圧延圧力の測定結果を Fig. 4 (a) にしめた。

材料の嚙込および吐出時において圧延圧力が増大しており、嚙込時は中央部に比べて約 5 t (範囲 3~6 t) 吐出時には平均約 11 t (範囲 4~24 t) の高い値を示した。

このように嚙込時と吐出時に圧力のピークが生じる理由として圧延方式が連続式であるため嚙込時には後方張力のみが作用して圧延され、材料がつぎのスタンドに入ると前方と後方の両張力が作用することになるので圧延圧力が低下する。また吐出時には材料温度が約 20°C 低いためと材料尾部が後方スタンドを出てしまうために後方張力がなくなることによつて圧力がさらにたかくあらわれるものと考えられる。各スタンドにから圧延圧力は同時圧延本数に比例して直線的に増大するが、No. 4, 6, 8 スタンドの oval 圧延の場合は同時圧延の材料本数倍よりもやや低い傾向をしめし No. 5, 7, 9 の square 圧延はいくぶん高目であつた。

各スタンド別の圧力は No. 6 スタンドが最大値をしめ

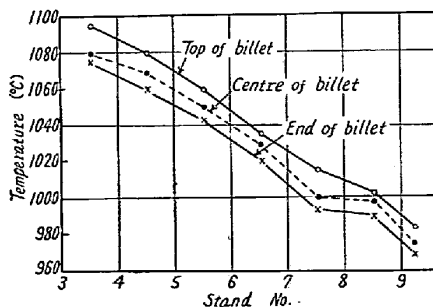


Fig. 3. Temperature of a billet at each stand.

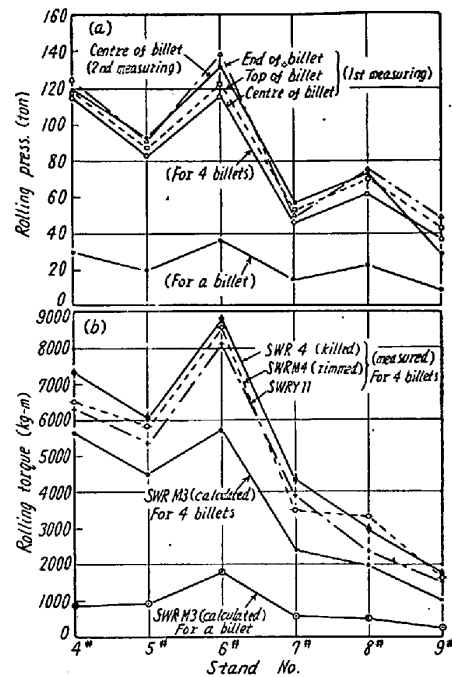


Fig. 4. (a) Rolling pressure of roughing stands.
(b) Rolling torque of roughing stands.

しており全体的に No. 4, 6, 8 の oval 圧延スタンドが No. 5, 7, 9 の square 圧延スタンドにくらべてたかい傾向が認められた。

2. 圧延トルク

(1) 圧延トルクの測定結果

圧延トルクの測定結果を Fig. 4(a) にしめすように鋼種の違いによるトルクの差はわずかであるが SWRM 4 (キルド鋼) の場合が高目の値をしめしている。スタンド別のトルクは圧延圧力の場合と同じ傾向をしめしており各スタンドを通過するにつれてトルクは減少する傾向があるが No. 6 スタンドのみが特異的に最高値をしめしている。Fig. 4 (b) には Fig. 4 (a) の圧力の測定結果から求めた計算トルクもあわせてしめたがトルクの計算値は実測値よりも約 20~40% 低い値となつている。軸受の効率を加味してもいくぶん低すぎる傾向がある。これは接触弧の長さに対する正しい推定が特に孔型圧延の場合は困難であるためと考えられる。

計算にあつて投影接触弧の長さ (ld) は Trinks の求積法³⁾によつて求めた投影接触面積の重心までの長さをもつて投影接触弧の長さとした。

嚙込時の圧延トルクはピークを呈し中央部よりも平均約 380 kg-m (範囲 200~700 kg-m) の上昇がみられた。これは後方張力のためであると考えられる。また吐出時には圧延圧力が他に比べてたかいにもかかわらず

Table 3. Contribution of the rolling torque at each stand to the motor and rolling efficiency.

Steels	Specification	Stand No.						Total rolling torque kg-m	Motor torque kg-m	Rolling efficiency %
		4	5	6	7	8	9			
SWRM 4 (killed)	Max. rolling torque kg-m	6867	6118	9000	4165	3828	1960	3299	4510	73
	Contributed torque to the motor kg-m	264	339	813	567	789	527			
	Contribution of each stand to the motor %	8.0	10.3	24.6	17.2	23.9	16.0			
SWRM 4 (rimmed)	Max. rolling torque kg-m	7620	6365	9220	4920	3580	2030	3426	4670	73
	Contributed torque to the motor kg-m	292	353	832	669	734	546			
	Contribution of each stand to the motor	8.5	10.3	24.3	19.5	21.4	16.0			
SWRY11	Max. rolling torque kg-m	6738	5590	8480	4510	2590	1940	3004	4440	68
	Contributed torque to the motor kg-m	259	310	766	613	533	523			
	Contribution of each stand to the motor %	8.6	10.3	25.5	20.4	17.7	17.4			

逆にわずかながら減少がみとめられた。この理由は後方張力がなくなり前方張力のみとなつたためであると推定される。いずれの場合も圧延時の張力はかなり圧延圧力および圧延トルクに影響を与えている。

(2) 各スタンドにおける圧延トルクの配分

圧延中各スタンドの圧延トルクを減速歯車を経て1台の電動機軸にかかる換算トルクとして求めると Table 3 が得られた。

各スタンド別のトルクの配分率は No.6 スタンドが一番大きく約 25% に相当しており、かなり高い値であつたが材料の種別による配分の違いはわずかであつた。

(3) 圧延効率

圧延トルクの最大値に対する圧延効率 (η = 圧延トルク/電動機トルク $\times 100$) を Table 3 にあわせてしめしたように平均約 71% であつた。材料種別の違いによる圧延効率の差はきわめて小さい。材料の同時圧延本数に対する圧延効率の変化を計算トルクから求めて Fig. 5 に

しめしたが同時圧延本数が増すにしたがつて圧延効率が次第に増加して一定値となる。

IV. 平均変形抵抗についての考察

1. 線材粗圧延機の平均変形抵抗

圧延圧力から平均変形抵抗を求めるに当り, Trinks の求積法³⁾によつて投影接触面積を求めて平均変形抵抗の計算を行なつた。

平均変形抵抗値は Table 4 にしめすように約 9.8~18.2 kg/mm² の範囲にあり、各スタンドを通過するにつれて値は増大する傾向が認められるが、No.4, 6, 9 スタンドの oval 圧延の場合の方が No.5, 7, 9 スタ

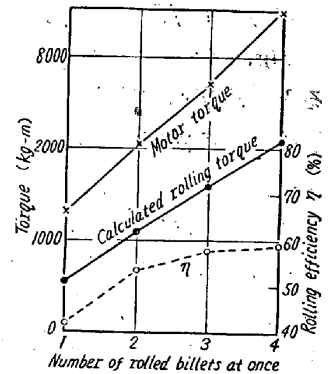


Fig. 5. Rolling efficiency of roughing stands.

Table 4. Mean specific pressure of roughing stands.

Stand No.	4	5	6	7	8	9	
Rolling temperature T°C	1075	1060	1040	1015	1000	980	
Mean strain rate $\dot{\phi}_m$ sec ⁻¹	1.2	1.6	3.9	5.5	11.4	7.1	
Projected contact area mm ²	3016	1964	1972	1040	949	749	
Projected contact length <i>ld</i> mm	67	72	48	63	46	60	
Mean rolling pressure P ton	30.0	20.0	36.5	15.0	22.5	9.0	
Mean specific pressure <i>k_f</i> kg/mm ²	9.8	10.9	15.8	12.5	18.2	12.3	
Velocity modified temperature <i>T_m</i> K	1324	1291	1221	1179	1125	1133	
Resistance of deformation by tensile test S kg/mm ²	8.4	9.0	11.9	13.5	16.3	14.1	
<i>k_f/S</i>	Oval rolling	1.165	—	1.330	—	1.115	—
	Square rolling	—	1.203	—	0.925	—	0.873

ンドの square 圧延に比較してたかい値をしめしている。

2. 平均変形抵抗値と材料および孔形形状との関係

平均変形抵抗値が oval 圧延および square 圧延方式でそれぞれ異なつた傾向をしめしているのでつぎのような材料寸法比および孔形形状因子との関係をしらべた。

hm/bm , (材料の平均厚みと平均巾の比)

hm/Dm , (材料の平均厚みと平均ロール径の比)

L/\sqrt{A} , (材料断面の周囲の長さの半分と材料断面積の平方根との比)⁴⁾

(1) hm/Dm との平均変形抵抗の関係

Fig. 6 (a) にみられるように hm/bm の比が小さくなると次第に平均変形抵抗は大きくなるのが認められるが oval 圧延および square 圧延で別々に整理すると oval 圧延では hm/Dm の値の変化の範囲が狭いにもかかわらず平均変形抵抗値はかなり変化している。

(2) hm/Dm と平均変形抵抗の関係

Fig. 6 (b) にしめすように hm/Dm の値が小さくなると平均変形抵抗値は増大するが oval 圧延と square 圧延でその傾向が異なり, oval 圧延の方が勾配が大きい。

(3) L/\sqrt{A} と平均変形抵抗との関係

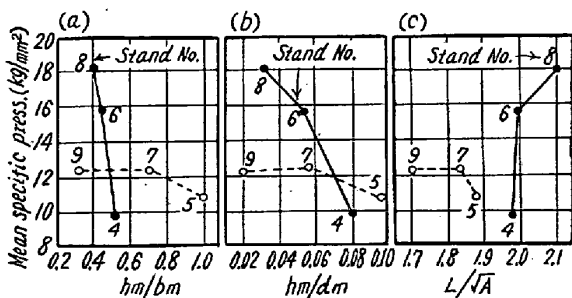
L/\sqrt{A} は孔形に関する無次元表示として用いられたものであるが L/\sqrt{A} との関係をしらべると Fig. 6 (c) のように oval 圧延と square 圧延で全く異なつた傾向をしめた。

(3) 平均変形抵抗と平均歪速度 ($\dot{\phi}_m$), 圧延温度 (T) との関係

圧延時の平均歪速度 ($\dot{\phi}_m$) を SIMS の定義⁵⁾による (1) 式にしたがつて求めた。

$$\dot{\phi}_m = \frac{V_u}{ld} \times \ln \frac{A_n}{A_{n-1}} \dots\dots\dots (1)$$

V_u はロールの周速度, ld は投影接触長さ, および



(hm; mean thickness of rolled steel, bm; mean width of rolled steel, Dm; mean diameter of roll, L; half length of section periphery, A; section area of rolled steel.)

Fig. 6. Relation between the specific pressure and some factors of rolled shapes.

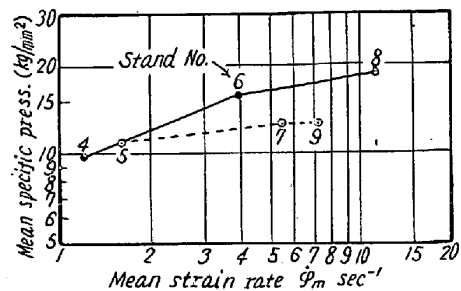


Fig. 7. Relation between the mean specific pressure and the mean strain rate.

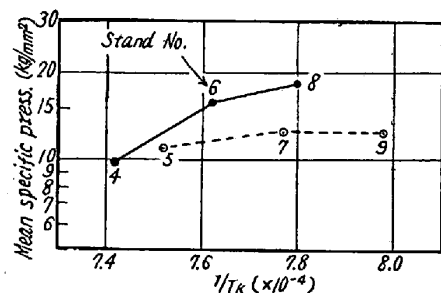


Fig. 8. Relation between the mean specific pressure and the rolling temperature. (T_K : absolute temp.)

A_{n-1} と A_n は圧延前後の材料断面積をあらわしている。圧延速度が $0.24 \sim 1.62$ m/s の範囲にあるとき平均歪速度は $1.2 \sim 11.4$ s⁻¹ であつた。平均変形抵抗と平均歪速度の関係は Fig. 7 にしめすごとく歪速度の増加にしたがつて変形抵抗も増大するが oval 圧延スタンドと square 圧延スタンドは増加の傾向が異なつている。

さらにまた圧延温度 ($1075^\circ\text{C} \sim 980^\circ\text{C}$) と平均変形抵抗との関係を求めると Fig. 8 にしめすごとく Fig. 7 と同様 oval 圧延と square 圧延でそれぞれ増加する傾向が異なつている。歪速度または圧延温度との関係はいずれも oval 圧延スタンドの方が, square 圧延スタンドよりもたかい変形抵抗値が得られたが, それぞれ歪速度と温度の関係には両者の影響が含まれていることに注意を要する。

4. 平均変形抵抗と歪速度修正温度 (velocity-modified temperature) T_m との関係

粘性流れの理論にもとずいて定常クリープに対する歪速度 ($\dot{\phi}$) と温度 (T_K) との関係を (2) 式であらわしたとき $T_m = T_K(1 - K \ln \dot{\phi} / \dot{\phi}_0) \dots\dots\dots (2)$ この T_m が歪速度修正温度 (velocity-modified temperature) とよばれるもので MACGREGOR と FISHER⁶⁾ は引張試験における変形抵抗 (k_f) がこの T_m と歪量 (ϕ) のみの函数としてあらわされることを MANJOINE⁷⁾ のデータ (温度, 常温 $\sim 600^\circ\text{C}$, 歪速度 $9.5 \times 10^{-7}/\text{s} \sim$

0.5/s) を整理して(3)式の成立することをたしかめている。

$$k_f = f(T_m \cdot \varphi) \dots\dots\dots (3)$$

さらに井上⁸⁾によつて高温(980~1200°C)でもほぼ成立することがみとめられているので T_m との関係をしらべた。井上の低炭素リムド鋼の高速引張りのデータを整理して(2)式の常数 K および $\dot{\varphi}_0$ を求めて T_m との関係を表わしたのが Fig. 9 である。($K=0.044$ $\dot{\varphi}_0=0.8 \text{ s}^{-1}$)

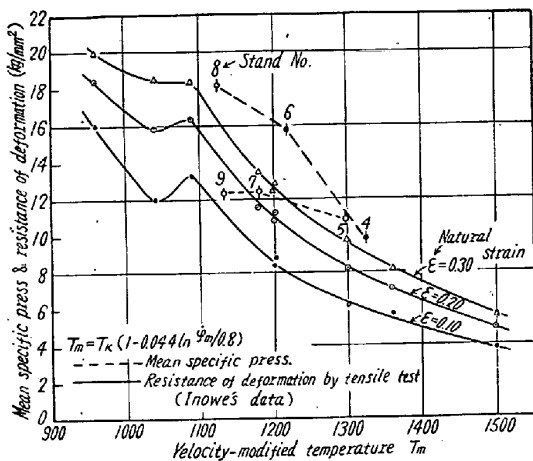


Fig. 9. Relation between the mean specific pressure and the velocity-modified temperature.

これより歪速度修正温度 T_m と平均変形抵抗を求めると oval 圧延および square 圧延で違った傾向となり、oval 圧延の方が傾斜が急である。

さらに Fig. 9 に井上の引張試験による変形抵抗値を各歪量別に比較のためあわせてしめた。Fig. 9 から圧延の場合と引張試験の場合で同じ T_m と φ に対する変形抵抗を近似的に求めて両者を比較すると Table 4 のごとく oval 圧延の変形抵抗値 (k_f) は引張試験値の平均約 1.20 倍に相当し square 圧延の場合は平均約 1.00 倍であつた。

さらに孔形状因子 L/\sqrt{A} との関係をしらべると Fig. 10 のごとく L/\sqrt{A} の値が境すと k_f/S の値も大きくなる傾向がある。Oval 圧延の場合 k_f/S の値が約 1.20 となるのは丁度 3 次元応力係数 1.15 とほぼ

一致している。したがつて oval 圧延に対する変形抵抗の算出にあつて高速引張試験結果を直接用いてもさしつかえないものと考えられるが square 圧延に対しては同様な方法で求めた値よりもいくぶん低目であることに

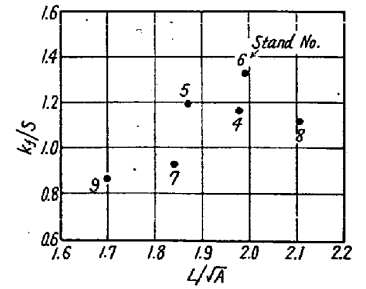


Fig. 10. Relation between the k_f/S and the factor of rolled shapes (L/\sqrt{A}).

なる。この理由はあきらかでないが孔形の形状からくる材料の流動、摩擦などの影響が複雑に作用しているためであろうと思われる。

V. 結 言

以上述べたごとく全連続式線材圧延機の粗圧延機にかかる圧延圧力および圧延トルクの測定を行なつて各スタンドにかかる負荷の状態をすることができた。

一般的に oval 圧延スタンドが square 圧延スタンドにくらべて負荷が大きい傾向がみられた。

圧延圧力の測定値から平均変形抵抗を計算して歪速度圧延温度、材料寸法および孔形状などの関連性について検討を加えた。さらに MACGREGOR-FISHER の歪速度修正温度 (T_m) の考え方にもとづいて粗圧延機の平均変形抵抗値と高速引張試験から求めた変形抵抗値との関係について若干の考察を行なつた。

(昭和 36 年 6 月寄稿)

文 献

- 1) 大宰三郎: 鉄と鋼, 42 (1955) No. 9
- 2) 製鉄研究, 220 (1957) 9
- 3) W. TRINKS: Roll Pass Design 1 (1933) p.103
- 4) 岡本豊彦: 第 7 回圧延理論分科会資料, 昭和 29 年
- 5) R. B. SIMS: Proc. Inst. Mech. Eng. 168 (1954) 191~200
- 6) J. C. FISHER & C. W. MACGREGOR: J. of the Appl. Mech. 67 (1945) A-824 68 (1946) A-11
- 7) M. J. MANJOINE: J. of the Appl. Mech. 66 (1944) A-211
- 8) 井上勝郎: 鉄と鋼, 41 (1955) No. 5, 6, 8