

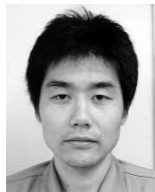
(技術資料)

組合せ荷重下にある組立型クランク軸のフィレット冷間ロール加工による疲労強度向上効果の予測

Prediction of Effects of Cold Rolling Method on Fatigue Strength Under Combined Loading



松田真理子*
Mariko MATSUDA



大月英士**
Eiji OOTSUKI



梶原修平***
Shuhei KAJIHARA



埴 洋二****
Yoji HANAWA



濱田 猛*****
Takeshi HAMADA

The cold rolling method is adopted to improve the fatigue strength of crankpin fillet for marine diesel engines. Under working conditions, combined bending and torsional loading occurs in crankpin fillet; therefore, combined axial and torsional fatigue tests under tensile or compressive mean stress were conducted to distinguish among the three methods of fatigue strength evaluation. Modified IACS and Findley criteria were confirmed to be methods on the safe side. By evaluating fatigue strength by these criteria, it was confirmed that compressive residual stresses from the cold rolling method improve fatigue strength on the pin fillet surface of semi-built crankshafts under working conditions.

まえがき＝当社の代表製品の一つである船用ディーゼル機関用のクランク軸は、フィレット部が最大応力発生部位となる。この部位の疲労強度向上を目的として当社は「冷間ロール加工技術」を開発した。本技術は加熱を伴わないため熱変形がなく、寸法精度や生産性に優れる。このため、1970年より鋳鋼製組立型クランク軸に適用を開始し、1995年以降に一部の一体型クランク軸に適用した事例もあり、当社の差別化技術の一つとなっている。

冷間ロール加工は、加工硬化による硬度上昇と圧縮残留応力付与の両方の効果によってフィレット部の疲労強度を向上させる技術である。硬さと疲労強度には相関があるため、硬度上昇の効果は比較的容易に予測可能であるが、圧縮残留応力の場合はフィレット部に働く応力状態によってその効果が異なる。クランク軸のフィレット部には曲げとねじりの組合せ荷重が発生するため、冷間ロール加工による圧縮残留応力の疲労強度向上効果を精度良く予測するためには、組合せ荷重を考慮した疲労強度評価法を適用する必要がある。

本稿では、冷間ロール加工による圧縮残留応力の疲労強度向上効果を予測するために、平均応力を伴う組合せ荷重下の疲労試験を行い、これまで多数提案されている組合せ荷重を考慮した疲労強度評価法の中から取上げた三つの手法の有効性を評価した。また、鋳鋼製組立型クランク軸のピンフィレット部を対象に組合せ荷重を考慮した疲労強度評価法を適用し、冷間ロール加工による圧縮残留応力のみが疲労強度に与える効果を予測した。

1. 従来結果のまとめ

1.1 小形冷間ロール加工試験による評価¹⁾

図1に小形冷間ロール加工試験の概要を示す。対象材

料には当社の鋳鋼製組立型クランク軸の代表鋼種の一つであるスロー3種材を使用している。化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。φ10mm試験片に設けたUノッチ部に冷間ロール加工を施し、回転曲げ疲労試験を実施した。その結果を図2に示す。同図では横軸に平均応力を、縦軸に疲労強度を表示し、硬度上昇を考慮し

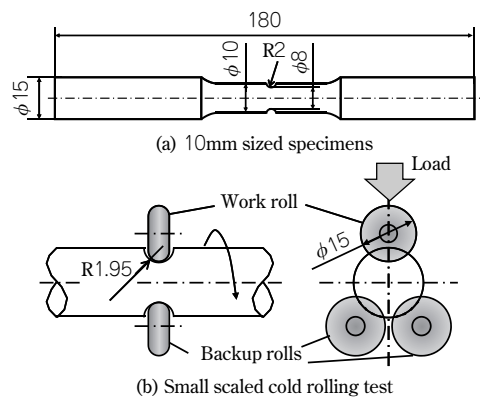


図1 小形冷間ロール加工試験概要

Fig. 1 Outline of small scaled cold rolling test using φ10mm sized specimens

表1 スロー3種材の化学成分
Table 1 Chemical composition of "Throw Grade3"

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	Ni%	V%
Spec. "Throw Grade3"	0.25*	0.35*	1.0*	≤ 0.50	≤ 0.30	≤ 0.50	0.08*

* nominal

表2 スロー3種材の機械的性質
Table 2 Material property of "Throw Grade3"

Specimen	Tensile strength (MPa)	Yield point (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Spec. "Throw Grade3"	≥ 530	≥ 310	≥ 20	≥ 45

*鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 **鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鋳鍛鋼工場 鍛圧部 ***三井造船(株) 機械・システム事業本部 機械工場 ディーゼル設計部 ****技術開発本部 機械研究所 *****技術開発本部 機械研究所 (現 コベルコクレーン(株))

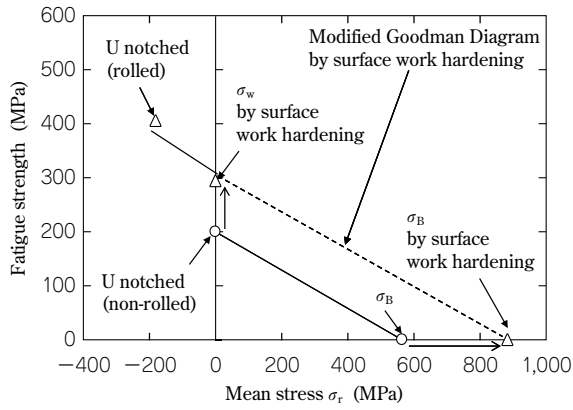


図2 疲労試験結果

Fig. 2 Effects of surface work hardening and residual stress on fatigue strength of $\phi 10\text{mm}$ sized specimens after cold rolling

た引張強さ σ_B と疲労強度 σ_w を用いた修正 Goodman 線図を表示している。冷間ロール加工を施した試験片の疲労強度は、圧縮残留応力を平均応力として扱うと、硬度上昇を考慮した修正 Goodman 線図に良く一致していることがわかる。以上より、スロー3種材の冷間ロール加工による疲労強度向上要因は、加工硬化による硬度上昇と圧縮残留応力であり、また圧縮残留応力は平均応力として取扱うことが可能であることがわかる。

1.2 実体クランク軸の残留応力分布²⁾

当社製品の大型組立型クランク軸のなかからシリンダ径980mmのK98MCタイプの実物大スローをスロー3種材で製造し、冷間ロール加工後の残留応力を計測した。K98MCタイプのスロー形状を図3に示す。また図4、図5にそれぞれ、残留応力の計測位置および計測結果を示す。図5より、半径方向および円周方向共に、ピンフィレット表面には400MPa程度の圧縮残留応力が付与されていることがわかる。

1.3 組合せ荷重を考慮した疲労強度予測法

ディーゼル機関用クランク軸に関する国際船級協会連合の統一規則(IACS UR M53, 以下 IACS ルールという)³⁾において、曲げ応力とねじり応力を考慮した評価式が適用されている。ただし、IACS ルールでは変動応力の応力振幅のみに着目して平均応力の効果を含めない。このためここでは、既報²⁾と同様に修正 Goodman 線図式に基づき曲げ応力振幅を修正する手法を取入れた。式(1)に修正 Goodman 線図式を、式(2)に IACS ルールを一部修正した評価式を示す。なお、ねじり応力に関しては一般に平均応力の影響が小さいとされているため、平均応力の影響は無視した。

$$\sigma'_{ra} = \sigma_{ra} / \left(1 - \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_B} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\sqrt{\sigma'_{ra}{}^2 + 3\tau_a^2} = \sigma_w \dots\dots\dots (2)$$

- ここで、 σ_{ra} : フィレット部に働く曲げ応力振幅
- σ_{rm} : フィレット部に働く平均応力
- τ_a : フィレット部に働くねじり応力振幅
- σ_B : 材料の引張強度
- σ_w : 材料の軸荷重または回転曲げ疲労強度を表す。

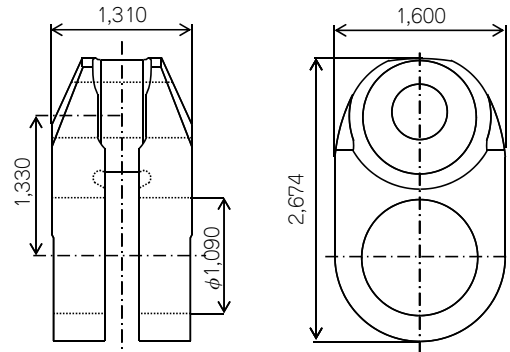


図3 K98MC クランクスロー形状
Fig. 3 Dimensions of K98MC throw

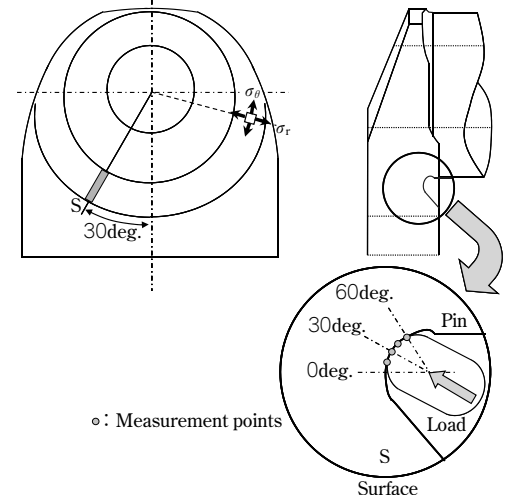


図4 残留応力測定位置
Fig. 4 Residual stress measurement points

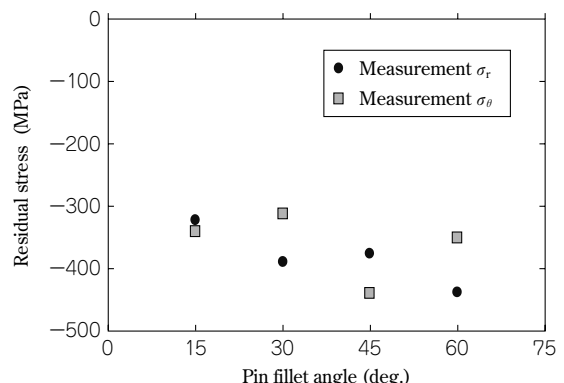


図5 ピンフィレット表面の残留応力測定結果
Fig. 5 Measured residual stresses on pin fillet surface

平均応力を伴う組合せ荷重下の疲労強度評価法の一つに、Mises 説に基づいて導かれた式(3)に示す Sines の式⁴⁾が提案されている。

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{ax} - \sigma_{ay})^2 + (\sigma_{ay} - \sigma_{az})^2 + (\sigma_{az} - \sigma_{ax})^2 + 6(\tau_{axy}^2 + \tau_{ayz}^2 + \tau_{axz}^2)} \\ & = A - B(\sigma_{mx} + \sigma_{my} + \sigma_{mz}) \end{aligned} \right\} (3)$$

$$A = \sigma_{w,R=-1}, B = \frac{\sigma_{w,R=-1}}{\sigma_{w,R=0}} - 1$$

- ここで、 σ_{ai} ($i = x, y, z$) : x, y, z 方向の応力振幅
- σ_{mi} ($i = x, y, z$) : x, y, z 方向の平均応力
- τ_{aj} ($i, j = x, y, z$) : x, y, z 面に働くせん断応力振幅
- $\sigma_{w,R=-1}$: 両振り条件での軸荷重疲労強度
- $\sigma_{w,R=0}$: 片振り条件での軸荷重疲労強度

を表す。

組合せ荷重に位相差が存在する場合も考慮した疲労強度評価法の一つに、内部摩擦説に基づく Findley の評価法 (式 (4))⁵⁾ が提案されている。Findley 説では、破断を起こす面は主応力の方向から θ 傾いた面であり、面の方向 θ は式 (4) の左辺が最大になる条件で決まるとされている。

$$(\tau_{\theta} + k\sigma_{\theta})_{\max} = f \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

τ_{θ} : 主応力の方向から θ 傾いた面のせん断応力振幅

σ_{θ} : 主応力の方向から θ 傾いた面の垂直応力振幅

を表す。また、 k, f は材料によって決まる定数であり、荷重条件が異なる二つの疲労強度から求めることができる。ここでは両振りと片振りの軸荷重疲労強度を使用する式 (5) を適用した。

$$\frac{\sigma_{w,R=0}}{\sigma_{w,R=-1}} = \frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2k + \sqrt{1+4k^2}}, f = \frac{k + \sqrt{1+k^2}}{2} \sigma_{w,R=-1} \dots\dots (5)$$

本稿では上記三つの組合せ荷重を考慮した疲労強度評価法を取上げ、疲労試験結果と実機フィレット部の評価に適用した。以下、式 (1) および式 (2) を用いた評価法を“Modified IACS”，式 (3) を“Sines”，式 (4) および式 (5) を“Findley”と表記する。

2. 疲労試験による疲労強度予測法の有効性評価

2.1 材料および試験片

スロー 3 種材を使用し、軸荷重とねじり荷重を同位相で負荷した組合せ荷重下の疲労試験を実施した。同時に各種の疲労強度評価に必要な材料定数を求めるために、軸荷重およびねじり荷重単独の疲労強度を求めた。各試験の試験片形状を図 6 に示す。

2.2 試験条件および結果

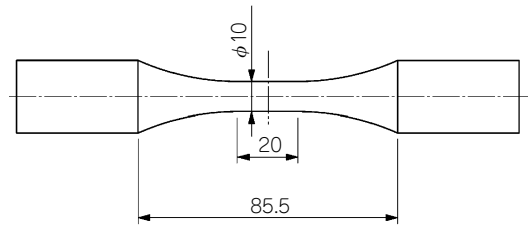
試験片本数に限りがあったため、いずれの疲労試験も低荷重条件から破断まで段階的に荷重を上げていく手法を取入れた。同荷重条件での繰返し数は、軸荷重疲労試験では 3×10^6 回とし、ねじりおよび組合せ荷重下の疲労試験では 1×10^6 回とした。

軸荷重疲労試験では、平均応力の影響を把握するために両振りおよび片振りの 2 条件で実施した。ねじり疲労強度は平均応力の影響を無視できると考え、平均応力のない条件で実施した。試験から求めた軸荷重およびねじり疲労強度は図 7 のとおりである。両振りおよび片振りの軸荷重疲労強度は修正 Goodman 線図と良く一致した。

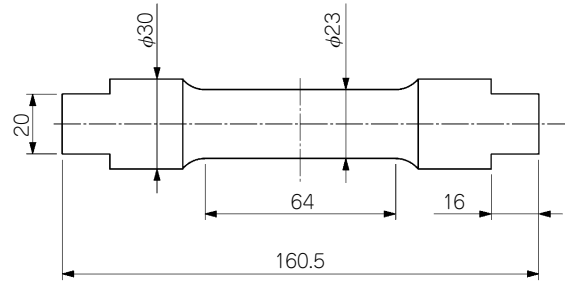
組合せ荷重下の疲労試験では、引張の平均応力有無の 2 条件に加え、冷間ロール加工で付与される圧縮残留応力を想定して圧縮の平均応力下での試験を実施した。引張の平均応力ありの条件では軸荷重およびねじり荷重の両方で片振り条件とし、圧縮の平均応力ありの条件では軸荷重に -200MPa の一定値の平均応力を与え、ねじり荷重は片振り条件とした。試験条件と結果を表 3 に示す。

2.3 疲労強度評価法の比較

本稿で取上げた三つの疲労強度評価法を適用し、組合せ荷重下の疲労試験結果を評価した。各手法の評価結果の比較を図 8 に示す。縦軸には各評価式の右辺の値を左



(a) Axial fatigue test



(b) Torsional or combined loading fatigue test

図 6 疲労試験片形状

Fig. 6 Dimensions of fatigue test specimen

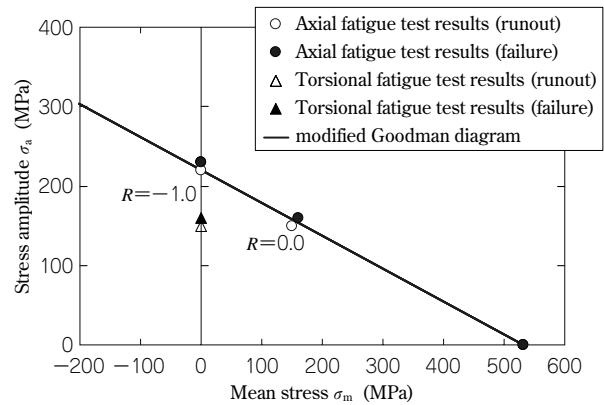


図 7 軸荷重およびねじり疲労試験結果

Fig. 7 Results of Axial and torsional fatigue test

表 3 組合せ荷重下の疲労試験結果

Table 3 Fatigue test results under combined loading

Axial-torsion fatigue tests	Axial stress		Torsional stress		Result
	Amplitude	Mean	Amplitude	Mean	
without mean stress	143.8	0.0	115.0	0.0	runout
	149.9	0.0	120.0	0.0	failure
with tensile mean stress	130.0	130.0	65.0	65.0	runout
	140.0	140.0	70.0	70.0	failure
with compressive mean stress	200.0	-200.0	100.0	100.0	runout
	210.0	-200.0	105.0	105.0	failure

辺の値で割った値を示した。右辺の値は図 7 に示した単軸方向の疲労試験結果の応力振幅を用いて計算した。右辺の値は材料固有に決まる値であり、左辺と右辺の一致する条件が疲労限度となる。

疲労強度評価に要求される精度は、最低でも破断条件で図 8 の縦軸が 1.0 を下回ることであり、未破断条件で縦軸が 1.0 を下回る場合は安全側の評価であるといえる。図 8 によると、平均応力なしの条件と引張の平均応力ありの条件ではいずれの手法も安全側の評価となったが、圧縮の平均応力ありの条件では“Sines”の評価は大幅に危険側の評価となった。“Modified IACS”と“Findley”の

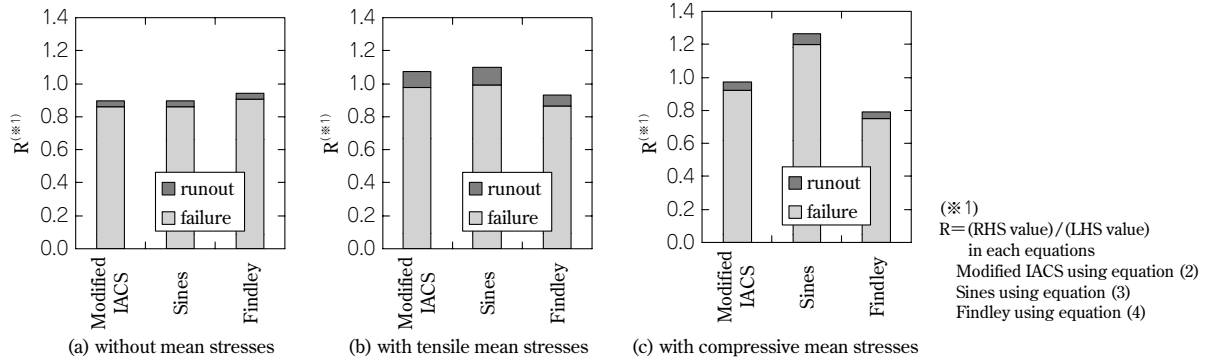


図8 組合せ荷重を考慮した疲労強度評価法の比較
 Fig. 8 Comparison of criteria under combined loading

手法は平均応力条件にかかわらず安全側の評価となり、“Modified IACS”は三つの中では一番精度が良い結果となった。

3. フィレット冷間ロール加工の効果予測

既報²⁾と同様に MITSUI-MAN B&W 8K98MC-C 機関を取上げ、エンジン稼動時のピンフィレット部に発生する応力を実働応力解析にて求めた。表4に対象機関の諸元を示す。またピンフィレット部の応力が最大となる No.8 シリンダのフィレット角度(図4で定義した角度)30度位置の応力履歴を図9に示す。同図より3つの応力成分にはほとんど位相差が見られず、ピン周方向応力 σ_θ は半径方向応力 σ_r およびせん断応力 τ と比べ応力振幅および平均応力共に小さいことがわかった。

エンジン稼動時の No.8 シリンダのピンフィレット部に発生する応力を対象に、図8の結果で安全側の評価となった“Modified IACS”および“Findley”の評価を適用した。ピンフィレット部の組合せ荷重を考慮した疲労強度評価結果を図10に示す。ここでは冷間ロール加工の影響を考慮していない。“Modified IACS”ではピン周方向応力 σ_θ を考慮できないため、“Findley”においてピン周方向応力の影響を確認したところ無視できることがわかった。いずれの評価においても、現状の発生応力では疲労限度以下となり、“Findley”の評価は“Modified IACS”よりもかなり安全側の評価となった。

つぎに、冷間ロール加工の圧縮残留応力がピンフィレット部の疲労強度に与える効果を確認した。ピンフィレット部の発生応力を片振り条件に固定し、“Modified IACS”の式(2)および“Findley”の式(4)において右辺と左辺の値が一致する限界応力を求め、圧縮残留応力が限界応力に与える効果を確認した。曲げ応力とねじり応力の比は図9のエンジン稼動時の最大応力の比と同様に1/2に固定し、冷間ロール加工による圧縮残留応力は図5の実測結果を使用した。“Modified IACS”および“Findley”の評価から求めたピンフィレット部の限界応力と、冷間ロール加工による圧縮残留応力が限界応力に与える効果を図11に示す。同図より、“Findley”の評価は“Modified IACS”よりも安全側の評価となったが、圧縮残留応力が限界応力に与える効果はほぼ同等の評価となった。また、ピンフィレット表面は冷間ロール加工による圧縮残留応力の効果で限界応力が約40%向上する

表4 対象機関諸元
 Table 4 Particular of studied engine

Type	MITSUI-MAN B&W 8K98MC-C	
Output	kW	45,680 (62,080HP)
MCR	rpm	104.0
Cylinder number		8
Cylinder bore	mm	980
Stroke	mm	2,400
Firing order		1-8-3-4-7-2-5-6
Throw material		Grade 3 (Cast steel)

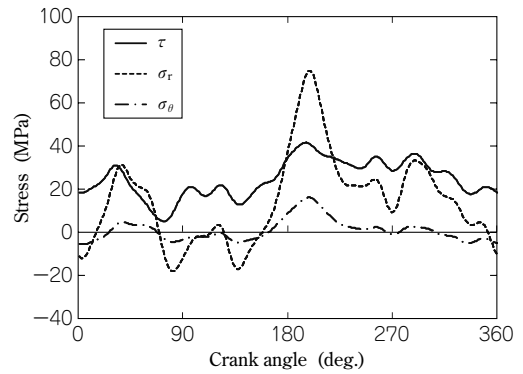


図9 ピンフィレット部の応力履歴 (No.8cyl. pin fillet angle=30deg.)
 Fig. 9 Surface stress history of pin fillet (No.8cyl. pin fillet angle=30deg.)

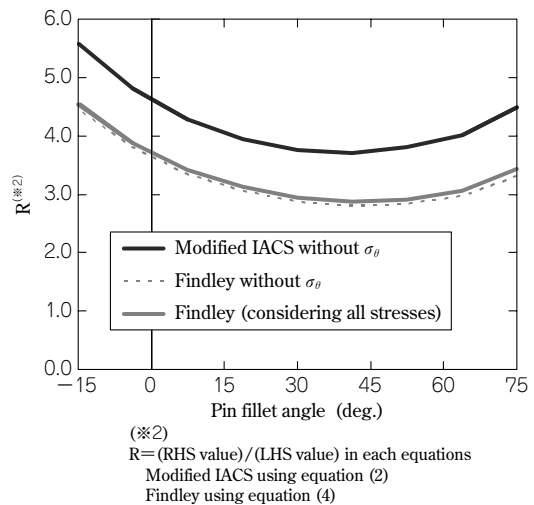


図10 ピンフィレット部の組合せ荷重を考慮した疲労強度評価結果 (No.8cyl.)
 Fig.10 Evaluation of fatigue strength under combined loading of pin fillet (No.8cyl.)

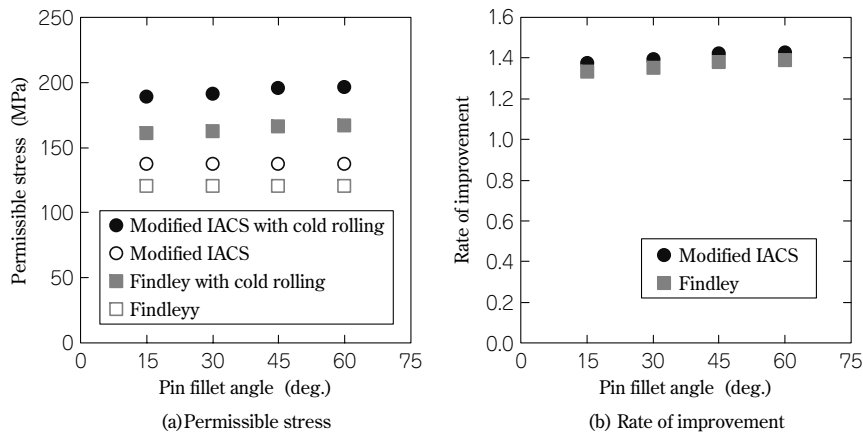


図11 冷間ロール加工によるピンフィレット部の限界応力向上効果
 Fig.11 Rate of improvement of pin fillet permissible stress by cold rolling

ことがわかった。

本稿より、冷間ロール加工による圧縮残留応力がフィレット部の疲労強度に与える効果を評価する上では、“Modified IACS”と“Findley”の手法はほぼ同等の評価となった。“Findley”の評価はすべての応力成分と位相差を考慮することが可能であるが、式(4)の左辺が最大になる条件を見つけるために繰り返し計算が必要である。本稿で取上げた応力条件はピン周方向応力を無視することが可能であり、位相差もほとんど存在しなかったため、“Modified IACS”でも十分に精度良く評価可能であった。曲げとねじりのみの組合せ応力下で位相差がない場合には、“Modified IACS”は非常に簡便で有効な評価法であるといえる。

むすび＝冷間ロール加工の影響を平均応力として考慮した組合せ荷重下の疲労試験を実施し、組合せ荷重を考慮した三つの疲労強度評価法の有効性を評価した。その結果、“Modified IACS”と“Findley”の評価は平均応力条件

にかかわらず安全側の評価となることがわかった。また、曲げとねじりのみの組合せ応力下で位相差がない場合には、“Modified IACS”は非常に簡便で有効な評価法であることがわかった。

同評価手法をエンジン稼働時のピンフィレット部に適用した結果、冷間ロール加工による圧縮残留応力の効果でピンフィレット部の限界応力が約40%向上することがわかった。本稿では冷間ロール加工による加工硬化の影響を考慮しておらず、加工硬化の影響が大きい材料ではさらなる疲労強度向上が期待できる。冷間ロール加工技術は既に実用化されており、今後も積極的に活用されることを期待する。

参 考 文 献

- 1) 濱田 猛ほか：日本鉄鋼協会，第131回春季講演大会，pp.394.
- 2) 松田真理子ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.59, No.1 (2009)，pp.89-93.
- 3) IACS UR M53：Calculation of Crankshafts for I. C. Engines.
- 4) G. Sines：NACA Tech. Note, 3495 (1955).
- 5) W. N. Findley：J. Eng. Ind., Nov.(1959)，pp.301-306.