

連接棒キャップボルトの疲労強度に及ぼす 塑性域締付けの影響*

鈴木 秀人**, 国尾 武***

Influence of Tightening Bolts into a Plastic Region on the Fatigue Strength of the Cap Bolt of a Connecting Rod

Hideto SUZUKI and Takeshi KUNIO

In order to examine the effects of tightening bolts into a plastic region on fatigue strength, close-to-practice tests on the fatigue performance and the dynamic looseness were conducted on the cap bolt of a connecting rod used (actually) in a diesel engine. The fatigue strength of a bolt tightened by the present method has been found to be better than that of the conventional elastic-controlled method. The residual axial tension of bolts tightened by the present method was still superior to that of bolts tightened by the other method. The fractographic examination using SEM showed that the fatigue crack of bolts tightened with the present method was initiated and propagated under a smaller cyclic plastic deformation than that tightened with the elastic method.

Key Words: Fatigue strength, Bolt, Tightening method, Plastic, Fractography

1. 緒 言

ボルトの疲労破壊が引き金となった故障や事故は、依然として跡を絶たない。疲労破壊の原因の多くは、不適切な初期締付け、特に軸力不足で、それが引き金となってゆりみが生ずるためと指摘されている⁽¹⁾。一方、最近ボルトに降伏点以上の初期締付け応力を加える締付け法によって、大きな軸力が保証されしかもばらつきが小さくなると注目されている⁽²⁾。すなわち、塑性域締付け法によって、ボルト締結体の疲労強度信頼性を改善させることが期待される^{(3)~(5)}。

しかし、塑性域締付けを施した実際の機械部品のボルト締結体での疲労強度データは、ほとんど公表されず、その上ボルト自体の疲労破壊のメカニズムそのものにも不明な点が多い。そのため、本法の疲労強度信頼性に依然として疑問をもつむきもある。

特に、本法では初期締付けによってボルトは降伏した状態に保持されるために、その後の外力の繰返しによって軸力が著しく低下し、すなわち動的ゆりみが生じ、結局むしろ疲労破壊しやすくなると懸念される。

そこで本研究では、実際にディーゼル機関に使用されている連接棒キャップボルトに塑性域締付けを施した場合の疲労強度について、動的ゆりみ特性と関連させて検討を加えた。併せて、SEMによるフラクトグラフィによって、ボルト自体の疲労き裂発生、進展の機構解析まで掘り下げた上で、塑性域締付けの疲労強度への影響を総合的に検討した。

2. 供 試 品

連接棒キャップボルト供試品の形状と重要寸法は、図1に示すとおりである。連接棒は一般的な形状で、連接棒軸に直角な割り面を有し、接合面は完全な平面である。供試ボルトは、実際に連接棒キャップボルトとして使用しているものであり、SCM 435材をJIS B 1051強度区分10.9を得るために調質した後に転造によってM9×1の細目ねじに加工したものである。機械的性質は、硬度H_rC 32で、ボルト単体で引張試験した降伏強さ、引張強さは840, 1000 MPaである。

ねじ底付近の顕微鏡組織写真を図2に示すが、表面から50 μm程度まで明瞭な転造組織が認められる。

3. 試 験 方 法

3.1 疲労および動的ゆりみ試験 エンジン運転

* 昭和61年10月6日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年5月16日。

** 正員、豊橋技術科学大学(〒440 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

*** 正員、慶應義塾大学理工学部(〒223 横浜市港北区日吉3-141)。

中にボルト締結部にかかる荷重は、ピストン、連接棒などの慣性力であるから、試験荷重の様式は片振り引張荷重とした。繰返負荷は、接続部の大端部と小端部にクランクピンとピストンピンを介して電気油圧式材料試験機（島津製作所製、負荷容量±20 t）によって加えた。負荷速度は20～30 Hzである。

3・2 ボルト軸力測定法 ボルト軸力の測定は、軸力の増大に伴ってボルト頭部が変形し、それに対応して磁束密度が変化することを利用した磁気軸力測定装置（東芝製）⁽⁶⁾を用いて行った。磁気軸力計の読みとボルト軸力との較正は、ボルトにひずみゲージを貼布し、別の較正用の締結体を用いて行った。この結果に基づいて、動的ゆるみ試験中での連接棒キャップボルトの軸力変化を調べた。

3・3 初期締付け 初期締付けによってねじ底に生じる公称応力は、ボルト平行部に張ったひずみゲージから荷重を求め、それを有効断面積で除して評価した。図3に連接棒キャップボルト軸応力を初期締付けトルクと回転角度との関係で整理して示す。

本研究では、現在使用している弾性域締付けと、塑性域締付けの2種類の締結方法を比較検討した。すなわち、降伏強さの70%に相当する締付け応力588 MPaを生ずる締付けトルク739.2 N・m (4 kg・m)と、

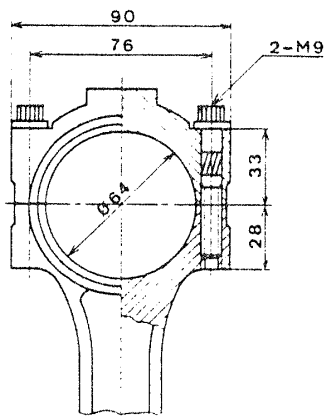


図1 連接棒キャップボルトの形状

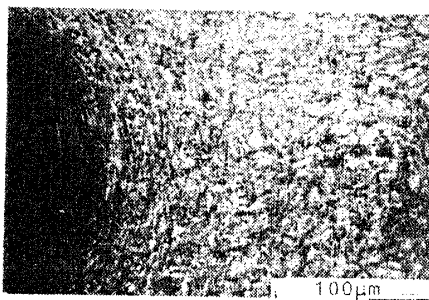


図2 ねじ底での顕微鏡組織写真

降伏強さ以上の882 MPaを生じる39.2 N・mのスナックトルクに回転角90°を加えたものである。

3・4 ボルト自体の疲労破壊の解析 マクロおよびSEMによるマイクロフラクトグラフィによって、ボルト自体の疲労破壊過程を調査し、その知見に基づいて連接棒キャップボルトの疲労強度に及ぼす塑性域締付け法の影響についての検討を加えた。

4. 結果と考察

塑性域締付けした連接棒キャップボルトの疲労強度を動的ゆるみ特性と関連させて、弾性域締付けと比較しつつ調べた結果について、以下のように考察した。

4・1 疲労強度 連接棒キャップボルトの実体疲労試験結果を、最大繰返し荷重 P_{max} と破断までの繰返し数 N との関係で整理して、図4に示す。なお、荷重レベル54, 46, 37 kNは、それぞれエンジン最大出力の200, 170, 140%オーバーランに相当する。

本図より、塑性域締付けは、従来の弾性域締付けよりボルト締結体の疲労強度を改善させることがわかる。例えば、疲労限度では、30%程度改善される。これをエンジン最大出力と対応させると、弾性域締付けでの疲労限度では最大荷重が37 kNでこれは140%オーバーランとなり、一方塑性域締付けでは46 kNでこれは170%ものオーバーランに耐え得ることになるといえる。

4・2 初期締付け軸力の繰返し外力による変化

実際のボルトの疲労破壊の原因の大半は、不適切な締付けに起因したゆるみである。塑性域締付けでは、ボルト自体が一度降伏しているため、その後の繰返し外力に抗して大きな軸力が依然として保証されるかどうか疑問が残る。それに関する実体試験によるデータ

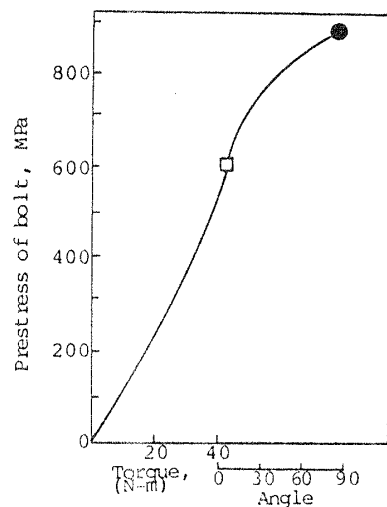


図3 締付け条件とボルトの初期締付け応力

の公表は少ないので、以下このことについて検討する。

疲労試験の過程での初期締付け軸力の変化は、磁気軸力計で調べた。負荷条件は、疲労試験と同様に 54-10, 46-10, 37-10 kN の三段階であり、軸力測定は、試験機を適宜とめて負荷を零にした状態で行った。

試験結果を図 5 に示すが、本図から繰返し外力による軸力変化の状態が次のように理解できる。すなわち、塑性域締付けの場合には、顕著な軸力低下が最初の 1 サイクル後に生ずる。しかし、幸いなことに、その軸力が弾性域締付けによるボルト軸力の大きさ以下となることはない。加えて、2 サイクル以後は軸力の低下は生じない。なお、ボルトと連接棒の相対回転角度は零であり、両者の間に相対回転は認められず、軸力低下に回転ゆるみは関与していない。

したがって、塑性域締付け法によってボルト締結体の疲労強度が改善されたのは、動的ゆるみが生じることなく大きな初期軸力が保たれるためと解釈できる。しかし一方で、ボルト自体の疲労強度を考えれば、降

伏強度を越える軸力はいわば降伏強度以上の平均応力がかかるわけであるから、機械部品の疲労設計の一般的常識では極めてきびしい状況である。この辺のことに理解を深めるために、以後、外力に対する連接棒の接合面の変形挙動と、さらに、ボルト自体の疲労破壊について検討を加える。

4.3 接合面変位量と疲労強度

本節では、連接棒接合面の変形挙動に及ぼす初期締付け力の影響を把握し、その知見に基づいて疲労強度の結果について検討を加える。まず、外力に対する接合面の変形挙動を知るために、図 6 に示すように分離面に 2 mm のテープをあて、その上にひずみゲージを貼付し A-A, B-B の変位量 d をひずみゲージによって測定した。その結果を外力 P を A-A 間のひずみ量 d との関係に整理して図 7 に示す。本図より、連接棒が外力によりまず内側 (A-A) から開き、外側 (B-B) に圧縮力が働き、さらに塑性域締付けのほうが、弾性域締付けより接合面変位量を、強く拘束することがわかる。すなわち、初期締付け力の増大は、引張外力に対する締結体接合面の変形を拘束する。このことが疲労強度にどのように関係するか検討すべく、接合面変位量 d と疲労強度の関係を次に調べる。

そこで、図 7 の d - P の関係に基づいて、疲労強度を最大荷重 P_{max} で整理した図 5 の P_{max} - N 線図を d_{max} - N の関係で整理し直すと、図 8 のように塑性域締付けあるいは弾性域締付けにかかわらず、疲労特性は一本の線図で表された。

本図の結果は、著者らが単純な形状の試験治具を用いて行った先の結果と一致し、接合面変位量 d が実際のボルト締結体の疲労強度を整理する上でも有効なパラメータであることがわかった。以上の結果より、連接棒のボルト締結体の疲労強度が、塑性域締付け法に

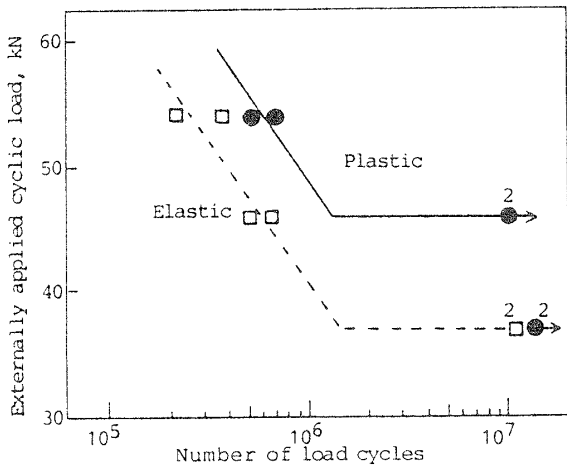


図 4 最大負荷 P_{max} -繰返数 N の関係

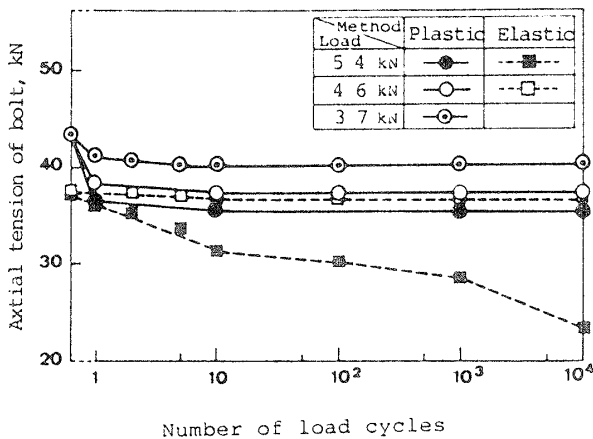


図 5 繰返し負荷によるボルトの初期締付け軸力の変化

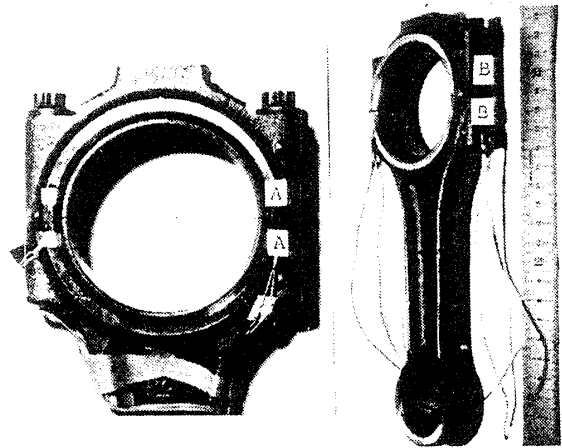


図 6 接合面変位量のひずみゲージによる測定箇所

よって改善されたのは、本法による初期締付け力が高いために、外力に対応した接合面変位量を小さくするからであると示唆された。

これは、ボルト自体の疲労強度とは、次のように関係しよう。すなわち、塑性域締付けによりボルト自体に大きな平均応力に加わり、そのためボルト自体の疲労限度は当然低下するが⁽²⁾、逆に大きな初期締付け応力によって、変位量 d が小さくなりボルト自体に生じる応力振幅も小さくなる。そのため、結果的にはボルト締結体がより大きな繰返し外力に耐え得ることになる。

この辺の状況をより明らかに把握するために、次節においてボルト自体の疲労破壊過程をフラクトグラフィによって検討する。

4.4 フラクトグラフィによる検討 まず、巨視的破面形態の一例を図9に示す。本図(a)は、塑性域締付け(4 kg・m+90°)で、疲労限度の117%の負荷で、

5.3×10^5 繰返し後破断した破面である。一方、本図(b)は、弾性域締付け(4 kg・m)で、疲労限度の124%の負荷で 6.3×10^5 繰返し後破断した破面である。いずれも、ねじ底に最大曲げ応力のかかる連接棒の内側から疲労き裂が発生し、外側で最終破断に至っている。

図9(a),(b)両者の巨視的破面形態の間には、疲労破面と最終破面の割合、さらに最終破面に至る直前の疲労破面の形態に相異が認められる。すなわち、塑性域の(a)では、弾性域の(b)と比べ疲労破面が少なく、最終破面直前の領域に、き裂進行方向に垂直な線が(b)では認められるが、(a)ではない。この垂直な線の中には、図10にSEMによる拡大写真を示すが、静的な延性破面が認められる。

これらの原因は、ボルト自体の疲労破壊の機構に及ぼす初期締付け力による平均応力と繰返し外力による繰返し曲げ応力の相対的大きさの相違に関連しよう。すなわち、塑性域締付けによる大きな引張りの平均応力は、疲労き裂が比較的短い段階で、すでに K_c に達しせしめ、急激な最終破断を導く。一方、弾性域締付けでは、大きな繰返し曲げ応力によって疲労き裂進展の中に静的引張破壊が混在し、き裂進行方向に垂直な線が目視で認められる。

次に、ねじ底からのき裂発生、進展機構について、

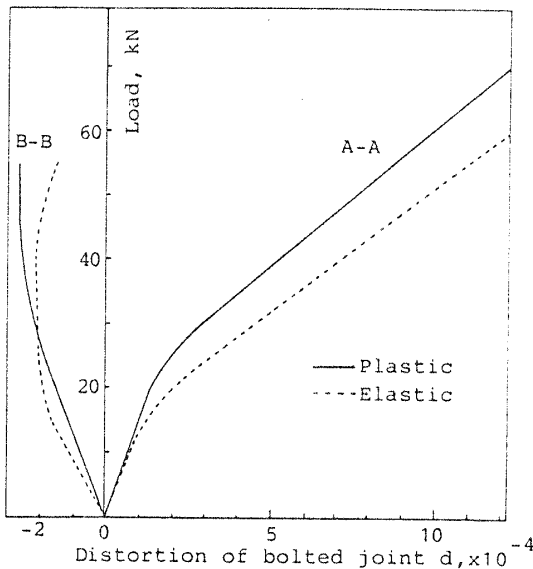


図7 接合面変位量 d と負荷 P の関係

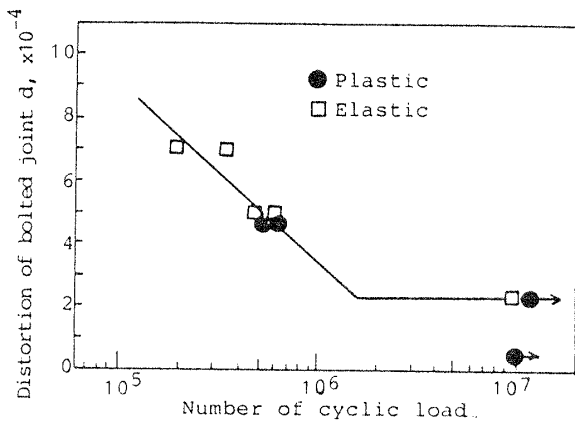
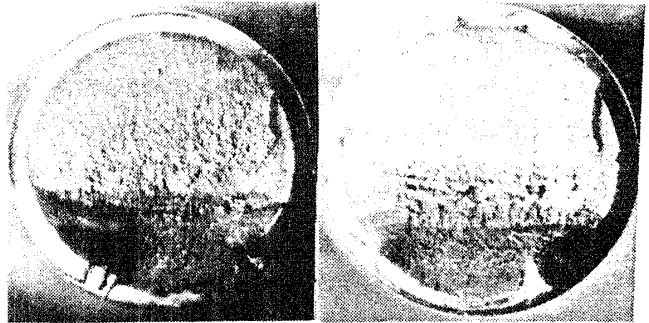


図8 接合面変位量 d -繰返数 N の関係



(a) 弾性域締付け (b) 塑性域締付け

図9 巨視的破面形態

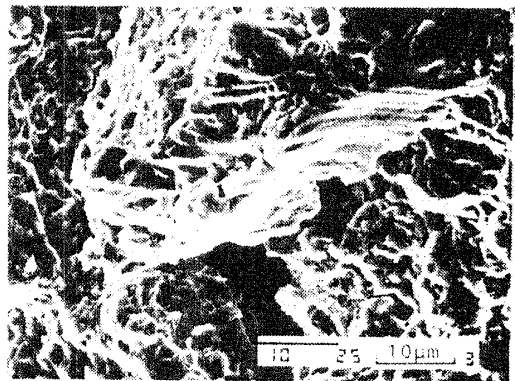
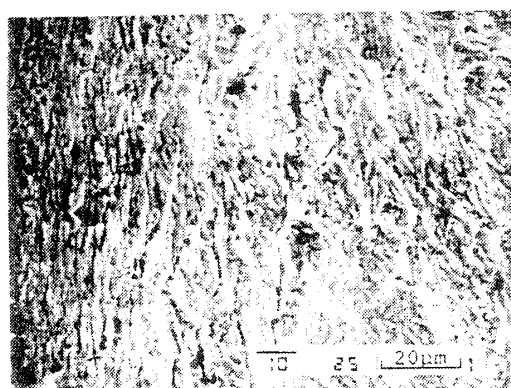
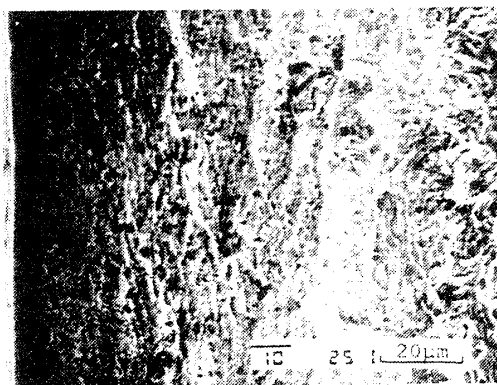


図10 最終破断直前での破面(弾性域締付け)



(a) き裂発生部の破面 (塑性域締付け)



(b) き裂発生部の破面 (弾性域締付け)

図 11 ねじ底でのき裂発生部の破面の SEM 写真

SEM 観察結果に基づいて検討を加える。図 11 は、図 9 の破面の疲労き裂発生部の SEM による拡大写真である。巨視的破面形態以上に、塑性域の図 10(a) と弾性域(b)の微視的破面形態の特徴の間に明りょうな相異が認められる。すなわち、(a)ではねじ底から $50 \mu\text{m}$ 程度までの領域で、き裂進行方向に垂直な線が互いに平行に認められる。この線は、図 2 のねじ底の顕微鏡組織写真と比較すると明らかであるが、転造組織と一致する。一方、(b)ではこの線が比較的不明りょうである。

これは次のように解釈される。(a)はもともとの金属組織と破面形態の特徴が明りょうに一致するいわゆる疲労き裂進展の Stage II-a⁽⁷⁾⁽⁸⁾に対応し、これはき裂進展が小さな繰返し曲げ応力での小さな繰返し塑性変形量で行われたことを意味する。一方、(b)はむしろ疲労き裂進展の Stage II-b に対応し、き裂進展は比較的高い繰返し応力に対応した大きな繰返し塑性変形量で行われた。これらの結果から、塑性域締付けボルトでは、弾性域と比べ平均応力が大きく、繰返し応力が小さい状況下で、疲労き裂発生・進展が行われたことが理解できる。

5. 結 言

ボルトをその塑性域まで締付けて、機械部品のボルト締結体の疲労強度を改善させる可能性について、実際の連接棒キャップボルトについての実体疲労試験および動的ゆるみ試験を行って検討を加え、以下の結論を得た。

(1) 本法により、疲労限度は従来の弾性域締付けより約 30% 改善された。これは、エンジン最大出力の 170% オーバランに耐え、従来のトルク法では 140% までに相当する。

(2) 本法の動的ゆるみ特性に問題はない。すなわ

ち、繰返し外力によるボルト締付け軸力の変化について、本法では最初の 1 サイクル後に軸力低下が生じるが、弾性域締付けによる初期軸力以下となることはない。その上、この軸力低下も 2 サイクル以降には生じない。

(3) 本法により締結した連接棒接合面の外力に対する変位量 d をひずみゲージで測定したところ、弾性法より顕著に小さかった。

(4) 接合面変位量 d は、ボルト締結体の疲労強度が初期締付け力の大小によって変化する程度を推定する上で有効なパラメータであると示唆された。例えば、塑性法、弾性法の締結方法の相違にかかわらず、疲労強度を $P-N$ 線図で整理すると 1 本の線図で表せた。

(5) ねじ底での疲労き裂生成部の破面形態について、本法では、転造組織が明りょうに残っており、弾性法では不明りょうである。これは、本法では弾性法と比べより小さな繰返し応力によりき裂の発生、進展が行われたものと解釈できる。

したがって、本法による疲労強度改善は、大きい初期締付け力によって、接合面変位量が拘束され、ボルト自体の繰返し応力が小さくなることと、併せて動的ゆるみ特性に問題がないためと理解される。

文 献

- (1) 高強度ボルト締結性能に関する標準化のための調査研究、1~4 (昭 53~57)、日本ねじ研究協会。
- (2) 鈴木・国尾、材料、31-346 (昭 57)、730。
- (3) 服部・野中・種田、高圧技術、23-1 (昭 60)、7。
- (4) 酒井、機論、44-383 (昭 53)、2505。
- (5) 中込・水野、精密機械、45 (昭 54)、529。
- (6) 森・ほか 4 名、機論、47-413、A (昭 55)、102。
- (7) Birkbeck, G., ほか 1 名、*J. Mat. Sci.*, 6 (1971)、319。
- (8) Suzuki, H. and McEvily, A. J., *Metall. Trans.*, A, 10 (1979)、475。