F10Tを用いた高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角法の適用の検討

白旗 弘実¹・南 邦明²・藤野 大地³・宮井 大輔⁴・矢野 将太⁵・横田 渉⁶

¹正会員 東京都市大学教授 工学部 都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: hshiraha@tcu.ac.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

E-mail: minami.kun-e27b@jrtd.go.jp

³正会員 川田工業 鋼構造事業部 技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)

E-mail: daichi.fujino@kawada.co.jp

⁴正会員 横河ブリッジ 設計本部 東京設計第一部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町27)

E-mail: miyai@yokogawa-bridge.co.jp

⁵正会員 川田テクノシステム 総合技術部 東京技術部 (〒114-0023 東京都北区滝野川6-3-1)

E-mail: s-yano@kts.co.jp

⁶非会員 東京都 下水道局 東部第一下水道事務所 (〒135-0016 東京都江東区東陽7-1-14)

(研究当時 東京都市大学 工学部 都市工学科)

E-mail: Wataru_Yokota@member.metro.tokyo.jp

本論文は、F10Tを用いナット回転角法でボルト締付けを行った高力ボルト摩擦接合継手に関する実験的研究である。本研究では、無機ジンクリッチペイントを施した同継手のナット回転角法の適用に向けた基礎データを取得することを目的として、まず、一次締めに関して、スナッグタイト（人力で力いっぱいでのボルト締付け）の適用性を調べた。次に、ボルト径およびボルト長をパラメータとした導入軸力試験およびリラクセーション試験を行い、適切なボルト軸力、すなわち、ボルトねじ部が降伏域に入らないでリラクセーション後も設計ボルト軸力を満足できるナット回転角を提案した。さらに、提案したナット回転角を用いてすべり試験体を作成し、すべり耐力試験を実施し、F10Tのナット回転角法の適用に向けた検討を行った。

Key Words : bolted connection, nut rotation method, F10T, relaxation, slip coefficient, snug tight

1. はじめに

道路橋示方書¹⁾（以下、道示）および鉄道構造物等設計標準²⁾（以下、鉄道標準）において、高力ボルト摩擦接合継手におけるボルト締付け法は、トルク法、ナット回転角法および耐力点法が示されている³⁾。現在、耐力点法を用いることはほとんどなく、一般にトルク法が適用されるが、防食法に金属溶射を適用する場合には、溶融亜鉛めっきボルトF8T（以下、めっきボルト）を使用するので、その際、ナット回転角法が適用される。理由としては、めっきボルトの締付け作業において、ボルトやナットに付着した亜鉛の膜厚のばらつき等の影響で、導入軸力にばらつきが生じること、リラクセーションによる軸力低下が大きいことが

あげられる。よって、導入軸力が高くなるナット回転角法が用いられる。

道示および鉄道標準において、ナット回転角法を用いる場合、ナット回転角は 120° ($L \leq 5d$ (L : ボルト長さ, d : ボルト径))を規定している。ただし、これはブラスト処理されためっき面を対象とした規定であり⁴⁾、著者の1人は、例えば、接触面に溶射あるいはりん酸塩処理しためっき面では、ナット回転角は 90° ($L \leq 5d$)がよいことを示した⁴⁾⁵⁾。これは、接触面によってリラクセーションによる軸力低下特性が異なるからであり、適切なボルト軸力が期待できるナット回転角は接触面によって異なると考えられる。

現在、鋼橋の建設工事では、使用ボルトはトルシア形ボルトS10Tを使用しているケースが最も多い。これ

表-1 使用鋼材の機械的性質および化学成分(スナッグタイト試験)

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)					適用場所
		耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び(%)	C	Si	Mn	P	S	
SM490YA	9	457	535	22	0.15	0.19	0.108	0.023	0.007	A1の母板・連結板
SM490YA	12	482	537	22	0.14	0.18	0.110	0.016	0.003	A2の連結板
SM490YB	19	461	542	23	0.15	0.19	0.107	0.016	0.005	A3の連結板
SM490YB	22	426	513	25	0.15	0.19	0.108	0.016	0.004	A2の母板
SM490YB	32	418	527	21	0.15	0.18	0.107	0.016	0.006	A3の母板

表-2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値(スナッグタイト試験)

ボルト径	首下長さ (mm)	有効 断面積 (mm ²)	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)
			4号試験片				製品		製品	製品	
			耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	
M22	70	303	993	1050	18	69	328	32	30	40	0.130
	90		987	1052	18	69	323	32	29	40	0.130
	110		1024	1056	18	69	324	33	30	40	0.129

は、作業効率がよいと考えられているからであるが、日々、締付け作業前に5本のボルト軸力の導入軸力の確認作業や、締付け後は、全数ピンテール破断面のグライNDER処理作業を行っているのも事実である。一方、ナット回転角法は、機械締め専用レンチで行い、締付け精度も高く、さらに、日々の締付けの前作業や締付け後の作業もなく、ナット回転角法を適用すれば作業効率が向上すると考えられる。ただし、道示や鉄道標準では、ナット回転角法の適用はF8Tのみであり、強度の高いF10Tでの適用は認められていない。これは、ナット回転角法での締付けは、導入軸力が高くなり、遅れ破壊を懸念しているからである(6,7)。これについては、道示ではボルト規定が初めて示された昭和48年度版から変更されていない。

F10Tのナット回転角法の適用に向けた検討は、昭和41年からJSSCの接合小委員会で行われた⁸⁾。ここでは、ナット回転角は180°が提案され、また、遅れ破壊に関しては、通常の使用条件であれば生じる可能性は少ないとし、適用事例を増やして一般化させることがよいとされた。ここでいう通常の使用条件とは、具体的な記述はなかったが、高温水中下といった特殊な腐食環境で促進試験を行っていたので、わが国において起こりうる気温、飛来塩分、湿度などの条件下ということと思われる。その後、締付け作業および施工検査の簡素化を図ることを目的とし、実構造物での適用に関する検討も行われ^{9,10)}、ナット回転角180°で実施工が行われた¹¹⁾。その後40年、F10Tでのナット回転角法を適用した事例は著者らの知る限りない。また、適用された当時の接触面は、黒皮を除去した粗面状態であり、現在の主流である厚膜型無機ジンクリッチペ

イント(以下、無機ジンク)を施した接触面でF10Tを適用した適用事例はなく、また、その適用性は不明である。

ナット回転角法の施工の際には、鉄道標準²⁾では150Nm(M22の場合)といった一次締付けトルク値の規定がある一方で、道示¹⁾では「接触面の肌隙がなくなる程度にトルクレンチで締めた状態又は組み立て用スパナで力いっぱい締めた状態」から回転角を与える記述となっている。肌隙のない状態をスナッグタイトというが、この道示で規定している状態が定量的なトルク量あるいはボルト軸力とどのような関係になっているかの調査や報告は著者らの知る限りない。

本研究は、F10Tを用いナット回転角法でボルト締付けを行った高力ボルト摩擦接合接手の適用に向けた基礎データを取得し、これらをもとにナット回転量について検討することを目的に行った実験的研究である。本実験では、始めにスナッグタイト試験を行った。つまり、組み立て工具で力いっぱい締めた状態がどれだけの軸力導入となるのかを調べ、試験で適用可能か検討した。その後、F10Tを用い無機ジンクを施した試験体を作成し、ボルト径、ボルト長およびナット回転角をパラメータとした導入軸力試験およびリラクセーション試験を行い、適切なボルト軸力、すなわち、ボルト軸部が降伏域に入らないでリラクセーション後も設計ボルト軸力を満足できるナット回転角を提案した。次に、提案したナット回転角ですべり試験体を作成し、すべり耐力試験を実施した。これらの結果から、提案したナット回転角の妥当性を検証し、F10Tのナット回転角法の適用に向けた検討を行った。

図-1 スナッグタイト試験片

表-3 試験体の板厚およびボルトの組合せ

試験体名	板厚(mm)		ボルトサイズ
	母板(t)	連結板(ts)	
A1	9	9	M22-L70(3.2d)
A2	22	12	M22-L90(4.1d)
A3	32	19	M22-L110(5.0d)

(母板)

(連結板)

×: 計測位置であり、円孔端から 20 ~ 30mm を測定

図-2 無機ジンク厚さ測定箇所

図-3 ひずみゲージの取り付け

2. スナッグタイト試験

(1) 試験体の使用材料および形状・寸法および種類

試験に用いた鋼材および高力ボルトの材料特性をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。使用ボルトは六角ボルト F10T-M22 であり、ボルト長は 70, 90 および 110mm の三種類である。表-2 のボルトの機械的性質は 3 本のボルトの平均値である。試験体を図-1 に示す。表-3 に示すような連結板および母板で三種類の組み合わせを用意し、それに応じたボルト長のボルトを締めた。表-3 のボルトサイズで示す d は、ボルトの呼び径であり、たとえば $3.2d$ とは、首下長さ 70mm が径の 3.2 倍であることを意味している。図-1 に示すように、一つの試験体には 3 つのボルト孔がつけられている。

表-4 スナッグタイト試験片の膜厚

試験体名	塗装膜厚(μm)			
	ボルト番号			平均
	No.1	No.2	No.3	
A1	88	87	77	84
A2	85	89	98	91
A3	87	88	87	87

ボルトピッチ(P)や縁端距離(e)は、標準試験片¹²⁾を参考に決定した。

(2) 塗装膜厚測定

試験体には無機ジンクを塗装した。膜厚測定結果を表-4 に示す。測定位置は、図-2 に示すようにボルト孔周辺とし、測定数は、1 つのボルト孔に対し、母板の両面および添接板の片面各 2 点とし、試験体一体あたり計 24 点測定した。1 点につき 5 回計測し、平均を取った。測定時期は、塗装作業後とした。

膜厚は 75μm を設計厚さとしたが、計測値は 77~98μm であり、厚めの結果となった。

(3) ボルト軸力の計測

導入軸力の評価を行うため、ボルト軸部にひずみゲージを取り付け、ボルト軸力を計測した。なお、ボルト軸力の計測に際し、表-2 に示す 3 種のボルトそれぞれに対し、荷重とひずみの関係から換算率を求めるキャリブレーション試験を実施し、ひずみからボルト軸力を算出するための換算率を求めた。

スナッグタイトの計測はボルト軸部に図-3 に示すように、2 枚のゲージを貼付し、それらのゲージ出力(ひずみ値)の平均値に換算率を乗じボルト軸力を算出した。ゲージ長は 5mm である。その際、ボルト軸部のひずみゲージの位置は、試験体として組み立てた際に、なるべく母材板厚中央となるようにした。

(4) ボルト軸力の締付け作業

ボルトの締付けは、三社の橋梁製作会社の工場あるいは建設現場で行った。会社をここでは A 社、B 社、C 社と呼ぶことにするが、日常的にボルト締付けを行っている作業員を A 社から 2 名、B 社では 3 名、C 社では 6 名の合計 11 名が締付け作業を行った。

三社のうちの一家の作業状況を写真-1 に示すが、高さ 70~100cm の机あるいは台に万力で試験片を固定した。最初のボルトを締める前にデータロガーのイニシャルを取ったのち、3 本のボルトを連続的に締めた。3 本のボルトの締付け順序は決まりをもうけず任意とし

写真-1 スナッグタイト試験状況

た. 3本のボルトを締め終わってからデータロガーでひずみの記録を取った.

締付けにおいては, 長さ 30~40cm のラチェット, レンチなどを用いて, 各作業員が力いっぱいと感じるまで, つまり, これ以上自身の力でナットを回せないと判断したところまでとした.

これら一連の締付け作業を 1 人の作業員につき, 3種類の試験片すべてのボルトを締付けるように同時にローテーションしながら, 何回か繰り返した. 一社が終わった後に, 試験体を他の会社に回送し, 次の一社で締付け試験を行い, 最後の会社に回送するという流れで行った. 三社ともに作業台の高さや工具による極端な差がないようにした. 人力であることからボルトや試験体が塑性域に達することはないと判断し, 再使用した. ただし, ゲージのひずみ値が不安定になった場合にはボルトを交換した. 最終的には A 社 108 件, B 社 80 件, C 社 53 件の合計 241 件の締付けデータを得た.

(5) ボルト軸力の分布

ボルトの導入軸力を計算し, 鉄道標準などで規定されている値との比較を行った. ボルトの軸力およびトルクの関係は次の式で表される.

$$N = \frac{T}{kd} \quad (1)$$

ここに, N はボルト軸力, T はトルク, k はトルク係数, d はボルト呼び径である. 使用したボルトの k は表-2 の値を用いると, M22 の規定値である 150Nm^2 に相当する軸力は 52kN であると算出された.

図-4はボルト軸力の頻度をボルト長ごとに示したものである. たとえばL70は, 首下長さ70mmのボルトであることを意味している. ボルトの軸力は 52kN を境とし, 5kN の範囲でまとめた. 図-4より, ボルト軸力は47~52, 52~57kNあたりをおおむねピークとした分布

図-4 スナッグタイト試験導入軸力分布

表-5 各ボルトに導入された軸力の平均および分散

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L120	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散
軸力値(kN)	55.7	17.7	54.9	15.3	54.2	18.7

表-6 軸力 52kN(トルク 150Nm)を上回るボルトの割合

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L120	計
割合(%)	56.3	47.5	51.9	51.9

になっている. 3種類のボルト軸力に対して, それぞれの平均と分散を表-5に示す. また, 150Nm を上回る軸力となった割合を表-6に示す. 表-6における計とは, ボルト長によらず軸力が 52kN を上回った割合である. 表-5および表-6より, 平均値としては 52kN を上回るものの個数としては半数程度であることがわかる. 分散値は 18kN 程度であるが, ここでの実験では最大と最小の軸力の差は 50kN であり, ボルト軸力は非常にばらついていることがわかる. なお, ボルト長の違いによる平均値や分散の差異は見られなかった (表-5).

実験において, 1次締めで締付け量(トルク)の影響は大きいと考えられる. そこで, 本実験では, 1次締めを鉄道設計標準²⁾の規定値で実施することとした.

3. 導入軸力試験及びリラクセーション試験方法

(1) 試験体の使用材料および形状・寸法

本試験で使用した鋼材および高力ボルトの材料特性をそれぞれ表-7および表-8に示す. 鋼材の材料特性は

表-7 使用鋼材の機械的性質および化学成分(軸力導入およびリラクセーション試験)

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)					適用場所
		耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び(%)	C	Si	Mn	P	S	
SM490YA	9	457	535	22	0.15	0.19	0.108	0.023	0.007	A1の母板・連結板, B2の連結板
SM490YA	12	482	537	22	0.14	0.18	0.110	0.016	0.003	A2の連結板, B1の母板
SM490YB	16	354	534	20	0.15	0.19	0.108	0.015	0.004	B1の母板
SM490YB	19	461	542	23	0.15	0.19	0.107	0.016	0.005	A3, B3の連結板
SM490YB	22	426	513	25	0.15	0.19	0.108	0.016	0.004	A2の母板
SM490YB	25	426	513	25	0.15	0.19	0.108	0.016	0.004	B2の母板
SM490YB	32	418	527	21	0.15	0.18	0.107	0.016	0.006	A3の母板
SM490YB	36	443	535	25	0.15	0.19	0.112	0.016	0.005	B3の母板

表-8 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値(軸力導入およびリラクセーション試験)

ボルト径	首下長さ (mm)	有効 断面積 (mm ²)	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)
			4号試験片				製品		製品	製品	
			耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	
M22	70	303	1025	1070	19	69	323	33	28	40	0.131
	90		1030	1071	19	69	330	33	27	40	0.131
	110		1030	1068	19	69	333	33	29	40	0.131
M24	75	353	1025	1070	20	66	372	33	26	39	0.136
	100		1033	1072	18	64	376	33	27	40	0.129
	120		1034	1070	20	66	377	33	27	40	0.131

図-5 試験体形状(軸力導入, リラクセーション試験)

表-9 試験体の種類

試験 体名	板厚(mm)		ボルト サイズ	ボルト締付け	
	母板 (t)	連結板 (ts)		1次締め	本締め
A1-1	9	9	M22-L70 (3.2d)	150N・m	75°
A1-2					90°
A1-3					120°
A2-1	22	12	M22-L90 (4.1d)		75°
A2-2					90°
A2-3					120°
A3-1	32	19	M22-L110 (5.0d)		75°
A3-2					90°
A3-3					120°
B1-1	12	9	M24-L75 (3.1d)	200N・m	75°
B1-2					90°
B1-3					120°
B2-1	25	16	M24-L100 (4.2d)		75°
B2-2					90°
B2-3					120°
B3-1	36	19	M24-L120 (5.0d)		75°
B3-2					90°
B3-3					120°

表-2 に同じである。試験体の母板および添接板には板厚 9～36mm の SM490Y を使用した。使用ボルトは、六角ボルト F10T (M22, M24) とし、ボルト長は 70～120mm を用いた。

図-5に試験体形状を示す。試験体は、ボルト径によ

り2種類を使用し、ボルト長により、適用板厚を選定した。1つはM22に対するものであり、図-1に示したものと同じである。もう1つはM24に対するものである。孔径は、各試験体ともに標準孔を用いた。ボルトピッ

表-10 無機ジंक厚さ測定結果

試験体 名	塗装膜厚(μm)			
	ボルト番号			平均
	No.1	No.2	No.3	
A1-1	88	87	77	84
A1-2	87	82	85	85
A1-3	95	87	92	91
A2-1	85	89	98	91
A2-2	94	83	80	86
A2-3	89	94	95	93
A3-1	87	88	87	87
A3-2	88	83	89	87
A3-3	80	89	90	86
B1-1	86	96	95	92
B1-2	98	90	83	90
B1-3	94	85	85	88
B2-1	94	87	94	92
B2-2	97	84	87	89
B2-3	88	99	98	95
B3-1	99	88	92	93
B3-2	84	89	87	87
B3-3	88	89	90	89

図-6 軸力導入試験のフロー

図-7 ナット回転角計測のための分度器

チ(P)や縁端距離(e)は、標準試験片¹⁰⁾を参考に決定した。

(2) 試験体の種類

試験体の種類を表-9 に示す。試験体のパラメータは、ボルト径、ボルト長およびナット回転角とした。M22 および M24 の両者ともに $5.0d$ (d : ボルト径) までを対象とし、各径 3 ボルト長、合わせて 6 種類のボルトを用いた。これらのボルトに対し、ナット回転角を 75, 90, 120° の 3 角度で締付けることとした。試験体は、各ボルト径および首下長さのパターンで 3 体製作することになり、合わせて 18 体を試験に供した。

接触面処理は、素地調整 (ブラスト処理(ISO Sa2.5)) を行った後に、無機ジंकを標準膜厚 $75\mu\text{m}$ 塗布した。

(3) 塗装膜厚測定

塗装面の膜厚測定は、電磁誘導式膜厚計を用いて行った。測定位置および測定点数は、スナッグタイト試験の試験体と同様、図-2 に示すとおりである。

膜厚測定結果を表-10 に示している。無機ジंकの設計膜厚は $75\mu\text{m}$ であるが、計測値は $77\sim 98\mu\text{m}$ であり、若干厚めであった。

(4) ボルト軸力の計測

導入軸力およびリラクセーションの評価を行うため、スナッグタイト試験の試験体の際と同様に、ボルト軸部にひずみゲージを取り付け、ボルト軸力を計測した。6 種のボルトそれぞれに対し、荷重とひずみの関係から換算率を求めるキャリブレーション試験 (1 種類のボルトのつき 3 本のボルトを使用) を実施し、ひずみからボルト軸力を算出するための換算率を求めた。

(5) ボルトの締付け作業

導入軸力試験において用いたナット回転法によるボルトの締付け手順を図-6 に示す。作業は、一次締めおよびマーキング後、本締めを行った。1 試験体でボルトは 3 本あるが、本締め作業では、その内 1 本(No.1)は、トルクレンチを用いて手締めで行い、残り 2 本(No.2,3)は、設定した回転角に締付けるナット回転角専用レンチを用いた機械締めとした。手締めは図-7 に示すように分度器を中心がボルト中心に一致するように削り取り、あてながら回転角の計測を行った。

表-11 軸力導入試験およびリラクセーション試験の計測結果の一覧

試験体名		ボルト サイズ	初期導入時の軸力(kN)										リラクセーション(720h)後の軸力(kN)									
			回転量 (°)	手締め(トルクレンチ)						機械締め		平均値	設計値 比率 (%)	手締め		機械締め				平均値	設計値比 率(%)	
				No.1 ボルト						No.2 ボルト	No.3 ボルト			No.1 ボルト	割合(%)	No.2 ボルト	割合(%)	No.3 ボルト	割合(%)			
				0°	30°	60°	75°	90°	120°													
M22	A1-1	M22x70 3.2d	75	43.89	117.8	183.0	241.3			256.7	248.0	248.7	121.3	218.3	106.5	-	-	222.4	108.5	220.4	107.5	
	A1-2		90	50.13	143.6	224.0			282.5	253.3	243.2	259.7	126.7	259.5	126.6	204.5	99.8	218.5	106.6	227.5	111.0	
	A1-3		120	60.63	154.9	225.6			282.3	324.0	295.1	293.2	304.1	148.3	306.2	149.4	280.6	136.9	265.7	129.6	284.2	138.6
	A2-1	M22x90 4.1d	75	68.74	140.9	221.7	258.4			231.5	239.2	243.0	118.5	236.7	115.5	209.8	102.3	219.2	106.9	221.9	108.2	
	A2-2		90	67.85	130.1	211.6			277.4	267.2	285.8	276.8	135.0	250.8	122.3	240.5	117.3	260.8	127.2	250.7	122.3	
	A2-3		120	54.63	115.3	197.6			263.5	297.0	-	291.6	294.3	143.5	278.6	135.9	-	-	269.8	131.6	274.2	133.8
	A3-1	M22x110 5.0d	75	52.71	101.5	160.8	188.9			209.9	219.4	206.0	100.5	167.2	81.6	195.4	95.3	207.3	101.1	190.0	92.7	
	A3-2		90	41.64	104.1	185.4			253.8	219.5	229.7	234.3	114.3	239.3	116.7	183.4	89.5	216.8	105.7	213.2	104.0	
	A3-3		120	51.92	104.0	170.6			226.9	268.0	272.7	-	270.4	131.9	251.8	122.8	253.4	123.6	-	-	252.6	123.2

試験体名		ボルト サイズ	初期導入軸力(kN)										リラクセーション(720h)後の軸力(kN)									
			回転量 (°)	手締め(トルクレンチ)						機械締め		平均値	設計値 比率 (%)	手締め		機械締め				平均値	設計値 比率 (%)	
				No.1ボルト						No.2 ボルト	No.3 ボルト			No.1 ボルト	割合(%)	No.2 ボルト	割合(%)	No.3 ボルト	割合(%)			
				0°	30°	60°	75°	90°	120°													
M24	B1-1	M24x75 3.1d	75	36.38	140.8	226.5	291.7		307.5	297.1	298.8	125.5	271.6	114.1	277.2	116.5	262.7	110.4	270.5	113.7		
	B1-2		90	33.81	139.5	259.3		327.6	-	325.6	326.6	137.2	301.9	126.8	-	-	302.0	126.9	302.0	126.9		
	B1-3		120	40.14	131.0	244.6		326.7	349.2	321.1	305.2	325.2	136.6	324.8	136.5	299.5	125.9	282.4	118.6	302.2	127.0	
	B2-1	M24x100 4.2d	75	38.02	119.0	235.2	294.8		288.3	284.0	289.0	121.4	267.7	112.5	263.3	110.6	262.3	110.2	264.4	111.1		
	B2-2		90	40.69	135.3	244.8		329.1		326.0	326.5	327.2	137.5	302.5	127.1	300.3	126.2	299.7	125.9	300.8	126.4	
	B2-3		120	35.36	119.6	242.8		336.2	348.5	326.8	331.0	335.4	140.9	320.1	134.5	-	-	305.5	128.4	312.8	131.4	
	B3-1	M24x120 5.0d	75	40.84	112.6	223.8	279.4		264.8	276.0	273.4	114.9	256.6	107.8	-	-	-	-	256.6	107.8		
	B3-2		90	41.12	112.8	202.7		289.0		303.9	305.9	299.6	125.9	267.9	112.5	281.7	118.4	278.5	117.0	276.0	116.0	
	B3-3		120	44.30	131.4	228.4		324.5	337.3	316.5	315.9	323.2	135.8	312.5	131.3	293.1	123.1	295.4	124.1	300.3	126.2	

表-12 残存軸力の割合

(6) 導入軸力試験方法

導入軸力試験では、各試験体の No.1 ボルトについては、回転角を 30°ごとにボルト軸力を計測した。一方、No.2,3 ボルトでは、表-9 に示す所定の角度の軸力のみ計測した。これら両者の結果より、導入軸力と回転角の関係を定量的に評価することとした。

軸力の初期を表す時刻としては、個々のボルトの本締め直後のひずみ値が最高となり、リラクセーションが始まる時点とした。手締めによるボルトを 30°ごとに締める際もひずみが一旦安定し、下がり始めたかと判断できる時点でひずみを軸力に換算した。データロガーのひずみ計測間隔は 10 秒間で、ボルト本締め後あるいは 30°締付け後には声で合図を送ったが、初期時刻としては、締付け直後から 30 秒以内におさまっていた。1 本目のボルトを締付けたのちに、次のボルトの締付けを同様に行い、さらにその次のボルトを締付けた。1 本目のボルトを締付けたのちにはリラクセーションによりひずみの値は時間とともに減少するが 2 本目のボルトを締付けることによって変化の度合いが大きく変わることはなかった。つまり、1 本のボルトが隣のボルトの軸力に与える影響はそれほど顕著ではないと考えられる。

一連の締付け作業終了後は 1 時間に 1 回の軸力測定を行った。3 日後には 1 日 1 回計測している。

	回 転 角	軸力残存率(%)					
		M22			M24		
		L70 (3.2d)	L90 (4.1d)	L110 (5.0d)	L75 (3.1d)	L100 (4.2d)	L120 (5.0d)
	75°	90.06	91.29	92.05	90.57	91.49	91.85
	90°	87.48	90.55	90.74	92.46	91.94	92.14
	120°	93.41	93.18	93.44	92.93	92.07	92.92
平均値		90.32	91.67	92.07	91.99	91.84	92.30
		91.35			92.04		

(7) リラクセーション試験方法

リラクセーション試験は、表-9 で示した 18 ケースであり、合わせて 54 本のボルトとし、計測期間は 720 時間(30 日)とした。

4. 導入軸力試験及びリラクセーション試験結果

(1) 導入軸力試験の計測結果

導入軸力試験の結果を表-11 に示す。表-11 においてたとえば A2-3 試験体の No.2 ボルトの軸力が横線「-」になっているものがあるが、これらはひずみゲージなどの不具合で計測ができなかったものである。

表-11 の初期導入時の軸力で、No.1 から 3 の平均値の欄を見ると、M22 および M24 において、ボルト長

図-8 リラクセーション試験による軸力残存率の低下

が長くなるにつれて導入軸力が低くなる傾向およびナット回転角が大きくなるにつれて、導入軸力が高くなる傾向が見られる。

設計値比率では M22-L110(長さ 110mm のボルトであることを示している)では、100～130%程度であったが、他の試験体では、120～140%の範囲にあるものが多い。ナット回転角と導入軸力の関係を見ると、回転角 75°で導入軸力は設計値に比較して 100～125%、90°で 115～135%、120°で 135～150%程度となっている。

(2) リラクセーション試験による軸力残存率の結果

表-12 において、リラクセーション後の軸力を数値で示している。図-8 に、リラクセーションによるひずみの経時変化を示す。図-8 の縦軸は初期のひずみ値により無次元化したものである。これらの曲線は試験体にある 3 つのボルトの値を平均したものである。

図-8(a)～(c)は M22、図-8(d)～(f)は M24 の結果であ

る。M22-L75 および L110 の一部で残存率が 90%を若干下回る程度に落ち込んでいる試験体、あるいは、90%程度にまで低下している試験体が見られる。しかしながら、他の大部分のボルトにおいては、軸力低下は 92～94%程度におさまっている。M22-L75 および M22-L110 の一部で残存率が 90%を若干下回る程度に落ち込んでいる試験体、あるいは、90%程度にまで低下している試験体が見られる。しかしながら、他の大部分のボルトにおいては、軸力低下は 92～94%程度におさまっている。

リラクセーションは締付け直後が著しいといわれている⁸⁾。初期の 30 分間の軸力の推移を各図とともに拡大して示しているが、いずれの試験体においても、94～98%にまで低下していることがわかる。その後も軸力は低下し続け、200 時間ほどが経過すると、軸力の低下はさほど見られなくなる場合が多かった。

ナット回転角との関係を見ると、多くの試験体にお

図-9 ナット回転量とボルト導入軸力

いて、回転角が大きいほうが、軸力残存率が高い傾向が見られた。

リラクセーション試験において、720 時間後の軸力残存率の数値を表にしたものが表-12 であるが、既往の研究において¹³⁾、著者の一人が同様に無機ジンのリラクセーション試験を行ったが、軸力残存率はおおむね 90%程度であり、既往の研究と同様の傾向を示した。

(3) ナット回転量の考察

図-9 に、軸力導入試験時のナット回転量と導入軸力の関係を示す。図-9(a)～(c)は M22、(d)～(f)は M24 の場合である。

図-9(a)～(b)の M22 において、L70 および L90 では、ナット回転量が 60°ではおおむね設計軸力が導入されていることがわかる。また、ナット回転量が 75°になると設計軸力の 120%が導入されているといえる。しかし、図-9(c)に示すように、L110 になると、ナット回転量が 75°で設計軸力とほぼ同じ軸力が導入され、90°で 120%になる結果となった。

ナット回転量が 120°になると、L70 および L90 において、ボルト軸力は設計軸力の 140%になる。図-9(b)の L90 においては、ナット回転量が 90°を超えると導入軸力との関係が線形ではなくなっている。

図-9(d)～(f)の M24 においては、L75、L100 だけでなく、L120 の場合でもナット回転量 60°において設計軸

図-10 720 時間後のボルト軸力とナット回転角

表-13 提案するナット回転量

ボルト締め付け	ボルト径			
	M22		M24	
ボルト長	$\leq 4.1d$	$\leq 5.0d$	$\leq 4.2d$	$\leq 5.0d$
一次締め (トルク法)	150Nm	150Nm	200Nm	200Nm
本締め (ナット回転法)	90度	105度	85度	90度

d : ボルト径

力と同等の軸力が導入されていること、およびナット回転量 75°で 120%が導入されていることがわかる。M24 ではすべてのボルト長において、ナット回転量が 90°を超えると、それまでの導入軸力-ナット回転角関係から傾きが減少し、非線形領域に入っていることがわかる。

以上の結果から、実施工でのナット回転法の適用に向けたナット回転量の提案を行う。ここでのボルト締付けは締付け精度が高い、ナット回転角専用レンチを使用することを前提としている。適切なナット回転量とは、ボルトねじ部が降伏域(非線形性が生じない)に入らないこと、およびリラクセーション後も設計ボルト軸力を満足することの条件を満たす回転量^{4,5)}となる。なお、トルク法では、設計ボルト軸力の 110%の軸力となるように締付け、その締付けトルクの規定上限値は、5 個の平均値において M22 で 261kN (127%)である。実施工では、個々のボルトでは 200～260kN で締付けられ、その平均値は 231kN (112%)である¹³⁾。

図-10 にリラクセーション後、つまり 720 時間後のボルト軸力と締付け時のナット回転量の関係を示す。図-10(a)の M22 においては、L70 および L90 では 90°が上記で示した軸力範囲に入っているといえる。L110 では 90°においては設計軸力とほぼ同じ値となってしまうことからそれより若干大きい 105°が、L70 と同等

の軸力であると考えられる。

表-11 の M24 においては、M22 より同じ角度でも軸力が高く、L75 および L100 において 90°では 126%を上回る。よって 90°よりも若干小さい 85°がよいと考えられる。85°における近似線では 120%となる角度となる。ただし、L120 においては、回転量 90°において軸力は 116%となっているので、90°でよいと判断した。

既往の研究で遅れ破壊に関するものとして池田・畑中¹⁴⁾のものがある。池田らはF10T-M22相当のボルトを用いて海上環境などで暴露試験を20年間続けている。その中に軸力350kNのものであっても拡散水素濃度が0.6ppm程度で遅れ破壊の可能性が生じてくる1.0ppmに対して余裕があることを示している。他の文献^{15),16)}でも遅れ破壊は報告されていない。西川ら³⁾も腐食環境への配慮が必要と述べつつも、鋼材品質の向上もあり、遅れ破壊は起こりにくいのではないかと述べている。

提案されたナット回転量をまとめると表-13のようになる。表-13は平均値での提案であるが、1度単位の規定は現実的ではなく、5度程度の誤差を見込んでの提案を行っている。また、ボルト継手としてはボルト軸力の平均値で評価することになるので、平均値の議論で妥当であると思われる。なお、施工に関しては、従来と同様に適切な施工管理を行い、特に一次締めめの軸力管理には十分な配慮が必要であると考えている。上記の既往の研究結果もふまえて、提案する方法でボルトを締付けたとしても遅れ破壊の可能性は少ないと考える。なお、5.0dを越える場合は、試験を行い、回転量を設定する必要があると考えられる。

5. すべり耐力試験

(1) 試験体の使用材料および形状・寸法

本試験で使用した鋼材および高力ボルトは、2, 3 章と同じ表-7, 表-8 で示した材料を使用した。

試験体形状を図-11 に示す。ボルト径による 2 種類を使用し、ボルト長により適用板厚を選定した。また、孔径は、各試験体ともに標準孔を用い、その他の寸法については、標準試験片¹²⁾の寸法とした。母板あるいは連結板の降伏荷重に対するすべり荷重の比(β 値)は 0.6~0.9 であり、すべり先行で限界状態となる条件となっている。なお、試験体は固定側とすべり側を設定し、固定側については 3 本のボルトを配置し、すべらせないよう配慮した。

(2) 試験体の種類および接触面の表面処理

試験体の種類を表-14 に示す。試験体の種類は、2,

図-11 すべり耐力試験の試験体

表-14 すべり耐力試験の種類

試験体名	板厚(mm)		ボルトサイズ	1次締め	本締め回転角
	母板(t)	連結板(ts)			
C1	22	12	M22-L90(4.1d)	150N・m	90°
C2	32	19	M22-L110(5.0d)		105°
D1	25	16	M24-L100(4.2d)	200N・m	85°
D2	36	19	M24-L120(5.0d)		90°

表-15 無機ジंक厚さ測定結果

試験体名	膜厚(μm)		平均値(母板と連結板)
	母板	連結板	
C1-1	87	87	87
C1-2	91	97	94
C1-3	86	88	87
C2-1	92	84	88
C2-2	91	91	91
C2-3	85	85	85
D1-1	85	99	92
D1-2	83	96	90
D1-3	85	90	88
D2-1	87	85	86
D2-2	91	100	96
D2-3	100	86	93

3 章を参考に、ボルト径およびボルト長を変えた 4 種類とし、試験体は、各種類で 3 体製作し、合わせて 12 体を試験に供した。

塗装作業、膜厚計測についても、2, 3 章と同様とした。また、これらの作業は、2, 3 章の試験体と同時にを行った。膜厚計測結果を表-15 に示す。

(3) ボルトの締付けおよびひずみ計測

一次締めおよび本締めは、4 章で提案した表-13 に

表-16 すべり耐力試験結果およびすべり係数

試験体	締付け直後 N_a					すべり試験直前 N_b					軸力残存率	残存率平均	すべり荷重(kN)	すべり音	すべり係数	
	軸力(kN)		平均	設計値比率	設計比率平均	軸力(kN)		平均軸力(kN)	設計比率	設計比率平均					μ_a (実軸力による)	μ_b (設計軸力による)
	No.1	No.2				No.1	No.2									
C1-1	260.0	244.8	252.4	123.1	119.4	235.5	221.0	228.3	111.4	108.1	90.61	91.03	513.6	あり	0.562	0.626
C1-2	236.2	253.9	245.1	119.5		-	-	-	-		-		433.6	あり	-	0.529
C1-3	245.2	228.2	236.7	115.5		224.2	205.4	214.8	104.8		91.46		410.8	あり	0.478	0.501
C2-1	262.6	-	262.6	128.1	123.2	239.6	-	239.6	116.9	113.3	91.23	91.78	539.2	あり	0.563	0.658
C2-2	255.0	244.1	249.5	121.7		233.1	226.5	229.8	112.1		91.41		498.8	あり	0.543	0.608
C2-3	239.9	251.2	245.5	119.8		222.4	232.2	227.3	110.9		92.70		576.4	あり	0.634	0.703
D1-1	325.0	304.1	314.6	132.2	125.3	287.4	276.3	281.9	118.4	113.4	88.42	89.79	561.2	あり	0.498	0.589
D1-2	-	290.5	290.5	122.1		-	263.1	263.1	110.6		-		565.4	あり	0.537	0.594
D1-3	279.6	299.0	289.3	121.5		254.9	274.6	264.7	111.2		91.16		653.4	あり	0.617	0.686
D2-1	239.0	267.1	253.1	106.3	114.4	197.2	245.5	221.3	92.99	103.6	82.48	87.15	495.0	あり	0.559	0.520
D2-2	-	272.6	272.6	114.5		-	254.2	254.2	106.8		-		652.8	あり	0.642	0.686
D2-3	284.0	298.3	291.1	122.3		260.8	267.3	264.0	110.9		91.82		597.0	あり	0.565	0.627

図-12 すべり試験状況

従い行った。なお、固定側(すべらせない側)のボルトについては、120°で締付けた。

(4) すべり耐力試験の方法

すべり試験は、ボルト締付け720時間後に実施した。荷重状況を図-12に示す。試験には載荷能力2000kNのTHU型万能試験機(東京衡機)を用いた。本試験では、試験体両端部それぞれ130mmの範囲をチャックで固定

し、試験体のすべりが生じるまで引張荷重を徐々に加えた。試験時には、図-11に示すNo.1ボルト位置で母板と連結板間の相対変位を測定した。図-12にクリップゲージ側面の拡大図を示しているが、アクリル製の支え材を2個使用し、一つを母板に接着、もう一つを連結板に接着することで相対変位を測定した。クリップゲージは動ひずみ測定器およびデータロガーに接続し、100Hzサンプリングでデータを取得した。

すべり耐力は、荷重が急激に下がるか、荷重の降下がなくすべりが不明確な場合はボルト位置での相対変位が0.1mmになったときの荷重値¹⁹⁾とした。

6. すべり耐力試験の試験結果

(1) ボルト軸力計測結果

ボルト軸力導入試験結果を表-16に示す。初期導入軸力は設計軸力の113~133%となったが、大半が120%台になった。120~130%となるように、ナット回転量を決めたのでこの範囲に入ったことになるが、D2シリーズ、つまりM24-L120では低めになってしまった。

リラクセーション後のボルト軸力は設計軸力の103~122%の範囲となった。軸力の残存率でみると、すべての試験体で90%前後になり、10%を大幅に上回る低下率とはならなかった。

(2) すべり係数算出結果

すべり荷重およびすべり係数算出結果を表-16に示す。

すべての試験片において、継手部分がすべった際に大きな音がした。また、すべり音とともに荷重が急激に低下した。このため、変位量によるすべりの判定を

図-13 すべり係数
とボルト軸力

図-14 すべり係数
とジンク厚さ

行う必要は生じなかった。

すべり係数は、式(2)を用いて計算した。ボルト軸力としては、載荷直前のボルト軸力(N_a)を用いて計算した μ_a と、設計ボルト軸力(N_b)を用いて計算した μ_b を示している。

$$\mu = \frac{P}{nmN} \quad (2)$$

μ : すべり係数, P : すべり荷重

m : 接触面数, n : ボルト本数, N : ボルト軸力

いずれの試験体においてもすべり係数(μ_a)は、道路橋示方書でも示されている無機ジンクリッチペイント下地 0.45 を上回り、0.48~0.64 の範囲にあった。ボルト径が太いほうが、また、ボルト長が長いほうがすべり係数が高くなる傾向はみられたが、差はほとんどないといえる。

設計ボルト軸力を用いて計算したすべり係数 μ_b はすべてのケースにおいて、0.5を上回り、0.5~0.7の範囲となった。

(3) すべり係数に及ぼす導入軸力、膜厚の影響

すべり係数と軸力の関係を図-13 に、すべり係数と膜厚の関係を図-14 に示す。軸力が高くなれば、すべり係数も若干低くなる傾向が報告されているが¹⁸⁾、本試験ではその傾向は見られなかった。また、一般に膜厚が薄くなるとすべり係数は低くなり、厚くなり過ぎても低くなる傾向¹²⁾にあるが、図-14 に示すように本試験の膜厚のばらつきの範囲程度ではすべり係数には影響しなかった。

(4) すべり試験後の接触面の観察

試験体の試験後の接触面(すべり面)を図-15 に示す。図-15(a)に示すように、ボルト孔周辺のすべったと思われる箇所では無機ジンクの剥離が生じた。塗膜の剥

図-15 すべり試験後の接触面の観察

離状況が著しい場合の方が、すべり係数は低くなる傾向となった。図-15(c)に示すように、厚い板では塗膜剥離の程度が小さかった。また、ボルト孔のこぼ面にボルトが接触した状態(支圧状態)になったと思われる試験体はなかった。

7. まとめ

本研究では、F10T ボルトのナット回転角法の適用に向けた検討を行うため、スナッグタイト試験を行い、その後、ボルト径およびボルト長をパラメータとした導入軸力試験およびリラクセーション試験により適切な回転角を検討した。提案したナット回転量で再度リラクセーション試験およびすべり耐力試験を行った。これら試験結果から得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1) スナッグタイト試験で締付けたボルトのトルクは、鉄道設計標準²⁾で規定されている一次締め値(150Nm)で平均値に近いものとなったが、大きくばらついており、分散値としては 18kN 程度のばらつきがあった。ナット回転角法の適用に際しては、締付け精度を向上させるため、一次締め値のトルク値を規定し、

実施工を行うのがよいと考えられる。

(2) ナット回転量とボルト軸力の間には、ナット回転量が 90° までの場合には、両者の間には線形関係が見られた。ナット回転量が 90° を超えると、ボルトねじ部は塑性域(非線形領域)に達するものと考えられる。

このときの設計ボルト軸力比は 140%程度であった。

(3) ナット回転角法の適用に際し、表-13 に示すように、M22 は一次締め 150Nm を前提として、ボルト長 $4.1d$ 以下(d はボルト径)のときは回転角 90° 、 $4.2d \sim 5.0d$ では 105° 、また、M24 では一次締め 200Nm を前提として、 $4.2d$ 以下のときは 85° 、 $4.3d \sim 5.0d$ では 90° とする。この回転量であれば、ボルトねじ部は塑性域に入らず、また、リラクセーション後の軸力も設計ボルト軸力を満足できる。

(4) 提案したナット回転量で、再度リラクセーション試験およびすべり耐力試験を行ったが、導入軸力は設計軸力に対し、各試験体の平均値は 114~125%導入されることが示された。また、720 時間のリラクセーション後の残存軸力は 104~113%、軸力残存率は 90%を保つことが示された。すべり試験を行ったところ、いずれの試験片に対しても、すべり係数は 0.48 を上回ることが確認された。

8. おわりに

これまでのナット回転角法では、ボルトねじ部において塑性域までを考慮した締付け回転角であった。このため、遅れ破壊の懸念が叫ばれてきた。ただし、本研究では、塑性域に入らない範囲でのボルト軸力であり、また、トルク法で許容されている上限トルクまでを考慮したナット回転角を提案した。

遅れ破壊の要因は、材料成分、拡散性水素量(さびから供給)およびボルト軸力である⁹⁾。ただし、遅れ破壊を起こさないための具体的な基準値はないのが現状である。そこで、本論文では弾性域(概ねトルシア型ボルトの基準値の最大値程度)に残存軸力を抑えておけば、遅れ破壊に対するボルト軸力の影響はほとんどなくなると考えた。

提案した回転角の信頼性を高めるためには、さらに実績を増やし、その締付け精度の検証を進めていく必要はあると考えている。

謝辞: 本研究は、鋼橋技術研究会「高力ボルト継手施工部会:(部会長:南 邦明)」の活動の一環で行ったものである。本試験の実施において、鋼橋技術研究会技術委員会(委員長:森 猛)の委員の方々および当部会の部会員の方々から数々のご意見・ご助言を賜

りました。また、スナッグタイト試験において、三井 E&S 鉄構エンジニアリングの濱達矢氏のご協力をいただきました。ここに記して心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説—II 鋼橋・鋼部材編, 2017.11.
- 2) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物), 2009.7.
- 3) 西川和廣, 高岡司郎, 菅原一昌:高力ボルト締付け工法—耐力点法一, 橋梁と基礎, Vol. 24, No. 7, pp. 35-43, 1990.
- 4) 南邦明, 斉藤雅充, 横山秀喜, 杉本一朗, 能島隆男, 増永寿彦, 長崎英二:亜鉛アルミ擬合金溶射を施した高ボルト摩擦接合継手に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 2, pp. 427-439, 2012.6.
- 5) 南邦明, 吉原伸行, 徳富恭彦, 鈴木茂弘:りん酸塩処理した溶融亜鉛めっき接合面の高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 69, No. 3, pp. 467-480, 2013.10.
- 6) 松山晋作:遅れ破壊, 日刊工業新聞社, 1989.
- 7) 日本鋼構造協会:高力ボルトの遅れ破壊, JSSC, Vol. 6, No. 52, 1970.4.
- 8) 田島二郎, 青木博文, 田中淳夫, 小林昌一, 北後寿:ナット回転法の提案, JSSC 協会誌, Vol. 9, No. 89, pp. 17-31, 1973.5.
- 9) 板垣秀克, 和泉公比古:回転法の F10T への適用, 首都高技報, No. 7, pp. 136-139, 1975.3.
- 10) 和泉公比古, 板垣秀克:回転法の F10T への適用(その 2), 首都高技報, No. 9, pp. 136-138, 1977.3.
- 11) 大貫一生:F10T ボルトの回転法による施工, 首都高技報, No. 9, pp. 130-133, 1977.3.
- 12) 土木学会:高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2006.12.
- 13) 南邦明, 遠藤輝好, 小峰翔一, 吉岡夏樹, 宮井大輔, 澁谷敦, 内田大介:トルシア形ボルト S10T(M22)の導入軸力および機械的性質の統計調査, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 2, pp. 280-289, 2018.8.
- 14) 池田秀継, 畑中清:耐力点締付け法に用いる摩擦接合用高力ボルトの暴露試験報告, 鋼構造論文集, Vol. 21, No. 84, pp. 1-7, 2014.
- 15) 橋田芳朗, 橋本郁郎, 今村壮宏, 山下恭敬, 松田哲夫, 山口弘信:38 年供用後の HTB F11T の遅れ破壊特性, 土木学会第 67 回年次学術講演会, I-344, 2014.
- 16) 本州四国連絡橋公団, (財)海洋架橋調査会:工場部構造委員会報告書, 本州四国連絡橋の海洋架橋技術に関する調査研究, 1992.3.
- 17) 日本建築学会:鋼構造接合部設計指針, 2012.3.
- 18) 南邦明:厚膜型無機ジンクリッチペイントを施した高力ボルト継手における導入軸力の影響の考察, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 1, pp. 58-63, 2018.
- 19) 南邦明, 田村洋, 白旗弘実, 内田大介, 吉岡夏樹, 濱達矢:高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験におけるすべり発生時の変位量, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 2, pp. 249-256, 2019.8.

(Received February 14, 2019)

(Accepted September 27, 2019)

APPLICABILITY OF TURN-OF-NUT BOLTING METHOD FOR FRICTION TYPE CONNECTION BY F10T HIGH STRENGTH BOLT

Hiromi SHIRAHATA, Kuniaki MINAMI, Daichi FUJINO, Daisuke MIYAI,
Shota YANO and Wataru YOKOTA

This study investigates the applicability of turn-of-nut method by F10T high strength bolt (Tensile strength is 1000MPa). Conventionally, turn-of-nut method is allowed only for F8T of lower yielding stress. In addition, torshear type high strength bolt such as S10T also can be found in many constructed works. Though S10T shows good workability, it requires finishing of tip of bolt and daily check of axial force by sampling. Turn-of-nut method of F10T can enhance the efficiency of the bolting process. In this study, at first, snug tight test was carried out by professional fastening workers. The result of axial forces of the bolts varied in a wide range, and the average axial force was almost equivalent with 150 Nm that is specified in railway design code. The appropriate turn-of-nut angle was investigated by the experiment, changing the length and diameter of bolt with the steel plates coated by inorganic zinc silicate primer. The result showed that the bolts get in the yielding area more than 90 degrees. Based on the optimum nut angle from the experiments, relaxation and slip tests were carried out. The one month relaxation test showed that the decrease of axial force of the bolts was ranged within 10%. The slip coefficients by the tests satisfied 0.45 that is specified in Japanese Road Association bridge design code.