ボルトテンショナーによる 「軸力管理と注意点」*

Bolt Fastening by Bolt-Tensioner

佐伯 洋**
Hiroshi SAEKI

Key words bolt-fastening, bolt-tensioner, bolt, bolt-tensioning, torque

1. はじめに

ボルト・ナットの締結技術には、古くからの歴史がある。

が、いまだに未解明な部分もたくさんある。それでも、昨今はパソコンを活用した有限要素法という解析手法も可能となり、ボルト締結の研究が一層進んできている。

ボルト締結方法には、現在以下の方法がある。

a. トルク管理法：

ハンドトルクレンチや油圧トルクレンチ（以下：油圧レンチ）を使って、ナットを締付ける方法。

b. 回転角度管理法：

一定の低いトルク値（初期トルクと呼ぶ）まで、ハンドトルクレンチや油圧レンチを使って締付けてから、その位置を基点にあらかじめ決めていた角度だけナットを増締めで回転させる。

c. 熱膨張・伸び管理法：

ボルトをガスバーナーやニクロム線、あるいは高周波ヒーターで加熱して、熱膨張でボルトの伸び量を測定しながら、締結する方法。

d. 引張・軸力管理法：

ボルトテンショナー（以下：テンショナー）という油圧工具でボルトを引張して、締結する方法。

先の四つの方法は、それぞれ独立して違うように見えるが、根本は共通していて、いずれもボルトを「引き伸ばし」、伸びたボルトが元の長さに「戻ろうとする力」をもって、締結力としている。「引き伸ばし」のやり方に、異なる四つの手段があるだけだといえる。

それぞれに、使用工具の経済性や、手軽さなど、締結精度においても特徴があるが、ここでは「軸力管理法のテンショナー」の特質について、主として「油圧レンチと比較」しながら説明する。

2. ボルトテンショナーの原理と構造

締付けの原理は、概念的に図1のような仕組みである。すなわち、ボルト・ナットを仮締めした状態で→ボルト部分を掴み→油圧シリンダー（ロードセル）で軸方向へ引張り→そうするとナットが座面から浮き上がる→浮き上がったナットを着座（手で直に回してもよい）させる→引っ張っている油圧シリンダーの油圧を抜く→ボルト・ナットの締結完了、となる。図2はテンショナーの構造図であり、ナットへ「ブリッジとソケット部」を被せ、ねじ部と噛み合ったプーラーでボルトを引っ張る仕組みになっている。図3は実際の製品で、プーラーがボルトサイズに合わせて交換できるようになっている。

3. ボルトテンショナーの締付け精度と利点

テンショナーを使うには、駆動するために高圧の油圧ポンプが必要である。先の原理の通り、油圧ポンプに接続されたロードセルと呼ばれる油圧シリンダーで引張力を発生させて（＝ボルトを引っ張って）、引張力をそのままボルト内に封じ込める機構になっている。引張力が300 kNであれば、そのまま300 kNの軸力がボルトへ伝えられ、「ボルト内に蓄えられる」。これと違って油圧レンチによるトルク管理法では、ナットを回転させて締結するため、ナットとボルトのねじ面の摩擦・ナットと座面との摩擦・ボルトが下穴に対して一方向へ押し付けられるために加わる摩擦力などの影響を免れない。その結果、与えたトルクのうち、40%がねじ面の摩擦、50%がナット座面の摩擦で使われ、わずか「10%程度」だけしか実際の軸力へ変換されない。

したがって、仮に当該の摩擦係数が10%でも変化すれば（潤滑油を使用しないとか、加工の面粗さが変化するなど）、それだけで締め付け軸力が倍・半分になってしまうことがある。これら摩擦力の影響による「締め付けの不確かさ」を、テンショナーでは確実に回避できる。図4はこれらトルク締めによる各部の摩擦ロスを示している。

また、熱膨張による「伸び管理法」の欠点である「温度

*原稿受付 平成27年4月21日

**ボルトエンジニア株式会社技術部（兵庫県神戸市西区岩岡町古郷255-6 2F）

図1 締結の原理

図2 ボルトテンショナーの構造

図3 実物の外観写真

管理の難しさ」を避けることができる。このため、非常に正確なボルトの締め付けが可能である。

このようにテンショナーには、正確に軸力管理ができるという利点以外にも、油圧レンチを含めた他の方法では「追従ができない」という大きな利点がある。

a. 例えば油圧レンチを使う場合、「必ず反力」をどこ

図4 トルク締めによる各部の摩擦ロス

かで取る必要があり、取る場所がないと使用できない。例えば、広い床面の真ん中にあるボルトとか、軸の端部にあるナットを締結するのは容易ではない。

しかしテンショナーであれば、そこへ設置できるだけのスペースさえあれば、難なく使用できる。

b. 二枚の板を締め付けるような場合(図5)、トルク法ではナットを回転させると、板が互いにずれる問題が起きる。テンショナーでは、こんな現象が起きない。

c. ボルトを一つひとつ締め付けていく油圧レンチ(図6, 7)では、そういう芸当ができないが、テンショナーでは、(ボルト数と同じだけの数を揃えれば)多数のボルトを「ほとんど一瞬という短時間で同時に締

図5 トルク締めによる部材の捩れ

図6 複数のテンショナーの取付け

図7 複数のテンショナーの同時締め

結」することが可能である。

4. ボルトテンショナーの経済性と使用の制約条件

テンショナーは、図2の構造図に示す通り、構成部品が少ないためにトラブルが起きにくく、価格面でも構造が複雑な油圧レンチに比べて1/2～1/5程度である。テンショナーも油圧レンチも両方とも、作動させるには高圧の専用の油圧ポンプが必要だが、前者のポンプは構造が単純なために、後者用に比較して、3割ほど安価である。

さらにテンショナーでは、もっとも経済的なハンドポンプでも使用ができるので（油圧レンチでは動力型以外を使用できない）、そうなれば駆動ポンプも動力型に比べ1/3程度になる。

先のように、経済性を含め、技術的にも利点が多く、テンショナーはいいことづくめに見えるが、もっとも一般的に行われている油圧レンチによる「トルク管理法」に比べれば、テンショナーが工具としてそれほど普及してこなかった。

これは、扱いが手軽さに欠ける上、汎用性にも見劣りがあるためである。特に、小径のボルト（M20以下程度）に対しては一般に不向きで、対象が大径ボルト（M20程度以上）にほぼ限定される。

また、ボルトを引張するための「掴み代」として、ナット端面からボルトのねじ山が少なくとも「ボルト径以上の長さ」が出ていないといけなく、という不便な面も使用の制約条件になっている。

それでも、近年ボルトの正確な軸力管理への認識がとみに高まってきており、ボルトテンショナーが次第に多用されるようになってきている。

5. 使用上で最も注意すべき残留軸力の問題

多用されるに従い、「テンショナーは正確だ」の言葉だけが独り歩きして、手馴れた作業者でも知識が不十分なために、せっかくの性能が十分引き出せず、かえって問題を起こすときがある。これは、意外に知られていない「残留軸力の問題」で、テンショナーを使うときは、原理と知識を熟知している監督者の指導の下に、注意して使用すべきである。

① 例えば、実際に100 kNでボルトを引張して締結したはずなのに、ボルトテンショナーを取り去った後で、ボルトに実際に残留する軸力（＝残留軸力という）が、たった70 kN（70%）というのが、可能性として「あり得る」のである。この残留軸力の大きさは、ボルトの有効長さ（＝被締結物の厚み）によって変化する。

ボルトの有効長さが、例えばボルト径の2～3倍以下の場合、残留軸力は60 kN（60%）程度となる。極端な場合、ボルト長さが径の1～1.5倍程度であれば、30 kN（30%）程度ということもあり得るし、あるいは、締結自体ができない（＝軸力ゼロ）場合も起きる。

いい換えれば、ボルト長さが（ボルト径に比べて）長ければ長いほど正確な締結（＝残留軸力90%以上）ができる。

② これはボルト長さが短いほど、軸力を掛けてもボルトの「伸び量が小さく、わずかに」なるためである。ボルトの伸び量は「ボルトの有効長さに比例」する。引張で得られたわずかな伸び量が、ボルト・ナットのねじのガタ（隙間）や、座面のわずかな凸凹や歪みに吸収されてしまうがために、実質的な伸びが想定より非常に小さくなってしまい、極端な場合ゼロになるためである。

例えば、M36のボルトで厚み125 mmの鋼板を締付けた場合（ボルト径の3.5倍）を28トンの軸力で締付けた場合、被締結物の厚みが変わらない条件で、ボルトの伸びはたった0.17 mmに過ぎない。マイクロメータでやっと測定できる程度である。

ボルトテンショナーを使用する場合、この点によく留意しないといけなく、そうでないと、もっとも正確に締め付けたはずであったのに、もっとも不正確な結果になってしまう（油圧レンチではこのような現象は起きにくい）。

図8 ボルト長による残留軸力の減衰

図9 求める残留軸力を得るための倍率

伸びを吸収してしまうリスクを一層高めるので、ボルトテンショナーを使う場合には、ワッシャーの使用は極力避けるべきである。

③ したがって正確な締結には、残留軸力の減少をあらかじめ「見込んで」、油圧ポンプの圧力を何%か（ボルトが大変に短い場合10～20%程も）高めておく必要がある。

ただし、この場合、「見込んだ」高めの軸力が、ボルト本来の耐力（降伏点）を越えてはならない。越えるようであれば、ボルトテンショナーは使えないことになる。

図8はボルト径と長さによって、残留軸力の減衰する様子を示している。これはあくまで数少ない実験による「参考値」なので、全てのボルトにあてはまるわけではない。線図は、ボルトや座面の材質や仕上げ状態によってグラフは変わる。ここでは減衰する事実の説明の目的のみで、添付している。

グラフからわかる通り、ボルトが（径に比べて）長くなればなるほど残留軸力は90%以上へと上昇し、締め付け軸力（＝ロードセルの発生引張力）に等しくなっていくが、全く同じにはならない。また、ボルト長さが3倍以下と短くなると、残留軸力は「極端に低下」し、締結の信頼性を失う。

これを見ると、期待する残留軸力を得るためには、当初いくらか「多めの軸力」で締め付けなければならないことを意味している。

図9は、どれくらい多めに締め付ければよいかの倍率（＝注意！：ボルトや座面の材質や仕上げ状態によってグラフは変わる。説明が目的のあくまで「参考値」としての

普通のボルト

伸びボルト

図10 通常のボルトと伸びボルト

M30

ボルトテンショナーでM30を締結

ワッシャー型ロードセルを挟み
残留軸力の計測 Max300kN

図11 残留軸力の計測実験の例（被締結長さ120mm）

み示しているもので、そのままには使用しないこと）である。倍率はボルトの長さによって変化する。ボルトが短くなるほど、倍率が急上昇するのがわかる。

これらのグラフからわかることは、

- ① 同じ軸力で締結する場合には、むやみに太いボルトで締結するよりも、細いボルトで締結するほうが、かえってよく締まるし（＝ボルトの伸び量が大きくなる）、緩みにくいのがわかる。
- ② この目的で「伸びボルト」（図10）というものがある。これはボルトの軸部断面をわざと細く造ったものである。

ボルトの全長は変化しないが、径を細く作ることで、径に対して「相対的に」ボルト長が長く（＝伸びやすく）なったことになる。締結したときにボルトの伸び量を大きくして（＝残留軸力を高める）、座面の凸凹や歪みの影響を小さくするのが目的である。振動による緩みに対しても有効となる。

参考までに図11は残留軸力の計測実験の例である。

6. ボルト締結上の注意

どんな工具を使ったとしても、ボルトはいったん締結してしまうと、どれくらいの軸力で締結されているのか、目視ではわからない。怖いのは、締付けた後で、それが不正確な締付け（＝残留軸力の不足）となっているという事実。作業者が気づきにくい点である。100 トンできっちり締まっているかもしれないし、実は軸力ゼロなのかもしれないからだ。

超音波軸力計という軸力を測定する機器もあるが、測定前にボルトの原寸を正確に測定しておかなければ、これも役に立たない。

正しい使い方をすれば、ボルトテンショナーによる締結は他のどの方法よりもはるかに正確であり、大変便利な工具といえる。だが、不測の事故を防ぐために、使用する作業者はボルトの伸びなどの理屈をよく理解し、習熟した人が「以下の点に十分留意」して作業に携わるべきである。

- ① ボルト有効長さは、径の3～4倍以上であること。
- ② ナット座面は、歪みがなく平滑清浄であること。
- ③ 平ワッシャーにせよ、バネワッシャーにせよ、ワッシャー類は特別な理由がない限り、使用しないこと。ボルトの伸びがそれらの歪みや面粗さに吸収されてしまうからである。
- ④ テンショナーによるボルトのつかみ代（ナットの上面からのボルトねじの突き出し長さ）は、ボルト径以上であること。
- ⑤ あらかじめボルトの伸び量が計算値でどれくらいかを念頭に置いて、引張力を掛ければナットは×××度くらい回転するはずだ（ねじの1ピッチ長さの伸びが360°相当になる）と予測しておくのは大切である。回転角が大き過ぎるなら、フランジの合わせ面に異常があるかもしれないし、小さければナット座面に問題があったり締まっていない可能性がある。使用中のこんな観察が、油圧レンチなどを使用する場合よりも、一層大事である。
- ⑥ さらに、安全な使用のために、ボルトテンショナーの引張り方向（ボルトの軸力方向）の位置には、決して手をかざしたり体を置いてはいけない。ボルト

図 12 油圧ナット

の破断の可能性は常に考えておくべきである。

7. 油 圧 ナ ッ ト

ボルトテンショナーは締付け工具であるから、ボルトの締結後はボルトから取り去る。しかし、ボルトへの着脱を頻繁に行う場合、いちいちテンショナーの設置・取外しが面倒で、そこへ「設置しっぱなし」にしたい場合がある。

こんな目的のために、油圧ナット（図 12）がある。原理と構造はボルトテンショナーと同じで、呼称は違うが、ボルトテンショナーの一種である。やはり軸力管理ができる。説明の詳細は省くが、締結後に油圧を抜くタイプ（長期に軸力を保持する）のものと、内部に油圧を保持し続けるタイプ（約三カ月間軸力を保持）の二種類がある。

機械加工する場合や溶接する場合に、部材を正確な位置に仮押さえする M20 程度のものから、船用ディーゼルエンジンの出力テストで試験機に接続するボルトの締結に使う M100 とかの大サイズも、国内で多用されている。

佐伯 洋

1965 年大阪府立大学造船工学部卒。現在、(株)日本ブラッド代表取締役、ボルトエンジニア株式会社取締役。ボルト締結工具の開発および販売に約 35 年携っている。