

(論文)

固有ひずみ法を用いたクランク軸の残留応力推定技術

Prediction of Residual Stress in Crankshafts Using Inherent Strain Method



沖田圭介*1 (博士(工学))
Dr. Keisuke OKITA



中川知和*1 (博士(工学))
Dr. Tomokazu NAKAGAWA



松田真理子*2
Mariko MATSUDA

Introducing compressive residual stress into crankshafts by cold rolling enables them to achieve high fatigue strength. When designing the fatigue strength of a crankshaft, it is important to grasp the residual stress distribution, not only on the surface, but also inside of the crankshaft. Thus, an inherent strain method has been developed to estimate the residual stress distribution of overall shaft systems, including inside the shafts, from limited amounts of actual data concerning stresses and strains. An estimate calculation using the developed method yielded values that match well with the actually measured values, verifying its usefulness.

まえがき = 船舶用ディーゼルエンジン向けのクランク軸に要求される疲労強度は年々高くなる傾向にある。これに対し、高強度材料の開発という材料面からのアプローチや冷間ロール加工法^{1), 2)}の適用が、さらなる高疲労強度化の有力な手段となる。冷間ロール加工法は、実働時に最大応力が発生するフィレット部に圧縮残留応力を付与する表面硬化技術である。高周波焼入れや浸炭、窒化など他の表面硬化技術に比べ、硬化深さを深くできることが特徴であり、クランク軸のフィレット部の硬化処理として適した方法である。

一方、冷間ロール加工を実機適用する際には、適切な加工深さまで圧縮残留応力が付与されていることを確認することが要求されることから、フィレット内部の残留応力の分布状態を把握する必要がある。これまでは、穿孔した穴底にひずみゲージを貼り、切断法によって深さ方向の測定を行ってきた。しかし、この方法による内部残留応力測定では、測定位置やその点数、方向が限定されるため、要求部位の包括的な内部残留応力の分布状態を把握することは難しい。

そこで、広い範囲における任意点の内部残留応力を把握する方法として、溶接継手部の内部残留応力測定に多数の適用事例がある固有ひずみ法^{3~7)}に着目し、クランク軸に適用するための技術開発を行っている。クランク軸は3次元的な複雑形状のため、最終的には固有ひずみ法による推定計算も3次元形状を想定した検討が必要となる。そこで、冷間ロール加工によるフィレット内部に生じる残留応力分布の推定手法としての固有ひずみ法の有効性を確認するために、まずはシンプルな軸対称形状を対象とした検討を行った。

本稿では、クランク軸において特徴的な形状であるフ

ィレット部への固有ひずみ法の適用方法について説明するとともに、実機と同寸法のフィレット部を持つ軸対称サンプルを対象に、ここで開発した手法を用いて推定した残留応力分布、およびその妥当性評価について紹介する。

1. 固有ひずみ法による残留応力の推定原理

1.1 固有ひずみの定義

固有ひずみとは、構造物あるいは部材内の残留応力の発生源となるひずみであり、熱的または機械的な外力によって、材料の内部に生じた永久ひずみ(非弾性ひずみ)に起因して生じる。ここで対象とするクランク軸に限れば、固有ひずみは冷間ロール加工によって生じた材料内部の塑性ひずみによって生じることになる。固有ひずみと残留応力は一意的に対応しているため、固有ひずみが求めれば、弾性計算で残留応力を求めることができる。固有ひずみの主成分は塑性ひずみなどの永久ひずみであるため、評価対象の物体を切断しても、切断加工により新たな塑性ひずみが導入されない限り、固有ひずみの分布や大きさは保たれる。固有ひずみ法は、この特性を利用した残留応力の推定方法であり、適切に切断した物体の弾性ひずみ、あるいは残留応力の測定値から逆解析して固有ひずみを求め、元形状における物体内に発生している残留応力を推定する方法である。

固有ひずみを ϵ_0 とすると、固有ひずみによって発生する残留応力 σ は、次式で表される。

$$\sigma = \mathbf{D}(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 \mathbf{D} は弾性係数マトリックス、 ϵ は全ひずみマトリックスである。上式により、残留応力が求められるので、固有ひずみを精度よく推定することが製品の設計や強度評価において極めて重要となる。

*1 技術開発本部 機械研究所 *2 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部

1.2 固有ひずみの推定方法

固有ひずみ法による残留応力推定方法は先行文献^{3)~7)}と基本的には同じであるため、詳細についてはここでは割愛し、大まかな手順について図1のフローチャートを用いて説明する。

Step1: 塑性加工や溶接施工などにより残留応力が導入された構造物を切断し、各切断片に対して複数点の残留応力を測定する。ここでは、切断片の残留応力測定にはX線法を用いた。また、切断片は構造物の形状に合わせて適切な形状で採取する必要があるため、対象とするクランク軸のフィレット部に対する切断片の採取方法や従来法との違いについては、2.2節で述べる。

Step2: 固有ひずみの分布形状を仮定する。例えば、固有ひずみを $\epsilon_0 = ax^2 + bx + c$ という x 座標の2次関数と仮定すると、3個の係数 a, b, c が決まれば全領域の固有ひずみが求まる。 a, b, c を分布関数パラメータと呼ぶ。

Step3: Step2で仮定した固有ひずみから式(1)によって求めた残留応力(計算残留応力 σ_c)と、Step1で求めた測定残留応力 σ_m の差が最小になるように分布関数パラメータを決定する。これにより、測定残留応力に最も合う固有ひずみ分布が決まる。

Step4: 分布関数パラメータを用いて、任意点の残留応力を計算(推定)できる。式(1)の ϵ_0 を材料に内在する初期ひずみと考えれば、通常の線形弾性体に対する有限要素法を用いて、構造物全体の釣り合い式を解くことで、残留応力 σ_c を求めることができる。

1.3 測定ひずみから固有ひずみを求める方法

N 個の測定残留応力を σ_m と表す。これに対応して、固有ひずみから求めた N 個の計算残留応力を σ_c とし、測定ひずみとの残差 R を次式で定義する。

$$R = (\sigma_m - \sigma_c)^T (\sigma_m - \sigma_c) \dots \dots \dots (2)$$

また、任意点の固有ひずみを M 個の分布関数パラメータ \mathbf{a} によって、つぎの線形関係で表す。

$$\epsilon_0 = \mathbf{M}\mathbf{a} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 \mathbf{M} は座標の関数で、座標に関して非線形であっても構わない。式(3)によって固有ひずみが決まれば、計測残留応力は式(1)で求められるため、つぎのような線形の関係式が成り立つ。

$$\sigma_c = \mathbf{H}\mathbf{a} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 \mathbf{H} は係数マトリックスで、その成分は \mathbf{a} の各成分に単位値を与えて残留応力を求めることにより得られる。

式(2)に式(4)を代入し、 R が最小になるように \mathbf{a} を決定することにより、測定残留応力、および測定点における計算残留応力の誤差が最小になるような固有ひずみ分布が決定できる。

2. フィレット形状を対象とした推定方法

2.1 試験体および座標系

最終的な解析対象のクランク軸の寸法形状を元に、図2に示すフィレット付き丸棒形状を製作し、クランク軸と同一条件の冷間ロール加工をフィレット部の全周に実施した。座標系としては、図3に示すようなフィレット半径中心 (r_0, z_0) を基準とする局所円筒座標系を定義した。例えば、図3におけるフィレット角 β の場合に対しては、 r をフィレット半径方向、 z をフィレットに沿

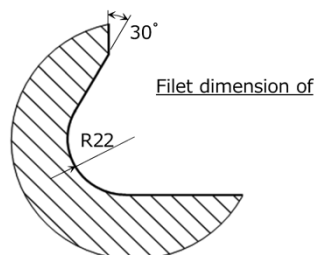
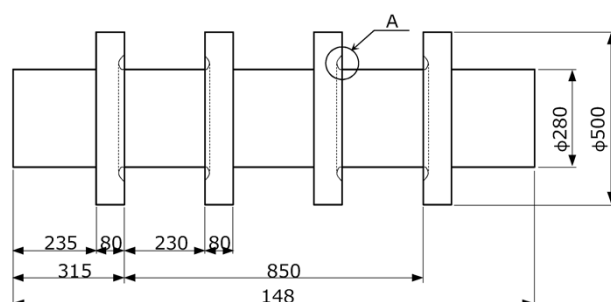


図2 フィレット付き丸棒試験体の形状
Fig. 2 Shape of round bar sample with fillets

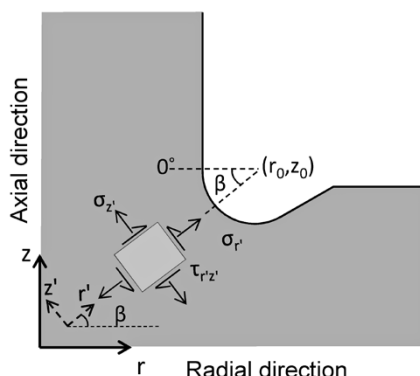


図3 フィレットにおける局所座標系の定義
Fig. 3 Definition of a local coordinate system for fillet

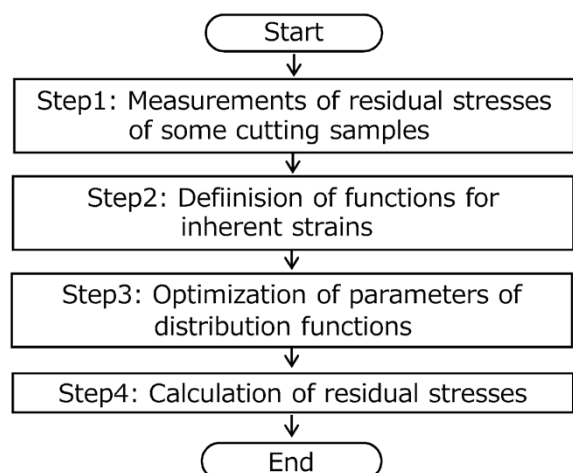


図1 固有ひずみ法における残留応力の計算フロー
Fig. 1 Calculation flow of residual stress in inherent strain method

う周（接線）方向，紙面垂直方向 θ を軸周方向と定義する。

2.2 サンプル切断および測定手順

固有ひずみ法におけるサンプル切断は，一般的には，平板形状を対象として直交座標系の各軸方向成分に沿って切断するT-L法⁸⁾が使われている。しかし，冷間ロール加工によりフィレット部に生じる残留応力はフィレット表面に沿った方向に分布するため，従来のT-L法におけるL片では急峻な応力分布を捉えきれない。そこで，L片に代えて，フィレット半径中心を基準にフランジ部を円錐形状に切断し，この切断片から図3に示す円筒座標系の半径方向と周方向の測定値を計測する方法を考案した（図4）。円錐（Conical）にちなんで，T-C法⁹⁾と呼ぶ。T片からはフィレット半径方向と軸周方向の残留応力を計測する。軸対称体のためT片は1体あればよいが，C片はフィレット角に応じて各々採取する必要がある。具体的には，塑性ひずみが導入されている領域よりも広いと考えられるフィレット角 20° から 110° ，かつフィレット深さ40mmの範囲を 10° ピッチで測定した。実際の工程では，フランジ部を切断し，まずフィレット角 110° のC片から測定する。つぎに，フィレット角 10° 分を切断し，フィレット角 100° のC片で測定する，という要領によって切断と測定の繰り返しをフィレット角 20° まで行った。総数で264箇所を計測し，今回の計算には対応する全てのデータを使用した。

2.3 固有ひずみ分布関数

固有ひずみは冷間ロール加工により発生する塑性ひずみに起因しているため，ロールと接触する周囲の領域にのみ発生し，その領域外では固有ひずみは存在しない。したがって，この領域の境界では0になる固有ひずみの分布関数を定義する必要がある。ここでは，その条件を満たす式（5）の三角級数を用いて，各ひずみ成分について独立に定義した。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} (1-\xi)^i \sin(j\pi\omega) \dots\dots\dots (5)$$

ここで， m ， n は ξ ， ω のそれぞれの方向成分に対応する

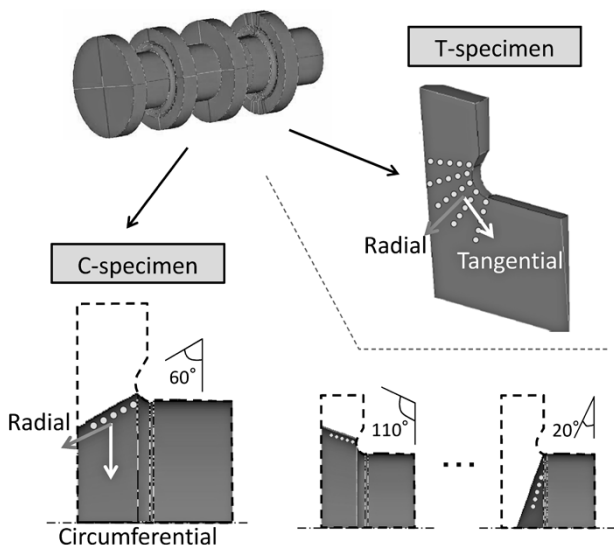


図4 各サンプルの切断および測定の手順
Fig. 4 Procedure of cutting and measuring for each sample

関数の次数である。また， ξ ， ω はそれぞれフィレット半径方向とフィレット周方向の固有ひずみ領域を表しており，図5に示す領域パラメータを用いて，次式で定義される無次元化座標である。

$$\xi = \frac{R-R_1}{\Delta R}, \omega = \frac{\alpha-\alpha_0}{\Delta\alpha} \dots\dots\dots (6)$$

2.4 クランク軸での推定方法

ここで，クランク軸に対する残留応力あるいは変形の前測方法の考え方について触れておく。クランク軸に対する冷間ロール加工において，ピンフィレットとジャーナルフィレットの加工領域は，図6に示すようにそれぞれの軸周りに 180° ， 360° である。導入される塑性ひずみは，ロールとワークとの局所的な接触・荷重条件によって決定されるため，フィレット形状やロール加工条件が同じであれば，加工領域内において同等と考えられる。したがって，2次元軸対称を対象とした計算プログラムおよび試験体を用いて固有ひずみを同定し，その固有ひずみを3次元形状であるクランク軸の各加工領域に割り当てるという手順により，加工後の残留応力および変形を予測することが可能となる。つまり，図1のフローチャートのStep1～3までは2次元軸対称問題として固有ひずみを同定しておいて，Step4でその固有ひずみをクランク軸形状に割り当てて弾性計算を行うという手順となる。

本手法の最終目的は，3次元形状であるクランク軸への拡張であり，その場合の前測方法の精度や妥当性の検証が今後の課題の一つである。

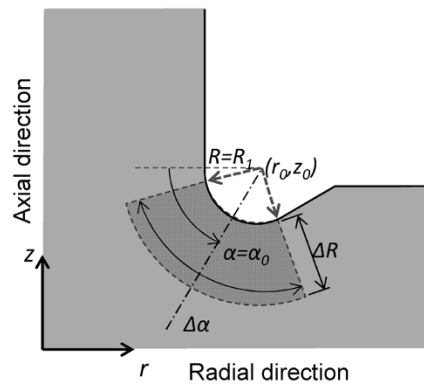


図5 固有ひずみの領域パラメータ
Fig. 5 Region parameters of inherent strain

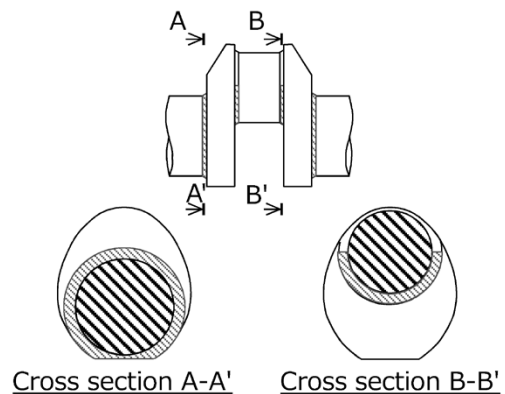


図6 各フィレットの冷間ロール加工範囲
Fig. 6 Cold rolled regions of each fillet

3. 軸対称試験体に対する測定結果および考察

2章で述べた推定手法を用いて、軸対称体に対して得られた残留応力分布を図7に示す。固有ひずみ法による残留応力の推定精度において、図5で示した領域パラメータの設定が非常に重要となる。本手法では、複数の領域パラメータの組合せを最初に定義し、その中で推定誤差を表す式(2)が最小となる組合せを自動抽出する機能を追加している。ここでは、一例として、分布関数の次数 m 、 n をそれぞれ4とし、表1に示す領域パラメータを設定した場合の結果を示す。あわせて、図8にフィ

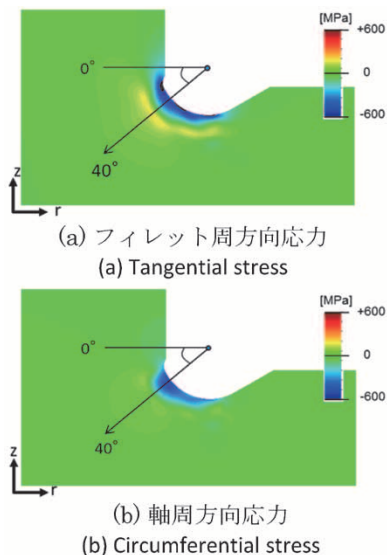


図7 固有ひずみ法により推定したフィレット内部の残留応力分布
Fig. 7 Residual stress distribution in the fillet calculated by inherent strain method

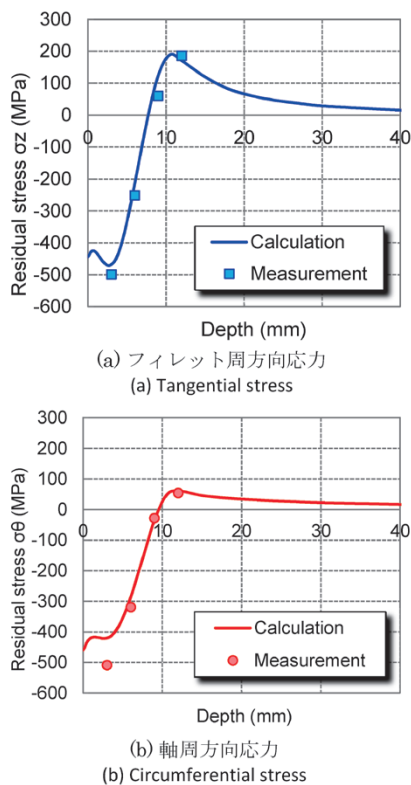


図8 フィレット角40°ラインにおける残留応力の推定値と実測値の比較
Fig. 8 Comparison of residual stress between calculated and measured on the fillet angle of 40 degree

表1 固有ひずみの領域パラメータ
Table 1 Values of region parameters of inherent strain

Filet radius R_f (mm)	22
Depth of inherent strain ΔR (mm)	12
Center of width of inherent strain α_0 ($^\circ$)	42.5
Width of inherent strain $\Delta \alpha$ ($^\circ$)	125

レット角度40°ラインにおける内部残留応力の推定値と実測値との比較を示す。なお、検証用の実測は、所定の深さまで穿孔した穴底にひずみゲージを貼り、切断法によって行った。

図7より、フィレット周方向応力、軸周方向応力ともに表面に圧縮の残留応力となり、少し内部にバランスするように引張の残留応力が発生していることが分かる。フィレット周方向応力の方が、軸周方向応力に比べてフィレット周方向に沿ってより広い領域に残留応力が分布しており、内部の引張残留応力の値もより大きくなっている。この深さ方向の残留応力分布の傾向は図8の実測値ともよく一致しており、内部残留応力を精度よく推定できていることが分かる。

むすび=表面硬化処理である冷間ロール加工後の内部残留応力分布の推定を目的に、クランク軸に特有なフィレット部に適した固有ひずみ法を開発した。実機サイズの軸対称サンプルの切断片データを用いた推定計算を行い、切断法により実測した内部残留応力分布(フィレット角40°ライン)と比較した結果、フィレット周方向と軸周方向ともによく一致していることを確認した。今回の検討により、冷間ロール加工によるフィレット内部の残留応力分布の推定手法としての固有ひずみ法の有効性を示すことができたと考えている。

今後は、本文中にも記した3次元形状であるクランク軸への適用を検討する。さらに、本手法では切断片への加工および測定が不可欠のため、多くの時間や労力を費やすことも課題であり、推定手法(とくに切断片データの取り扱い)の簡略化、および測定点の位置や点数の適正化(最小化)にも取り組む予定である。

参考文献

- 1) 長坂英明ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.1, p.68-71.
- 2) 松田真理子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.24-28.
- 3) 上田幸雄ほか. 日本造船学会論文集. 1979, 第145巻, 第215号, p.203-211.
- 4) 中長啓治ほか. 溶接学会論文集. 2007, 第25巻, 第4号, p.581-589.
- 5) 中長啓治ほか. 溶接学会論文集. 2009, 第27巻, 第4号, p.297-306.
- 6) 小川直輝ほか. 溶接学会論文集. 2010, 第28巻, 第2号, p.208-215.
- 7) 中長啓治ほか. 溶接学会論文集. 2012, 第30巻, 第4号, p.313-322.
- 8) 中長啓治ほか. 溶接学会論文集. 2009, 第27巻, 第1号, p.104-113.
- 9) 松田真理子ほか. 特願2013-236300. 残留応力算出方法. 2013.