

10

高張力ボルトの現場締付けに関する研究

山原 浩

§ 1. 概 要

最近、鉄骨工事の接合法に高張力ボルトを使用する現場が多くなった。高張力ボルト使用の利点は、

- (1) 工事中の騒音が少ない
- (2) 火気の心配がない
- (3) 締付けに熟練を要しないから、労務者の制約を受けない。
- (4) 施工が容易で、鉋打の約3倍の施工能率が可能である。
- (5) 継手強度は、摩擦力のほかボルト剪断を考えれば非常に高くなる。

などが挙げられる。労務者の不足、工期短縮を補う工法として将来の普及が望まれる。

しかし実際に高張力ボルトを使用した人は、あまりにも厳格な検査規準に当惑し、もし正直に従うならば徒らに心労を浪費し、高張力ボルト使用の目的利点は、大部分失われることに気付いたのである。

高張力ボルトは成品となって工事現場に持込まれるまでに、非常に厳密な検査のフルイにかけられている。この間の検査の方法および規準の適否は、目下研究の段階でここでは触れないことにしておこう。

現在、日本建築学会構造標準委員会において作製された高張力ボルト摩擦接合施工規準案に準じて、個々の現場における工事仕様書が作られている。ボルトの現場締付けに関して学会の規準案では

- (1) ボルトに所要締付けトルクが与えられているか否かを係員の立会いの下に検査し確認する。このためナ

ット1/6を回転程度ゆるめた後再び元の位置まで締付け、その締付けトルクが所要締付けトルクに達しているか否かを検査する。

- (2) 締付け検査数は各ボルト群についてボルト数の10%以上とする。

となっている。またこの締付け検査の合否判定規準は、早稲田大学鶴田研究室私案によると、「現場の状況に応じて決定するが、通常±10%とする」となっている。

今般たまたま福岡電々公社ビル新築工事において、電々公社現場技師立会いのもとにボルトの締付け検査を行なったところ、締付けトルク値に意外なバラッキを生じ問題になった。

同現場において行なった1,226本のボルトの検査結果を表-1に示し、その度数分布図を図-1に示してある同現場で使用したボルトは標準締付けトルクを55kg・mとし、規準案に従って±10%すなわち50kg・m～60kg・mが許容範囲となっていた。検査の結果50kg・mにみえないもの8本、60kg・mを越えるもの153本で、実に全体の13.1%の不合格率をだした。

高張力ボルトは究極において、設計上の要求から所要の軸力で均等に締付けられていなくてはならない。これを確認するための検査も等閑にしてはならない。締付けられたボルトの軸力を現場において直接測ることができないため、従来は規準案に示されているように、締付けられたボルトを1/6回転もどし、再びもとの位置に締直した時のトルク値をもって間接試験を行なっている。この検査精度が十分高く、なおかつ問題にすべく大きなバラッキが発見されたならば、締付け不良を見逃がさないよう厳重な検査が必要であろう。

反対に、検査精度が実際のバラッキ以上に低いものだったらどうなるであろうか。正常な状態に締付けられて

いたボルトも、低い検査精度によって不合格と判定され附近一群のボルトが再び締直しとなる可能性を生ずる。

また非常に不安定な足場でしかも高い所になると、この検査を実行することは甚だ困難であり危険も伴う。しかも全体のボルト数の10%以上実施するととなると、大変な時間と労力を必要とされる。少し大きな現場になると10万本以上のボルトを使用する。10万本のボルトに対してその10%、すなわち1万本について上記の検査を実施しなくてはならない。

仮にこの検査に最少限3人の労務者と1人の試験係員が立会い、1本の検査に3分を要したとする。1日7時間この検査に従事したとして1万本について実に71日を要する。これは検査したすべてのボルトが合格し問題を起こさなかった場合であるから、もし現状のように13%の不合格率を出したとなると、その締直し再検査に更に2倍の日数を見ておかねばならない。

ここに至って高張力ボルト使用の利点は大部分失われ、現場においては適当に検査を省略してしまう結果になる。福岡電々ビルの場合には、施主側の立会いが厳重であったために、たまたま問題が表面化したに過ぎない。したがって締付検査に関する規準は全く実施されないか、正直に実行した者が馬鹿をみるという皮肉な結果になっている。

高張力ボルト締付けの本来の目標は「いかにしてすべてのボルトを所要値に均等に締付けるか」にあり、「い

表—1

福岡電々公社ビル工事における
締付トルク検査結果

締付トルク (kg·m)	本数
47以下	2
48~49	6
50~51	49
52~53	99
54~55	320
56~57	171
58~59	248
60~61	178
62~63	95
64~65	35
66~67	10
68~69	7
70~71	5
72以上	1
合計	1226
平均	57.3 kg·m
標準偏差	3.71 kg·m

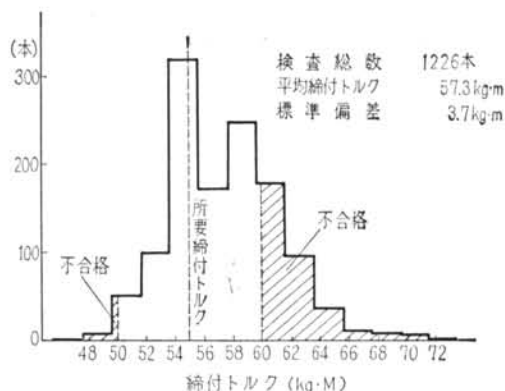


図-1福岡電々公社ビル工事における締付トルク検査結果

かにして検査基準の取締りを強化しようか」という事ではない。与えられた道具によってどのような点に注意をし作業を管理すれば、もっとも理想に近い状態を実現し得るかを追求しなくてはならない。以上のような諸疑問解決のため、電々公社および片山鉄工所の協力を得てこの研究を行なった。

§ 2. ナットの回転角と
軸力、締付トルクとの関係

締付けられたボルトの軸力を検査するため、先に述べたようにナットを約60°緩め、再びもとの位置に締戻した時のトルク値を求め、判定の規準にしている。実際に知りたいのはボルトの軸力であって締付トルク値ではない。締付トルクと軸力が一義的な関係を持っているならば、締付トルクによって軸力を正確に知ることはできる。しかし、ねじ部およびナット座金間の摩擦抵抗が小さければ、比較的小さい締付トルクによって大きな軸力が与えられる。

反対に摩擦抵抗が大きければ、大きな締付トルクを与えても軸力は案外大きくならない。また一度締付けられたナットを戻すことによって摩擦面の状態が変わり、再びもとの位置に締戻した時に軸力は完全に回復しているだろうか。さらにナットはもとの位置に戻るまでは、比較的楽に行くのではないかという臆測も成立つ。こうした諸疑問を解くために、図-2に示すような試験装置によって実験を行なった。

(a) 実験方法

図-3 のようにボルト(SCR-4現場使用と同一品)

表-2 ナットの回転角と軸力，締付トルクとの関係

固転角 (°)	締付トルク (kg·cm)	軸力 (ton)
0	500	1.3
10	900	2.0
20	1300	2.7
30	1700	3.5
40	2100	4.2
50	2500	5.3
60	3000	6.4
70	3500	7.4
80	4100	8.7
90	4500	9.8
100	4700	10.9
110	5200	12.1
120	5600	13.4
110	—	10.8
100	—	9.1
90	—	7.2
80	—	5.8
70	—	4.5
60	1600	3.4
70	2300	5.2
80	2900	6.5
90	3300	7.9
100	4000	9.8
110	4500	11.2
120	5000	12.7
125	5800	13.1
130	6100	13.8
135	6200	14.4

に軸力測定用のロードセルをはさみ，回転角測定用の指針を取付けたソケットをトルクレンチにて加力する。トルクレンチは補正試験を行なったものを使用し，ナット，ソケット間のガタを完全に片寄せして指針の基点調整を行なった。

以上の要領にてボルト軸力，締付トルク，回転角の階段的同時測定を行なった。

(b) 測定精度

締付トルク	±0.5kg·m
軸力	±0.2ton
回転角	±0.5°

(c) 測定結果

5本のボルトについてそれぞれ同様の実験を行なった結果，ほぼ同様の結果が得られた。一例のみ表-2に示しておいた。

図-4はこの結果を図示したものである。図中1~2

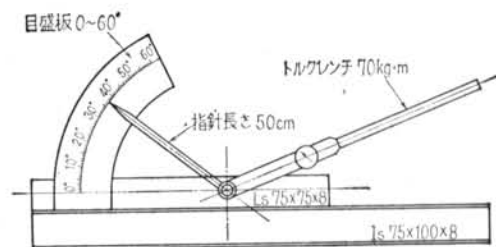


図-2

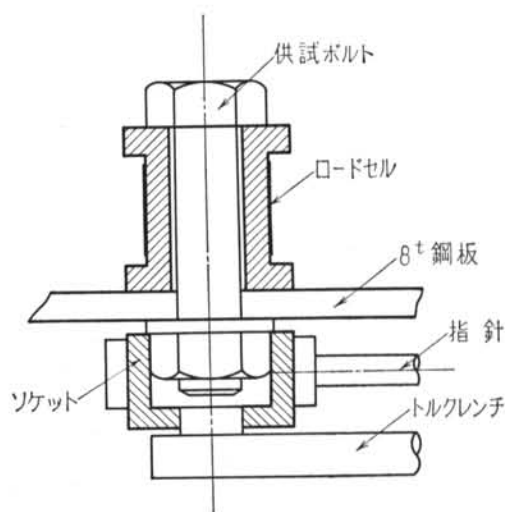


図-3

はナットの初期締付，2~3はナットの戻し，3~4は再締付における特性である。

ナットの再締付によってもとの位置にきたとき，軸力および締付トルクは完全に回復しないことがわかる。初期締付に対し軸力は0.7ton，締付トルクは6kg·m足りない。

さらに初期締付位置を越すと，締付トルクが急激に上昇する。

この結果，ナットを60°緩めた後正確にもとの位置に戻したとしても，軸力および締付トルクは完全には回復せず，初期締付状態が再現できないことが明らかである。

§ 3. インパクトレンチによる
ボルト締付時間と軸力との関係

インパクトレンチは，従来米国のインガーソル製のものが多く使われていたが，最近国産品で優秀なものが出廻るようになってきた。インガーソルはトルクコント

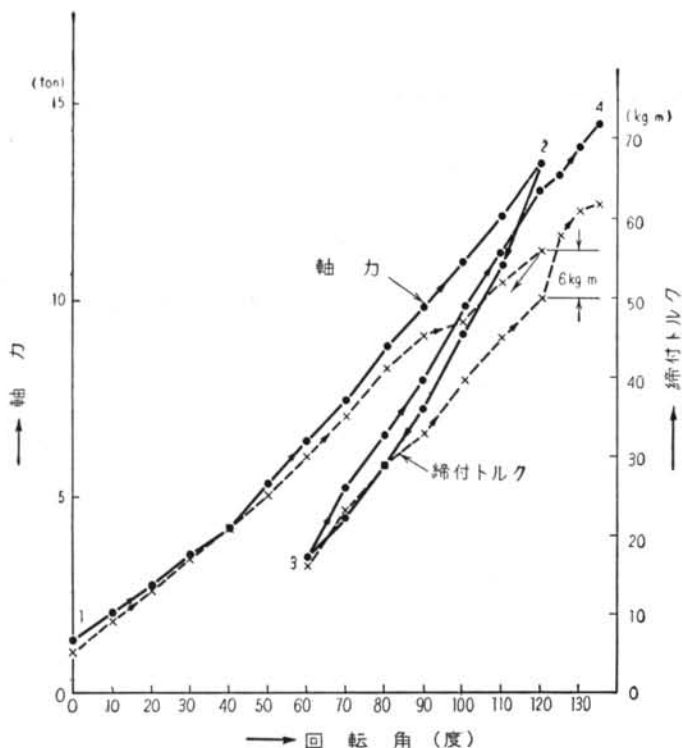


図-4 ナットを60°戻した場合の回転角と軸力および締付けトルクとの関係

ローラーが自蔵していて、一定締付トルクにてトーショ
ンパネが自動的にはずれるような構造になっている。し
かし実際に現場で使用した調査例によると、締付トルク
に相当なバラツキは避けられないといわれている。イン
ガーソルは重量が大きく、全長も長く日本人の体格には
使いにくい。一方国産のインパクトレンチはインガーソ
ルに比べて遙かに軽量で、非常に使いやすくできている
が、トルクコントロールが自動的にできる構造にはなっ
ていない。

(a) 実験方法

図-5 に示す試験装置は、実際のボルト締付条件に一
致させるため、3枚の鋼板を重ね、ボルト間隔、発錆程
度はすべて実際に準じて配慮してある。ただしボルト孔
は、ストレンゲージ貼付けのため 20.5φ を 23.0φ に大
きくしてある。まずストレンゲージを貼付けたボルトを
所定のボルト孔に設定後、軸力約200kgに仮締めし、イ
ンパクトレンチにて最初は1秒～2秒ごとに累加軸力を
測定、次に再び緩めた後、4秒および8秒の締切り時間
に対する軸力を読み取ることを原則とした。ストレンゲ
ージによる歪測定は、ナットを完全に緩めた後、歪値が
 $0 \pm 30 \times 10^{-6}$ (軸力 0.2ton に相当) に復帰しているこ
とを確認して採用とした。

また歪値から軸力の算定は、予め行なった較正試験結
果(図-6)から比例計算によった。ボルト締付けの場合
軸方向歪値には振りによる影響が加味されるため、厳密
な意味で軸力換算は複雑になる。ここでは慣習に従って
振りの影響を無視し、軸方向歪はすべて軸力によるもの
とし、これを相当軸力と呼ぶことにした。この実験には
瓜生22S型インパクトレンチを使用し、コンプレッサー
空気圧は 7.0 kg/cm^2 とした。

	インガーソル	国産品(瓜生製作所)
重量	14.1kg	8.5kg
全長	610mm	336mm
価格	約300,000	約45,000

以上の比較で明らかなように、国産品で十分に使える
ものならば、すべての面で有利という結論になる。そこ
で瓜生製インパクトレンチを使って、締付時間とボルト
軸力発生過程を定量的に調べ、その締付状態のバラッキ
を検討するため、次のような実験を行なった。

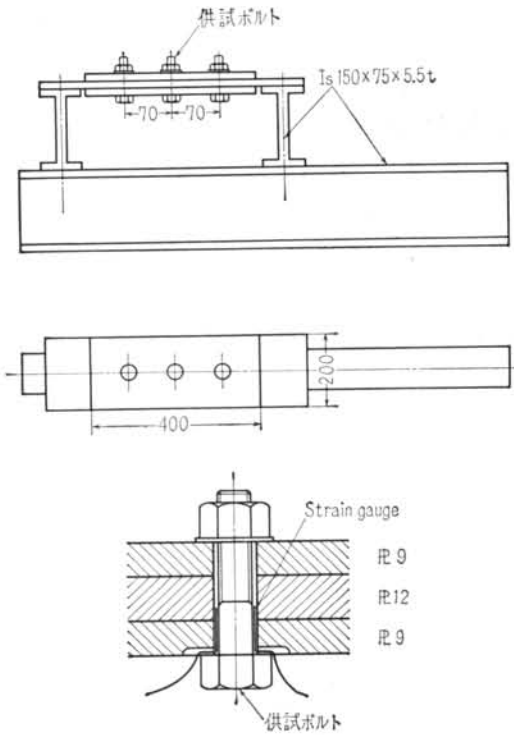


図-5

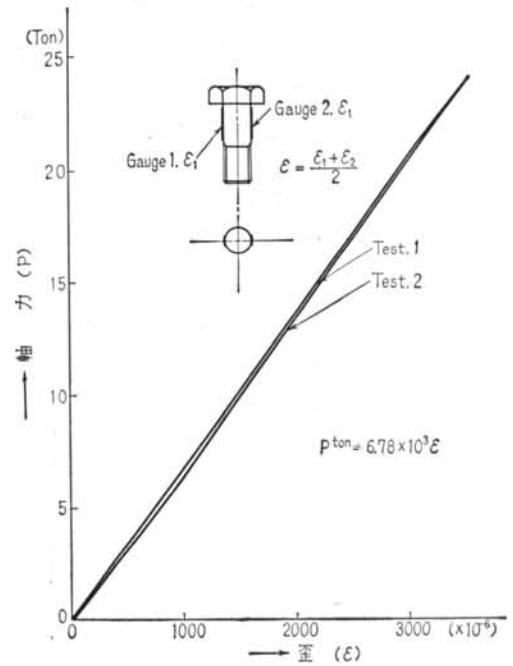


図-6 ボルトの軸力-歪関係の較正実験

(b) 測定精度

縮付時間 ±0.5sec
相当軸力 ±0.4ton

(c) 測定結果

測定結果を表-3 に示し、図-7 はこれを図示したものである。以上の測定結果を要約すると、

- (1) インパクトレンチの縮切り能力に限界があり、約8秒でほぼ最終縮切り状態に収斂する。
- (2) これ以上時間をかけても縮付鋼板、ねじ山、ナットの摩擦面、座金、ボルトの順で焼付き、くい込み、降伏等の損傷を受けるだけでナットは廻っても軸力は増加しない。
- (3) 縮付速度の平均特性は4回の試験結果について整理すると表-4 のようになり、2~3秒で最終縮

表-3 インパクトレンチによる縮付時間と軸力との関係

Test No.	縮付時間 (sec)	相当軸力 (ton)	Test No.	縮付時間 (sec)	相当軸力 (ton)	
1	4	17.2	4	1	14.3	
	10	19.4		2	17.7	
1'	1	13.1		3	19.4	
	2	16.9		4	20.1	
	3	18.1		6	20.5	
	4	18.3		8	20.8	
	6	18.7		4'	4	19.2
	8	19.0			8	21.8
2	1	11.8	4''	4	21.2	
	2	16.7	4'''	4	19.2	
	3	18.3	5	4	20.6	
	4	18.7		5'	4	21.2
	6	19.5		5''	4	21.5
2'	4	19.8	〔注〕 Test No. の同一番号は同一ボルトを意味し、ボルトを緩め繰返し再試験に供した場合を破線にて分類した。再試験には必ずナットおよびワッシャーを交換して行った。			
	8	20.1				
	10	20.3				
3	2	17.1		3'	4	19.0
	3	18.5			8	20.4
	4	18.6				
	6	19.1				
	8	19.3				

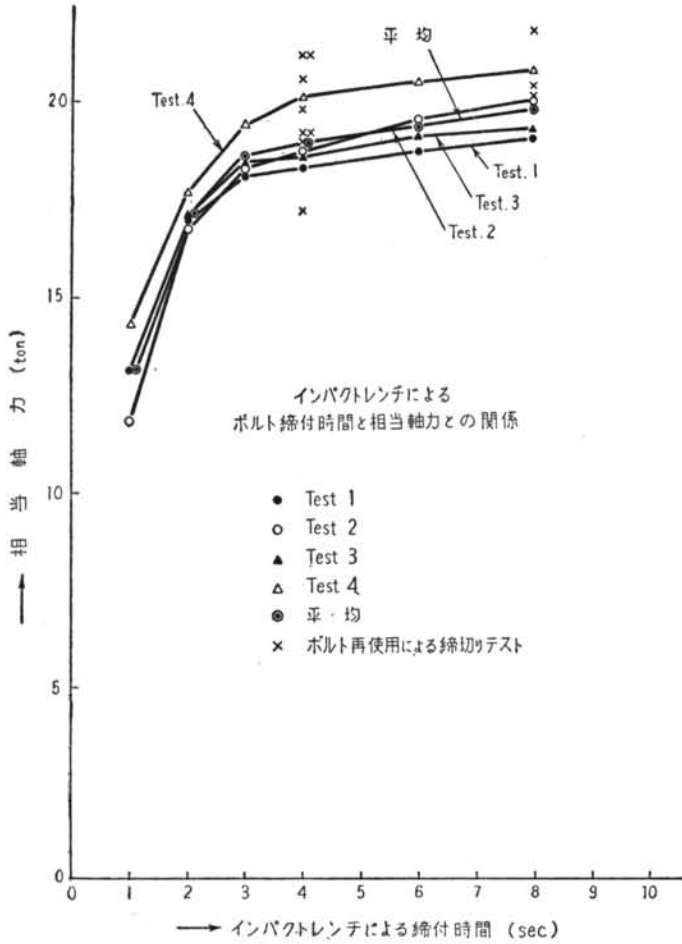


図-7 インパクトレンチによるボルト締付時間と相当軸力との関係

切りの90%を越える。

(4) 相当軸力のバラツキは、締付時間4秒について13回

の試験結果を整理すると、

平均相当軸力 19.6ton
標準偏差 1.24ton

であった。

(d) 軸力のバラツキ

以上の測定結果から、一定時間(4秒)の締切りに対する相当軸力のバラツキを検討してみよう。相当軸力の分布は当然正規分布に従う。(図-8)

平均値±10%以内に入るものは、

$$t = \frac{1.96}{1.24} = 1.58$$

$$\int_{-t}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 0.89 \quad (89\%)$$

平均値±15%以内に入るものは、

$$t = \frac{2.94}{1.24} = 2.37$$

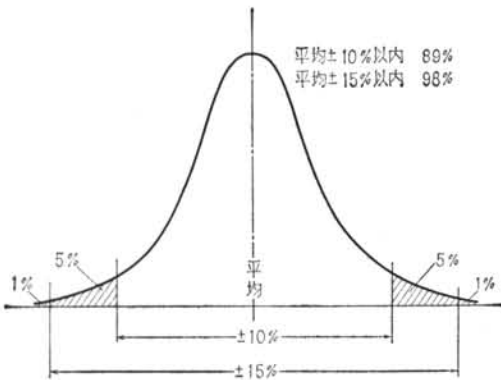


図-8 インパクトレンチによる軸力の正規分布

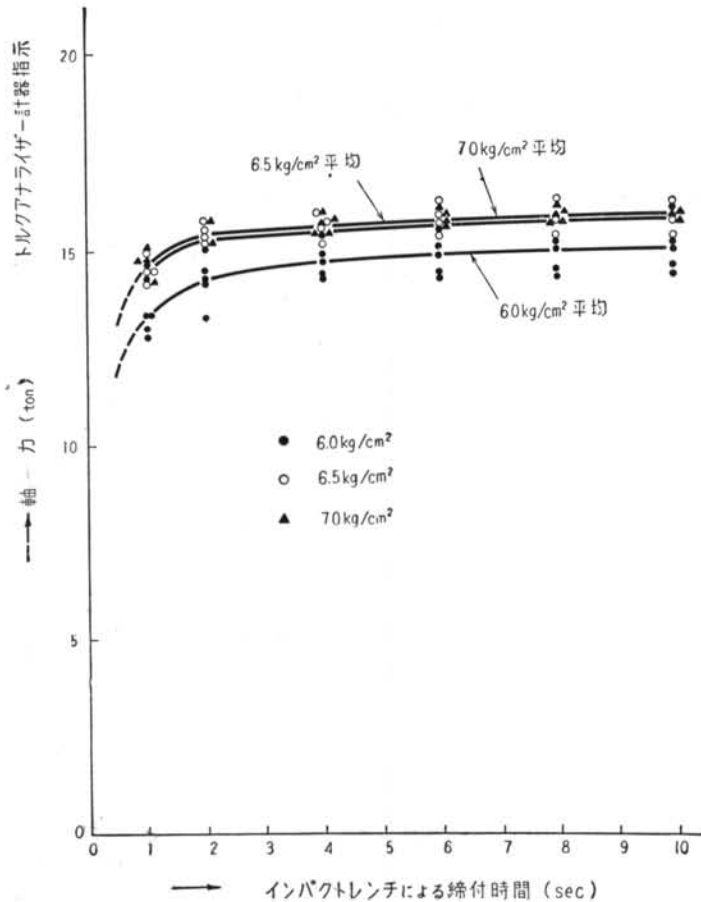


図-9 締付時間—軸力（トルクアナライザーによる）

$$\int \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 0.98 \quad (98\%)$$

となる。すなわち、インパクトレンチの一定時間締切りによる軸力のバラッキは、意外に小さいことがわかる。

§ 4. コンプレッサー空気圧の変動と軸力との関係

§2の実験はコンプレッサーの空気圧を7.0kg/cm²として行なったが、もし空気圧のわずかな変動によって締切り特性に著しい影響を与えれば、実用上支障を来す。そこで空気圧の変動に対するボルトの締切り特性を検討するため次のような実験を行なった。

(a) 実験方法

ボルトをトルクアナライザーにかけ、インパクトレンチにて10秒連続締切りとし、その過程で1, 2, 4, 6

8, 10秒の締付時間に対する計器指示を読み取った。この実験でも§2の実験と同一のインパクトレンチを使用し空気圧は6.0, 6.5, 7.0kg/cm²の3段階に変化して行なった。

(b) 測定精度

トルクアナライザーの軸力指示精度は明らかでない。
締付時間読取精度 ±0.5sec

(c) 測定結果

各空気圧において3～4本のボルトについて実験を行ない、その平均特性を表-5に示し、図-9にこれを図示してある。

この実験に使用したインパクトレンチ（瓜生22型）は空気圧5～6kg/cm²にて設計されたもので、これ以上空気圧を上げても、締付速度および最終締切り状態は殆んど変わらない様子が、実験の結果明らかにされた。

空気圧7.0kg/cm²はこの種のインパクトレンチの飽和圧であり、実際に現場においてこの附近の空気圧で使用する限り、空気圧の変動は全く問題にならないことが明らかである。

§ 5. 結 論

(1) 学会の規準案に規定された、60°戻して行なう締付トルク検査法は、ナットを正しく元の位置まで戻した時でも、軸力、締付トルク共に完全に回復しない。また元の位置を過ぎることによって締付トルクは急激に上昇しこの附近の回転角精度によって、締付トルク値に大きなバラッキを生ずる。

この実験はすべてトルクレンチを用いて、ほぼ静的に加力した場合で、インパクトレンチを用いて動的に締付ける場合に比べて、遙かに理想化された条件で行なわれた。

実際に現場でインパクトレンチを用いて締付ける場合ねじ山、座金等の変形、附着物の程度等によって、回転角—締付トルク特性は著しく変動するであろう。

さらに現場検査における回転角精度も、正確に管理することは困難である。

検査の合否基準の±10% (5kg・m) は、実験室的に極めて入念に行なっても危ないのが実状である。

したがって、軸力と一義的な関係を持たない締付トルク値を、こうした検査方法によって合否判定するのは適当でないといえる。

(2) (1)で述べたように従来の検査方法に疑問があったとしても、實際上締付けられたボルトの軸力を知ることは現場においては不可能に近い。そこで漠然と締付けたものを検査することよりも、如何にしたら許容内に均等に締付けられるか、を追求することが先決問題である。

§3の実験によって、ボルトの現場締付に際し、インパクトレンチの一定時間締切りによって十分な均等性の実現できることがわかった。

実験では約4秒で最終締切り状態に収斂しているが、実際の使用に当っては個々のインパクトレンチについて特性を調べ、締切時間を決定すべきである。このとき最終締切りにおける軸力が所要軸力になるように、空気圧ホース長さを調整する。したがってボルト径の異なる場合には、少なくともその種の数だけインパクトレンチを用意しなくてはならない。

表—4 各締付時間における軸力の最終締切り状態に対する割合

時 間	平均相当軸力	最終締切りに対する割合
1(sec)	13.1(ton)	60(%)
2	17.1	86
3	18.6	94
4	18.9	96
6	19.4	98
8	19.8	100

表—5 コンプレッサー空気圧の変化が軸力に与える影響

空 気 圧	軸 力 (ton)					
	1sec	2sec	4sec	6sec	8sec	10sec
6.0(kg/cm ²)	13.3	14.2	14.6	14.8	14.9	14.9
6.5	14.4	15.3	15.5	15.6	15.7	15.7
7.0	14.6	15.3	15.6	15.7	15.8	16.8

一般に建築に使用する高張力ボルトは3/4"が圧倒的に多く、5/8"、7/8"が少々使われる程度である。したがって10万本程度使用する現場では、3/4"用3～5台、5/8"および7/8"用各1台を用意すれば十分である。

(3) §3の実験から、インパクトレンチの飽和圧力附近で使用する限り、空気圧のわずかな変動(±0.5kg/cm²)は全く問題にならないことがわかった。しかし実際の現場締付に当っては、空気圧を一定値に保つよう注意を忘れてはならない。