



ボルトナットの多くは、トルクレンチ、油圧式インパクトレンチ、過剰トルクカット式レンチなど、トルク法で締付を行なっています。

トルク法で締め付けをする時、たくさんの技術者、整備士、組立作業者が共通した疑問を持ちます。それは、「このボルトは、どれだけのトルクを掛けて締めたらいいのか？」というものです。そしてこの疑問に対して最も正しく、おそらく何の役に立たない回答が、「最適な軸力の発生に必要なだけのトルクで締付を行なって下さい。」です。

この回答の問題点は、実際の作業環境下で“軸力”を測定する手段が、まず存在しない事です。その代わりに締め付けに掛ける力である“トルク”を測定するという事は、昔から可能だった為に、トルクレンチによるトルク法が一般化しました。

では、「どれだけのトルクで締め付ければいいのか？」という質問に答えようとすると、“トルク”と“軸力”とは何か？ そしてその関係はどのようなものなのか？ という説明が必要になってきます。“トルク”とは締付の時にナットやボルトを回す“回転力”です。ナットにトルクを掛けるとナットは回転しながらボルトのねじを登って行き、ボルトの頭とナットの間の距離は近づいていきます。しかしこの時、被締結物がボルトの頭とナットの間にある場合、間に挟まっている被締結物の為に距離を縮める事が出来ず、結果代わりに距離を縮めようとする力でボルト自体の軸が引き伸ばされます。このボルトの伸びはバネと同じように作用し被締結体を挟む予張力、即ち“軸力”となります。

軸力が発生している状態とは、ボルトナットによる被締結物を圧縮する力と被締結物からの反発する力が釣り合っている状態です。この状態、つまり軸力こそがボルト締結で最も肝心の固定する力であり、軸力によってボルト締結体の構成部品は一つにまとまっています。

トルク法によるボルト締めを行う際、一般的にはボルトサイズ、ピッチ、強度区分、表面処理、潤滑の有無、その他諸条件とトルク表を照らし合わせ値を見つけます。略式のトルク表の例が下の図1.です。例えば、ボルト径 M12、ピッチ 1.75 の強度区分 8.8 ボルトの場合、トルク表の真ん中の標準値によれば推奨トルクは 88Nm となりますが、このトルク値は何に基づいているのでしょうか？

図1. トルク表 (略式)

		強度区分 8.8		
		トルク値 Nm		
ボルト径	ピッチ	K=0.15	K=0.2	K=0.25
M10	1.50	38	51	63
M12	1.75	66	88	110
M16	2.00	164	218	273

このトルク値は略式のトルク・軸力(予張力)方程式で計上されたものです。ビックフォードの方程式では、 $T = K \cdot F \cdot D$ というもので、それぞれ T =締め付けトルク、 K = ナット係数、 F = 到達した軸力(予張力)、 D = ボルトの呼び径を表します (Bickford 1995, p226)。

ナット係数とは経験則に基づいた、トルクの大きさに比例して発生する軸力を推定計算する時に使う係数です。ナット係数は摩擦の他に、トルク・軸力の関係に影響すると思われる様々な要因の変動も一緒に含めます。材質、ボルト寸、重さなどの直径以外のボルトサイズ、ナットやワッシャーの種類やその表面処理、ねじのさびや摩耗、潤滑の有無と度合い、過去の締付回数などの要素をまとめて、“ナット係数”として計算に含みますが感覚的なものも含む為、当然精密な計算ではありません。

ナット係数を使用する略式のトルク・軸力方程式に関するより詳しい考察については Dave Archer 氏著の Dissecting the Nut Factor (ナット係数の解剖分析) をご参考下さい。(*著作権の都合上、残念ながらこの参考文献の訳文を用意する予定はありません。)

目標軸力はボルトの強度的限界だけでなく、その締結体全体としての要求事項に基づいて決められる事が理想的です。ここでの留意点は、先の一例を含むトルク表の多くはボルト保証荷重の75%を基準値として使用しているということです。この基準値を目標軸力(予張力)とした前提で、前述のナット係数と共にこのトルク・軸力方程式に適用しています。例えば M12-1.75 の強度区分 8.8 のボルトの保証荷重は 48,900N ですが、この75%は 36,675N です。この方程式の中で、ボルトの呼び径だけが単純明快な情報です。方程式の解であるトルクの単位は Nmm(ニュートンミリメートル) ですので、Nm(ニュートンメートル) に換算するには、1000 (1M=1000mm) で割ります。この例でいえば方程式の解であるトルクは 88Nm となります。つまり、 $T = K \cdot F \cdot D = (0.2) \cdot (36,675N) \cdot (12mm) = 88,020Nmm / 1000 = 88Nm$ です。

さて、この方程式の何処に問題があるのか？ まず真っ先にあがるのはナット係数、 K の値が結局はおおよその参考値に過ぎず、違っているかも知れない事です。出版物などのトルク表に注意書きがある事に気付いた方も多いと思います。そこには概ねこの様な内容が書かれているはずですが。

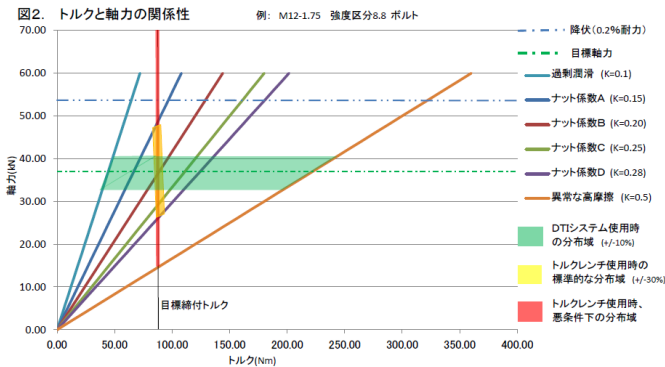
“この表のトルク計算はあくまで目安です。トルクと軸力の関係には、材質、表面処理、潤滑の有無等々、様々な要因が影響します。本来トルクと軸力の関係は実験によって確立されるべきものです。本表の情報は自己責任でご使用ください。”

この注意書きはつまり、ナット係数の変化はサイズ、材質、表面処理だけによるものではなく、それらの特徴が同一であってもナット係数は同じではないという事を意味しています。それどころか、全く同じ個体であっても締め付けの回数等でナット係数は変化しえるのです！

ナット係数は、資料の参考値又は実験結果であり、いずれにしても複数のサンプルをもとにした統計結果です。複数のサンプルであれば平均値と標準偏差が計上できます。平均値と3つの標準偏差をグラフにする事で、ナット係数がどれだけ簡単にトルクと軸力の関係を変化させる事が出来るかがよく解ります。

図2. の範囲、 $0.15 < K < 0.28$ は、いずれも通常の条件下での結果です、これには例えば寸法異常または、破損により嵌合が非常に悪いまたは、過剰な潤滑、柔らかい材質のワッシャーの使用等、極端にトルク・軸力の関係を変えるような要素は含まれていません。もしそれらの極端な条件がある場合は、ナット係数の範囲は高い時で 0.5、低い時で 0.1 ぐらいになりえます。この大きなナット係数の変動は図2. の“過剰な潤滑”と“極めて摩擦が高い”の線で表されています。

これら両極の状態にある時に、推奨トルク 88Nm で締付を行なった場合、“過剰な潤滑”の状態では軸力が上がり過ぎてボルトの降伏点を越えた締め過ぎの状態となり。一方、“極めて摩擦が高い”状況下では、88Nm で締付を行なった結果として発生する軸力は約 14.6kN だけで、本来必要な軸力のたった 40%しか無く、締め付け不足の状態となります。



図の示す要点:

- ・ グラフの縦軸が発生した軸力、横軸が締め付けトルクを示す。トルク管理における理想的な結果は目標締付トルク到達時での目標軸力との公差である。
- ・ 結果が水平に揃う程、ナット係数の変動に関わらず軸力の値が安定しており、垂直方向への分布は逆にトルク係数による影響を受け結果が不安定である事を示す。
- ・ ナット係数 A～D は、通常充分に考えられる僅かな差異である。
- ・ ナット係数の変化はトルク・軸力の関係に大きく影響します。従ってトルク法では結果としての軸力が大きく違ってしまう原因となります。
- ・ ボルト締結の安全を確実にする為に必要なのは、トルク管理ではなく**軸力管理**である。
- ・ DTIシステムを使用した場合が緑色のエリアで、目標軸力の水平のラインを中心に高い精度で安定して重なっています。**トルクや摩擦係数の変動による影響は一切受けません**

冒頭の例のようにボルト締めを行う作業者はいずれもトルク法によって、トルクを一定に保つ事のみ腐心していますが前述の例で分かる通り、いくらトルクが正確であってもナット係数が変われば、肝心の軸力も違ってくるのです！ 判断をかえて誤らせる原因にもなり兼ねないトルクレンチの“カチッ”という音以外は実際、作業者にとって今の軸力が適正なのか、高いのか低いのかボルト締めの際に判断の手掛かりになるような反応はほとんどありません。(トルクレンチが示すのは当然ながらトルクだけです。音もトルクに応じて出ています。) 強いというなら、ボルトが過剰な潤滑により想定よりも締め過ぎで軸力が引張荷重の限界を超え引きちぎれる、又は、極めて摩擦が高い為に、せん断強度の限界を超えてボルトがねじ切れる等の極端な状態だけが誰の目にも明らかな反応といえます。

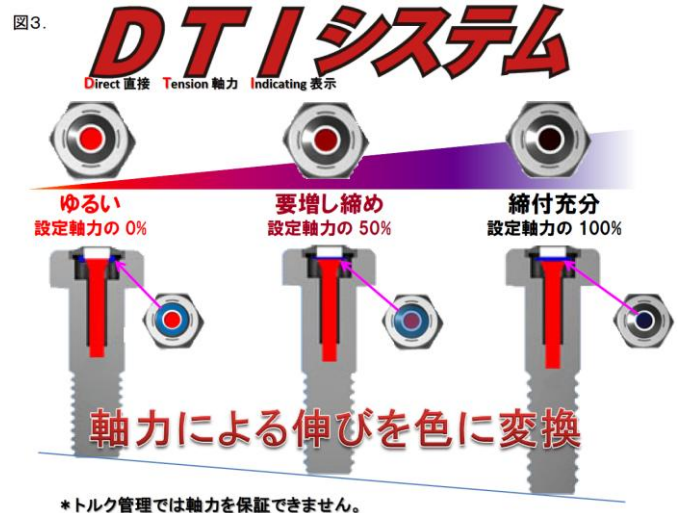
図2. の黄色のエリアは、精度 +/- 3% 以内に校正されたトルクレンチを使用して、通常の条件下できちんとした締め付けを行なっても、発生する軸力は目標に対して A～D、即ち +/- 30% の範囲でばらつく事を表しています。(Bickford 1995, p222) つまりここで示されたのは、どんなにトルクレンチを校正して精度を上げてもトルクと軸力の根本的な不一致は、改善出来ないという事です。赤い部分は、締め付けトルクの軸に細長く帯状に重なっており、この帯の細さはトルクが正確に測定されている事を示しています。しかし、同時に悪条件下では、非常に長く上下に分布し、これは結果として軸力のバラつきが非常に危険性の高い状況になり得る事を示しています。

では、トルクと軸力の関係への問題解決策とは何か？
DTIシステムは、問題を起こしがちなトルクは最初から相手にせず、本来の目的である**軸力だけを直接測定**します。もし軸力を測定する方法が存在するのならば、そもそもトルク測定は全くの無意味で不必要です。**私たちはトルクの変動などは気にせず放っておいて、軸力のコントロールにのみ専念する事を提案します。**

DTIシステムによる目視軸力管理

図2. の緑色の四角いエリアは、DTIシステムを使用した場合に発生した軸力がおさまる範囲です。これはDTIシステムが軸力のみ反応し、反対にナット係数及び、要求される締め付けトルクの変動には全く影響を受けない為です。

軸力を測定できる最大の利点は締結体の安全であり、ボルトが“本来の役割”を果たしているかが確実に判別できる事です。ボルト締結の確実な点検は、安全面と経済面のリスクを伴う重要締結箇所には特に必要不可欠です。



DTIシステムは軸力を常時表示する機能をボルトに内蔵した軸力管理システムです。表示は鮮やかな赤色から軸力が高まるにつれて徐々に暗くなり、設定軸力へ到達した時点で黒色へと変化します。

DTIシステムの軸力表示技術は最も正確な軸力測定の原理である、軸力発生時のボルトの伸びの測定に基づいています。

弾性域内の軸力によるボルトの伸びに伴い、内部に埋め込まれたゲージピンが引っ張られてごくわずかに沈み込みます。この微細な動きをDTIシステムは完全な可逆性のある色彩変化へと変換し目視による軸力管理を可能にします。DTIシステムの常時軸力表示機能は適切な軸力が掛かっているかどうかを設置や定期点検時だけでなく、使用中でも確認作業を可能とします。

DTIシステムの導入を検討されたい具体的な案件がございましたら、ぜひお問い合わせください。製造の可否判定、お見積りに必要な情報を伺う為の聞き取りシートをご用意しております。

参考文献

Bickford, J.H. (1995). An introduction to the design and behavior of bolted joints (3rd ed.). New York, NY: Taylor & Francis Group.

* 本文中のナット係数とトルク係数とは概念的には同義ですが、原文を尊重してナット係数としております。

著者

Chris Bunai
ストレスインディケイターズ社、チーフエンジニア、
アメリカ機械工学会 (ASME) 会員

訳: 立花 伸一
池田金属工業 株式会社
商品開発