

論 文

線材・棒鋼圧延の負荷特性とその数式化

篠倉恒樹*・高井耕一*

Mathematical Models of Roll Force and Torque in Steel Bar Rolling

Tsuneki SHINOKURA and Koichi TAKAI

Synopsis:

This paper describes a new method for calculating roll force and torque in Square \rightleftharpoons Oval, Round \rightleftharpoons Oval, Square \rightleftharpoons Diamond, Oval \rightarrow Oval, and Diamond \rightarrow Diamond passes. We conducted hot steel bar rolling experiments, and investigated some characteristics related with roll force and torque. The shape of projected contact area can be approximated as follows; in the Square \rightarrow Oval pass, it is approximated by concave rectangular; in the Round \rightleftharpoons Oval, Oval \rightarrow Oval and Oval \rightarrow Square passes, by half ellipse; in the Square \rightleftharpoons Diamond and Diamond \rightarrow Diamond passes, by cosine curves. The mean deformation resistance can be calculated by an equivalent rectangular transformation method. The non-dimensional roll force and torque arm coefficient are expressed as simple functions of a common roll gap ratio.

1. ま え が き

線材棒鋼圧延工程では近年電算機による孔型設計や圧延制御、シミュレーションなどが活発に進められている。この電算化に重要な役割を果たすのが孔型圧延の数式モデルである。著者らは各圧延方式に共通の簡便な幅広がり式を提案した¹⁾が、圧延荷重やトルクなどの負荷特性の数式化も重要である。従来の研究^{2)~8)}でも種々の数式が提案されてはいるが、圧延方式によつて必ずしも統一されていない。そこで本研究では8種の圧延方式(角 \rightarrow オーバル、角 \rightarrow ダイヤ、丸 \rightarrow オーバル、ダイヤ \rightarrow ダイヤ、オーバル \rightarrow オーバル)について軟鋼の熱間圧延実験を行い、投影接触面の形状と面積、平均変形抵抗、圧延荷重係数、トルクアーム係数の数式化を試みた。その結果、各圧延方式に共通の簡便な負荷特性計算式を開発できたので報告する。

2. 実 験 方 法

本実験に用いた圧延機は直径 200 mm、回転速度一定 (14 rpm) の孔型ロールを備えたものである。素材は JIS SS41 の軟鋼で、市販の丸と角のみが棒鋼及びこれらをダイヤとオーバルの孔型ロールで熱間圧延したものを、いずれも長さ 200~220 mm に切断して用いた。孔型の形状と寸法を Fig. 1 に示す。これらの孔型に対

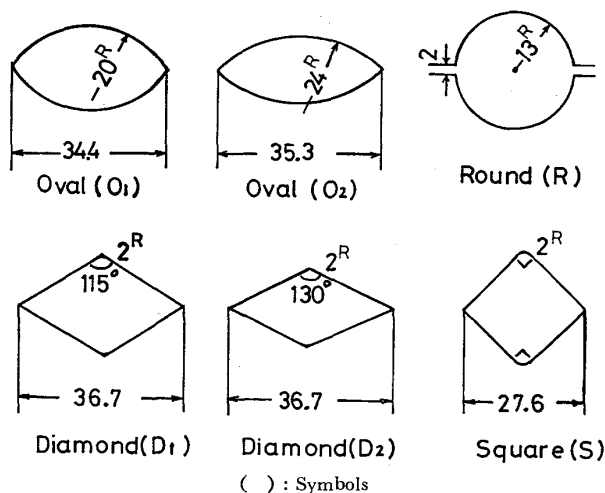


Fig. 1. Shapes and dimensions of calibers (mm).

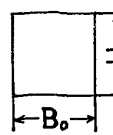
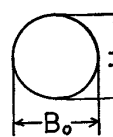
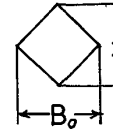
応した圧延条件を Table 1 と Table 2 に分けて示す。圧延温度は 1050°C 一定とし、窒素ガス中で加熱したあと、無潤滑で圧延した。ロール表面は、上下ロールでの圧延状態を同じくするため圧延前に毎回 #400 のエメリー紙で研磨後アセトンで脱脂した。

圧延荷重は上ロールチャックと圧下スクリューの間にひずみゲージ式ロードセルを駆動側と操作側に設置してストレインメーターで測定した。圧延トルクは下スピンドルにひずみゲージを貼布し、スリップリングを通してストレインメーターで測定した。

昭和 54 年 5 月・11 月塑性加工学会講演会にて発表 昭和 60 年 5 月 15 日受付 (Received May 15, 1985)

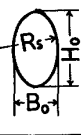
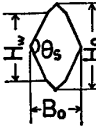
* (株)富士電機総合研究所 (Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd., 2-2-1 Nagasaka Yokosuka 240-01)

Table 1. Rolling conditions in Square-Oval, Round-Oval, and Square-Diamond passes.

		(mm)	
Billet	Caliber	O ₁	O ₂
	B ₀	22~25	19~28
	H ₀		
	G ₀	0~1	0~3.5
	r (%)	0~32	0~45
	B ₀	22~28	22~28
	H ₀		
	G ₀	0~2	0~2
	r (%)	0~27	0~38
	Billet	D ₁	D ₂
	B ₀	27~34	27~34
	H ₀		
	G ₀	0~3	0~2
r (%)	0~26	0~37	

r: Reduction in area G₀: Roll gap

Table 2. Rolling conditions in Oval-Square, Oval-Oval, Oval-Round, Diamond-Diamond and Diamond-Square passes.

		(mm)			
Billet	Caliber	S	O ₁	O ₂	R
	B ₀	15~21	20~22	15~21	15~23
	H ₀	27~37	25~28	22~34	28~35
	R _s	20, 24	20	20, 24	20, 24
	G ₀	0~1	0~1	0~3	1, 2
	r (%)	15~35	16~24	24~45	5~15
	Billet	D ₁	D ₂	S	
	B ₀	15~26	14~24	17~28	
	H ₀	25~45	21~40	28~49	
	H _w	13~45	12~40	18~49	
	θ _s (rad)	20, 21, 23	20, 21, 23	21, 23	
	G ₀	0	0	0~5	
	r (%)	2~37	12~37	2~31	

G₀: Roll gap r: Reduction in area

3. 実験結果及び数式化

3.1 圧延荷重

圧延荷重 P は一般に圧延荷重係数 Q と投影接触面積 F_d 及び平均変形抵抗 K_{fm} との積すなわち $P=Q \cdot F_d \cdot K_{fm}$ で表される。板圧延の場合には Q と F_d は理論式が、 K_{fm} は実験式が一応確立されているが、孔型圧延の場合には材料の変形が複雑であるため十分には確立されていない。そこで本研究ではまず F_d の新しい計算法を考案し、次に矩形換算法による K_{fm} の計算法を検討した。さらにこれらの計算値と P の実測値とから Q

を逆算して、 Q の数式化を試みた。

3.1.1 投影接触面積

周知のごとく板圧延の場合には投影接触長が幅方向に一樣であるため、投影接触面積 F_d は簡単に $F_d=(\text{平均接触幅}) \times (\text{投影接触長})$ から求められる。しかし、孔型圧延の場合には投影接触長が幅方向に分布しているために容易に得られない。厳密には投影接触長の分布を幾何学的に求め、それを積分する方法(積分法)があるが、計算がかなり面倒である。そこで簡単化のため、投影接触長の分布が圧延方式によつて特徴のある類似のパターンを示すことに着目し、Fig. 2(b)~Fig. 7(b) の点領域が示すようにその形状をパターン化し、各圧延固有の簡単な数式モデルを開発することにした。これは著者らが本研究の前に行つたプラスチックや鉛の棒による噛み止めモデル圧延実験から得られた知見に基づくものである。この方法であれば、投影接触面積が上述の積分法よりも簡便に求められるので、計算の手間が大幅に省ける。本法に基づいて各圧延方式の投影接触長 L_d の分布及び投影接触面積 F_d を求めると次のようになる。

(1) 角→オーバル (S→O) 圧延

Fig. 2(b) に投影接触面を示す。 L_d の分布は凹型となり、中央のわん曲部は余弦曲線で、両側の曲線はゆるやかなので、直線で近似される。図中の L_{dx} は角棒材の両側での最大投影接触長、 L_{dc} は幅中央での投影接触長であり、それぞれ次の式で求められる。

$$L_{dx} = \sqrt{\left(R_0 + \frac{G_0 - H_B}{2}\right)(H_0 - H_B)} \dots\dots\dots (1)$$

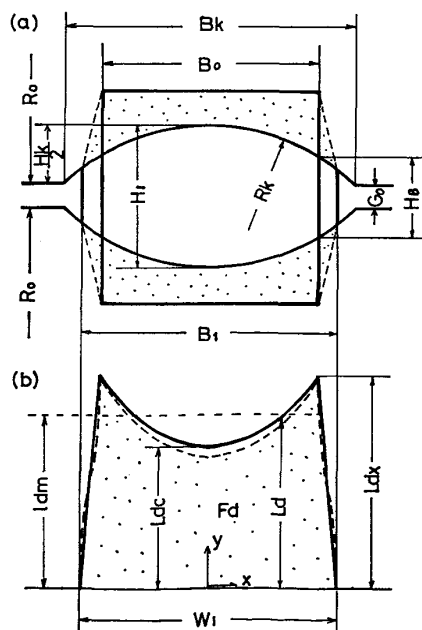


Fig. 2. Geometrical designations in Square-Oval pass (a) and shape of projected contact area (b).

ここに $H_B = 2 \left(\sqrt{R_k^2 - \frac{B_0^2}{4}} - R_k + \frac{H_1}{2} \right)$
 $L_{dc} = \sqrt{\left(R_0 - \frac{H_k}{2} \right) (H_0 - H_1)} \dots \dots \dots (2)$

(1) と (2) 式を用い、 L_d の分布を図中の x - y 座標で表すと次のようになる。

$|x| \leq \frac{B_0}{2}$ では、
 $L_d = L_{dx} - (L_{dx} - L_{dc}) \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{B_0}\right) \dots \dots \dots (3)$

$\frac{B_0}{2} < x \leq \frac{W_1}{2}$ では、
 $L_d = 2 \cdot L_{dx} \cdot \left(\frac{B_1}{2} - x \right) / (B_1 - B_0) \dots \dots \dots (4)$

ただし、実際の中央わん曲部は破線のように、(3)式で幾何学的に決まる曲線よりも内側に片寄る。これは圧延材がロールによつて圧下を受け、その上下面が孔型の奥へ少し入りこむためである。

なお、(4)式において W_1 は B_1 と同値であり、 B_1 は前報¹⁾の幅広がり式から計算され、下記の B_1 もすべて同様である。

(2) 丸→オーバル (R→O) 圧延

この圧延では L_d の分布は Fig. 3(b) に示すごとく単調な凸型となるので、半楕円で近似できる。すなわち、

$L_d = L_{dx} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot x^2}{W_1^2}} \dots \dots \dots (5)$

(3) 角→ダイヤ (S→D) 圧延

Fig. 4(b) に示すように、 L_d の分布は余弦曲線で示

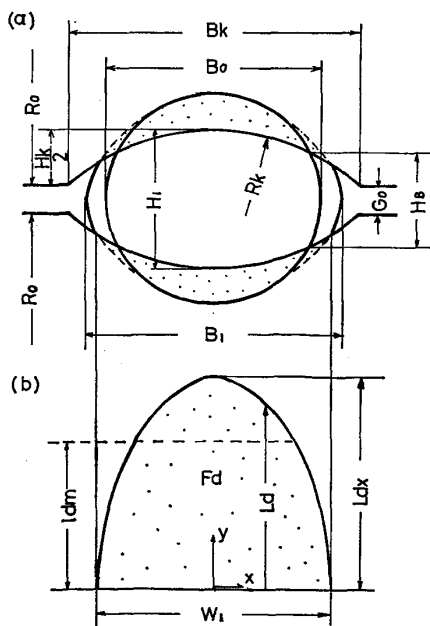


Fig. 3. Geometrical designations in Round-Oval pass (a) and shape of projected contact area (b).

される。

$L_d = \frac{2}{\pi} \cdot L_{dx} \cdot \cos^{-1}\left(\frac{2 \cdot x}{W_1}\right) \dots \dots \dots (6)$

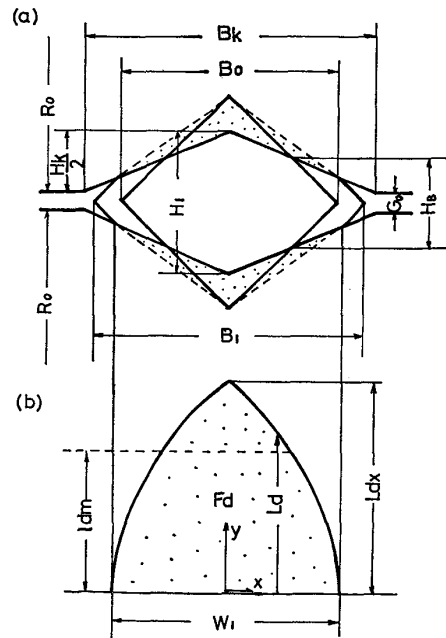


Fig. 4. Geometrical designations in Square-Diamond pass (a) and shape of projected contact area (b).

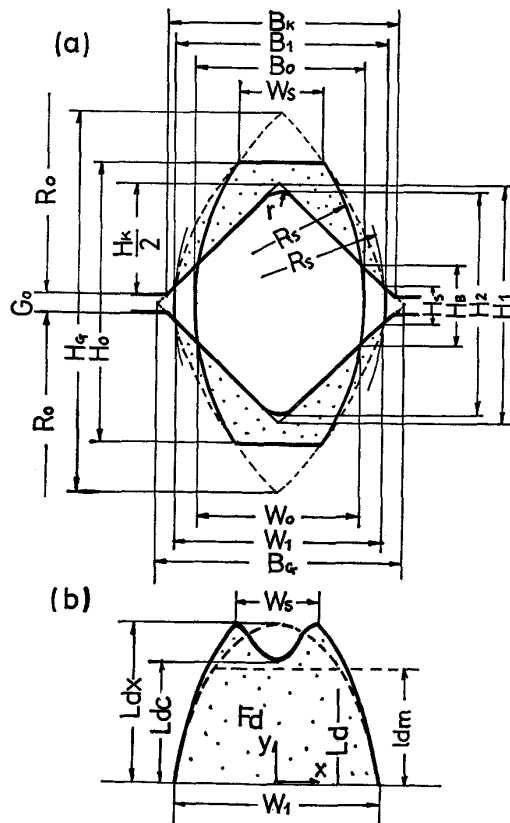


Fig. 5. Geometrical designations in Oval-Square pass (a) and shape of projected contact area (b).

(4) オーバル→角 (O→S) 圧延

Fig. 5(b) に示すごとく、一般には凹型となるが、これを図の破線で示すように半楕円に便宜上、形状変換して(7)式のような数式化を行つた。これにより、計算はかなり簡便になる。

$$L_d = L_{dx} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot x^2}{W_1^2}} \dots\dots\dots (7)$$

(5) ダイヤ→ダイヤ (D→D) 圧延

Fig. 6(b) に示すように凸型となるが、三角形に近いので、半楕円よりも余弦曲線で表した方が一般的により近似を与える。

$$L_d = \frac{2}{\pi} \cdot L_{dx} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{2 \cdot x}{W_1} \right) \dots\dots\dots (8)$$

(6) オーバル→オーバル (O→O) 圧延

Fig. 7(b) に示すごとく凸型となるので、半楕円で近似できる。L_dの分布はO→Sと同様次ようになる。

$$L_d = L_{dx} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot x^2}{W_1^2}} \dots\dots\dots (9)$$

以上の L_d をそれぞれ積分すれば、各圧延方式の投影接触面積 F_d は次のように得られる。

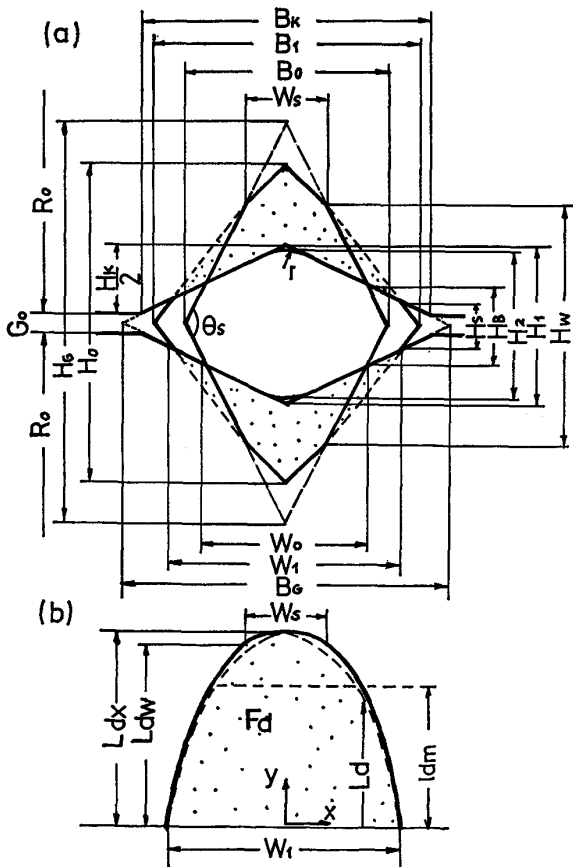


Fig. 6. Geometrical designations in Diamond-Diamond pass (a) and shape of projected contact area (b).

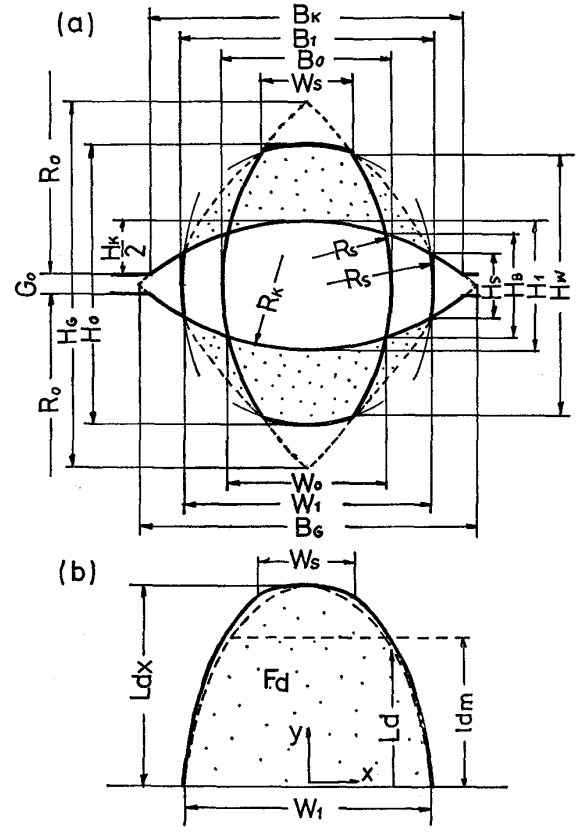


Fig. 7. Geometrical designations in Oval-Oval pass (a) and shape projected contact area (b).

S→O では

$$F_d = \int_{-B_0/2}^{B_0/2} \left\{ L_{dx} - (L_{dx} - L_{dc}) \cos \left(\frac{\pi x}{B_0} \right) \right\} dx + 2 \int_{B_0/2}^{B_1/2} \left\{ 2 \cdot L_{dx} \cdot \left(\frac{B_1}{2} - x \right) \right\} / (B_1 - B_0) dx = \frac{B_0 + B_1}{2} \cdot L_{dx} - \frac{2}{\pi} \cdot B_0 \cdot (L_{dx} - L_{dc}) \dots\dots (10)$$

R→O, O→S, O→O では

$$F_d = \int_{-W_1/2}^{W_1/2} \left(L_{dx} \cdot \sqrt{1 - \frac{4x^2}{W_1^2}} \right) dx = \frac{\pi}{4} \cdot W_1 \cdot L_{dx} \dots\dots\dots (11)$$

S→D と D→D では

$$F_d = \int_{-W_1/2}^{W_1/2} \frac{2}{\pi} \cdot L_{dx} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{2x}{W_1} \right) dx = \frac{2}{\pi} W_1 \cdot L_{dx} \dots\dots\dots (12)$$

Table 3 は KHAIKIN⁵⁾ や ARNOLD⁶⁾ らの類似の計算式と比較したものであるが、S→D や D→D では著者らの式とよく似た形となつている。

3.1.2 平均変形抵抗

周知のごとく平均変形抵抗 K_{fm} は一般にひずみ ε, ひずみ速度 ε̇, 温度 T, 鋼材成分 C% 等の関数で表される。板圧延であれば、ε や ε̇ が幅方向で一様に分布しているため、K_{fm} の計算は可能であるが、孔型圧延の場合

Table 3. Comparison of some formulae for predicting projected contact area (F_d).

	Present work	KHAIKIN	ARNOLD
S→O	$\frac{B_0+B_1}{2}L_{dx} - \frac{2}{\pi} \times B_0(L_{dx}-L_{dc})$	$0.54(B_0+B_1)L_{dc}$	$\frac{B_0+B_1}{2} \cdot L_{dc}$
O→S	$\frac{\pi}{4} \cdot W_1 \cdot L_{dx}$	$\frac{3}{4} \cdot B_1 \cdot L_{dx}$	—
R→O		—	
O→O		—	
O→R		—	
S→D	$\frac{2}{\pi} \cdot W_1 \cdot L_{dx}$	$\frac{2}{3} \cdot B_1 \cdot L_{dx}$	$\frac{\pi}{4} \cdot B_1 \cdot L_{dx} \cdot 0.85$
D→S			
D→D			

合には一様でないためにこの取扱いが問題となる。ここでは簡便性と汎用性を重視して各圧延方式に共通の数式化を図るため、平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ と平均ひずみ速度 $\bar{\dot{\epsilon}}$ を用いることにした。 $\bar{\epsilon}$ として $\bar{\epsilon} = \ln(\bar{H}_0/\bar{H}_1)$ も提案されている⁹⁾がここでは次式²⁾を採用した。

$$\bar{\epsilon} = \ln \frac{F_0}{F_0 - F_H} \dots\dots\dots (13)$$

ここに F_0 : 入側断面積

F_H : 入側断面積が孔型によつて幾何学的に排除される部分の面積 (Fig. 8 参照)。

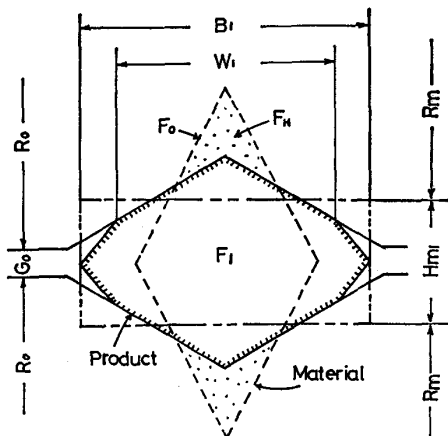
さらに、 $\bar{\dot{\epsilon}}$ は次式を用いた。

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{2\pi \cdot R_m \cdot N \cdot \bar{\epsilon}}{60l_{dm}} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 N はロール回転速度、 R_m は Fig. 8 の矩形換算法で得られる平均ロール半径で次のように求められる。

$$R_m = R_0 - \frac{H_{m1} - G_0}{2} \dots\dots\dots (15)$$

ここに H_{m1} : 平均出側高さ ($\equiv \frac{F_1}{B_1}$)。



F_1 : Cross sectional area of product
 F_H/F_0 : Fractional reduction of area

Fig. 8. Equivalent rectangular transformation method to determine mean roll radius (R_m).

また、 l_{dm} の定義は次のとおりで、Fig. 2(b)~7(b)に図示されている。

$$l_{dm} \equiv F_d/W_1 \dots\dots\dots (16)$$

次に問題となるのは K_{fm} の計算式である。あらゆる合金鋼で数式化されているのが望ましいが、現在数式化されているのは主に炭素鋼⁹⁾¹⁰⁾である。本研究では圧延条件が $\bar{\epsilon} = 0.09 \sim 0.7$ 、 $\bar{\dot{\epsilon}} = 0.4 \sim 3 s^{-1}$ 、 $T = 1050^\circ C$ 、 $C = 0.2\%$ であったので、次の志田の式⁹⁾を用いた。

$$K_{fm} = \sigma_f \cdot f_m \cdot \left(\frac{\bar{\dot{\epsilon}}}{10}\right)^m \dots\dots\dots (17)$$

ただし、 σ_f 、 f_m 、 m は C 、 T 、 ϵ の関数である。

3.1.3 圧延荷重係数

前述の圧延荷重式 $P = Q \cdot F_d \cdot K_{fm}$ において、 P に実測値を、 F_d に Table 3 に示した式の計算値、 K_{fm} に (17) 式の計算値を代入すると圧延荷重係数 Q が得られる。この Q については斎藤⁹⁾がロール間隙比 m を用いて整理し、数式化を行つているが、種々の圧延方式によつて数式の係数が異なつている。ここでは計算精度を多少犠牲にしても、どの圧延方式にも使える汎用的な数式化を配慮した。すなわち、投影接触幅 W_1 や投影接触面積 F_d の求め方、並びに矩形換算法を工夫し、さらに PAWELSKI¹¹⁾らが提唱しているようなロール間隙面積比 M を導入した。この M は次の式で定義される。

$$M \equiv \frac{F_d}{F_M} \equiv \frac{2F_d}{F_0 + F_1} \dots\dots\dots (18)$$

この M と上述の Q との関係は Fig. 9 に示すとおりであり、 Q は各圧延方式で統一的に整理できること

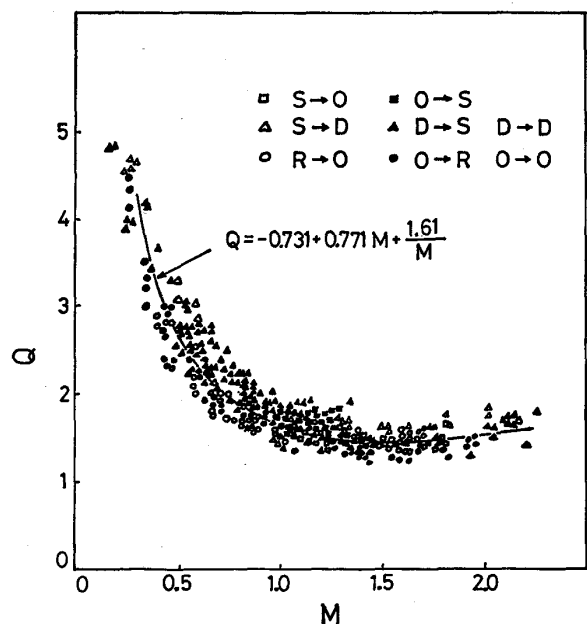


Fig. 9. Relation between M and Q in eight passes.

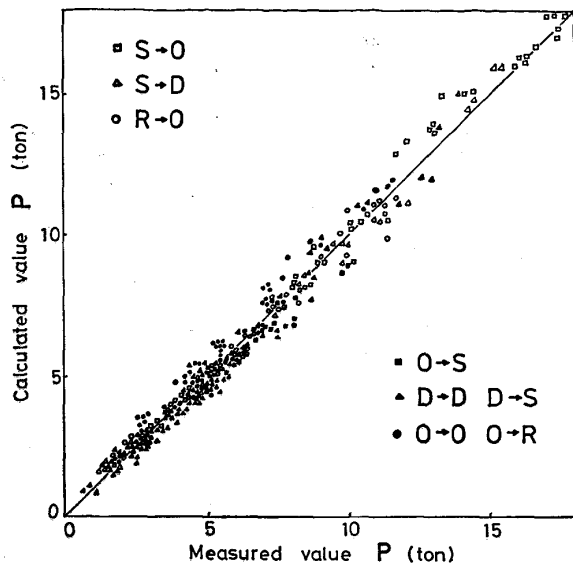


Fig. 10. Comparison of measured and calculated values of rolling force P .

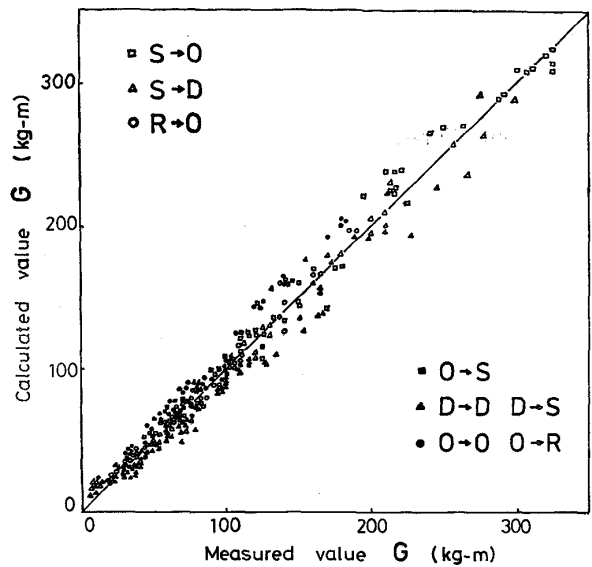


Fig. 12. Comparison of measured and calculated values of rolling torque G .

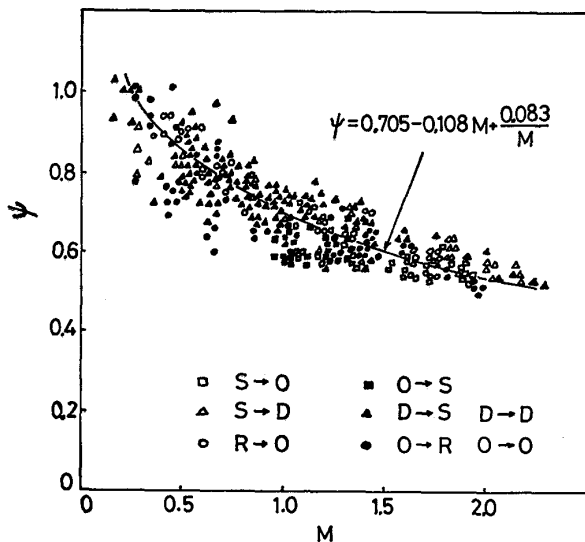


Fig. 11. Relation between M and ψ in eight passes.

が分かった。 Q と M の関係を $Q = a + bM + cM^{-1}$ の形で表し、定数 a, b, c を回帰分析で求めた結果、次のようになった。

$$Q = -0.731 + 0.771M + \frac{1.61}{M} \dots \dots \dots (19)$$

以上より圧延荷重 P は簡便に計算される。本研究での実測値と計算値を比較した結果を Fig. 10 に示す。

3.2 圧延トルク

ロール1本当たりの圧延トルク G は一般に圧延荷重 P とトルクアーム l_a の積すなわち $G = P \cdot l_a$ で与えられる。 P は上述の式から求められるが、問題は l_a である。板圧延であれば、 l_a は幅方向に一様に分布するの

で、理論的に求められる。しかし、孔型圧延では Fig. 2~Fig. 7 に示したように投影接触長 L_d が幅方向に分布しているために l_a もそれに応じて分布しているはずである。ここでは簡単化のため、 L_d の分布の代わりに(16)式の平均投影接触長 l_{dm} を採用して l_a を求めることにした。すなわち

$$l_a = \psi \cdot l_{dm} \dots \dots \dots (20)$$

ここに ψ はトルクアーム係数である。

ψ の数式化を種々検討したが、結局 Fig. 11 に示すように前述のパラメーター M で整理するのが最も簡便で汎用的であることが分かった。ただし、 M の小さい範囲ではかなりばらつきがみられるが、これは圧延方式のちがいで以外に $O \rightarrow R$ と $D \rightarrow D$ の軽圧下での測定誤差が効いているものと思われる。

Q と同様の形で ψ を M の回帰式で表したのが次の式である。

$$\psi = 0.705 - 0.108M + \frac{0.083}{M} \dots \dots \dots (21)$$

以上より圧延トルク G は圧延荷重 P を用いて容易に計算される。 P と同じように計算値と実測値を比較した結果を Fig. 12 に示す。

4. あとがき

線材棒鋼圧延の代表的圧延方式8種について、軟鋼棒の熱間圧延実験を行って、負荷特性(圧延荷重とトルク)の統一の数式化を試み、次の結果を得た。

投影接触面の形状は $S \rightarrow O$ では凹型で余弦曲線と直線、 $R \rightarrow O$ と $O \rightarrow O$ では凸型で半楕円、 $S \rightarrow D$ と $D \rightarrow$

D では凸型で余弦曲線により近似される。O→S では凹型となるが、半楕円に形状変換して近似できる。これらの近似により三つの簡便な投影接触面積計算式が提案された。さらに矩形換算法による平均変形抵抗の計算とロール間隙面積比 M の導入により圧延荷重係数 Q とトルクアーム係数 ϕ が全圧延方式について統一的に M の関数で表され、圧延荷重とトルクが簡便に計算できるようになった。

文 献

- 1) 篠倉恒樹, 高井耕一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2477
- 2) 斎藤好弘, 高橋洋一, 加藤健三: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 250

- 3) 柳本左門, 青木 至: 日本機械学会論文集, 33 (1967), p. 826
- 4) M. PIETRZYK: J. Mech. Working Tech., 10 (1984), p. 67
- 5) B. E. KHAIKIN, I. A. KISILENKO and I. Y. TARNOVSKI: Steel USSR (1971) Nov., p. 884
- 6) R. R. ARNOLD and P. W. WHITTON: Met. Technol. (1975) Mar., p. 143
- 7) A. HENSEL and E. KUNZMANN: Der Kalibreur (1977) 26, p. 3
- 8) 斎藤好弘, 高橋洋一, 森賀幹夫, 加藤健三: 塑性と加工, 24 (1983-10), p. 1070
- 9) 志田 茂: 日立評論, 52 (1970), p. 731
- 10) 美坂佳助, 吉本友吉: 塑性と加工, 8 (1967-8), p. 414
- 11) O. PAWELSKI and E. NEUSCHÜTZ: Stahl Eisen, 86 (1966), p. 1375