斜め割り連接棒大端部の強度について* (セレーション形状に関する基礎的考察)

福 岡 俊 道^{*1}

Stress Analyses of the Big End of Diagonally Split Connecting Rod (Shapes of Serrations)

Toshimichi FUKUOKA

The big end of a connecting rod of medium-speed diesel engines is frequently diagonally split to reduce its width to enable easy assembly and disassembly. Accordingly, shearing forces occur along the interface between the shank and cap. To support these shearing forces, serrations which have shapes similar to screw threads are machined at both contact surfaces. It is reported that failure is sometimes observed around serrations, which seems to be caused by stress concentrations at the root of serrations and the relative displacement between mating surfaces. In this study, the strength of serrations subjected to basic loading, such as compression, shear and bending, is analyzed by FEM which deals with elastic contact problems, where the effects of the configuration of serration, pitch errors of the serration occurring during machining and coefficients of friction at contact surfaces are estimated. In addition, the effects of the distance between the serration and the blind hole in which a crank pin bolt is tapped, are also discussed by employing the axisymmetric model.

Key Words: Elasticity, Contact, FEM, Diesel Engine, Connecting Rod, Serration, Stress Concentration

1. 緒 言

中速ディーゼル機関の連接棒大端部は、機関出力の上昇と小型化という相反した要求に対応して設計された結果、いわゆる“ピストン抜き”を可能にするために、連接棒大端部のシャンクとキャップの合わせ面が斜割りとなった構造形式が多く見受けられる。その場合、斜め割りにした結果生じるせん断力を受けることを目的として、合わせ面はセレーションと呼ばれるねじ山に類似した形状に加工されている。このセレーション部分は、シャンクとキャップを締付けているクランクピンボルトとともに、もっとも破損事故が発生しやすい箇所である。その破損の原因としては、セレーション谷底の応力集中によるクラックの発生、セレーションの合わせ面の相対すべりによるフレッティングなどが挙げられる。しかしながら、斜め割り連接棒の強度を評価した研究⁽¹⁾、とくに大端部のセレーション部分の強度を扱った報告は極めて少なく^{(2)・(3)}、種々の設計因子の影響を数値解析により体系的に解明した研究については、著者の知る限りほとんど皆無である。とりわけ接触面の状態を表す摩擦係数の影響の定量的評価は、数値解析による検討が不可欠である。その結

果、セレーション部分の破損防止に対する抜本的な対策は依然として未解決であるといえる。

そこで本研究では、斜め割り連接棒の設計基準を定める第一段階として、セレーションの基本的な力学的特性を明らかにすることを目的としている。まず最初に、セレーション部分が圧縮、せん断、曲げという基本的な荷重を受けた場合について、セレーション谷底部に発生する応力集中、各山の荷重分担率および合わせ面の相対すべり量に対するセレーション谷底の半径、山の角度、接触面摩擦係数の影響を、セレーションにピッチ誤差がある場合も含めて評価する。つぎに、実際にセレーション部がボルト締めされた場合については、上記の諸因子に加えてシャンクに加工しためねじとセレーションの距離の影響を検討する。解析に際しては、従来からねじの力学的特性の解明に用いている弾性接触問題を効率的に扱うことのできる有限要素法⁽⁴⁾を適用する。

2. 解 析 方 法

2.1 セレーションの形状と付加される荷重

図1は、斜め割り連接棒の大端部まわりの形状を示したものである。分割角度 ϕ は30~40度、セレーションの山の角度 θ は55~90度程度の機関が多く見受けられる。また、セレーションのピッチ p 、谷底の半径

* 原稿受付 1995年3月20日。

*1 正員、神戸商船大学 (〒168 神戸市東灘区深江南5-1-1)。

r , 山の高さは様々である。山の数ピッチと合わせ面の幅によって決まるが, 5~10程度である。”ピストン抜き”の問題から大端部の幅を小さくするためには分割角度 ϕ を小さくする必要があるが, その場合はセレーションがより大きなせん断力を受けることになる。機関が停止した状態では, セレーション部はクランクピンボルトの締付け力による圧縮荷重のみを受けており, さらに運転中は, 慣性力による引張り力と, ガス爆発圧力による圧縮力が交互に作用する。これらの荷重はセレーション部に複雑な状態で作用する。ここでガス爆発圧力による圧縮荷重は, 大部分がクランクピンの上部で支えられると推察されるので, 図1中には, 慣性力 $F_{m.a.s}$ が作用した場合にセレーション部に付加される荷重を模式的に示している。 $F_{m.a.s}$ が作用した場合, 左右のセレーション部には, ボルト締付け力 F_b に加えて, 引張り力 F_t , せん断力 F_s , および曲げモーメントが作用すると考えられる。

一般に, クランクピンボルトの締付け力により発生するセレーション面の平均圧縮応力は100MPa程度といわれている^{(2), (3)}。また, 例えば1シリンダあたりの出力が120kW程度の中速ディーゼル機関では, 最大慣性力が120kN前後であり, その機関の分割角度 ϕ , 大端部の寸法を考慮すると, セレーション面に付加されるせん断応力は20MPa程度, 曲げモーメントによる最大曲げ応力は100MPaのオーダーである。以上の荷重はセレーション部に複雑な状態で作用する。ここでは, 機関が稼働中にセレーションに付加される荷重が圧縮, せん断, 曲げという基本的な3種類の荷重の組み合わせであると考えて, 図2に示した解析モ

Fig.1 Diagonally Split Connecting Rod

デルを設定してセレーション部の力学的特性を解明する。従来の研究ではセレーションが1山のモデルで解析を実施しているが^{(2), (3)}, 本研究ではより実機の条件に近づけるために, 複数の山を持つモデルで解析する。

2.2 接触問題の解析方法 接触問題の解析方法としては, レギュラリゼーション法の導入により多体弾性接触問題を効率的に扱うことのできる有限要素法⁽⁴⁾を適用する。ここで接触面に発生するせん断応力はクーロンの摩擦法則に従い, 「固着」, 「すべり」, 「離隔」の3つの接触状態を仮定している。接触状態の判定は, 接触面上の接触力に関する等価節点力の垂直方向成分と接線方向成分, および対応節点間の相対変位量による。基本的な荷重に対しては, セレーション部のみを解析対象としているので, 合わせ面の両側にあるシャंकとキャップの2体1接触面問題を平面ひずみ問題として解析する。また, 4節で扱うボルト締めされたセレーション部の強度に関しては, 軸対称3体3接触面モデルにより解析する。

2.3 解析モデル 本節では基本荷重に対する解析モデルの詳細を示す。セレーションの山数は6, ピッチ p は10mm一定とする。山の角度 θ は60度, 75度, 90度の3通り, 谷底の半径 r は, ピッチ p との比 r/p を0.08, 0.1, 0.12, 0.14と変化させる。各荷重に対する境界条件を図2中の記号を用いて以下に示す。

$$\begin{aligned} y=L: u=v=0 \text{ and } x=\pm B: \sigma_x=\tau_{xy}=0 & \text{ for all loads} \\ y=-L: \sigma_y=-\sigma_0 & \text{ for compression} \\ y=-L: \tau_{xy}=\tau_0 & \text{ for shear} \\ y=-L, x=0: v=0 & \text{ for bending} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで u , v はそれぞれ x , y 方向変位, また σ_0 , τ_0 は一様圧縮応力とせん断応力で, 2.1節の考察に基づいてそれぞれ100MPa, 20MPaとする。曲げ荷重は両端での垂直応力が $\pm 100\text{MPa}$ となるように与え, 式(1)に示したように中央の1節点のみ垂直方

Fig.2 Basic Loading (Compression, Shear, Bending)

向変位を拘束する。なお、モデルのヤング率は200GPa、ポアソン比は0.3とし、接触面の摩擦係数 μ は0から0.4まで変化させる。ここで $\theta = 75^\circ$ 、 $r/p = 0.12$ 、 $\mu = 0.2$ を基準条件とする。解析に用いたシャंकとキャップに対応する有限要素モデルの寸法は等しく、それぞれの縦横比は約1:0.6である。図3はセレーション近傍の要素分割の一例を示しており、要素は、四角形双一次要素を基準とし、三角形一次要素を併用している。また、もっとも応力集中が問題となると考えられるセレーション谷底周辺の分割について

Fig.3 Finite Element Mesh around Serration ($\theta = 75^\circ$, $r/p = 0.12$)

Fig.4 Stress Distributions along Serration

ては、ねじ谷底の応力集中を求めた過去の研究⁽⁵⁾を参考にして、2ケタ程度の精度で応力集中係数が求められる要素分割としている。

3. 解析結果

3.1 セレーション部の応力集中 図4は、圧縮、せん断、曲げの3種類の荷重を受けた場合について、セレーション表面のミーゼスの相当応力の分布を示したものである。横軸はセレーション表面に位置する節点の通し番号である。極端に高い応力値を示しているのはセレーションの角の部分で、特異応力場が形成されていると考えられる。実際のセレーションでは角部に面取りが設けられている。そこで図3に示した解析モデルにおいて、セレーション端部から接触面中央に向かってクリアランスを設けることにより面取りの効果を評価する。なお、クリアランスの大きさは端部で0.2mmとし、対応節点間に初期不整量として与えた。その結果、角部の応力はセレーション谷底のピーク応力と同程度、あるいはそれ以下の値となった。角部の強度を詳細に評価するためには、接触面端部の特異応力場を解析できる程度の細かい要素分割が必要となるが、上記の結果は、実機においてわずかな面取りを施すことにより、角部に関連する破損の問題がほぼ解消されているという事実を支持する結果であると

Fig.5 Stress Concentration Factor (Effects of Root Radius)

考えられる。図より圧縮の場合は両端で、せん断の場合は中央で谷底部の応力が高くなっている。また、曲げを受けた場合は非常に複雑な分布を呈している。つぎに3種類の荷重に対して、それぞれ応力集中係数 K_1 、 K_2 、 K_3 を定義することにより、谷底の半径 r 、接触面摩擦係数 μ 、山の角度 θ の影響を定量的に検討

Fig.6 Stress Concentration Factor (Effects of Friction Coefficient)

Fig.7 Stress Concentration Factor (Effects of Ridge Angle)

する。応力はすべて相当応力で評価するので、圧縮と曲げ荷重は $\sigma_0 = 100\text{MPa}$ 、せん断荷重については $\sqrt{3}\tau_0$ を基準応力とする。

図5, 6, 7は、前述の r 、 μ 、 θ の3つの因子の影響を、それぞれ圧縮とせん断荷重を受けた場合に対して示している。曲げ荷重については、他の2種類の荷重に比較して各因子の影響が小さいので省略している。図に示した結果より、 r が大きくなると応力集中はやや軽減される傾向にあるが、その影響は μ 、 θ に比較して小さい。また μ の影響は圧縮荷重においてもっとも大きく現れており、圧縮荷重とせん断荷重で逆の傾向を示している。したがって、大端部の組立、開放、再組立、あるいはセレーション面のなじみ等によって接触面摩擦係数 μ の値が低下すると、ボルト締付け力に起因する主要な荷重である圧縮荷重に対して、セレーション谷底部の応力集中が顕著になり、破損を引き起こす可能性があるので注意を要する。山の角度 θ の影響は、せん断荷重においてもっとも顕著で、圧縮とせん断のいずれの荷重に対しても θ の増加に伴って応力集中は軽減されている。以上の結果から、セレーション谷底における応力集中は、ねじ谷底における応力集中と異なり、谷底の半径よりも接触面摩擦係数と山の角度が支配的な因子であるといえる。

3.2 セレーション部の荷重分布 図8(a),(b)は、圧縮荷重とせん断荷重を受けた場合のセレーション部の荷重分布を示している。圧縮荷重については、各セレーションにかかる垂直力 P_i を1山あたりの平均垂直力 P で除して示している。またせん断荷重につ

Fig.8 Load Distributions along Serration

いては、セレーションの各山にかかるせん断力を全せん断力で除して示している。いずれの場合も、図4に示したセレーション表面の相当応力分布と類似の分布パターンを示しており、山の角度 θ の影響は圧縮荷重においてやや顕著に現れている。曲げ荷重を受けた場合は、図2に示したセレーション番号が大きくなるにつれて分担率が減少し、右半分の3つの山にはほとんど荷重がかからないという結果が得られた。

3.3 セレーション部の相対すべり量 セレーション部のフレットング強度は、接触面の相対すべり量に大きく影響される。実機のセレーション部は、クランクピンボルトによる締付け力を受けており、その状態で付加される慣性力による引張りと、ガス爆発力による圧縮力によって発生する合わせ面の相対すべりが問題となる。本研究で設定した解析モデルでは、ボルトの締付け力の大きさに対する外力の影響を考慮することはできないが、基本的な荷重に対するセレーション部の相対すべりの特性を評価することは可能である。図9(a),(b)では、圧縮荷重とせん断荷重に対するセレーションの各山の相対すべり量の平均値を示している。分布パターンについては、前節の荷重分布と同様に図4の相当応力分布と類似の傾向を示しており、相対すべり量の大きさに関してセレーションの山の角度 θ の影響はさらに顕著で、両荷重に対して相反する影響を持つ。また、接触面摩擦係数 μ の影響も大きく現れている。

ここで、実機のデータに基づいて与えた圧縮荷重と

せん断荷重は、その大きさが異なるにもかかわらず、両者は同じ程度の相対すべり量を生じている。このことは、セレーションに与えられるせん断力がフレットングの主要な原因の一つであるという報告⁽²⁾を裏付ける点で注目すべき結果である。また、圧縮荷重の大きさはボルトの締付け力に対応しているが、慣性力が付加されて面圧がほぼ失われる場合に対して、図9(a)に示した解析結果は定量的に有効であると考えられる。相対すべり量の大きさは、圧縮力に対してはセレーション端部で最大約10数 μm 、せん断力に対しては中央部で約20数 μm である。中野ら⁽³⁾によると、フレットングの発生する相対すべり量は面圧の上昇によりやや低下するが、概ね10 μm 程度のオーダーである。したがって、外力が付加された場合にフレットングが発生する可能性は十分考えられる。その場合、セレーション分割面に垂直な方向の応力変化が支配的であれば両端付近で、また分割面に沿った方向、すなわちせん断力の影響が大きい場合はセレーション中央付近で発生すると予測される。

3.4 セレーションの加工誤差の影響

Fig.10 Pitch Errors of Serration

Fig.9 Relative Displacement along Mating Surfaces of Serration

Fig.11 Effects of Pitch Errors due to Machining

クとキャップにセレーションを加工する場合、製作上の問題からある程度の加工誤差は避けられない。とくに大型のセレーションではその傾向が顕著であると推察される。加工誤差は種々の形態で現れると考えられるが、ここでは図10に示したピッチ誤差で代表させる。なお、ピッチ誤差 ϵ はセレーション1山あたりの値であり、図は上側のセレーションのピッチが下側に比較して大きい場合を示している。ここで接触面の境界条件は、セレーションの右側では初期不整の離隔状態、左側では重合状態として扱う。応力分布については、ピッチ誤差が存在するとセレーション周辺で非対称となるが、最大応力はピッチ誤差の存在しない場合と同様、セレーション谷底周辺で発生した。図11(a),(b)は、山の角度 θ が75度のセレーションについて、付加応力の絶対値が大きい圧縮荷重および曲げ荷重を受けた場合の各谷底における応力分布を表している。加工誤差の増加に伴って、周期的な応力の変動幅が大きくなっており、その傾向は圧縮荷重の場合に顕著である。高尾らの光弾性実験⁽²⁾による結果では、圧縮荷重に対して小型セレーションでは端部で応力が大きく、反対に加工誤差の生じやすい大型セレーションでは中央部で応力が大きくなるという結果を得ている。この結果は、ピッチ誤差が存在しない場合はセレーションの両端で、またピッチ誤差が大きくなると中央部で応力が高くなるという図11(a)の結果と一致

している。また、実機におけるセレーション谷底の破損が端部のセレーションではなく、やや中央よりの谷底から発生することが多い点から、図11(a)はそれを裏付ける結果であり、加工誤差の影響の評価の重要性を示している。

本研究で対象としたセレーションのピッチ p は10mmであり、1ピッチあたり $10\mu\text{m}$ のピッチ誤差、すなわち $\epsilon/p = 1/1000$ 程度の誤差が存在すると、セレーション谷底の応力分布は大きく変化すると考えられる。また、 $\theta = 60, 90$ 度の場合についても同様の傾向が見られた。

4. ボルト締めされたセレーションの力学的特性

本節では、実際にボルト締めされた場合のセレーション部の力学的挙動を、図12に示した3体3接触面モデルにより、セレーションとめねじの距離の影響を含めて検討する。ここでは実機の寸法を参照して、片側ボルト1本締めの場合を解析の対象とする。図12(a)はセレーションの合わせ面を示しており、一般にセレーションにおける破損が厚さ方向の中央付近から発生する場合が多いという事例報告より、図中のA-A断面に重点を置いて解析する。本来三次元解析を実施すべきであるが、数値解析上の困難さを考慮して図12(b)の解析モデルを用いる。A-A断面については、ボルト軸中心に対して変形を考慮するのが妥当であると考えて、その効果を取り入れるために前章までの平面ひずみモデルにかわって軸対称モデルで解析する。ボルト1本締めの場合、連接棒の寸法が変わっても各部の寸法比はさほど変化せず、接触面の応力分布に対するボルトの穴径やセレーションの幅の影響は小さいと考えられるので、これらの寸法は一定とする。なお、セレーション部の幾何学的形状は、2.1節で述べたモデルと同様である。境界条件は以下の通りである。

$$\begin{aligned} z=0: v_z &= 0 \\ r=r_0: \sigma_r &= \tau_{rz} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

上式で v_z は軸方向変位であり、軸力はボルト頭部座面に負の不整量を与えることにより発生させる。図13は解析に用いた有限要素モデルの一例を示している。図14(a),(b)は、谷底の半径 r と接触面摩擦係数 μ の影響を、図5, 6に示した圧縮荷重に対する応力集中と同じ要領で示したものである。基本荷重を受けた場合と比較して、全般的な傾向は図5(a), 図6(a)と同じであるが、応力集中係数の値は大きくなっており、摩擦係数の影響はさらに顕著に現れている。

Fig.12 Axisymmetric Model of Serration Clamped by Bolt

Fig.13 Finite Element Mesh of Serration Clamped by Bolt

すなわち、セレーション谷底の応力集中による破損は、3.1に示した基本荷重に対する結果とあわせて、圧縮荷重によるくさび作用および摩擦係数の大きさの変化が主要な原因であると考えられる。

つぎに、キャップをシャンクに締め付ける場合、大端部の両側で通常は同じ寸法のクランクピンボルトを用いるので、セレーションとめねじの距離 b がシャンクの左右で異なることになる。ここではその距離 b を15, 30, 47.5mmと変化させて、セレーションの谷底の応力集中に及ぼす影響を検討する。図15はその解析結果を示している。セレーションとめねじの距離が近いと応力集中は顕著になるが、少し距離が大きくなるとその影響はほとんど現れないといえる。

5. 結 言

Fig.14 Effects of Root Radius and Friction Coefficient

Fig.15 Effects of Distance between Serration and Threaded Hole

斜め割り連接棒大端部におけるセレーション部の基本的な力学的特性を、弾性接触問題として有限要素法を用いて解析した結果、以下に示す結論を得た。

(1) セレーション谷底における破損に対しては、圧縮荷重によるくさび作用が主要な原因であり、大端部の組立、開放等に伴って接触面摩擦係数が低下した場合とくに注意を要する。また、実機における破損位置から、加工誤差によるセレーションのピッチ誤差も主要な原因であると考えられる。

(2) 種々の荷重に対する相対すべり量の解析結果から、セレーション部にかかるせん断力がフレッティングの発生に対して大きく影響することを確認した。また、圧縮荷重あるいはせん断荷重を受けた場合、相対すべり量の大きさの分布パターンが、セレーション面に沿った応力および荷重分布と相似性があることを示した。

(3) セレーション谷底の応力集中に対しては、接触面摩擦係数および山の角度が支配的な因子である。

(4) 製作上の問題から、セレーションに1ピッチあたり1/1000程度のピッチ誤差が存在すると、セレーション谷底の応力分布は大きく変化する。

(5) 斜め割り連接棒では、一般にシャンクの左右においてセレーションとクランクピンボルトがねじ込まれるめねじ部の距離が異なるが、ボルト締め付け力のみを受ける場合は、両者の距離が近くなるとセレーション谷底の応力集中は顕著になる。

終わりに、本研究の遂行にご協力をいただいた(株)タクマの高部真司氏、ならびに貴重なデータと助言をいただいた(株)ダイハツディーゼルの岡内崇氏に謝意を捧げます。

参 考 文 献

- (1) 酒井, 機論 (第3部), 43-368 (1977), 1454-1461.
- (2) 高尾・他2名, 日本船舶機関学会誌, 16-6 (1981), 488-498.
- (3) 中野・他5名, 川崎重工技報, 84 (1984), 8-18.
- (4) 福岡, 機論 (A編), 60-580 (1994), 2782-2788.
- (5) 福岡・ほか3名, 機論 (A編), 52-481 (1986), 2201-2208.