

冷間ロール加工による一体型クランク軸の疲労強度の向上

長坂英明*・森 啓之(工博)*・荒木重臣*・石橋保樹*・濱田 猛**・高見元彦***

* 鑄鋼工場・技術部 ** 技術開発本部・機械研究所 *** 鑄鋼工場・製造部

Fatigue Strength Improvements of Solid Type Crankshafts through Fillet Cold Rolling

Hideaki Nagasaka・Dr Hiroyuki Mori・Shigeomi Araki・Yasuki Ishibashi・Takeshi Hamada・Motohiko Takami

The effect of fillet cold rolling was studied in the fatigue strength of a solid type forged crankshaft with a high tensile strength. It was found that fatigue strength increases were mainly due to compressive residual stress generated by cold rolling. The increasing fatigue strength rate could be estimated with compressive residual stress and Hertzian contact pressure. Based on these results, an actual production size fatigue test was performed, and an approximate 1.8 times improvement in fatigue strength was achieved by fillet cold rolling.

まえがき = 近年、船舶や陸上発電にもちいられている中・高速ディーゼルエンジンはますます高出力化する傾向にあり、低燃費化とエンジンのコンパクト化の要求も強い。このためエンジン主要機関部品であるクランク軸においては、従来にもまして高強度化が求められている。クランク軸において最大のウィークポイントは曲げ変形により高応力が発生するフィレット部であるため、高強度材料をもちいてさらにこの部分を強化することができれば、設計上からも有利になるとともに、信頼性の高いクランク軸が製造可能となる。

フィレット部の疲労強度向上方法としては、冷間ロール加工、高周波焼入、窒化、ショットピーニングなどが挙げられる¹⁾²⁾。中でも冷間ロール加工法は加熱をとまなわないため熱変形もなく、寸法精度、生産性に優れるという点から、当社ではすでに1970年より鑄鋼製組立型クランク軸に適用しており、ロール加工していない場合と比較して疲労強度が約1.8倍向上することを確認している³⁾⁴⁾。しかし、材質の異なる場合の疲労強度向上率への効果やその強化機構が明確にされていなかったことから、高強度低合金鋼材をもちいる一体型クランク軸においては適用されていなかった。

そこで、高強度低合金鋼材に様々な条件でロール加工を施した試験片をもちいて疲労試験をおこない、疲労強度に及ぼす材料の加工硬化量や圧縮残留応力の影響を検討するとともに、ロール加工条件と疲労強度の関係についての定量化をおこなった。さらに実製品サイズのクランク軸の疲労試験をおこない、疲労強度向上策として冷間ロール加工法が有効であることを確認した。

1. 実験装置および方法

1.1 試験片

供試材料は鍛鋼製クランク軸に使用されている構造用低合金鋼のSCM440相当材である。熱処理は870℃に加熱後油焼入れし、620℃で焼戻し処理した。化学成分および機械的性質を第1表に示す。試験片の寸法および形状を第1図(a),(b)に示す。第1図(a)は直径100mmの丸棒にR7mmのUノッチを付けた切欠き試験

片(以下、100mm試験片と呼ぶ)であり、曲げ応力集中係数は2.0である⁵⁾。第1図(b)はクランク軸の1スロー分を実生産のクランク軸と同様の製造工程で製作したもの(以下、実体クランク軸と呼ぶ)であり、フィレット半径は14.5mmとした。

1.2 ロール加工装置

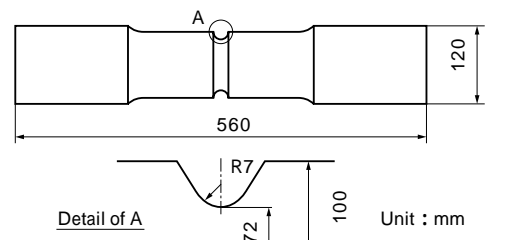
各試験片にロール加工を施すために使用した装置の概

第1表 試験材の化学成分および機械的性質

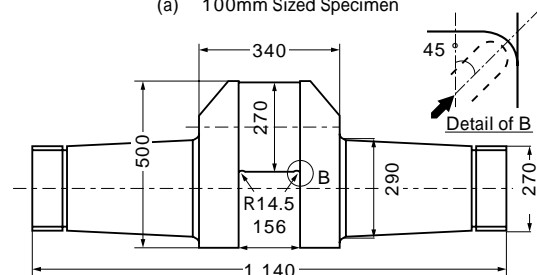
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of specimens

Chemical Compositions mass%								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.43	0.26	0.73	0.011	0.005	1.07	0.22	0.44	0.093
Mechanical Properties								
Proof Stress MPa	Tensile Strength MPa	Elongation %	Reduction of Area %		Impact Energy J*			
800	941	17	60		44			

*5mm U Notch



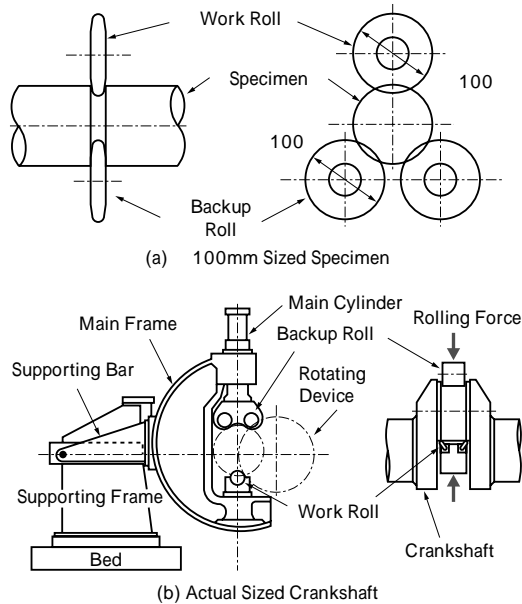
(a) 100mm Sized Specimen



(b) Actual Sized Crankshaft Specimen

第1図 試験材の寸法および形状

Fig. 1 Dimension of specimens



第2図 冷間ロール加工装置の概略図
Fig. 2 Schematic illustration of fillet cold rolling equipments

略を第2図(a),(b)に示す。本装置はいずれも試験片を回転させる装置とフィレット部にロール加工を施すための加圧装置から構成される。加圧力を加圧装置により調整し、試験片を回転させることによってフィレット部全周にわたってロール加工を施した。

なお、今回使用したワークロール先端半径 R_2' は、100mm 試験片では 5.6mm、実体クランク軸では 13.8mm である。

1.3 ロール加工条件

第3図に示すように、疲労強度向上率を十分に達成するロール加工条件を把握するためには、ワークロール先端半径 R_2' など様々な影響因子が存在する。そこでこれらをヘルツの接触論⁶⁾による最大接触面圧（以下、ヘルツ面圧と呼ぶ）の考え方をもちいて整理した。ヘルツの接触論によれば、加圧荷重 P によりワークロール接触面に長半径 a 短半径 b なる接触楕円が形成され、ヘルツ面圧 p_0 は式(1)で表される。

$$p_0 = 1.5 P / (\pi \cdot a \cdot b) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ただし, } a = 0.0188 \cdot m \cdot (P/A)^{1/3},$$

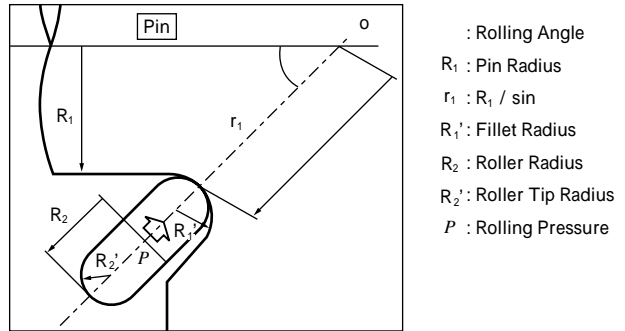
$$b = 0.0188 \cdot n \cdot (P/A)^{1/3}$$

A m n : ピン半径 R_1 , フィレット半径 R_1' ,
ワークロール半径 R_2 , ワークロール先端半径 R_2' によって定まる定数

今回実施したロール加工条件、およびヘルツ面圧を第2表に示す。

1.4 疲労試験装置

疲労試験は 100mm 試験片、実体クランク軸ともに写真1および第4図に示す共振型疲労試験装置⁷⁾をもちいた。試験機は加振機から与えられる振動により試験片に曲げ応力を発生させるものである。疲労試験は共振現象を利用し固有振動数に近づけていくことで曲げ応力振幅を増加させ、フィレット底に貼付した歪みゲージにより応力を監視して実施した。



第3図 冷間ロール加工の影響因子
Fig. 3 Parameters of fillet cold rolling

第2表 冷間ロール加工条件

Table 2 Condition of fillet cold rolling

Specimen	Roll Tip Radius mm	Rolling Force kN	Hertzian Contact Pressure MPa
100mm	5.6	6	2 940
		20	4 410
		28	4 900
		56	6 180
Actual Sized Crankshaft	13.8	80	2 070
		128	3 620

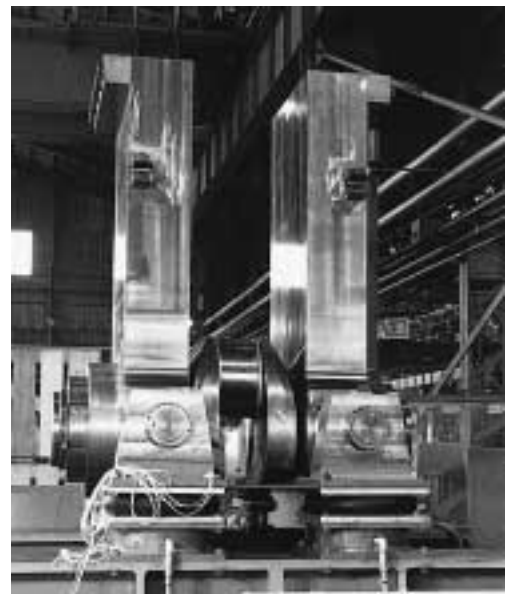
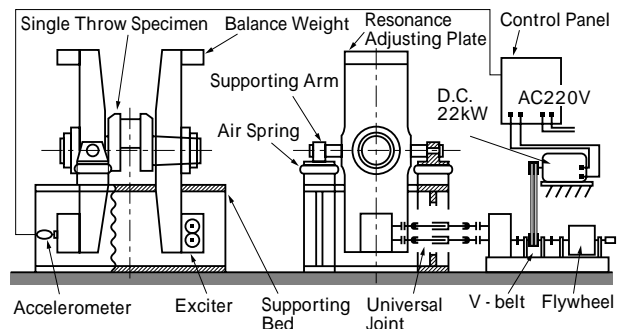
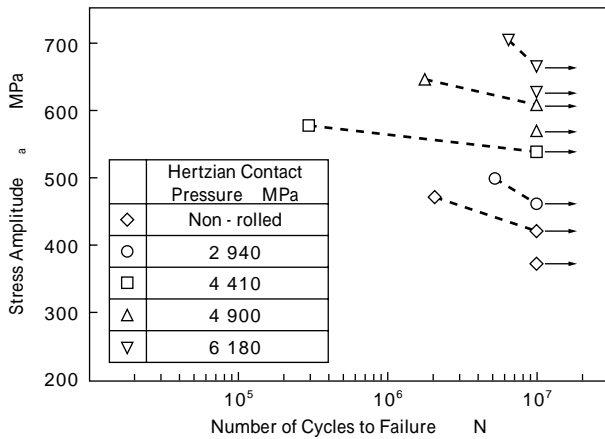


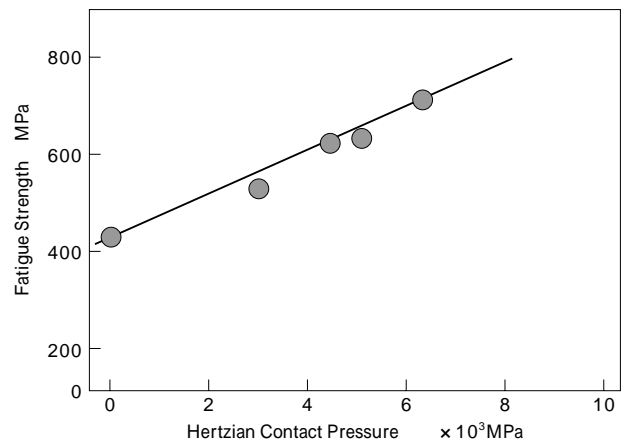
写真1 共振型疲労試験機
Photo.1 Fatigue test machine



第4図 疲労試験機の概略
Fig. 4 Schematic illustration of fatigue test machine



第5図 100 mm 試験材の疲労試験結果 (応力階差法)
Fig. 5 Fatigue test results of 100 mm sized specimens (Step method)



第6図 疲労強度に及ぼすヘルツ面圧の影響
Fig. 6 Effect of Hertzian contact pressure on fatigue strength

2. 実験結果および考察

2.1 100mm 試験片による疲労強度向上要因の検討

2.1.1 疲労試験結果

様々な条件でロール加工を施した試験片の疲労試験結果 (S-N 曲線) を第5図に示す。同図には比較のためにロール加工を施していない場合の疲労試験結果も併記した。本試験はある応力水準を 1×10^7 回繰返し、未破断の場合には順次応力振幅を増加させる応力階差法によっておこない、もっとも大きな未破断応力を疲労強度とした。ヘルツ面圧と疲労強度の関係を第6図に示す。同図より疲労強度はヘルツ面圧の増加とともに直線的に増加することがわかる。疲労強度が向上する要因としては、表面粗さの改善, 加工硬化, 表面に生成する圧縮残留応力などの影響が考えられる。以下ではこれらの向上要因について考察をおこなった。

2.1.2 表面粗さ測定結果

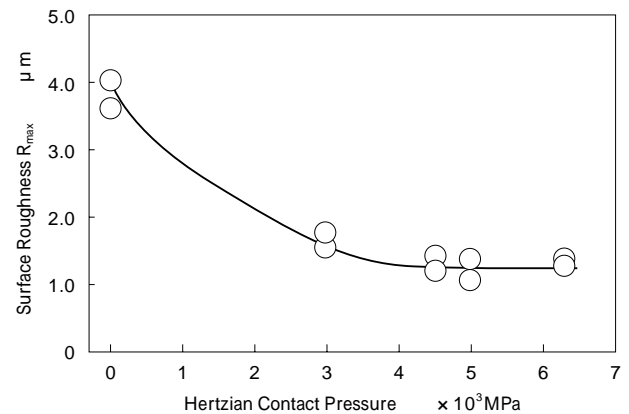
様々な条件でロール加工を施した試験片表面の軸方向の最大粗さ (R_{max}) を測定した結果を第7図に示す。ロール加工を施すことによって R_{max} が $1.3 \mu\text{m}$ まで低減するが、 $4 \times 10^3 \text{MPa}$ 以上のヘルツ面圧では R_{max} の変化は少ないことから、表面粗さの疲労強度への影響は小さいと思われる。

2.1.3 硬さ分布測定結果

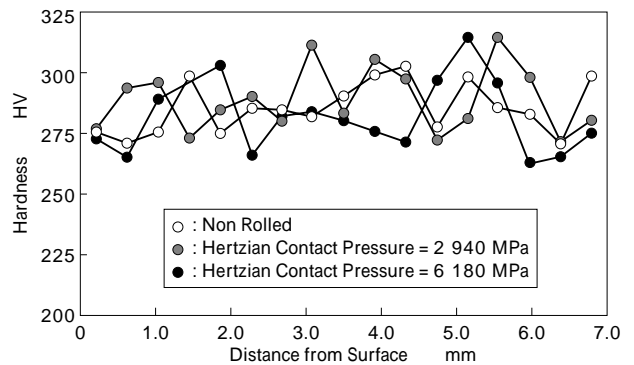
ロール加工後のフィレット底断面方向のピッカース硬さ HV (測定荷重 9.8N) 分布を第8図に示す。鋳鋼では母材に対して、表面は1.5倍程度硬度上昇³⁾が、今回使用した高強度低合金鋼では、いずれのヘルツ面圧の場合においても、表面部近傍および内部に硬さの上昇は認められないことから、硬さの増加が疲労強度に及ぼす影響は小さいと思われる。

2.1.4 残留応力分布測定結果

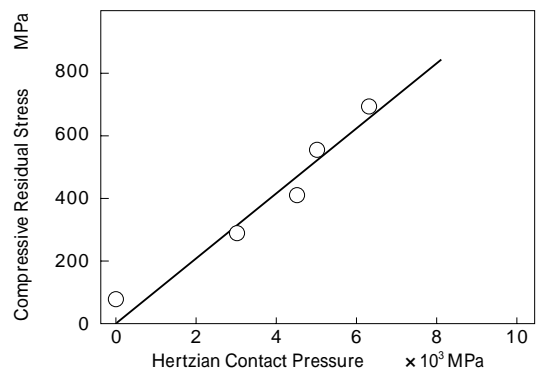
ヘルツ面圧と残留応力分布の関係を第9図に示す。残留応力の測定はX線回折法によりおこなった。同図より、ヘルツ面圧の増加とともに表面の圧縮残留応力は直線的に増加する。第5図で示したようにヘルツ面圧の増加にともなって疲労強度が上昇したことから、ロール加工を施した高強度材料の疲労強度の向上は、表面粗さ



第7図 表面粗さに及ぼすヘルツ面圧の影響
Fig. 7 Effect of Hertzian contact pressure on surface roughness



第8図 100 mm 試験材のロール加工後の硬度分布
Fig. 8 Hardness distribution of 100 mm sized specimen after cold rolling



第9図 圧縮残留応力に及ぼすヘルツ面圧の影響
Fig. 9 Effect of Hertzian contact pressure on residual stress

の改善や硬さ上昇よりも、表面に生成される圧縮残留応力の影響が大きいことがわかる。

2.1.5 残留応力と疲労強度の関係

疲労試験後の破断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果、いずれも破壊起点は表面であったことから、疲労き裂の発生は表面に生成される圧縮残留応力の影響が大きいと考えられる。表面の残留応力を平均応力として取り扱った場合の疲労限度線図を第 10 図に示す。同図より、疲労強度は修正 Goodman 法により直線近似できるので、残留応力は平均応力として取り扱うことが可能であり、疲労強度 w と残留応力 r の関係は式 (2) で表すことができる。

$$w \text{ (MPa)} = -0.42 \cdot r \text{ (MPa)} + 400 \dots\dots\dots (2)$$

(相関係数 $r = 0.98$)

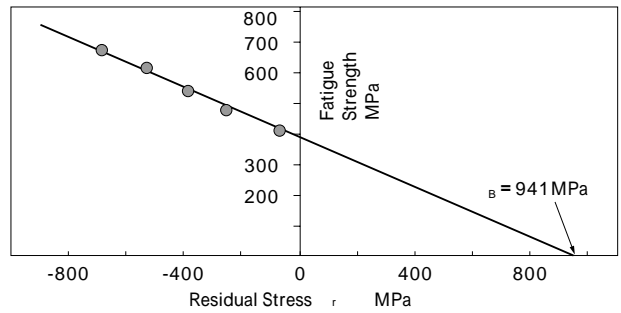
2.2 実体クランク軸による検証結果

上述した結果をもとに、実体クランク軸をもちいてロール加工の効果を検証した。実体クランク軸の疲労試験結果を第 11 図に示す。実体クランク軸においてもロール加工により 1.5~1.8 倍疲労強度が向上することが確認できた。また、ロール加工後の断面の硬さ測定をおこなったが、第 8 図で示した硬さ測定結果と同様に硬度上昇は見受けられなかった。ヘルツ面圧 3 620MPa における実体クランク軸の残留応力を X 線回折法により測定した結果を第 12 図に示す。同図より軸方向圧縮残留応力はフィレット部全体にわたり 900~1 000MPa と非常に大きいことがわかる。また、ヘルツ面圧 2 070MPa の場合の軸方向圧縮残留応力は 680MPa であった。実体クランク軸フィレット部における軸方向圧縮残留応力を式 (2) に代入して疲労強度を予測すると、ヘルツ面圧 2 070MPa、3 620MPa の場合でそれぞれ 686MPa、820 MPa となり第 11 図の疲労試験結果の 720MPa、810 MPa とほぼ一致する。

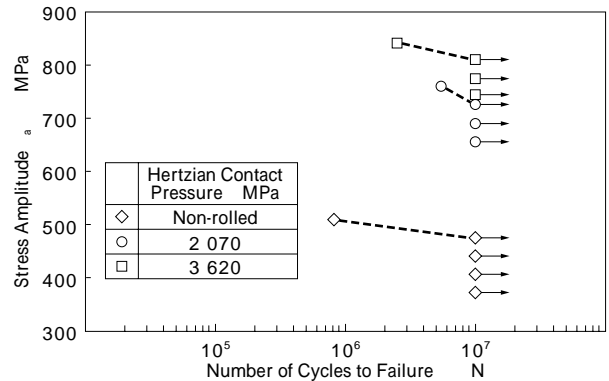
以上より、高強度材料をもちいた実体クランク軸においてもロール加工を施すことによって疲労強度は向上し、その向上要因は表面に生成される圧縮残留応力の影響が大きいことが明らかになった。

むすび = 高強度低合金鋼に様々なロール加工条件を施した試験片をもちいて疲労強度およびその向上効果の検討をおこない、実体クランク軸での疲労強度向上率を確認した結果、以下の結論がえられた。

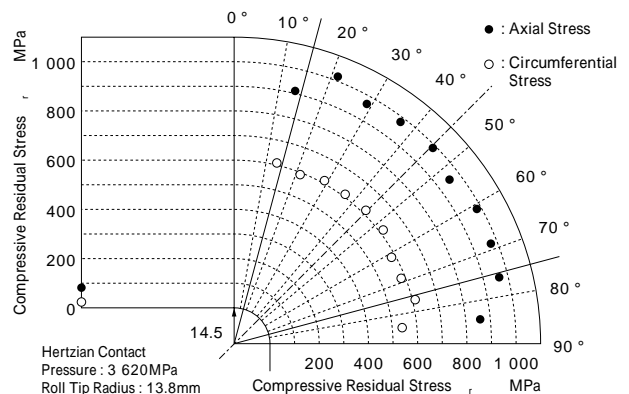
- 1) ロール加工を施した実体クランク軸の疲労強度はロール加工を施さないものにくらべて約 1.8 倍向上した。
- 2) 様々なロール加工条件における疲労強度はヘルツ面圧の増加とともに直線的に向上する。
- 3) 高強度材料にロール加工を施した場合の疲労強度向上要因は、表面に生成する圧縮残留応力の影響が大きい。
- 4) 圧縮残留応力を平均応力として扱うことが可能であり、疲労強度は修正 Goodman 法をもちいることによって予測可能である。



第10図 疲労強度に及ぼす圧縮残留応力の影響
Fig. 10 Effect of compressive residual stress on fatigue strength



第11図 実体クランク軸の疲労試験結果 (応力階差法)
Fig. 11 Fatigue test results of actual sized crankshaft (Step method)



第12図 ロール加工後の圧縮残留応力の分布
Fig. 12 Distribution of compressive residual stress after fillet cold rolling

最後に、本報の冷間ロール加工法は 1995 年度に日本海事協会をはじめ各国船級協会より認定され、ロール加工を施した一体型クランク軸は順調にその製品出荷実績を増やしている。今後もさらなる適用の拡大を図りたいと考える。

参考文献

- 1) 日本機械学会編：金属材料疲れ強さの設計資料() (1965) .
- 2) 島本敏郎ほか：自動車技術, Vol.44, No.6 (1990), p.95 .
- 3) M .Nishihara : Bulletin of the M .E .S .J. ,Vol.2 ,No.2 (1974) , p.57 .
- 4) 福井義典：日本船用機関学会誌, Vol.17, No.2 (1982) , p.164 .
- 5) R .E .Peterson : Stress Concentration Factors (1974) .
- 6) 川田雄一ほか：材料強度ハンドブック (1966) .
- 7) 西原 守ほか：日本船用機関学会誌, Vol.5, No.5 (1970) , p.22 .