製造工程における残留応力を考慮した 低速ディーゼル機関用組立型クランク軸の応力照査*

大 月 英 士** 梶 原 修 平*** 埴 洋 二****
濱 田 猛***** 久 保 晴 義**

Stress Assessment of Crankshaft of Low Speed Diesel Engines Considering Residual Stress in Manufacturing Process

By Eiji Otsuki, Shuhei Kajihara, Yoji Hanawa, Takeshi Hamada and Haruyoshi Kubo

Higher output and compactness is becoming the norm for low speed diesel engines. The gripping torque of shrink-fit on semi-build up crankshaft can be raised by taking advantage of its high yield point in new cast steel "Throw Grade 5". Instead, large oversized shrink-fit might induce higher residual stress in the pin fillet or overheating might cause decrease in the cold rolling effect in the pin fillet for short stroke crankshaft.

In this paper, a shrink-fit test of the actual crankthrow was carried out for a large oversized shrink-fit. It was accomplished without any decrease of the cold rolling effect in pin fillet. Finally, in order to confirm to safety stress analysis on the crankshaft of a large engine with Throw Grade 5 was made taking the residual stress due to shrink-fit and cold rolling into account.

1. はじめに

今日、エンジンメーカーによる低速2ストローク・ディーゼルエンジン機関の高出力化及びコンパクト化の傾向はますます高くなっている。その一方で、エンジンは負荷荷重などの厳しい条件に対する設計がされており、クランク軸にも高い品質と機械的性質が求められている。その要求に迅速に対応するため、高強度鋳鋼“スロー5種”を開発した。高強度鋳鋼スロー5種は表1に示すように、従来の鋳鋼・鍛鋼以上の引張強さに加え、降伏応力も高いことから、高い許容焼嵌め把握力を可能にしている。そのため従来以上の焼嵌め率（焼嵌め代／焼嵌め孔×100[%]）が採用されている。しかし、高い焼嵌め率を適用した場合、現行以上の焼嵌め代のため、フィレット部には高い内部残留応力が発生し得る。それに加え、大きい焼嵌め代を得るためには現行以上の加熱が必要である。そのとき、特に焼嵌め孔とピンフィレット部が近いショートストローク機関については、ピンフィレット部が高温にさらされる事が懸念される。

焼嵌めについての基本設計は、1970年代中期における研究活動を経過して確立された^{1)~4)}いくつかの実験

や数値解析によって疲労強度における焼嵌めの影響が証明されてきた。しかしながら、これらの調査は従来のクランクスロー用材料によるものであり、新鋼種についての焼嵌め率は過去に実施してきた試験の範囲外である。コンパクト化のため、最近の組立型クランク軸は従来以上の激しい鉛直曲げに加えて、水平曲げ、ねじりや軸変形による組み合わせ応力の影響を受けやすい。一方、最近では疲労強度を向上させる目的で、全ての鋳鋼製クランクスローのピンフィレット部に冷間ロール加工を実施している。そのため、製造工程における総合的な影響を評価する必要がある。

そこで本稿では、冷間ロール加工と焼嵌め工程によって発生する残留応力と工業的な作業の可否を確認するため、大型機関用の実物大クランクスローを用いて従来よりも高い焼嵌め率で焼嵌め試験を実施した。そして、機関実働状態での疲労強度を評価するために実働応力解析を行なった。

表1 クランクスロー材料の機械的性質

	神鋼呼称	MAN B&W 呼称	降伏応力 [MPa]	引張強度 [MPa]
鍛鋼	—	S34MnV	350	610
鋳鋼	スロー3種	S25VF	310	530
	スロー4種	S25VF-H	370	550
	スロー5種	S18NiVF	490	650

*原稿受付 平成18年7月12日。

**正会員 株式会社神戸製鋼所（高砂市荒井町新浜2-3-1）。

***正会員 三井造船株式会社（玉野市玉3-1-1）。

****正会員 株式会社神戸製鋼所（神戸市西区高塚台1-5-5）。

***** 株式会社神戸製鋼所（神戸市西区高塚台1-5-5）。

2. 製造工程におけるフィレット部の残留応力

2. 1 組立型クランク軸の製造工程概要 図1に組立型クランク軸の主な製造工程を示す。熱処理前の熱間ロール加工で、ピン及びピンフィレット表面付近のマイクロシユリネージを圧着させ、品質を向上させている。超音波探傷試験の後、ピンフィレット部に冷間ロール加工を行い、焼嵌めによってスローとジャーナル軸を一体化させる。これら製造工程において、特に冷間ロール加工と焼嵌めによって発生する残留応力が最終製品に関連する工程として挙げられる。

2. 2 冷間ロール加工効果と加熱温度の関係 ピンフィレット部の疲労強度を向上させるため、鋳鋼製クランクスローには冷間ロール加工を行っている。図2に冷間ロール加工の状況を示す。ワークロールがフィレット表面を加圧しながら移動することによって接触表面を強化している。このとき同時に、バックアップロールがピン反対側から支持をしている。この工程によってフィレット表面に圧縮残留応力が付与され、さらに焼嵌め時の引張応力発生も抑えている。また、フィレット部の硬度と表面粗さも改善されている。

しかし、冷間ロール加工の疲労強度を向上させる効果は、加熱温度によって低減する可能性がある事が小型材の試験でわかっている。試験に用いた引張試験の結果を表2に示す。図3に小型ロール加工機で試験片のノッチ部に加工している様子を示す。この設備では、試験片を回転させながら試験片ノッチ部をワークロールで加圧する事により加工している。加工後の試験片を各温度について5時間加熱保持し、室温まで空冷した。上記の方法で加工した試験片で、応力階差法による疲労試験を実施した。表3に疲労試験の各条件を示す。図4に示すようなR2 ノッチ付φ10 試験片を用いて、回転曲げ疲労試験を実施した。図5に試験結果として、加熱温度と疲労強度の関係を示す。図5より、加熱していない試験片については、ロール加工後の疲労強度の方が約2倍程度に向上していることがわかる。ここで、ロール加工後の疲労強度は、加熱温度400℃までは一定であるが、400℃を超えて温度上昇し続けると、疲労強度は徐々に低下していく。また、硬度においても、400℃以上の温度で低減することが確認されている。それゆえ製造工程中は、400℃以下の温度に管理する事が重要となる。この特性は、化学成分が似ている他の鋳鋼品に関しても同様の傾向があると考えられる。

図1 鋳鋼製クランク軸の製造工程

図2 冷間ロール加工の状況

表2 引張試験結果 (室温)

材料	試験片	降伏 応力 [MPa]	引張 強さ [MPa]	伸び [%]	絞り [%]
スロー4種	Spec.	≥370	≥550	≥20	≥35
	No. 1	407	599	28	62
	No. 2	409	596	26	56

表3 疲労試験条件

材料	スロー4種
試験様式	回転曲げ(R=−1)
試験速度	3200rpm
試験方法	階差法(10 ⁷ Cycles)

図3 試験片用冷間ロール加工の概略

図4 R2 ノッチ付疲労試験片

図5 加熱温度と疲労強度の関係

3. 焼嵌め試験

3. 1 試験用クランクスローの概要 実物大のクランクスローを用いて、焼嵌め試験を実施した. 本試験用スローは、図1で示した工程で製造しており、ピンフィレット部には冷間ロール加工を施している. 形状は、MAN B&W K98MC 機関仕様のスローである. 図6に本試験用のクランクスロー及びジャーナル軸形状と引張試験片の採取位置をそれぞれ示す. なお、焼嵌め試験には、焼嵌め孔の膨張とフィレット温度の挙動を明確にすることを目的としたため、スロー材は入手性を考慮してスロー3種を用いた. 表4に、スローとジャーナル軸から採取した試験片の引張試験結果を示す. 試験結果はすべて仕様を満足していた.

焼嵌め試験の条件を表5に示す. 本試験では、焼嵌め率 0.299%を目標値とした. 本スローの焼嵌め孔径における最大焼嵌め率は、スロー5種の降伏応力 490MPaを考慮すると IACS ルール⁶⁾の式(1)より 0.318%と算出される.

$$Z_{\max} \leq D_s \cdot \left(\frac{\sigma_{sw}}{E_m} + \frac{0.8}{1000} \right) \quad (1)$$

ここで、Z_{max} は最大焼嵌め代、D_sは焼嵌め孔直径、σ_{sw}はクランクスロー材の最小降伏応力、E_mはヤング率である.

3. 2 焼嵌め工程 図7に焼嵌め工程における各作業の状況を示す. 最初に、焼嵌め孔周りをウェブの間に設置したバーナで加熱し、作業代を含むジャーナル軸直径まで膨張させる. 次に、バーナ炎を消火した直後に、焼嵌め孔へジャーナル軸を挿入する. その後空冷やファン冷却で焼嵌め孔を収縮させてジャーナル

軸と一体化させる. この焼嵌め工程で焼嵌め代を大きくとれば焼嵌め把握力を高くすることができる. しかし、大きい焼嵌め代を確保するためには長時間のバーナ加熱が必要であり、フィレット部が高温にさらされる事が懸念される. そのため、先述した冷間ロール加工の効果を確保するために、フィレット部の温度を管理する必要がある.

a)クランクスロー

b)ジャーナル軸

■: 引張試験片の採取位置

図6 試験スロー及びジャーナル軸の形状 (K98MC 形状)

表4 スロー及びジャーナル軸の引張試験結果

材料	試験片	降伏 応力 [MPa]	引張 強さ [MPa]	伸び [%]	絞り [%]
スロー3種 (クランクス ロー)	Spec.	≥310	≥530	≥20	≥45
	No. 1	374	567	25.5	47.7
	No. 2	383	577	30.3	66.2
S34MnV (ジャーナル 軸)	Spec.	≥350	≥610	≥18	≥40
	No. 1	368	695	26.3	50.8
	No. 2	369	700	25.8	54.0

試験片: φ6×G.L. 30mm (JIS 14A 号)

表5 焼嵌め条件

焼嵌め孔直径 D _s	mm	1090.08
焼嵌め代 Z	mm	3.26
焼嵌め率	%	0.299
式(1)による最大焼嵌め率	%	0.318

図7 焼嵌め工程

3.3 焼嵌め試験 図8に焼嵌め試験の計測位置を示す。フィレット部の温度は図9に示す位置に熱電対を計5点取付けて計測した。図10に焼嵌め孔の各位置における膨張率（昇温中の焼嵌め孔膨張径/加熱前の焼嵌め孔径[%]）と加熱時間及び加熱温度との関係を示す。焼嵌め孔の膨張率は、加熱されているウェブ内面側のトップ・ボトム方向が最も大きく、外側の左・右方向が最も小さかった。焼嵌め孔径の最小膨張率が、作業代を含む焼嵌め率を超えるまで加熱し続けた。本試験では、バーナ点火から約9時間後にジャーナル軸を挿入でき、フィレット部の最高温度は約200℃であった。また、今回の計測結果では、5点とも同等の温度履歴を示していた。これらの結果から、フィレット部の温度が400℃以下までならば加熱時間を延長し、焼嵌め代を現行以上に拡張できると考えられる。すなわち、高温によって冷間ロール効果を減少させることなく、（焼嵌め率を上げて）焼嵌め把握力を高くすることができる。

図8 焼嵌め膨張径の各計測点

図9 焼嵌め時の測温位置

図10 焼嵌め孔膨張率と加熱時間及び温度の関係

3.4 製造工程の残留応力計測 ショートストロークタイプのクランク軸において、フィレット部は焼嵌めと冷間ロール加工の影響を特に受ける。上記2工程の影響を評価するため、焼嵌め試験後スローのフィレット部の残留応力を計測した。なお、スロー材はスロー5種よりも降伏応力の低いスロー3種だが、焼嵌め孔周りの降伏は局所的であり、フィレット部までは距離があるため、フィレット部の残留応力は同等と考える。計測の手法には、破壊法（切断法）を用いた。手順としては、ロゼットゲージ（3軸ひずみゲージ）を図11に示す位置に貼り付け、ゲージ周囲を最小片（10×10×3mm）にまで切断した。そして、そのときに開放されたひずみと切断前の初期ひずみとの差分から残留応力を算出した。

焼嵌めと冷間ロール加工によってフィレット部に発生した残留応力を図12、13にそれぞれ示す。図12は半径方向の残留応力 σ_r 、図13は円周方向の残留応力 σ_θ をそれぞれ示している。

図12、13の横軸は、図11におけるフィレットR部分の各角度を表している。本計測結果では、フィレット部の残留応力は概ね圧縮であった。

図12に示されているように、半径方向の残留応力 σ_r はピン直下位置（A1）にて、最も圧縮応力が高くなる³⁾。この理由は、ピン直下部分が焼嵌めによって最も圧縮応力が高くなるためである。しかしその一方で、A2及びA3位置では焼嵌めによって半径方向に引張応力が作用するため³⁾、その部分の冷間ロールによる圧

縮残留応力は少し低減されている。フィレットR部分の応力分布を考えると、30deg. 位置が冷間ロール加工の加圧方向となるため、最も高い圧縮残留応力を示している。その傾向は図13に示されている円周方向の残留応力 σ_θ についても確認できる。今回の計測結果では、最も焼嵌め孔に近かった位置(A1, -60deg.)の円周方向残留応力 σ_θ のみ引張残留応力を示した。これは、この計測位置(A1, -60deg.)が焼嵌めによって引張に作用したためと考えられる。それに加え、この位置は冷間ロール効果の範囲外であることも要因の一つと考えられる。しかし、この引張残留応力を示した部位は曲げ負荷による半径方向の実働応力が支配的であり、高い応力が発生するピンに近い部分より離れているので、円周方向の実働応力は非常に低い。

ピンフィレット部のほとんどの領域に、焼嵌めと冷間ロール加工の影響によって圧縮残留応力が発生している事を本計測結果から確認できた。

図11 残留応力の計測位置

図12 フィレット部各位置の半径方向残留応力

図13 フィレット部各位置の円周方向残留応力

4. 製造工程を考慮した応力評価

4.1 クランク軸の実働応力解析 スロー5種を適用しているクランク軸について、現行以上の焼嵌め代を考慮して実働応力解析を実施した。

表6に対象にした機関諸元を示す。この機関のクランク軸中間位置には、スロー5種材が2スロー使用されている。解析に用いた焼嵌め条件を表7に示す。最大焼嵌め代については、製造における作業代も含めている。

表6 対象機関諸元

型式	MITSUI-MAN B&W 10K98MC
出力	kW 57, 200
定格回転数	rpm 94
シリンダ数	10
ボア径	mm 980
ストローク	mm 2, 660
着火順序	1-8-7-3-5-9-4-2-10-6 (不等間隔)
スロー材料	Grade 3 (No. 1, 2, 3, 4) Grade 5 (No. 5, 6) Grade 4 (No. 7, 8, 9, 10)

表7 焼嵌め条件 (解析)

焼嵌め孔直径 D_s	mm	1, 090
焼嵌め代 Z	mm	3. 46
焼嵌め率	%	0. 317
ジャーナル軸直径 D_G	mm	1, 062
スロー材料の降伏応力 σ_{sw}	MPa	490
スロー材料の引張強さ σ_B	MPa	650
スロー材料の伸び $E. L.$	%	12

表7の条件で焼嵌め解析を実施し、焼嵌め応力を求めた。そして、No.6 スローについて解析された定格回転時の実働応力に、フィレット各位置における焼嵌め応力と冷間ロール応力⁷⁾を足し合わせた。

疲労強度における平均垂直応力の影響は修正グッドマン線によって評価した。平均せん断応力の影響は非常に小さいため考慮していない。平均応力の存在は疲労強度の変化につながる。平均応力に従って変動する疲労強度の代わりに、実働状態の応力については次のように修正した。

$$\sigma = (\sigma_a + \sigma_{add}) \frac{\sigma_B}{\sigma_B - \sigma_m}, \tau = \tau_a \tag{2}$$

ここで、 σ_a は変動垂直応力を、 σ_m は平均垂直応力を、 σ_B は引張強さを、 τ_a は変動せん断応力をそれぞれ示

している。 σ_{add} は IACS ルールによって示されている付加曲げ応力 30MPa である。

上記の複合応力は、式 (3) に示す Von Mises による等価応力で評価した。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3)$$

ピン直下からピン周方向の各角度におけるピンフィレット部の各最大応力を図 1 4 に示す。比較のため図 1 4 には、製造中に発生する残留応力の影響を含んでいない最大実働応力も示している。ここで、図 1 4 中の σ_{DW} は、式 (4) のように IACS ルールに示されているクランク軸の許容疲労強度である。本解析では、製造工程中の影響を含めた実働応力の方が、含めていない場合よりも安全側を示した。大きい焼嵌め代を適用した時においても、スローのフィレット部における応力は、製造工程の影響を考慮しても安全側である事が示された。

$$\sigma_{DW} = \pm K \cdot (0.42 \cdot \sigma_B + 39.3) \cdot \left[0.264 + 1.073 \cdot D_G^{-0.2} + \frac{785 - \sigma_B}{4900} + \frac{196}{\sigma_B} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_X}} \right] \quad (4)$$

ここで、K は表面処理をしていないクランク軸の製造方法の違いによる係数を（鋳鋼では $K=0.93$ ）、 σ_B はクランク軸材料の最小引張強さを、 D_G はピン直径を、 R_X はフィレット半径をそれぞれ示している。

図 1 4 フィレット部の最大等価応力

5. まとめ

加熱温度 400℃を超えなければ、冷間ロール加工によって向上した疲労強度が維持できる事を小型材の疲労試験で確認できた。

高強度鋳鋼“スロー 5 種”を適用した場合を想定し、焼嵌め率 0.299%の焼嵌め試験を行った。焼嵌め試験

は成功し、フィレット部の最大温度は約 200℃であった。加熱時間を可能な限り延長すれば、スロー 5 種の最大焼嵌め率 0.318%まで拡張し得ることが示された。

焼嵌め後のフィレット部の残留応力は、ほとんど圧縮の残留応力である事が確認できた。ピン直下の半径方向残留応力 σ_r は、冷間ロール加工と焼嵌めによって最大の圧縮応力を示した。しかし、焼嵌め孔に最も近い位置の円周方向残留応力 σ_θ は焼嵌めによって引張を示していた。

スロー 5 種を適用している MITSUI-MAN B&W 10K98MC 機関の実働応力解析より、安全性評価を実施した。焼嵌めや冷間ロール加工による残留応力を考慮しても、フィレット部が安全側である事を確認できた。

将来的に、スロー 5 種の高い降伏応力の優位性を用いることで、さらにコンパクトで高出力の船用主機関や陸上発電プラント用機関への適用が期待できる。

参考文献

- 1) The Report of Studies for Determining the Method of Practical Designing of Semi-Built-UP Type Crankshafts (Part 1), March 1975, The Ship-Machinery Manufacturers' Association of Japan.
- 2) The Report of Studies for Determining the Method of Practical Designing of Semi-Built-UP Type Crankshafts (Part 2), March 1976, The Ship-Machinery Manufacturers' Association of Japan.
- 3) The Report of Studies for Determining the Method of the Practical Designing of Long-Stroke Semi-Built-UP Type Crankshafts, March 1979, The Ship-Machinery Manufacturers' Association of Japan.
- 4) Fujita, H., Hoshino, J., Tsuta, T., Tsukada, Y. and Fukui, Y., Strength Design of Built-up Crankshaft, 12th International Congress on Combustion Engines (CIMAC) Tokyo, B8, (1977)
- 5) Donath, G., Seidemann, H., Tran of Inst. Of Marine Engineers, Vol.97, Paper 25, (1985), 2-26.
- 6) IACS, UR M53, Calculation of Crankshafts for I. C. Engines.
- 7) 濱田, 石橋, 長坂, 荒木, 高見, 冷間ロール加工による高強度クランク軸の疲労強度向上, (社) 日本材料学会関西支部, 1997, 46-53.