

シャシ締結構造体の小型化技術

Downsizing Technology for Chassis Parts Fastening Structure

菱田 元樹*

Motoki HISHIDA

朝見 明彦*

Akihiko ASAMI

佐藤 真人*

Masato SATO

石松 久嗣*

Hisashi ISHIMATSU

要 旨

次世代の軽量高性能なサスペンションを安価に実現すべく、締結構造体の小型化技術を開発した。実現するための要素技術として、車体系にも適用可能な 12.9 級、14.9 級の高強度ボルトと、締結接合面の限界摩擦特性制御技術を開発した。従来調質鋼による高強度化では遅れ破壊特性が低下するため、パテンティング処理を施したパーライト鋼を用いた高強度六角フランジボルトを開発し、高強度化と遅れ破壊特性の両立を実現した。開発した高精度摩擦係数測定技術に基づいて評価された微小凹凸の最適化により、安定的に耐すべり性を確保することを可能とした。締結接合面の限界摩擦特性制御技術は、締結構造体の小型化に貢献できた。これら二つの技術は 2016 年モデルの CIVIC において締結部位ごとに単独、または複合的に適宜組合せて適用され、軽量かつ安価なサスペンションを実現できた。

ABSTRACT

Downsizing technology for fastening structures was developed to realize a low-cost, next-generation, lightweight, high-performance suspension. The key technologies developed to achieve this were strength class 12.9 and 14.9 high-strength bolts that can also be applied to the vehicle body, and technology that controls the limit friction characteristic of the fastening joint surface. When the strength is increased with conventional thermal refining steel, the delayed fracture characteristic decreases, so a high-strength hexagon flange bolt was developed that uses patenting-treated pearlite steel to realize both increased strength and an enhanced delayed fracture characteristic. Technology for controlling the limit friction characteristic of the fastening joint surface made it possible to secure stable slipping resistance by optimization of micro unevenness, evaluated using developed accurate friction coefficient measurement technology, which helped to downsize the fastening structure. These two technologies were applied separately and in combination as appropriate to each fastening position in the 2016 model year CIVIC, and helped to achieve a lightweight and low-cost suspension.

1. まえがき

近年、燃費性能向上と運動性能向上の観点より、自動車軽量化ニーズが高まっている。また、商品魅力向上のために、C カテゴリなどの車両においてもマルチリンク形式のサスペンションを採用する例が多くなっており、軽量、高性能なサスペンションが求められている。

サスペンションは車体とタイヤ、ホイールをつなぐリンク機構であり、リンク取り付け部は一般的にゴムブッシュを介してボルトとナットによって締結される。マルチリン

ク化によりボルト締結部位も多くなるため、軽量で、小型のリンク取り付け部締結構造体を実現することで車両の軽量化に大きく貢献できる。

リンク取り付け部のゴムブッシュ特性は走行中の路面からの振動遮断のほか、操安性能や乗心地性能に大きく影響する。具体的には、振動遮断のために動ばね定数を低く、操安性能のために軸直方向ばね定数は高く、また、乗心地性能のためにねじり方向ばね定数は低くといった大きなばね比が求められる。一般的に軸直方向のゴム厚を薄くすると軸直方向ばね定数が高くなるためゴム硬度を下げるこ

*四輪 R&D センター

ができる。ゴム硬度を下げると、ねじり方向ばね定数が低くなる。プッシュ径を小さくすることによりばね比を大きくできるが、ゴム容量が減少する方向であるため、耐久性が課題となる。そこで本研究では、ゴム容量を確保したままプッシュの内径を小さくして、ばね比を大きくすることに着目し、締結構造体のボルトサイズを小さくする方法を検討した。

また、サスペンションのボルト締結点は、その周辺部品のレイアウトを設計する上での基点となるため、ボルトサイズを小さくすることで、周辺部品のレイアウト設計自由度も向上する。

従来のボルト小型化のアプローチとしては、ボルトの高強度化のみで対応することが一般的であった。例えば、シャン締結で一般的に用いられる高強度ボルトである強度区分 10.9 級の M14 ボルト (Fig. 1 の A 点) を M12 に小型化する場合を考える。同等の許容軸力を得るために、10.9 級の M12 ボルト (Fig. 1 の a 点) を高強度化しようとする。12.9 級の M12 ボルト (Fig. 1 の b 点) では許容軸力が足りず、14.9 級までの高強度化が必要となる (Fig. 1 の c 点)。また、後述の遅れ破壊特性の低下^{(1), (2)}の改善に加えて、めねじ強度の確保、被締結体座面強度の確保、締付けトルクの低減などが課題となるため、ボルトの高強度化のみでは適用可能な部位が限定される。

そこで、本研究では、プッシュを介したボルト締結構造に着目し、ボルトの高強度化のみに頼らない小型化の手法を検討した。Fig. 2 にプッシュを介した締結構造体に発生する荷重状態の概念図を示す。式 (1) に示すように、締結構造体に負荷される最大外力 F_v に対して、ボルト軸力 F と締結接合面の限界摩擦係数 μ との積が上回るようにボルトサイズが設計される。なお、限界摩擦係数は、すべりが発生しない最大外力とボルト軸力との比で定義した。

$$F_v < \mu F \quad (1)$$

ボルトを高強度化することで、ボルトサイズを大きくす

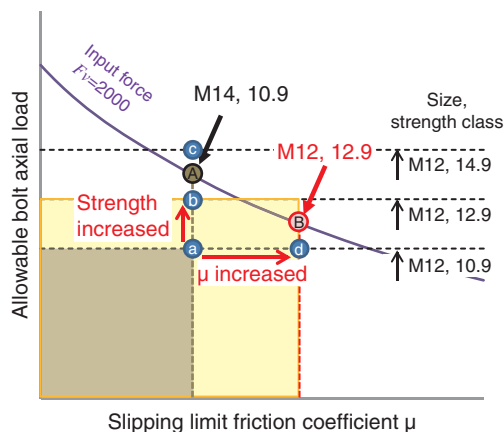


Fig. 1 Relationship between bolt axial load, slipping coefficient and bolt size

ることなく必要軸力を確保することに加え、接合面の限界摩擦係数 μ を向上させることでも、許容荷重を高めることが検討されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。これを Fig. 1 で示すと、 μ の向上により Fig. 1 の d 点からのボルト高強度化が可能になり、12.9 級のボルト軸力で最大外力を許容することができる (Fig. 1 の B 点)。したがって、これらの二つのアプローチがボルトサイズを小さくするために有用であり、締結部位ごとに単独、または複合的に適宜組み合わせることで適用範囲が拡大し、より大きな軽量化効果が期待できる。

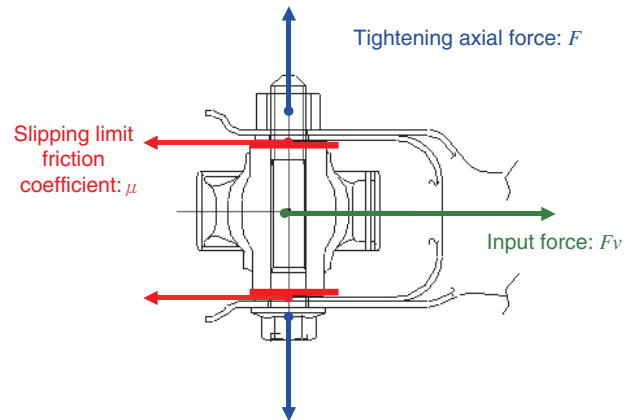


Fig. 2 Schematic illustration of bolt fastening structure

2. 開発の課題と目標

2.1. 高強度ボルト

高強度ボルトを適用する際には、鋼材強度の上昇に伴い、遅れ破壊が発生することが知られている。特に引張強度が 1200 MPa を超える領域では遅れ破壊特性が低下する傾向がある。遅れ破壊は、実使用時の腐食反応により発生し、吸蔵される拡散性水素によるものと考えられており、シャン部品のように腐食環境下で使用されるボルトでは、特に遅れ破壊特性向上の必要性が高くなる。

高強度ボルトに適用可能で、遅れ破壊特性を向上させる材料は二種類に大別される。一つは、合金添加と熱処理を用いる調質鋼線である。しかし、これは材料単価が高くなることに加えて、熱処理品質の安定性確保が課題となる。もう一つはピアノ線に代表される、パテンティング処理と呼ばれる恒温変態処理を施した鋼材 (以降、パテンティング鋼) である。調質鋼線に比べ同一強度で比較すると遅れ破壊特性に優れており、Honda では 16.9 級高強度ボルト材料として採用し、エンジン部材を締結している⁽⁶⁾。しかし、パテンティング鋼を用いたボルトの製造は Fig. 3 に示す通り、ボルト成形前の伸線加工率が高い場合、材料強度が高いために六角フランジボルトの頭部成形が課題となる。一方、伸線加工率が低い場合、ボルト成形時の軸部成形の加工度を高くする必要があり、圧造金型への負担荷

重が高くなる。伸線加工とその後の塑性変形により強度を満足させるために、成形時の材料強度が調質鋼と比較して高く、強度と成形性の両立が課題となる。このため、これまでパテンティング鋼を用いた高強度ボルトは、ボルト頭部形状の成形が容易なヘキサローブ型への適用にとどまっていた。シャシ用締結ボルトにおいては、ヘキサローブ形状は欧米では普及しているものの、グローバルでの展開を考慮すると、既存工程を変更することなく締め付け可能な六角フランジボルトへのニーズが高い (Fig. 4)。これまでに、調質処理を施さないボルト用線材が開発されているが、圧造時の変形抵抗が高いために、成形性確保、工具寿命確保の観点から、強度区分 8.8 級までの適用に限界であった⁽⁷⁾。

そこで高強度ボルト開発では、シャシ部品の実使用環境下を想定した腐食環境で、十分な耐遅れ破壊特性を有し、従来材同等の熱的安定性を有する、12.9 級、14.9 級の六角フランジボルトを目標とした。

2.2. 締結接合面の限界摩擦特性制御

締結接合面の限界摩擦特性については、これまでに種々の締結組合せに対して検証されている。しかしながら、限界摩擦係数の測定は、一般的に確立された計測手法がなく、異なる手法で計測された実験値を参照することが多く、系統的な整理が不足していた。これは、摩擦係数の測定が多くの環境因子 (試験片、治具、荷重付与方法、清浄度等) に影響されることでばらつきが大きくなることや、すべり開始点の定義とその判定が容易ではないといった点が原因であったと考えられる。特に実車走行時荷重入力環境下で用いられるブッシュを介したボルト締結構造体における、締結接合面のすべり挙動は、構造や入力荷重が複雑となるため、解析は容易ではない。

このような状況のため、締結接合面のすべり特性の向上に影響を及ぼす因子やその効果については、統一的な見解



(a) Hexalobular internal bolt (b) Hexagon flange bolt

Fig. 4 Shape difference between hexalobular internal bolt and hexagon flange bolt

が得られていない。そこで、締結接合面の摩擦特性制御技術開発では、締結接合面の限界摩擦特性に及ぼす表面性状の影響を系統的に評価し、安価な手法で高い限界摩擦係数を実現することを目標とした。

3. 車体用高強度ボルトの開発

3.1. 鋼種選定

材料選定は、コスト、調達性、リサイクル性を考慮して汎用性の高い冷間圧造用炭素鋼線を基本組成として検討した。冷間圧造用炭素鋼線の強度は、カーボン (C) 量が主たる影響因子になるため、パテンティング処理とその後の伸線加工の影響を考慮した成分選定をおこなった。Table 1 に本開発で設定した強度 12.9 級、14.9 級のボルトに対応する材料成分を示す。なお、ここで実施したパテンティング処理は、強度と延性のバランスを向上させるためにパーライト組織の均一化と微細化、フェライト素地の確保のため C 量を低減することをねらいとして施した。パテンティング処理の後、伸線加工をおこない、組織の微細化による強度確保をおこなった。前述のとおり、伸線加工率の設定が六角フランジボルト成形における鍵となる。Fig. 5 にボルト成形可能な伸線加工率を設定した結果を示す。

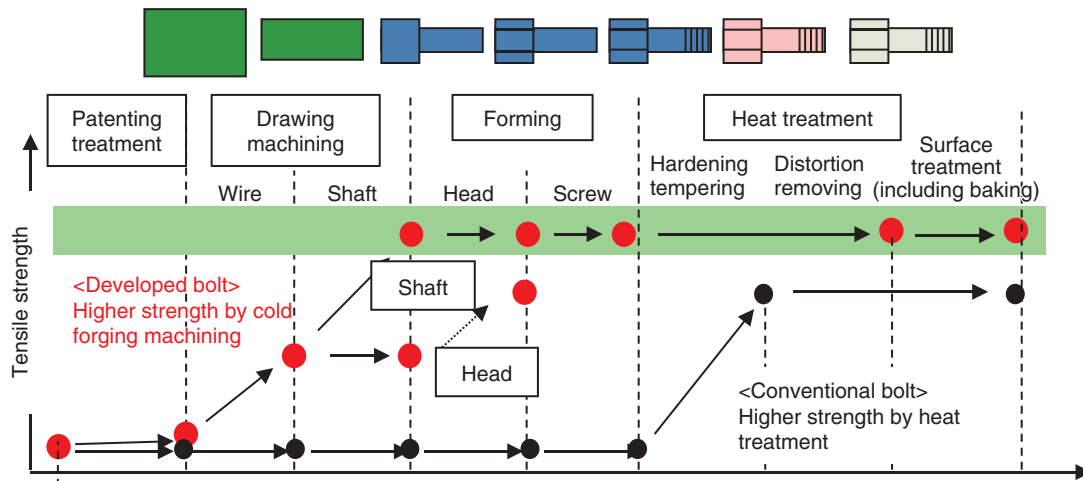


Fig. 3 Relationship between bolt manufacturing process and strength transition

Table 1 Material composition

Bolt Strength class	Composition mass%				
	C	Si	Mn	P	S
12.9	0.54 -0.61	0.15 -0.35	0.60 -0.90	≤0.030	≤0.030
14.9	0.69 -0.76	0.15 -0.35	0.60 -0.90	≤0.030	≤0.030

ボルト強度 12.9 級, 14.9 級でそれぞれ最適な伸線加工率を設定した。

3.2. ひずみ取りの熱処理

本開発で成形したボルトは、伸線加工と圧造加工において導入されたひずみにより、フェライト層に転位が多く蓄積されている。このため、圧造したままでは可動転位密度が高いことからリラクゼーション特性が低く、蓄積された転位にトラップされる水素が多くなるため、遅れ破壊特性が低下する。そこで、成形時のひずみ導入によるへたり、遅れ破壊特性の改善を目的として、ブルーイング処理（ひずみ取り熱処理）をおこなった。Fig. 6 に、ブルーイング処理に伴う材料内部組織の変化を示す。ひずみが蓄積されている領域は、転位が蓄積することで電子線が透過しにくくなるため黒いコントラストで示される。熱処理前と 350℃ 熱処理後の金属組織を比較すると、フェライト層の転位が消滅し、ひずみが解放されていることが確認される。一方、450℃ のブルーイング処理を実施した場合には、セメンタイトが球状化し、パーライト組織の崩壊が始まっていることが確認される。このような低温熱処理によるパーライト組織の崩壊は、強加工により導入された多量の転位が組織変化の駆動力となったことによると考えられる⁽⁸⁾。Fig. 7 に引張強度とブルーイング処理温度との関係を検証した。

その結果、400℃ 以上になると急激に強度が落ち込む傾向にあった。ブルーイング温度は、ボルトのねらいの強度区分を下回ることのない高い温度で処理することで高い熱的安定性を確保できる。したがって、本開発では熱処理にお

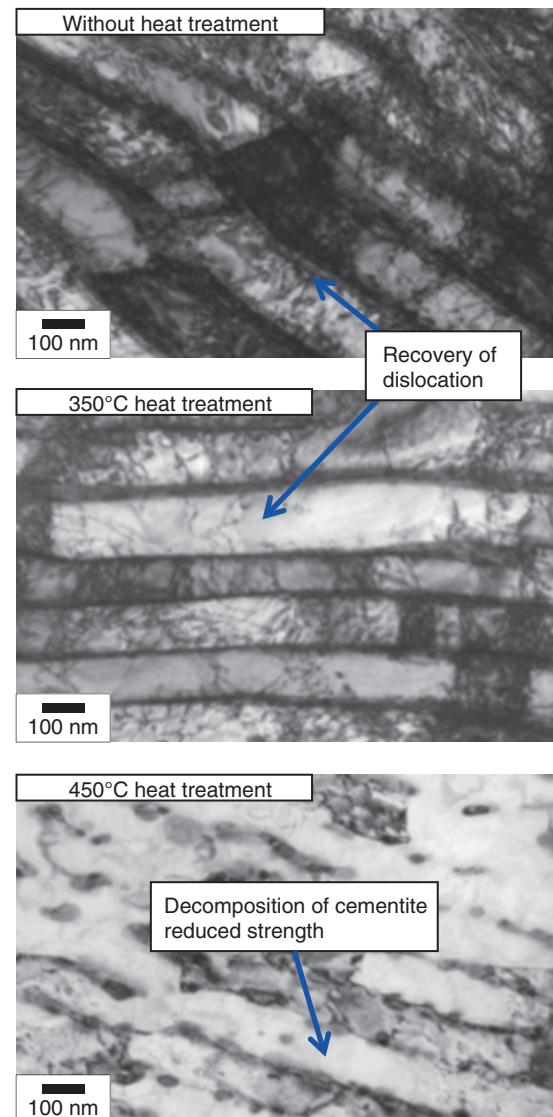


Fig. 6 Photographs of metal structure before and after heat treatment

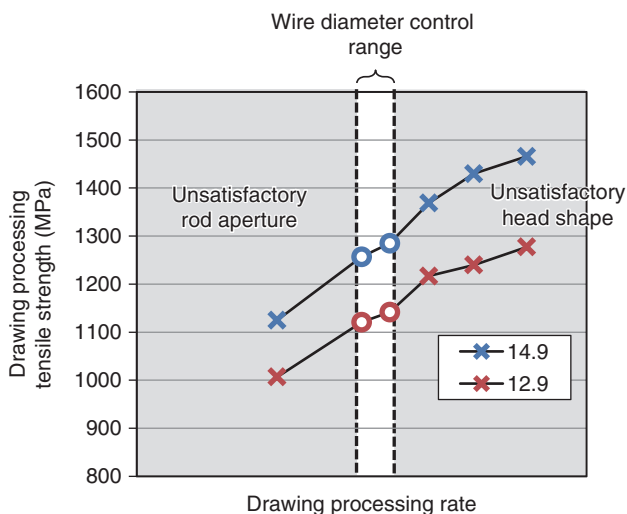


Fig. 5 Relationship between tensile strength and wire drawing rate

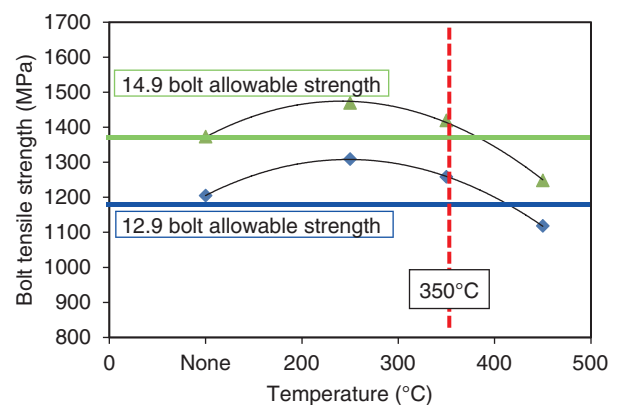


Fig. 7 Relationship between tensile strength and heat treatment temperature

ける品質ばらつきを考慮して、ブルーイング温度を 350℃ に設定した。

一般使用環境においては、常温以上で使われることが想定されるため、熱的安定性の確保が必要となる。そこで、ブルーイング処理による熱処理安定性の向上効果を検証した。常温で締め付けた開発ボルトを 150℃ で 100 時間放置したときの締結残存軸力を測定する。その結果、ひずみ取り熱処理したボルトは残存軸力が 20% 改善し、強度区分 10.9 級の調質型ボルトと同等の熱的安定性を有していることが確認された (Fig. 8)。

3.3. 遅れ破壊特性

遅れ破壊は、腐食やめっき等の外部から鋼中に侵入する水素によって引き起こされる。遅れ破壊特性の検証は、電解水素チャージ法により鋼材中に強制的に水素を導入させた状態で、引張強度の 0.9 倍の一定荷重で引張応力を付与した試験において、破断しない限界水素濃度を電解水素チャージ法により測定した。Fig. 9 は、開発ボルトに種々の温度条件で熱処理による脱水素処理を施した際の拡散性水素曲線を示す。200℃ で脱水素処理を施した仕様では破断が発生しないことから、250℃ までのピーク面積に相当する拡散性水素量が遅れ破壊に影響を及ぼすことを示している。以降の水素量評価では、250℃ までの水素量进行评估することとした。

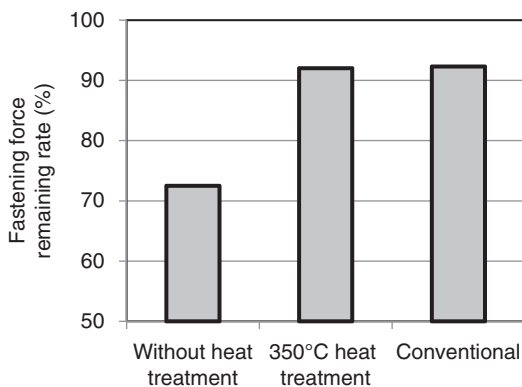


Fig. 8 Effect of strain-removing heat treatment

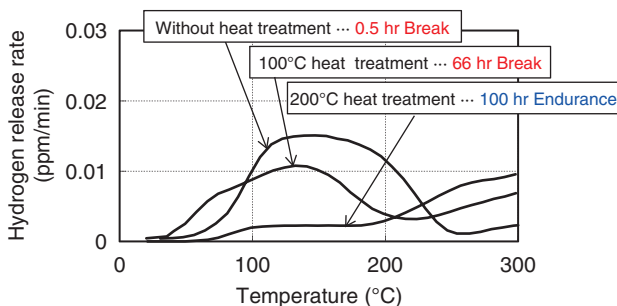


Fig. 9 Relationship between hydrogen release rate and temperature

耐遅れ破壊特性の定量評価として限界水素量 (Hc) と侵入水素量 (He) の測定を実施した。Hc の測定は、電解水素チャージ法によりおこなった。鋼材表面に種々のチャージ条件でアノード電位を発生させて水素を鋼材中に取り込んだ。He は、実車環境を模擬した錆耐久試験下でボルトに水素侵入させ、試験後直ちに水素量測定をすることにより算出した。

Hc/He の値が高いほど耐遅れ破壊性が高くなる。Fig. 10 に開発ボルトの Hc/He の測定結果を示す。比較として、開発ボルトと同等強度を有する調質型従来ボルトの値を示す。開発した 12.9 級、14.9 級のボルトは、調質型ボルトに対して優れた遅れ破壊特性を有していることが明らかとなった。また、実車錆環境を想定した試験下において侵入する水素量に対して、十分大きな限界水素量を有していることから、本開発ボルトがシャシ部品に適用可能な高強度ボルトであることが確認された。

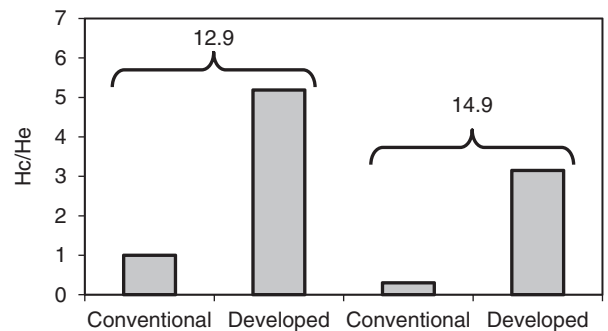


Fig. 10 Comparison of Hc/He between conventional and developed bolts

4. ボルト締結接合面の高限界摩擦係数の実現

4.1. 接合面の限界摩擦特性の評価技術の確立

本研究では、対象となる締結構造体を、単純構造でモデル化した試験装置を開発し、種々の改良を加えることで、接合面のすべり特性の安定的評価を可能とする手法の確立を試みた。

Fig. 11 に本研究で使用した限界摩擦特性評価用の測定装置の概念図を示す。プッシュの挟み込み構造を模擬した治具として、2 枚のテストピース A によりテストピース B のパイプ部材を挟み込む構造とした。なお、供試材は量産で適用されている代表的な締結組合せとして、A はカチオン電着塗装が施された強度 440 MPa 級の鋼板、B は SWCH10R⁽⁹⁾ が選択された。あらかじめボルト締結により所定軸力が付与された B に、初期軸力の付与方向に対して垂直となるように、実車入力を想定した外力を 1 mm/min の速度で静的に付与した。このとき得られる外力と A と B

の相対的変位の関係から、接合面の限界摩擦特性を評価した。Fig. 12 に本試験で得られた結果を示す。外力と変位の関係に加えて、試験中のボルト軸力変動を示している。外力の変曲点において、軸力変動も変曲点を示していることがわかり、これ以降は軸力が漸減することから、軸力が極大点を示す位置をすべり開始点と定義し、限界摩擦係数を算出した。なお、本開発で用いた試験手法では、試験結果のばらつきを抑えるために、外力付与時の軸の安定化、被締結体の固定位置と固定方法の安定化、変位測定位置の安定化などの種々の改良を加えた。その結果、Fig. 13 に示すように、複数回の試験にて外力と変位の関係が安定していることが確認された。

4.2. 接合面表面性状が限界摩擦特性に及ぼす影響

接合面の限界摩擦特性に及ぼす、表面性状の影響を検証することを目的として、種々の制御手法により得られた異なる表面性状に対して、限界摩擦特性の静的検証を実施した。Table 2 に本開発で用いた表面性状の制御手法を示す。これらの手法における設定パラメータの変更により、種々

Table 2 Methods for controlling surface roughness

Sample	a	b1, b2	c1, c2	d1, d2, d3
Process	As forged	Forming	Wet blast	Air blast
Method	-	Form-rolling	Sprayed pressure (up to 5 MPa)	Sprayed air pressure

の表面性状を有するサンプルを作製した。Fig. 14 に表面粗さ (Rk) と接合面の限界摩擦係数との関係を示す。なお、Rk は粗さ曲線の突出山部と突出谷部を除いたコア部のレベル差を示すパラメータ⁽¹⁰⁾である。すべり試験は $n=3$ で実施し、その平均値をプロットした。Rk の増加に伴い、限界摩擦係数が増加し、Rk が 30 μm 以上の領域では摩擦係数が減少する傾向が確認された。これは、表面粗さの増加は摩擦係数向上に有効であるものの、過大な粗面化処理は逆に摩擦特性を低下させることを示唆している。

一般的に、接触固体間ですべりが発生する場合には、真実接触部の結合部がせん断される。結合部のせん断強さを S とすると、せん断による摩擦力 F_s は、

$$F_s = ArS \quad (2)$$

で示される。ここで、 Ar は真実接触面積であり、これが大きくなるとせん断による摩擦力が大きくなり、高い摩擦係数を示す。このことから、適度な粗面化処理は真実接触面

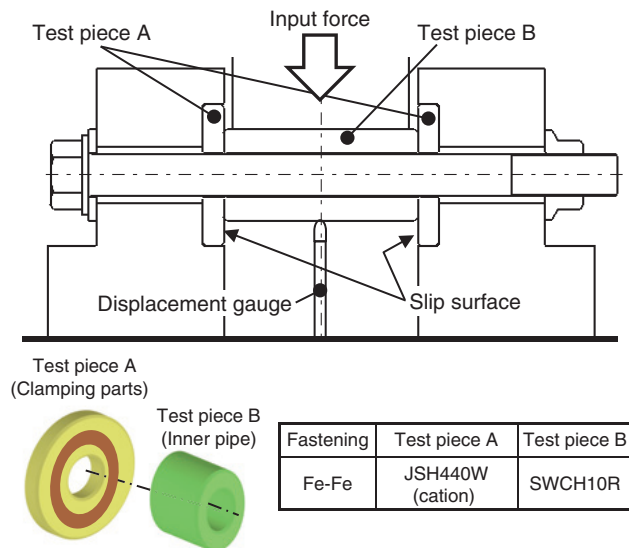


Fig. 11 Developed slipping test method and specimens

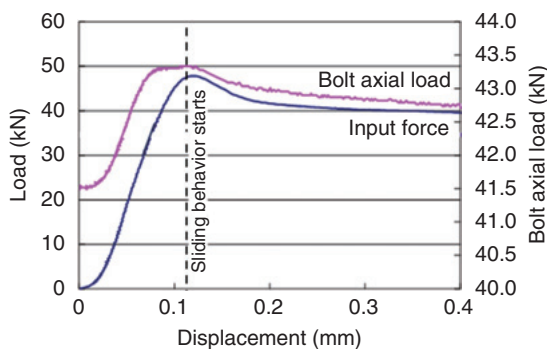


Fig. 12 Relationship between bolt load and displacement

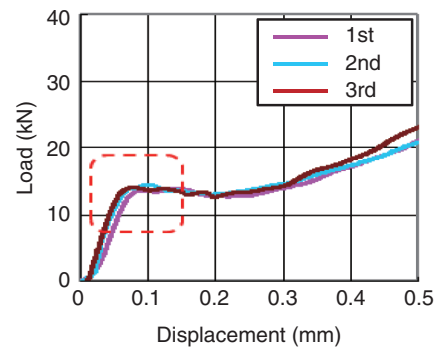


Fig. 13 Relationship between load and displacement for developed method

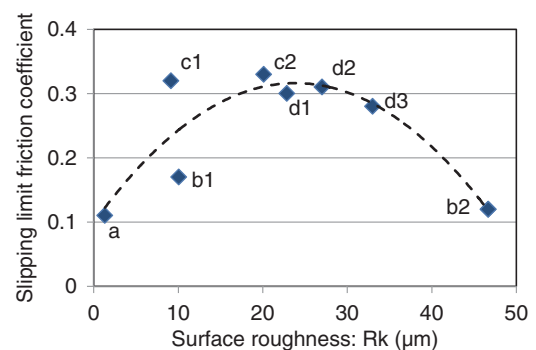


Fig. 14 Relationship between Rk and slipping limit friction coefficient

積を増加させ、過大な粗面化処理は真実接触面積を減少させていると考えられる。

さらに、Fig. 14では、 R_k が10 μm 付近で、同等(b1とc1)の R_k を有しているにも関わらず、限界摩擦係数が大きく異なる二つの仕様が確認できる。これらの仕様の差異を検証するために、表面性状のミクロ組織をSEM画像により比較した結果をFig. 15に示す。Fig. 15(b1)は圧造による粗面化処理を施しているため、粗大な凹凸が付与されている。一方、Fig. 15(c1)はウェットブラスト処理により、微小な凹凸が高密度に分散していることが確認できる。これらの比較から、接合面の限界摩擦特性向上に対して、微小な凹凸が大きく影響していることが示唆されたため、次節ではその影響について検証した。

4.3. 限界摩擦係数向上に寄与するメカニズム解明

接合面の限界摩擦特性に及ぼす微小凹凸の影響の詳細解析のために、表面凹凸をファイバレーザ処理にて付与した仕様に対する限界摩擦特性を評価した。ここで、ファイバレーザ処理を用いた理由は、任意の入力パラメータ設定により、微小凹凸を規則的かつ安定的に付与することができるためである。なお、ブラスト処理のような粗面化処理では、微小凹凸と共に粗大な凹凸が付与されてしまい、微小凹凸のみの影響に着目した検証ができなかったと考えた。ファイバレーザ加工の施工条件はTable 3に示す。凸部高さは1.25 μm となるように設定した。同条件によるすべり係数の測定結果をFig. 16に示す。本図よりシャシ締結軸力レベルにおける限界摩擦特性はピッチ間隔が0.12 mm以下の設定により高くなる傾向があることが確認された。これは、高さ1.25 μm という微小な凹凸であっても、高密度に分散させることにより、限界摩擦特性が向上することを示している。

以上の結果から、接合面の限界摩擦特性の向上に対して μm オーダの微小凹凸付与の影響が大きく、ショットブラスト、ウェットブラストのような簡便な手法によって

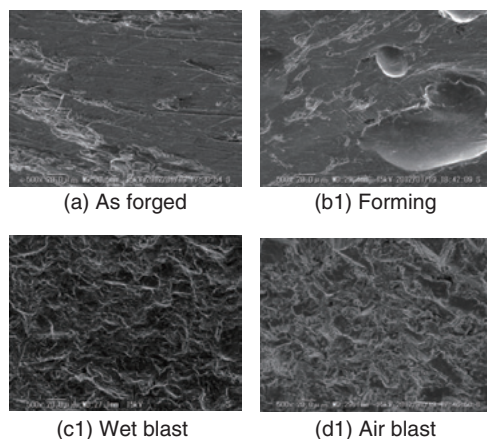


Fig. 15 SEM images of inner pipe surface after phosphate treatment

Table 3 Laser processing conditions

Frequency	Rated output	Peak output
30 Hz	30 W	20 kW

制御された仕様においても、このような微小凹凸の高密度分散が限界摩擦特性向上に有効であることが明らかとなった。

4.4. 耐繰返し入力特性評価

実車入力状態に近い条件での検証を目的として、前述の静的試験と同様の試験治具を用いて、30 Hzで繰返し両振り入力を与付した際の繰返し限界摩擦特性を検証した。すべり判定は、繰返し入力を10万回付与後に外観上マクロなすべりが発生していないこと、かつ、締結軸力低下が10%以内であることを確認し、設定した両振り入力荷重ですべりが発生しない限界荷重を検証し、その限界荷重を繰返し限界摩擦係数に換算した。

Fig. 17に、繰返し入力条件を付与した際の繰返し限界摩擦係数を示す。微小凹凸を付与した開発仕様は、前節ま

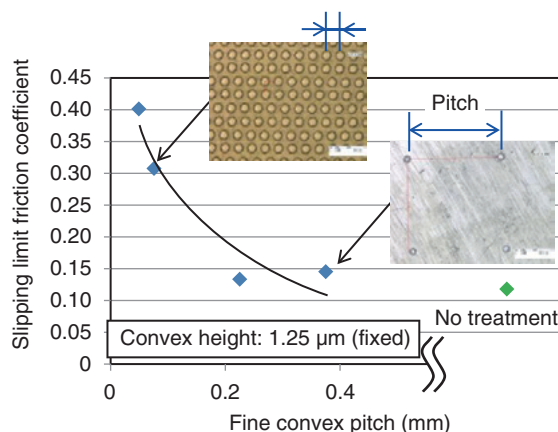


Fig. 16 Relationship between convex pitch and slipping limit friction coefficient

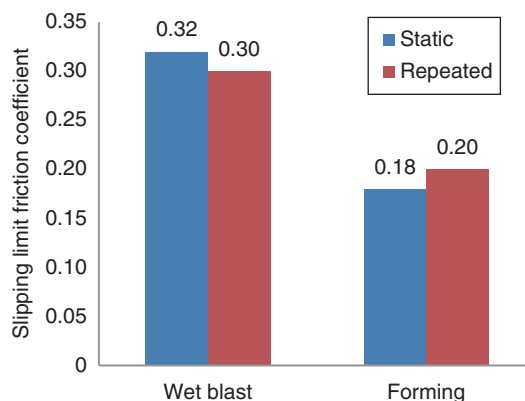


Fig. 17 Results of repeated force input test on Fe-Fe part with micro unevenness

でに評価した静的な限界摩擦係数に対してわずかに低下するものの、高い繰返し限界摩擦係数を示している。以上の結果から、本開発で設定した微小凹凸仕様が、実車入力環境下でも高い限界摩擦特性を向上するために有用であることが示された。

5. 適用効果

本研究で開発した高強度ボルトと接合面の限界摩擦特性制御技術は、2016年モデルのCIVICのサスペンション部品の複数の締結部位に適用された。Fig. 18に本技術の適用部位の例を示す。なお、本技術の軽量化量は、ボルト、ブッシュ、周辺部位を合わせて、1箇所当たり約0.05 kgの軽量化効果があることが確認された。Fig. 19に本研究で開発された二つの要素技術の組合せによる軽量化効果を示す。締結接合面の限界摩擦特性向上技術による軽量化効果は、約0.6 kg/台である。高強度ボルトとの要素技術を組合せた場合には、さらに0.2 kg/台の軽量化効果が認められ、合

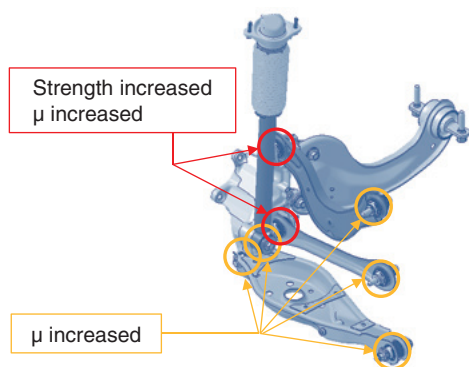


Fig. 18 Illustration of 2016 model year CIVIC rear suspension with weight reduction technology

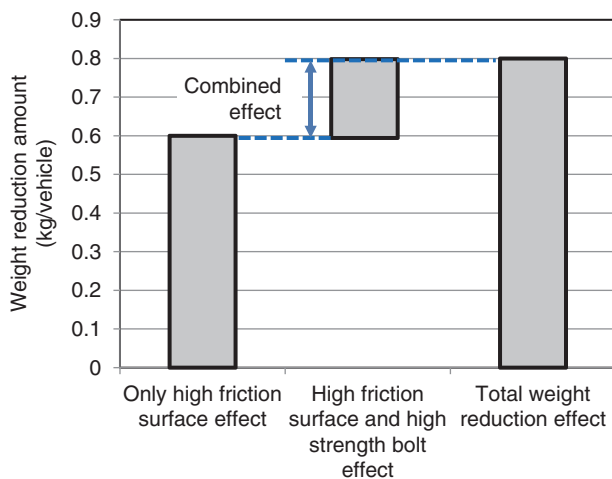


Fig. 19 Illustration of weight reduction effects for 2016 model year CIVIC rear suspension

計0.8 kg/台の軽量化効果が得られた。このことは、本開発で確立した技術を複合的に適用することにより、より大きな軽量化効果が得られることを示している。ここで示した軽量化効果は今回適用した機種の場合であるが、他機種に対しても、単独または複合的に適宜適用することで、同様の複合効果が得られることが期待される。また、本開発で得られた小型化効果は、車体燃費の向上のみならず、ブッシュ外径を約9%小型化できたことにより、部品レイアウト自由度の向上に貢献した。

6. まとめ

シャシ部品におけるブッシュを介した締結構造体の小型化を目的として、遅れ破壊特性に優れる高強度ボルトと、締結接合面の限界摩擦特性向上技術を開発した。また、本開発で確立した二つの技術を単独、または複合的に適宜組合せることで、より大きな小型化効果が得られることが明らかとなった。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 強度と成形性を両立するために、ボルト用線材の最適な伸線加工率を設定し、強度区分12.9級、14.9級に対応するC量を、それぞれ0.54 wt.%C-0.61 wt.%C、0.69 wt.%C-0.76 wt.%Cに設定した。
- (2) 伸線加工とボルト圧造工程において導入されたひずみの開放を目的として、350℃でのブルーイング処理をおこなった。これにより、リラクゼーション特性が改善され、シャシ部品で必要とされる熱的安定性を確保した。さらに、実車使用時の腐食環境を考慮した遅れ破壊特性の検証により、十分な耐遅れ破壊特性を有していることが確認された。
- (3) 接合面の限界摩擦特性において、 μm オーダの微小凹凸が限界摩擦係数向上に有効であることが明らかとなった。また、これを安価に実現する手法として、ウェットブラスト処理、ショットブラスト処理が有効であることを確認した。

参考文献

- (1) 中野元裕：高強度鋼線の現状と製造技術，塑性と加工，第54巻，第624号，p. 4-8，(2013)
- (2) 中里福和：最近の高強度ボルト用鋼とその関連技術，熱処理，43巻，3号，p. 129-136，(2003)
- (3) 丸山一男，澤俊行，辻裕一：ねじ締結体の接合面のすべり係数に関する実験結果報告書，日本ねじ研究協会部門誌，p.1-32，(1993)
- (4) Pai, N. G., Hess, D. P.: Three-dimensional Finite Element Analysis of Threaded Fastener Loosening due to Dynamic Shear Load, Engineering Failure Analysis, Vol. 9, p. 383-402, (2002)

- (5) Izumi, S., Yokoyama, T., Iwasaki, A., Sakai, S.:
Three-dimensional Finite Element Analysis of
Tightening and Loosening Mechanism of Threaded
Fastener, Engineering Failure Analysis, Vol. 12, p.
604-615, (2005)
- (6) 高島光男, 飯田善次, 高田健太郎, 森誠治: 1600 N/
mm² 級高強度ボルトの開発, Honda Technical Review,
Vol. 15, No. 2, p. 183-188
- (7) 鹿磯正人, 千葉政道: 非調質ボルト用線材, R&D 神戸
製鋼技法, Vol. 52, No. 3, p. 52-56, (2002)
- (8) 樽井敏三, 丸山直紀, 高橋淳, 西田世紀, 田代均: 高
炭素鋼線の組織制御と高強度化, 新日鐵技報 第 381
号, p. 51-56, (2004)
- (9) JIS G 3507-2: 2005, 冷間圧造用炭素鋼—第 2 部: 線
- (10) ISO 13565-2: 1996, Geometrical Product
Specifications (GPS) — Surface texture: Profile
method; Surfaces having stratified functional
properties — Part 2 Height characterization using the
linear material ratio curve

■ 著 者 ■



菱田 元樹



佐藤 真人



朝見 明彦



石松 久嗣