

コネクティング・ロッド大端部における実験的考察

An Experimental Study of Connecting Rod Big Ends

都竹 広幸*

Hiroyuki Tsuzuku

土田 直樹*

Naoki Tsuchida

要旨

コネクティング・ロッド大端部における限界設計を行う上で、把握が必要な影響因子について考察を加えた。実験には、大端部形状及び大端ボス部・ボルトの材質を変更したコネクティング・ロッドを用意し、比較テストを行った。

その結果、外力（慣性力）作用下における大端ボア変形及びボルト発生応力は、大端形状・ボルト軸力・材質等により大きく左右されることがわかった。また、3次元FEMを工夫して用いることにより、設計初期段階でこれまで予測が困難であったボルト曲げ応力等、コネクティング・ロッド設計に不可欠な情報を比較的精度良く求めることが可能となった。

1 まえがき

最近のモーターサイクルエンジンは、高回転・高出力化に伴い、主要運動部品の耐久性に関して極めて過酷な条件下に置かれている。とりわけ、コネクティング・ロッド（以下コンロッドと呼ぶ）においては、高回転化のための軽量化が重視されるとともに、高強度・高剛性化も図らねばならないといった限界設計をしいられている。特に大端部においては、

- 1) 最大外力の作用下で大端接合面の分離を防ぐ。

[接合面の分離は、ベアリングメタルの耐久性及び摩擦損失に悪影響を及ぼす。]

- 2) ボルト負荷応力をできるだけ減少させる。

[ボルト負荷は、大端ボス部・ボルト相互のばね定数による影響を受ける。]

等を考慮したより詳細な検討が必要である。⁽¹⁾

本報告では、その大端部に注目し、

- i) 接合面分離防止を目的とした形状
- ii) コンロッド及びボルト材質の変更（チタン化）

を例に大端ボア変形量及びボルト応力の計測を行い、大端部設計に際して必要な影響因子について検討を加えた。また同時に3次元⁽²⁾⁽³⁾を行い、設計初期段階で適用可能な解析手法について検討した。

2 実験方法及び供試コンロッド

測定は図1に示す様、コンロッドボルトにひずみゲージを貼り、軸力一定の条件下で引張りを行う静的応力解析である。

供試コンロッドは、平行割りねじ込みボルトタイプであり、図2に示す材質・大端形状（フランジ有無）の違いによる5仕様について測定を行った。以下、各仕様を示す際はコンロッド材質－ボルト材質－大端形状の順で、例えば、仕様1の場合S－S－STDといった具合に書き表す。ここで、図2に示す様、Sは高合金鋼、Tはチタン合金を示す。

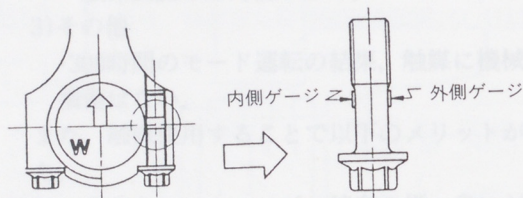


図1 コンロッドボルトゲージ位置

3 実験結果及び考察

3.1 締付トルクと軸力の関係

締付をトルク管理で行った場合、ボルトの強度上から最も問題になる点は、ネジ部における摩擦係数のばらつきによる締付力の変動であり、その摩擦係数は材質及び表面状態等により大きく異なることは、すでによく知られている。以下に参考として、今回の測定より得られた各材質間の摩擦係数について示す。

* 技術本部 基盤技術研究センター

仕 様	1	2	3	4	5
記 号	S-S-STD	S-S-MOD	T-S-STD	T-S-MOD	T-T-STD
コンロッド材質	SCM435	SCM435	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V
ボルト材質	AMS6304	AM6304	AMS6304	AMS6304	Ti-6Al-4V
略 図					

図2 供試コンロッド

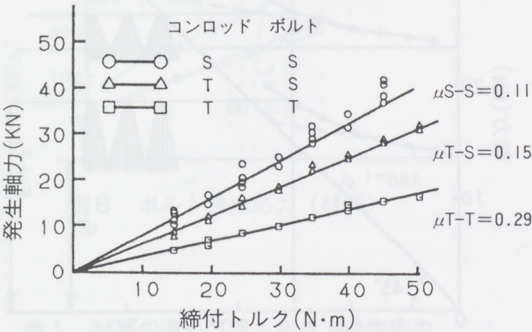


図3 締付トルク－発生軸力の関係

図3は、コンロッド材質－ボルト材質がそれぞれS－S・T－S・T－Tの各仕様において、締付トルクと発生軸力の関係を示したものである。また図中の摩擦係数は、以下に示した関係式より $\mu_s = \mu_w$ と仮定して求めた値である。チタンを用いることにより締付トルクに対する発生軸力の傾きは小さくなっており、摩擦係数が大きいことがわかる。

なお、チタン同士を高トルクで締め付ける際には、トルク－軸力の関係が階段状に変化することをたびたび経験した。これは、チタン表面が金属面のままでは活性で極めて焼付き易い性質をもつことに関係するものと考えられ、なんらかの表面処理が必要であろうと思われる。

3.2 締付力（軸力）による影響

図4は、S－S－STD仕様において、ボルト軸力が一定の条件下、引張荷重を変化させた際のゲージ出力結果をもとに締付線図を作成したものである。

－摩擦係数計算式 ($\mu_s = \mu_w$ と仮定)－

$$\mu_s = \frac{2T_f - F_f \cdot d_p \cdot \tan \beta}{F_f (1.15d_p + d_w)}$$

T_f : 締付トルク
 F_f : ボルトに発生した軸力
 d_p : ねじの有効径
 β : ねじのリード角
 d_w : ナット座面における摩擦トルクの等価面径
$$d_w = \frac{2(D_w^2 - D_i^2)}{3(D_w - D_i)}$$

D_w : 座面径
 D_i : 穴径
 μ_s : ねじ面摩擦係数
 μ_w : 座面摩擦係数

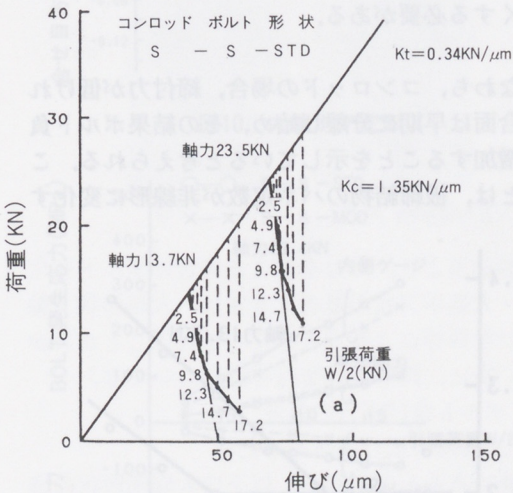


図4 締付線図 (S-S-STD)

通常、図5に示す様な単純なネジ締結体に外力が加わった場合、被締結物のバネ定数を表す線(a)は、ほぼ直線的に変化し、分離が始まる少し前からバネ定数を小さくする様に湾曲することが知られている。しかしながら、コンロッドの様にボル

ト軸力に対して偏心荷重を受ける場合は、荷重の増加とともにかなり前から大きく湾曲していることがわかる⁽⁴⁾。

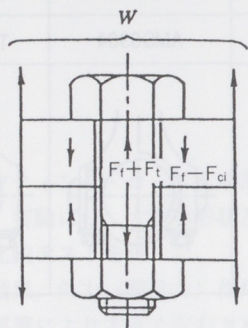


図5 簡単なネジ締結体

また、図6は、それぞれの軸力に対してボルト内力係数 ϕ を求めたものである。各軸力において、ある荷重より ϕ が急増し、その立ち上がり点は軸力が小さい方が早い。ここで、外力とボルト負荷荷重の関係をより明らかにするため、上記の関係を丸山による動的締付線図⁽⁵⁾に書き換えたものを図7に示す。同一外力 W が作用した場合の繰返し内力の振幅 $(F_t/2)$ を比較してみると、軸力の高い方が小さい値を示すことがわかる。この振幅は、ボルト疲労強度にも影響するため、なるべく小さくする必要がある。

すなわち、コンロッドの場合、締付力が低ければ接合面は早期に分離し始め、その結果ボルト負荷が増加することを示していると考えられる。このことは、被締結物のバネ定数が非線形に変化する

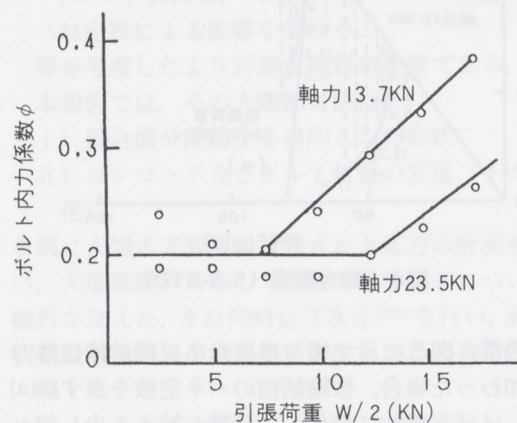


図6 ボルト内力係数 ϕ

ることとなり、偏心荷重を受けるため、その傾向がより顕著に現れるものと思われる。また、これらの現象は大端諸元により、大きく影響を受けることが想像される。よって、限界設計をする場合においては、従来の被締結物のバネ定数を線形とした机上検討では、不十分であるとともに、直線性を示さなくなる荷重の把握も必要であると考えられる。

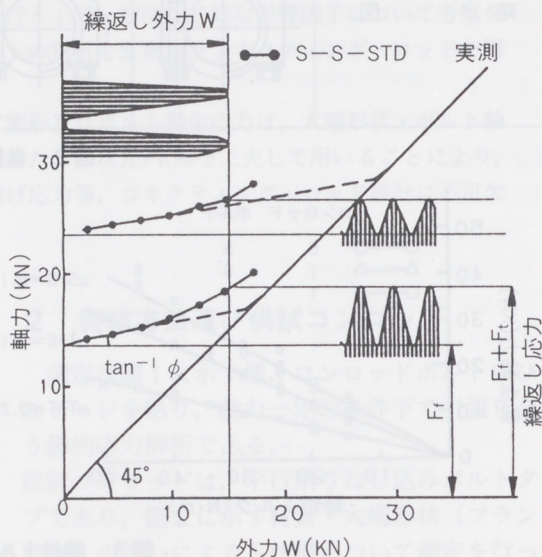


図7 動的締付線図

3.3 材質による影響（チタン化）

図8は、コンロッド材質・ボルト材質をそれぞれS-S・T-S・T-T（形状はいずれもSTD）と変えた際の引張荷重とボルトに発生する応力（締付時発生する応力は除去）の関係を示したものである。

また、表1には、引張荷重19.6KN時における各仕様の応力比較結果を示す。なお、測定においては、ボルト内力係数 ϕ ＝一定の条件内で行っている。

いずれの仕様も引張応力に加え、その2倍以上の曲げ応力を生じていることがわかる。

特に、現在市販エンジンに用いられているチタンコンロッドの様にT-Sの組合せは、ボルトに生じる応力のみを考慮すると、その負荷が大きいことに注意する必要がある。しかしながら、チタンコンロッドにチタンボルトを使用することにより、その応力をS-S並に低減できることもわかる。

図9は、S-S・T-S仕様における大端ボア変形の測定結果を示したものである。当然ながら、

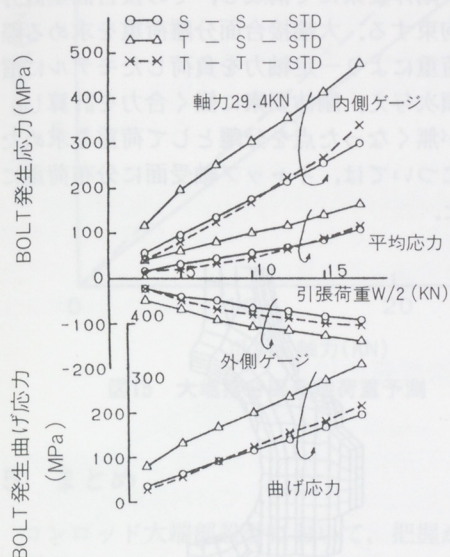


図8 ボルト発生応力（材質）

表1 材質の違いによるボルト発生応力

仕 様	引張応力 σ_T (Mpa)	曲げ応力 σ_B (Mpa)	σ_B/σ_T	仕様①に対する σ_B 比率(%)
①S-S-STD	54	117	2.2	—
②T-S-STD	95	197	2.1	170
③T-T-STD	12	123	2.7	105

(軸力29.4KN : 荷重19.6KN)

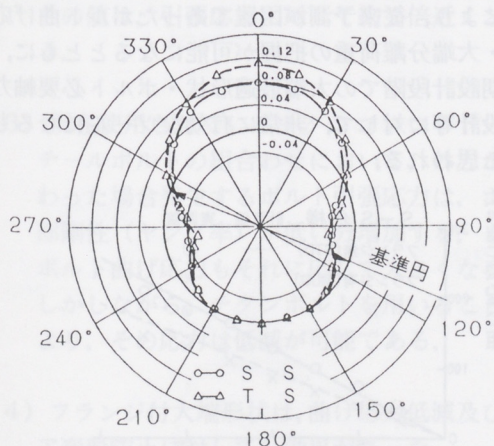


図9 大端ボア変形

ヤング率の違いからチタンの場合、同じ形状ではボア変形は大きい。このボアの変形は、メタルの耐久性及び摩擦損失にも影響を及ぼすため、ボルトに加わる曲げ応力低減とともにボアの変形防止も、ヤング率の異なる材質の組み合わせの場合には、忘れてはならない点である。

3.4 大端部形状による影響

大端接合面分離防止の一例として、図2に示した様な大端部形状の違い（フランジ有無）⁽⁶⁾による比較を行った。図10は、S-S仕様に関して大端ボア変形の様子をみたものであり、図11・表2は、同仕様におけるボルト応力の比較結果を表したものである。なお、表2にはT-S仕様の場合も示してある。

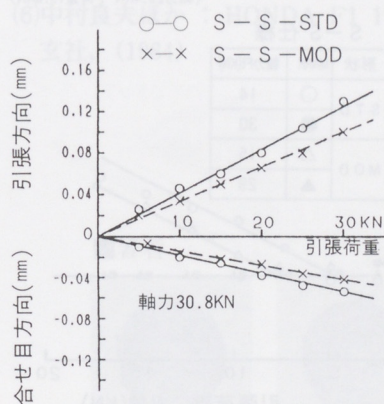


図10 大端ボア変形

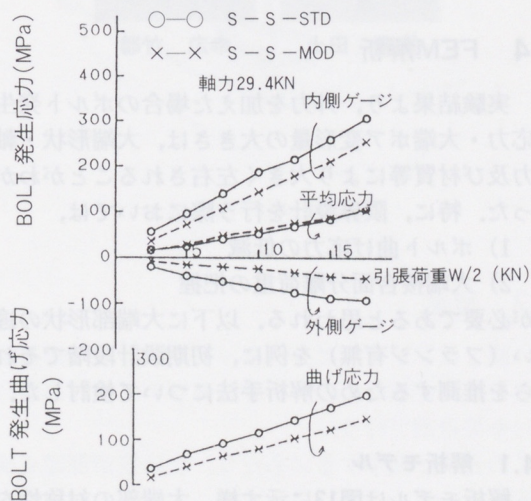


図11 ボルト発生応力（形状）

フランジ付 (MOD形状) にすることにより、大端変形が減少するとともに、ボルトに発生する曲げ応力も約30%前後減少していることがわかる。また、図12からわかる様、接合面が分離しにくい形状であることもわかる。

これらの結果は、T-S仕様に対してほぼ同様な結果となり、フランジ付形状はボア変形及び曲げ応力低減に有効であると言える。

表2 大端部形状変更によるボルト発生応力比較

仕 様	引張応力 σ_T (Mpa)	曲げ応力 σ_B (Mpa)	σ_B/σ_T	STD形状に対する σ_B 低減率 (%)
①S-S-STD	54	117	2.1	—
②T-S-MOD	57	83	1.5	29%
③T-T-STD	95	197	2.1	—
④T-S-MOD	88	154	1.8	22%

(軸力29.4KN : 荷重19.6KN)

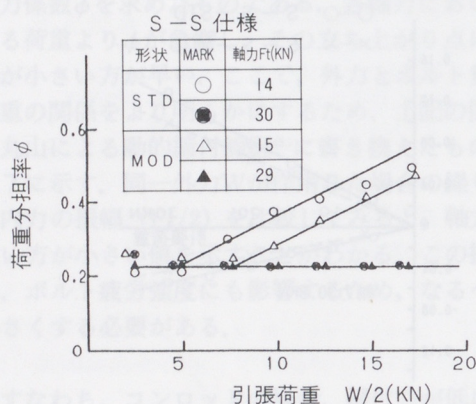


図12 ボルト内力応力係数

4 FEM解析

実験結果より、外力を加えた場合のボルト発生応力・大端ボア変形量の大きさは、大端形状・軸力及び材質等により大きく左右されることがわかった。特に、限界設計を行う際においては、

- 1) ボルト曲げ応力の低減
- 2) 大端接合面分離荷重の把握

が必要であると思われる。以下に大端部形状の違い (フランジ有無) を例に、初期設計段階でそれらを推測するための解析手法について検討した。

4.1 解析モデル

解析モデルは図13に示す様、大端部の対称性を考慮し1/4モデルを3次元ソリッド要素にて作成した。ボルト軸力は、大端ボス部・ボルト部に温

度差を加え、その熱収縮を利用した熱荷重により与えた。⁽²⁾⁽³⁾また大端接合面は、結合剛性を判断するため、剛体要素にて構成し、その接合面垂直方向のみ拘束する。大端接合面分離荷重を求める際は、熱荷重により一定軸力を負荷したモデルに慣性力を順次与え、剛体要素に働く合力を計算し、圧縮力が無くなった点を分離として荷重を求めた。慣性力については、キャップ軸受面に分布荷重にて与えた。

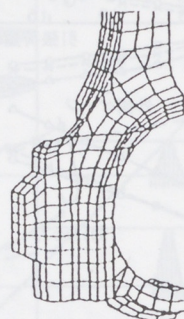


図13 FEMモデル

4.2 解析結果

図14は、大端形状の違い (STD, MOD形状) によるボルト曲げ応力の計算結果を示したものである。また、図15は接合面分離荷重を前述の方法を用いて計算したものである。なお、分離荷重の実測値はボルト内力係数の増加点 (一定でなくなる点) より求めた。

いずれの場合も、実測値と比較的良好に一致していることがわかる。この様にFEM解析を用いることにより、従来予測が困難であったボルト曲げ応力・大端分離荷重の把握が可能になるとともに、初期設計段階での大端最適形状・ボルト必要軸力の設計等に対して、非常に有効なツールになるものと思われる。

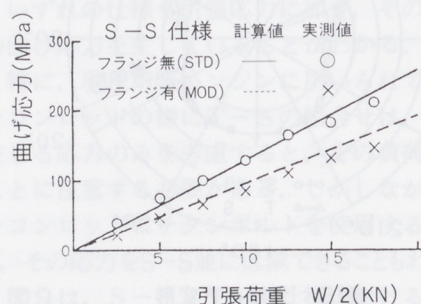


図14 ボルト発生曲げ応力 (計算)

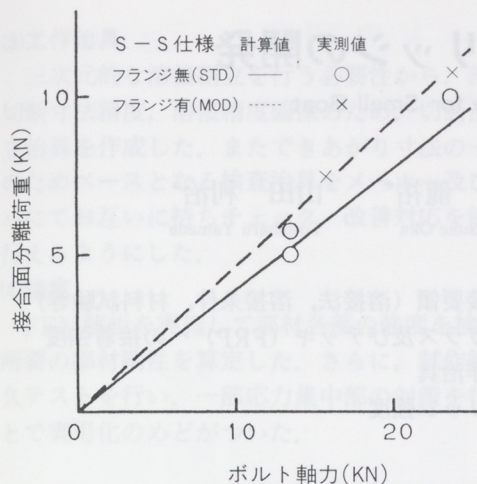


図15 大端接合面分離荷重予測

5 まとめ

コンロッド大端部設計において、把握が必要な影響因子の一部について、実験結果を中心にして簡単な考察を加えた。また、設計初期段階で有効なツールとなるFEM解析手法について検討した。以下にその結果をまとめる。

- 1) 実験結果より作成したボルト締付線図において、コンロッドボス部ばね定数を表す線は、外力（慣性力）とともにかなり大きく湾曲する。そのことは、ボルトに加わる負荷荷重が増加することを示す。また、その湾曲し始める点（荷重）は、ほぼ軸力に比例する。
- 2) 今回テストした平行割りねじ込みボルトタイプのコンロッドにおいて、外力を加えた場合発生するボルト曲げ応力は、かなり大きく、その値は、引張応力に対して約2倍近くとなる。
- 3) 現在使用されているチタンコンロッド・スチールボルトの組合わせにおいて、外力が加わった場合発生するボルト引張応力は、ボス部剛性（ヤング率）が低い分増加する。またボルト曲げ応力もそれに応じて大きくなる。しかしながら、チタンボルトを用いることにより、その応力は低減が可能である。
- 4) フランジ付大端形状は、曲げ応力低減及びボア変形防止に対して、効果があった。
- 5) 3次元ソリッドモデルを用いたFEM解析により、従来予測が困難であったボルトに発生

する曲げ応力及び大端接合面分離荷重の見積もりが可能になった。

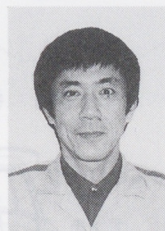
参考文献

- (1) 佐々木浩二ほか：コネクティングロッド・キャップボルトの強度に関する実験的考察，自動車技術Vol. 22, No. 10 (1968)
- (2) 山本明ほか：大端合わせ面の分離を考慮したコネクティングロッドボルトの応力解析，自動車技術会講演前刷集872074 (1987)
- (3) 辰己隆英ほか：コネクティングロッドの応力解析，自動車技術，Vol. 43, No. 4 (1989)
- (4) 山本晃：ねじ締結の理論と計算(第6版)，養賢堂，(1975)
- (5) 丸山一男：ねじ締結，機械設計，第33巻，第16号(1989，12月臨時増刊号)
- (6) 中村良夫ほか：HONDA F1 1964-1968，二玄社，(1984)

著者



都竹 広幸



土田 直樹