

© 1989 ISIJ

論 文

# 中心孔を有する大型バックアップロールの破壊 事故品の応力解析と材料強度評価による検討

宮 沢 賢 二\*

## Discussion by Stress Analysis and Material Strength of Broken Rolls of Large Sized Backup Rolls with a Center Bore

Kenji MIYAZAWA

### Synopsis :

Breaking accidents which started at the center bore face of the journal of large sized backup rolls were experienced. To settle these problems, the working stresses inflicted on the center bore face of the backup roll was analysed by the three-dimensional photoelastic method. The fatigue strength of the test pieces taken from the core part of the journal and the residual stresses were also investigated. The main results obtained are as follows:

- 1) Though the repeated tensile stresses were inflicted on the center bore face of the journal, they were not so large. It is thought that the main cause of the fracture in question was the residual tensile stresses there.
- 2) The fatigue strength in the core part of the journal was equivalent or less than the fatigue strength of the sharp notched test pieces.
- 3) It was concluded that the breaking accidents from the center bore face could be prevented by giving the residual compressive stresses on the bore face.

**Key words :** stress analysis ; backup roll ; photoelastic method ; fatigue strength ; residual stress ; working stress ; breaking accident ; center bore.

## 1. 緒 言

板圧延用 4 段あるいは 6 段圧延機などに使用されるバックアップロールの性能としては、一般的に胴部では耐摩耗性、耐スポーリング性を、軸部では耐折損性を要求される。近年、圧延機の多段化、連続化、高圧下圧延などによって<sup>1)2)</sup>、圧延条件は過酷化の傾向にあり、バックアップロールに対する性能として特に耐摩耗性、耐スポーリング性向上の要求度が増大している。これらの要求にこたえるため、製造面からは主としてロール材の高合金化とその製鋼技術、及び高硬度高深度を得る熱処理技術などの確立によって、今日では 5% Cr 鋼バックアップロールが製造され成果をあげている。一方、軸部の耐折損性については、主として胴軸付根の応力集中箇所が対象となるが、著者が遭遇した大型バックアップロールの事故品の中には、この位置の破壊事故品は皆無であった。しかし 2、3 の破壊事故品では従来みられな

かった破壊形態のものがあった。これらはいずれも中心孔のある一体式バックアップロールでの破壊で、その起点はロール使用時ベアリングジョック内に入る軸の中心孔壁に存在した。この破壊現象はベアリングジョックの剛性的構造からみて、一見想像しがたいものであった。

中心孔壁からの破壊例としては、ワークロールについて報告したものはあるが<sup>3)4)</sup>、バックアップロールについてはみあたらない。

本研究は上記中心孔を有する一体式バックアップロールの軸内部からの破壊事故を防止するため、応力解析と材料強度について検討したものである。はじめ圧延使用時のロール内作用応力を解析するため、光弾性法を適用した。光弾性法によるバックアップロールの応力解析例はいくつかあるが<sup>5)6)</sup>、これらはロール外面の一部を対象としたもので、内部については全く不明であった。

そこで、ロール内部の小さいと予想される作用応力を求めるため、3次元大型モデルによる光弾性実験をおこ

昭和 55 年本会講演大会にて発表 昭和 63 年 8 月 25 日受付 (Received Aug. 25, 1988)

\* 関東特殊製鋼(株)研究開発部 (Research and Development Department, Kanto Special Steel Works, Ltd., 1-3-1 Tsujidokandai Fujisawa 251)

なった。次に、実体ロールの軸材について疲れ試験をおこない、破壊原因と破壊防止条件について検討した。

## 2. 光弾性法による応力解析

### 2.1 供試モデル

中心孔を有するバックアップロールの3次元光弾性モデルの寸法を Fig. 1 に示した。モデルは某製鉄所の冷間4段圧延機用バックアップロールの寸法（胴径1420 mm×胴長2030 mm×全長4250 mm，中心孔径190 mm）を1/10に縮尺したもので、合成樹脂（アラルダイト B）と硬化剤（ハドナー 901）を融解（130°C）して重量比100:25に配合し、均一に混合した後注型凝固させ、その鑄塊を機械加工して製作した。Photo. 1 にモデルの外観を示した。

なお、実験にあたっては、バックアップロールモデルの軸にはめるベアリングチョックモデル、及び胴で接触するワークロールモデル（円柱の縦半切りしたもの）も、同様に縮尺1/10の合成樹脂製とした。

### 2.2 応力凍結法<sup>7)</sup>

モデルへの負荷法を実圧延機に類似させるため、モデルは圧延機を想定した鋼製治具にセットした。Photo. 2 はモデルのセット状況を示したもので、4段圧延機の上半分を想定して最下部にワークロールモデルをおき、こ

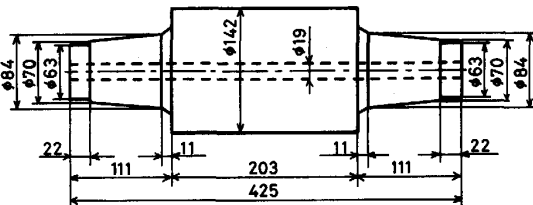


Fig. 1. Dimension of three-dimensional model of a backup roll (1/10).

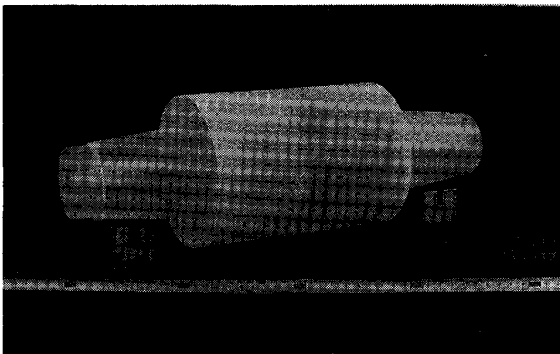


Photo. 1. Appearance of the three-dimensional roll model.

の上にバックアップロールモデルをのせ、軸にはベアリングチョックモデルをはめた。負荷はこれらの最上部にのせた天びん棒の中心に加え、ベアリングチョックモデルを介してロールモデルの軸に加えるようにした。本実験では、これらの操作を応力凍結装置（理研計器製 PA-2 型）の中でおこなった。次に応力凍結条件としては、20 kgf の負荷を分銅により加え、同時に 130°C×10 h→徐冷（1°C/h）の凍結サイクルを与えた。応力凍結後、バックアップロールモデルから Fig. 2 のごとくスライスを切り出した。

すなわち、モデルの対称性により、モデル右半分では長手方向に直角な輪切りスライス7枚を胴および軸より切り出し、また、左半分では負荷方向に平行で軸心を含む縦切りスライス1枚を切り出した。これらを光弾性実験装置（理研計器製 PA-420 型）により観察し等色線を得た。

### 2.3 実験結果と考察

#### 2.3.1 等色線

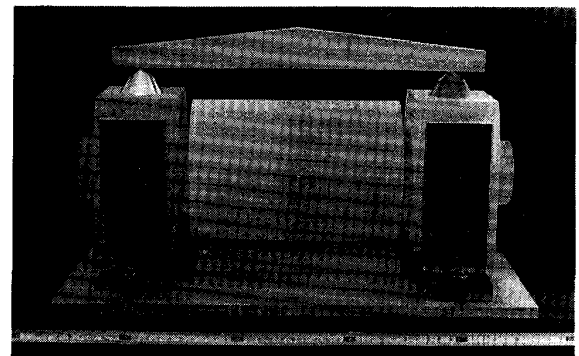


Photo. 2. Method of loading on the three-dimensional roll model.

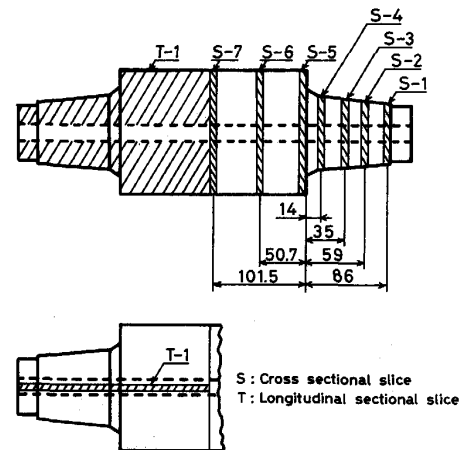


Fig. 2. Positions to cut slices from the three-dimensional roll model.

縦切り及び輪切りスライスより得られた等色線写真を Photo. 3~5 に示した。Photo. 3 の縦断面スライスの等色線によると、等色線が密集して応力集中現象がみられるのは軸付根のみであり、問題の中心孔壁ではあまり大きな応力が作用しないことが推定された。また、

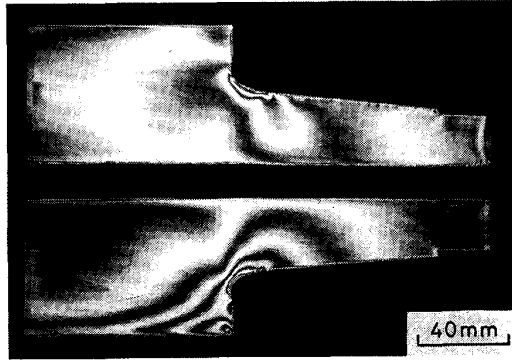


Photo. 3. Isochromatic fringes in the longitudinal sectional slice (T-1).

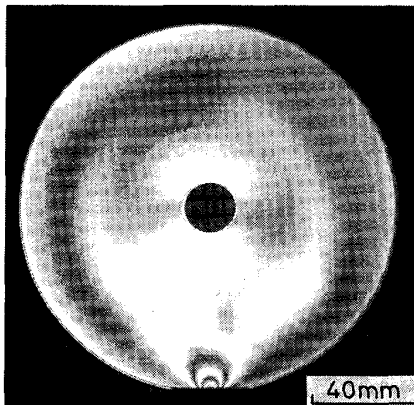


Photo. 4. Isochromatic fringes in the cross sectional slice (S-7).

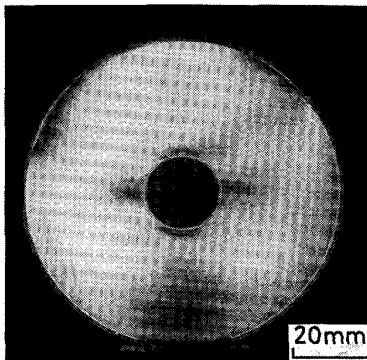


Photo. 5. Isochromatic fringes in the cross sectional slice (S-4).

Photo. 4, 5 は胴及び軸での輪切りスライスにおける等色線の代表例であるが、この場合には孔壁にわずかの応力集中現象が認められた。

2・3・2 中心孔壁における作用応力の分布と事故品の破壊現象

3次元モデルの主応力面スライス内の二つの主応力を  $\sigma_1, \sigma_2$  とすると、これらの間には次の関係が成立する<sup>8)</sup>。

$$\alpha t (\sigma_1 - \sigma_2) = N \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\alpha$ : 光弾性感度、 $t$ : スライスの厚さ、 $N$ : 等色線縞次数である。本実験の場合には、 $\alpha = 40 \text{ mm/kgf}$ ,  $t = 6.0 \text{ mm}$  である。そこで、中心孔壁付近についてみると、いずれのスライスでも面内に主応力を含んでいるとみてよいので、孔壁における等色線縞次数  $N$  を読みとれば、モデルの中心孔壁における応力を算出できる。

次に、モデルから実体ロールの応力を算出するための方法は、両者が相似の関係にあれば一般的に成立する次の相似則<sup>9)10)</sup>を適用した。

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{W_p}{W_m} \cdot \frac{1}{(l_p/l_m)^2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\sigma_p$ : 実体における応力、 $\sigma_m$ : モデルにおける応力、 $W_p$ : 実体に加えられた荷重、 $W_m$ : モデルに加えた荷重、 $l_p$ : 実体の寸法、 $l_m$ : モデルの寸法である。式(2)から常用圧延荷重  $W_p = 10^6 \text{ kgf}$  のときの実体バックアップロールの中心孔壁における作用応力を算出すると、Fig. 3, 4 のようになる。軸方向応力は上下の孔壁で引張応力が作用したが、最大値は(+)2.1 kgf/mm<sup>2</sup>で軸部の孔壁に存在した。また、円周方向応力も引張りで、胴軸境界付近の胴側及び軸側の孔壁に最大値(+)3.1 kgf/mm<sup>2</sup>が作用した。これらの引張応力と最小値0 kgf/mm<sup>2</sup>とから、ロールの圧延使用時中心孔壁は引張りと0、すなわち、片振り引張りの応力サイクルを受け

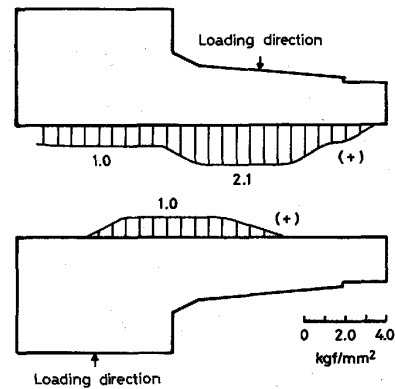


Fig. 3. Distribution of axial stresses on the center bore face of the backup roll (load  $10^6 \text{ kgf}$ ).

ることになるが、破壊を起こすには小さすぎると考えられた。そこで常用最高圧延荷重  $1.5 \times 10^6$  kgf の場合についてみると、最大引張応力は  $4.7 \text{ kgf/mm}^2$  であり、この応力による疲労破壊を想定した場合でも、作用応力

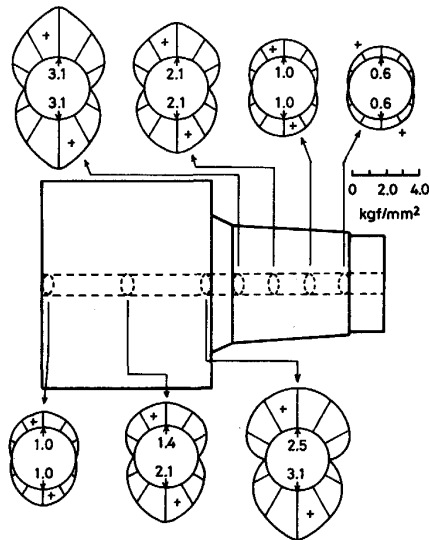


Fig. 4. Distribution of circumferential stresses on the center bore face of the backup roll (load  $10^6$  kgf).

のみによる破壊は考えにくかった。

そこでさらに、圧延に使用して応力解析対象ロールの破壊事故例と全く同形態に軸内部に破壊を起こした実体バックアップロール（胴径 1435 mm×胴長 1370 mm×全長 4265 mm）について調査した。Photo. 6 に破壊の状況を示した。破壊箇所は軸内部のため、あらかじめ破壊範囲を超音波探傷法により確認し、次にガス溶断して破壊部分を取り出した。Photo. 6 の最下部に破壊起点部一帯の破面がみられるが、起点は中心孔壁にあり、この周囲に疲労破壊を特徴づけるビーチマークが軸方向及び円周方向に広がっている。この破壊の特徴から、破壊初期には円周方向応力が支配的であったことが分かる。なお、破壊経路は Fig. 5 のごとくである。調査結果によると、破壊起点には大型鋼塊でしばしばみられる成分偏析や大型介在物が観察されたが、巨視的材料欠陥は認められなかった。また、起点位置は上記調査ロールでは胴端から軸内部 380 mm のところであったが、応力解析対象ロールでも 350 mm の起点位置から破壊していた。そこで先に示した中心孔壁各位置での最大引張応力及び破壊起点位置を、一括して表示すると Fig. 6 のようになる。

すなわち、破壊起点は円周方向の作用応力が必ずしも

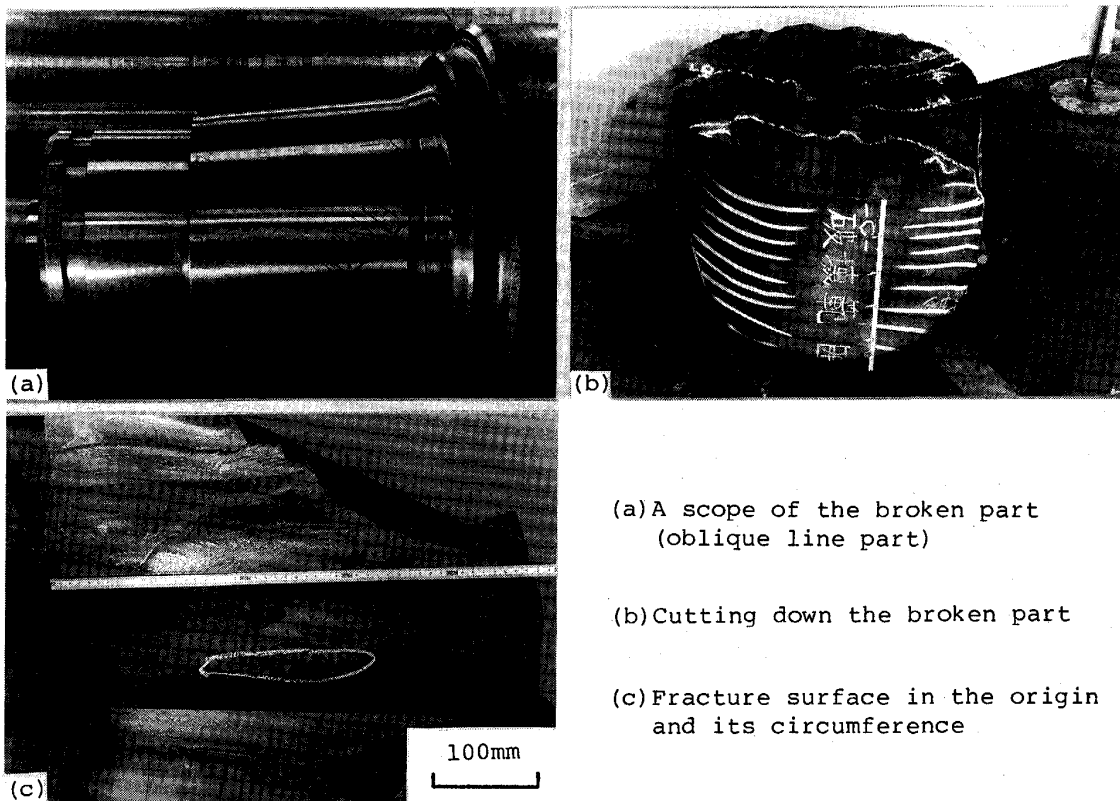


Photo. 6. Appearance of the inner broken part of the journal of a backup roll.

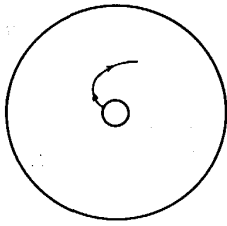


Fig. 5. A route of the fracture from the center bore face.

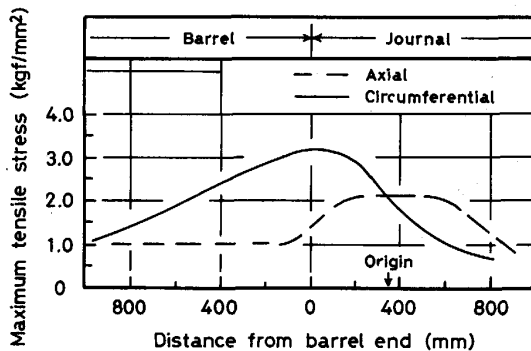


Fig. 6. Distribution of the maximum tensile stresses in each position on the center bore face (load  $10^6$  kgf).

最大となる位置ではなく、円周及び軸方向の両応力がほぼ同一の大きさとなる胴端から離れた孔壁に存在した。

以上のように、中心孔を有するバックアップロールの応力解析及び破壊事故品の調査結果より、比較的小さな作用応力によって軸部中心孔壁で疲労破壊し、その破壊の展開が円周方向応力によって径方向におこなわれた理由としては、次の2点が考えられた。

(1) 中心孔壁材の疲れ強さは円周方向が軸方向よりも小さかった。

渡辺<sup>11)</sup>は Ni-Mo-V 鋼の 60 t 鋼塊から製作された発電機軸の内外部試験材で疲れ試験をおこない、疲れ強さの横/縦比は外部では 0.867、中心部では 0.744 で内外とも横方向 (円周方向) の疲れ強さが縦方向 (軸方向) よりも小さいこと、中心部ほど異方性の大きいことを示している。

本報の応力解析対象ロールは 80 t 級鋼塊から製造されており、軸中心部では上記発電機材と同様の異方性は当然考えうる。従って、中心孔壁材の円周方向の疲れ強さが、軸方向のそれより小さいと考えるのは妥当であろう。

(2) 軸部中心孔壁には、胴のそれよりもかなり大きな引張残留応力が存在し、そのために疲れ強さが低下し

た<sup>12)</sup>。

軸内部が破壊したバックアップロールの焼入工程として、加熱はロール全体を同時に施行する方法が採用されたが、ロール内温度分布としては、外層高温内部低温の温度傾斜をつける工夫がされた。また、焼入時には胴外層は所定硬さを得るために急冷したが、冷却時間は限定した。一方、軸は急冷をおさえた。この熱処理は引張残留応力を小さくすることをねらったため、熱処理時、温度制御の重点を胴においた。その結果、胴及び胴とつながる軸付根付近の軸部中心孔壁では、(+) $10 \text{ kgf/mm}^2$ 以下の所定残留応力が確保されたが、軸付根から離れた位置では、緩慢な外部冷却にもかかわらず、熱応力型の残留応力分布となって<sup>13)</sup>、軸部中心孔壁に比較的大きな引張応力が残留したものと考えられた。本件については次章でさらに検討する。

### 3. バックアップロール軸材の疲れ試験

#### 3.1 供試鋼と試験法

供試鋼は事故ロールの軸を軸方向に直角に切り出した円板で、その中心孔壁部材料の化学組成及び機械的性質を Table 1, 2 に示した。次に疲れ試験片の寸法と採取位置を Fig. 7 に示した。試験片は平滑なものと、切欠きのあるものを準備したが、後者の切欠きの形状係数 (応力集中係数) は 7.0 で、R. E. PETERSON の図表<sup>14)</sup>により決定した。ここで形状係数 7.0 の鋭い切欠き試験片を選定した理由は三つある。

(1) 光弾性法による応力解析結果によれば、軸部中心孔壁は (+) $4.7 \text{ kgf/mm}^2$ 以下のきわめて小さい繰返し応力により疲労破壊したことになる。この疲れ強さは本鋼種の引張強さ  $78.5 \text{ kgf/mm}^2$ と比較考慮するとあまりに小さく、かなり鋭い切欠き試験片の疲れ強さと同等であろうと予測された。

Table 1. Chemical composition of the steel used (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al
0.39	0.35	0.55	0.015	0.010	0.13	2.49	0.014

Table 2. Mechanical properties of the steel used at room temperature.

Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)
78.5	38.5	16.8	28.5

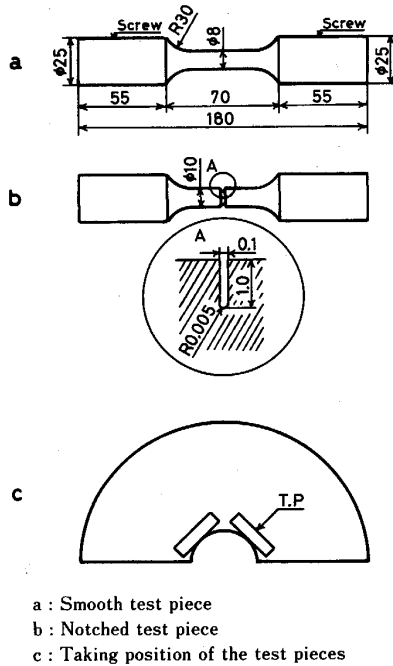


Fig. 7. Dimension and taking position of the fatigue test pieces.

(2) 2・3・2 項で述べたように破壊起点には巨視的材料欠陥はなかったが、中心孔壁にはマイクロキャビティーや酸化スケールなどの微小凹凸があり、これらは切欠きになり得ると考えられた。

(3) 鋭い切欠き試験片を想定した場合、形状係数は 7.0 程度がよいと考えられた。

石橋<sup>15)</sup> は引張強さ  $\sigma_B$  の異なる 5 鋼種について形状係数  $\alpha$  と切欠き係数  $\beta$  の関係について述べている。それによると  $\sigma_B = 77.3 \text{ kgf/mm}^2$  の場合、 $\alpha$  の増大とともに  $\beta$  も比例的に増大するが、 $\alpha \geq 3.5$  では  $\beta = 3.0$  で一定となり、また  $\sigma_B = 80.3 \text{ kgf/mm}^2$  では  $\alpha \geq 5.0$  で  $\beta = 3.3$  で一定。すなわち本鋼種の引張強さは上記二つの引張強さの間にあるので、試験片の形状係数  $\alpha$  は少なくとも  $\alpha \geq 5.0$  であればよいと考えられるが、本実験では  $\alpha = 7.0$  とし  $\beta$  が確実に一定になる領域のもので、かつ加工が可能な  $\alpha$  を選定した。

また、試験片の採取位置は中心孔壁にできるだけ接近し、その軸方向が孔壁の円周方向に一致するようにした。

次に、疲れ試験法としては中心孔壁の作用応力が 0 と引張りの繰返しであること、及び孔壁に引張残留応力の存在する場合を想定して、試験片に付加する応力パターンを Fig. 8 のように、片振り引張りと部分片振り引張りの 2 種類とした。なお片振り引張りの場合、一般的に、疲れ限度は  $2\sigma_a (= \sigma_{max} - \sigma_{min} = \text{Stress range})$  で表示されるので、本報でも以下の疲れ試験結果はすべてこの

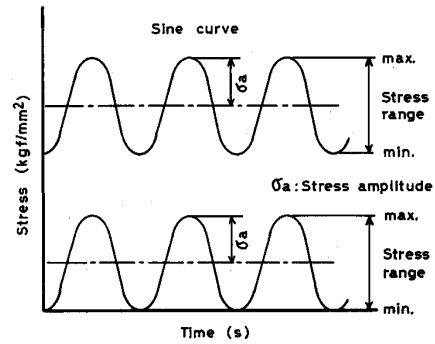


Fig. 8. Stress pattern in the fatigue test.

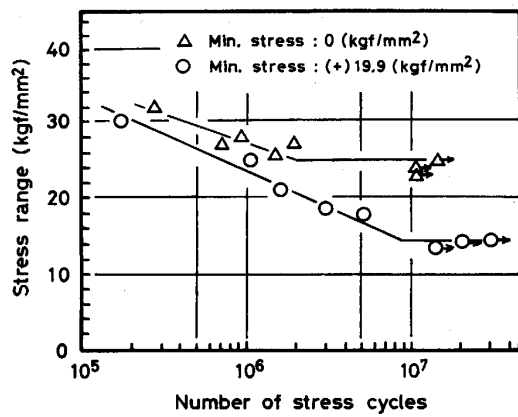


Fig. 9. Result of the pulsating tension fatigue test of smooth test pieces taken from the journal of the backup roll.

表示法を採用した。使用した試験機はサーボパルサー(島津製 EHF-EA10 型, 容量  $\pm 10^4 \text{ kgf}$ ) で繰返し速度はロールの回転速度(最高 110 rpm)にあわせて 4 Hz とした。

### 3・2 試験結果

平滑及び切欠き試験片による疲れ試験結果を Fig. 9, 10 にそれぞれ示した。  $\sigma_{min} = 0 \text{ kgf/mm}^2$  のときの疲れ限度は平滑材で  $25.0 \text{ kgf/mm}^2$ 、切欠き材で  $12.5 \text{ kgf/mm}^2$  であった。また、引張残留応力を想定して  $\sigma_{min} = (+)20 \text{ kgf/mm}^2$  を目標とした場合の結果として、平滑材では  $\sigma_{min} = (+)19.9 \text{ kgf/mm}^2$  のとき疲れ限度は  $14.5 \text{ kgf/mm}^2$ 、切欠き材では  $\sigma_{min} = (+)17.7 \text{ kgf/mm}^2$  で疲れ限度  $8.0 \text{ kgf/mm}^2$  であった。これらの結果を疲れ限度線図として示すと、Fig. 11 のようになる。切欠き材では  $\sigma_{min} = (+)10 \text{ kgf/mm}^2$  以上になると疲れ限度は 1 けた、すなわち  $\sigma_{min} = (+)20 \text{ kgf/mm}^2$  で  $7.4 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $\sigma_{min} = (+)30 \text{ kgf/mm}^2$  で  $4.9 \text{ kgf/mm}^2$  となる。

2・3・2 項によると軸部中心孔壁の作用応力は高々 4.7

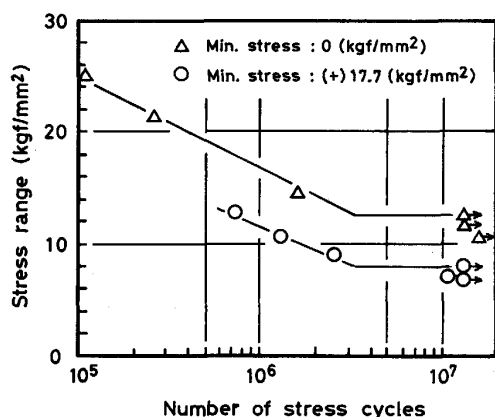


Fig. 10. Result of the pulsating tension fatigue of notched test pieces taken from the journal of the backup roll.

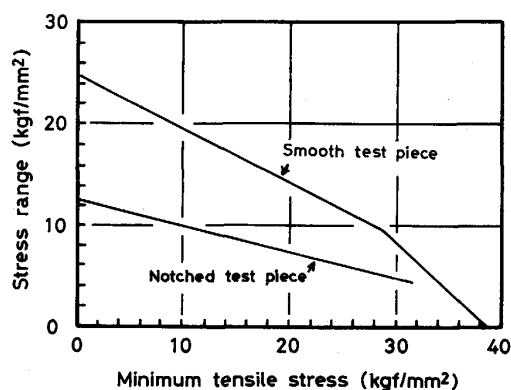


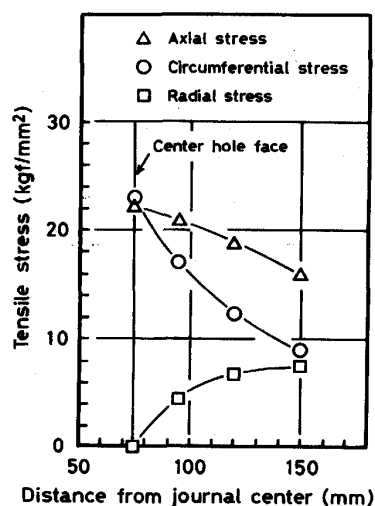
Fig. 11. Endurance limit diagram under pulsating tension of the steel of the backup roll journal core part.

kgf/mm<sup>2</sup>であるから、もし中心孔壁の残留応力が(+)20~30 kgf/mm<sup>2</sup>程度とすれば、上記の結果より実体バックアップロール軸部中心孔壁の疲れ強さは、かなり鋭い切欠き材の疲れ強さと同程度ということになる。そこで次節ではこの点の検討をする。

### 3.3 考察

前節の結果より、軸部中心孔壁からの破壊事故に対しては、孔壁の残留応力が重要な意味をもつことから、応力解析対象ロールと同様の熱処理を施した中心孔を有する実体バックアップロール(胴径1300mm×胴長2180mm×全長5480mm)の軸部(直径708mm×長さ1650mm, 中心孔径150mm)の残留応力を、ザックス法により測定した<sup>16)</sup>。

Fig. 12は軸部中心孔壁とその付近の残留応力測定結果を示す。図より明らかなごとく、中心孔壁における残留応力は引張応力で、円周方向では23.0 kgf/mm<sup>2</sup>、軸



Roll dimension :  $\phi 1300 \times 2180 \times 5480$

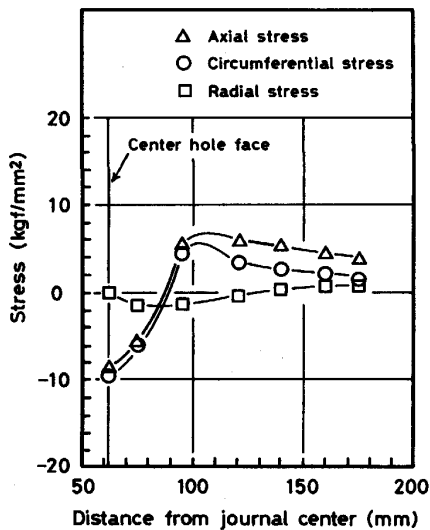
Fig. 12. Residual stress in the core part of a backup roll journal.

方向では22.3 kgf/mm<sup>2</sup>であった。なお、残留応力測定ロールと本報で残留応力を知りたい応力解析対象ロールを比較すると、後者が軸径において約70mm大きく、焼入時の加熱温度は50°C高いこと、などから後者の方が熱応力型残留応力を少し高める要因がある。従って、応力解析対象ロールの軸部中心孔壁の残留応力としては、上記引張応力より大きく、かつこれに近い値と考えられた。

以上の考察と3.2節で述べた試験結果より、実体バックアップロールの軸部中心孔壁の疲れ限度を知ることは不可能であったが、少なくともその疲れ強さはかなり鋭い切欠き材のそれと同等かそれ以下であることが分かった。

次に、中心孔壁からの破壊防止法について検討する。

一般的に疲れ強さを向上するためには、残留応力を圧縮応力とすること<sup>12)</sup>、材料の引張強さを高めること<sup>17)</sup>などの方法があるが、これらの重畳効果を利用するのが有効である。本研究では前者を主体とした熱処理方法について検討したが、付加的には後者の効果も付与されるようにした。そこで必要な残留応力の大きさであるが、切欠き材の疲れ限度線図(Fig. 10)によれば、残留応力が(+)10 kgf/mm<sup>2</sup>以下になると、疲れ限度は10 kgf/mm<sup>2</sup>以上になること、及び胴部中心孔壁では2.3・2項で述べたように、引張残留応力が確実に存在するが、大きさは10 kgf/mm<sup>2</sup>以下と考えられること、しかも破壊事故が起きていないという事実から、軸部中心孔壁の残留応力は大きくても(+)10 kgf/mm<sup>2</sup>以下とすれば、破壊事故はないであろう。しかし、破壊防止を確実にす



Roll dimension :  $\phi 1300 \times 1250 \times 4230$

Fig. 13. Residual stress in the core part of a backup roll journal whose center bore face was cooled forcibly.

るためには、2・3・2 項より作用応力の最大値を引張りで  $5 \text{ kgf/mm}^2$  とすれば、残留応力は圧縮で  $5 \text{ kgf/mm}^2$  以上とし、両者を重畳したものが部分片振り圧縮応力の状態とするのが望ましい。従って、残留応力としては極端に大きな圧縮応力とする必要はない。これを付与する方法としては、焼入時中心孔を適当に強制冷却すれば可能である。なお、強制冷却の具体的方法としては、若干の工夫をおこなっているため、その効果を確認するため、実体バックアップロール寸法の供試体（胴径  $1300 \text{ mm}$  × 胴長  $1250 \text{ mm}$  × 全長  $4230 \text{ mm}$ ）に適用し、残留応力の測定をおこなった。測定結果を Fig. 13 に示した。

図にみるように中心孔壁の残留応力としては、円周方向で  $(-9.3 \text{ kgf/mm}^2)$ 、軸方向で  $(-8.5 \text{ kgf/mm}^2)$  であり、ほぼ適切な残留応力が得られた。本方法は応力解析の対象としたバックアップロールと同一寸法の製品バックアップロールに適用して、すでに 10 年以上経過しているが、中心孔壁からの破壊事故は全く起きていない。

#### 4. 結 言

中心孔を有する大型バックアップロールの軸部中心孔壁からの破壊事故に遭遇したため、この種の事故を防止することを意図して、3次元光弾性法による中心孔壁における作用応力の解析、中心孔壁材による疲れ試験、及び残留応力の検討などをおこなった。それらの結果をまとめると以下のようなものである。

(1) 軸部中心孔壁には、繰返し引張応力が作用したが、その大きさは小さく、孔壁からの破壊に対しては、引張残留応力が大きな要因であることを示した。

(2) 軸部中心孔壁の疲れ強さは、かなり鋭い切欠き試験片の疲れ強さと同等かそれ以下であった。

(3) 中心孔壁からの破壊防止法としては、孔壁に圧縮残留応力を付与することによって、対処し得ると判断された。

#### 文 献

- 1) 安森 古: 塑性と加工, 23 (1982), p. 2
- 2) 福田宣雄: 製鉄研究 (1981)304, p. 13803
- 3) 阪部喜代三: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 611
- 4) A. A. BRADD: Iron Steel Eng., 38 (1961) 1, p. 85
- 5) L. MACNAUGHTON and A. A. BRADD: Iron Steel Eng., 39 (1962) 4, p. 97
- 6) Dr. F. A. D'ISA, H. ERZURUM and J. GROSS: Iron Steel Eng., 46 (1969) 11, p. 99
- 7) 辻 二郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法 (1975), p. 283 [日刊工業新聞社]
- 8) 辻 二郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法 (1975), p. 316 [日刊工業新聞社]
- 9) 江守一郎, D. J. シューリング: 模型実験の理論と応用 (1977), p. 17 [技報堂]
- 10) 宮沢賢二: 鉄と鋼, 74 (1988), p. 688
- 11) 渡辺十郎: 日本機械学会誌, 64 (1961), p. 1556
- 12) 金属の疲労 (日本材料学会編) (1964), p. 223 [丸善]
- 13) 下田秀夫: 熱処理, 5 (1965), p. 166
- 14) R. E. PETERSON: Stress Concentration Factors (1974), p. 50 [John Wiley & Son, Inc.]
- 15) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止 (1967), p. 53 [養賢堂]
- 16) 応力測定法 (応力測定技術研究会編) (1969), p. 358 [朝倉書店]
- 17) 金属材料疲れ強さの設計資料 I (1966), p. 51 [日本機械学会]