Numerical Prediction of Residual Deformation of Forged Component Subjected to Induction Hardening

> 技術本部 猪 狩 敏 秀*1 紀 博 徳*2 森田 鴻 司*3 相模原製作所 下河内寛子*4

ディーゼルエンジン用クランクシャフトなどの大型鍛造材の高周波焼入れに伴う残留変形を予測するため、材料の相変態を考 慮した非弾性解析による変形再現を試み、変形メカニズムを検討するとともに、変形低減法の検討を行った。まず、クランクシ ャフトの構成材料である SCM 440 材の相変態挙動、クランクシャフトのピンの高周波焼入れ中の温度分布計測及び焼入れ深さ分 布計測結果を基に、高周波加熱、冷却中の熱非弾性解析を行った結果、実測に近い残留変形が再現できることが明らかになった。 残留変形は加熱中のウェブ開き及び冷却中のウェブ閉じの累積として生じること、相変態のみでなく、塑性変形の寄与が大きい ことなど残留変形のメカニズムを明らかにした。また、焼入れ開始温度や焼入れ深さ分布を変えることで残留変形を小さくでき る可能性があることを示した。

This paper shows the results of an inelastic analysis, which considers phase transformation, in order to predict the residual deformation after induction hardening of the crankshafts of diesel engines. Firstly the thermo-inelastic analysis of a partial model of a crankshaft is performed by considering the phase transformation properties of SCM440 together with the experimentally-obtained temperature history and the distribution of the quenching-depth of the crank pin. Comparing the results of analysis and the measured deformation showed that an analysis which considers the phase transformation can reproduce the actual residual deformation. Secondly the mechanism of residual deformation is discussed. The residual deformation is the summation of the opening of the web during the heating process and the closing of the web during the cooling process, and the plastic deformation due to thermal stress as well as the deformation by changing the starting temperature of the cooling and the distribution of the quenching-depth is shown.

1. はじめに

ディーゼルエンジンクランクシャフトなどの大型鍛造材の高サ イクル疲労強度向上のために高周波焼入れがなされることが多い が,残留変形が問題となる場合がある.残留変形の防止が生産工 程簡素化につながるため,残留変形の予測技術及びそれに基づく 熱処理条件最適化が求められている.パラメータ実験に基づく熱 処理条件最適化は大型部材になると実用上困難であるため,解析 に基づく残留変形予測技術が必要となる.熱処理過程では熱応力 による塑性変形に加えて,材料の相変態に基づく変形が問題とな るため,これらを考慮した詳細解析法⁽¹⁾が必要となる.

材料の相変態を考慮した非弾性解析については井上らによる方法⁽²⁾⁽³⁾が示されており,解析コード HEARTS として実用化されている.しかしながらクランクシャフトのような複雑形状の大型部材への適用例はなく,残留変形が解析的に再現可能か否かは明確でない.

本報では,SCM 440 製クランクシャフトの高周波焼入れ時の温 度分布や焼入れ深さ分布実測結果を基に,相変態を考慮した熱非 弾性解析を行い,残留変形の実測値との対比を行って,解析的な 現象再現の可能性を検討する。また,クランクシャフトの残留変 形発生メカニズムを基に残留変形を減少させる熱処理条件につい ても検討を加える.

2. 材料の相変態とそのモデル化

材料の相変態とそのモデル化⁽²⁾⁽³⁾については次のように考えた.

フェライト組織の受入れ材を、オーステナイト化温度以上の1000 ℃ 程度の高温に加熱するとオーステナイト組織に変わる.この状 態から 30℃/s 以上の速度で室温まで急冷すると結晶構造が硬いマ ルテンサイト組織に変わり、焼きが入る.これより遅い速度で冷 却すると硬度の低いパーライトあるいはベイナイト組織に変わる.

加熱冷却時の SCM 440 材の自由熱膨張収縮挙動をフォーマスタ 試験により求めた結果⁽⁴⁾を図1 (b)に示す. 緩やかな昇温時にオー ステナイトに変化する際の変態収縮が見られる. 降温時には冷却 速度によって挙動が異なる. 30℃/s以上の高速で冷却するとマル テンサイト変態が生じ,冷却中にもかかわらず,変態膨張が生じ る. また,膨張率もオーステナイトの値からマルテンサイトの値 に変化する. より遅い速度での冷却ではマルテンサイト変態は生 じず,パーライトあるいはベイナイトに変化する際の変態膨張が 生じる. パーライト (フェライト,ベイナイトも降伏応力は同じ と扱う),オーステナイト及びマルテンサイトの降伏応力の温度依 存性⁽⁴⁾を図1(c)に示す.

相変態は体積分率の考えに従い,材料の一点の材料組成がオー ステナイト,マルテンサイト,パーライト(フェライト,ベイナ イト)の体積分率を有する混合体から成り,前述のTTT 線図を基 に相変態の支配則に従って変化するものとする⁽²⁾⁽³⁾.降伏応力など の材料特性の値は,この体積分率により計算される値とする.

材料の加熱冷却に伴う材料の相変化については,昇温時について は材料の状態図に,また,冷却時については材料の温度・時間・ 変態を示す TTT (Time-Temperature-Transformation) 線図 に従うものとした.図1(a)に SCM 440 材の TTT 線図を示す.



相変態に伴う膨張,収縮ひずみは増分型の非弾性構成式で下記 のように取扱う.

 $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{eij} + d\varepsilon_{pij} + d\varepsilon_{thij} + d\varepsilon_{trij}$

ここで、d ϵ_{ij} , d ϵ_{eij} , d ϵ_{pij} , d ϵ_{thij} 及びd ϵ_{trij} は全ひずみ増分,弾 性ひずみ増分,塑性ひずみ増分,熱ひずみ増分及び変態膨張収縮 ひずみ増分である.

3. クランクシャフトの残留変形解析

3.1 クランクシャフトの温度及び焼入れ深さの計測

図2に示すような長さ1m程度のクランクシャフトの高周波焼 入れにおいては、一方の端部をチャッキングでつかみ、他方をピ ンで弾性的に押しながらクランクシャフトを回転させ、ピン(直 径70mm)及びジャーナル(直径90mm)を外側から順次高周波 焼入れを行っている。焼入れ後の残留変形の計測については、例 えば外側のピンP1、P6の焼入れの後、両端支持の条件でクラン クシャフトを回転させ、クランクシャフト中央での振れの方向と 幅を計測している。振れ幅と方向にほぼ再現性がある。

以下では、最初に焼入れを行う P6の部分モデルについて解析を 行うこととした。

実体クランクシャフトの焼入れ中の温度履歴を計測するため, P6の部分モデルを実体から切出し、ピン焼入れを行ったときの温 度計測を行った.温度計測は回転しながらの計測のため、赤外線 放射温度計により行った.なお、別途予備試験を行い、熱電対に よる温度計測結果との対比により放射温度計の校正を行っている. 計測の結果 12 秒程度で最高温度 1 100℃ 程度に加熱され、数秒



図2 ディーゼルエンジン用クランクシャフトの形状 クランクシャフト のピン焼入れを考え、ピンの部分モデルを解析に用いた. Configuration of engine crankshaft (SCM 440)

の徐冷の後,表面温度800℃程度から急冷されていることが分かった。焼入れ後のピンを切断し,硬さ分布を計測した結果を図3(a)に示す。ピン上部で5mm程度,ピン下部で7mm程度焼きが入っていた。

3.2 解析条件

クランクシャフトの部分モデルについて HEARTS コード⁽²⁾⁽³⁾を 用いてピン焼入れの場合の解析を行い,変形の再現を試みた.

図4(a)に解析に用いた部分モデルを示す.

ピン中央部を対称面としており,ジャーナル端部は自由面とした.要素は8節点三次元要素であり,接点数3115,要素数2594 である.

材料特性としては、実体のクランクシャフトのピン部より切出 した素材を用い、受入れ材(フェライト組織)及び焼入れを行っ た材料(マルテンサイト組織)についての高温引張試験結果を基 に図1(c)に示したような降伏応力を用いることとした。オーステ



308



加熱終了時の等温線図及び焼入れ後のマルテンサイト分布 図4 (a)ピン表面で約1100℃に加熱されており、(b)はピン上下の焼入れ深さ分布 は実体と対応していることを示す (ケースC). Temperature distribution at end of heating process and distribution of martensite after cooling (case C)

ナイト組織については文献値を用いることとした.

TTT 線図については図1(a)中のパーライト/ベイナイト50% 変態点を図中の破線のように設定した。変態膨張収縮特性につい てもフォーマスタ試験を行って,図1(b)に示したようなデータを 取得した. 図1(a)の TTT 線図を基に1要素での自由熱膨張収縮 を行わせる解析によりフォーマスタ試験結果の再現を試みた結果 を図1(b)の図中の実線で示すがほぼ対応している.

高周波加熱については、図3(a)のピンの焼入れ深さ分布を基 に、 ピン上部で 1.5 mm 程度、 ピン下部で 3 mm 程度の深さで内 部発熱を考えた解析を行った。12 秒程度の加熱終了時の最高温度 が1100℃程度になるような内部発熱量とした。冷却については、 冷却剤温度 23℃,熱伝達率 10 000 Kcal/m²h℃ とした境界条件を 与えて急冷を模擬した.

解析は表1に示すように以下3ケースについて行った. ケースA: T_s=1100℃ 徐冷なし. 加熱深さピン上下 3 mm ケース B: T_s=1100℃ 徐冷あり. 加熱深さピン上下1.5mm, ウェブ加熱 ケースC: T_s=1100℃ 徐冷あり. 加熱深さピン上1.5 mm, 下3 mm, ウェブ加熱



解析ケース 焼入れの範囲 温度履歴 3mm 加熱域 マルテンサイト 変態開始 ケースA 3mm TMS ٥ 12 250 1 (s) 1.5mm 加熱域 Tマルテンサイト 変態開始 Γς ケースB 1.5 mn 250 0 121620 t (s) 1.5 mm 加熱域 Tマルテンサイト 変態開始 ケースC 3mm 121620 250 1 (s)

Cases of analysis considering several heat treatment conditions

ケースCが部分モデルの焼入れ試験に近い条件であり、他は焼 入れ条件の差を見るためのものである.

3.3 解析結果

高周波焼入れの加熱終了時の温度分布解析結果(ケースC)を 図4(a)に示す。ピン表面は約1100℃、ピン/ウェブ接合部も高 温となっている.ピン上部表面5mm程度,及びピン下部表面 7 mm 程度がオーステナイト化温度(756℃)を超えオーステナイ トとなっている. この部分は 30℃/s 以上で急冷されるため、硬い マルテンサイト組織となる.図4(b)には焼入れ後のマルテンサイ ト組織分布(ケースC)を併示している。また、解析により求まっ たピン上下表面のマルテンサイト組織分布を図3(b)に併示してい るが、実測とほぼ対応している.加熱、冷却中の変形挙動解析結 果の例(ケース A)を図5に示す.

加熱中はウェブが開き、冷却中はウェブが閉じる変形となって いるのが分かる.このメカニズムはピン上下のウェブの拘束差に よるものと考えられる. つまり、ピン下部のウェブは質量が大き く、加熱中はピンに比べて低温であり、半径が大きく膨張するピ ン中央に比べて、ウェブ付根ではピン半径膨張が拘束されるため、 ウェブ付根のピン半径は小さく抑えられ、ウェブ板厚方向の温度 分布の影響もあってウェブが下開きとなる。冷却時にはピン温度 が下がるためウェブによる拘束は低下し、ウェブは閉じながらほ



加熱冷却時の変形図 図 5 加熱時にはウェブが下開き、冷却時にはウェブ が下閉じとなる (ケース A). Deformation during heating and cooling process (case A)





きとなる.条件の異なるケース A,B は変形状況が異なる. Residual deformation of journal

ぼ元の形状に戻る.

このときの残留変形によりジャーナル変位方向が決まる.

ケース A~C についてウェブ上下の距離の差及びジャーナル上 下端の変位を求めた結果を図6及び図7に示す.ウェブ上下の距 離の差についてはケース A, B, C の中でケース C が最も実測値に 近い.

図7から分かるように、ケースAではジャーナルは下閉じ、ケ ースB、Cでは下開きであり、ケースBの残留変形は小さい。

この開き,閉じに及ぼす塑性変形及び変態変形の寄与を分析し たが,特に塑性変形の寄与が大きく,昇温時の開きは同じであっ ても,冷却開始温度を下げて熱応力を低減させると閉じ量が小さ くなる傾向があった.昇温時の開きについてはピン下部のウェブ を加熱することで大きくなる傾向が見られた.

図7を基にクランクシャフトの外側のピン P1,及び P6を焼入 れた場合のクランクシャフト中央の変位方向と変位量は、ジャー ナル端面の変位角 θを基に図8に示す方法で推定できる。実際の 条件に近いケース C ではピンを 12 時方向とすると、180 反対側の 6 時方向にクランクシャフト中心が変位し、その振れ幅は全振幅 で 0.1 mm 程度である。併示した実測結果に比べて振れ幅は若干 少ないが、方向は一致しており、実際の現象はほぼ再現できたと 考えられる。

クランクシャフトの残留変形を小さくする方法についても解析 結果を基に検討可能と考えられる.ケースCでは最終的に下開き であるため,加熱中の開きを小さく抑えることで,例えばケース Bのようにピン上下の焼入れ範囲を変えて,焼入れ深さを同じに することで残留変形が小さくなることが示唆されている.



図8 クランクシャフト全体の残留変形実測との比較 からクランクシャフト中央の変形を予測すると、変形の方向及び量がほ ぼ実測と対応する。 Comparison of predicted deformation of crankshaft with measured results

4.まとめ

複雑形状の大型部品の高周波焼入れ時の残留変形の予測技術の 開発のため、クランクシャフトを対象として相変態及び降伏応力 の温度依存性を考慮した熱非弾性解析を行い、実測値と比較し、 以下の結果が得られた。

- (1) クランクシャフトの高周波焼入れによる残留変形を解析的に 再現するためには、実際の温度履歴や焼入れ深さ分布の考慮が 不可欠であることが分かった。
- (2)残留変形は昇温中のウェブ開き、及び冷却中のウェブ閉じの 総和として発生するなど残留変形発生メカニズムが明らかになった。
- (3) 焼入れ深さ分布や冷却開始温度などの焼入れ条件の調整により,残留変形を小さくできる可能性があることを示した.

参考文献

- 田中道夫,有限要素法による残留応力解析,三菱重工技報 Vol.11 No.6 (1974) p.13~20
- (2) 井上達雄,相変態を伴う金属材料における応力と残留応力, 材料科学 19-3 (1982) p.7~16
- (3) 井上達雄ほか,変態一熱一力学に基づいた熱処理シミュレーション用 CAE システム "HEARTS"の開発と応用,材料 44 -496 (1995) p.103~109
- (4) 猪狩敏秀ほか、クランクシャフトの高周波焼入れ残留変形/ 応力シミュレーション、日本機械学会材料力学部門講演会 M&M 96 講演論文集(1996)