

(論文)

ディーゼルエンジン用鋳鋼製クランク軸への熱間ロール加工法の適用

落 敏行*・久保晴義**・吉本篤人**・吉田泰正**・長田 卓***・金丸信夫****

*鉄鋼部門・鋳鋼事業部・技術部 **鉄鋼部門・鋳鋼事業部・製造部 ***技術開発本部・機械研究所 ****㈱コベルコ科研

Application of Hot Rolling to Diesel Engine Cast Crankshafts

Toshiyuki Ochi・Haruyoshi Kubo・Atsuhito Yoshimoto・Yasumasa Yoshida・Takashi Chiyouda・Nobuo Kanamaru

Micro-shrinkage is unavoidable in cast steel products. In order to consolidate micro-shrinkage in the product surface area, a new hot rolling method was developed. It is currently used for all cast crank throws manufactured at the Kobe Steel factory. An increase in fatigue strength of nearly 30% was observed in the hot rolled pin and fillet area. The study also clarified that micro-shrinkage consolidation is dominated by the hydro static pressure value of the hot rolled area.

まえがき = 船舶には数多くの鋳鋼製品が使用されている(図1)が、その中でも推進用のディーゼル機関に用いられるクランク軸は主要部品の一つである。大型船舶に使用されている2ストローク・ディーゼルエンジン用クランク軸は大型の部品であり、通常、一体物で製造することが不可能なため、回転の中心軸であるジャーナル軸と、偏芯部であるスローとを焼ばめにより結合した「組立型クランク軸(写真1)」が使用されている。このスロー(写真2)には鍛鋼製のものと鋳鋼製のものがある。

鋳鋼品は余肉の少ないニアネットの形状が作れること、量産が可能、などのメリットがある一方、その内部に不可避免的に存在するマイクロシュリンケージの影響で、同一の引張強度を持つ鍛鋼品と比べて疲労強度が若干低いことが知られている。そのため当社の鋳鋼製スローにおいては、その応力集中部位であるフィレット部に「冷間ロール加工」を施して疲労強度を大幅に向上させることにより高い信頼性を得ており¹⁾、現在当社の鋳鋼製スローの生産量が世界全体に占める割合は約30%に達している。

近年のエンジンのコンパクト化・高出力化に伴い、クランク軸に対するユーザからの要求も厳しくなっており、当社では、さらなる信頼性の向上、高強度化技術の

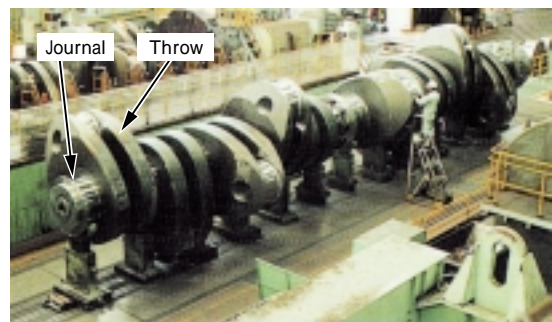


写真1 組立型クランク軸
Photo 1 Build-up type crank shaft

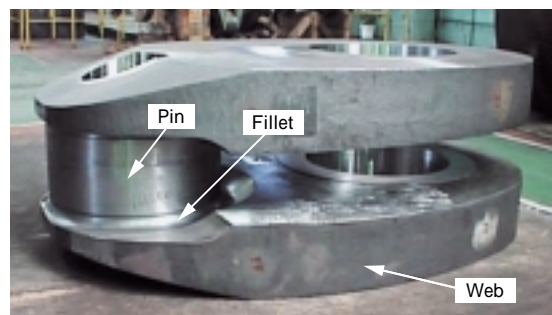


写真2 スロー
Photo 2 Throw

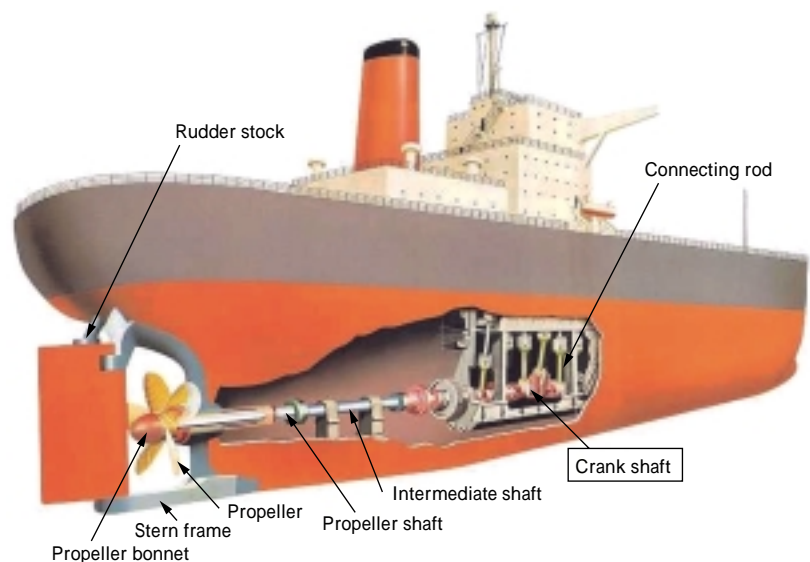


図1 大型船舶に使用されている鋳鋼品
Fig. 1 Casting & forging parts in large Vessel

開発に取り組んでいる。

その取組みの一環として、製品の仕上げ表面近傍に残存する鑄鋼品特有のマイクロシュリンケージを、熱間での塑性加工により圧着・消失させることにより、材料の信頼性を向上させる“熱間ロール加工法”を検討し、その有効性を確認した。この結果に基づき、当社高砂製作所内(鑄鍛鋼事業部)に実機加工装置を1999年に設置し、実用に供している。

そこで本報では、この熱間ロール加工法の有効性の確認結果、実機加工装置の概要、操業条件と実機への適用結果について述べる。

1. 基礎実験方法

1.1 試験材及び試験装置

熱間ロール加工は、従来にはない加工法であり、加工装置自体が存在しないため、現存する熱間加工装置であるリングミルを一部改造し、試験装置とした。また試験材としては、実機サイズクランクスローのピン・フィレット部の部分モデル(ピン部外径約700mm)を作成して試験に供した。

図2に試験装置のイメージ図を示す。ギア駆動で試験材を回転させるとともに、リングミルのアキシャルロール移動機能を改造して、ロール加圧に用いた。加工時の加圧力は34ton(一定)である。

1.2 加熱装置

局部加熱用のバーナ(LNG, 酸素)を使用し、ピン部・

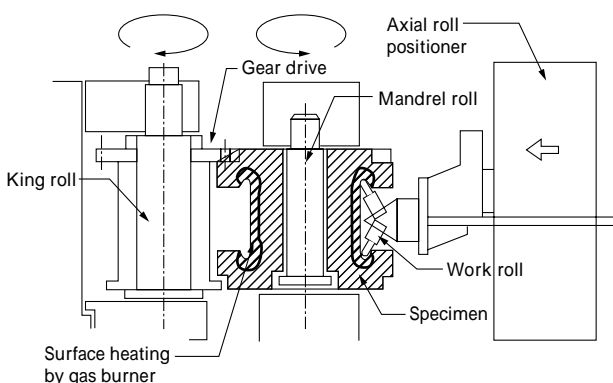


図2 試験装置のイメージ図

Fig. 2 Schematic illustration of testing equipment

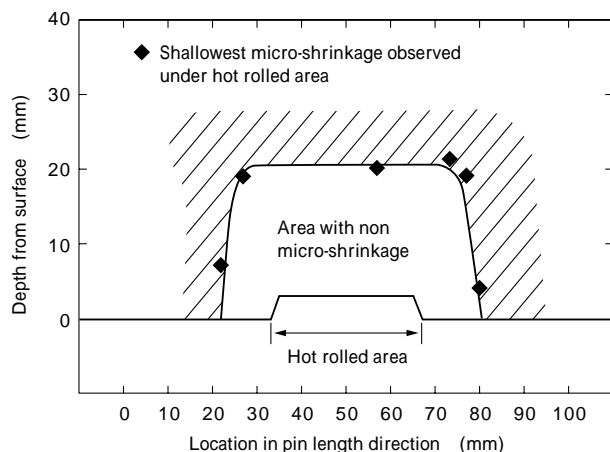


図3 ピン部の調査結果

Fig. 3 Results of pin area examination

フィレット部を約900℃まで加熱して実験に供した。

2. 実験結果及び考察

2.1 ミクロシュリンケージの圧着・消失状況

ロール加工後の試験材に対し、超音波探傷及び試験材を表面より順次削り込んで浸透探傷/磁粉探傷を施し、表面近傍のマイクロシュリンケージの消失領域を調査した。

図3にピン部の調査結果を示す。90×幅30mmのローラによる圧下量3mmの加工に対し、ローラによる加圧部直下では深さ20mmまでマイクロシュリンケージが完全に消失している。この段階での仕上げまでの機械加工取代は9mmであり、十分余裕を持った消失深さである。

2.2 熱間ロール加工部の組織、機械的性質

試験材に熱処理を施したのち、引張・衝撃・疲労・ミクロ各試験片を採取して調査を行った。試験片採取位置を図4に示す。試験片の表面と、最終製品の仕上げ表面位置が一致するように深さを決めた。

熱間ロール加工の有無で組織に差違は見られず(写真3)、引張強さ・降伏点も特に変化はないが、伸び、絞り、衝撃値に若干の上昇が見られる(表1)。

一方、疲労強度は図5に示すように大幅な上昇を見せており、疲労強度比(疲労強度/引張強さ)は約48%と、

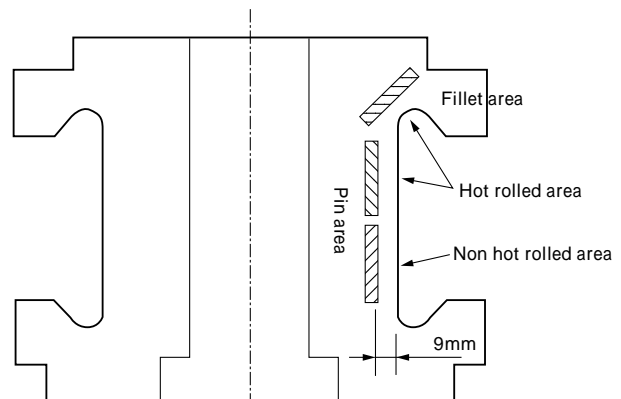


図4 試験片採取位置

Fig. 4 Locations of test coupons

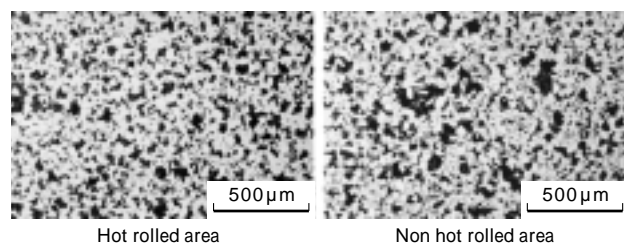


写真3 熱間ロール加工部・非加工部のミクロ組織(ピン部)

Photo 3 Microstructure of hot-rolled and non hot-rolled area (pin)

表1 熱間ロール加工部・非加工部の機械的性質の対比

Table 1 Comparison of mechanical properties between hot rolled and non hot rolled area

	Without hot rolling	With hot rolling
TS (MPa)	560	557
YP (MPa)	357	356
EL. (%)	30	33
RA (%)	47	67
K_{v2} (J)	37	43

鍛鋼材と同等もしくはそれ以上のレベルとなっている。

これらとともに、熱間ロール加工によりマイクロシュリンケージが消失した効果であると言える。

3. 実生産用設備能力検討

試験材による予備調査で、熱間ロール加工法の有効性が確認できたので、実生産用設備の検討を行った。マイクロシュリンケージの圧着条件に関する検討は後に譲り、ここでは、「圧下量 3.0mm」を仮の圧着条件として、装置仕様を検討した。

装置の基本仕様として特に問題となる、(1) ローラ押付け力及び(2) ローラが受ける横向きの荷重(図6)を、FEM解析と実験結果を合わせ込むことにより求めた。すなわち、まずローラ押付け力のFEM計算結果が実験で得られた荷重と等しくなるように材料の変形抵抗を合せ込み、その値を用いて最大クラスのスローでの加工条件での荷重を求めた。解析にはFEM解析ソフトNASKAの一般化平面歪バージョン²⁾を用いた。

実機での最大加工荷重を予測するためのFEM解析に当っては余裕代を含ませるため、加工条件として圧下量4.0mmにして計算を行った。

表2に結果をまとめた。最大クラスの実機スローでは約100tonのローラ押付け力が必要であり、実機仕様としては3割のマーヅンをみて130tonとした。

横方向荷重については実験結果とFEM解析結果との整合性が悪く信頼性が低いと判断し、実機仕様決定にあ

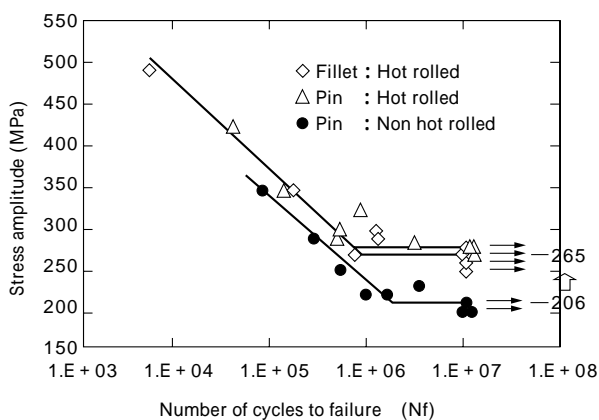


図5 熱間ロール加工による疲労強度の向上効果
Fig. 5 Effect of hot rolling for fatigue strength

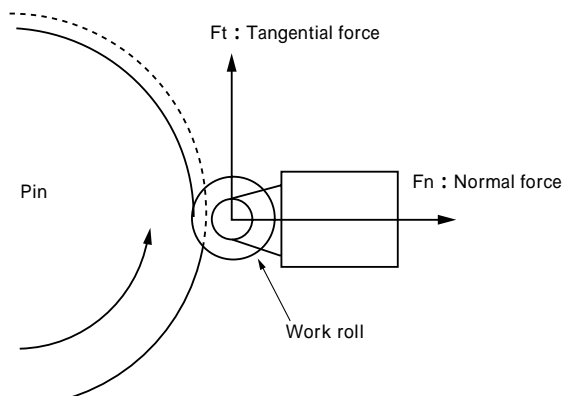


図6 加工荷重
Fig. 6 Working force

表2 実生産用設備の必要能力検討

Table 2 Estimation of required specification of hot-rolling equipment

	Experiment	FEM analysis	
		FEM analysis	FEM analysis estimation
Location	Pin	Pin	Fillet
Diameter (mm)	692	1 008	1 008
Number of rolls	1	2	2
Roll diameter (mm)	90	90	200
Roll width (mm)	30	40	80
Reduction (mm)	3.0	4.0	4.0
Fn (ton)	34	34	96
Ft (ton)	33	3.0	(6.2)

たっては、ピン加工時の実験結果(33ton × 2 = 66ton)にさらに安全代を見込んで110tonとした。

4. 熱間ロール加工装置

実験・解析により得られた緒元をベースに実機加工装置を製作した。

4.1 装置の構成と能力

図7に熱間ロール加工装置のイメージ図を示す。本装置は、大別すると次の2項目により構成されている。

- a) ターンテーブル及び加熱バーナ
- b) 加圧装置本体

加圧装置本体は、図7の紙面垂直方向に移動可能となっており、ロール加工時のみ前進させて、ターンテーブル上に進入する。この加圧装置本体には、両側に油圧シリンダを取付けたC型フレームが昇降可能なように取付けられており、この両油圧シリンダの先端に取付けられたワークロール及びバックアップロールにてスローのピン、フィレットをはさみ込んで加工を行う。

4.2 ローラの構成

4.2.1 ピン用ワークロール

ピン部の加工には図8(a)~(c)に示す形状のワークロールを用いる。(a),(b)のローラは、実際のスローの形状に合わせてローラ径やローラ間隔の異なるものが用意されている。またローラ全体を上下に移動させることにより、1個のローラにて広い範囲をカバーできる。

4.2.2 フィレット用ワークロール

フィレット部の加工には図9(a)(b)に示す形状のワークロールを用いる。(a)のローラはロール先端を用いてフィレット底を加工、(b)のローラはロール肩部を用いてフィレット底の両脇を加工するのに用いる。

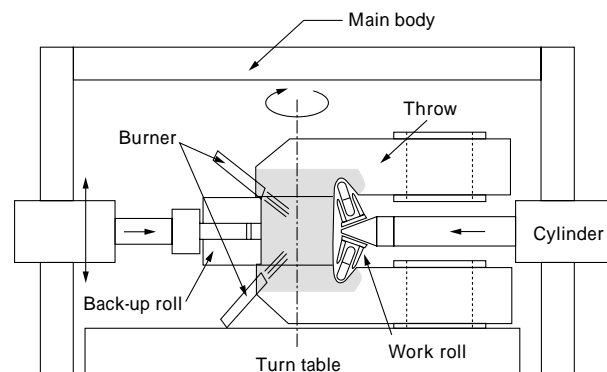


図7 熱間ロール加工装置
Fig. 7 Hot rolling equipment

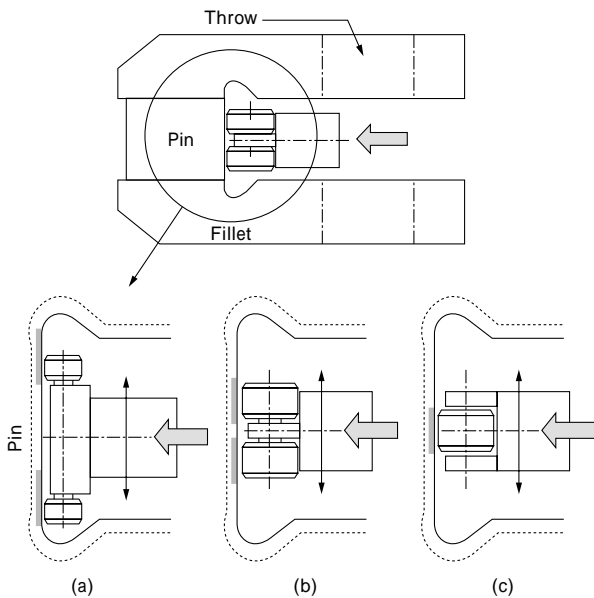


図8 ピン用ワークロールの種類と形状
Fig. 8 Types and shapes of work rolls for pin

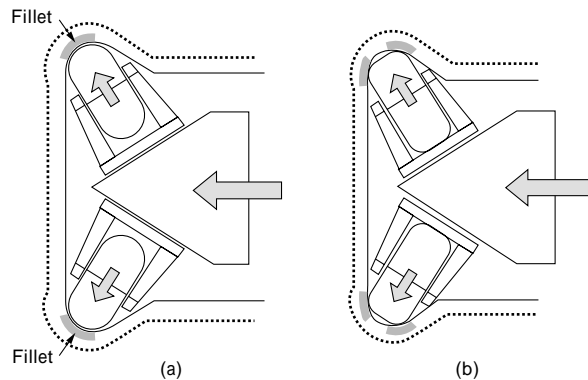


図9 フィレット用ワークロールの種類と形状
Fig. 9 Types and shapes of work rolls for fillet

5. 操業条件の確立

5.1 加熱温度

別途実施したドリルによる人工欠陥を用いた厚板材の部分圧延実験により、同じ圧下量が見られるならば加熱温度の違いによる欠陥圧着効果には差が無いことが確認されている。そこで実操業での加熱温度は生産性、ローラの耐熱・耐荷重などを考慮し、850 ~ 1000 とした。

5.2 圧下量 (マイクロシュリンケージ圧着条件)

鋼塊の中心部に連続して存在する「ザクきず」の圧着に関しては、様々な研究がなされ³⁾⁴⁾また実用化もされて

いるが、素材に分散して存在するマイクロシュリンケージの、素材表面近傍位置での圧着を目的とした報告は見当たらない。そこで実験及び3次元FEM解析を用いて、この圧着条件を調査し、必要な圧下量を明確にした。

5.2.1 実機加工装置による試験結果

ピン径約 580mm のスローを試験材として用い、条件を振った熱間ロール加工をピン部に施した。

加工後、マイクロシュリンケージ消失効果の確認を行った。結果を表3に示す。なお、この表には基礎実験及び他の条件での加工による結果も同時に記した。

圧下量の増加とともに、効果深さは増すが、その増え方は直線的ではなく、また同一の圧下量でもローラ径の大きい方が、効果深さも大きい。

5.2.2 3次元FEM解析による検討

マイクロシュリンケージの圧着条件を明かにするため、3次元FEM解析を行い、実験結果との対比を行った。図10(a)に熱間ロール加工によるマイクロシュリンケージの消失状況をイメージ化して示す。また、図10(b)にローラ下における静水圧応力及び相当歪みの分布の一例を示した(解析は1/2対称、図の上端の凹み部を紙面に垂直方向にローラが通過している)。

実験によりマイクロシュリンケージが完全に消失している限界の深さでの、静水圧応力及び相当歪みの値をFEM解析により調べると表4のようになった(値は、表中の網かけした基準条件での値で無次元化している)。

圧着条件として相当歪みを考えると、ローラ径が大きくなった場合(表4中では140, 180mmの加工)には、相当歪みが小さいにもかかわらずマイクロシュリンケージが圧着されており、圧着のパラメータとしては適切ではないことがわかる。一方、静水圧応力は圧着限界深さにおいて加工条件によらずほぼ一定の値を示している。すなわち静水圧応力が、あるしきい値に達するとミ

表3 加工条件の違いによる圧着効果の変化

Table 3 Variation of consolidating effect against hot rolling condition

Reduction (mm)	Roll diameter (mm)	Consolidated depth (mm)
0.5	52	10
0.9	66	12
1.4	140	18
3.0	90	20
3.0	140	25
2.0	180	25

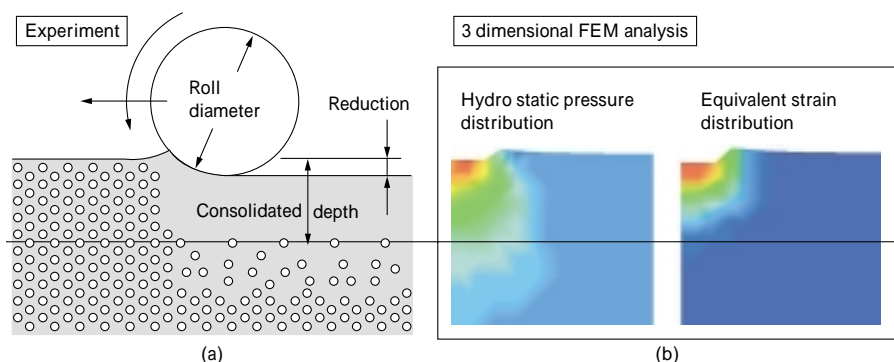


図10 3次元FEM解析と実験結果との合わせ込み

Fig.10 3 dimensional FEM analysis

表4 圧着限界深さにおける静水圧応力と相当歪みの計算結果
Table 4 Calculated value of hydro static pressure and equivalent strain at marginal consolidated depth

Reduction (mm)	Roll diameter (mm)	Consolidated depth (mm)	Hydro static pressure (MPa/MPa)	Equivalent strain
0.5	52	10	1.03	0.97
0.9	66	12	1.03	1.07
1.4	140	18	0.95	0.86
3.0	90	20	1.00	1.00
3.0	140	25	0.96	0.77
2.0	180	25	0.98	0.69

クロシュリンケージが圧着すると考えることができる。

実際には加工時の静水圧応力値は絶対値ではなく、加工温度や材質の違いにより異なる変形抵抗の影響を受けて変化するので、例えば（静水圧応力 / 材料の変形抵抗値）のような形で無次元化すれば良いと考えられる。

図11は、90mmのローラで3mm圧下した場合の深さ20mmの位置での静水圧応力をマイクロシュリンケージ圧着のしきい値として考え、使用ローラ径・圧下量・圧着深さ相互の関係を求めグラフ化したものである。これにより、温度や材質の違いによる影響を排除した形で圧着条件を整理できる。

このグラフを用いれば、必要とする深さまでマイクロシュリンケージを圧着させるための加工条件を簡単に求めることができ、操業条件の決定に活用している。

6. 実機スローによる加工の効果確認

ピン径約790mmのスローを試験材として用い、ピン全面及びフィレット部に熱間ロール加工を施した。熱処

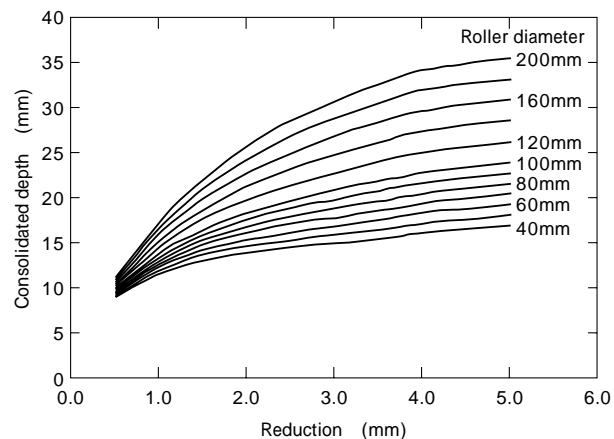


図11 圧下量、圧着深さ、使用ローラ径の関係
Fig.11 Relations between reduction, consolidated depth and roller diameter

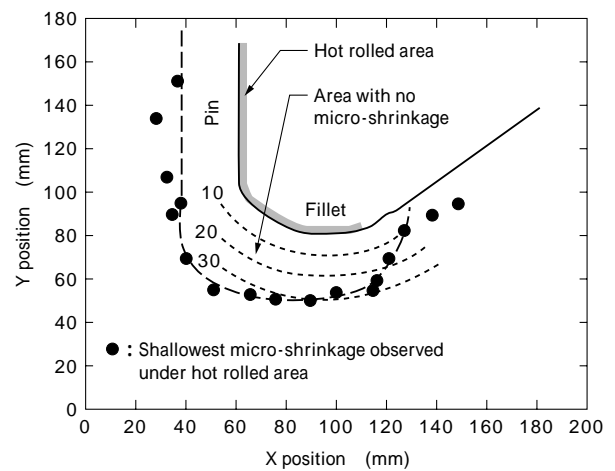


図12 実スロー試験材のピン及びフィレット部の調査結果
Fig.12 Result of pin and fillet area examination in actual size crank throw test specimen

理後、超音波探傷及び試験材を表面より順次削り込んで浸透探傷 / 磁粉探傷を行い、表面近傍のマイクロシュリンケージの消失領域を調査した。

図12に調査結果を示す。熱間ロール加工を施した領域すべてに渡り、25~35mmの深さまでマイクロシュリンケージが消失しており、実機スローにおいても部分モデル試験材と同様の品質向上効果が得られていることが確認された。

むすび = 当熱間ロール加工法は1999年1月の設備導入後、試験運転を経て実機適用を開始した。2000年8月にはスローの加熱時間・セッティング時間の短縮による生産能力増強工事を実施し、現在当社にて生産されるすべての鋳鋼製スローに適用され、信頼性の向上に貢献している。今後は本技術の活用、及び鋳鋼製クランク軸のさらなる信頼性の向上・高強度化の推進により、その供給を通じ、エンジンメーカ・造船メーカのご要望に応えていきたい。

参考文献

- 1) M. NISHIHARA et al. : Proceedings of 9TH International Congress On Combustion Engines, A5 (1971).
- 2) 森賀幹夫ほか：平3 塑性加工春季講演会，422 (1991)，p.615.
- 3) 荒木重臣ほか：昭61 塑性加工春季講演会，327 (1986)，p.383.
- 4) 小野信市ほか：塑性と加工，Vol.35, No.405 (1993)，p.1201.