

# 水冷によってロールに発生する熱応力

## Thermal Stress Induced in the Rolls by Water Cooling

河原 英 磨\* 関 本 靖 裕\*\*  
 Hidemaro Kawahara Yasuhiro Sekimoto

### 内 容 梗 概

熱間圧延においてはほとんどのロールは水冷して使用されている。その場合ロール内部の不均一な温度分布によって熱応力が発生する。この熱応力を検討するために円柱形試験棒に熱応力を生じさせた抗折実験を行ない、さらに圧延中ロール表面に発生する熱応力を算出した。その結果、水冷によって生ずる熱応力はロールの使用温度あるいは水冷条件によってかなり高い値となりうるということが明らかになり、圧延圧力に基づく曲げ応力と重畳してロール表面に発生する深いき裂あるいはロールの折損などの事故を起こす原因となりうると思われる。

### 1. 緒 言

圧延中のロールの事故は鋼材の生産量を低下せしめるとともにロールの使用原単価を高めるので、極力事故を未然に防ぎロールの使用寿命を伸ばすことが必要である。そのためには使用中のロールの状況を熟知して、ロールメーカーおよび使用者が協力して各圧延方式にもっとも適したロールを選び、かつ適切に使用することが必要である。

鋼板の熱間圧延におけるロールの事故として、折損、チルはげ、き裂、ファイヤクラック、摩耗、およびロールウォブラー欠損などがある。これらの事故を防止するためにはまず圧延中のロールの力学的、熱的状态およびロール自体の諸性質を知る必要がある。

熱間圧延においてはロールの最表面は圧延材と接触している間かなり高温に加熱され、その後圧延材と離れると冷却水によって冷却されるという繰り返し加熱冷却を受ける<sup>(1)</sup>。そのためにロールの温度は圧延時間の経過とともに漸次上昇し、やがては定常状態になる。このときの温度をロール使用温度と呼んでいる。その場合、熱的条件の過酷な圧延機においては急激な加熱冷却の繰り返しによって、ロール表面に微細なヒートクラックが発生する<sup>(2)</sup>。ロール内部の温度分布が不均一になる場合、たとえば圧延開始直後あるいは圧延終了後においては熱応力が発生する。また、圧延作業中においてロールの温度が定常になっても圧延材の品種変更あるいは均熱炉内の圧延材熱上げのために圧延が小休止するとき、ロール表面は水冷されるのでロールの表面温度が漸次低下し、熱応力が発生する。二重圧延機の粗スタンドあるいは分塊圧延機においては、このような状況のもとで圧延が再開されると圧延荷重によって生ずる曲げ応力が上述の熱応力に追加されて、き裂あるいは折損などの事故が発生するものと考えられる。圧延荷重によってロール表面に生ずる曲げ応力は各圧延機の圧延スケジュールによってあらかじめ検討されたうえ、そのスタンドの荷重に十分耐えうるロールが使用される。したがって正常な圧延が行なわれている場合は曲げ応力のみによってき裂が発生するとは考えられない。それゆえ、圧延休止中水冷されたことによって生じた熱応力が深いき裂の発生に影響したのではないかと考えられる。すなわち、圧延途上の小休止によってロール表面に軸方向の引張熱応力が生じているとき圧延が再開

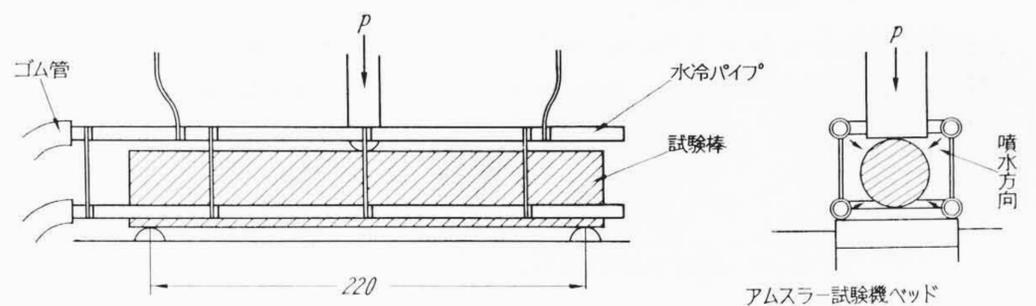
されると、さらにロール表面に曲げによる引張応力が重畳され、その高い引張応力が表面の微細なヒートクラックをさらに伝播(でんぱ)せしめて深いき裂となるのではないかと推論される。この深いき裂はロールの異常切削の直接の原因となり、ロールの使用寿命を著しく縮める。また場合によってはき裂がもとになって胴折れ事故が発生することも考えられる。

本論文は上に述べたように圧延中の小休止の際にロール表面に生ずる熱応力について検討したものである。そのために、まず円柱形試験棒に熱応力を生じさせてその値を検討し、さらに抗折実験によって熱応力と曲げ応力が材料の破壊にいかに関与するかを調査した。次に、圧延小休止中水冷によって生ずる熱応力がロールの使用温度および水冷条件によっていかなる値をとるかを明らかにし、ロール表面に発生する深いき裂の発生原因を考察し、さらにその対策についても検討した。この拙稿が関係諸氏のご理解を得てロールの寿命、ひいては鋼材の生産性の向上に役立てば筆者らの望外の喜びである。

### 2. 熱応力を伴った抗折実験

#### 2.1 実験方法

直径 50 mmφ、長さ 230 mm の丸棒をあらかじめ電気炉で所定の温度に加熱したのち、アムスラー式万能試験機で水冷しながら抗折



第1図 実験方法

第1表 実験結果

実験番号	曲げ荷重 (kg)	実験条件	結果	$\sigma_{Bend}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{Th}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_z = \sigma_{Bend} + \sigma_{Th}$
1	9,800	常温曲げ試験	折損荷重値	44	0	44
2	8,000	330℃加熱後水冷	水冷開始後3秒で折損	36	12	48
3	7,000	330℃加熱後水冷	水冷開始後6秒で折損	31	13	44
4	6,000	330℃加熱後水冷	水冷開始後7秒で折損	27	13	40
5	5,500	330℃加熱後水冷	折損せず	25	13	38
6	8,250	330℃加熱後空冷曲げ試験	折損荷重値	37	1	38
7	10,350	230℃加熱後空冷曲げ試験	折損荷重値	46	1	47
8	8,000	230℃加熱後水冷	水冷開始後5秒で折損	36	8	44
9	7,000	230℃加熱後水冷	折損せず	31	8	39
10	7,500	230℃加熱後水冷	折損せず	33	8	41
11	8,000	230℃加熱後水冷	水冷開始後3秒で折損	36	8	44

\* 日立金属工業株式会社若松工場 工博

\*\* 日立金属工業株式会社若松工場

実験を行なった。その場合、まず水冷しないで抗折実験を行なってあらかじめ試験棒の抗折荷重を求めておき、そのあと荷重を抗折荷重より漸次下げて水冷を行ない、熱応力と曲げ応力の抗折破壊に及ぼす影響を調査した。熱応力は試験棒内部の温度分布を熱電対によって測定し、その結果から算出した。

第1図に実験方法を示す。均一な温度に加熱された試験棒を試験機に取り付け、所定の荷重  $P$  を加えたのち水冷を行ない、冷却開始後屈折までの時間を測定した。

2.2 実験結果

前項で述べた実験方法に従って行なった実験結果を第1表左欄に示す。試験棒の予備加熱温度を  $330^{\circ}\text{C}$  と  $230^{\circ}\text{C}$  の二段階にとった。水冷条件はすべての実験について同じになるよう (ゲージ圧  $0.5$  気圧) 特に留意した。加熱された試験棒を電気炉からとり出して試験機にのせ、所定の荷重を加えて水冷を開始するが、その間の所要時間は約1分30秒であった。したがって、この実験を行なう前に予備実験として、試験棒を電気炉から引き出したあと空冷および水冷した場合の試験棒内部の温度分布を測定し、それによって生ずる熱応力を検討する必要がある。これについては次項で述べる。

第1表の実験結果によれば、試験棒の曲げ折損に要する荷重は約  $10\text{ t}$  であるが、 $330^{\circ}\text{C}$  に予備加熱した試験棒を水冷すれば  $6\text{ t}$ 、 $230^{\circ}\text{C}$  の場合は  $8\text{ t}$  で折損していることがわかる。これは明らかに試験棒内部に生じた不均一な温度分布による熱応力の影響によるものである。これらの点について次項で定量的に検討してみよう。

2.3 実験結果の検討

2.3.1 温度分布

試験棒内部の温度分布を測定するために試料の軸端面から熱電対をそう入した。測定位置は試験棒表面から  $5\text{ mm}$  内部、 $10\text{ mm}$  内部および中心軸上の3点であった。表面温度は次のようにして求めた。

試験棒を無限長円柱とし、初期温度分布を一定と仮定したとき表面から熱放散によって冷却される場合の熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $\theta$  : 温度 (外気あるいは冷却水の温度との差をとる)  
 $t$  : 時間  
 $k$  : 温度伝導度

初期条件として  $t=0$  で  $\theta=\theta_0$ 、境界条件として  $r=a$  (試験棒の半径) において  $\partial\theta/\partial r = -h\theta$ 。なお  $h=H/K$  で  $H$  は熱伝達係数、 $K$  は熱伝導率である。(1)式の解は次式で与えられる<sup>(3)</sup>。

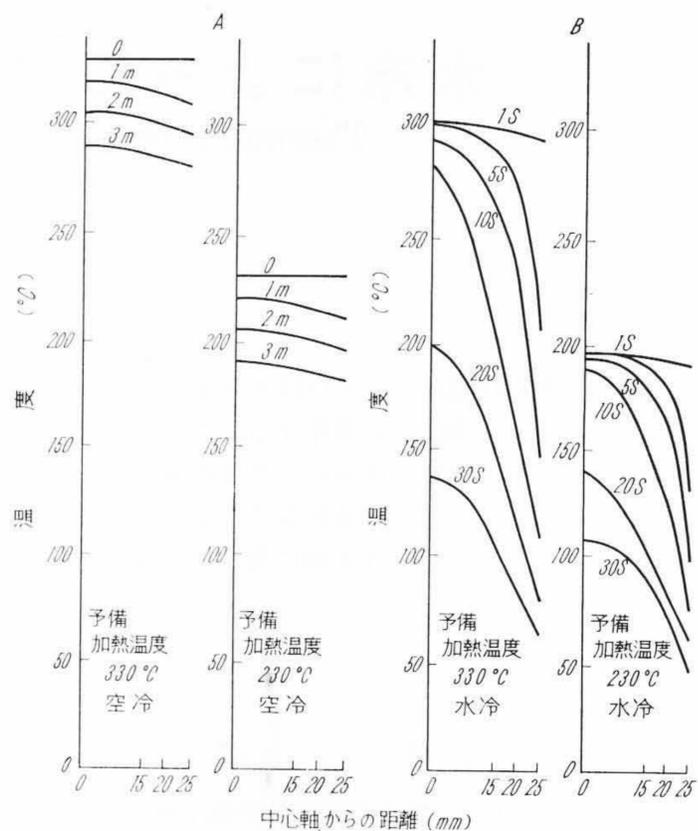
$$\theta = \frac{2\theta_0}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2 e^{-\frac{\lambda_n^2 kt}{a^2}} J_0\left(\frac{\lambda_n r}{a}\right)}{(h^2 a^2 + \lambda_n^2) \{J_0(\lambda_n)\}^2} \int_0^a J_0\left(\frac{\lambda_n \rho}{a}\right) \rho d\rho \dots \dots \dots (2)$$

ここに  $\lambda_n$  は  $xJ_1(x) - haJ_0(x) = 0$  の第  $n$  番目の正根である。 $J_0$ 、 $J_1$  はそれぞれ第1種0次および一次の Bessel 関数である。(2)式から表面温度  $\theta_s$  と中心温度  $\theta_c$  を求めると次式のようになる。

$$\theta_s = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(\lambda_n)J_1(\lambda_n)}{\lambda_n \{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)\}} e^{-\frac{\lambda_n^2 kt}{a^2}} = \theta_0 f\left(ha, \frac{k}{a^2} t\right) \dots \dots \dots (3)$$

$$\theta_c = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\lambda_n)}{\lambda_n \{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)\}} e^{-\frac{\lambda_n^2 kt}{a^2}} = \theta_0 g\left(ha, \frac{k}{a^2} t\right) \dots \dots \dots (4)$$

(4)式において  $ha$  をパラメーターとして  $g$  の値を計算しておき、試験棒の中心軸上の測定値と一致するような  $ha$  を求め、そ



第2図 試験棒内部の温度分布

の値を用いて(3)式から表面温度を算出した。

空冷の場合の試験棒内部の温度分布を第2図Aに示す。○点は測定値で、●点は上述の方法で算出した値である。図中の数値は経過時間を示す。水冷時の温度分布については、空冷時の温度分布が第2図Aに示したようにほとんど均一とみなしうるので、初期温度分布を均一と考え空冷時の場合とまったく同様な方法で試験棒内部の温度分布を求めた。第2図Bにその結果を示す。この実験における熱伝達係数は、空冷の場合は  $40\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、水冷の場合は  $4,000\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$  であった。

2.3.2 熱 応 力

第2図に示すような軸対称の温度分布が試験棒内部に生ずるとき当然熱応力が発生する。この実験で問題となるのは軸方向の熱応力で、この場合試験棒表面に最大引張力が発生し、その応力は次式で与えられる<sup>(4)</sup>。

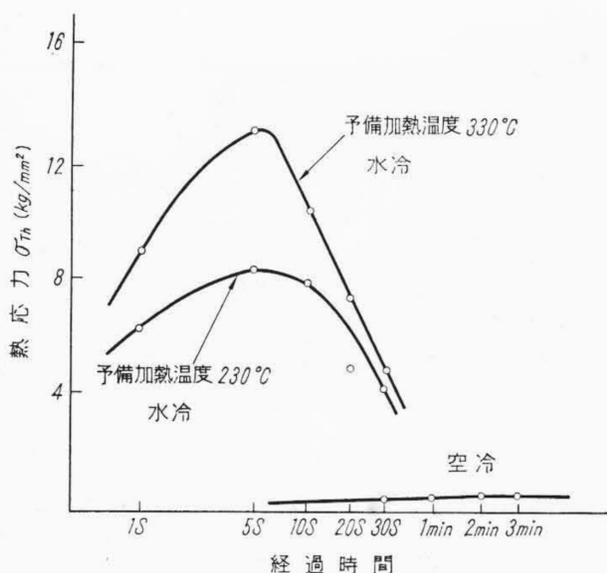
$$\sigma_{Th} = \frac{m\alpha E}{m-1} \left\{ \frac{2}{a^2} \int_0^a \theta(r)r dr - \theta(a) \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここに  $\sigma_{Th}$  : 円柱表面に発生する軸方向の熱応力 ( $\text{kg/mm}^2$ )  
 $1/m$  : ポアソン比  
 $\alpha$  : 材料の熱膨張係数 ( $\text{mm/mm}^{\circ}\text{C}$ )  
 $E$  : 材料の弾性係数 ( $\text{kg/mm}^2$ )  
 $a$  : 試験棒の半径 (mm)  
 $\theta(r)$  : ある時刻における温度分布 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\theta(a)$  : ある時刻における円柱表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

各定数の値として  $1/m=1/3$ 、 $E=0.9 \times 10^4\text{ kg/mm}^2$ 、 $\alpha=1.0 \times 10^{-5}\text{ mm/mm}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、 $a=25\text{ mm}$ 、 $\theta(r)$  および  $\theta(a)$  には第2図の値を用いた。第3図に試験棒を  $330^{\circ}\text{C}$  および  $230^{\circ}\text{C}$  に加熱した後、空冷あるいは水冷したときの試験棒表面に発生する  $\sigma_{Th}$  の値を示す。空冷の場合の  $\sigma_{Th}$  は加熱温度によってそれほど差はなく、 $0.5\text{ kg/mm}^2$  程度となる。水冷の場合の  $\sigma_{Th}$  は水冷が開始されるや急激に大きくなり、5秒も経過すれば最大値を示し、その値は初期温度が  $330^{\circ}\text{C}$  の場合は  $13\text{ kg/mm}^2$ 、 $230^{\circ}\text{C}$  の場合は  $8\text{ kg/mm}^2$  程度になることが明らかになった。

2.3.3 曲 げ 応 力

第1図に示したようなはりの中央に集中荷重が働くとき、その点に最大曲げモーメントが作用し、はりの最下層に最大引張応力が発生する。その応力は次式で与えられる<sup>(5)</sup>。



第3図 試験棒表面に発生する熱応力

$$\sigma_{Bend} = M/Z \dots\dots\dots (6)$$

ここに  $\sigma_{Bend}$ : 最大引張応力 (kg/mm<sup>2</sup>)  
 $M$ : 最大曲げモーメント (kg・mm)  
 $Z$ : 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

この実験の円柱形試験棒の場合  $M=Pl/4$ ,  $Z=\pi d^3/32$  となる。 $P$ は集中荷重(kg),  $l$ はスパンの長さ(mm),  $d$ は試験棒の直径(mm)である。この実験に用いた試験棒の折損荷重は第1表の実験結果からわかるように約10tとみなしうる。試験棒の中央最下端に発生する応力を $\sigma_z$ とすれば、試験棒が曲げ応力のみで折損するときの $\sigma_z$ は $\sigma_z = \sigma_{Bend} \approx 44 \text{ kg/mm}^2$ となる。

2.3.4 結果の検討

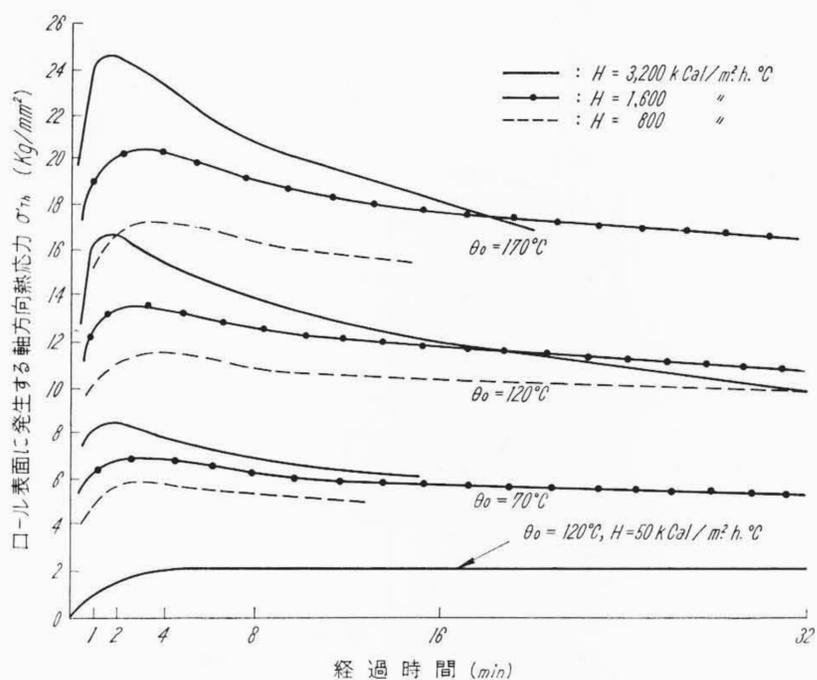
第1表左欄の実験結果について $\sigma_{Bend}$ と $\sigma_{Th}$ を求めてみると第1表右欄に示す値となる。これらの値をみると $\sigma_{Bend}$ と $\sigma_{Th}$ の和が材料の抗折応力に達すれば試験棒が折損することが認められる。中には抗折応力に達しないで折損したもの(No. 4, 6)があったが、破断面を観察すると鑄巣がかなり認められた。また、高い $\sigma_z$ で折損したものもあるが、これらは材料の抗折力に差があったものと考えられる。さらに誤差の他の原因として、荷重が正確に加わっていたか、あるいは冷却条件が一定であったかなどの点が考えられる。なお、この実験に用いた試験棒はチルドロール材から成形したもので、ほとんど降伏点が認められないもろい材料である。

熱応力を実測することはほとんど不可能で、もっぱら理論的な計算によって求めるほかはない。そしてその結果を立証することのできる例はそれほど多くはない。この実験においては熱応力を伴った抗折実験を行なったが、その結果、熱応力についてはそのもとなる温度分布が正しく与えられ、対象とする物体の形状に合致した応力計算を行えばその値は実際に正しいということ、また降伏の生じない材料においては熱応力は力学的な曲げ応力に近似的に加算され、材料の破壊に影響することを確認した。

3. 圧延中水冷によってロールに発生する熱応力

圧延中のロール内部の温度は圧延開始後漸次上昇し、ある程度時間が経過すればほぼ平衡状態に達する。このような平衡状態に達しても圧延材の品種変更、あるいは均熱炉中の圧延材の熱上げ不十分のためにしばしば圧延が小休止されることがある。そのときはロール表面は水冷されるだけなので、ロールの温度は表面から漸次低下し、ロール表面には軸方向の引張熱応力が発生する。この熱応力について検討してみよう。

水冷によって発生する熱応力が問題となるのは分塊圧延機および鋼板用粗圧延機などのロールの使用温度が高い二重圧延機において



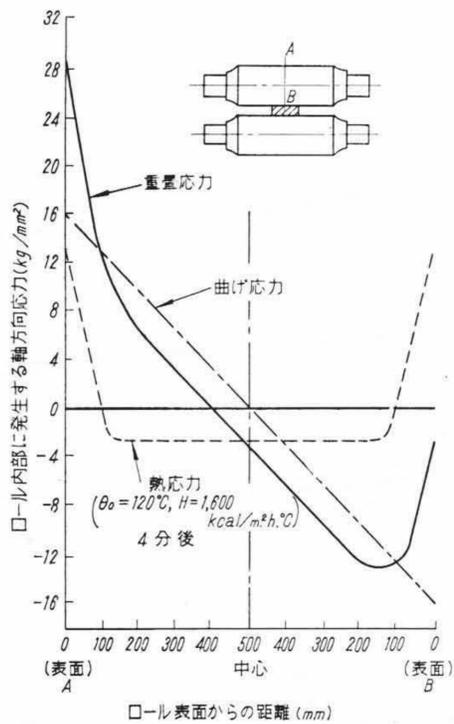
第4図 圧延材通過後ロール表面に発生する軸方向の熱応力

である。ここでは分塊圧延用二重可逆式圧延機のロールを対象とした。この種のロールとしては鋼および鑄鉄系ロールが使用されているが、計算の対象として球状黒鉛鑄鉄ロールを選んだ。ロール直径は1,000 mmφと仮定した。普通の分塊圧延機においては、冷却水はロールの軸方向に設置された2本のパイプから噴射されているが、冷却水はロール全表面積のおよそ半分しかかかっていない。しかも噴射冷却水がロール表面に直接に接触する面積はロール全表面積に比べるとかなり小さく、それ以外のところは冷却水は流れながら接触している。したがってロール表面と冷却水との間の平均的な熱伝達係数は前項の実験の場合よりも小さいものと考えられる。また、そのためにロールの使用温度も高く100°C以上と考えられている。

いまロールの使用温度すなわち初期温度 $\theta_0$ を120°C、熱伝達係数 $H$ を1,600 kcal/m<sup>2</sup>・h・°Cと仮定したときを一応基準にとり、空冷した場合( $H=50 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ )、冷却能力が悪い場合( $H=800 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ )および冷却能力が良い場合( $H=3,200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ )を考えた。さらに初期温度として70°Cと170°Cの場合も考えた。なおロールの熱伝導率を0.06 cal/cm・s・°Cにとった。

上述の各場合におけるロール内部の温度分布を(2)式から求め、(5)式からロール表面に発生する軸方向の熱応力 $\sigma_{Th}$ を計算した。第4図にその結果を示す。すなわち圧延材通過後、水冷によってロール表面に発生する $\sigma_{Th}$ がロールの使用温度あるいは水冷条件によっていかなる値をとるか示したものである。用いた定数は $1/m=1/3$ ,  $E=1.6 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\alpha=1.0 \times 10^{-5} \text{ mm/mm} \cdot \text{°C}$ である。実線は $H=3,200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 、1点鎖線は $H=1,600 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 、破線は $H=800 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ の場合で、各曲線群は $\theta_0=170^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$ および $70^\circ\text{C}$ としたときの値を示す。

第4図の結果からわかるように、圧延材通過後時間の経過とともにロール表面の温度が降下するにつれ、ロール表面に発生する $\sigma_{Th}$ は漸次増加し、最大値をへて緩やかに減少する。 $\sigma_{Th}$ の値は $\theta_0$ が高いほど大きい。 $\sigma_{Th}$ が最大値をとる時刻はロール表面の冷却能力が良いほど左に(短時間側に)移動し、しかも最大値は大きくなる。これは水冷条件がよければ早くロール表面温度が下がり温度こう配が急になるためである。 $H=1,600 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ の場合は圧延材通過後約4分経過したころ $\sigma_{Th}$ は最大値をとり、その値は $\theta_0=70^\circ\text{C}$ のとき7 kg/mm<sup>2</sup>,  $120^\circ\text{C}$ のとき13 kg/mm<sup>2</sup>,  $170^\circ\text{C}$ のとき20 kg/mm<sup>2</sup>程度となる。これに比べて $H=3,200 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ の場合は $\sigma_{Th}$ は小休止後急激に増加し約2分後に最大値となる。その値は $\theta_0=70^\circ\text{C}$ のとき8 kg/mm<sup>2</sup>,  $120^\circ\text{C}$ のとき16 kg/mm<sup>2</sup>,  $170^\circ\text{C}$ のとき24 kg/mm<sup>2</sup>程度となる。 $H=800 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ の場合は約4分後 $\sigma_{Th}$ は



第 5 図 ロール内部に発生する軸方向応力

最大になるが、そのあとは前の二つの場合に比べてややゆるやかに減少する。 $\sigma_{Th}$  の最大値は  $\theta_0 = 70^\circ\text{C}$  のとき  $6 \text{ kg/mm}^2$ 、 $120^\circ\text{C}$  のとき  $11 \text{ kg/mm}^2$ 、 $170^\circ\text{C}$  のとき  $17 \text{ kg/mm}^2$  程度となる。

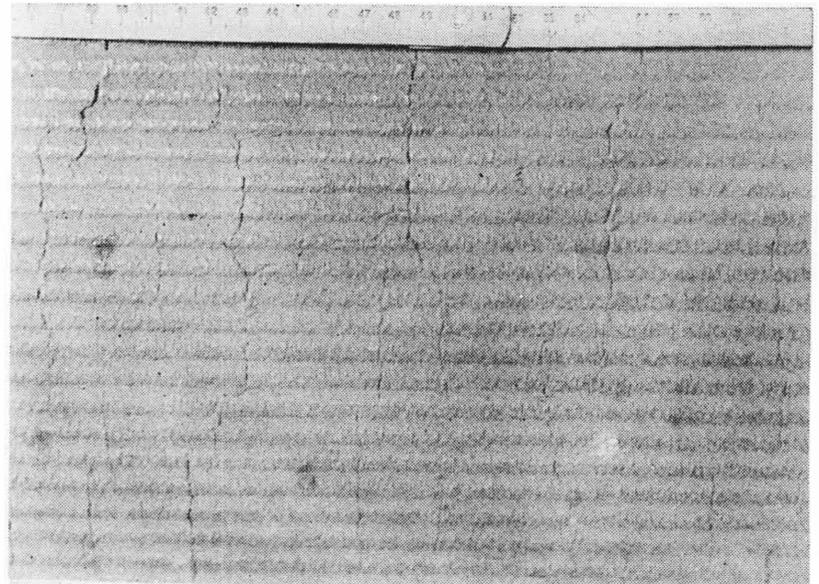
$\theta_0 = 120^\circ\text{C}$ 、 $H = 1,600 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  の場合で圧延材通過後表面の  $\sigma_{Th}$  が最大になるときのロール内部の  $\sigma_{Th}$  分布を第 5 図の中に破線で示す。

#### 4. 圧延中ロール表面に発生する深いき裂について

熱間圧延用ロール表面に円周方向に発達した深いき裂がしばしば発生する。その例として第 6 図に分塊圧延機に使用されたロールの表面状態を示す。このようなき裂は引張応力によるものと考えられる。

ロール表面に作用する引張応力として圧延荷重による曲げ応力と前項で述べた水冷による熱応力がある。曲げ応力のみではき裂の発生が困難であっても、圧延が一時小休止したときロール表面には前項で述べたような熱応力が発生するので、そのとき圧延が再開されると圧延荷重と熱応力が重複され、ロール表面に発生する引張応力はさらに高くなる。第 5 図にその場合のロールに生ずる応力状態を示す。第 5 図の結果から、ロール表面より 10 mm 内部においても  $20 \text{ kg/mm}^2$  以上の引張応力が存在すると推察される。この値は分塊用球状黒鉛鋳鉄ロールの疲労限に近く、この応力の繰り返しによってき裂は表面から 10 mm 内部まで進行しうると考えられる。また、一度使用されたロールの表面には急熱急冷の繰り返しに起因する微細なヒートクラックが存在しているが、このクラックが少し深い場合には上述の応力が応力集中を起こしてさらにクラックが進行するものと考えられる。鋳鉄ロールよりも強度のある鋼ロールについては次のように考えることができる。鋼ロールの弾性係数は鋳鉄ロールに比べて高い値をとる。熱応力は弾性係数に比例するので同じ熱ひずみを生じても、鋼ロールにおいては鋳鉄ロールよりも高い熱応力が発生する。クラックの先端の応力集中係数は鋼の方が鋳鉄に比べて大きいと考えられている。したがって鋼ロールにおいてもクラックの先端は当然危険状態になると考えられる。

上述のようにロール表面付近に生ずる水冷による熱応力と圧延荷重による曲げ応力が深いき裂を発生させる原因と考えられる。曲げ応力は圧延材の圧延スケジュールによって定まったものであるが、熱応力はロールの定常使用温度、水冷条件および圧延休止後の経過



第 6 図 ロール表面に発生したき裂

時間によって変化する。すなわち、前項で述べたようにロールの定常使用温度が高いほど放水冷したときに生ずる熱応力が高く、ロール表面に発生する微細なヒートクラックも激しい。また、圧延休止中の水冷能力がよいほど発生する熱応力が高くなる。このようなときに圧延を再開すればロール表面に深いき裂を発生させる原因となる。あるいは深いき裂がさらに進行して折損事故を起さないとも限らない。したがってロールはできるだけ低い温度で使用するよう心掛けるべきである。そのためには圧延中の水冷を十分行なうことがまず肝心である。不幸にして冷却水量が不十分でロールの温度がかなり高温まで上昇するような場合には、一定状態で圧延を継続すべきであり、圧延の休止ならびに急ピッチの圧延は避けるべきである。万一、圧延休止の事態が起きたならば、ロールの保守から考えて一時水冷を止め、ロール内部の温度こう配をできるだけ小さくし、ロール表面の危険状態を緩和して次の圧延に備えることが望ましいと考えられる。

#### 5. 結 言

- (1) 熱応力を発生させた円柱形試験棒で抗折実験を行ない、対象とする形状に合った応力計算を行なえばその計算結果は正しい、また降伏の生じない材料においては熱ひずみによる熱応力は純力学的な応力に近似的に加算されて材料の破壊に影響を及ぼすことを確かめた。
  - (2) 圧延中、圧延が小休止した場合、ロール表面には水冷によって引張熱応力が発生し、その値はロールの使用温度ならびに水冷条件によって変化することを示した。
  - (3) 熱間圧延におけるロール事故の一つである深いき裂の発生原因を検討した結果、放水冷による熱応力が影響することを示した。さらにその対策についても付言した。
- なお、その後圧延工場において本論文の考え方に基づくと思われるロール事故例の発生をしばしばみたが、それらに対しては末項で述べた対策をとることによって以後事故がなくなったことを付記して本稿の結びとする。

#### 参 考 文 献

- (1) 関本：日立評論 別-42, 43 (昭 36-5)
- (2) 河原：日立評論 33, 793 (昭 26-9)
- (3) 川下：熱伝導論, 201 (昭 19 河出)
- (4) S. T. Timoshenko: Theory of Elasticity, 410 (1951)
- (5) ティモシェンコ：材料力学 (上巻), 52 (昭 30 コロナ社)