

高力ボルトナット回転法の鉄道橋への適用

Application of High-Strength Bolts by Turn-of-Nut Method to Railway Bridge

菊 川 春 三*

Shunso Kikukawa

盛 岡 純 一**

Junichi Morioka

近 島 芳 夫***

Yoshio Chikajima

石 渡 正 夫****

Masao Isiwata

Synopsis:

Application of turn-of-nut method featuring easy execution and economy was examined. After confirming the tightening performance of high-strength bolts F8T and F10T, and the performance of tightening equipment, the method was applied to main joints of an actual railway bridge (span 37.8m, single track). The result revealed the following points:

- 1) F8T and F10T have sufficient performance suited for the method.
- 2) Optimum nut tightening conditions under the method are a 1500kg·m torque for the primary tightening, and a 180° nut turning angle for the secondary tightening.
- 3) In the execution of the method, the design bolt tension can be 90% of bolt yield strength.
- 4) During the tightening in the method, no special device is required of the wrench.

1. 緒 言

高力ボルト摩擦接合は、施工に際して熟練技術が必要とせず、すぐれた現場継手形式として各方面で多用されているが、応力伝達は摩擦力によって行われるため、信頼度の高い継手をうるには摩擦面ならびにボルトに導入される軸力を厳密に管理することが不可欠である。

このうち、軸力管理については、わが国およびドイツのようにボルトの締付けをトルクコントロ

ール法によって行っている国では、トルク係数が一定範囲内になるようボルトセットを製造（品質管理）したうえで、所定のトルク値でボルトを締付ける（施工管理）という、製造・施工の両面からの努力がなされている。

しかしながら、それらの努力にもかかわらず、トルクコントロール法は周辺環境によるトルク係数の変動¹⁾、締付け機器調整の煩雑さ、施工後ただちに締付けトルクの検査を実施しなければならぬといった施工管理上の難点をいくつか持って

* エンジニアリングセンター建設開発部鋼構造研究所構造研究室

*** 千葉製鉄所土建部副部長

** エンジニアリングセンター建設開発部鋼構造研究所構造研究室主任研究員

**** エンジニアリングセンター建設開発部土木開発技術室課長

おり、その適用にあたっては施工上はもちろん、設計上からも細心の配慮が要求される。

一方、アメリカやイギリスにおいては、トルクコントロール法に比べ導入軸力の管理が容易なナット回転法を採用し、良好な成績を納めている。このような状況から察するに、わが国においても近い将来ナット回転法がボルトの施工法として広く普及することが予想され、すでに基礎的な実験²⁻⁴⁾ もいくつか見うけられる。

しかるに、わが国の諸規準においては、道路橋についてナット回転法に関する詳細な記述がなされているのみで、適用例はきわめて少ないという現状にある。また鉄道橋については2次部材への適用例が見られるのみである。また主部材を施工するため、トルクコントロール法と併用してナット回転法が使われた例⁵⁾ では、ボルトのみかけ上の弾性範囲での締付けにとどまり、ナット回転法の最大のメリットである施工管理の簡略化を積極的に指向したものとはいえない。

このような実情を考慮し、筆者らは摩擦接合用高力ボルト JIS B1186 (1970) を用い、ボルトの力学的挙動を実験室的に調べ、さらに実構造物として不寝見川鉄道橋(スパン37.8m)現場継手の主要部にナット回転法を適用し、同法による施工性を調べた。その結果、ボルトの変形能、設計ボルト軸力、ナット回転法に適した締付け機器に関する所見が得られたのでここに報告する。

2. ボルトの特性試験

ナット回転法とは、ボルトの塑性域ではナット

回転角の変化に対してボルト軸力はわずしか変化しないという特性を利用し、適当なナット回転角を与えることにより、バラツキの少ないボルト軸力を得ようとする締付け方法である。

したがって、同法を採用するに際し、ボルトセットの変形能を正確に把握することがきわめて重要な事項となる。変形性状を左右する因子としては、首下長さ、遊びねじ長さ、グリップ長さ、セットの機械的性質(等級)、ボルトとナットの硬度、ねじ形状などがあげられるが、本研究においては不寝見川鉄道橋の施工にあわせた等級、首下長さのボルトを用いて実験した。

2.1 供試材および試験方法

供試ボルトは径22mm、F8T、F10Tの2等級、首下長さをパラメータとした12種である。それらの化学成分、熱処理履歴、セットの寸法諸元、機械的性質を Table 1～4 に示す。

試験は高力ボルト試験機(Photo. 1、容量50 t)

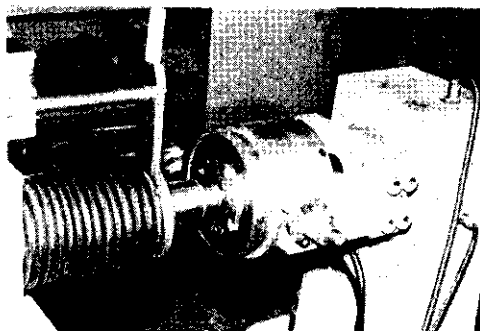


Photo. 1 Bolt testing machine

Table 1 Chemical composition of bolts, nuts and washers

		(wt%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	B	Ti
Bolt	F8T	0.25	0.28	1.51	0.019	0.024	0.03	—	—
	F10T	0.23	0.35	0.83	0.010	0.011	0.61	0.021	0.020
Nut		0.34	0.25	0.66	0.026	0.022	—	—	—
Washer		0.48	0.30	0.83	0.018	0.022	—	—	—

Table 2 Heat-treatment history of bolts used

Bolt	Quenching		Tempering	
	Temp. (°C)	Time (min)	Temp. (°C)	Time (min)
F8T M22×60	860	60	495	90
65				
70				
95				
F10T M22×60	860	60	442.5	90
65			442.5	
70			445	
75			445	
80			440	
95			440	
135			450	
145			450	

によりボルトを締付け、軸力と伸び、軸力とナット回転角、および軸力と締付けトルクの関係をそれぞれX-Y記録計に同時記録させた。なお、ボルトの単純引張試験は JIS B1186 に準じて行った。

Table 3 Dimensions of bolt sets

					(mm)
Bolt		L_0	l	Δl	D
F8T	M22×60	60.20	45.20	3.50	21.80
	65	65.35	44.45	3.40	21.80
	70	70.00	45.00	2.80	21.80
	95	94.65	44.70	3.20	21.80
F10T	M22×60	60.90	45.80	3.40	21.90
	65	65.60	45.80	3.20	21.80
	70	69.70	43.10	4.10	21.80
	75	75.00	44.60	3.55	21.80
	80	79.80	45.00	3.00	21.80
	95	95.35	45.60	3.45	21.80
	135	134.30	43.95	3.25	21.80
	145	145.20	44.65	2.95	21.80
Nut		Height		22.10	
Washer		Thickness		5.75	

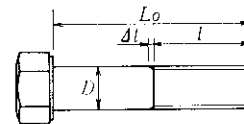


Table 4 Mechanical properties of materials

Bolt	Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	ϵ_U (%)	δ_N (mm)	R. A. (%)	$E \times 10^3$ (t/cm ²)	α^*
F8T M22×60	85.5	94.9	6.9	7.7	62.5	2.10	0.02
65	83.0	92.2	6.9	8.0	62.8	2.08	0.00
70	81.7	91.8	7.8	7.7	61.7	2.10	0.00
95	83.1	91.9	8.0	7.7	63.7	2.12	0.00
F10T M22×60	104.1	111.0	3.4	8.1	67.8	2.11	0.05
65	105.9	112.5	4.2	7.8	66.7	2.11	0.03
70	101.6	109.0	5.4	7.9	70.0	2.10	0.03
75	102.2	109.2	4.4	7.9	67.9	2.10	0.05
80	106.1	114.3	3.9	7.7	64.3	2.11	0.06
95	104.5	112.1	4.1	7.8	67.4	2.10	0.04
135	101.2	109.4	4.3	8.2	67.2	2.10	0.06
145	99.5	107.4	3.7	8.3	68.6	2.10	0.05

Y. P. : Yield point (0.2% offset strength)

T. S. : Tensile strength

ϵ_U : Uniform strain

δ_N : Local elongation

R. A. : Reduction of area

E : Elastic modulus

* $E' = \alpha E$

α : Hardening modulus

E' : Second modulus

2.2 結果と考察

試験結果の一覧を Table 5 に、また軸力-ナ

ット回転角曲線の例を Fig. 1 に示す。これらは変形初期の立上がり部分の影響を除去すべく、弾性域での直線部分の延長線と横軸との交叉点を原

Table 5 Tightening test results by bolt testing machine

Class	L_0 (mm)	L_1 (mm)	k	P_T (t)	$P_{max.}$ (t)	$\theta_{max.}$ (deg.)	$\delta_{max.}$ (mm)	P_s (t)	θ_s (deg.)	θ_{10} ($P=5t$)	θ_{10} ($P=10t$)	P_{25+180} (t)	P_{50+180} (t)	P_{75+180} $P_{max.}$	$P_{100+180}$ $P_{max.}$
F10T	60	36	0.146	33.0	30.5 (8.19)* ¹	296.4	0.89	5.1* ²	25.7	24.8	48.3	29.9	30.2	0.98	0.99
	65	36	0.136	32.5	30.3 (7.26)	267.4	0.79	4.8	24.4	23.7	46.5	29.4	29.7	0.97	0.98
	70	41	0.139	32.6	30.5 (6.88)	236.6	0.69	5.7	23.5	19.3	39.1	29.9	30.3	0.98	0.99
	75	46	0.139	32.8	30.4 (7.84)	239.3	0.69	8.0	28.3	21.6	39.7	30.0	30.2	0.99	0.99
	80	51	0.144	33.2	30.9 (7.44)	250.2	0.69	3.3	15.9	21.7	43.3	30.6	30.8	0.99	1.00
	95	61	0.137	33.1	31.0 (6.77)	236.8	0.69	4.2	18.2	19.9	39.7	31.0	31.0	1.00	1.00
	135	106	0.136	31.6	29.7 (6.39)	256.5	0.99	2.6	15.8	24.1	44.8	29.4	29.7	0.99	1.00
	145	116	0.134	32.2	29.0 (11.03)	269.6	0.99	3.1	14.5	27.6	53.7	28.5	28.8	0.98	0.99
F8T	60	36	0.143	28.1	26.2 (7.25)	317.6	1.24	6.6	32.0	22.7	45.1	25.2	25.4	0.96	0.97
	65	36	0.137	28.5	26.3 (8.36)	300.1	1.12	6.6	24.8	24.5	48.7	25.7	26.0	0.98	0.99
	70	41	0.140	27.6	25.6 (7.81)	300.0	1.12	5.8	24.5	20.1	40.0	25.3	25.4	0.99	0.99
	95	61	0.141	27.9	26.0 (7.30)	286.9	1.02	4.6	20.2	22.0	43.6	25.5	25.6	0.98	0.99

L_0 : Bolt length

L_1 : Grip length

k : Torque coefficient

P_T : Max. strength at pure tension

*¹ Reduction of max. strength by tightening of nut (%)

*² Bolt tension on which the curve of nut rotation angle changes up

$P_{max.}$: Max. torsion strength

$\theta_{max.}$: Angle at $P_{max.}$

$\delta_{max.}$: Elongation at $P_{max.}$

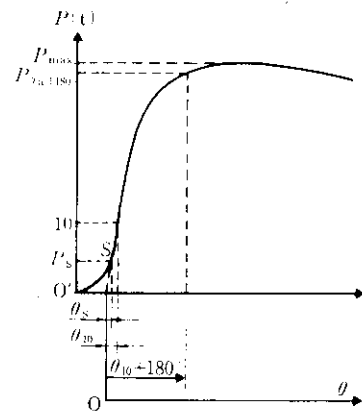
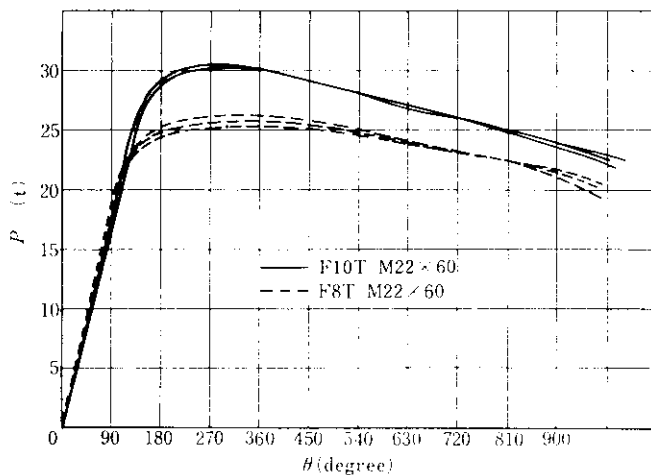


Fig. 1 Load vs. nut rotation curves

点とし、かつナット回転角についても、ボルト試験機のロードセルの剛性を考慮して修正した値を用いて整理している。

2・2・1 最大軸力と変形

締付けによりボルトの最大軸力は、単純引張試験で求めた最大軸力より7～11%低い値となった。これはナットを回転させてボルトに軸力を導入するとき、ねじ山間の摩擦抵抗によってボルトに振り力が作用し、ボルトが多軸応力下におかれることによるものと考えられる。この現象は、ある程度締付けた後軸方向に引張ると、変形曲線は原曲線（単純引張試験曲線）に復帰することからも容易に理解される（Fig. 2 参照）。

最大軸力時のナット回転角は、F8Tボルトで290～320°、F10Tボルトで240～300°と、F8Tボルトの方がややすぐれた変形性状を示したが、両者とも最大軸力に至るまでに1/2回転以上、また破断するまでに3回転以上のナットの回転を要することから、いずれもナット回転法に適した良好な変形能を有するボルトであると判断される。

2・2・2 締付け条件の選定

Fig. 1 において O'S で示される立上りの曲線部分は、被締付け材間の密着状態が不良時に発生し、このような場合、完全に密着したとみなさ

れるS点に至るナット回転角のバラツキも大きくなる。しかし、S点以降の軸力-ナット回転角の関係はきわめて安定した性質を示し、トルクコントロール法と比べ導入軸力の変動も小さくなる。このような変形特性より、ナット回転法によってボルトを締付ける場合には、

- (1) 被締付け材を密着させるためS点に至る軸力を導入する（1次締め）
- (2) 所定の軸力を導入するためナット回転角 θ を与える（2次締め）

の2段階の手順を踏むことになり、それぞれの締付け条件の選定が重要となる。

AISC⁶⁾ では、A325、A490 ボルト（それぞれF8T、F10T相当）の施工条件として、1次締めはスパッドレンチで力一杯締付けた状態、あるいはインパクトレンチによる数回の打撃、また2次締めはナット1/2回転（標準値）を規定しているが、これにしたがえば1次締めによりM22では3.5～7.0tの軸力が与えられることになる⁷⁾。

一方、本実験で測定されたS点軸力 P_s は Table 5 に示したように3～8tである。この値は上記の値と良く一致しており、したがって P_s は1次締め導入軸力設定の日安を与えているといえる。なお、これらの値にはかなりのバラツキが認められるが、ボルトの塑性域で締付けを終了させるというナット回転法の特徴を考えれば、

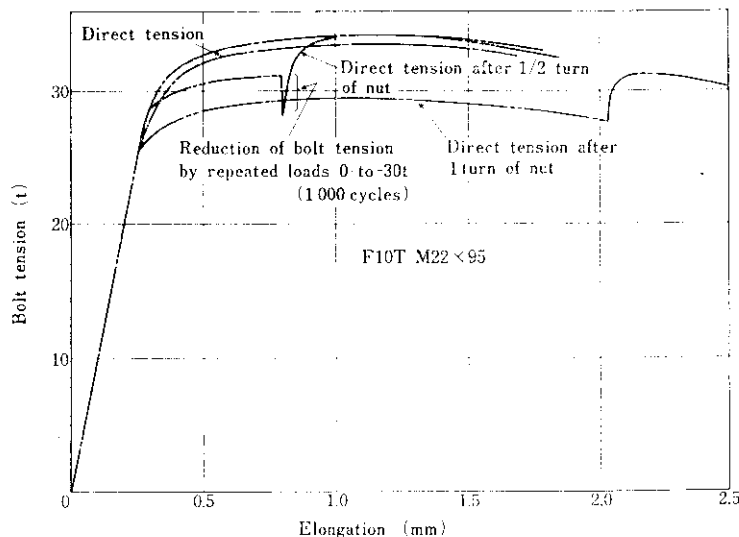


Fig. 2 Load-elongation curves

1次締め軸力が過大にならないかぎり、通常の外力、環境条件に対して、ボルトは安定した挙動を示すと考えられる。ちなみに、S点軸力の平均的な値5 tと、実測上限値を越える10 tの軸力を導入したうえで、ナット回転角 180° の2次締めを行ったときのボルト軸力 P_{95+180} , $P_{910+180}$ を求めれば (Table 5 参照), 締付け時のボルトの最大軸力 P_{max} に対し、前者では96~100%, 後者では97~100%といずれによっても目標値を満たすことが計算される。したがって、この範囲の軸力を1次締めで導入すれば、ボルト軸力はナットを 180° 回転させることにより安定して制御できることになる。

しかし、2次締め時の施工誤差を、AISC に準じて $\pm 30^\circ$ とすれば、1次締め軸力5 tに対して締付け軸力上限値は P_{max} を越えず、下限値も Fig. 1 に示されるように塑性領域にあるため、十分に安定した軸力の確保が可能であるが、1次締め軸力を10 tとした場合には、 P_{max} を越えて過度に締付けられることが懸念される。ゆえに、現場での締付けを考慮すれば、あえて締付け条件として厳しいものを採用する必要性はなく、1次締付け軸力は5 t程度で十分であろう。この値を採用すればA種ボルトの場合、トルクに換算して1500kg $\cdot$ cmであり、スリップ付単能トルクレンチで容易に締付けができる。

以上のことから、ナット回転法によるM22ボルト (F8T, F10T) の締付け条件として、

1次締め……トルク 1500kg $\cdot$ cm (軸力5 tに相当)

2次締め……ナット回転角 180° が最適であると結論づけられる。

3. 締付け機器の性能試験

ナット回転法でボルトを締付けるときには、特別な制御装置は必要としないが、一般的にトルクコントロール法よりも強い力で締付けることになるため、締付け容量の大きなものが要求される。ここでは代表的な締付け機器3種 (Table 6 参照) を取り上げナット回転法への適用性の検討を行い、現場施工に使用する機器を選択した。

3.1 試験方法

締付け機器のうち、インガソルインパクトレンチは現在最も一般的に使用されているもので、トルクコントロール装置付であるが、今回はこの制御装置をはずして実験した。トルシャット (TN-25P) はナット回転法用に開発された機器で、回転角制御装置が付いており、締付けはインパクト方式によっている。エスパーレンチは油圧利用の静回転方式で、インパクト方式である先の2機種とは異なるため、特殊な六角座金を使用して機器本体の回転防止を図っている。

試験には F8T M22 $\times$ 70, F10T M22 $\times$ 145のボルトを用い、締付け時間、ナット回転角、騒音をそれぞれの機種ごとに測定、比較した。なお締付け条件は前記のとおり1次締めトルク1500kg $\cdot$ cm、2次締めナット回転角 180° である。

Table 6 Bolt wrenches used

Wrench	Power unit	Max. torque (kg $\cdot$ m)	Nut turning controlling	Weight (kg)	Note
Ingersoll (Extra heavy) 5340-TO	Air motor 700 r.p.m.	76	No controlling	14.3	Impact
TN-25P	Air motor 3 000 r.p.m.	120	0~300° Pitch 5°	14.5	Impact
Acepower wrench APS-120	Oil pump	120	180° only	10.0	No impact Use hexagonal washers

3・2 試験結果と考察

結果の一覧を Table 7 に示すが、これらの数値はボルト10本の平均値である。

3・2・1 ナット回転角

3機種とも目標値180°から負側にかたよっており、機種間での大きな差は見られない。インガソルインパクトレンチでは、レンチソケットの1対角線に沿って赤色テープを貼付し、目視による制御で締付けを行ったが、同機種がトルクコントロール法用に製造されているにもかかわらず、かえって他の機種よりもバラツキが少なかった。このことは、通常の締付け機器でも十分ナット回転法に転用が可能であることを示すものであるが、目視制御の分だけ締付け作業者に負担がかかることになり、ナット回転法による施工の経験に乏しい現況では、目視制御による締付け方法は避けた方がよいと考えられる。

3・2・2 締付け時間

ボルトの首下長さが短くなればボルトの剛性が増加するため、通常、締付けに要する時間は長くなるが、エスパーレンチの場合は0.5sec、トルシャットでは1.5secの増加を記録した。他方、インガソルインパクトレンチではF10T M22×145

の締付けに27.6secをも要したにもかかわらず、F8T M22×70には約1/3の9secしか要しないという、他の2機種とは全く逆の様相を呈した。

この理由としては、インガソルインパクトレンチのパワー不足が考えられる。すなわち、トルシャット、エスパーレンチはいずれも締付け最大容量が120kg・mであるのに比べ、インガソルインパクトレンチではエキストラヘビー級でも76kg・mと小さいため、50kg・m程度のトルクで締付けが完了するF8T M22の場合には容易に締付けられる反面、ほぼ80kg・mの締付けトルクを要するF10T M22ボルトの締付けは能力的に無理があったものと思われる。

3・2・3 締付け時の騒音

エスパーレンチは、静回転方式のため無騒音に近い。インガソルインパクトレンチとトルシャットは、どちらも打撃をくり返して締付けるため、かなりの騒音が観測されたが両者の間には大きな差は認められなかった。

以上の結果より、施工性の最もすぐれているのはエスパーレンチであると結論づけられるが、六角座金を使用するといった特殊性があるため、より一般的な機器としてトルシャットを取りあげることにした。これは騒音に関してはエスパーレンチに劣るものの、施工条件によって締付け角度を

Table 7 Test results of wrenches

Wrench	F8T M22×70				F10T M22×145			
	$\bar{\theta}$	S	t	L	$\bar{\theta}$	S	t	L
Ingersoll 5340-TO	180.3	175 190	9	107	183.5	165 180	27.6	105
TN-25P	170.3	160 190	6.7	98	163.5	155 170	5.2	93
Acepower wrench	166.6	160 170	4	72*	167	160 175	3.5	72*

$\bar{\theta}$: Mean of nut rotations by tightening bolts (degree)

S : Scattering of nut rotations (degree)

t : Time used in tightening bolts (sec)

L : Noise occurred in operating the wrench (phon)

* : Background noise

任意に変更できるよう回転角制御装置が内蔵されており、より実際的な締付け機器であると判断したためである。

4. 鉄道橋現場継手への応用

前述の実験室的な研究の結果、ボルトセットの変形能を確認し、適正締付け条件および締付け機器を選定できた。したがって、これらを基に以下に述べる鉄道橋現場主桁接合部の高力ボルト全数をナット回転法によって施工した。

4.1 鉄道橋の概要

この鉄道橋は、国鉄京葉線から当社千葉製鉄所に分岐する専用線で、幅30mの不寝見川を斜めにまたいで架っている。橋の型式は水面からの余裕高の制限、レール高の制限から下路プレートガーダーが採用され、また橋脚は川の中につくることが許されないため、両岸に基礎を有する門型ラーメン橋脚とした。橋梁の概要は次のとおりである (Fig. 3, Photo. 2 参照)。

型式	単線下路プレートガーダー(2径間)		
橋長	76.0m		
支間	37.8m		
主桁間隔	4.3m		
使用鋼材	SM50A, SM50B, SM50C, SMA41A他		
	最大板厚44mm		
鋼材重量	上部工	182.3 t	
	橋脚	64.8 t	計247.1 t

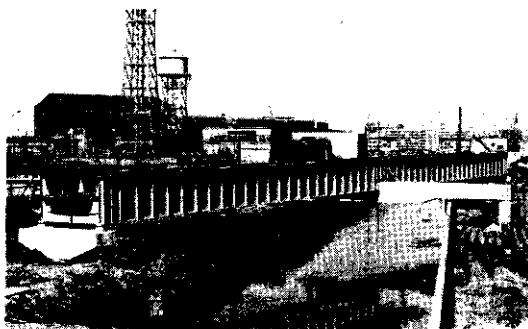


Photo. 2 General view of Nezumi river railway bridge

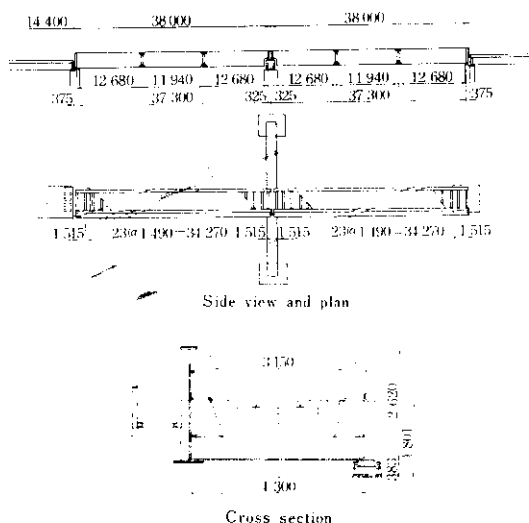


Fig. 3 General view of bridge

下路プレートガーダー、橋脚の現場継手はすべて高力ボルトを用いた。高力ボルトは等級F8T, F10T, F11TでM19, M22が使用されている。ナット回転法は主桁添接(F10T M22, 本数2400本)、横桁取付(F8T M22, 一連のみ)、防水用張板(F8T M22~19)に適用された。橋脚継手その他はトルクコントロール法により締付けを行った。

4.2 施工要領

ボルトの締付けは以下に列記する要領で実施した。

- (1) 1次締め: 1500kg・cmのトルクをスリップ付単能トルクレンチで与える (Photo. 3 参照)。
- (2) マーキング位置: ボルト尾部、ナット、座金および接合面
- (3) 2次締め: トルクシャットでナット回転角180°を与える (Photo. 4 参照)。
- (4) 締付け角度の許容誤差: $\pm 30^\circ$
- (5) 検査および補正: 締付け後全数検査を行い、締付け不足のときは追い締め、締付け過剰のときは取り換え再締付けとし、回転角を許容範囲に納める。
- (6) その他: 道路橋示方書、高力ボルトの締めつけに関する規定¹⁾を準用する

Table 8 Bolt tension and nut rotation

Bolt	L_0 (mm)	$\bar{B}_1$ (t)	σ_{B1} (t)	$\bar{B}_2$ (t)	σ_{B2} (t)	$\bar{\theta}$ (degree)	σ_{θ} (degree)	n (pieces)
F8T M22	60	3.2	0.62	26.2	---	171	32	32
	65	3.3	0.73	26.1	0.51	170	24	24
	70	3.2	0.77	24.9	1.12	183	16	16
	95	3.4	0.56	24.8	0.58	183	16	16
F10T M22	60	3.4	0.85	30.3	0.80	170	7.4	32
	65	3.2	0.37	30.1	0.59	169	5.5	24
	70	3.5	0.50	30.0	0.86	184	11.5	16
	75	3.4	0.93	30.0	0.86	172	6.4	71
	80	2.9	0.51	29.5	0.72	168	9.6	24
	95	3.3	0.33	30.6	0.65	174	11.7	16
	135	3.0	1.15	27.9	1.39	185	9.6	66
	145	4.3	0.69	28.6	0.80	173	12.3	82

$\bar{B}_1$: Mean bolt tension at first tightening

$\bar{B}_2$: Mean bolt tension at second tightening

$\bar{\theta}$: Mean nut rotation angle at second tightening

σ_{B1} : Standard deviation at first tightening

σ_{B2} : Standard deviation at second tightening

σ_{θ} : Standard deviation at second rotation angle

軸力のバラツキは非常に小さく、すべてのボルトが F11T M22 の標準ボルト軸力 23.2 t を満たしているという好結果を得た。さらに多くの現場の施工実績にもとづく裏付けを待たねばならないが、少なくとも、ナット回転法によって施工され

たボルトには、トルクコントロール法による場合よりも高い軸力を設計値として期待できると考えられる。

本工事ではボルトの首下長さが 60mm から 145 mm と、かなり開きのあるものまでを同一施工条

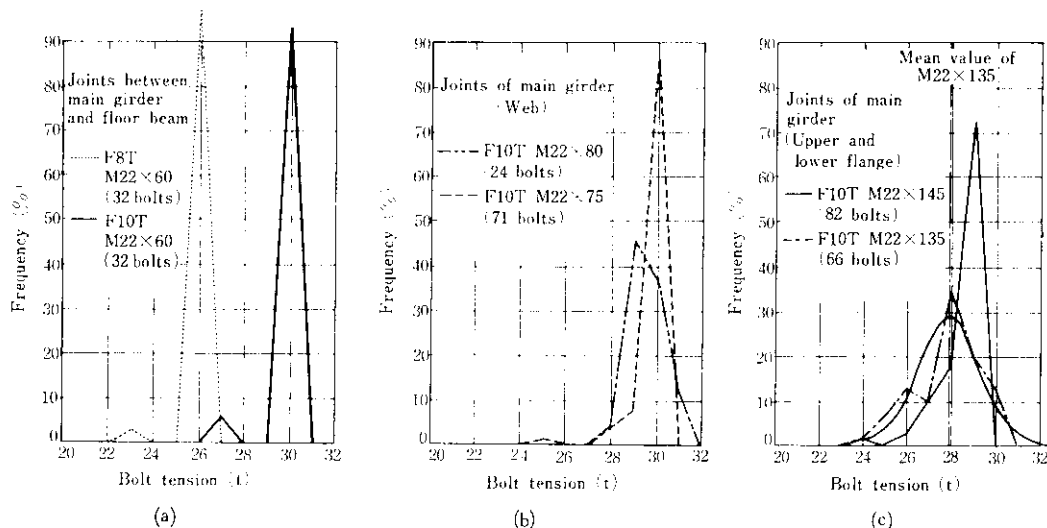


Fig. 5 Frequency distribution of bolt tension

件で締付けしたが、首下長さが長くなるほど軸力のバラツキがわずかに大きくなる傾向が見られる程度であり、この範囲では軸力に関して顕著な差は認められず、ナット回転法により容易にできわめて安定した軸力導入がなされることを立証しえた。

なお、首下長さが100mm以上のボルトを用いるような厚板を接合する場合には、被締付け材の剛性が大きいことに起因して、1次締めのみでは材が十分に密着されないおそれがあることに注意して施工する必要がある。すなわち、このようなときには、順次締付けて行く間に、2次締めの終了していないボルトの軸力が低下し、所定のナット回転角を与えても、目標軸力が得られないことがおこりうるからである。

この問題は、あらかじめ材を十分に密着させることにより解決され、仮ボルトの本数を増すことで対処できる。トルクコントロール法の場合は、1次締めにおいて目標軸力の80%を締付けるため、仮ボルトの管理を厳密にする必要はないが、ナット回転法で締付ける際には仮ボルトの管理を厳密にしなければならない。一例によれば⁵⁾、仮ボルトの数を締付けボルト総数の約50%としている。

ただし、いったん2次締めされたボルトについては、隣接するボルトの影響を受けないことが今回の実験でも確かめられており、2次締め後にリラクゼーションが起らない限り、ボルト軸力が低下することはない。

4.4.2 締付け時間と施工能率

ボルト1本あたりの締付けに要する時間は、3.2の結果と大差なく、M22×145のボルトで5～6 sec, M22×60, M22×65で7～8 secであった。ただ首下長さが短いものは、時に1本の締付けに30sec前後の時間を要したものがあつた。この最大の原因として、レンチの容量に余裕がなかったことがあげられるが、インパクトを与えると同時にレンチをボルトの締付け方向(時計方向)へ押し付けると比較的短時間で締付けられたことから判断して、締付け姿勢にも若干の原因があるものと考えられる。なお、今回の現場継手では平均して300本/人・日の施工能率であった。これは通

常のインパクトレンチを用いたトルクコントロール法による800～1000本/人・日に比べてかなり能率が低い。締付け作業者の慣れによって改善が期待されるとはいえ(本工事では最大締付け数は100本/人・時)、飛躍的な能率向上を図るには、首下長さにかかわらず短時間で締付けられる機器の開発を急ぐ必要がある。しかし、締付け後の検査能率は、全数検査で150本/人・時と、トルクコントロール法に比べてきわめて良好な成績を納めた。

4.4.3 設計ボルト軸力の算定

ナット回転法で締付けたボルトには、本実験の結果でも明らかなように、トルクコントロール法に比べ、はるかに高い軸力が導入されており、当然のことながら、トルクコントロール法よりも大きな設計軸力が期待される。ここで、主要な継手に用いられ、かつ導入軸力のバラツキの比較的大きなF10T M22×135 (Fig. 5 (c) 参照) のボルトに着目し、ナット回転法による場合の設計軸力を算定してみる。

現行規準⁶⁾にしたがえば、摩擦接合の設計すべり荷重 P_a は次式で示される。

$$P_a = f \cdot n \cdot \mu \cdot N / \nu \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 f : 摩擦面の数
 n : 継手構成ボルト数
 μ : すべり係数
 N : 設計軸力
 ν : 安全率

いま、(i) 導入軸力の分布は正規分布とする (Fig. 5 (c) 参照)、(ii) すべり係数 μ は1継手内では一定、かつ継手間での変動は正規分布にしたがう、と仮定し、導入軸力を $N : N(m_N, \sigma_N^2)$ 、すべり係数を $\mu : N(m_\mu, \sigma_\mu^2)$ とおき、さらにボルトのリラクゼーション、部材の日違いなどによるボルト軸力の低下を考慮すれば、(1)式は次のようになる。

$$P_a = f \cdot n \cdot m_\mu \cdot \beta \cdot m_N / \nu \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 β : ボルト軸力低下率
 m_μ : すべり係数の平均値
 m_N : ボルト軸力の平均値
 また実際の継手のすべり荷重 F_s は、

$$F_s : N (m_{Fs}, \sigma_{Fs}^2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, $m_{Fs} = f \cdot n \cdot m_\mu \cdot m_N$: 継手のすべり荷重の平均値

$$\sigma_{Fs} = f \{ n (m_\mu^2 \sigma_N^2 + n m_N^2 \sigma_\mu^2 + \sigma_\mu^2 \sigma_N^2) \}^{1/2} : \text{継手すべり荷重の標準偏差}$$

なる分布とすれば, 継手のすべり荷重 F_s が P_a を下まわる確率 p は⁹⁾

$$p = 1 - \int_{t_a}^{\infty} \phi(t) dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2)$$

$$t_a = \frac{P_a - m_{Fs}}{\sigma_{Fs}} = \frac{1}{v_{Fs}} \left(\frac{\beta}{\nu} - 1 \right)$$

ここに, v_{Fs} : 継手すべり荷重の変動係数
 v_{Fs} はほとんどすべり係数の変動係数に等しい。ゆえに, 現行の規準にしたがい $\beta=0.9$, $\nu=1.7$, $v_{Fs}=0.1$ とすれば, $t_a = -4.65$ となり, このときの p はほぼ 2×10^{-6} と算出され, トルクコントロール法によって施工することを前提としている現行の規準にしたがえば, 継手は上記の数値の示すとおりにきわめて安全であるといえる。

したがって, 設計ボルト軸力を決定するに際し, ナット回転法による継手のすべり荷重が, 設計すべり荷重を下まわる確率が, トルク法のそれと同等以下となるよう, $p \leq 2 \times 10^{-6}$ を判定規準として, 実験値 $m_N = 27.9 \text{ t}$, $\sigma_N = 1.39 \text{ t}$ を採用すれば, 設計ボルト軸力は 25.3 t と算出される。これはボルト降伏軸力の93%に相当するものである。

すなわち設計ボルト軸力は次式で示される。

$$N = \gamma \cdot \sigma_y \cdot A_e \quad \dots\dots\dots (5)$$

σ_y : JIS で規定する最小降伏点応力

A_e : ボルト有効断面積

γ はボルトの材料, 施工の両面から定められた一種の安全率であり, トルクコントロール法では F8T に対し 0.85, F10T および F11T に対しては 0.75 の値を取っているが, 上述のように, ナット回転法による施工の場合は $\gamma=0.9$ をとりうる事がわかる。

5. 結 言

本実験の結果, 明らかになった事項は以下のとおりである。

(1) ボルトの変形能

(a) ボルトの締付け最大軸力は, 単純引張試験より求めた最大軸力より 7~11% 低い値を示す。
 (b) F8T, F10T ボルトは, とくに破壊に至るまでナット 3 回転以上の変形を要するほどの十分な変形能力を有するので, ナット回転法に適しているといえる。

(2) 施工性

(a) F8T, F10T ボルトの 2 次締め条件は, ナット回転角 180° が適当である。
 (b) 接合部材の目違い, 接合面の密着不良により, 2 次締め時に 1 次締め段階にあるボルトのゆるむ可能性がある。このためナット回転法による施工にあたっては, 仮ボルトの管理に十分注意し, 接合部材が密着するよう心掛ける必要がある。
 (c) いったん 2 次締めされたボルトは, ボルト穴の周辺で接合材が密着された状態になっているので, 他のボルトの締付けにより軸力が低下することはない。
 (d) ナット回転法によって施工されたボルトは, 首下長さにより導入軸力のバラツキは異なるが, 設計軸力として, 降伏点応力の 90% が保証され, 継手としての安全性も現行規定と同等以上のものが期待できる。

(3) 締付け機器

(a) 首下長さの短いものほど施工能率が落ちるため, さらに容量の大きな機器の開発が望まれる。
 (b) 回転角制御装置がなくても締付けは可能である。
 (c) ナット回転法による締付けの検査能率は 150 本/人・時と, トルクコントロール法に比べてはるかに高い。

ナット回転法の実用化を図るとき, 最も不安となるのはボルトの遅れ破壊, リラクゼーションなどである。これらのうち, F8T, F10T のボ

ルトに関しては、遅れ破壊の心配がないとされており¹⁰⁾、リラクゼーションについても導入軸力が大きい、設計軸力は十分確保できると思われる。なお、リラクゼーションについては現在室内実験的に追求しており、追って報告の予定である。

本研究を遂行するにあたり、本州四国連絡橋公団設計第一部 田島二郎部長、国鉄構造物設計事

務所 阿部英彦次長、神戸大学工学部 西村昭教授には種々有益なる御教示を賜った。また川崎重工業㈱、日本ファスナー工業㈱の関係各位、ならびに当社大阪プロジェクト営業室 村田勝弘課長、大阪鋼材技術室 小森正義課長には実験の際、多くの協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 北岡ほか：高力ボルトのトルク値の温度による変動，橋梁と基礎，5 (1971) 5
- 2) 鷺尾ほか：高力ボルトの締付けとゆるみ，製鉄研究，(1967) 260
- 3) 橋本ほか：ナット回転法に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1973)，10月
- 4) 田島ほか：高力ボルト接合，ナット回転法の提案，JSSC，9 (1973)，89
- 5) 日本道路公団：工事報告・天草五橋 施工編，〔土木学会〕
- 6) Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts，〔AISC〕
- 7) 舟橋ほか：高張力ボルトのナット回転法に関する実験，建築学会論文報告集，(1963)，69
- 8) 鋼鉄道橋設計規準・解説，(1974)，3月，〔土木学会〕
- 9) 西村昭：高力ボルト摩擦接合のすべり荷重の統計学的考察，土木学会論文報告集，(1971)，188
- 10) 日本鋼構造協会：高力ボルトの曝露試験のその後の経過，JSSC，7 (1971)，72
- 11) 道路橋示方書・同解説，(1973)，377，〔道路協会〕