

I. ボルト施工に関する検討WG

ボルト施工に関する調査

ボルト施工に関する検討WGメンバー

WGリーダー	遠藤 輝好	(株) 巴コーポレーション
幹事	田村 洋	横浜国立大学
〃	澁谷 敦	宮地エンジニアリング (株)
〃	小峰 翔一	日本ファブテック (株)
部会員	樋口 祐治	パシフィックコンサルタンツ (株)

ボルト施工に関する検討WG 目次

1. はじめに	I-1-	1
2. 施工基準の調査	I-2-	1
2-1 調査対象	I-2-	1
2-2 各種施工基準の比較	I-2-	1
2-2-1 ボルト・ナットおよび座金	I-2-	1
2-2-2 接合面	I-2-	2
2-2-3 器具の検定	I-2-	2
2-2-4 ボルトの締付け	I-2-	4
2-2-5 検査	I-2-	5
2-2-6 基準内容比較一覧および道路橋における各基準の改定年表	I-2-	6
3. 高力ボルトの統計調査	I-3-	1
3-1 調査概要および規定値について	I-3-	1
3-1-1 S10T(W)	I-3-	2
3-1-2 F10T(W)	I-3-	3
3-1-3 F8T	I-3-	3
3-2 ボルト軸力の調査結果	I-3-	4
3-2-1 検査証明書	I-3-	4
3-2-2 立会い試験	I-3-	5
3-2-3 現場試験	I-3-	8
3-3 トルク係数値の調査結果	I-3-	16
3-3-1 検査証明書	I-3-	16
3-3-2 立会い試験	I-3-	18
3-3-3 現場試験	I-3-	20
3-4 機械的性質の調査結果	I-3-	23
3-4-1 耐力(0.2%耐力)	I-3-	25
3-4-2 引張強さ(引張強度)	I-3-	27
3-4-3 伸び・絞り	I-3-	30
3-4-4 引張荷重	I-3-	33
3-4-5 硬さ	I-3-	35
3-4-6 めっき膜厚	I-3-	38
3-5 統計調査のまとめ	I-3-	38

4. 施工性の調査	I-4-	1
4-1 調査方法	I-4-	1
4-1-1 施工項目の違い	I-4-	1
4-1-2 計測方法	I-4-	5
4-2 調査結果	I-4-	5
4-2-1 ボルトの締付け	I-4-	5
4-2-2 検査	I-4-	6
4-2-3 施工後作業	I-4-	7
4-2-4 トルシア形高力ボルトと六角高力ボルトの作業時間の違い	I-4-	7
4-3 考察	I-4-	7
4-4 締付け作業の課題	I-4-	9
5. ボルト施工の作業項目調査	I-5-	1
5-1 施工計画書の調査および調査対象	I-5-	1
5-2 調査結果	I-5-	1
5-2-1 フローチャート	I-5-	1
5-2-2 ボルトの保管	I-5-	4
5-2-3 軸力計の検定	I-5-	5
5-2-4 現場予備試験	I-5-	6
5-2-5 締付け作業要領	I-5-	8
5-2-6 検査	I-5-	10
5-3 考察	I-5-	12
6. 作業効率化に向けた方策案	I-6-	1
6-1 トルシア形高力ボルトにおける現場予備試験の実施頻度の見直し	I-6-	1
6-1-1 はじめに	I-6-	1
6-1-2 本部会における検討成果	I-6-	1
6-1-3 施工管理基準に対する提案	I-6-	4
6-2 高力六角ボルト(F10T)における締付け完了後の検査方法の見直し	I-6-	5
6-2-1 はじめに	I-6-	5
6-2-2 本部会における検討成果	I-6-	5
6-2-3 施工管理基準に対する提案	I-6-	6
7. まとめ	I-7-	1

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合継手は、鋼橋の架設現場で広く用いられており、リベット接合からの移行時期である昭和 30 年代の中頃（1960 年頃）から使用され始めて現在まで約 60 年経過した^{1,2,3,4)}。時代の変化とともに使用するボルトも変化し、ボルトの遅れ破壊に配慮した昭和 55 年の道路橋示方書⁵⁾では F11T を削除し、摩擦接合面用トルシア形高力ボルト規格⁶⁾を道路協会が制定したのは昭和 58 年である。高力六角ボルト（F10T）は JIS B 1186（日本規格協会）⁷⁾で規格化されているが、トルシア形高力ボルト（S10T）や溶融亜鉛めっき高力ボルト（F8T）は日本規格協会による規格化はされておらず、前者は各協会の基準^{8,9,10)}が適用され、後者は JIS B 1186 を準用している。また、高力ボルトの施工方法に関しては各協会の基準が適用されており、道路橋では道路橋示方書（日本道路協会）⁸⁾、鉄道橋では鉄道構造物等設計標準（鉄道総合技術研究所）⁹⁾などが用いられている。

鋼橋の高力ボルトの施工に関して、道路橋示方書および鉄道構造物等設計標準などではトルク法を基本とし、溶融亜鉛めっき高力ボルト（F8T）のみナット回転法が適用されている。これまで設計基準や高力ボルトの材料（強度）については必要に応じて改定されてきたが、施工基準については大きな改定はされてこなかった。トルク法の締付け基準は、昭和 52 年発行の「トルク法による高力ボルト摩擦接合継手施工管理要領」（日本道路協会）¹¹⁾や昭和 58 年発行の「トルシア形高力ボルト施工管理要領」（日本道路協会）¹²⁾に示されて以降、道路橋示方書の改定等で多少の変更や修正はあるものの、これまで設計基準が必要に応じて改定がなされてきたことと比べると施工基準に関しては現在までほとんど変わっていない。

これまで、鋼橋の高力ボルト摩擦接合継手に関する出来事として、平成 2 年改定の道路橋示方書¹³⁾以降は摩擦接合面に無機ジンクリッチペイントを用いることが可能となった。平成 10 年前後以降はガイドライン型設計¹⁴⁾によりフィラープレートを用いた継手が増加した。また、平成 17 年発行の鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁵⁾では、トルシア形高力ボルト（S10T）のピンテール破断跡を平滑に仕上げることが記載され、ボルト締付け後の作業が増えた。

そこで、本編ではボルト施工の実態確認や効率化のための基礎データを収集することを目的として、第 2 章では各高力ボルトの施工方法に関して締付け方法、管理、検査の内容を中心に道路橋、鉄道橋、建築構造物の施工基準を調査した。第 3 章では現在使用されている高力ボルトの品質を把握するため製造時の製品検査証明書、ボルト出荷時の立会い試験、架設現場での現場予備試験における結果の統計調査を実施した。第 4 章では現状のボルト施工（検査、締付け後作業を含む）に要する時間を調査した。第 5 章では各工事現場の施工計画書の管理項目と各基準の関連性等を調査した。第 6 章では調査結果およびⅡ編での成果をもとにボルト施工に関する効率化の提案を検討した。

なお、本編では、当該基準および規格に関して略称を用いる場合、表 1-1-1 に示す略称を用いることとする。なお、基準および規格の変化について述べる場合は略称に発行年を付記する。

表 1-1-1 基準・規格の略称

発行元	設計基準	発行年月日	略称
日本道路協会	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編	2017年 11月	道示
日本道路協会	鋼道路橋施工便覧	2015年 4月	施工便覧
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年 7月	鉄道標準
土木学会	鋼・合成構造標準示方書 施工編	2018年 1月	土木基準
日本建築学会	高力ボルト接合設計施工ガイドブック	2016年 5月	建築基準
日本規格協会	摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・ 平座金のセット	2013年	JIS B 1186
日本規格協会	金属材料引張試験方法	2011年	JIS Z 2241

参考文献)

- 1) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，1966.5.
- 2) 日本鋼構造協会，鋼材倶楽部：鋼構造接合資料集成-リベット接合・高力ボルト接合-，1977.3.
- 3) 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.
- 4) 日本鋼構造協会：高力ボルト接合技術の現状と課題，2013.3
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，1980.2.
- 6) 摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット，解説，1983.10
- 7) 日本産業規格：JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」，2013.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017.11.
- 9) 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.
- 10) 日本鋼構造協会：構造用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット，2015.3.
- 11) 日本道路協会：トルク法による高力ボルト摩擦接合継手施工管理要領，1977.8.
- 12) 日本道路協会：トルシア形高力ボルト施工管理要領，1983.1.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，1990.2.
- 14) 日本橋梁建設協会：ガイドライン型設計 適用上の考え方と標準図集，1998.5
- 15) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.12

2. 施工基準の調査

2-1 調査対象

施工基準に関する調査は、国内の道路橋、鉄道橋、建築構造物に関する、日本道路協会、鉄道総合技術研究所および日本建築学会の 2000 年以降に発行された基準を中心に行った。なお、高力ボルトに関して初めて基準化された道路協会の道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 1973 年 9 月 と、高力ボルトに関する要領・規格を整理した高力ボルトに関する要領・規格集 1984 年 9 月についても比較対象として整理を行った。本章で調査対象とした基準を表 2-1-1 に示す。以降、表中の略称で示すものとする。

表 2-1-1 対象基準一覧

発行元	設計基準	発行年月日	略称
日本道路協会	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 ¹⁾	1973 年 9 月	S48 道示
日本道路協会	高力ボルトに関する要領・規格集 ²⁾	1984 年 9 月	S59 ボルト要領
日本道路協会	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 ³⁾	2012 年 3 月	H24 道示
日本道路協会	鋼道路橋施工便覧 ⁴⁾	2015 年 4 月	H27 施工便覧
日本道路協会	道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編 ⁵⁾	2017 年 11 月	H29 道示
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 ⁶⁾	2009 年 7 月	鉄道標準
日本建築学会	高力ボルト接合設計施工ガイドブック ⁷⁾	2003 年 12 月	2003 建築基準
日本建築学会	高力ボルト接合設計施工ガイドブック ⁸⁾	2016 年 5 月	2016 建築基準

なお、本章の高力六角ボルトの整理は、一般的な締付け方法とされているトルク法による締付け方法を基本とし、ナット回転法については特有の内容を追記する形で整理する。

2-2 各種施工基準の比較

2-2-1 ボルト・ナットおよび座金

ボルト・ナットおよび座金について、各基準で規定しているセット諸元について述べる。なお、ボルトの等級は本調査で対象としている日本道路協会発行の道示、ボルト要領、施工便覧では F8T, F10T, S10T を対象としている。ただし、S48 道示は F11T, B8T, B10T も対象であったが、S59 ボルト要領発刊時には対象外となっている。鉄道標準では道路協会発行の基準と同様に F8T, F10T, S10T を対象としている。建築基準では 2003 建築基準では F8T, F10T, S10T を対象としていたが、2016 建築基準では F8T が削除され、F10T, S10T を対象としている。高力六角ボルトについて、S48 道示では特に設定されていなかったが、S59 ボルト要領でトルク係数値の平均値、変動係数、20℃あたりの温度変化に対する 1 製造ロットのトルク係数値の変動幅などのセット諸元について記載がされた。以降、道示や建築基準、鉄道標準で管理値が決められ、現在に至っている。トルシア形高力ボルトについて、道示、鉄道標準では上記に記載したトルク係数の平均値、変動係数、変動幅は定められていないが、建築基準ではトルク係数値の範囲のみについて記載されている。

納入後についても、厳密な保管方法が整理されている。いずれの基準も、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認することや、工場包装のまま、雨などの湿気を与えないよ

う保管庫に保存すること、出荷から施工までの期間を短くすることなど、ボルトセットへの配慮すべき事項が記載されている。H27 施工便覧、鉄道標準については、それらに加えて、保管期間は6か月を目安にするという具体的な期間が記載されており、施工時のボルトセットの予備数も具体的に決められている。

なお、H29 道示のみ、トルシア形高力ボルトの S14T の使用が認められている。使用にあたっては塩分環境が厳しくない箇所など、適用可能条件が明記されている。

2-2-2 接合面

接合面の処理に付随したすべり係数値について、高力六角ボルト、トルシア形高力ボルトともに、S59 ボルト要領や H24 道示以前では一律 0.4 としていたが、H24 道示では接触面を塗装しない場合は 0.40、無機ジンクリッチペイントを塗装する場合は 0.45 と、これまで得た知見を踏まえて係数値を改定している。それに伴い、施工時に接触面の汚れや黒皮、さびなどは十分に除去するという留意事項に加えて、H24 道示以降では、無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の塗膜厚や亜鉛含有量など、上記すべり係数を満足するために必要な詳細な条件（表 2-2-1 参照）が追加された。一方、鉄道標準は処理に関係なく 0.4 以上としているが、接触面は中期・長期耐久型塗装系および耐候性鋼材の場合は、無機ジンクリッチペイントを塗布するものとし、道示と同様に無機ジンクリッチペイントの塗装仕様が記載されている。建築基準では自然発生の赤さびによる場合、ブラスト処理による場合、薬剤処理による場合のいずれかとした条件で、すべり係数を 0.45 としている。道示、鉄道標準とは違い、無機ジンクリッチペイントのみの接触面仕様ではないため、ブラストは表面粗さ $50\mu\text{mRz}$ 以上 (Rz は JIS B 0601 における最大高さを示す) を前提として、ショットブラストまたはグリットブラストとすることや、薬剤処理は使用する薬剤の留意事項について良く知った上で用いなければならないことが記載されている。なお、これらの差異については鉄道標準、道示は曝露環境下の構造物が対象であるが、建築については外壁内であり、使用環境が異なることに起因したものである。

表 2-2-1 無機ジンクリッチペイントを塗装する場合の条件 (H29 道示より)

項目	条件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	$50\mu\text{m}$ 以上
接触面の合計乾燥塗膜厚	$100\sim 200\mu\text{m}$
乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
亜鉛末の粒径(50%平均粒径)	$10\mu\text{m}$ 程度

2-2-3 器具の検定

(1) 高力六角ボルト

S59 ボルト要領で初めて測定器具や締付け機の検定について詳しく記載がされた。測定器具（軸力計）の検定回数は現場搬入時に1回、搬入後は3か月に1回行い、軸力計の軸力範囲は基準となる計測機器が示す値の $\pm 3\%$ 以内としている。締付け機も測定回数は現場搬入時に1回、搬入後は3か月に1回と測定器具と同様のタイミングで行うこととしている。また、出力トルクの変動係数は基準となる計測機器が示す値の4%以下と規定している。トルクレンチの検定は現場搬入時に1回、搬入後は1か月に1回を標準とし、使用頻度によっては定期検定の期間を別に定めることとしている。以降、道示では大きな変更はなく、鉄道標準においても同様な検定方法をとっている。一方で、建築基準では道示、鉄道標準ほど詳細な記載はないが、検定器具の軸力の範囲は道示、鉄道標準と同様に基準となる計測機器が示す

値の±3%以内と記載されている。

締付け機の調整は、毎日もしくは節目ごとでの実施が各基準で規定されている。また、その調整方法としては、その日に締付ける予定の一施工ロットの中から、軸力計にかかる首下長さのボルト5本以上を使用することを標準としている。締付け軸力の平均値の範囲についても規定されており、5本以上のボルトの平均値の上限値と下限値が表にて整理されている。それらを整理したものを表 2-2-2 に示す。平均値の範囲は、道示と鉄道標準は同じであるが、建築基準はそれらよりも広い範囲を許容している。

表 2-2-2 締付け機の調整に用いるボルトの平均軸力 (kN)

ボルトの等級	ねじの呼び	H29道示		鉄道標準		2016建築基準	
		下限値	上限値	下限値	上限値	下限値	上限値
F8T	M20	139	153	139	153	-	-
	M22	173	191	173	191	-	-
	M24	200	222	200	222	-	-
F10T	M20	172	190	172	190	155	209
	M22	215	237	215	237	191	259
	M24	249	275	249	275	223	301

※ 表中の - は該当する基準に記載されていないことを示す

※ 鉄道標準は基準に示される標準締付け軸力の±5%の値を算出して記入している

(2) トルシア形高力ボルト

軸力計の検定回数は、高力六角ボルトと同様にボルト要領で整理され、道示、鉄道標準はそれに準拠し、現場搬入時に1回、搬入後は3か月に1回行い、軸力計の軸力範囲は基準となる計測機器が示す値の±3%以内としている。建築基準は軸力の範囲のみ規定している。なお、締付け機は、トルクを制御する機能をもたずに単にトルクを与えるためのものであることから、検定の必要はなく、整備点検を行えばよい。

トルシア形高力ボルトは、現場予備試験として、その日に締付ける予定の全製造ロットのうち、軸力計にかかる首下長さの1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して行うことを標準としている。締付け軸力の平均値の範囲について、5本の供試ボルトの軸力の平均値が一定値以下であることを確認することとしている。その平均値の範囲は各基準で表にて整理されている。それらを整理したものを表 2-2-3 に示す。各基準で大きな差はないが、建築基準のみ、他の2つの基準に比べて上限値が高く設定されている。なお、規定の平均値を満足しない場合、同じ製造ロットにて倍数の試験を行い、それでも満足しない場合、その製造ロットのセットを使用してはならないことが明記されている。

表 2-2-3 現場予備試験に用いるボルトの平均軸力 (常時) (kN)

ボルトの等級	ねじの呼び	H29道示		鉄道標準		2016建築基準	
		下限値	上限値	下限値	上限値	下限値	上限値
S10T	M20	172	202	172	202	172	207
	M22	212	249	212	249	212	256
	M24	247	290	247	290	247	298
S14T	M22	311	373	-	-	-	-
	M24	363	435	-	-	-	-

2-2-4 ボルトの締付け

(1) 高力六角ボルト

ボルトの締付け方法について、各基準にていずれも原則としてナットを回して行うことと記載されている。予備締めについて、ボルト要領、道示、鉄道標準は締付けボルト軸力の 60%程度で予備締めを行い、予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施するよう記載されている。ナット回転法による締付けの場合、道示、鉄道標準では組立用スパナで力いっぱい締めた状態と記載されており、定量的な軸力は示されていない。ただし、鉄道標準では溶融亜鉛めっきボルトの一次締めにおいて、M20、22 では約 150kN・mm、M24 で約 200kN・mm の管理トルク値が記載されている。建築基準では、トルク法、ナット回転法ともにトルク値 100～200N・m の範囲で決めるよう記載され、同基準にボルト軸力とナット回転量の関係模式図が示されている。なお、ナット回転法による締付けについては、本報告書のⅡ編において、高力六角ボルト(F10T)へのナット回転法適用に向けた調査研究を実施した。

ボルトの締付けにあたっては、所定の設計ボルト軸力が得られるように締付けることが各基準で規定されている。各基準の設計ボルト軸力を表 2-2-4 に示す。なお、トルク法による高力六角ボルトの締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の 10%を標準としている。ナット回転法においては、設計軸力による管理ではなく、予備締めが終わった状態から各基準で定められている回転量でボルトを締め付けることとしている。いずれの基準においても、ボルト長に応じた回転量が規定されている。

締付け順序は、いずれの基準も連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、予備締めと本締めの 2 度締めを行うよう記載されている。なお、道示では、具体的な締付け順序の図が記載されているが、図 2-2-1 に示すように、S48 と H24、H29 道示 (H2 以降) では若干順序が変更されている。

締付け条件は、ボルト要領、道示、鉄道標準では降雨時は実施不可であると記載されている。建築基準においても、降雨時は防水シートなどで覆って養生するよう記載されているが、基本は降雨時の実施を推奨していない。

その他、本締め締付け記録について、ボルト要領までは記録計による記録を取るよう記載があるが、以降の道示では規定されていない。

表 2-2-4 高力ボルトの設計ボルト軸力 (kN)

ボルトの等級	ねじの呼び	H29道示	鉄道標準	2016建築基準
F8T	M20	133	133(147)	-
	M22	165	165(182)	-
	M24	192	192(211)	-
F10T	M20	165	165(182)	165
	M22	205	205(225)	205
	M24	238	238(262)	238

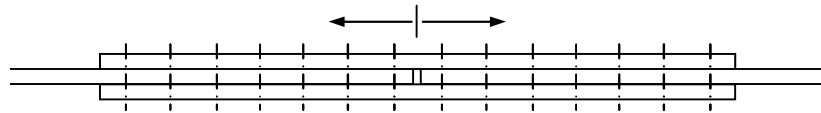
※ 表中の - は該当する基準に記載されていないことを示す

※ 鉄道標準の表中の括弧書き数値は標準締付け軸力を示す

(鉄道標準において標準締付け軸力は設計ボルト軸力の10%増しとされている)



(a) S48 道示時のボルト締付順序



(b) H24, H29 道示 (H2 道示以降) のボルト締付順序

図 2-2-1 ボルト締付順序の違い

(2) トルシア形高力ボルト

ボルトの締付け方法について、各基準にていずれも専用締付け機で行うことと記載されている。予備締めについて、高力六角ボルトと同様に、ボルト要領、道示、鉄道標準は締付けボルト軸力の 60%程度で予備締めを行い、予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施するよう記載されている。ボルトの締付けにあたっては、所定の設計軸力が得られるように締付けることが各基準で規定されている。各基準の設計ボルト軸力を表 2-2-5 に示す。なお、トルシア形高力ボルトはトルク法で締め付けるため、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の 10%を標準としている。

その他、締付け順序、締付け条件は高力六角ボルトと同様の内容で各基準において整理されている。

表 2-2-5 高力ボルトの設計ボルト軸力 (kN)

ボルトの等級	ねじの呼び	H29道示	鉄道標準	2016建築基準
S8T	M20	133	133(147)	-
	M22	165	165(182)	-
	M24	192	192(211)	-
S10T	M20	165	165(182)	165
	M22	205	205(225)	205
	M24	238	238(262)	238
S14T	M22	299	-	-
	M24	349	-	-

※ 表中の - は該当する基準に記載されていないことを示す

※ 鉄道標準の表中の括弧書き数値は標準締付け軸力を示す

(鉄道標準において標準締付け軸力は設計ボルト軸力の10%増しとされている)

2-2-5 検査

検査のタイミングは、いずれの基準、ボルト種類に関係なく、締付け後、速やかに実施するよう記載されている。

高力六角ボルトの締付けトルクの留意点や検査基準は、ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならないことや、各ボルト群の 10%のボルト本数を標準として、トルクレンチによって締付け検査

を行うこと（合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内）、不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査することが道示、鉄道標準では記載されている。なお、建築基準では詳細は記載されていない。ナット回転法の場合は、全数におけるマーキングによる外観検査を基本としており、所定の回転量が不足していれば増し締めを行い、過大なものについては新しいボルトセットに取替え、締め直しを行うよう記載されている。

トルシア形高力ボルトは、その締め付け機構の特性より、各基準にはピンテール切断の目視による確認について記載されている。ピンテール切断の目視確認は全数にて検査を行い、マーキングによる外観検査を行うことを義務付けている。

2-2-6 基準内容比較一覧および道路橋における各基準の改定年表

表 2-1-1 に示した基準の内容を一覧で整理したものを表 2-2-6, 7 に示す。また、道路橋については、基準の改定年表を表 2-2-8, 9 に示す。

一覧表は、施工基準として最も細部にわたって項目が整理されていた S59 ボルト標準の項目を基に、表 2-1-1 に記載される基準の内容がそれらの項目について記載されているかを確認し、一覧表として整理をおこなった。また、施工方法の違う高力六角ボルトのトルク法およびナット回転法とトルシア形高力ボルトで分けて一覧表の作成した。

道路橋に関する各基準の改定年表については、基準の改定に伴い変更になった項目や基準の変更に起因した高力ボルトに関する諸問題を、時系列に沿って整理した。

表2-2-6 高力六角ボルトにおける関連基準内容一覧表

大項目	中項目	小項目	S48道路橋示方書(道路橋) ※15章 施工 15.4.6 高力ボルトの項にて確認	S59年高力ボルトに関する要領・規格集(道路協会)	H24道路橋示方書(道路協会) ※18章 施工 18.5 高力ボルトの項にて確認	H27鋼道橋施工便覧(道路協会)	H29道路橋示方書(道路協会) ※付録資料4-3および4-5を含めて確認	H21.7軌道橋造物等設計標準・同解説【鋼・合成構造物】(鉄道総研)	2003高力ボルト接合設計施工ガイドブック(建築学会)	2016高力ボルト接合設計施工ガイドブック(建築学会)
ボルト・ナットおよび座金	セッティング	トルク係数値の平均値	-	0.110~0.160	-	0.110~0.160	0.110~0.160	-	0.110~0.150	0.110~0.150
		トルク係数値の変動係数	-	5%以下	-	5%以下	-	-	-	-
ボルト・ナットおよび座金	保管方法	20℃あたりの温度変化に対する1製造ロットのトルク係数の平均値の変動	-	出荷時トルク係数の平均値5%以下	-	出荷時トルク係数の平均値5%以下	出荷時トルク係数の平均値5%以下	-	-	-
		ボルトのセッティングは、工場出荷時の状態が現場施工時まで保たれているように運搬および包装、保管に注意しなければならない	工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする
接合面	接合面の処理	すべり係数値	0.4以上	0.4以上	接合面に塗装しない場合:0.40 接合面に無機シンクを塗装する場合:0.45	接合面に塗装しない場合:0.40 接合面に無機シンクを塗装する場合:0.45	接合面に塗装しない場合:0.40 接合面に無機シンクを塗装する場合:0.45	0.4以上	0.45	ただし、条件として、自然発生の赤さびに引ける場合、プラスト処理による場合、薬剤処理による場合のみすべり。
		接合面の留意事項	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する 無機シンクを塗装する場合の条件が明記	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する 無機シンクを塗装する場合の条件が明記	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する 無機シンクを塗装する場合の条件が明記	短期耐久型塗装の場合はプラスト等により黒皮、錆びなどは十分に除去する 中期・長期耐久型塗装および耐蝕性鋼材の場合は、厚膜型無機シンク・ゾルゲルを塗布するものとする	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する プラストは鋼表面を50μm以上厚く塗布し、鋼材に引ける赤さびを発生させない。シロップ状のプラストは鋼材に引ける赤さびを発生させない。シロップ状のプラストは鋼材に引ける赤さびを発生させない。シロップ状のプラストは鋼材に引ける赤さびを発生させない。	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する プラストは鋼表面を50μm以上厚く塗布し、鋼材に引ける赤さびを発生させない。シロップ状のプラストは鋼材に引ける赤さびを発生させない。シロップ状のプラストは鋼材に引ける赤さびを発生させない。シロップ状のプラストは鋼材に引ける赤さびを発生させない。
接合面	継手の肌すき	継手の肌すき	部材等と添接板は密着するようにする くい違いの出た部材を添接する場合は下表のとおりとする	部材等と添接板は密着するようにする	部材等と添接板は密着するようにする	部材等と添接板は密着するようにする	部材等と添接板は密着するようにする	部材等と添接板は密着するようにする	部材等と添接板は密着するようにする	部材等と添接板は密着するようにする
		測定器具の検定	トルク計の検定回数	-	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	-	-
接合面	締付け機の調整	締付け機の調整の方法	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	その日に締付ける予定の一施工ロットごとに無作為に抽出した5本以上の供試ボルトを調定して実施 (同一製造ロットのボルトを原則とするが、トルク係数の平均値の差が5%以下である場合は他製造ロットを同一としてよい)	
		締付け機の調整のタイミング	適当な時期に精度を確認する	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施 記録簿により出力トルクを記録	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施	締付け機の調整は毎日作業開始前に実施
締付けおよび検査	ボルトの締付け	ボルトの締付け方法	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする	ナットを回して行うことを原則とする
		予備締め	-	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する
締付けおよび検査	ボルトの締付け	予備締め(ナット回転法)	接触面の肌すきがなごろ程度にトルクレンチで締めた状態、あるいは組立用メスで力かっけしめた状態	- (本標準ではトルク法のみ記載されている)	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けトルク60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	
		設計ボルト軸力	所定の設計ボルト軸力が得られるように締付ける (六角トルク法の場合、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の10%増を標準)	記載なし	所定の設計ボルト軸力が得られるように締付ける (六角トルク法の場合、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の10%増を標準)	所定の設計ボルト軸力が得られるように締付ける (六角トルク法の場合、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の10%増を標準)	所定の設計ボルト軸力が得られるように締付ける (六角トルク法の場合、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の10%増を標準)	所定の設計ボルト軸力が得られるように締付ける (六角トルク法の場合、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の10%増を標準)	所定の設計ボルト軸力が得られるように締付ける (六角トルク法の場合、締付けボルト軸力は設計ボルト軸力の10%増を標準)	
締付けおよび検査	ボルトの締付け	締付けの順序	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	-	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	
		本締め(ナット回転法)	予備締めを行った後、以下の回転角を与える ①ボルト軸に対し、両面が直角または1面が直角で他面が1/20以下の傾斜の場合 ・ボルト長が径の8倍または120cm以下:1/2回転(180度) ・ボルト長が径の8倍または120cm以上:2/3回転(240度) ②両面とも1/20以下の傾斜の場合 ・ボルト長にかかわらず3/4回転(270度)	- (本標準ではトルク法のみ記載されている)	予備締めを行った後、以下の回転角を与える a)ボルト長が径の5倍以下の場合:1/3回転(120°)±30° b)ボルト長が径の5倍を超える場合:施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する	予備締めを行った後、以下の回転角を与える a)ボルト長が径の5倍以下の場合:1/3回転(120°)±30° b)ボルト長が径の5倍を超える場合:施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する	予備締めを行った後、以下の回転角を与える a)ボルト長が径の5倍以下の場合:1/3回転(120°)±30° b)ボルト長が径の5倍を超える場合:施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する	予備締めを行った後、以下の回転角を与える a)ボルト長が径の5倍以下の場合:1/3回転(120°)±30° b)ボルト長が径の5倍を超える場合:施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する	予備締めを行った後、以下の回転角を与える a)ボルト長が径の5倍以下の場合:1/3回転(120°)±30° b)ボルト長が径の5倍を超える場合:施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する	予備締めを行った後、以下の回転角を与える a)ボルト長が径の5倍以下の場合:1/3回転(120°)±30° b)ボルト長が径の5倍を超える場合:施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する
締付けおよび検査	ボルトの締付け	本締めの締付け記録	-	記録簿を用いてボルト全数の締付け記録を取る	-	記録簿を用いてボルト全数の締付け記録を取る	-	-	-	
		検査のタイミング	締付け後、早い時期に実施	締付け後、速やかに実施 (記録簿による場合はボルト全数で実施)	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	
検査	締付けトルクの留意点、検査基準	締付けトルクの留意点、検査基準	締め付けに際しては、締め付け完了が確認できるように印をつけるものとする トルク法による場合は、トルクレンチなどによる検査を行うものとする。この場合の締付け検査数は各ボルト群についてボルトの本数の10%を標準とし、その検査時期はボルト締め付け後すみやかに行うものとする 回転法による場合は、マーキングによる外観検査を行うものとする	ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならない 各ボルト群の10%のボルト本数を標準として、トルクレンチ締付け検査を行う(合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内) 不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査 所定締付けトルクを下回る場合、①所定トルクまで増し締め ②所定締付けトルクを10%超えたボルトは交換し、締直す	ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならない 各ボルト群の10%のボルト本数を標準として、トルクレンチ締付け検査を行う(合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内) 不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査 所定締付けトルクを下回る場合、①所定トルクまで増し締め ②所定締付けトルクを10%超えたボルトは交換し、締直す	ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならない 各ボルト群の10%のボルト本数を標準として、トルクレンチ締付け検査を行う(合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内) 不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査 所定締付けトルクを下回る場合、①所定トルクまで増し締め ②所定締付けトルクを10%超えたボルトは交換し、締直す	ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならない 各ボルト群の10%のボルト本数を標準として、トルクレンチ締付け検査を行う(合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内) 不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査 所定締付けトルクを下回る場合、①所定トルクまで増し締め ②所定締付けトルクを10%超えたボルトは交換し、締直す	ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならない 各ボルト群の10%のボルト本数を標準として、トルクレンチ締付け検査を行う(合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内) 不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査 所定締付けトルクを下回る場合、①所定トルクまで増し締め ②所定締付けトルクを10%超えたボルトは交換し、締直す	ボルト全数に締忘れ、共回り等の異常があつてはならない 各ボルト群の10%のボルト本数を標準として、トルクレンチ締付け検査を行う(合格基準はキャリブレーション時の設定トルク値±10%範囲内) 不合格の場合、倍数のボルトを抜き出し再検査し、再検査で不合格の場合、その群のボルト全数を検査 所定締付けトルクを下回る場合、①所定トルクまで増し締め ②所定締付けトルクを10%超えたボルトは交換し、締直す	
		締付けトルクの留意点、検査基準(ナット回転法)	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する	- (本標準ではトルク法のみ記載されている)	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する 回転角が不足するものは所定回転角まで増し締めを実施する 回転角が過大なものについては新しいボルトセットに取替へ締直す	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する 回転角が不足するものは所定回転角まで増し締めを実施する 回転角が過大なものについては新しいボルトセットに取替へ締直す	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する 回転角が不足するものは所定回転角まで増し締めを実施する 回転角が過大なものについては新しいボルトセットに取替へ締直す	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する 回転角が不足するものは所定回転角まで増し締めを実施する 回転角が過大なものについては新しいボルトセットに取替へ締直す	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する 回転角が不足するものは所定回転角まで増し締めを実施する 回転角が過大なものについては新しいボルトセットに取替へ締直す	全数についてマーキングによる外観検査を行い、締付け回転角が規定する範囲内であることを確認する 回転角が不足するものは所定回転角まで増し締めを実施する 回転角が過大なものについては新しいボルトセットに取替へ締直す

表2-2-7 トルシア形高力ボルトにおける関連基準内容一覧表

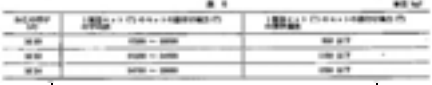



大項目	小項目	S48道路橋示方書(道路協会) ※15章 施工 15.4.6 高力ボルトの項にて確認	S59年高力ボルトに関する要領・規格集(道路協会)	H24道路橋示方書(道路協会) ※18章 施工 18.5 高力ボルトの項にて確認	H27鋼道路橋施工便覧(道路協会)	H29道路橋示方書(道路協会) ※付録資料2-4および2-5より確認 (S14Tの追加)	H21.7鉄道構造物等設計標準・解説【鋼・合成構造物】 (鉄道総研)	2003高力ボルト接合設計施工ガイドブック (建築学会)	2016高力ボルト接合設計施工ガイドブック (建築学会)
ボルト・ナット および座金	トルク係数値の平均値	-	下表の値を満足していることを確認する	-	-	下表の値を満足していることを確認する	-	0.110~0.170程度 下表の値を満足していることを確認する	0.110~0.170程度 下表の値を満足していることを確認する
	常温時のセットの締付軸力の平均値と標準偏差	-		-	-		-		
	出荷時検査	-	-	-	-	-	工場出荷時に各製造ロットごとに軸力試験の実施を原則とする ボルト軸力の温度依存性に関する試験については一納入単位につき一製造ロットを選んでの実施を標準とする	-	-
保管方法	保管方法	-	-	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 向上出荷後6ヶ月以上経過した場合、潤滑油の不足や劣化による品質及び施工性の低下、発錆がないことを確認するとともに、締付軸力、トルク係数値の再検査を行うことが望ましい	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 雨などの湿気を与えない 出荷から施工までの期間を短くする 保管期間は良好な状態を保った場合6ヶ月を目安ボルトの予備数は下表のとおり	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存(梱包箱の強度を踏まえて、積上げる箱の敷に留意して保管) 雨などの湿気を与えない	現場搬入時、工場での検査成績書と照合し、品質の保証されたものであることを確認する 工場包装のまま保管庫に保存(梱包箱の強度を踏まえて、積上げる箱の敷に留意して保管) 雨などの湿気を与えない
	寸べり係数値	-	0.4以上	接触面に塗装しない場合:0.40 接触面に無機ジンを塗装する場合:0.45	接触面に塗装しない場合:0.40 接触面に無機ジンを塗装する場合:0.45	接触面に塗装しない場合:0.40 接触面に無機ジンを塗装する場合:0.45	0.4以上	ただし、条件として、自然発生の赤さびによる場合、プラスチック処理による場合、薬剤処理による場合のいずれか	0.45 ただし、条件として、自然発生の赤さびによる場合、プラスチック処理による場合、薬剤処理による場合のいずれか
	接合面の処理	接合面の処理 接触面の留意事項	-	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する 無機ジンを塗装する場合の条件が明記	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する 無機ジンを塗装する場合の条件が明記	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する 無機ジンを塗装する場合の条件が明記	短期耐久型塗装系の場合はプラスチック等により黒皮、錆びなどは十分に除去する 中期・長期耐久型塗装系および耐蝕性鋼材の場合は、原型無機ジンクリッチペイントを塗布するものとする	汚れ、黒皮、錆びなどは十分に除去する プラスチックは表面粗さを50µm以上(RaはJIS B 0601における最大高さを示す)を前提として、ショットブラストまたはグリップブラストする(サンドブラストは所定サヘリ係数が得られないことによるため不可) 薬剤処理は使用する薬剤の留意事項についてよく知った上で用いなければならない
継手の肌すき	継手の肌すき	-	部材等と添板は密着するようにする	部材等と添板は密着するようにする	部材等と添板は密着するようにする	部材等と添板は密着するようにする	-	部材等と添板は密着するようにする 肌すきがある場合、ブローを挿入し肌すきを1mm以下にする(この場合、両面両側の挿入量と両側の状態に注意する)	部材等と添板は密着するようにする 肌すきがある場合、ブローを挿入し肌すきを1mm以下にする(この場合、両面両側の挿入量と両側の状態に注意する)
軸力計の検定	軸力計の検定回数	-	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	現場搬入時に1回 搬入後は3ヶ月に1回	-	-
	軸力計の軸力の範囲	-	基準となる計測機器が示す値の±3%以内	基準となる計測機器が示す値の±3%以内	基準となる計測機器が示す値の±3%以内	基準となる計測機器が示す値の±3%以内	基準となる計測機器が示す値の±3%以内	基準となる計測機器が示す値の±3%以内	基準となる計測機器が示す値の±3%以内
	現場予備試験の方法	-	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする	その日に使用する予定の1つの製造ロットから5組の供試セットを無作為に抽出して試験することを標準とする
現場予備試験	締付け軸力の平均値の範囲	-	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)	平均値が以下の範囲内に入るように調整しなければならない(10~30℃の場合)
	規定を満足しない場合の試験方法	-	上記(軸力平均値)を満足しない場合、同じ製造ロットにて倍数の試験を行う それでも満足しない場合、その製造ロットのセットを使用してはならない	-	-	-	上記(軸力平均値)を満足しない場合、同じ製造ロットにて倍数の試験を行う それでも満足しない場合、その製造ロットのセットを使用してはならない	上記(軸力平均値)を満足しない場合、同じ製造ロットにて倍数の試験を行う それでも満足しない場合、その製造ロットのセットを使用してはならない	上記(軸力平均値)を満足しない場合、同じ製造ロットにて倍数の試験を行う それでも満足しない場合、その製造ロットのセットを使用してはならない
	ボルトの締付け方法	-	専用締付け機で行う	専用締付け機で行う	専用締付け機で行う	専用締付け機で行う	専用締付け機で行う	専用締付け機で行う	専用締付け機で行う
締付けおよび検査	予備締め	-	締付けボルト軸力の60%程度	締付けボルト軸力の60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けボルト軸力の60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けボルト軸力の60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けボルト軸力の60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けボルト軸力の60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する	締付けボルト軸力の60%程度 予備締め後にはボルト、ナットおよび座金にマーキングを実施する
	締付けの順序	-	記載なし	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う(H2道示から下図順序で規定)	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う	ボルトの締付けは、連結板の中央ボルトから順次端部ボルトに向かって行い、2度締めを行う
	締付け条件	-	降雨時は実施不可	-	降雨時は実施不可	降雨時は実施不可	降雨時は実施不可	降雨時は防水シートなどで覆って養生する	降雨時は防水シートなどで覆って養生する
	検査のタイミング	-	記載なし	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施	締付け後、速やかに実施
検査	ピンテール切筋の目視確認	-	全数にて検査	全数にて検査 マーキングによる外観検査	全数にて検査 マーキングによる外観検査	全数にて検査 マーキングによる外観検査	全数にて検査 マーキングによる外観検査	全数にて検査 マーキングによる外観検査 (ピンテールの溝部が破断している、ボルトの余長がナットより出ている、センター線破断面が鋭利な形状となっていない、共回り方向に回転量が揃っている)	全数にて検査 マーキングによる外観検査

表 2-2-8 道路橋における各基準の改定年表（その 1：1964 年～1977 年）

西 暦	和 暦	基準の変遷	概 要
1964 年	昭和 39 年	JIS B 1186 制定	摩擦接合用高力六角ボルトの JIS 規格化 ボルトの等級：F7T, F9T, F11T, F13T ねじの呼び：M12, M16, M20, M22, M24 W1/2, W5/8, W3/8, W7/8, W1
1965 年	昭和 40 年		F13T ボルトで遅れ破壊が発生する
1966 年	昭和 41 年	日本道路協会： 鋼道路橋高力ボルト摩擦接合 設計施工指針 発行	ボルトの等級：F9T, F11T ねじの呼び：M20, M22, M24 W3/4, W7/8, W1 接合方法：摩擦接合 すべり係数：0.4 接合面処理：無塗装, 50s 相当の粗面 締付け方法：トルク法 標準ボルト軸力：設計ボルト軸力の 10%増 一次締め：80%程度 締付け検査：各ボルト群の 10%の本数
1967 年	昭和 42 年	JIS B 1186 改定	ボルトの等級：F8T, F10T, F11T ねじの呼び：M12, M16, M20, M22, M24, M27, M30
1971 年	昭和 46 年	日本道路協会： 支圧接合用打込み式高力ボルト の暫定規格 制定	高力ボルト支圧接合に用いる打込み式ボルトを規定 ボルト形状：打込み式高力六角ボルト 打込み式皿ボルト 打込み式丸頭ボルト ボルトの等級：B8T, B10T ねじの呼び：M20, M22, M24
1973 年	昭和 48 年	道路橋示方書 改定	ボルトの等級：F8T, F10T, F11T, B8T, B10T ねじの呼び：M20, M22, M24 接合方法：摩擦接合, 支圧接合 接合面処理：無塗装, 50s 相当の粗面（摩擦接合） 締付け方法：トルク法, 回転法（F8T, B8T）
1977 年	昭和 52 年	日本道路協会： トルク法による高力ボルト摩擦 接合継手施工管理要領 発行	トルク法に記録計を用いた締付け施工管理 ・ボルトセットの保管について規定 ・1 製造ロットの出荷時のトルク係数の平均値 および変動係数を規定 ・測定機器の検定について規定 ・締付け機械の調整手順を規定 ⇒現場予備試験 ・接合面に無機ジンクリッチペイントを塗装した 試験例についての記述 ・一次締めを 60%程度

表 2-2-9 道路橋における各基準の改定年表（その 2：1978 年～2017 年）

西 暦	和 暦	基準の変遷	概 要
1978 年	昭和 53 年		都市高速道路で F11T ボルトの遅れ破壊が確認される
1979 年	昭和 54 年	JIS B 1186 改定	ボルトの等級：F8T, F10T, (F11T) F11T はなるべく使用しないという意味で括弧書きとなる
1980 年	昭和 55 年	道路橋示方書 改定	ボルトの等級：F8T, F10T, B8T, B10T 締付け検査：自動記録計で原則全数検査, またはトルクレンチで各ボルト群の 10%の本数
1981 年	昭和 56 年		F11T ボルトの製造中止
1983 年	昭和 58 年	日本道路協会： 摩擦接合用トルシア形高力ボルト規格 制定 トルシア形高力ボルト施工管理要領 発行	ボルトの等級：S10T ねじの呼び：M20, M22, M24 現場予備試験：その日に使用する全製造ロットのうち, 1 つの製造ロットから 5 組の供試ボルトを抽出 一次締め：60%程度 締付け検査：ピンテールの破断を目視で確認
1990 年	平成 2 年	道路橋示方書 改定	ボルト等級：F8T, F10T, S10T, B8T, B10T ねじの呼び：M20, M22, M24 接合面処理：塗装しない場合は黒皮を除去して粗面 塗装する場合は無機ジンクリッチペイントを使用 トルシア形高力ボルトについて常温時以外 (0℃～10°, 30℃～60℃) の締付けボルト軸力の平均値を規定
1994 年	平成 6 年	道路橋示方書 改定	
1996 年	平成 8 年	道路橋示方書 改定	締付け方法：トルク法, 回転法, 耐力点法 回転法はボルト長が径の 5 倍以下に改定 締付け検査：トルク法 (HTB) はトルクレンチで各ボルト群の 10%の本数 耐力点法は正常に締付けられたボルト 5 本の回転角の平均値に対して±30°を確認
2002 年	平成 14 年	道路橋示方書 改定	接合方法：摩擦接合, 支圧接合, 引張接合 (F10T, S10T) 締付け方法：引張接合の締付けはトルク法による
2005 年	平成 17 年	鋼道路橋塗装・防食便覧	トルシア形高力ボルトのピンテール処理
2012 年	平成 24 年	道路橋示方書 改定	接合面に無機ジンクリッチペイントを塗装する場合のすべり係数は 0.45
2017 年	平成 29 年	道路橋示方書 改定	ボルト等級：F8T, F10T, S10T, S14T, B8T, B10T ※ S14T の使用は記載される条件を満足する場合のみ

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1973.9
- 2) 日本道路協会：高力ボルトに関する要領・規格集，1984.9
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋施工便覧，2015.4
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017.11
- 6) 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
- 7) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工ガイドブック，2003.12
- 8) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工ガイドブック，2016.5

3. 高力ボルトの統計調査

3-1 調査概要および規定値について

調査は、最近のボルトの実態を把握することを目的として、鉄道建設・運輸施設整備支援機構および当部会所属の橋梁製作会社7社の過去10年程の橋梁工事で使用したトルシア形高力ボルト S10T, S10TW (以下両者をさす場合は, S10T(W)), 高力六角ボルト F10T, F10TW (以下両者をさす場合は, F10T(W)), 溶融亜鉛めっき高力ボルト F8T (以下, F8T) を対象に、検査で用いるボルト製品検査証明書(図3-1-1)に記載されている導入軸力またはトルク係数値(以下, 検査証明書データ), および検査時の立会いで行われる軸力確認試験またはトルク係数確認試験の試験結果(以下, 立会い試験データ)を調べた。また、架設現場では、施工前に日々1ケース(5本)の導入軸力またはトルク係数値を確認しており、これらの結果(以下, 現場試験データ)を集計し、導入軸力またはトルク係数値の現状を明確にした。さらに、機械的性質においては、ボルト製品検査証明書に記載されている耐力(0.2%耐力), 引張強さ(引張強度), 伸び, 絞り, 引張荷重および硬さを調査した。なお, F8Tについてはめっき付着量についても調査した。これらの規定値について表3-1-1に示す。耐力, 引張強さ, 伸びおよび絞りの4項目は, JIS Z 2241(金属材料引張試験片)の4号試験片(標点距離50mm, 径14mm)を用いて, 2体の試験体の平均値で求められている。耐力とは0.2%耐力であり, 引張強さは引張最大荷重を有効断面積で除した値である。伸びは, 破断時の標点間の伸び量を標点距離で除して求め, 絞りは破断面の最小断面積を公称断面積で除して求めている。これに対し, 引張荷重および硬さはボルト製品で試験を行い, 3本のボルトの平均値で求められている。引張荷重は製品そのもののボルト(頭部)の座面にくさび(くさび・テーパ)を入れて引張荷重を載荷し, 破断時の荷重値を示している。硬さは, ロックウェル硬さで示されており, ボルト以外にもナットおよび座金の各製品でも硬さ測定が行われている。なお, これら試験方法等の詳細については, 文献1)~3)を参照にされたい。

神鋼ハイテンションボルト (S10T, F10T, F8T)		製品検査証明書										発行日 平成31年3月28日 STY001 262-614-305							
セット 番号	等級 F10T	数量	ボルト						ナット		座金		セット		外観 形状・寸法 ねじ精度	付着量 g/m ²			
			4号試験片				製品		製品		トルク 係数値 平均値	トルク N-m							
			耐力 N/mm ²	引張 強さ N/mm ²	伸び %	絞り %	引張 荷重 kN	硬さ HRC	硬さ HRC	保証 荷重 kN			硬さ HRC						
			900 以上	1000 ~ 1200	14 以上	40 以上	303 以上	27 ~ 38 HRC	20 ~ 35 HRC	303	35 ~ 45	0.110 ~ 0.150	-						
C40130FW	22 X 70	40	1018	1084	18	70	332	33	27	合格	40	0.132	**	合格	**	**	**	**	
C40200FW	22 X 85	40	999	1066	18	68	328	33	26	合格	40	0.131	**	合格	**	**	**	**	
C39370GW	22 X 100	40	1007	1071	18	69	329	33	25	合格	38	0.129	**	合格	**	**	**	**	
C33900GW	22 X 105	40	1008	1066	18	67	324	32	27	合格	40	0.127	**	合格	**	**	**	**	
合計		160																	

注)検査数: ボルト4号試験片(C), ボルト製品(C), ナット製品(C), ナット保証重量(D), 座金(C), セット(C), めっき付着量(C)
上記の製品は, 検査の結果合格したことを証明します。

神鋼ボルト株式会社
品質保証部
千葉県市川市二俣新町17番地

図3-1-1 検査証明書の一例

表 3-1-1 機械的性質の規定値

		JIS Z 2241				製品			溶融亜鉛めっき付着量 (g/m^2 , HDZ55)				
		耐力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)			ボルト	ナット	座金	
							ボルト	ナット	座金				
S10T(W)	M22	≥ 900	1000~1200	≥ 14	≥ 40	≥ 303	27~38	16~35	35~45	—	—	—	
F10T(W)	M22							20~35		—	—	—	
F8T	M16	≥ 640	800~1000	≥ 16	≥ 45	≥ 126	18~31	16~35	25~45	≥ 550			
	M20												≥ 196
	M22												≥ 243
	M24												≥ 283

調査数量を表 3-1-2 に示す。調査は M16 (F8T のみ), M20, M22, M24 の高力ボルトに対して行った。30 データ以上集まった S10T(W)および F10T(W)は M22 の検査証明書データ, 立会い試験データおよび現場試験データについて, F8T は M16~M24 の検査証明書データのみについて調査結果をまとめた。S10T(W)のデータ数量は合わせて 2982 であるが, 1 データにつき 5 本のボルトで試験が実施されており, 14910 本のボルトから得られたデータである。F10T(W)のデータ数量は合わせて 1350 であるが, 1 データにつき 3 本 (現場試験のみ 5 本) のボルトで試験が実施されており, 4818 本のボルトから得られた結果である。F8T の調査は, 建設工事で使用したボルトに加えて, 実験で使用したボルトを調査した。データ数量は合わせて 346 であるが, 1 データにつき 3 本のボルトで試験が実施されており, 1038 本のボルトから得られたデータである。

表 3-1-2 調査数量

データ名		S10T	S10TW	F10T	F10TW	F8T				合計
		M22	M22	M22	M22	M16	M20	M22	M24	
検査証明書データ	実工事	1304	270	612 ^{※1}	239 ^{※1}	69 ^{※1}	30 ^{※1}	167 ^{※1}	48 ^{※1}	2771
	実験	—	—	—	—	3 ^{※1}	3 ^{※1}	11 ^{※1}	15 ^{※1}	
立会い試験データ		333	43	38 ^{※1}	77 ^{※1}	—	—	—	—	491
現場試験データ		773	259	168	216	—	—	—	—	1416
合計		2410	572	818	532	72	33	178	63	4678

(注) 1データにつき5本のボルトで実施。※1のデータのみ3本のボルトで実施しており, 合計21458本のボルトから得られたデータである。

3-1-1 S10T(W)

S10T(W)は, JIS 規格化されておらず, 各協会等の規格が適用されている。代表的な規格として, 道路橋では日本道路協会¹⁾, 鉄道橋では鉄道総合技術研究所²⁾の規格がある。また, 建築鉄骨では日本鋼構造協会³⁾の規格を適用している。表 3-1-3 にボルト軸力管理に関する規定値を示す。軸力は, 1 製造ロット 5 本のボルト軸力の平均値とその標準偏差で規定されているが, 常温時以外 (非常温時: 以降, 9°C以下を低温時, 31°C以上を高温時として整理した) では軸力のみ管理である。なお, 規格では標準偏差で示されているが, 実工事では変動係数で示されているケースも多く見られ, これらの規格の標準偏差を変動係数に換算すると, 道路橋および鉄道橋では 5.0%, 建築鉄骨では 6.9%となる。

表 3-1-3 トルシア形ボルトの軸力の規定値 (単位：kN)

規定	常温時 (10℃～30℃)		常温時以外(*)
	ボルト軸力の 平均値	標準偏差	ボルト軸力の 平均値
道路橋の規定 ¹⁾	212～249	11.5以下	207～261
鉄道橋の規定 ²⁾			
建築鉄骨の規定 ³⁾	212～256	16.0以下	205～268

(*)：適用温度は、0～60℃ (鉄道橋のみ0～50℃)

3-1-2 F10T(W)

F10T(W)は、JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」⁴⁾で規格化されており、表 3-1-4 にトルク係数値に関する規定値を示す。道路橋示方書では、トルク法による施工管理を合理的に行うためとしてばらつきが規定されている。S10T(W)とは異なり、トルク係数値は 1 製造ロットの平均値と標準偏差で規定されている。また、温度に関係なく一定であり、トルク係数値の範囲と標準偏差の上限値で示されている。架設現場では、式 (3-1-1) を用いて、日々トルク係数値の確認を行っている。その手順は、予備試験で使用するボルトの製品検査証明書に記載されているトルク係数値と導入軸力 (締付け軸力=設計ボルト軸力の 10%増) から算出したトルクでボルトを締め付ける。そして、軸力計を用いて導入された軸力とトルクからトルク係数値を算定する。これを 5 本のボルトで行い、その平均値からトルク係数値を算定した上でその日のトルクを設定し、そのトルクでボルトの締付け作業を行っている。

表 3-1-4 高力六角ボルトのトルク係数値の規定値

規定	トルク係数値	標準偏差	変動係数
JIS B 1186 ⁴⁾ (鉄道橋・建築鉄骨)	0.110～0.150	0.010以下	—
道路橋示方書 ⁵⁾	0.110～0.160	—	5%以下

*1：セットの種類A

$$k = \frac{T}{d \cdot N} \quad (3-1-1)$$

k ：トルク係数値， T ：トルク(N・m)，
 d ：ボルト径(mm)， N ：ボルト軸力(N)

3-1-3 F8T

めっきボルトは、JIS 規格化されておらず、JIS B 1186 の規定値を準用している。そのため、めっきボルトのトルク係数値に関する規定値は F10T(W)と同じで表 3-1-4 のとおりである。

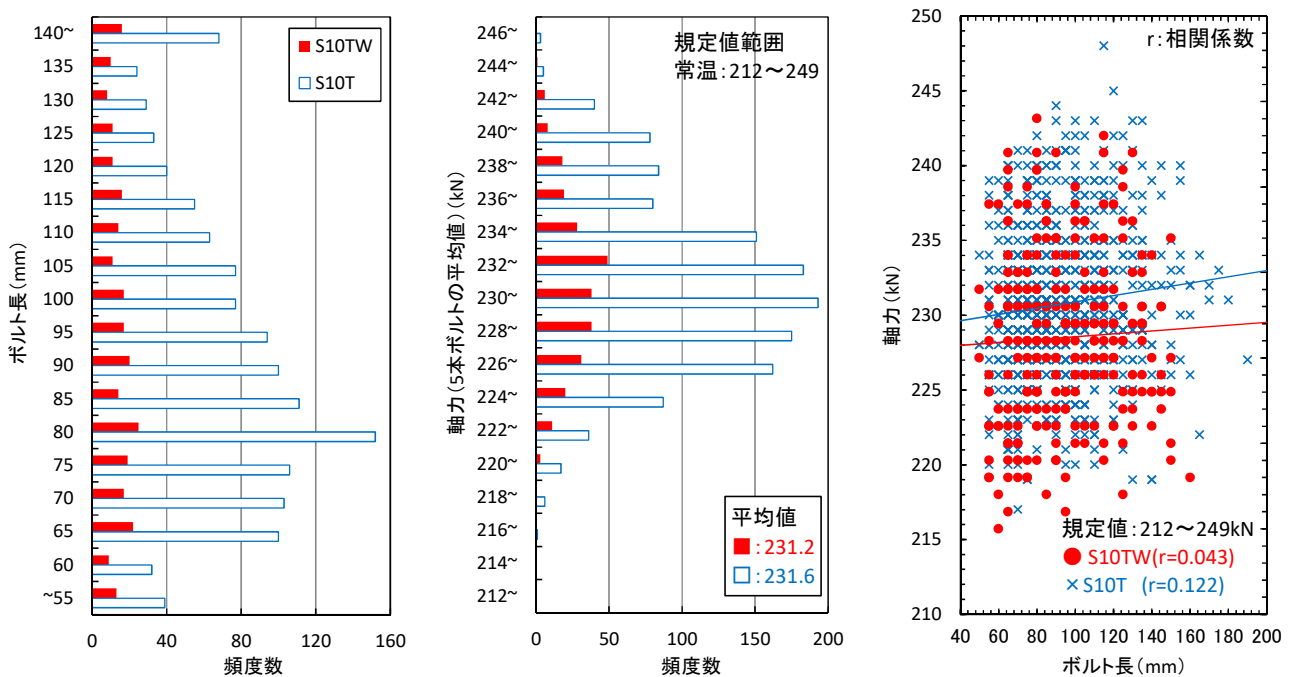
3-2 ボルト軸力の調査結果

3-2-1 検査証明書

図 3-2-1(a), (b)には、検査証明書で調査したボルトのボルト長およびボルト軸力を頻度分布で示し、図 3-2-1(c)は、ボルト長と軸力の関係を示した。また、表 3-2-1にはこれらの調査結果の集計値を示した。ここで示す標準偏差は、表 3-1-3 で示した標準偏差（5 本での統計処理結果）と区別するため、標準偏差 A と称し、調査したボルト軸力の統計処理結果を示した。なお、集計できた検査証明書は 3 社のボルト製造会社のものである。

図 3-2-1(a)に示すように、調査したボルト長は、S10T(W)で 80mm をピークにその前後のものが多く、最大で S10T が 190mm, S10TW が 160mm, 最小で S10T(W)共に 50mm であった。図 3-2-1(b)に示すボルト軸力も、S10T(W)で 226~235kN の頻度が高く、平均値は S10T で 231.2kN, S10TW で 231.6kN とほぼ目標通り(230kN)の導入軸力であった。表 3-1-1 で示す規定値(212~249kN)との関係を述べると、最小値は S10T で 217kN と規定の下限値より 5kN 大きく、S10TW で 220kN と 8kN 大きい値であった。最大値は S10T で 248kN と規定の上限値より 1kN 小さく、S10TW で 244kN と 5kN 小さい値であった。また、各基準^{5)~7)}で示されている締付け軸力 226kN（設計ボルト軸力の 10%増し）に対し、S10T で 87%, S10TW で 89%のデータがこれを上回った。

ボルト長の影響を確認するため、図 3-2-1(c)には、ボルト長と軸力の関係を示す。以下、相関関係を表す図では、プロットが重なっている場合もあり、ここで示す 1 つの×データは、必ずしも 1 プロットが 1 調査データとは限らないのでご留意いただきたい。図に示すように、回帰直線は右肩上がりであるが、相関係数は S10T で 0.122, S10TW で 0.043 と低く、ボルト長と軸力の明確な相関は認められなかった。



(a) ボルト長の頻度分布

(b) 軸力の頻度分布

(c) ボルト長と軸力の関係

図 3-2-1 検査証明書データの集計結果

表 3-2-1 検査証明書データの集計結果

種別	項目		
	S10T	ボルト軸力 (kN)	最大値
最小値			217
平均値			231.6
標準偏差A (kN)		5.26	
S10TW	ボルト軸力 (kN)	最大値	244
		最小値	220
		平均値	231.2
	標準偏差A (kN)		4.92

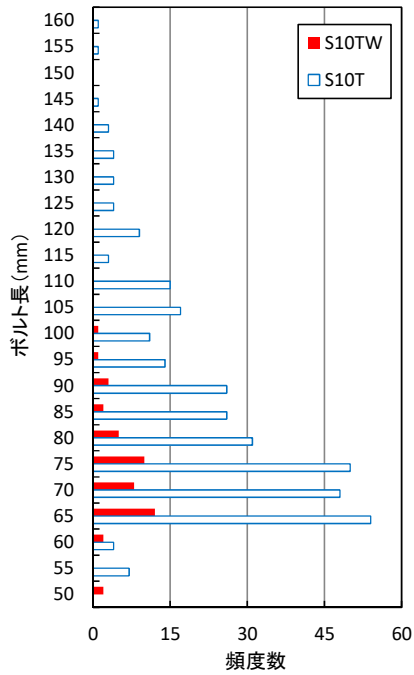
3-2-2 立会い試験

図 3-2-2 には、立会い試験の試験結果を頻度分布等で示し、表 3-2-2 はこれらの試験結果の集計値を示した。

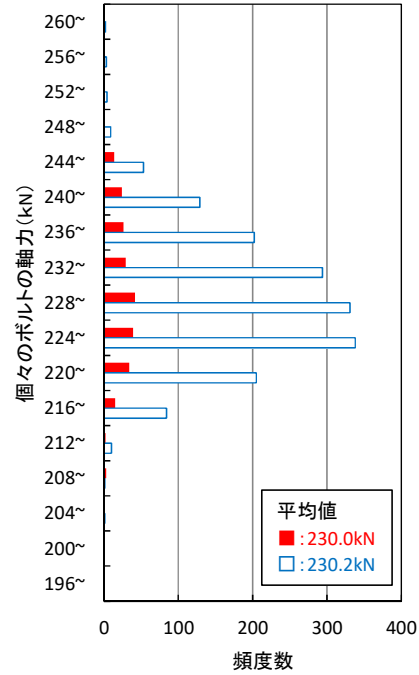
立会い試験時でのボルト長 (図 3-2-2 (a)) は、図 3-2-1 (a) と比較すると短いもので行われているケースが多いことがわかる。図 3-2-2 (b) の個々のボルト軸力は、S10T(W) で 220~235kN の頻度が高く、その平均は S10T で 230.2kN、S10TW で 230.0kN と目標通りの軸力が導入されていたが、検査証明書よりそれぞれ 1.4kN、1.2kN 小さい結果であった。試験結果の判定に用いる 5 本の平均値 (図 3-2-2 (c)) においても、当然図 3-2-2 (b) と同じ値であった。検査証明書と大きな違いがない理由として、ボルト製造会社の試験場における室内温度は一定下に管理されていること (JIS 規定は 23±5°C で立会い試験データの平均値は S10T で 21.8°C、S10TW で 20.9°C)、また、製造からの期間が短いことなどが考えられる。ただし、S10TW の標準偏差は 24% 程度大きくっており、これは立会い試験データ数が極端に少ないことが原因と考えられる。締付け軸力 226kN に対しては S10T で 83%、S10TW で 74% の試験データがこれを上回り、測定結果の最小値は S10T(W) で 219kN と、規定の下限値に対して 7kN 大きくなる結果であった。最大値は S10T で 245kN と規定の上限値より 4kN、S10TW で 244kN と 5kN 小さい値であった。図 3-2-2 (d) には、ボルト長と軸力の関係を示すが、検査証明書の結果と同様、回帰直線は右肩上がりであるが、その相関係数は S10T で 0.072、S10TW で 0.206 と低く、ここでもボルト長と軸力の明確な相関は認められなかった。

図 3-2-3 (a) は 1 データ 5 本の最大軸力と最小軸力の軸力差を示したものであるが、試験温度が安定していても最大で 50kN の差があり、平均では S10T(W) で約 15kN の違いが生じていた。次に、図 3-2-3 (b) は検査証明書で示されている軸力と試験時での軸力差を示したものであるが、そのほとんどが 0 をピークとした ±3kN の範囲内に S10T で 61%、S10TW で 50% のデータがあり、平均値は S10T で -0.5kN、S10TW で -2.1kN と小さく、検査証明書で示されている軸力は信頼性の高い値であると判断できる。ただし、約 22kN の違いが生じる場合も見られた。

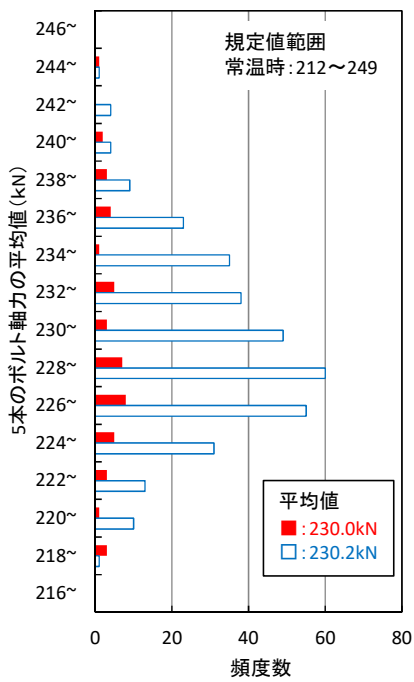
図 3-2-4 (a) は 1 データ 5 本の標準偏差の頻度分布を示すが、最大値は 17.8kN と規定の上限値 (11.5kN) を超える場合もあり、平均は S10T で 5.3kN、S10TW で 5.5kN と規定の上限値の 1/2 弱であった。図 3-2-4 (b) は変動係数の頻度分布を示すが、規定の上限値 (5.0%) に対し最大値は 7.6%、平均値は S10T で 2.3%、S10TW で 2.4% であった。なお、高力ボルト製造工場での品質管理は X-R 管理図^{1)~3)}で行っているため、ロット単体での標準偏差は参考値である。



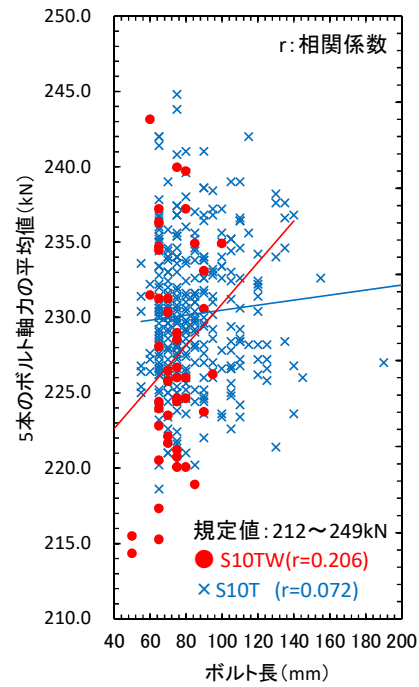
(a) ボルト長の頻度分布



(b) 個々のボルト軸力の頻度分布



(c) 5本のボルト軸力平均値の頻度分布

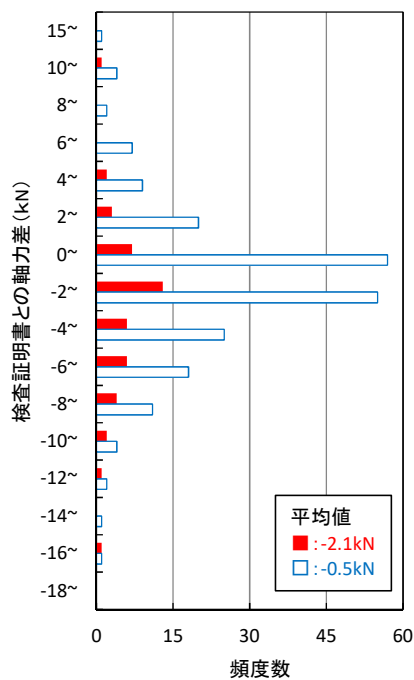
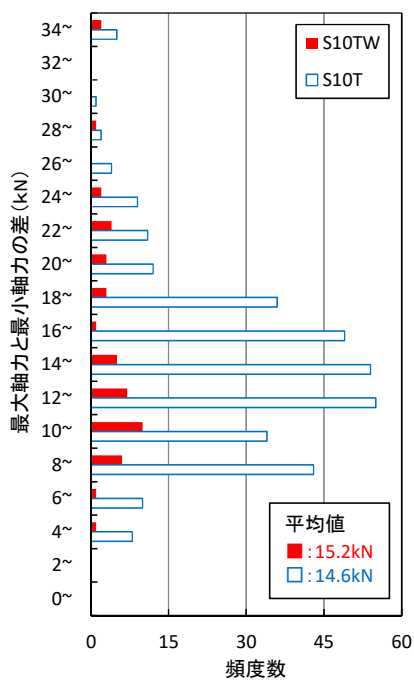


(d) 軸力とボルト長の関係

図 3-2-2 立会い試験データの集計結果 (各頻度分布, ボルト長との関係) I

表 3-2-2 立会い試験データの集計結果

項目	種別	最小値	最大値	平均値	標準偏差A
個々のボルト軸力 (kN)	S10T	206	260	230.2	7.33
	S10TW	202	251	230.0	8.60
5本のボルト軸力平均値 (kN)	S10T	219	245	230.2	4.68
	S10TW	219	244	230.0	6.09
最大と最小の軸力差 (kN)	S10T	4	50	14.6	5.74
	S10TW	5	38	15.2	7.22
検査証明書との軸力差 (kN)	S10T	-14.6	21.8	-0.5	4.40
	S10TW	-14.2	13.8	-2.1	4.66
標準偏差 (kN)	S10T	1.36	17.79	5.26	—
	S10TW	1.94	14.03	5.54	—
変動係数 (%)	S10T	0.60	7.55	2.29	—
	S10TW	0.85	6.26	2.41	—



(a) 最大と最小の軸力差

(b) 検査証明書との軸力差

図 3-2-3 立会い試験データの集計結果 (各頻度分布) II

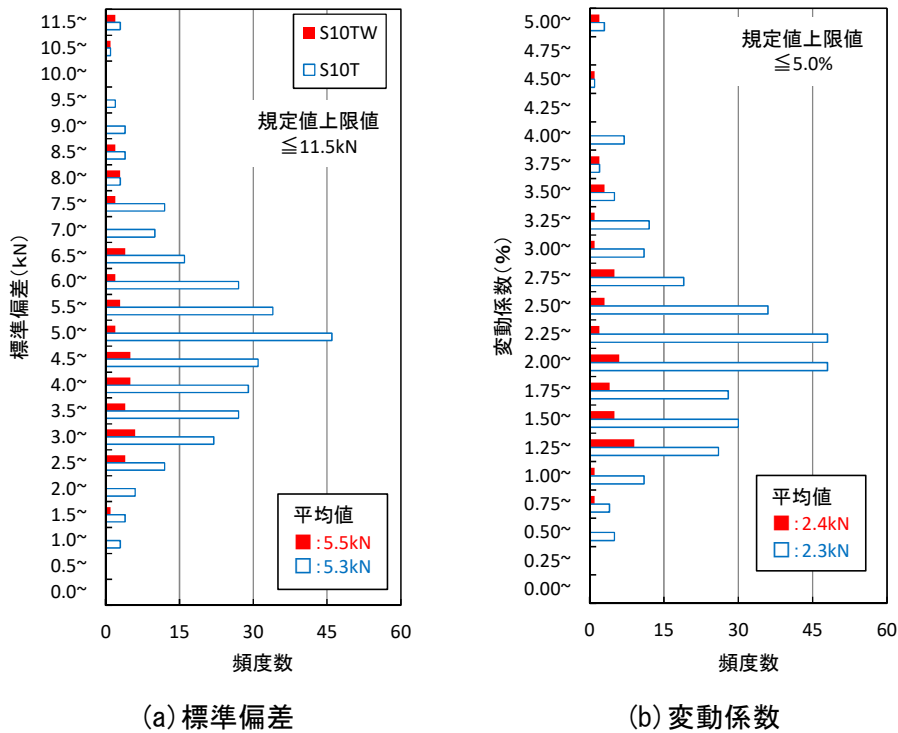


図 3-2-4 立会い試験データの集計結果 (各頻度分布) III

3-2-3 現場試験

(1) 現場試験の頻度分布と立会い試験との比較

図 3-2-5~10 には、現場試験の試験結果を頻度分布で示し、表 3-2-3 はこれらの調査結果の集計値を示した。現場試験のデータ総数量については、表 3-1-2 で示したように S10T で 773 データであるが、その内訳は、常温時 516、低温時 195、高温時 62 データである。S10TW のデータ総数量は 259 データであるが、その内訳は、常温時で 198、低温時で 39、高温時で 22 データであり、常温時のデータと比較して常温時以外のデータが少ないことに留意が必要である。なお、S10T(W)の現場試験では、基本的に長さ 80mm のボルトを用い確認試験を行っているので、ボルト長の影響はないデータである。

図 3-2-5 は個々のボルト軸力の頻度分布を示す。S10T については、常温時は 224~231kN、低温時では 216~219kN の頻度が高いなだらかな凸型で、高温時はピークがなく全体的に広がっている凸型の分布であった。S10TW については、常温時は 224kN、232kN にピークがあるばらつきのある分布であった。低温時と高温時は目立ったピークがなく全体的に広がっている凸型の分布であった。常温時、低温時および高温時の軸力の平均値は、それぞれ S10T で 228.4kN、220.3kN および 235.9kN、S10TW で 229.9kN、216.4kN および 238.6kN であり、どちらも高温時>常温時>低温時となった。特に低温時と高温時では S10T で 15.6kN、S10TW で 22.2kN の違いが生じていた。また、標準偏差 A は、S10T で高温時>常温時>低温時となっているが、常温時と低温時では大きな違いはなく、若干であるが常温時が大きかった。一方で、S10TW は常温時>低温時>高温時であった。この温度との関係については、(2) で詳細に述べる。次に、立会い試験データ (図 3-2-2 (b)) と比較すると、S10T の常温時であれば 1.8kN の違いが生じているだけであり、また、標準偏差 A の違いも小さく、架設現場においても 3-2-2 で示した室内試験である立会い試験との大きな違いは見られなかった。S10TW については、平均値で 0.1kN の違いを生じているだけであるが、頻度分布は、立会い試験が凸型であるのに対し、現場試験

ではばらつきが生じていた。

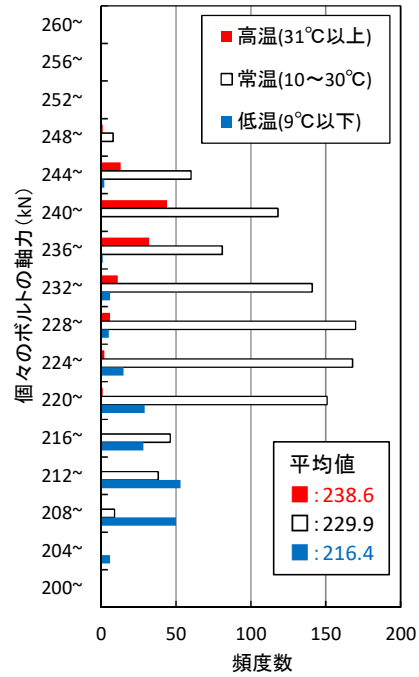
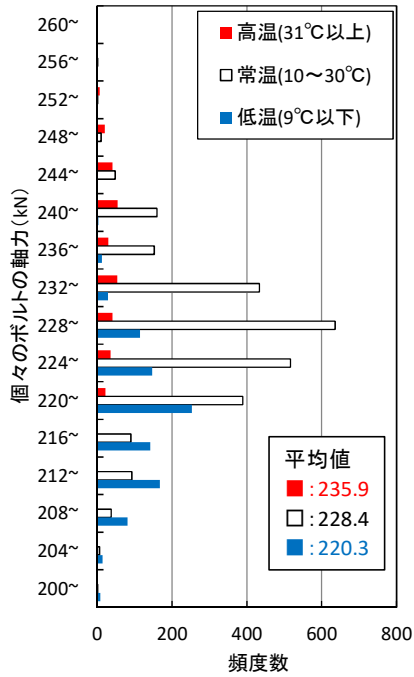
図 3-2-6 は 5 本の平均値の頻度分布を示す。S10T の常温時および S10T(W) の高温時において、規定の上限値となるデータは見られなかったが、S10TW の常温時において規定の上限値および下限値付近のデータが見られ、ピークも 222kN, 234kN, 238kN とばらつきのある分布であった。最小値は S10T の常温時、S10T(W) の低温時および S10TW の高温時において、規定の下限値を下回るものはないもののその付近のデータがある。なお、S10T(W) において規定の下限値は常温時と非常温時で 5kN の差があるが、S10T の現場試験データでの常温時と低温時の最小値の差は 5kN であり、規定値の差と一致した。締付け軸力 226kN に対しては、常温時で S10T が 65%, S10TW が 69%, 高温時では S10T が 89%, S10TW が 100% これを上回るが、低温時には S10T で 17%, S10TW で 5% の試験データのみ締付け軸力を上回るに止まった。S10T の常温時の頻度分布はなだらかな凸型であり、立会い試験データ (図 3-2-2(c)) とは異なり、分布幅が広く標準偏差 A も立会い試験より大きかった。S10TW も個々のボルトの軸力と同様にばらつきのある分布であり、立会い試験データ (図 3-2-2(c)) のようななだらかな凸型ではなかった。

図 3-2-7 は、5 本中の最大と最小の軸力差の頻度分布を示す。S10T は、平均値では常温時で 11.0kN、低温時で 10.0kN、高温時で 11.3kN の軸力差が生じ、有意な差とは言えないが高温時 > 常温時 > 低温時となった。また、常温時において、立会い試験データ (図 3-2-3(a)) より軸力差は 3.6kN 小さかった。S10TW は、平均値では常温時で 12.9kN、低温時で 10.0kN、高温時で 8.5kN の軸力差が生じ、常温時 > 低温時 > 高温時となった。また、常温時において、立会い試験データ (図 3-2-3(a)) より軸力差は 2.3kN 小さかった。

図 3-2-8 は検査証明書との軸力差の頻度分布を示す。S10T(W) の常温時には -4 ~ -6kN をピークとするなだらかな凸型の分布であり、S10T の高温時にはデータにばらつきが生じていた。軸力差の平均値は、常温時で S10T が -3.7kN, S10TW が -4.5kN, 低温時で S10T が -7.8kN, S10TW が -15.1kN, 高温時で S10T が 0.4kN, S10TW が 2.2kN と温度が低くなれば検査証明書との差が大きくなる結果となった。立会い試験データ (図 3-2-3(b)) と比較すると、常温時には分布が大きく異なっており、ばらつきが大きく (標準偏差 A も大きい)、平均値で S10T は 3.2kN, S10TW は 2.4kN の違いが生じていた。

図 3-2-9 は標準偏差の頻度分布を示すが、S10T(W) で 2.0kN ~、3.5kN ~ および 6.5kN 以上にピークがあるばらつきのある分布であった。S10T の平均値は常温時で 4.0kN, 低温時で 3.7kN, 高温時で 4.1kN と規定の上限値 (11.5kN) の 1/2 以下で、低温時の方が若干小さかった。一方 S10TW の平均値は常温時で 4.7kN, 低温時で 3.5kN, 高温時で 3.1kN と常温時の方が小さかった。最大値は S10TW の常温時および低温時に規定の上限値を上回った。

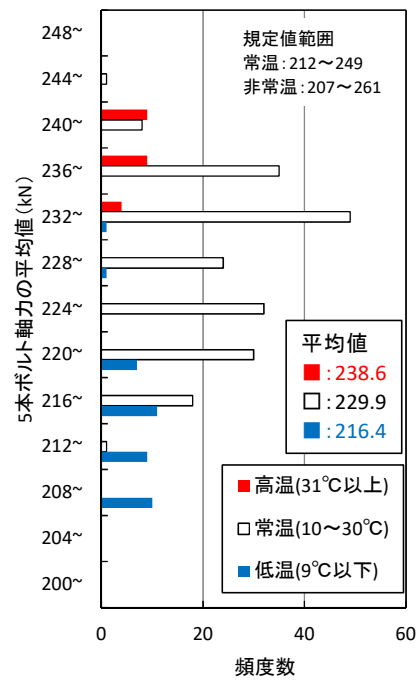
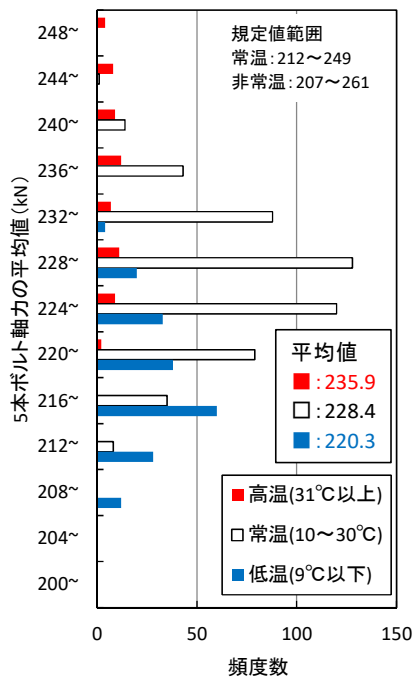
図 3-2-10 は変動係数の頻度分布を示すが、S10T(W) の常温時および S10T の低温時に 1.50% ~ にピークがあるが、凸型の分布でもなく、標準偏差と同様にばらつきが生じていた。S10T の平均値は常温時および低温時に 1.7%, 高温時に 1.8% であり、最大値はそれぞれ、5.3%, 4.3%, 3.9% であった。S10TW の平均値は常温時に 2.0%, 低温時に 1.6%, 高温時に 1.3% であり、最大値はそれぞれ、5.2%, 4.4%, 2.6% であった。



(a) S10T

(b) S10TW

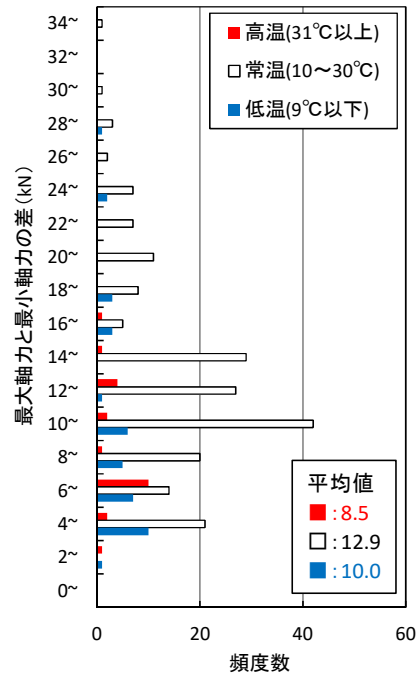
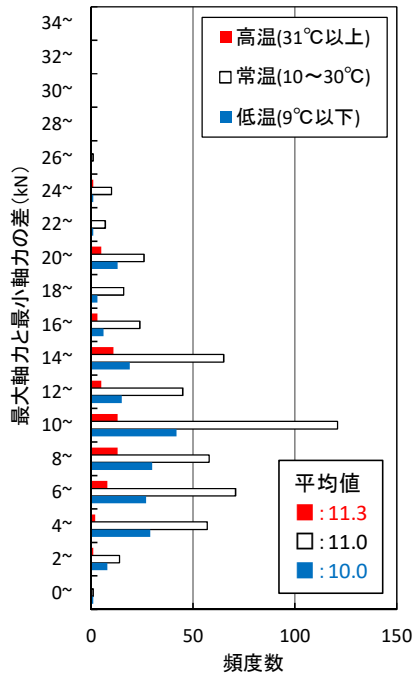
図 3-2-5 現場試験データの集計結果 I (個々のボルト軸力)



(a) S10T

(b) S10TW

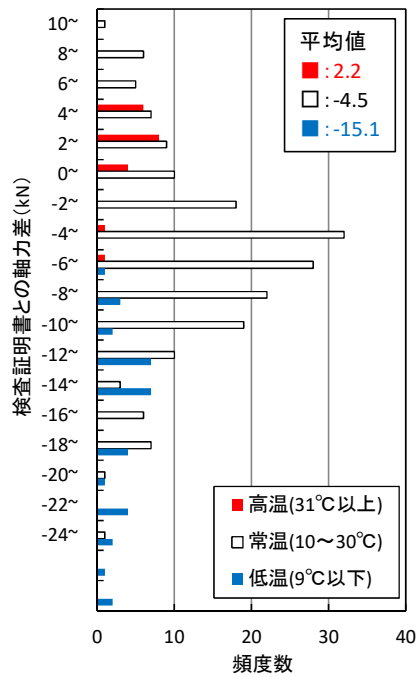
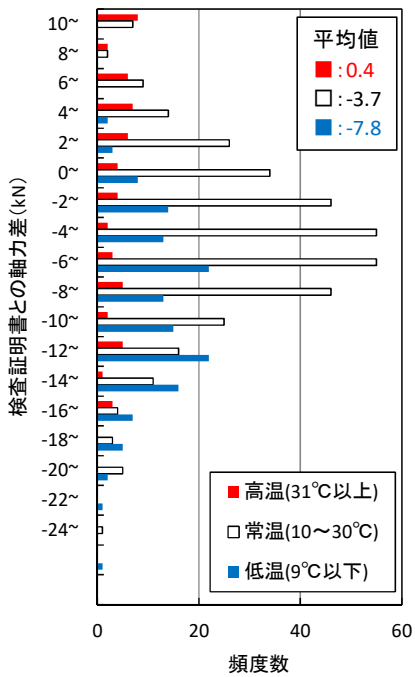
図 3-2-6 現場試験データの集計結果 II (5本のボルト軸力平均値)



(a) S10T

(b) S10TW

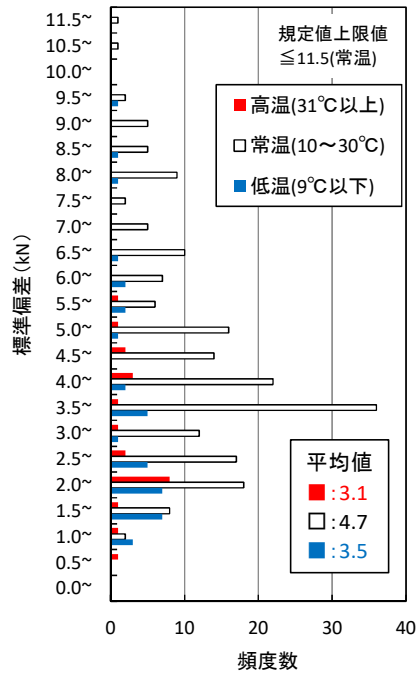
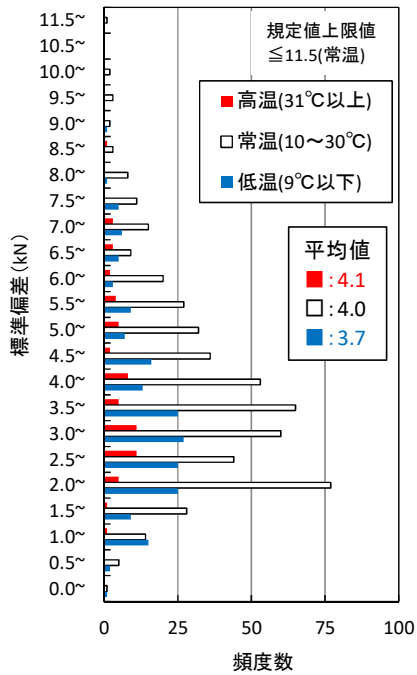
図 3-2-7 現場試験データの集計結果Ⅲ（最大と最小の軸力差）



(a) S10T

(b) S10TW

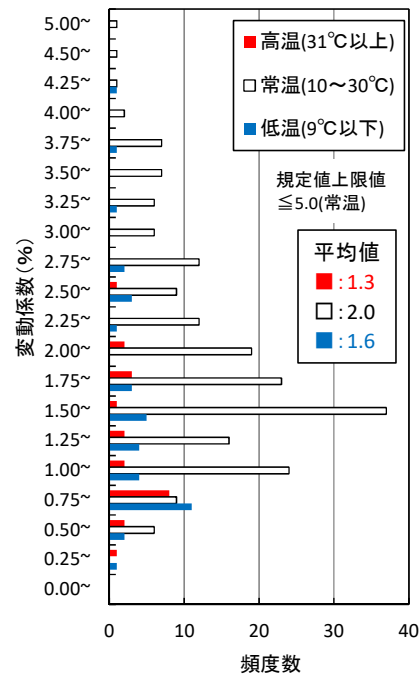
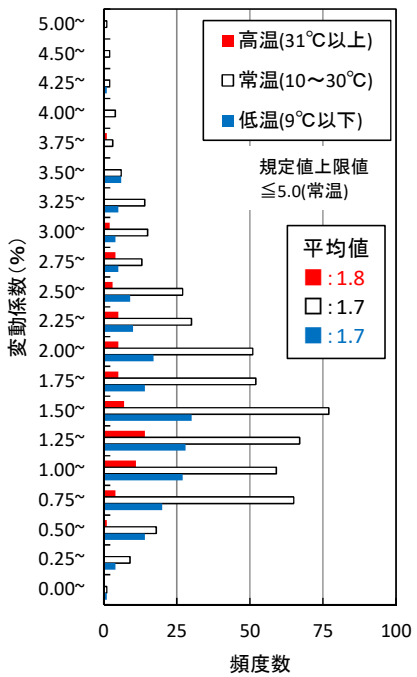
図 3-2-8 現場試験データの集計結果Ⅳ（検査証明書との軸力差）



(a) S10T

(b) S10TW

図 3-2-9 現場試験データの集計結果 V (標準偏差)



(a) S10T

(b) S10TW

図 3-2-10 現場試験データの集計結果 VI (変動係数)

表 3-2-3 現場試験データの集計結果

項目		S10T				S10TW			
		最小値	最大値	平均値	標準偏差A	最小値	最大値	平均値	標準偏差A
個々のボルト軸力 (kN)	常温時	200	258	228.4	7.49	208	248	229.9	8.61
	低温時	200	246	220.3	6.99	204	245	216.4	7.19
	高温時	217	260	235.9	8.62	223	248	238.6	4.54
	全データ	200	260	226.9	8.64	204	248	228.6	9.92
5本のボルト軸力平均値 (kN)	常温時	213	244	228.4	6.04	216	245	229.9	6.90
	低温時	208	235	220.3	5.69	209	234	216.4	5.94
	高温時	222	249	235.9	7.44	232	243	238.6	3.13
	全データ	208	249	226.9	7.47	209	245	228.6	8.65
最大と最小の軸力差 (kN)	常温時	1	26	11.0	5.05	4	35	12.9	6.10
	低温時	0	25	10.0	4.80	3	28	10.0	6.36
	高温時	3	24	11.3	4.45	2	17	8.5	3.86
	全データ	0	26	10.7	4.95	2	35	12.1	6.15
検査証明書との軸力差 (kN)	常温時	-23.2	14.4	-3.7	5.79	-22.6	10.6	-4.5	6.23
	低温時	-25.0	5.4	-7.8	5.68	-27.6	-5.8	-15.1	6.05
	高温時	-15.6	19.2	0.4	8.74	-4.2	5.6	2.2	2.64
	全データ	-25.0	19.2	-4.3	6.57	-27.6	10.6	-5.4	7.38
標準偏差 (kN)	常温時	0.5	11.6	4.0	—	1.4	12.1	4.7	—
	低温時	0.0	9.3	3.7	—	1.0	9.6	3.5	—
	高温時	1.3	8.9	4.1	—	0.8	6.0	3.1	—
	全データ	0.0	11.6	3.9	—	0.8	12.1	4.4	—
変動係数 (%)	常温時	0.2	5.3	1.7	—	0.6	5.2	2.0	—
	低温時	0.0	4.3	1.7	—	0.5	4.4	1.6	—
	高温時	0.6	3.9	1.8	—	0.3	2.6	1.3	—
	全データ	0.0	5.3	1.7	—	0.3	5.2	1.9	—

(2) 現場試験各結果と温度との関係

図 3-2-11~13 には、現場試験各結果と温度との関係を示した。図中には、最小二乗法を用いて求めた温度に対する各結果の回帰直線を示し、その直線式および相関係数も示した。いずれの結果においても、右肩上がりであるが、相関係数に違いが生じており、S10TW のボルト軸力の平均値に強い相関が認められ、S10T(W)の個々のボルト軸力、検査証明書との軸力差および S10T のボルト軸力の平均値に相関が認められた。S10TW の方が回帰直線の傾きが大きく、また、相関係数も大きかった。

図 3-2-11(a) は個々のボルト軸力と温度の関係を示すが、相関係数は大きく S10T で 0.5、S10TW で 0.6 を超え、相関有りだと判断できる。ボルト締付けにおいて温度依存性が生じるのは、ボルトに塗布されている潤滑剤の影響である。この潤滑剤は、トルク法でボルト締付けを行う上で軸力の安定を図るために欠かせないものであるが、この潤滑剤に温度依存性がある。このため、温度が高くなればボルト軸力も大きくなったものと考えられる。3-2-2 の立会い試験時での平均温度は S10T で 21.8°C、S10TW で 20.9°C であり、これを試験標準温度とすれば、この温度における各回帰直線での推定値はそれぞれ 229.0kN、230.0kN となる。S10T では立会い試験データ(230.2kN)と 1.2kN の違いで、S10TW では立会い試験データ(230.0kN)と一致して、この平均温度で判断すれば比較的精度よく推測できる回帰直線式であると考えられる。同様に、その他の関係についても、平均温度における回帰直線から得られた推定値を表 3-2-4 に示す。ここでは、表 3-2-2 で示した立会い試験データの平均値およびこれと

推定値との差も示した。相関係数が大きい結果では、推定値と立会い試験値は近い値を示した。

これらの結果から判断すると、立会い試験データより現場試験データでは、頻度分布の範囲が広く、標準偏差 A が大きかった（ばらつきが大きい）のは、試験時の温度による影響が主要因であり、架設現場での設備環境や使用機具による影響は少ないと考えられる。なお、相関係数が小さかった最大と最小の軸力差、標準偏差および変動係数について、回帰直線の傾きは小さく、1つの確認試験における軸力のばらつきは、温度の影響は少ないと考えられる。

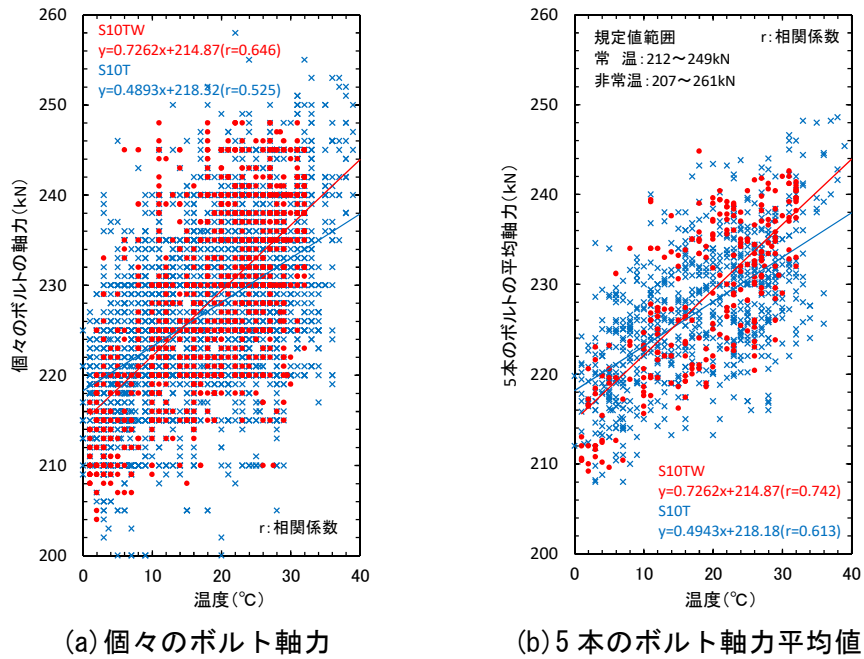


図 3-2-11 現場試験データ各結果と温度との関係 I

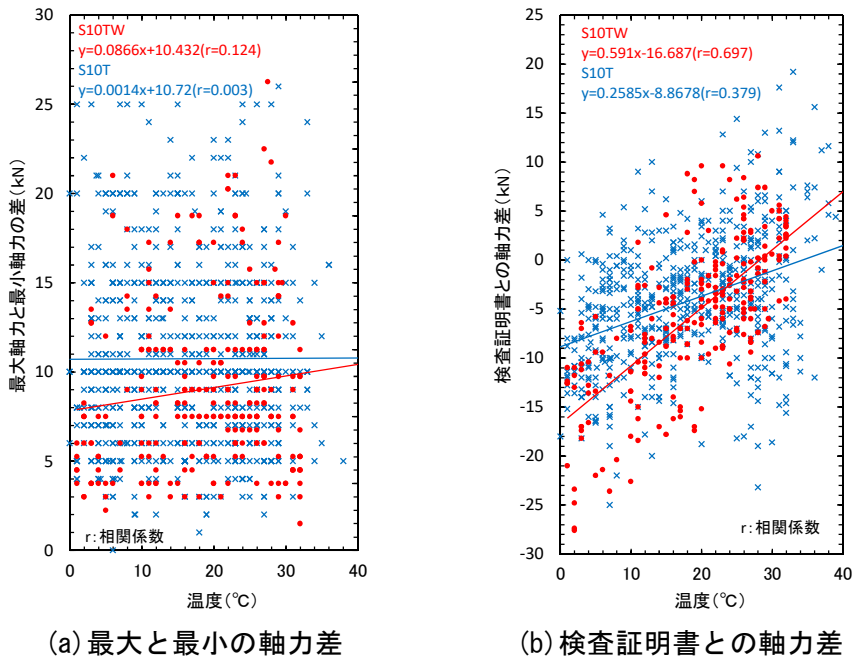
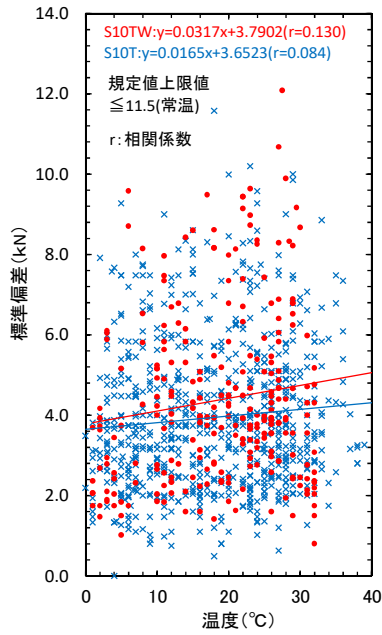
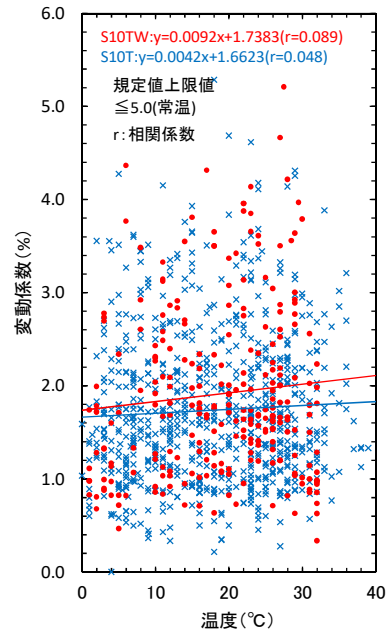


図 3-2-12 現場試験データ各結果と温度との関係 II



(a) 標準偏差



(b) 変動係数

図 3-2-13 現場試験データ各結果と温度との関係Ⅲ

表 3-2-4 回帰直線推定値と立会い試験結果との比較

項目	種別	回帰直線 推定値(1)	立会い試験 平均値(2)	(1)-(2)
個々のボルト軸力(kN)	S10T	229.0	230.2	-1.2
	S10TW	230.0	230.0	0.0
5本のボルト軸力平均値(kN)	S10T	229.0	230.2	-1.2
	S10TW	230.0	230.0	0.0
最大と最小の軸力差(kN)	S10T	10.8	14.6	-3.8
	S10TW	12.2	15.2	-3.0
検査証明書との軸力差(kN)	S10T	-3.2	-0.5	-2.7
	S10TW	-4.3	-2.1	-2.2
標準偏差(kN)	S10T	4.0	5.3	-1.3
	S10TW	4.5	5.5	-1.0
変動係数(%)	S10T	1.8	2.3	-0.5
	S10TW	1.9	2.4	-0.5

3-3 トルク係数値の調査結果

3-3-1 検査証明書

図 3-3-1, 2 には, 検査証明書で調査したボルトのボルト長およびトルク係数値を頻度分布で示し, 図 3-3-3 は, ボルト長とトルク係数値の関係を示した. また, 表 3-3-1 にはこれらの調査結果の集計値を示した. ここで示す標準偏差は, 表 3-1-4 で示した標準偏差 (3 本での統計処理結果) と区別するため, 標準偏差 A と称し, 調査したトルク係数値の統計処理結果を示した. なお, 集計できた検査証明書は 3 社のボルト製造会社のものである.

図 3-3-1 に示すように, 調査したボルト長は, F10T(W)は 80mm をピークに, F10TW でその前後のものが多く, F10T では一様に分布しており, 最大で 205mm, 最小で 55mm であった. F8T については, ボルト径により傾向が異なり, M16 および M20 は 50~60mm, M22 は 80mm をピークに比較的小さいものも多く, M24 は 85mm, 100mm をピークに 75~175mm の範囲で一様に分布していた. 図 3-3-2 に示すトルク係数値は, F10T(W)は 0.132~の頻度が高く, 平均値は F10T で 0.1307, F10TW で 0.1305 であり, 表 3-1-4 で示す規定値(0.110~0.150)のほぼ中間値にあった. 最小値は 0.116 と規定の下限值より 0.006 大きく, 最大値は 0.142 と規定の上限値より 0.008 小さかった. F8T については, M20, M22 および M24 は 0.128~の頻度が高く, M16 は 0.124~の頻度が高かった. 平均値は 0.1259~0.1285 であり, 表 3-1-4 で示す規定値(0.110~0.150)のほぼ中間値にあった. 最小値は 0.115 と規定の下限值より 0.005 大きく, 最大値は 0.143 と規定の上限値より 0.007 小さかった. なお, ボルト径の差異によるトルク係数値に明確な違いは認められなかった.

ボルト長の影響を確認するため, 図 3-3-3 には, ボルト長と軸力の関係を示す. 回帰直線は右肩下がりであるが, 相関係数は F10T(W)で 0.1 を下回っており, F8T については, 回帰直線はボルト径により異なり, M20 で 0.4 を上回るものの, M16 では 0.1 を下回っており, ボルト長と軸力の明確な相関は認められなかった.

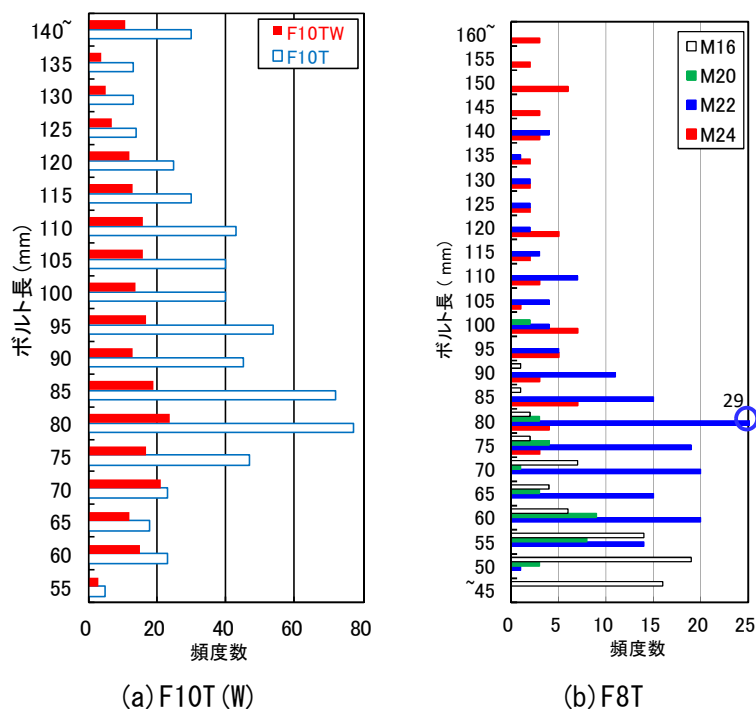
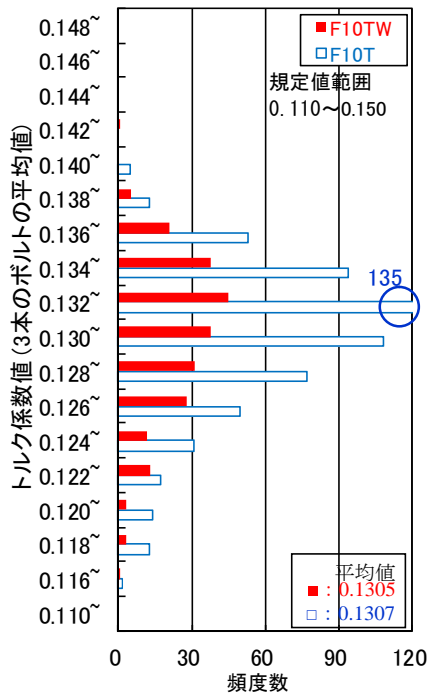
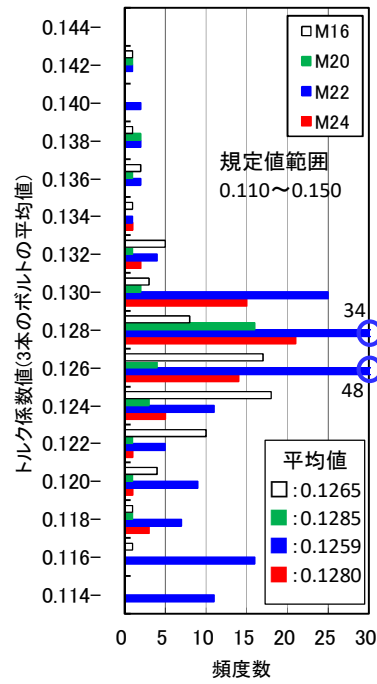


図 3-3-1 検査証明書データの集計結果 I (ボルト長)

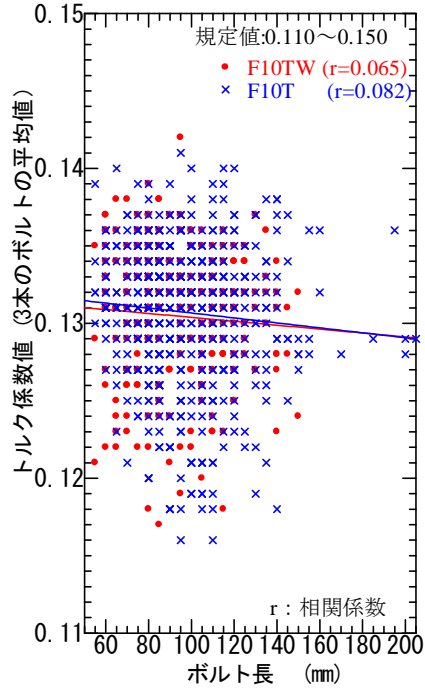


(a) F10T (W)

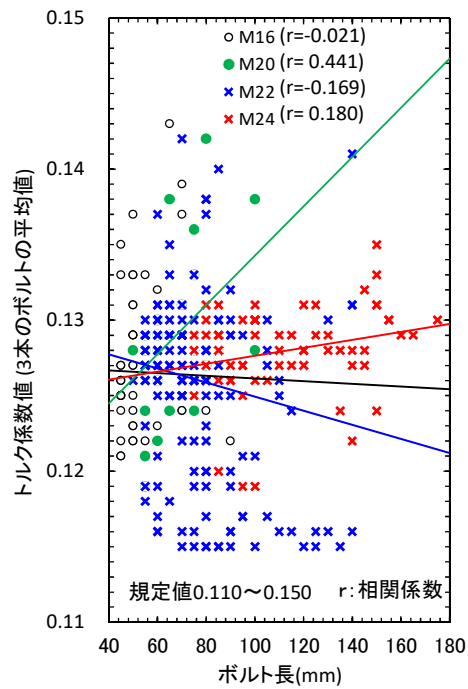


(b) F8T

図 3-3-2 検査証明書データの集計結果Ⅱ (トルク係数値)



(a) F10T (W)



(b) F8T

図 3-3-3 検査証明書データの集計結果Ⅲ (ボルト長とトルク係数値の関係)

表 3-3-1 検査証明書データの集計結果

種別	ボルト径	項目			
		トルク係数値 (kN)			標準偏差A
		最大値	最小値	平均値	
F10T	M22	0.141	0.116	0.1307	0.0044
F10TW	M22	0.142	0.117	0.1305	0.0044
F8T	M16	0.143	0.116	0.1265	0.0047
	M20	0.142	0.119	0.1285	0.0047
	M22	0.142	0.115	0.1259	0.0058
	M24	0.135	0.119	0.1280	0.0030

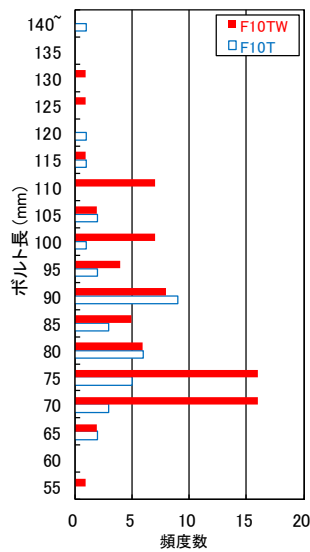
3-3-2 立会い試験

図 3-3-4 には、立会い試験の試験結果を頻度分布等で示し、表 3-3-2 はこれらの試験結果の集計値を示した。

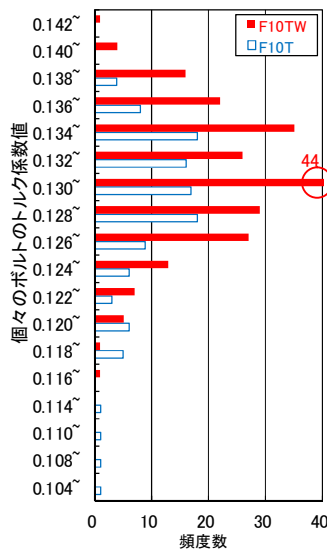
立会い試験時でのボルト長 (図 3-3-4 (a)) は、検査証明書 (図 3-3-1) と比較すると短いもので行われているケースが多いことがわかる。図 3-3-4 (b) の個々のトルク係数値は、F10T では 0.128~0.135 の頻度が高く、ピークがない台形型の分布であり、その平均は 0.1293 と検査証明書より 0.014 低い結果であった。一方、F10TW では 0.126~0.137 の頻度が高く、平均値をピークとする分布であり F10T とは異なっていた。なお、平均値は検査証明書の結果と違いはなかった。試験結果の判定に用いる 3 本の平均値 (図 3-3-4 (c)) においても、平均値は当然図 3-3-4 (b) と同じであった。なお、検査証明書と大きな違いがない理由として、ボルト製造会社の試験場における室内温度は一定下に管理されていること (JIS 規定は $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ で立会い試験データの平均値は F10T で 21.5°C 、F10TW で 20.8°C)、また、製造からの期間が短いことなどが考えられる。ただし、頻度分布は検査証明書とは異なっており、F10T(W)ともに壺型の分布で、平均値より大きい位置にトルク係数値のピークが生じる分布であった。図 3-3-4 (d) には、ボルト長と軸力の関係を示すが、回帰直線は F10T では右肩上がり、F10TW では右肩下がり、その相関係数は小さく、ボルト長とトルク係数値の明確な相関は認められなかった。

図 3-3-4 (e) は検査証明書で示されているトルク係数値と立会い試験時でのトルク係数値の差を示したものであるが、試験温度が安定していても最大で 0.016 の差が生じる場合もあった。頻度分布は -0.001~0.001 に集中しており、また、F10T(W)の平均値が -0.0005 であり、検査証明書との差はほとんどないと判断でき、検査証明書で示されているトルク係数値は信頼性の高い値であると考えられる。

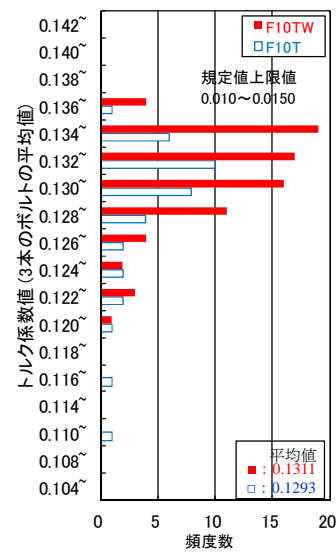
図 3-3-4 (f) は 1 データ 3 本の標準偏差の頻度分布を示すが、最大値は 0.0089 と規定の上限値(0.010) に対し近い場合もあり、平均は F10T で 0.0039、F10TW で 0.0043 と規定の上限値の約 4 割であった。なお、高力ボルト製造工場での品質管理は X-R 管理図⁴⁾で行っているため、ロット単体での標準偏差は参考値である。



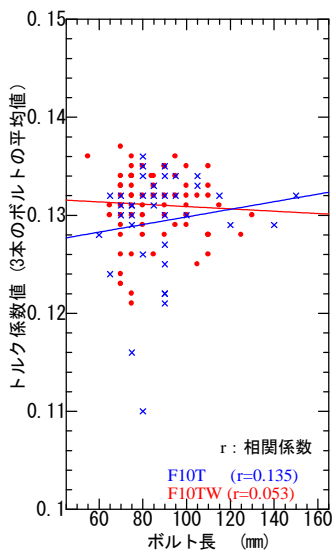
(a) ボルト長



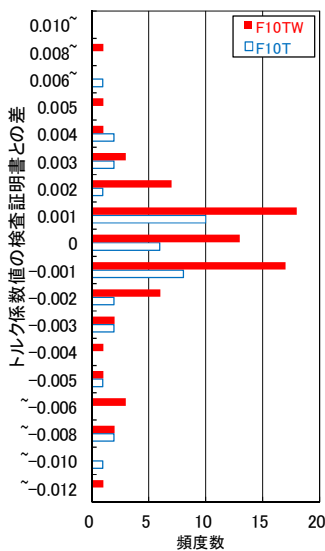
(b) 個々のトルク係数値



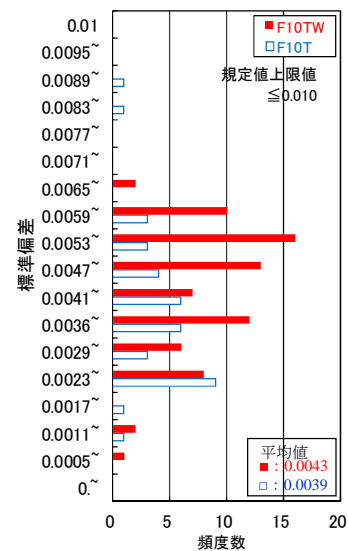
(c) 5本のトルク係数値平均値



(d) ボルト長との関係



(e) 検査証明書との差



(f) 標準偏差

図 3-3-4 立会い試験データの集計結果

表 3-3-2 立会い試験データの集計結果

項目	種別	最小値	最大値	平均値	標準偏差A
個々のトルク係数値	F10T	0.104	0.139	0.1293	0.0054
	F10TW	0.117	0.143	0.1311	0.0035
5本のトルク係数値平均値	F10T	0.110	0.136	0.1293	0.0062
	F10TW	0.121	0.137	0.1311	0.0048
検査証明書との差	F10T	-0.0097	0.0060	-0.0005	0.0033
	F10TW	-0.0160	0.0077	-0.0005	0.0032
標準偏差	F10T	0.0012	0.0089	0.0039	—
	F10TW	0.0006	0.0065	0.0043	—

3-3-3 現場試験

(1) 現場試験の頻度分布

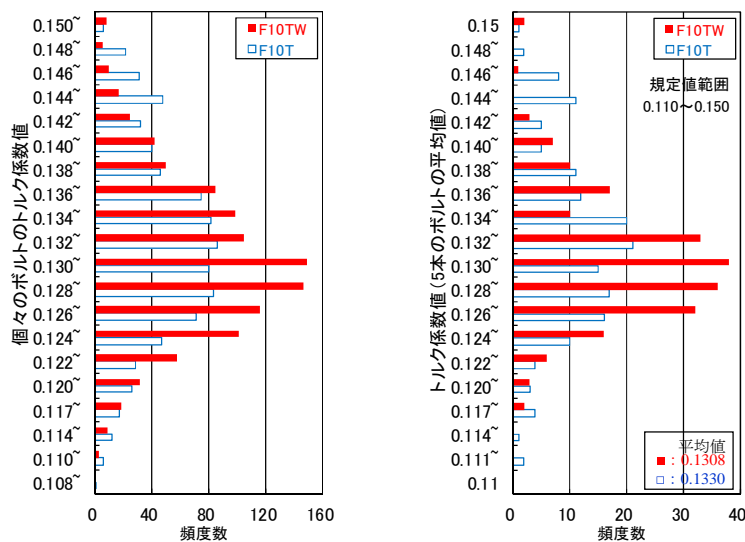
図 3-3-5 には、現場試験の試験結果を頻度分布で示し、表 3-3-3 はこれらの調査結果の集計値を示した。ここでは、予備試験で得られたトルク係数値と標準偏差および設定トルクを示した。ここで示す設定トルクとは、予備試験で得られたトルク係数値から 3-1-2 の式 (3-1-1) を用いて求めたその日の締付けトルクである。なお、現場試験では、基本的に長さ 80mm のボルトを用い確認試験を行っているので、ボルト長の影響はないデータである。

図 3-3-5 (a) は個々のトルク係数値の頻度分布を示したものであるが、F10T では 0.126~0.137 の範囲に分布が集中し、その範囲では同程度の頻度であり、ピークがない台形型の分布であった。一方、F10TW では平均値をピークとする凸型の分布であった。また、F10T(W)で標準偏差 A の大きな違いはなかった。

図 3-3-5 (b) は 5 本の平均値の頻度分布を示す。規定の下限値となるデータは見られなかったが、規定の上限値となる場合は見られた。F10T(W)で、平均値 (図 3-3-5 (b)) と個々の結果 (図 3-3-5 (a)) の分布は若干異なるものの大きな違いではなかった。また、標準偏差 A については、室内試験である立合い試験データと比較しても、現場試験の方が大きくなるものの差異は小さく、現場という理由でばらつきが大きくなるものではないと判断できる。

図 3-3-5 (c) は標準偏差の頻度分布を示すが、F10T は 0.0015 をピークとする釣り鐘型の分布であり、F10TW は 0.0030 をピークとする尖った凸型の分布を示し、F10T と F10TW で大きな違いが見られた。また、平均値においても、F10T で 0.0027、F10TW では 0.0043 と約 1.6 倍、F10TW の方が大きかった。さらに、F10T(W)で規定の上限値に近い場合もわずかではあるが見られた。

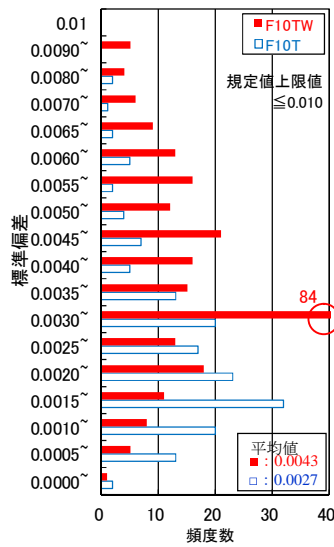
図 3-3-5 (d) は、3-1-2 で示した手順で求めた設定トルクを集計した結果の頻度分布である。F10T では 630N・m~と 720N・m~をピークとする 2 つの凸を有する緩やかな凸型の分布であり、F10TW では 630N・m~をピークとする釣り鐘型の分布を示し、F10T と F10TW で大きな違いが見られた。なお、平均値においては、F10T は 652N・m、F10TW は 644N・m と大きな違いではなかった。



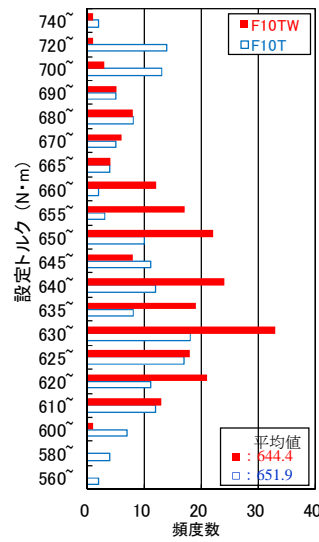
(a) 個々のトルク係数値

(b) 5本のトルク係数値平均値

図 3-3-5 現場試験データの頻度分布 (トルク係数値, 標準偏差, 設定トルク)



(c) 標準偏差



(d) 設定トルク

図 3-3-5 現場試験データの頻度分布(トルク係数値, 標準偏差, 設定トルク)

表 3-3-3 現場試験データの集計結果

項目	種別	最小値	最大値	平均値	標準偏差A
個々のトルク係数値	F10T	0.108	0.154	0.1330	0.0080
	F10TW	0.112	0.153	0.1308	0.0065
5本のトルク係数値平均値	F10T	0.112	0.150	0.1330	0.0076
	F10TW	0.117	0.150	0.1308	0.0052
標準偏差	F10T	0.0004	0.0086	0.0027	—
	F10TW	0.0004	0.0099	0.0041	—
設定トルク (N・m)	F10T	562	747	651.9	38.584
	F10TW	607	744	644.4	21.964

(2) トルク係数値および設定トルクと温度との関係

図 3-3-6 には、トルク係数値および設定トルクと温度との関係を示した。図中には、最小二乗法を用いて求めた温度に対する各結果の回帰直線を示し、その直線式および相関係数も示した。F10T(W)で、いずれの結果においても、右肩上がりであったが、F10Tはトルク係数値および設定トルクともに相関係数は0.2に達しておらず、明確に相関有りとは判断するのは困難である。ただし、F10TWのトルク係数値は0.199とほぼ0.2であり、設定トルクは0.329であり、弱い相関はあると判断できる。

図 3-3-6(a)はトルク係数値と温度の関係を示すが、F10Tでは回帰直線の傾きは小さく、また相関係数は小さかった。一方、F10TWでは弱い相関は認められた。すなわち、温度が高い場合には大きいトルク係数値となる傾向であることを示している。一方、図 3-3-6(b)は設定したトルクと温度の関係を示すが、F10T(W)で右肩上がりであり、温度が高い場合には大きいトルクでボルトを締め付けていることを示している。

図 3-2-11 で示したように S10T(W)においても温度依存性があり、温度が高くなればボルト軸力も

大きくなる傾向にある。さらに、回帰直線の傾きは大きく、また、相関係数も大きく、これと本試験結果である F10T(W)を比較しても、F10T(W)の方が温度依存性は低いと判断できる。温度依存性が生じるのは、3-2-3(2)に示したとおりであるが、F10T(W)では、締付け日の温度からトルク係数値を算出し、その日のトルクを設定しているため、導入軸力には温度の影響は生じないと考えられる。

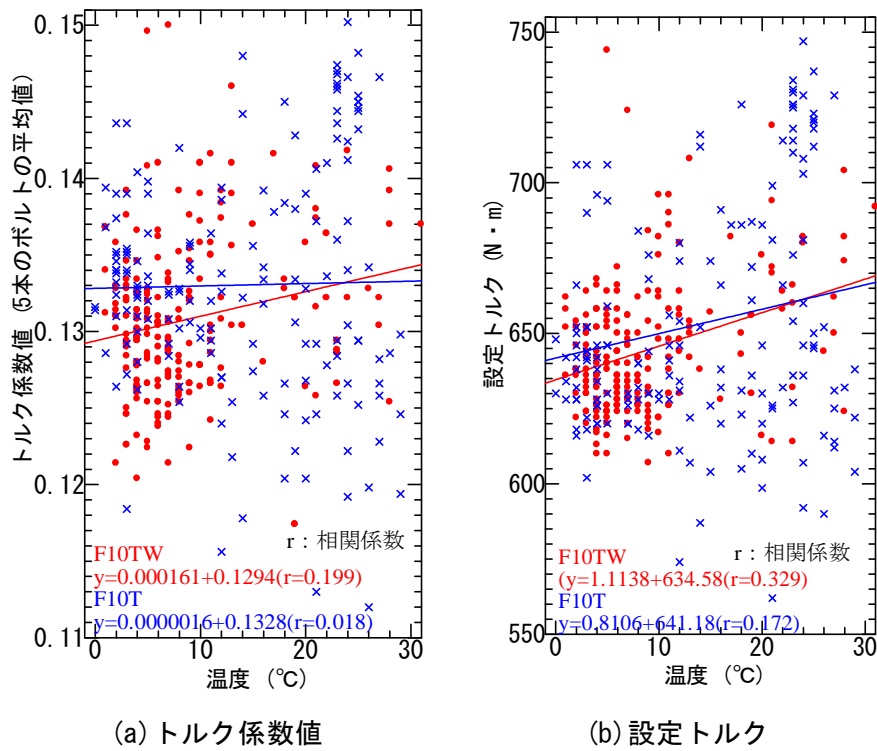


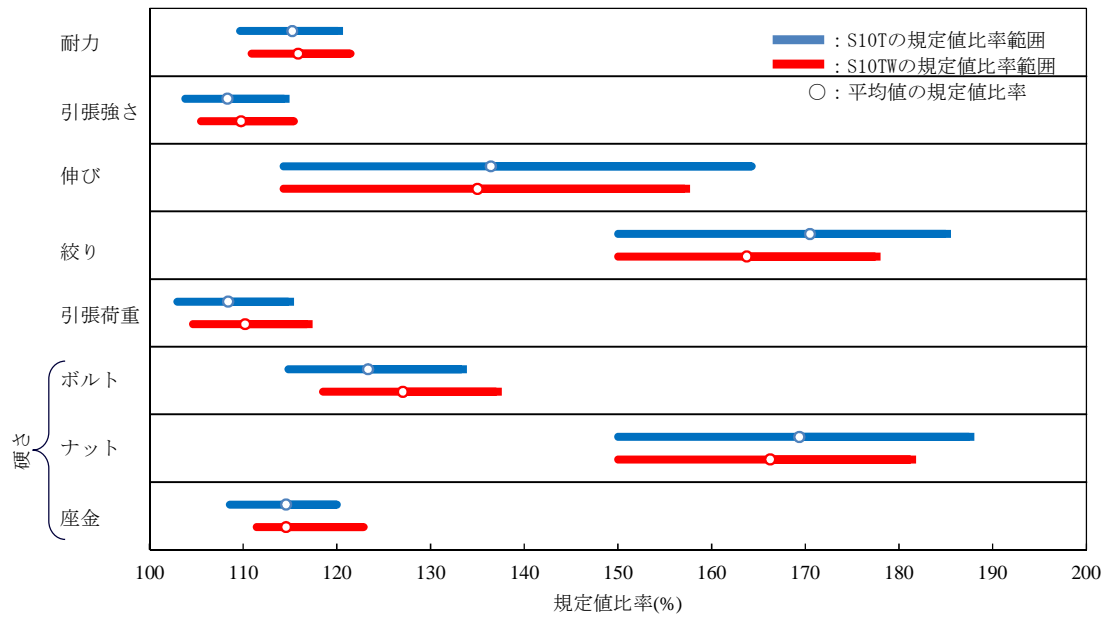
図 3-3-6 現場試験データ各結果と温度との関係

3-4 機械的性質の調査結果

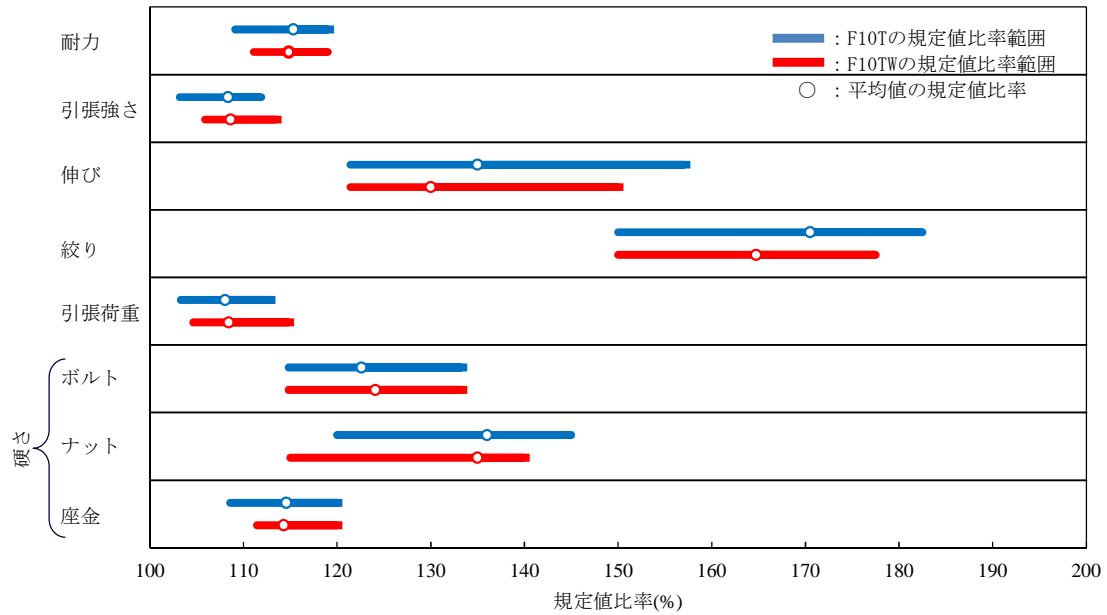
すべての機械的性質の調査結果を表 3-4-1 に示し、各調査項目における規定値比率を図 3-4-1 に示した。ここで示す規定値比率とは、調査結果（表 3-4-1）を規定の下限値（表 3-1-1）で除して求めた比率を示しており、その範囲は最小値と最大値に対する比率である。また、平均値に対する比率も示している。

表 3-4-1 機械的性質の集計結果

		耐力 (N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	引張 荷重 (kN)	硬さ(HRC)			溶融亜鉛めっき付着量 (g/m ² , HDZ55)			
							ボルト	ナット	座金	ボルト	ナット	座金	
S10T	最小値	987	1038	16	60	312	31	24	38	-	-	-	
	最大値	1081	1144	23	74	348	36	30	42	-	-	-	
	平均値	1037.1	1083.2	19.1	68.2	328.4	33.3	27.1	40.1	-	-	-	
	標準偏差A	14.99	15.04	0.99	2.01	5.47	1.06	0.98	0.67	-	-	-	
S10TW	最小値	998	1055	16	60	317	32	24	39	-	-	-	
	最大値	1093	1154	22	71	354	37	29	43	-	-	-	
	平均値	1042.7	1097.6	18.9	65.5	333.9	34.3	26.6	40.1	-	-	-	
	標準偏差A	19.18	19.60	1.03	2.26	6.93	0.98	1.24	0.94	-	-	-	
F10T	最小値	982	1032	17	60	313	31	24	38	-	-	-	
	最大値	1072	1119	22	73	342	36	29	42	-	-	-	
	平均値	1038.1	1083.6	18.9	68.2	327.4	33.1	27.2	40.1	-	-	-	
	標準偏差A	14.54	12.86	0.89	1.75	4.21	0.84	0.91	0.68	-	-	-	
F10TW	最小値	1000	1059	17	60	317	31	23	39	-	-	-	
	最大値	1071	1135	21	71	348	36	28	42	-	-	-	
	平均値	1033.4	1086.3	18.2	65.9	328.5	33.5	27.0	40.0	-	-	-	
	標準偏差A	13.34	11.41	0.85	2.33	5.00	1.04	0.94	0.46	-	-	-	
F8T	M16	最小値	809	856	21	70	133	25	26	28	563	562	558
		最大値	882	921	24	75	145	28	28	34	747	714	662
		平均値	841.1	884.8	22.2	72.2	137.8	26.3	26.8	31.3	614.7	611.9	601.7
		標準偏差A	19.70	15.25	0.62	1.15	2.74	0.87	0.65	1.31	39.20	41.88	26.57
	M20	最小値	806	856	21	70	208	25	25	30	564	567	578
		最大値	881	918	24	74	226	28	29	33	686	698	657
		平均値	841.8	886.5	22.3	72.3	215.8	26.8	27.0	31.7	602.7	597.3	596.4
		標準偏差A	18.81	14.18	0.81	0.98	5.10	0.55	1.07	0.94	32.49	30.77	23.46
	M22	最小値	802	851	19	68	258	25	25	27	560	566	558
		最大値	888	934	25	75	281	28	29	40	807	741	758
		平均値	839.9	885.3	22.1	72.4	266.8	26.7	27.0	32.7	610.0	626.7	615.2
		標準偏差A	17.71	15.12	0.83	1.01	5.79	0.74	0.81	2.40	39.01	42.77	34.44
M24	最小値	789	846	19	69	295	24	24	29	557	573	574	
	最大値	882	919	24	74	329	28	28	40	785	749	652	
	平均値	831.0	879.0	22.4	72.2	308.0	26.9	26.6	32.3	608.6	603.3	592.2	
	標準偏差A	22.95	18.10	1.10	1.17	8.45	0.75	0.85	2.17	44.13	34.02	18.69	

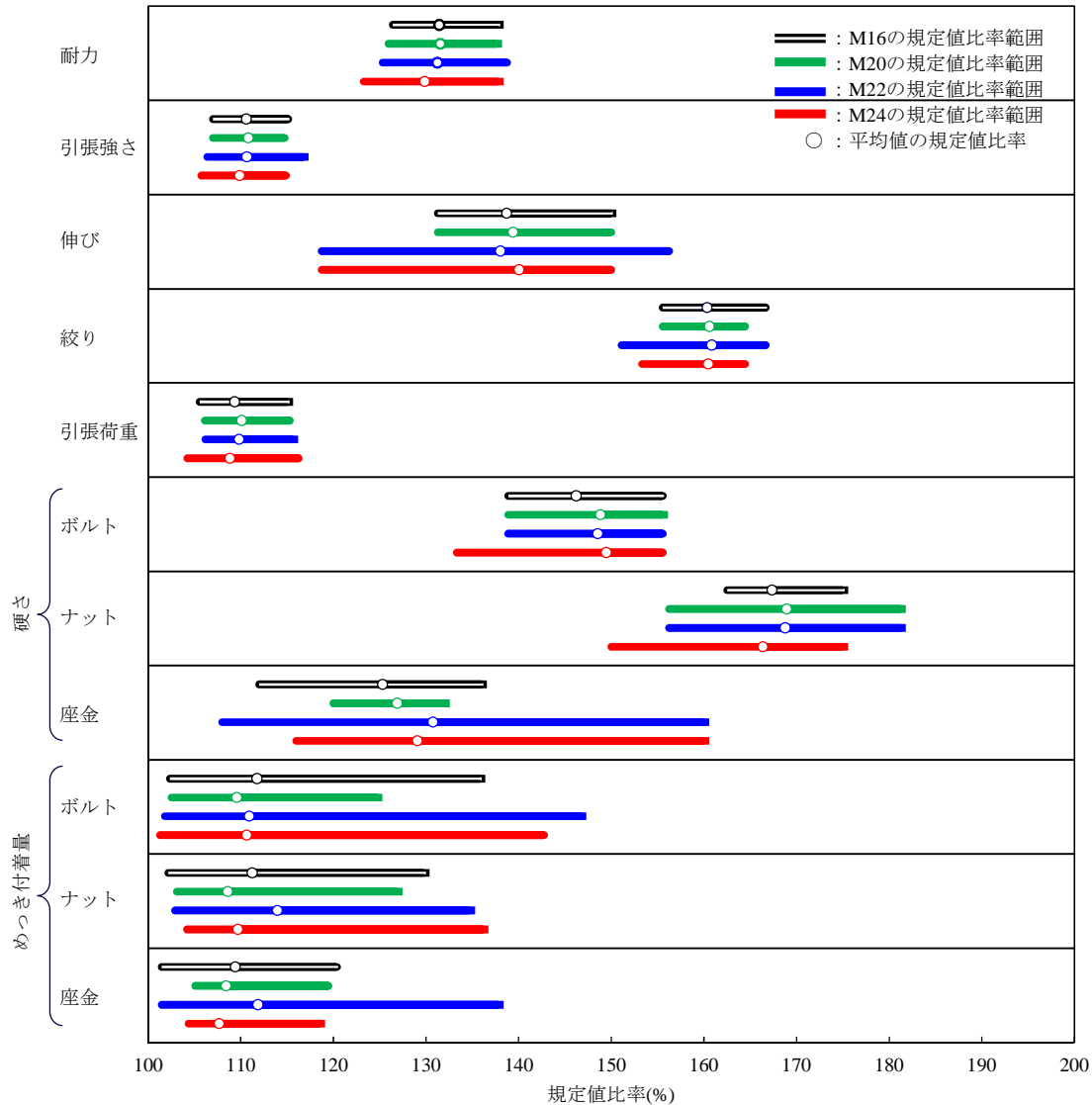


(a) S10T (W)



(b) F10T (W)

図 3-4-1 規定の下限値に対する比率の範囲



(c) F8T

図 3-4-1 規定の下限値に対する比率の範囲

3-4-1 耐力 (0.2%耐力)

図 3-4-2~4 には、耐力の調査結果を頻度分布およびボルト長との関係で示した。

図 3-4-2 は S10T(W) の関係を示すが、耐力の最小値は S10T で 987N/mm^2 、S10TW で 998N/mm^2 であり、規定値 (900N/mm^2) よりそれぞれ 87N/mm^2 、 98N/mm^2 大きく、さらに、平均値は 1037.1N/mm^2 、 1042.7N/mm^2 と 137.1N/mm^2 (規定値比率:115%)、 142.7N/mm^2 (規定値比率:116%) 大きかった。頻度分布 (図 3-4-2 (a)) は、S10T は $1020\sim 1049\text{N/mm}^2$ の分布が多く、ピークがない台形型に分布していた。S10TW は、 1035N/mm^2 をピークとする凸型であるが、比較的耐力の大きい 1075N/mm^2 に小さなピークが見られた。また、ボルト長との相関 (図 3-4-2 (b)) は明確には見られなかった。

表 3-4-1 に示すように S10T(W) で比較すると標準偏差は S10TW が 19.18、S10T が 14.99 であり S10TW のばらつきが大きいことがわかる。これは 3-4-2 も同様の傾向である。工場製造時には、軸力を規定値内に管理するためピンテールが破断する部位の断面積と潤滑油で調整を行うが、素材のばらつきが大きい S10TW において、表 3-2-1 および表 3-2-2 に示した軸力の平均値が目標通りであることから

信頼性の高い生産管理が実施されていることが確認できる。

図 3-4-3 は F10T(W) の関係を示すが、耐力の最小値は F10T で 982N/mm^2 、F10TW で 1000N/mm^2 であり、規定値(900N/mm^2)よりそれぞれ 82N/mm^2 、 100N/mm^2 大きかった。平均値では、逆に F10T の方が 5.3N/mm^2 大きく、F10T で 1038.1N/mm^2 、F10TW で 1033.4N/mm^2 であり、規定値比率はそれぞれ 115.3%、114.8%と 0.5%の違いであった。頻度分布(図 3-4-3(a))は、 $1020\sim 1059\text{N/mm}^2$ の分布が多く、ピークがない台形型に分布していた。また、ボルト長との相関(図 3-4-3(b))は明確には見られなかった。

図 3-4-4 は F8T の関係を示すが、耐力の最小値は M16 で 809N/mm^2 、M20 で 806N/mm^2 、M22 で 802N/mm^2 、M24 で 789N/mm^2 であり、規定値(640N/mm^2)よりそれぞれ 169N/mm^2 、 166N/mm^2 、 162N/mm^2 、 149N/mm^2 大きかった。平均値でも、M24 が 10N/mm^2 ほど小さく、M16 で 841.1N/mm^2 、M20 で 841.8N/mm^2 、M22 で 839.9N/mm^2 、M24 で 831.0N/mm^2 であり、規定値比率はそれぞれ 131%、132%、131%、130%と 2%の違いであった。頻度分布(図 3-4-4(a))は、 $825\sim 849\text{N/mm}^2$ の分布が多く、 850N/mm^2 を境に大小 2 つのピークをもつ凸型の分布であった。また、ボルト長との相関(図 3-4-4(b))は明確には見られなかった。

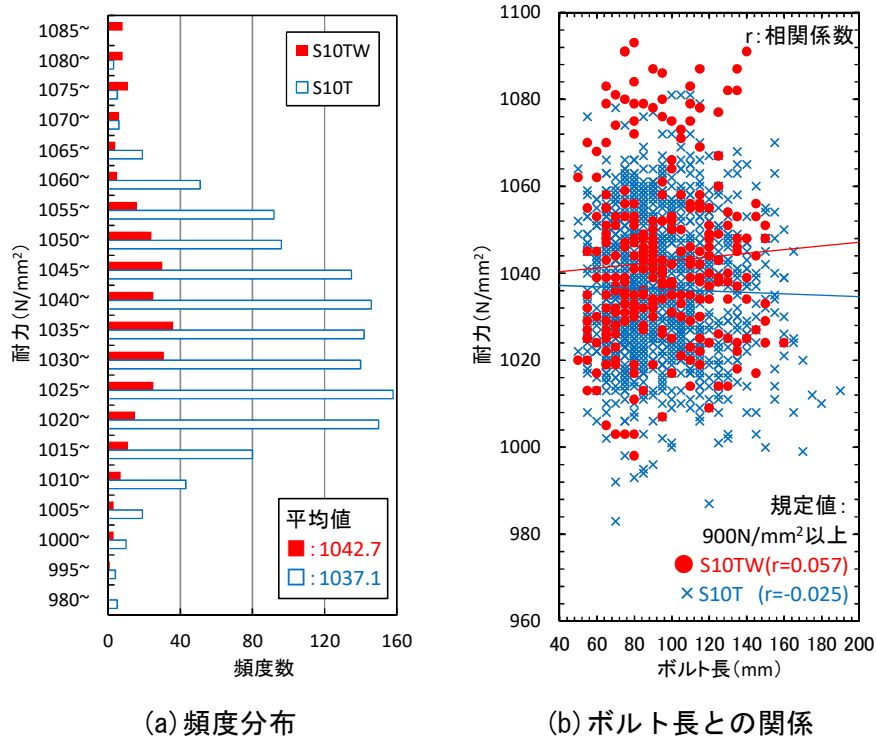
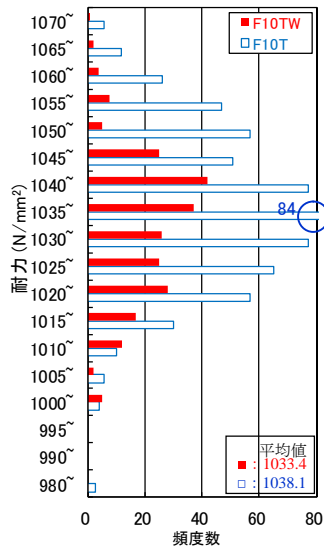
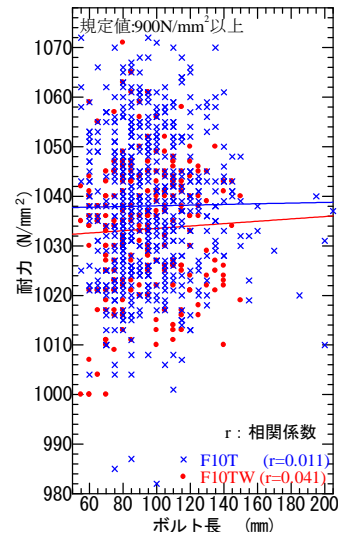


図 3-4-2 S10T(W) の耐力(0.2%耐力)の調査結果

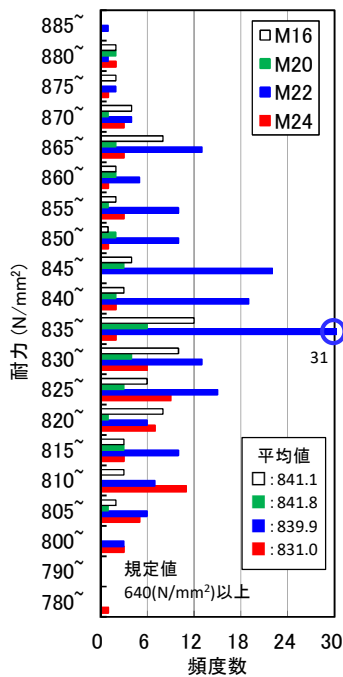


(a) 頻度分布

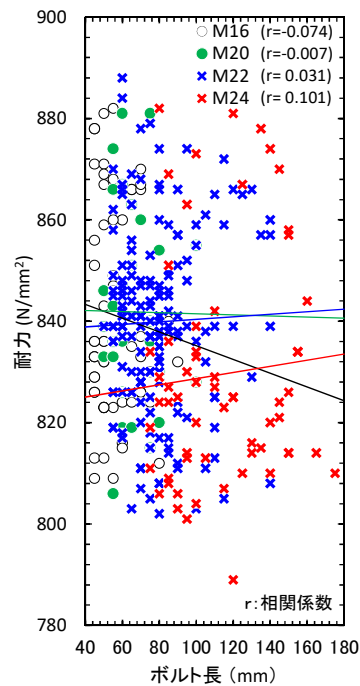


(b) ボルト長との関係

図 3-4-3 F10T(W) の耐力(0.2%耐力)の調査結果



(a) 頻度分布



(b) ボルト長との関係

図 3-4-4 F8T の耐力(0.2%耐力)の調査結果

3-4-2 引張強さ(引張強度)

図 3-4-5 には、引張強さの調査結果を頻度分布、ボルト長との関係および耐力との関係で示した。

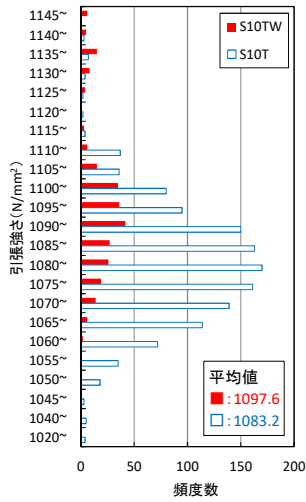
図 3-4-5(a), (b), (c) は S10T(W) の関係を示すが、引張強さの最小値は S10T で 1038N/mm^2 、S10TW で 1055N/mm^2 であり、規定値(1000N/mm^2) に対しそれぞれ 38N/mm^2 、 55N/mm^2 大きく、平均値では S10T で 1083.2N/mm^2 、S10TW で 1097.6N/mm^2 と、規定値(1000N/mm^2) に対しそれぞれ 83.2N/mm^2 (規定値比率 : 108%)、 97.6N/mm^2 (規定値比率 : 110%) 大きかった。頻度分布 (図 3-4-5(a)) は、S10T が平均

値近傍をピークとするなだらかな凸型の分布であり、耐力の分布とは若干異なった。ただし、標準偏差 A は、耐力とほぼ一致していた。S10TW は、 1090N/mm^2 をピークとする凸型の分布であるが、耐力と同様に比較的引張強さの大きい 1135N/mm^2 に小さなピークが見られた。ボルト長との関係 (図 3-4-5 (b)) については、耐力と同様、まったく相関は見られなかった。なお、耐力との関係 (図 3-4-5 (c)) については、相関係数が S10T で 0.867, S10TW で 0.944 と強い相関が認められた。

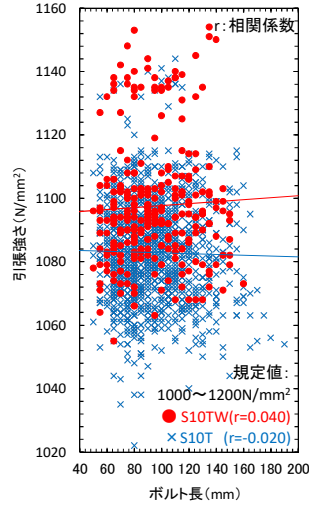
図 3-4-5 (d), (e), (f) は F10T(W) の関係を示すが、引張強さの最小値は F10T で 1032N/mm^2 , F10TW で 1059N/mm^2 であり、規定値 (1000N/mm^2) よりそれぞれ 32N/mm^2 , 59N/mm^2 大きかった。平均値では、大きな違いはなく、F10T で 1083.6N/mm^2 , F10TW で 1086.3N/mm^2 であり、規定値比率はそれぞれ 108%, 109% と耐力の比率より若干小さかった。なお、耐力と引張強さの規定の下限値の差は 100N/mm^2 であるが、調査データの平均値で耐力と引張強さの差は約 50N/mm^2 の違いであった。次に、頻度分布 (図 3-4-5 (d)) は、平均値近傍をピークとするなだらかな凸型の分布であるが、F10(W) で耐力の分布とは若干異なった。また、標準偏差 A も、耐力より若干小さかったが大きな違いではなかった。ボルト長との関係 (図 3-4-5 (e)) については、右肩上がりであるが、相関係数は小さく、耐力と同様、明確な相関関係は認められなかった。耐力との関係 (図 3-4-5 (f)) については、F10T(W) で相関係数は 0.85 を超え強い相関が認められた。また、耐力は F10T > F10TW, 引張強さでは F10TW > F10T であったこともあり、F10T(W) の回帰直線に違いが生じていた。ただし、回帰直線の傾きに大きな違いは見られなかった。

図 3-4-5 (g), (h), (i) は F8T の関係を示すが、引張強さの最小値は M16 と M20 で 856N/mm^2 , M22 で 851N/mm^2 , M24 で 846N/mm^2 であり、規定値 (800N/mm^2) よりそれぞれ 56N/mm^2 , 51N/mm^2 , 46N/mm^2 大きかった。平均値では、ボルト径による大きな違いはなく、M16 で 884.8N/mm^2 , M20 で 886.5N/mm^2 , M22 で 885.3N/mm^2 , M24 で 879.0N/mm^2 であり、規定値比率は M16, M20, M22 で 111%, M24 で 110% と耐力の比率より小さかった。なお、耐力と引張強さの規定の下限値の差は 160N/mm^2 であるが、調査データの平均値はいずれも耐力と引張強さの差は約 50N/mm^2 の違いであった。次に、頻度分布 (図 3-4-5 (g)) は、M22 はピークが突出しているものの、全体的になだらかな凸型の分布であった。また、標準偏差も、耐力より若干小さかったが大きな違いではなかった。ボルト長との関係 (図 3-4-5 (h)) については、相関係数は小さく、耐力と同様、相関は認められなかった。耐力との関係 (図 3-4-5 (i)) については、いずれの径でも、相関係数は 0.9 を超え強い相関が認められた。また、耐力および引張強さの径による差が小さかったこともあり、回帰直線に大きな違いは見られなかった。

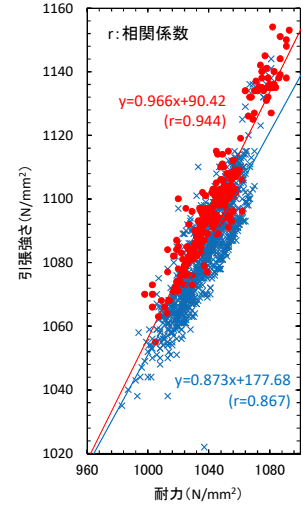
図 3-4-6 には降伏比 (耐力 / 引張強さ) の算出結果を頻度分布で示した。S10T の降伏比は 0.930 ~ 0.976 の範囲にあり、その平均値は 0.957 であった。ただし、分布のピークは 0.950 と 0.960 にあった。一方 S10TW の降伏比は 0.927 ~ 0.969 の範囲にあり、その平均値は 0.950 であった。頻度分布は、0.948 をピークとする凸型の分布であった。F10T(W) は、ピークが複数ありばらつきのある分布であった。また、その平均値は、F10T で 0.958, F10TW で 0.951 であり、F10T の降伏比が高かった。F8T は、いずれも 0.938 ~ 0.950 に集中し、0.956 ~ に小さなピークがあった。また、その平均値は、M16, M20, M22, M24 の順で 0.951, 0.950, 0.949, 0.945 であり、ボルト径の小さい順に降伏比が高かった。



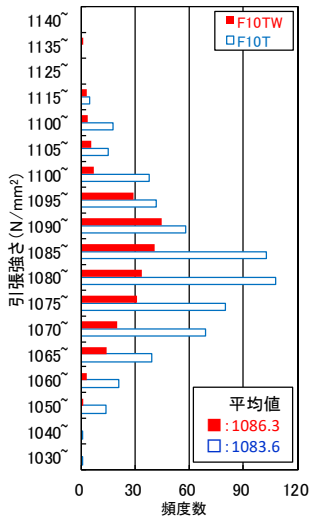
(a) S10T (W) の頻度分布



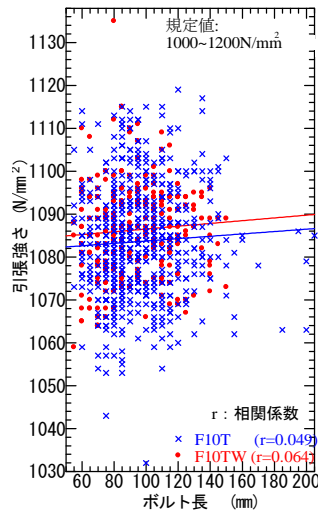
(b) S10T (W) のボルト長との関係



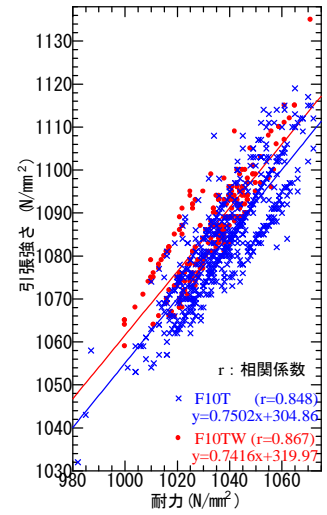
(c) S10T (W) の耐力との関係



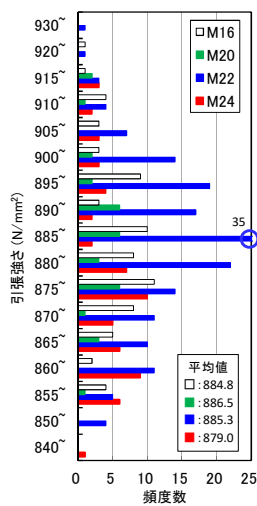
(d) F10T (W) の頻度分布



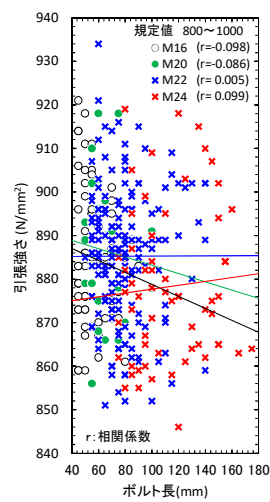
(e) F10T (W) のボルト長との関係



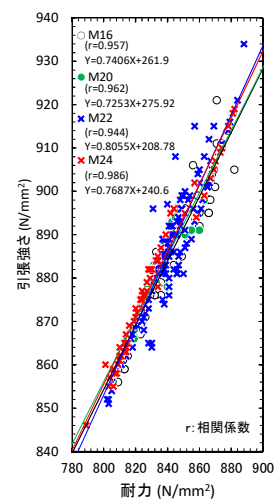
(f) F10T (W) の耐力との関係



(g) F8T の頻度分布



(h) F8T のボルト長との関係



(i) F8T の耐力との関係

図 3-4-5 引張強さ(引張強度)の調査結果

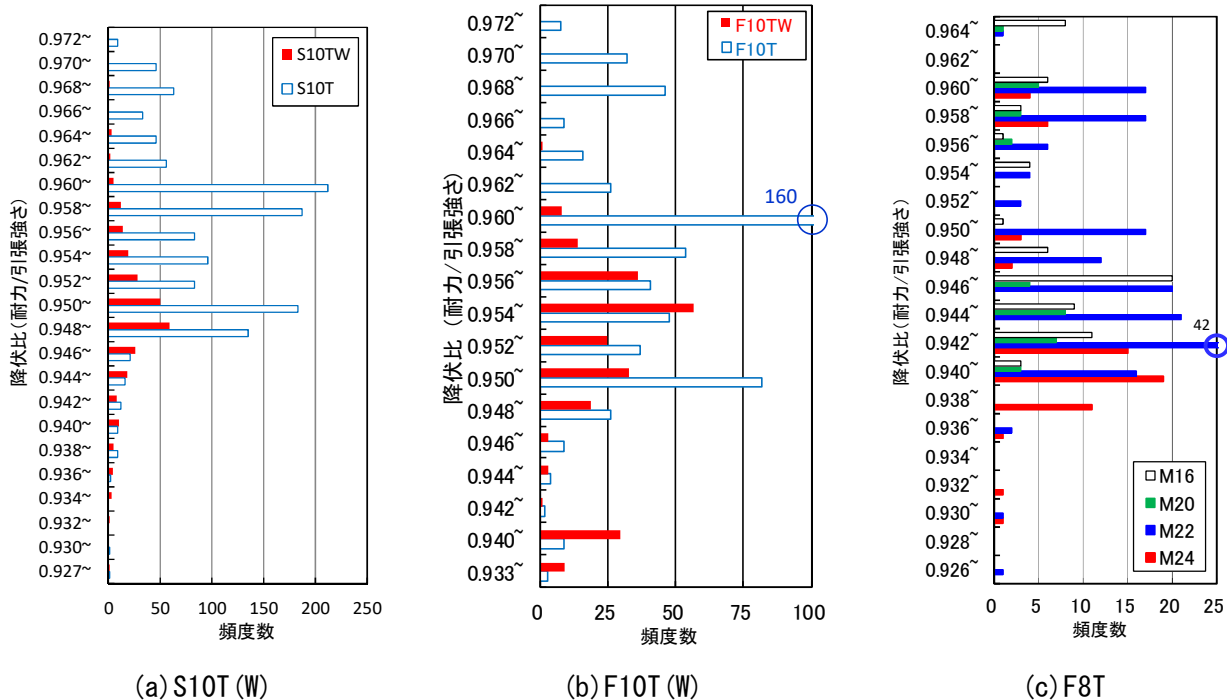


図 3-4-6 降伏比の頻度分布

3-4-3 伸び・絞り

図 3-4-7~9 に伸び・絞りの調査結果を頻度分布、ボルト長との関係および伸びと絞りの関係で示した。

図 3-4-7 は S10T(W) の関係を示すが、頻度分布 (図 3-4-7(a)) は、伸びについて、S10T で 16~23%、S10TW で 16~22% の狭い範囲であった。S10T は平均値をピークとする尖った凸型の分布であった。一方、S10TW は 18%、19%、20% にピークが集中する分布であった。絞りについては、S10T で 60~76%、S10TW で 60~71% の広い範囲であった。S10T は平均値近傍をピークとするなだらかな凸型の分布であり、伸びとは分布が異なった。S10TW は 63%、67% の 2 つのピークをもつ分布であった。また、S10T(W) で標準偏差 A は伸びの約 2 倍であった。平均値の規定値比率は、伸びおよび絞りでそれぞれ S10T が 136%、171%、S10TW が 135%、164% であった。特に、絞りについては、S10T(W) で最小値でも規定値の 150% の性能を有していた。

ボルト長との関係 (図 3-4-7(b)) については、伸びおよび絞りともに、回帰直線は右肩下がりであるが、相関係数は S10T(W) で 0.119~0.168 であり、明確な相関は認められなかった。また、伸びと絞りとの関係 (図 3-4-7(c)) については、相関係数は S10T で 0.546、S10TW で 0.685 であり、伸びが増加すれば絞りも増加する相関が認められた。

図 3-4-8 は F10T(W) の関係を示すが、伸びの頻度分布 (図 3-4-8(a)) は、17~22% の狭い範囲で、平均値は F10T で 18.9%、F10TW で 18.2% であり、平均値をピークとする尖った凸型の分布であった。また、平均値の規定値比率は、F10T および F10TW でそれぞれ 130%、135% であった。

絞りについては、60~73% と広い範囲で、平均値は F10T で 68.2%、F10TW で 65.9% であり、F10T では平均値をピークとするなだらかな凸型、F10TW ではピークがない台形型の分布であり、F10T(W) で分布が異なった。また、標準偏差 A は伸びの 2 倍を超えていた。平均値の規定値比率は、F10T および F10TW でそれぞれ 171%、164% であった。特に、絞りについては、最小値でも規定値の 150% の

性能を有していた。

ボルト長との関係 (図 3-4-8 (b)) については、伸びおよび絞りともに、回帰直線は、F10T では傾きはほぼゼロであるが、F10TW では右肩下がりであり、相関係数は F10T(W) で 0.2 を超え、弱い相関は認められた。また、伸びと絞りとの関係 (図 3-4-8 (c)) については、伸びが増加すれば絞りも増加する相関が認められ、相関係数は F10T で 0.493、F10TW で 0.373 であった。

図 3-4-9 は F8T の関係を示すが、伸びの頻度分布 (図 3-4-9 (a)) は、19~25% の狭い範囲で、平均値は 22.1~22.4% であり、平均値付近をピークとする尖った凸型の分布であった。また、平均値の規定値比率は 140% であった。

絞りについては、68~75% の狭い範囲で、平均値は 72.2~72.4% であり、M16、M20 では平均値をピークとするなだらかな凸型、M22、M24 では尖った凸型の分布であり、径によって分布が異なった。平均値の規定値比率は 160% であった。特に、絞りについては、最小値でも規定値の 151% の性能を有していた。

ボルト長との関係 (図 3-4-9 (b)) については、回帰直線は、M20 の絞りを除き傾きはほぼゼロであるが、相関係数は 0.2 未満で、相関は認められなかった。また、伸びと絞りとの関係 (図 3-4-9 (c)) については、M16 を除き伸びが増加すれば絞りも増加する相関が認められ、相関係数は M20 で 0.366、M22 で 0.204、M24 で 0.700 であった。

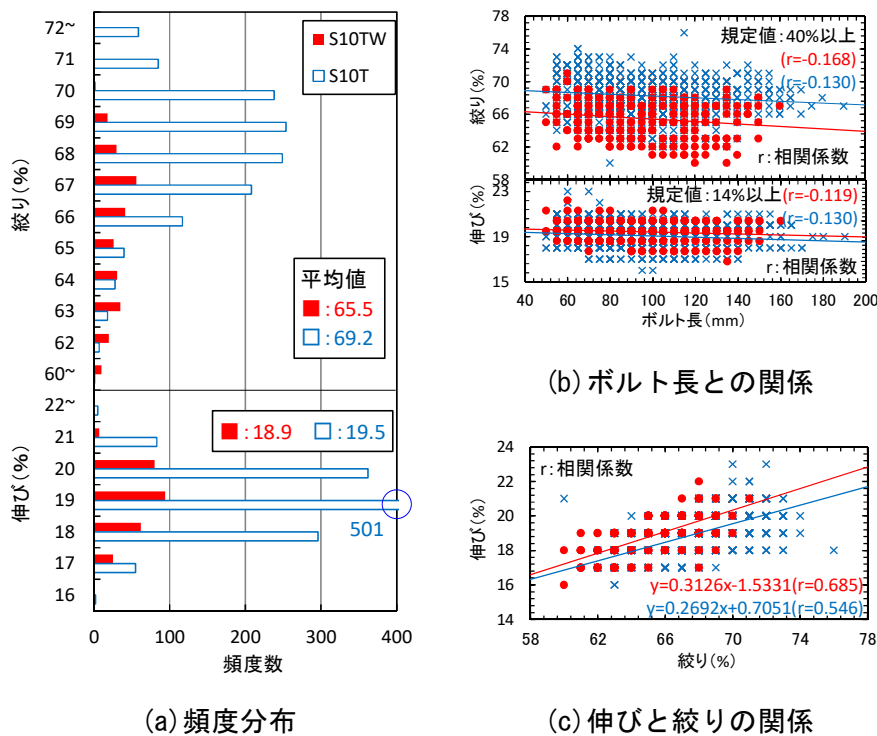
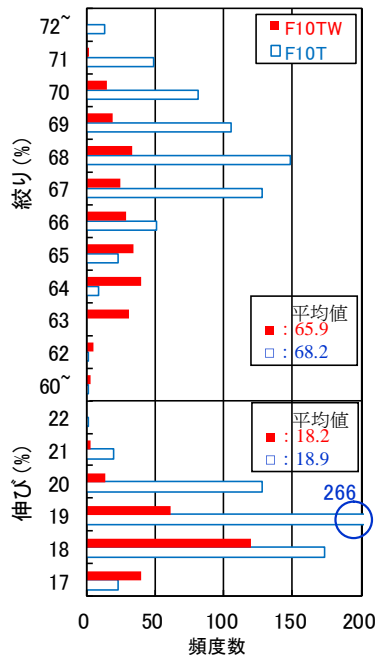
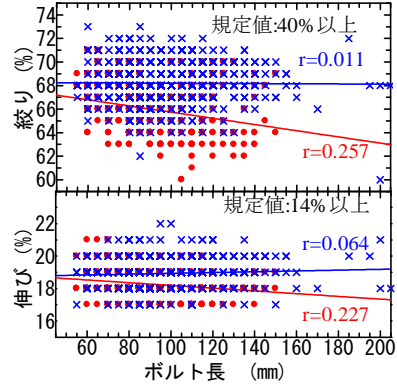


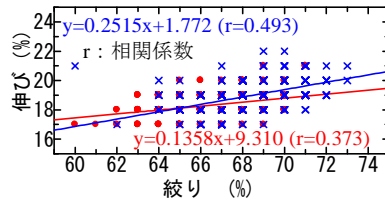
図 3-4-7 S10T (W) の伸び・絞りの調査結果



(a) 頻度分布

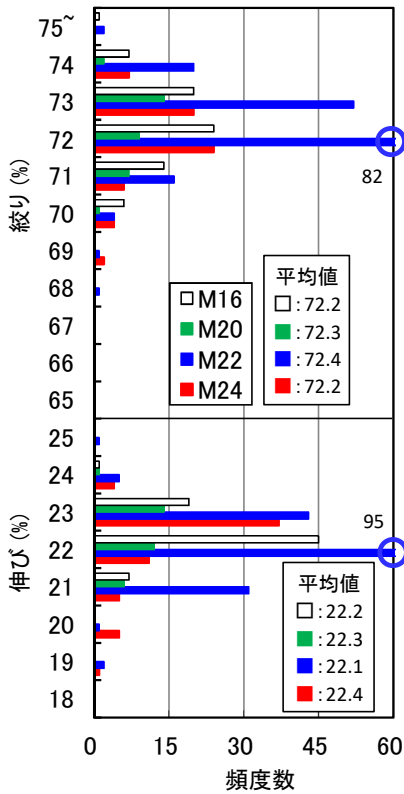


(b) ボルト長との関係

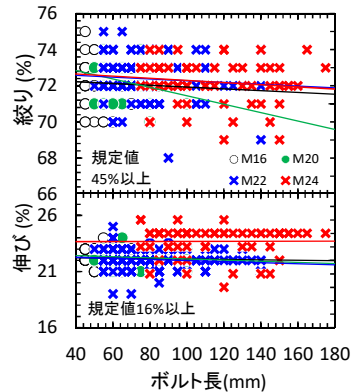


(c) 伸びと絞りの関係

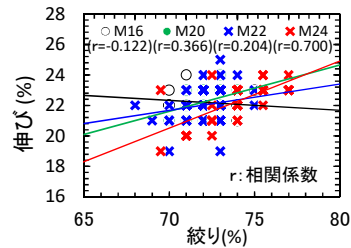
図 3-4-8 F10T(W)の伸び・絞りの調査結果



(a) 頻度分布



(b) ボルト長との関係



(c) 伸びと絞りの関係

図 3-4-9 F8Tの伸び・絞りの調査結果

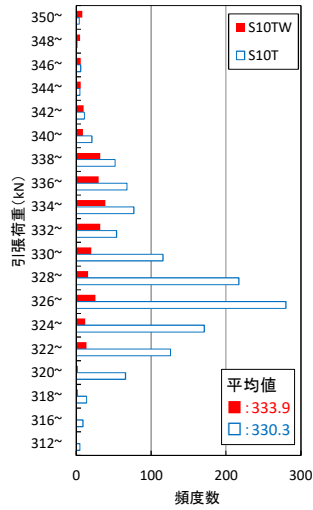
3-4-4 引張荷重

図 3-4-10 に引張荷重の調査結果を頻度分布およびボルト長との関係で示した。

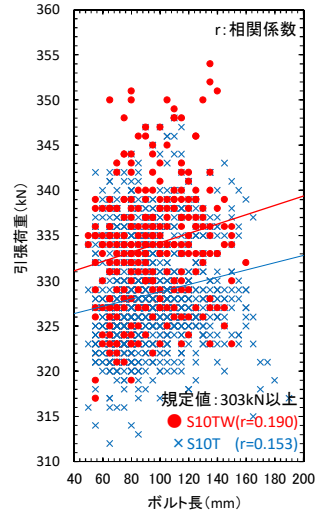
図 3-4-10(a), (b) は S10T(W) の関係を示すが、引張荷重の最小値は S10T で 312kN, S10TW で 317kN, 平均値は S10T で 328.4kN, S10TW で 333.9kN と、規定値(303kN) に対しそれぞれ S10T で 9kN, 25.4kN (規定値比率: 108%), S10TW で 14kN, 30.9kN (規定値比率: 110%) 大きかった。この規定値比率については、3-4-2 で示した JIS Z 2241 の 4 号試験片で行った S10T(W) の引張強さの比率と一致した。また、頻度分布 (図 3-4-10(a)) は S10T で 326kN, S10TW で 334kN 近傍をピークとする凸型の分布であった。S10TW については、比較的引張荷重の小さい 326kN にも小さなピークが見られた。ボルト長との関係 (図 3-4-10(b)) については、回帰直線は右肩上がりであるが、相関係数は S10T で 0.153, S10TW で 0.190 と小さかった。なお、図 3-4-5(b) で示した引張強さでは、まったく相関は見られなかったが、ボルト製品で試験を行った引張荷重とは傾向が異なった。表 3-4-1 に示す S10T(W) の標準偏差を比較すると、S10T は 5.47kN, S10TW は 6.93kN であり、S10TW のばらつきが大きい。これは、JIS Z 2241 の 4 号試験片で行った耐力および引張強さと同様の傾向である。

図 3-4-10(c), (d) は F10T(W) の関係を示すが、引張荷重の最小値は F10T で 313kN, F10TW で 317kN, 平均値はそれぞれ 327.4kN, 328.5kN と、規定値(303kN) に対しそれぞれ 24.4kN, 25.5kN (規定値比率はそれぞれ 108%, 109%) 大きかった。この規定値比率については、3-4-2 で示した JIS Z 2241 の 4 号試験片で行った F10T(W) の引張強さの比率と一致した。また、頻度分布 (図 3-4-10(c)) は F10T では 324~329kN の狭い範囲に分布しているのに対し、F10TW は 320~335kN の広い範囲に分布する全く異なる凸型の分布であった。ボルト長との関係 (図 3-4-10(d)) については、回帰直線は右肩上がりであるが、相関係数は F10T で 0.134, F10TW で 0.072 と小さかった。なお、図 3-4-5(e) で示した引張強さでも相関係数は小さいが、ボルト製品で試験を行った引張荷重と同様の右肩上がりの傾向が示された。

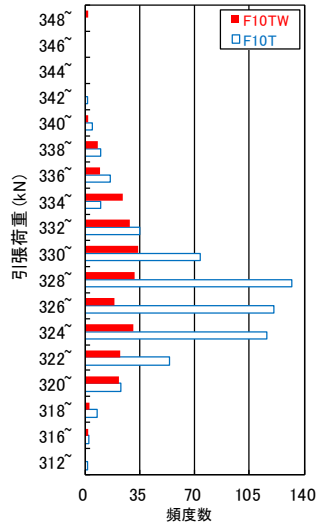
図 3-4-10(e), (f) は F8T の関係を示すが、引張荷重の最小値は規定値に対し 7~15kN 大きく、平均値は 11.8~25.0kN 大きかった (規定値比率では最小値が約 105%, 平均値が約 110%)。この規定値比率については、3-4-2 で示した JIS Z 2241 の 4 号試験片で行った F8T の引張強さの比率と概ね一致した。また、頻度分布 (図 3-4-10(e)) は M16 と M22 は平均値近傍をピークとする尖った凸型に分布しているのに対し、M20 はなだらかな凸型、M24 は凹型に分布する全く異なる分布であった。ボルト長との関係 (図 3-4-10(f)) については、回帰直線は M16 を除き右肩上がりであるが、相関係数はいずれの径でも 0.2 未満と明確な相関は認められなかった。



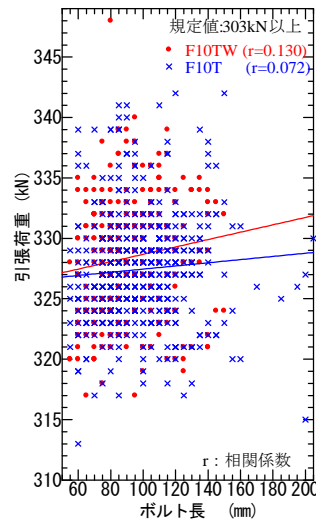
(a) S10T (W) の頻度分布



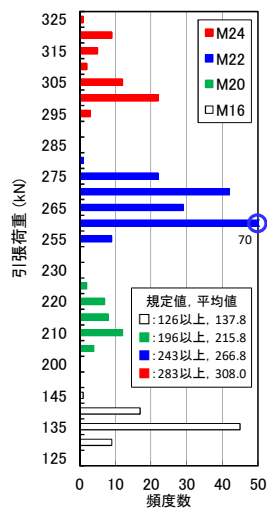
(b) S10T (W) のボルト長との関係



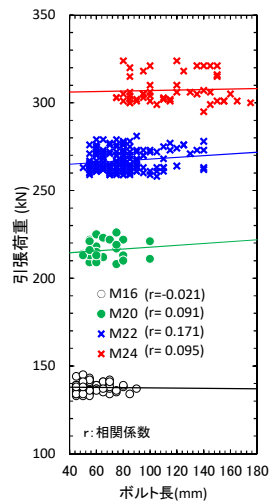
(c) F10T (W) の頻度分布



(d) F10T (W) のボルト長との関係



(e) F8T の頻度分布



(f) F8T のボルト長との関係

図 3-4-10 引張荷重の調査結果

3-4-5 硬さ

図 3-4-11~13 に硬さの調査結果を頻度分布および引張強さ・引張荷重とボルト硬さの関係で示した。なお、硬さの規定値は、ボルト、ナット、座金によって異なっている。これは、ボルトはボルトに要求される引張強さで決まる材料特性での硬さを規定しているが、座金はボルトとナットがめり込まない程度の硬さ、ナットはナット自身が滑らかに回転できる程度の硬さが要求されるので、硬さの規定値は、座金>ボルト>ナットとなっている。ただし、F8T はめっき処理を行うため、500°C近いめっき浴のなまし効果により実用上問題ない硬さで規定されている。

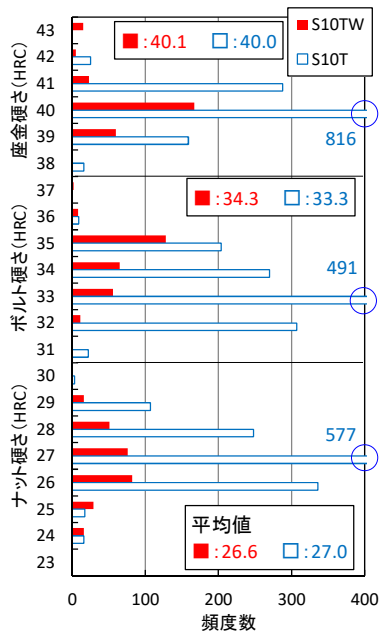
図 3-4-11 は S10T(W) の関係を示すが、ボルト、ナット、座金ともに分布の範囲 (図 3-4-11 (a)) は狭く、特に座金では 38~42HRC の範囲で標準偏差 A も S10T で 0.67HRC, S10TW で 0.94HRC と小さかった。各部位の平均値は、S10T がボルトで 33.3HRC, ナットで 27.1HRC, 座金で 40.1HRC, S10TW がボルトで 34.3HRC, ナットで 26.6HRC, 座金で 40.1HRC であり、規定値で示されているように座金>ボルト>ナットとなっていた。

ボルト材料についても一般の鋼材と同様、硬さが大きくなれば、引張強さ (引張荷重も同様) が大きくなる関係にある。そこで、図 3-4-11 (b), (c) は、それぞれ引張強さおよび引張荷重との関係を示すが、どちらも回帰直線は右肩上がりで相関係数も 0.4 を超え、相関は認められた。図 3-4-11 (b) に示す回帰直線から推定 (ナットおよび座金の硬さの平均値を代入) すると、ナットは 1043N/mm², 座金は 1128N/mm² 程度の強度を有するものと推定できる。

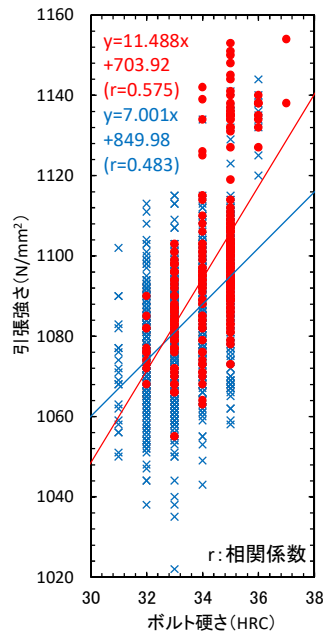
図 3-4-12 は F10T(W) の関係を示すが、ボルト、ナット、座金ともに分布の範囲 (図 3-4-12 (a)) は狭く、特に座金では 38~42HRC の範囲で標準偏差 A も F10T で 0.68HRC, F10TW で 0.46HRC と小さかった。各部位の平均値は、F10T と F10TW で大きな違いはなく、ボルトで約 33HRC, ナットで約 27HRC, 座金で約 40HRC であり、規定値で示されているように座金>ボルト>ナットとなっていた。

ボルト材料についても一般の鋼材と同様、硬さが大きくなれば、引張強さ (引張荷重も同様) が大きくなる関係にある。そこで、図 3-4-12 (b), (c) は、それぞれ引張強さおよび引張荷重との関係を示すが、どちらも回帰直線は右肩上がりで相関係数も一部を除けば 0.4 を超え、相関は認められた。図 3-4-12 (b) に示す回帰直線から推定 (ナットおよび座金の硬さの平均値を代入) すると、ナットは F10T で 1055N/mm², F10TW で 1047N/mm², 座金は F10T で 1133N/mm², F10TW で 1126N/mm² 程度の強度を有するものと推定できる。

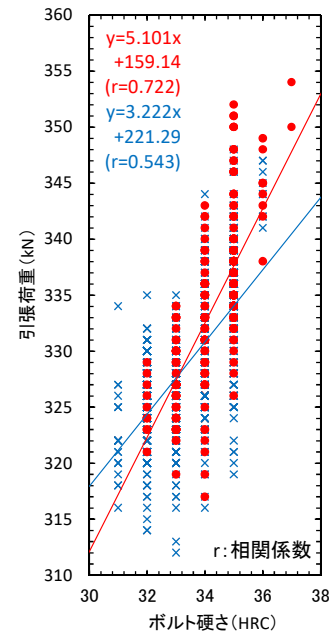
図 3-4-13 は F8T の関係を示すが、ボルト、ナット、座金ともに分布の範囲は平均値近傍をピークとする凸型の分布であった。各部位の平均値は、径による大きな違いはなく、ボルトおよびナットで約 27HRC, 座金で約 32HRC であり、規定値で示されているように座金>ボルト≒ナットとなっていた。



(a) 頻度分布

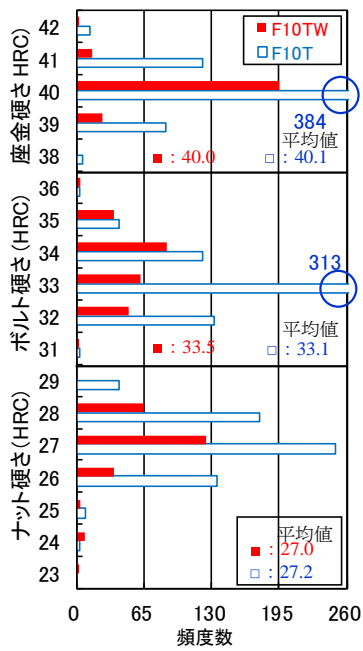


(b) 引張強さとの関係

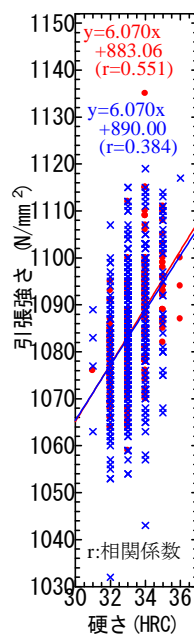


(c) 引張荷重との関係

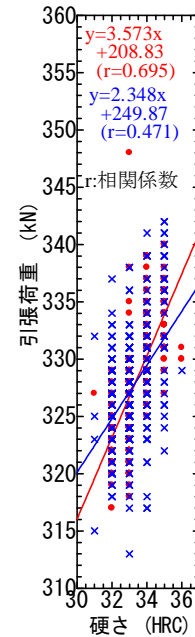
図 3-4-11 S10T(W) の硬さの調査結果



(a) 頻度分布

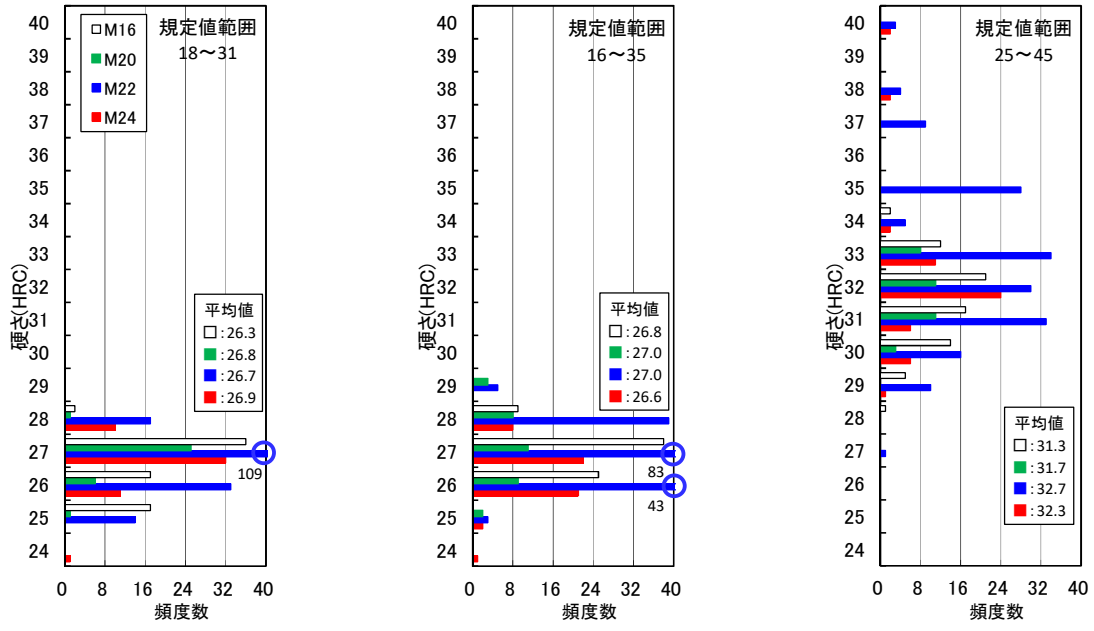


(b) 引張強さとの関係



(c) 引張荷重との関係

図 3-4-12 F10T(W) の硬さの調査結果

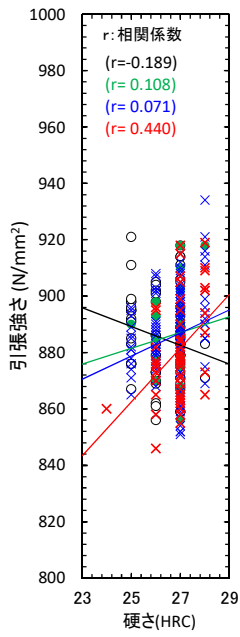


ボルト

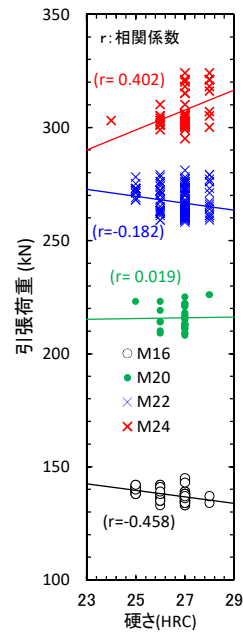
ナット

座金

(a) 頻度分布



(b) 引張強さとの関係



(c) 引張荷重との関係

図 3-4-13 F8T の硬さの調査結果

3-4-6 めっき膜厚

めっき膜厚の調査結果を図 3-4-14 に示す。平均値は 590～630g/m² の範囲にあり、最小値は 557g/m² であり、規定値比率はそれぞれ 110%前後、101%であった。また、頻度分布は全ての径に共通して、580g/m² にピークをもち、M16 と M22 に関しては 650～680g/m² にもピークをもつ分布であった。なお、ボルト、ナット、座金における付着量の違いはなく、ボルト径による違いも見られなかった。

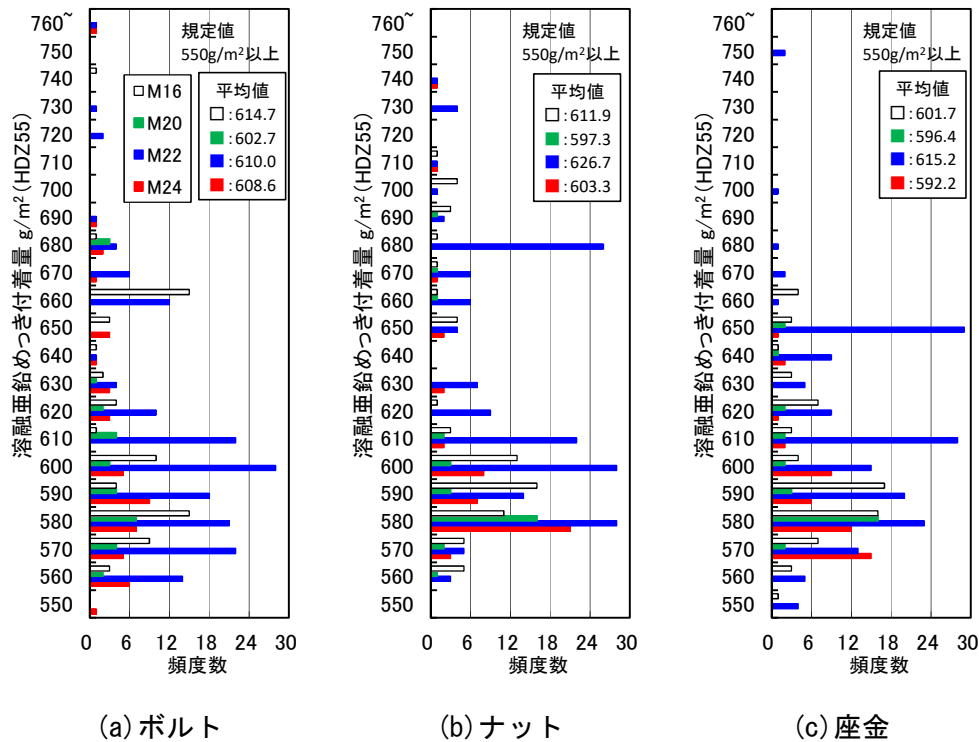


図 3-4-14 めっき膜厚の調査結果

3-5 統計調査のまとめ

トルシア形高力ボルト S10T(W)の導入軸力、高力六角ボルト F10T(W)と溶融亜鉛めっき高力ボルト F8T のトルク係数値、およびこれらの機械的性質を把握することを目的とした調査の結果をまとめると以下の通りである。

S10T(W)の導入軸力について、一定温度下で試験が行われている検査証明書および立会い試験の平均値は同等であった。また、温度が低くなればボルト軸力は小さくなる相関は認められ、その相関係数は S10T で 0.61, S10TW で 0.74 であった。なお、最大と最小の軸力差や標準偏差については、温度との相関は明確ではなく、同一試験における軸力のばらつきは温度の影響は低いと考えられる。

F10T(W)のトルク係数値について、一定温度下で試験が行われている検査証明書および立会い試験の平均値は同等であった。また、温度が低くなればトルク係数値や設定トルクは小さくなる弱い相関は認められた。ただし、高力六角ボルトについては、締付け日の温度条件でトルクを変えて行っているため、導入軸力には温度の影響はないと考えられる。

機械的性質について、今回調査した範囲ではすべて規定値を満たし、いずれの項目においても変動係数が 10%未満となっており、ばらつきの少ない材料であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット・解説，1983.10.
- 2) 鉄道総合技術研究所：摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット，鋼鉄道橋規格(SRS)，2010.8.
- 3) 日本鋼構造協会：構造用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット・解説，JSS II 09-2015，2015.3.
- 4) 日本規格協会：JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」，2013.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋編，2012.3.
- 6) 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.
- 7) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工ガイドブック，2016.5.

4. 施工性の調査

鋼橋の架設現場において、高力ボルト摩擦接合継手に使用するボルトは、トルシア形高力ボルト（以下、トルシアボルト）、高力六角ボルト（以下、六角ボルト）および溶融亜鉛めっき高力ボルト（以下、めっきボルト）を使用する。道路橋示方書¹⁾および鉄道構造物等設計標準²⁾では、これらのボルトの締付け基準が示され、トルク法（トルシアボルト、六角ボルト）での締付け軸力は、設計ボルト軸力の10%増し（M22では226kN）とし、ナット回転法（めっきボルト）での回転角は $120 \pm 30^\circ$ とすることが規定され、架設現場ではこれに従い、締付け作業を行っている。本章では、これらのボルトに関して、まず、架設現場で行われるボルト施工に関する実施作業を示す。そして、トルシアボルトと六角ボルトに関して、実際に行われる作業時間を実測し、両者の作業性の違いを示す。最後に、締付け作業の課題について示す。

4-1 調査方法

4-1-1 施工方法の違い

架設現場において実施されるボルト施工に関する一連の作業を図4-1-1に示す。ここでは、ボルト締付け作業だけでなく、作業前に行われる予備試験あるいは作業後の締付け確認検査等も示している。

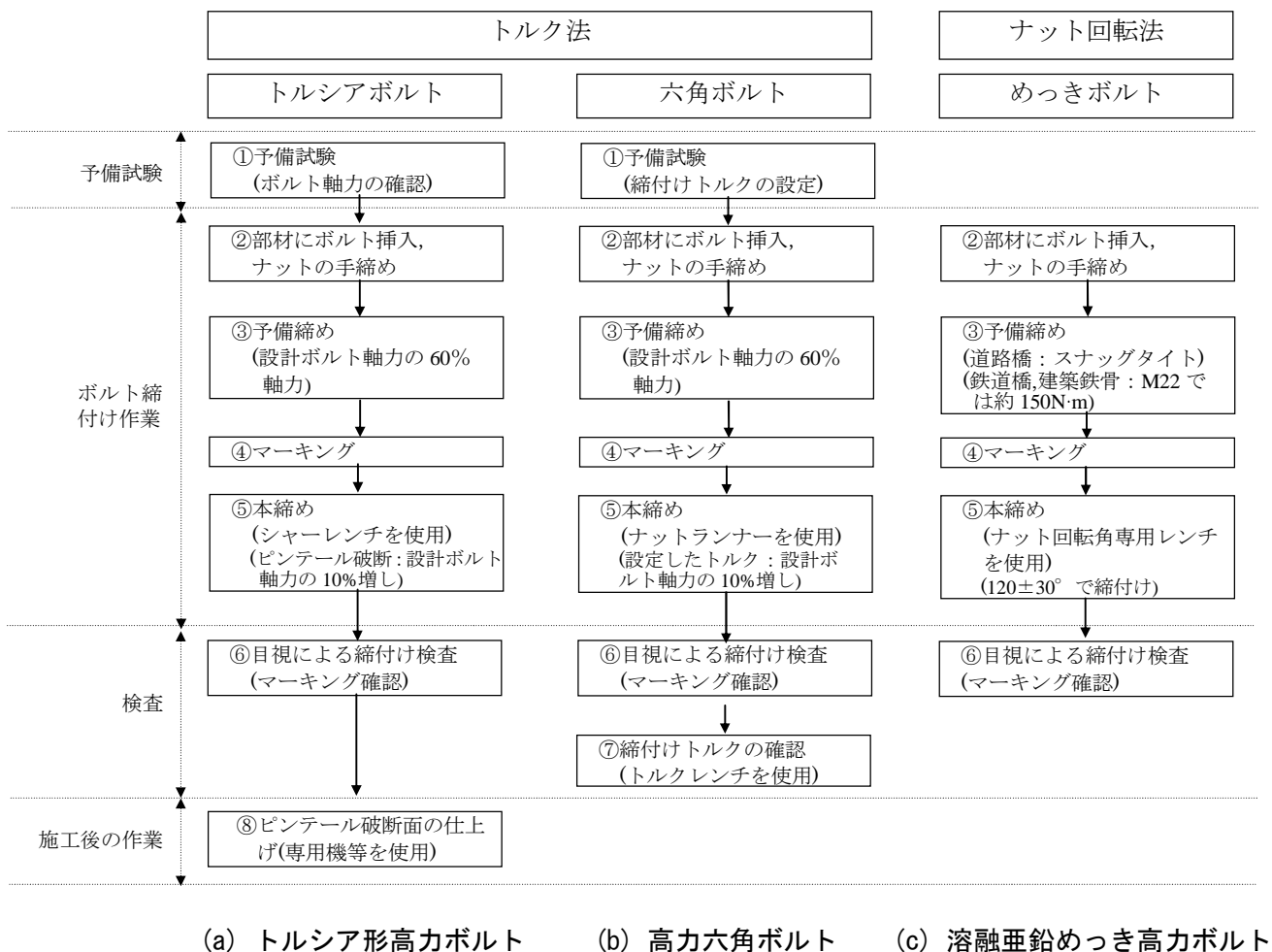


図 4-1-1 架設現場でのボルト施工の手順

(予備試験, ボルト締付け作業, 検査, 仕上げ作業)

(1) トルシア形高力ボルト

図4-1-1(a)はトルシアボルトの作業項目を示すが、まず、①の予備試験では、図 4-1-2に示す油圧式の軸力計にボルトを挿入し、これを用いて、日々、1製造ロット(5本)の導入軸力を確認し、5本の平均値が規定値(表4-1-1参照)を満足することを確認する。確認後は、予備試験確認シートに記録し、その後締付け作業に取り掛かる。

ボルト締付け作業として、まず、部材にボルトを挿入し、すべてのナットを手で締付ける(②)がこれらは各ボルト共通項目である。③の予備締め(一次締め)は、導入軸力の60%を目標としてトルク制御式インパクトレンチを用いて締付ける。その後、図 4-1-3に示すように、ナットにマーキング(④)を行う。⑤の本締めは、シャーレンチを用いて締付け、ピンテールが破断すれば締付け完了となる。図 4-1-4はその作業状況を示すが、最上段・最下段の行は、締付け前の状況(ピンテールあり)であり、その他のボルトは、締付け後の状況(ピンテールが破断)を示している。

目視による締付け検査として、⑥でピンテールの破断確認を行い、マーキングのずれを確認し、共回りがないことを確認する。トルシアボルトでは六角ボルトのような⑦の締付け確認はないが、最後に、⑧の塗装直前でピンテール破断面を仕上げる必要がある。この場合、破断面はグラインダーで仕上げるか、あるいは図 4-1-5に示すように専用機を用いて行う。

表 4-1-1 トルシアボルト(M22)の軸力管理の規定値 (単位: kN)

規定	常温時(10℃～30℃)	常温時以外 ^(*)
	ボルト軸力の 平均値	ボルト軸力の 平均値
道路橋の規定 ³⁾	212～249	207～261
鉄道橋の規定 ⁴⁾		
建築鉄骨の規定 ⁵⁾	212～256	205～268

(*) : 適用温度は、0～60℃ (鉄道のみ 0～50℃)



図 4-1-2 油圧式軸力計



図 4-1-3 マーキング (トルシアボルト)



図 4-1-4 シャーレンチによる締付け



図 4-1-5 ピンテール仕上げ専用機

(2) 高力六角ボルト

図 4-1-1 (b)は六角ボルトの作業項目を示すが、①の予備試験の手順は、ボルトを図 4-1-2に示す油圧式の軸力計に挿入し、予備試験で使用するボルトの製品検査証明書に記載されているトルク係数値（規定値は表4-1-2参照）と導入軸力（設計ボルト軸力の10%増し）から算出したトルクで、ナットランナーを用いてボルトを締付ける。そして、ボルトに導入された軸力（軸力計の針での軸力の読み値）とトルク（図 4-1-7に示すトルクレンチの針でのトルクの読み値）から式(4-1-1)を用いてトルク係数値を算定する。これを5本以上のボルトで行い、その平均値からトルク係数値を算定した上でその日のトルクを設定する。設定後は、予備試験確認シートに記録する。

ボルト締付け作業として、トルシアボルトと同様、②のボルトの挿入、ナットの手締め、③の予備締め（導入軸力の60%軸力）および④のマーキングを行う。⑤の本締めは、予備試験で求めたトルクを図 4-1-6に示すナットランナーに入力（セット）し、ボルト締付けを行う。このナットランナーは、設定したトルクに達すれば、自動的に締付け作業を終える機器である。

締付け検査として、⑥でマーキングのずれを確認し、共回りが無いことを確認する。そして、⑦のトルクの検査を行うが、締め付けたボルト一群の10%のボルトの締付けトルクの検査を行う^{1),2)}。トルクの検査は当日の作業終了後、図 4-1-7に示すトルクレンチを用いて行い、締付け作業者、記録者および立合い者の3名で通常行い、締付けトルクが所定のトルクであることを確認する。そして、検査記録シートに記入する。

表 4-1-2 六角ボルトのトルク係数値管理の規定値

規定	トルク係数値
道路橋示方書の規定 ¹⁾	0.110～0.160
JIS B 1186の規定 ⁶⁾ (鉄道橋・建築鉄骨)	0.110～0.150(*1)

*1：セットの種類 A

$$k = \frac{T}{d \times N} \quad \dots \dots (4-1-1)$$

k：トルク係数値

T：トルク(N・m)

d：ボルト径(m)

N：ボルト軸力(N)



図 4-1-6 ナットランナーによる締付け 図 4-1-7 トルクレンチによるトルク確認

(3) 溶融亜鉛めっき高力ボルト

図 4-1-1(c)はめっきボルトの作業項目を示すが、ナット回転法では、トルシアボルトや六角ボルトで行う予備試験で確認する項目はなく、②のボルト挿入・ナットの手締めからボルト作業が始まる。③の予備締めは、道路橋ではスナッグタイト、すなわち、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としている¹⁾。架設現場ではインパクトレンチで締め付ける場合が多い。一方、鉄道橋および建築鉄骨では、トルクで規定しており、M22では約150N・m、M24では約200N・mとしている^{2), 5)}。その後、④のマーキングを行う。ここでのマーキングは、図 4-1-3に示すトルシアボルトや六角ボルトと位置が異なり、図 4-1-8に示すナットのコーナー部にマーキングする。その後、⑤の本締めをナット回転角専用レンチで120° ナットを回転させるが、その専用レンチは高い精度で締付けができる。⑥の目視確認は、④ではコーナー部でマーキングしたが、ナット形状は六角形であり、1コーナーを回転すれば60° 回転するので、120° の回転は2コーナー回転すればよく、目視で120° の回転を確認することができる。必要に応じてナット回転角用の回転定規を使用することもある。

なお、ボルト長が径の5倍を超える場合は、事前に予備試験を実施して目標回転角を決定することが各規準に記載されている。

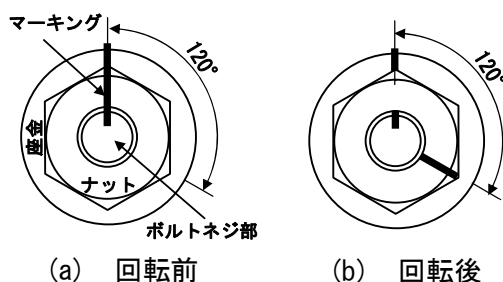


図 4-1-8 めっきボルトのマーキング

(4) 締付け法の違いによる作業の比較

(1)～(3)で示したように、使用するボルトにより締付け方法や検査方法等が大きく異なる。ただし、ボルト締付け作業については、使用する機器や締付け方法が異なるものの、いずれも機械式の専用機器を用いており、作業時間に大きな違いは生じないものと考えられる。

作業時間に違いが生じると考えられる項目として、予備試験の有無、締付け後の検査および締付け後

の作業の有無である。締付け法の中で、めっきボルトで使用するナット回転法は、予備試験を行う必要はなく、また、締付け後の検査も目視のみで、六角ボルトやトルシアボルトのようなトルクの実測作業やその後の作業（仕上げ等）を行う必要がなく、最も作業工程が少ない施工方法であり、ボルトの施工としては最も効率のよい締付け法であると考えられる。

トルシアボルトと六角ボルトの大きな違いとしては、前者はピンテールの破断面の仕上げ作業があり、後者はトルクレンチによる締付けトルクの実測作業がある。そこで、トルシアボルトと六角ボルトの予備締め以降の実作業も含めて作業時間の実測を行い、作業時間を定量的に評価することとする。

4-1-2 計測方法

計測は、鉄道・運輸機構および橋梁製作会社5社で行い、鉸桁橋あるいは箱桁橋の構造部材を対象とした。六角ボルトの締付けでは、新規の高力ボルトであれば仮設部材でも対象としたが、反力レバーが空回りするボルト中心間隔が大きい継手、狭隘箇所などでトルシアボルトが適用できないために六角ボルトを使用した継手は対象外とした。

計測項目は、図 4-1-1に示す③予備締め、⑤本締め、⑥目視による締付け検査、⑦締付けトルクの確認、⑧ピンテール破断面の仕上げとした。なお、トルシアボルトと六角ボルトで同じ作業となる②部材にボルト挿入、ナットの手締め、④マーキングについては計測の対象外とした。さらに、締付け作業の段取り、締付け作業中の作業員の移動、ドリフトピンを挿入して孔位置を合わせる作業は、現場条件や構造条件で時間差が生じ、定量的な判断ができないと考えて計測の対象外とした。

4-2 調査結果

計測結果を表 4-2-1 に示す。計測数量は、トルシアボルト（本節のみ S10T と略す）では 41 継手 3590 本のボルト、六角ボルト（本節のみ F10T と略す）では 14 継手 1484 本のボルトを計測した。計測結果は、継手毎に計測した締付け時間を 1 本当りの締付け時間に算定してその平均値を示した。また、目視検査、締付けトルクの確認、ピンテール破断面の仕上げも同様に継手毎に集計した。

以下の 4-2-1～3 ではボルト締付け時間、検査時間、施工後作業時間の各作業について、計測結果で示された特徴を箇条書きで示す。

4-2-1 ボルトの締付け

- ・締付け時間の合計は、S10T の全姿勢よりも F10T の全姿勢の方が約 1.4 秒/本早い。
- ・本締めは、S10T と F10T の全姿勢で比較すると差はほぼなかった。作業環境で比較すると S10T では上空よりも地組箱内の方が約 0.9 秒/本遅いが、F10T では上空よりも地組の方が約 1.5 秒/本早い。
- ・本締めにおいては、S10T ではシャーレンチ（図 4-1-4 参照）を使用し、F10T ではナットランナー（図 4-1-6 参照）を使用している。シャーレンチがピンテールを破断する時間とナットランナーが所定のトルクに達する時間の差があるものの地組や上空での作業環境による差が大きいと考えられる。ちなみに、シャーレンチとナットランナーでは、ナットランナーの方が締付け時間は短い傾向にあり、ナットランナーは反力レバーの回転時間が短いほど早くなり、シャーレンチの方は破断したピンテールの回収にてまどると遅くなる。

表 4-2-1 計測結果

施工ボルト						締付け時間 (秒/本)			目視 検査	トルクの確認			ピンテール破断面の仕上げ					
													専用機			グラインダ		
径	等級	作業 環境	姿勢	継手 数	本数	予備 締め	本締 め	合計	秒/本	継手 数	本数	秒/本	継手 数	本数	秒/本	継手 数	本数	秒/本
M22	S10T	地組 箱内	下向き	15	996	2.9	4.8	7.7	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			横向き	10	1,612	2.8	4.5	7.2	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			全姿勢	25	2,608	2.9	4.7	7.5	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		上空	下向き	10	424	5.3	4.1	9.4	0.5	—	—	—	1	27	26.2	1	80	9.3
			横向き	6	558	4.9	3.4	8.2	0.5	—	—	—	1	40	19.0	1	208	4.4
			全姿勢	16	982	5.2	3.8	9.0	0.5	—	—	—	2	67	22.6	2	288	6.8
	全姿勢	41	3590	3.9	4.3	8.2	0.5	—	—	—	2	67	22.6	2	288	6.8		
	F10T	地組	下向き	4	180	1.8	3.1	4.9	0.5	4	18	9.0	—	—	—	—	—	—
			横向き	4	960	3.2	3.9	7.1	0.5	4	100	24.1	—	—	—	—	—	—
			全姿勢	8	1,200	2.6	3.5	6.1	0.5	8	124	16.6	—	—	—	—	—	—
		上空	下向き	4	32	2.8	5.5	8.2	0.7	4	8	21.6	—	—	—	—	—	—
			横向き	2	252	2.9	4.1	7.0	0.6	2	26	35.3	—	—	—	—	—	—
			全姿勢	6	284	2.8	5.0	7.8	0.6	6	34	26.2	—	—	—	—	—	—
	全姿勢	14	1484	2.7	4.2	6.8	0.6	14	158	20.7	—	—	—	—	—	—		

※ S10T : トルシアボルト, F10T : 六角ボルト

- ・予備締めは、S10T の全姿勢よりも F10T の全姿勢の方が約 1.2 秒/本早い。作業環境で比較すると S10T では上空よりも地組箱内の方が約 2.3 秒/本早い。これは、両ボルトともに締付け機はインパクトレンチを使用しており、作業環境として足場の制約、構造条件として連結板周辺にウェブや補剛材の近接、または連結板にスタッドジベルがあると締付け時間が長くなる傾向がある。
- ・予備締めと本締めに比較すると S10T の全姿勢では本締めよりも予備締めの方が 0.4 秒/本早く、F10T の全姿勢も同様に 1.5 秒/本早い。これは、差の大きい F10T では予備締めに使用するインパクトレンチと本締めに使用するナットランナーの性能の違いであり、インパクトレンチは締付けトルクの誤差は大きい。作業時間は早い。対して、ナットランナーは締付けトルクの誤差は小さいが作業時間は長くなる。なお、S10T の上空での予備締めがその他の作業環境と比較して時間を要しているが、16 継手中 13 継手が同一現場での結果であり、集計後のヒアリングでは予備締めは若手クラスが、本締めは職長クラスが担当しており、上空での作業で熟練度の差が大きく現れた結果と考えられる。
- ・下向き、横向きの姿勢の違いを締付け時間の合計で比較すると、S10T では下向きよりも横向きの方が早く、地組箱内で 0.5 秒/本、上空で 1.2 秒/本の差があった。しかし、F10T では地組において下向きよりも横向きの方が 2.2 秒/本遅く、上空においては下向きよりも横向きの方が 1.2 秒/本早い。これは、F10T の地組において下向きがその他の結果と比較して早い。この結果は同一現場の 4 継手から得られた結果であり、その他の現場でもあり得る時間ではあるものの早い時間のみが集計された結果である。

4-2-2 検査

- ・目視検査は、S10T で 0.5 秒/本、F10T で 0.6 秒/本であった。施工ボルトの等級、作業環境、姿勢にかかわらず、同程度の結果であった。

- ・締付けトルクの確認は、地組の全姿勢で 16.6 秒/本，上空の全姿勢で 26.2 秒/本であった。
- ・締付けトルクの確認では，作業環境による影響が大きく，重くて長いトルクレンチ（図 4-1-7 参照）を取り扱うため，ソケットのナットにセットするときやグリップを回転する際に補剛材や二次部材と干渉することによって時間を要したと考えられる。

4-2-3 施工後作業

- ・ピンテール破断面の仕上げは，専用機（図 4-1-5 参照）の全姿勢が 22.6 秒/本，グラインダーの全姿勢が 6.8 秒/本であった。
- ・ピンテール破断面の仕上げ作業は，専用機が破断面の凹部の底まで全体を削る必要があるのに対して，グラインダーは凹部を集中して仕上げられるため研削量を少なくできる。ただし，グラインダーはピンテール破断面の円周部の仕上げには不向きである。

4-2-4 トルシア形高力ボルト S10T と高力六角ボルト F10T の作業時間の違い

各作業時間は，4-2-1～3 の項に示したが，本項では S10T および F10T の各作業，各作業工程および合計時間の違いを検討する。表 4-2-2 は，表 4-2-1 で示した作業時間の各工程の平均値を集計した結果をボルト 1 本あたりの作業時間で示す。なお，F10T の締付けトルクの確認は，実作業として 20.7 秒/本を要するが全体の 10%のボルトを対象に実施するので，ここでは全ボルトに対する時間としてボルト 1 本あたり 2.1 秒に換算している。また，S10T のピンテール破断面の仕上げは作業時間が早いグラインダー処理を対象に示している。

ボルト締付け工としては，S10T で 8.7 秒/本，F10T で 9.5 秒/本であり，F10T の方がボルト 1 本あたり 0.8 秒であるが作業時間は長くなった。これに現場塗装工として行われる S10T のピンテール破断面の仕上げ時間を考慮すれば，ボルト 1 本あたり S10T の方が 6.0 秒（15.5-9.5 秒）長く時間を要し，作業時間が逆転した。例えば，積算上の 1 日の最大締付け本数 1670 本を施工したと仮定すれば，S10T では 167 分/日（ $1670 \times 6 \div 60$ ）多くの時間を要する結果となる。

表 4-2-2 各作業時間の比較（単位：秒/本）

種別	ボルト締付け工				現場塗装工	合計
	締付け時間	目視検査時間	トルク確認時間	合計	破断面仕上げ時間	
S10T	8.2	0.5	—	8.7	6.8 ^{(*)2}	15.5
F10T	6.8	0.6	2.1 ^{(*)1}	9.5	—	9.5

注) *1：検査は全数の 10%であり，全数量の対する 1 本あたりで換算。

*2：グラインダー仕上げで計算。

4-3 考察

前節においてボルト施工に関する作業時間は，ボルト締付け工では六角ボルトの方が 0.8 秒/本長い，現場塗装工（塗装直前でのピンテール破断面の仕上げ）を考慮するとトルシアボルトの方が 6.0 秒/本長くなることを示した。しかしながら，土木建築の構造物に使用される高力ボルトの 90%強がトルシアボルトであるとの文献¹¹⁾もあり，大半の橋梁技術者は，トルシアボルトの方が作業効率がよいとの認識を

持っている可能性が高い。ここでは、その理由を考察する。

六角ボルトの採用が少ない要因として、予備試験での「締付けトルクの設定」と締付け後の「締付けトルクの確認」の2項目が考えられる。トルシアボルトの予備試験では、4-1-1(1)で示した5本のボルト軸力を確認するだけであるが、六角ボルトでは、4-1-1(2)で示した5本以上のボルト軸力の確認だけでなく、トルクレンチで締付けトルクを確認し、この両者からトルク係数値を算出した上でその日の締付けトルクを設定する必要がある。トルクの設定が煩雑であることが1つの理由と考えられる。もう1つの締め付け後のトルクの確認では、各基準では締め付けたボルト一群の10%のボルトの締め付けトルクの検査を行う必要がある^{1),2)}。これを当日の作業終了後、締付け作業員、記録者および立合い者の3名で行い、検査書類を作成する。このような作業はトルシアボルトにはなく、六角ボルトでは単純に一工程の作業が増える以上に負担があることが敬遠される要因と思われる。事実、締付けトルク確認の作業までは、六角ボルトの方が0.8秒/本トルシアボルトより時間を要した。

一方、トルシアボルトではピンテール破断面の処理が十数年前から定着してきた。これは、塗装の密着性を向上させるためであるが、この作業は塗装直前に素地調整の一作業として塗装工が行っている。すなわち、ボルト締付け作業と切り離されているため、総合的な検証が行われてこなかった。ちなみに、今回の計測結果から締付けトルクの確認は3人工、ピンテール破断面の仕上げは1人工であることを考慮すると、作業時間は締付けトルクの確認では(20.7秒/本×10%×3人工=)6.2秒/本・人工、ピンテール破断面の仕上げ(グラインダー)では(6.8秒/本×100%×1人工=)6.8秒/本・人工となり、人工を考慮しても締付けトルクの確認の方が作業時間は短く、専用機(22.6秒/本)を使用すればトルシアボルトの方が作業時間はさらに長くなる。

以上のように、架設担当技術者(現場代理人や主任技術者等)やボルト締付け作業員にボルト施工について確認すれば、ピンテール破断面の仕上げ作業には関与せず、むしろ六角ボルトでは自ら締付けトルクの確認を行うので、一工程多い六角ボルトの方が負担が大きいと述べる。これまで、作業に関するヒアリングは当然ながら架設担当技術者に行っていた。つまり、トルシアボルトの方が作業時間が短いと考えられるのはピンテール処理を考慮していなかったことが要因と考えられる。

なお、予備試験での比較については施工時間調査では実施していないが、3章、5章によれば、最近の六角ボルトの予備試験は5本のボルトで実施されており、施工基準が制定された当初に10本~20本の試験を実施した頃と比較すれば機械制御のバラツキは少なくなっていると考えられ、作業負担は軽減されていると推測される。

なお、今回の比較では対象としなかったが、トルシアボルトと六角ボルトを比較する場合、以下の違いがあることも留意頂きたい。

- ・ボルト頭の形状の違いから塗装面積が異なる。六角ボルト(M22:6.70 m²/1000本)ではトルシアボルト(M22:5.06 m²/1000本)の約3割増の塗装面積となる。
- ・ボルトが共回りした場合には、トルシアボルトは丸頭でボルト本体を押えにくいため取り外しが容易ではない場合がある。
- ・トルシアボルトには温度依存性があり、導入軸力の確認が困難である。
- ・六角ボルトはワッシャーが2枚必要で、トルシアボルトはワッシャーが1枚である。

セット購入時はボルト、ワッシャー(1枚)、ナットのセットと別途ワッシャーが搬入される。そのため、連結時のボルト挿入前に、ボルトセットの組み直し作業をする必要がある。ボルト挿入作業時においても当然ながら、2枚あるワッシャーに注意しながら作業することになる。

六角ボルトは、トルシアボルトよりも5mm長いボルトを使用する。六角ボルトはトルシアボルトより10円/kg値段が高い（建設物価¹²⁾）ことに加えて5mm分(M22：約15g/組)増加する。

4-4 締付け作業の課題

本章ではトルシアボルトと六角ボルトの作業時間の計測をおこなった。一般に六角ボルトよりトルシアボルトの方が作業性がよいとの認識が一般的であり、設計時の使用ボルトの選定でトルシアボルトを選定してきた。しかし、ボルト施工の実際の作業時間は、ピンテールの破断面を仕上げる必要性が生じた場合、トルシアボルトは六角ボルトより作業時間が増える。本計測結果から判断すると、ボルト1本当たりトルシアボルトは六角ボルトより6秒多く時間を要する結果となった。

トルシアボルトでは、破断面の仕上げに時間を要することで作業時間が多くなるが、その仕上げ程度については必要条件が明確ではない。ピンテール破断面の仕上げは削る量により作業時間が左右されるためその検証が必要である。なお、耐候性鋼材を使用した無塗装橋梁ではピンテール破断面の仕上げが不要である。

六角ボルトでは、トルク確認による時間とその書類整理に時間を要する。トルク確認では、大きくて重いトルクレンチを連結部周辺の部材を避けながら使用する必要があり、高力ボルトの締付けトルクが大きいこともあり、人力では必要アーム長がどうしても長くなる。ただし、最近では、確認したトルクや回転角のデータをタブレット端末等に送信できる機能がある機種もあり、データ整理は今後省力化されていくことが予想される。機械の開発に期待することになるが、小型のトルクレンチで力作業がなくなれば時間短縮に加えて省力化ができるもと考えられる。

今回作業時間計測を実施していないナット回転法は、4-1-1(4)で示したようにトルシアボルトおよび六角ボルトを用いたトルク法よりも作業項目が少ない締付け方法である。しかし、ナット回転法の適用は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^{1),2)}。これは、ナット回転法での締付けは、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。これについては、道路橋示方書で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のナット回転法の適用に向けた検討は、昭和41年から日本鋼構造協会の接合小委員会で行われた⁷⁾。ここでは、遅れ破壊に関して、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。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^{8),9)}、実施工が行われた¹⁰⁾。その後40年、F10Tでのナット回転法を適用した事例は報告されていない。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を施した接触面でF10Tを適用した事例はなく、また、その適用性は不明であった。そこで、Ⅱ編では、F10Tのナット回転法の適用の拡大に向けた検討を行った。ここでは、ボルトをF10TのM22、M24を用い、鋼材の板厚の薄板、中板および厚板を用いて、導入軸力試験、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を実施し、実用化に向けた基礎データを取得した。詳細は、Ⅱ編を参照されたい。

現状では、ナット回転法は、適用するケースが少ないので、ほとんど作業性を検討されることがなかったが、4-1-1(3)で示したようにその他のボルト施工法と比較して、予備試験を行う必要はなく、また、締付け後のトルクの実測や施工後の作業（仕上げ等）を行う必要もなく、最も作業項目が少ない施工法であり、定性的には最も効率のよい締付け法であると考えられる。ただし、その作業の実測は実施でき

ていないので、今後、これを行い定量的にナット回転法の作業効率を評価していく必要があると考えられる。また、ボルト施工の効率化を考えた場合、ナット回転法の適用の拡大を図っていくことも重要であると考えられる。

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) 日本道路協会：摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット・解説, 1983.10
- 4) 鉄道総合技術研究所：摩擦接合用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, 鋼鉄道橋規格(SRS), 2010.8.
- 5) 日本鋼構造協会：構造用トルシア形高力ボルト・六角ナット・平座金のセット・解説, JSS II 09-2015, 2015.3.
- 6) 日本産業規格：JIS B 1186 「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」, 2013
- 7) 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, pp17-31, 1973.5.
- 8) 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, pp136-139, 1975.3.
- 9) 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, pp136-138, 1977.3.
- 10) 大貫一生：F10T ボルトの回転法による施工, 首都高技報, No.9, pp130-133, 1977.3.
- 11) 日本鋼構造協会：高力ボルト接合技術の現状と課題, 2013.3.
- 12) 建設物価調査会：建設物価, 2018.6.

5. ボルト施工の作業項目調査

鋼橋の架設現場では、それぞれの現場において施工計画書を作成して施工している。施工計画書をもとにボルト施工を実施しているため、施工計画書に記載されている項目・内容は実際の現場で実施している作業となる。そこで、施工計画書および関連基準との関係性を整理することで、実際の現場施工と基準の関係を確認する。

5-1 施工計画書の調査および調査対象

ボルト施工項目の調査は、橋梁製作会社 7 社 17 工事の施工計画書を調査した。また、関連基準は、道路橋示方書¹⁾ (以下、道示)、鋼道路橋施工便覧²⁾ (以下、施工便覧)、土木工事共通仕様書³⁾ (以下、共通仕様書) を調査した。施工計画書の調査では、作業項目を抽出して現場で実施されている作業内容および管理項目について確認し、関連基準との関係性を整理する。調査対象とするボルトは、トルシア形高力ボルト (以下、トルシアボルト)、高力六角ボルト (以下、六角ボルト)、溶融亜鉛めっき高力ボルト (以下、めっきボルト) の 3 種類で整理した。調査した施工計画書はトルシアボルト 7 工事、六角ボルト 5 工事、めっきボルト 5 工事であった。

5-2 調査結果

施工計画書の調査で対象とした 3 種類のボルトで共通した項目は、①フローチャート、②ボルトの保管、③軸力計の検定、④現場予備試験、⑤締付け作業要領、⑥検査の 6 項目であった。それぞれについて詳細項目を抽出し、その記載の有無を調査する。施工計画書はボルトの種類毎にまとめ、施工計画書を A~Q の記号で示した。また、①~⑥の項目それぞれについて関連基準との関係性について整理した。

5-2-1 フローチャート

フローチャートに記載されていた詳細項目は、施工順に「購入」「輸送」「保管」「現場出庫」「軸力計の点検」「締付け機の整備点検」「現場予備試験」「接合面処理」「仮ボルト締付け」「ボルト挿入」「予備締め」「マーキング」「本締め」「検査」「共回り等による入替」の 15 項目であり、対象とした 3 種類のボルトは締付方法や使用機械が異なるが記載された詳細項目は共通していた。

表 5-2-1 にフローチャートの記載項目と関連基準の規定項目を示す。表中の数値は各関連基準の章節番号である。フローチャートに記載された項目は、概ね関連基準に規定されている項目であるが、「購入」「現場出庫」「ボルト挿入」については関連基準に記載はなかった。フローチャートは、施工手順を示すものであり、「購入」「現場出庫」は作業の始まりを、「ボルト挿入」は挿入方向に注意する必要があることから作業要領して必要な項目であることが考えられる。また、「購入・輸送」からスタートするフローチャートと「現場予備試験」からスタートするフローチャートがあった。

表 5-2-2 にトルシアボルトのフローチャートに関する記載項目を示す。表中の○印は記載されていたことを示す。また、すべての施工計画書に記載された項目は濃い朱色でハッチングし、半数以上の施工計画書で記載された項目を薄い朱色でハッチングした。

トルシアボルトですべての施工計画書に記載された項目は、「現場予備試験」「予備締め」「マーキング」「本締め」の 4 項目であった。また、少数の項目は、「現場出庫」「締付け機の整備点検」(3 工事)、「仮ボルトの締付け」(2 工事) の 3 項目だった。

表 5-2-1 フローチャート記載項目と関連基準の整理

フローチャートの記載項目	道示 ¹⁾	施工便覧 ²⁾	共通仕様書 ³⁾
購入			
輸送	20.9.2 高力ボルトの品質管理及び保管	2.3.4 保管・運搬	
保管	20.9.2 高力ボルトの品質管理及び保管	3.5.6 (3) 高力ボルトの保管	6. ボルトの包装と現場保管
現場出庫			
軸力計の点検	20.9.4 ボルトの締付け 2) 機械器具の検定	3.5.6 (5) トルク法による施工 3) 軸力計及びトルクレンチの検定	3. ボルトの締付け
締付け機の整備点検	20.9.4 ボルトの締付け 2) 機械器具の検定	3.5.6 (5) トルク法による施工 4) 締付け機の検定	3. ボルトの締付け
現場予備試験	20.9.4 ボルトの締付け 3) 締付けボルト軸力	3.5.6 (5) トルク法による施工 5) 締付け機の調整 3.5.6 (6) ナット回転法による施工	4. 締付けボルト軸力
接合面処理	20.9.1 施工一般 4) 接合面の処理方法 20.9.3 接合面の処理	3.5.6 (5) トルク法による施工 1) 接合面の処理	1. 一般事項 (1) 接触面を塗装しない場合 (2) 接触面を塗装する場合
仮ボルト締付け	20.11.4 組立	3.5.5 部材の組立	
ボルト挿入			
予備締め	20.9.4 ボルトの締付け 1) ボルトの締付け	3.5.6 (5) トルク法による施工 6) ボルトの締付け 3.5.6 (6) ナット回転法による施工	5. ボルトの締付け順序
マーキング	20.9.4 ボルトの締付け 4) 締付け順序 20.9.5 締付け完了後の検査	3.5.6 (5) トルク法による施工 6) ボルトの締付け 7) 検査 3.5.6 (6) ナット回転法による施工	5. ボルトの締付け順序 7. 締付け確認
本締め	20.9.1 施工一般 3) 締付け方法並びに締付け軸力の管理 および検査方法 20.9.4 ボルトの締付け 1) ボルトの締付け 3) 締付けボルト軸力 4) 締付け順序	3.5.6 (5) トルク法による施工 6) ボルトの締付け	3. ボルトの締付け 4. 締付けボルト軸力 5. ボルトの締付け順序
検査	20.9.1 施工一般 3) 締付け方法並びに締付け軸力の管理 および検査方法 20.9.5 締付け完了後の検査	3.5.6 (5) トルク法による施工 3) 軸力計及びトルクレンチの検定 7) 検査 3.5.6 (6) ナット回転法による施工	7. 締付け確認
共回り等による入替	20.9.5 締付け完了後の検査	3.5.6 (5) トルク法による施工 7) 検査	

表 5-2-3 に六角ボルトのフローチャートに関する記載項目を示す。六角ボルトでは、5 工事中 4 工事がフローチャートを記載していた。記載した 4 工事のすべてに記載された項目は、トルシアボルトと同様の 4 項目に「接合面処理」を加えた 5 項目であった。少数の項目は「購入」「現場出庫」「軸力計の点検」「締付け機の整備点検」「共回り等による入替」(2 工事)、「仮ボルト締付け」(1 工事) の 6 項目だった。トルシアボルトと比較すると簡素化されている傾向があった。理由として、トルシアボルトを主に使用し、六角ボルトは限定的に使用していることが理由と考えられる。

表 5-2-4 にめっきボルトのフローチャートに関する記載項目を示す。めっきボルトでは、すべての施工計画書に記載された項目はトルシア形高力ボルトと同様の 4 項目であった。少数の項目は、「軸力計の点検」「締付け機の整備点検」が 2 社、「仮ボルトの締付け」が 1 社の 3 項目であった。関連基準において、めっきボルトの締付け方法であるナット回転法では、ボルト長さがボルト径の 5 倍以下の場合に予備試験の記載はない¹⁾が、全社で現場予備試験を記載していた。

フローチャートの記載項目の集計から、ボルトの施工手順として、「現場予備試験」「予備締め」「マーキング」「本締め」の 4 項目が最も重要であること推察される。

表 5-2-2 トルシアボルトのフローチャートに関する記載項目

詳細項目	A	B	C	D	E	F	G
購入	○	○		○		○	
輸送	○	○	○	○	○	○	
保管	○	○		○	○	○	
現場出庫		○		○		○	
軸力計の点検	○			○	○	○	
締付機の整備点検	○				○	○	
現場予備試験	○	○	○	○	○	○	○
接合面処理		○		○	○	○	○
仮ボルト締付け			○				○
ボルト挿入	○		○	○	○	○	○
予備締め	○	○	○	○	○	○	○
マーキング	○	○	○	○	○	○	○
本締め	○	○	○	○	○	○	○
検査	○		○	○	○	○	○
共回り等による入替	○		○	○	○	○	

表 5-2-3 六角ボルトのフローチャートに関する記載項目

詳細項目	H	I	J	K	L
購入	○		○		
輸送	○		○	○	
保管	○		○	○	
現場出庫	○		○		
軸力計の点検			○	○	
締付機の整備点検			○	○	
現場予備試験	○		○	○	○
接合面処理	○		○	○	○
仮ボルト締付け					○
ボルト挿入			○	○	○
予備締め	○		○	○	○
マーキング	○		○	○	○
本締め	○		○	○	○
検査			○	○	○
共回り等による入替			○	○	

表 5-2-4 めっきボルトのフローチャートに関する記載項目

詳細項目	M	N	O	P	Q
購入	○	○	○		
輸送	○	○	○		
保管	○	○	○		
現場出庫		○	○		
軸力計の点検	○		○		
締付機の整備点検	○		○		
現場予備試験	○	○	○	○	○
接合面処理		○	○		○
仮ボルト締付け					○
ボルト挿入	○		○	○	○
予備締め	○	○	○	○	○
マーキング	○	○	○	○	○
本締め	○	○	○	○	○
検査	○		○	○	○
共回り等による入替	○		○	○	

5-2-2 ボルトの保管

ボルトの保管においては、トルシアボルトとめっきボルトで「湿気対策」「衝撃対策」「保管期間」「開封時の注意」「開封後の注意」「降雨対策」「整理整頓」「不具合発生時の対応」の8項目が共通で記載されていた。六角ボルトでは、「衝撃対策」「降雨対策」の記載はなく、「納品時の検査記録の確認」が記載されていた。

表 5-2-5 にトルシアボルトのボルト保管に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目は、「湿気対策」「開封時の注意」の2項目であった。また、少数の項目は、「整理整頓」「不具合発生時の対応」(3 工事)、「保管期間」(2 工事)、「降雨対策」(1 工事)の4項目だった。特にトルシアボルトでは、潤滑油の不足や劣化によって締付け時の導入軸力に影響を及ぼすことが懸念されるため、湿気対策と開封時の注意がすべての工事で記載されていることはボルトの取り扱いに注意していることが推察される。

表 5-2-6 に六角ボルトのボルト保管に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に共通して記載された項目はなく、半数以上の工事で記載のあった項目が7項目中5項目であった。少数の項目は、「保管期間」(2 工事)、「納品時の検査記録の確認」(1 工事)だった。施工計画書 I では、「保管」の項目がなく、一般事項として、納品時の現品とロット番号の照合、および締付け時期を考慮した搬入が記載されているのみであった。「湿気対策」「開封時の注意」「開封後の注意」は4工事で記載されており、重要な項目であることが推察される。

表 5-2-7 にめっきボルトのボルト保管に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載された項目は、トルシアボルトと同様に「湿気対策」「開封時の注意」の2項目であった。半数以上の施工計画書に記載された項目は、「衝撃対策」「開封後の注意」の2項目で、その他5項目は少数項目にとどまった。めっきボルトは、熔融亜鉛めっきが表面に付着しており、「衝撃対策」「開封後の注意」に関して記載が多いことは現場での取り扱いに注意していることが推察される。

ボルトの保管に関して関連基準では、“工事出荷時の品質が現場施工時まで保たれるように、その包装と現場保管に注意しなければならない”ことが記載されてある。また、品質低下の原因として“雨や結露等による濡れ、さびの発生、ほこり・砂等のねじ部への付着、乱暴な取扱いによるねじ部の損傷等により品質の変化が生じやすい”との記載から、「湿気対策」「衝撃対策」「開封時の注意」が記載されており、ボルトの取り扱いに留意していると推察される。

ボルトの保管期間に関して、施工便覧²⁾に“工場出荷後6ヶ月以上経過した場合には、潤滑油の不足や劣化による品質及び施工性の低下、発せいが無いことを確認するとともに、締付軸力、トルク係数値の再検査を行うことが望ましい。”との記載があり、記載された施工計画書では6ヶ月を目安としていた。

表 5-2-5 トルシアボルトのボルト保管に関する記載項目

詳細項目	A	B	C	D	E	F	G
湿気対策	○	○	○	○	○	○	○
衝撃対策	○		○			○	○
保管期間	○		○				
開封時の注意	○	○	○	○	○	○	○
開封後の注意		○	○	○	○	○	○
降雨対策	○						
整理整頓		○		○		○	
不具合発生時の対応		○		○	○		

表 5-2-6 六角ボルトのボルト保管に関する記載項目

詳細項目	H	I	J	K	L
湿気対策	○		○	○	○
保管期間	○	○			
開封時の注意	○		○	○	○
開封後の注意	○		○	○	○
整理整頓	○		○	○	
納品時の検査記録の確認		○			
不具合発生時の対応	○		○	○	

表 5-2-7 めっきボルトのボルト保管に関する記載項目

詳細項目	M	N	O	P	Q
湿気対策	○	○	○	○	○
衝撃対策	○			○	○
保管期間	○				
開封時の注意	○	○	○	○	○
開封後の注意		○	○		○
降雨対策	○				
整理整頓		○	○		
不具合発生時の対応		○	○		

5-2-3 軸力計の検定

軸力計の検定に関する詳細項目については、「検定期期」「判定基準」の2項目が3種類のボルトすべてで共通していた。軸力計は、主に現場予備試験で使用する機械であり、検定期期とその判定基準は関連基準に規定されている。

表 5-2-8 にトルシアボルト、表 5-2-9 に六角ボルト、表 5-2-10 にめっきボルトの軸力計の検定に関する記載を示す。少数であるが、記載のない施工計画書もあった。

軸力計の検定に関して関連基準では、現場搬入直前に1回、定期検定は3ヶ月に1回を標準としており、ボルト締付け期間が3ヶ月以内であれば施工計画書に記載する必要性が薄れるものと考えられる。また、めっきボルトは、ボルト径の5倍以下は規定の回転角を本締めであたえればよく、予備試験は必要ない。ただし、鋼橋で使用されるボルト径はM22が標準で、近年では合理化桁等の厚板が使用されてボルト長110mm以上のボルトも多くみられることから、ボルト径の5倍を超えたボルトの回転角を決めるための予備試験を実施していることや5-4-2(3)に詳述するが締付け機械の確認のために予備試験を実施していることが施工計画書に記載されていた。

表 5-2-8 トルシアボルトの軸力検定に関する記載項目

詳細項目	A	B	C	D	E	F	G
検定期期	○			○	○	○	○
判定基準	○			○	○	○	

表 5-2-9 六角ボルトの軸力検定に関する記載項目

詳細項目	H	I	J	K	L
検定期期			○	○	○
判定基準			○	○	

表 5-2-10 めっきボルトの軸力検定に関する記載項目

詳細項目	M	N	O	P	Q
検定時期	○		○	○	○
判定基準	○		○	○	

5-2-4 現場予備試験

施工計画書の現場予備試験に関する詳細項目については、「締付け機の整備点検」「供試ボルト本数」「試験の判定値」の3項目が3種類のボルトすべてで共通していた。

表 5-2-11 にトルシアボルトの現場予備試験に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目は「供試ボルト本数」の1項目であった。「締付け機の整備点検」「試験の判定値」「不合格時の対応」「再不合格時の対応」においても半数以上で記載があった。

表 5-2-12 に六角ボルトの現場予備試験に関する記載項目を示す。施工計画書 H では予備試験の記載がないのではなく、詳細項目に関する記載がないということで、現場予備試験により軸力を確認することが記載されていた。

表 5-2-13 にめっきボルトの現場予備試験に関する記載項目を示す。「締付け機の整備点検」「締付け機の検定」「供試ボルト本数」「試験の判定値」の4項目すべてにおいて半数以上で記載があった。締付け機の検定が記載されているのは、回転角の精度に配慮してのことと推察される。

表 5-2-11 トルシアボルトの現場予備試験に関する記載項目

詳細項目	A	B	C	D	E	F	G
締付け機の整備点検	○	○		○	○		○
供試ボルト本数	○	○	○	○	○	○	○
試験の判定値	○		○	○	○	○	○
不合格時の対応	○		○	○	○	○	○
再不合格時の対応	○			○	○	○	○

表 5-2-12 六角ボルトの現場予備試験に関する記載項目

詳細項目	H	I	J	K	L
締付け機の整備点検		○	○	○	○
供試ボルト本数		○	○		○
試験の判定値			○	○	○
不合格時の対応			○		

表 5-2-13 めっきボルトの現場予備試験に関する記載項目

詳細項目	M	N	O	P	Q
締付け機の整備点検		○	○	○	○
締付け機の検定			○	○	○
供試ボルト本数	○	○	○		○
試験の判定値	○		○	○	○

現場予備試験は、3種類のボルトでそれぞれの目的が異なる。トルシアボルトと六角ボルトは同じトルク法に分類され、めっきボルトはナット回転法で締付けるが、その施工方法は締付け機械や作業等が違うことを4-1-1で述べた。ここでは、基準上の目的について整理する。その後、施工計画書での記載

事項に関する特徴について述べる。

トルシアボルトは専用締付け機を用いて締付ける。その専用締付け機にはトルクや軸力を調整する機構はなく、機械的にトルシアボルトのピンテールを切断することで軸力を導入する機構になっていることから、その導入軸力はボルトの性能（品質）に左右されることになる。そのため、関連基準では、現場予備試験を実施して、締付け日毎に5本の供試ボルトを抽出し、締付けボルト軸力の平均値が一定範囲に入っていること、および現場で締付けるまでのボルトの性能が工場出荷時から保持されているかを確認することを目的として現場予備試験を実施することとされている。ちなみに、トルシアボルトの専用締付け機（シャーレンチ）では、調整機能がないため、機械の精度の検定は必要なく、点検整備を行えば良いと記載されているが、その頻度は記載されていない。

六角ボルトは、目標トルクを設定できる締付け機（ナットランナー）で締付ける。六角ボルトでは、締付け機械の調整を目的として現場予備試験を実施する。道示¹⁾の付録2-4「トルク法による高力ボルト摩擦接合継手の施工管理」5.4 締付け機の調整では、その詳細な方法が記載されている。そこでは、ボルトのトルク係数値のばらつきや締付け機の出力トルクのばらつき、さらに調整時と施工時の温度差によるトルク係数値の変化、調整時に用いた軸力計と実部材との剛性の違い、締付け姿勢などによる導入軸力への影響を懸念している。それらを理由として、調整には5本以上の供試ボルトの軸力の平均値が締付けボルト軸力の±5%以内に調整するように記載されている。なお、この±5%の範囲は、トルシアボルトで規定された範囲（常温）よりも厳しい設定となっている。

めっきボルトは、ナット回転法で締付け作業を行う。これは、締付けボルト軸力をボルトの伸びで管理する方法である。関連基準では、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以下のa)およびb)に示す回転角を与えることになっている。

a) ボルト長が径の5倍以下の場合 $120^{\circ} \pm 30^{\circ}$

b) ボルト長が径の5倍を超える場合は施工条件に一致した予備試験によって目標回転角を決定する。

そのため、現行の基準では、b)のケースにおいて、回転角を決定する目的として予備試験を実施することになる。

施工計画書での予備試験に関する記載内容の特徴を以下に示す。

(1) トルシアボルト

締付け機の整備点検に関して、具体的な整備方法を記載するのではなく、「良く整備された機械を用いて実施すること」を記載している施工計画書が多数であった。

標準偏差を試験の判定値として記載した施工計画書はなかった。道示¹⁾の付録2-1に示される製品出荷時検査の合格判定値の軸力と標準偏差のうち、標準偏差は現場では判定値としては用いられていなかった。供試ボルトが5本と少ないことが理由として考えられる。

道示¹⁾では、本文および解説に供試ボルトの本数と軸力の判定範囲が示されている。付録では、本文および解説の内容に加えて軸力の判定範囲を満足しない場合（不合格）の対応方法が記載され、さらにその対応方法でも満足しない場合の対処措置について記載されている。施工計画書では不合格の対応方法まで記載するケースが多数であった。

なお、3章において現場予備試験の軸力値を集計しており、集計したデータの中に規定の軸力範囲を

超えるデータはなかった。

(2) 六角ボルト

道示¹⁾の付録2-4では、「現場において初めて締付け機を使用する場合には10本から20本程度の供試ボルトによる調整を行い、2日目以降は供試ボルトの数を少なくして調整値がずれていないかどうかを確認する方法をとればよい。」とあるが、これに準じた記載をした施工計画書はなかった。

実態として現場で初めて締付け機を使用する場合の記載はなく、ボルト本数は5本と記載した場合が多かった。また、3章におけるデータからも5組の供試ボルトで締付け機の調整を行っていると考えられる。

(3) めっきボルト

予備試験の内容に関して、ボルト長が径の5倍以内でも現場予備試験を実施しており、その内容は5本の供試ボルトを抽出し、締付け機で目標回転角まで締付けた場合の誤差が $\pm 15^\circ$ 以下を確認するものであった。これは記載された施工計画書すべてで共通していた。

5-2-5 締付け作業要領

施工計画書の締付け作業要領に関する詳細項目については、「接合面の清掃」「肌すきの確認」「肌すきの対応」「ボルトの挿入方向」「予備締め」「締付け順序」「マーキング」「予備締め機器」「本締め機器」「降雨時の作業禁止」「降雨予報時の対応」「1日の施工本数」の12項目が3種類のボルトで共通していた。その中でも、「予備締め」「マーキング」はすべての施工計画書で記載があり、次いで「接合面の清掃」「締付け順序」「降雨時の作業禁止」を記載する施工計画書が多かった。

表5-2-14にトルシアボルトの締付け作業要領に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目は、「接合面の清掃」「予備締め」「締付け順序」「マーキング」の4項目であった。半数以上で記載があった項目は、「肌すきの確認」「ボルト挿入方向」「予備締め機器」「本締め機器」「降雨時の作業禁止」の5項目で、管理項目に関する内容であった。少数の項目は、「ボルトセットの温度の確認」と「ピンテールの回収」でトルシアボルトの特性を考慮した記載と考えられる。

表5-2-15に六角ボルトの締付け作業要領に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目は、「予備締め」「締付け順序」「マーキング」の3項目であった。半数以上で記載のあった項目は、「接合面の清掃」「肌すきの確認」「予備締め機器」「本締め機器」「降雨時の作業禁止」で、トルシアボルトと同様の傾向であった。

表5-2-16にめっきボルトの締付け作業要領に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目は、「予備締め」「マーキング」「本締め」の3項目であった。半数以上で記載のあった項目は、「接合面の清掃」「肌すきの確認」「ボルト挿入方向」「締付け順序」「予備締め機器」「本締め機器」「降雨時の作業禁止」で、トルシアボルト、六角ボルトと同様の傾向であった。少数の項目は、「皮膜の補修」でめっきボルトの特性に配慮した記載と考えられる。

施工計画書での締付け作業要領に関する記載内容の特徴を以下に示す。

(1) 予備締め

トルシアボルトおよび六角ボルトでは、締付け軸力の60%程度とすることがすべての施工計画書で記載されていた。

めっきボルトでは、一次締めとして、F8TM22の場合、約150N・mで締付けることが記載されており、

その他の径においても締付け目標トルクがすべての施工計画書で記載していた。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立用スパナで力いっぱい締めた状態」との表現になっているが、現場施工では、明確に管理するために定量的に管理していると考えられる。なお、鉄道構造物等設計標準⁴⁾の解説では、一次締めトルク値を管理する場合として「M20, M22 : 約 150N・m, M24 : 約 200N・m」の記載がある。

(2) マーキング

目視による検査項目であり、すべての施工計画書で説明図または写真付きで作業要領、判定要領が記載されていた。

(3) 接合面の清掃

ほぼすべての施工計画書に記載されており、除去する付着物・対象物の例が記載されていた。

(4) 肌すきの確認

肌すきの確認または肌すきの防止に関する記載に分けられ、確認方法については目視、防止対策については仮締めボルトを使用することや締付け順序が記載されていた。

(5) 締付け順序

関連基準に締付け順序が記載されており、基準通りに施工するための記載と考えられる。

(6) 降雨時の作業禁止

雨天における作業禁止が関連基準に記載されているが、ほぼすべての施工計画書で、原則禁止としていた。さらに、降雨対策設備や降雨予想の場合の対策を記載する施工計画書もあった。

表 5-2-14 トルシアボルトの締付作業要領に関する記載項目

詳細項目	A	B	C	D	E	F	G
接合面の清掃	○	○	○	○	○	○	○
肌すきの確認		○	○	○	○	○	○
肌すきの対応		○					○
ボルト挿入方向	○			○	○		○
ボルトセットの温度確認	○						
予備締め	○	○	○	○	○	○	○
仮締めボルトの交換					○		
締付け順序	○	○	○	○	○	○	○
マーキング	○	○	○	○	○	○	○
予備締め機器			○	○		○	○
本締め機器	○		○	○	○	○	○
降雨時の作業禁止	○	○	○	○	○		○
降雨予報時の対応		○				○	○
1日の施工本数			○			○	○
ピンテールの回収					○	○	

表 5-2-15 六角ボルトの締付作業要領に関する記載項目

詳細項目	H	I	J	K	L
接合面の清掃	○		○	○	○
肌すきの確認	○		○	○	○
肌すきの対応	○				○
ボルト挿入方向			○		○
予備締め	○	○	○	○	○
仮締めボルトの交換				○	
締付け順序	○	○	○	○	○
マーキング	○	○	○	○	○
予備締め機器	○	○	○	○	○
本締め機器		○		○	○
降雨時の作業禁止	○		○	○	○
降雨予報時の対応	○				○
1日の施工本数					○
ナット締めの原則		○			

表 5-2-16 めっきボルトの締付作業要領に関する記載項目

詳細項目	M	N	O	P	Q
接合面の清掃	○	○	○		○
肌すきの確認			○	○	○
肌すきの対応					○
ボルト挿入方向	○		○		○
予備締め	○	○	○	○	○
締付け順序			○	○	○
マーキング	○	○	○	○	○
本締め	○	○	○	○	○
予備締め機器		○	○	○	○
本締め機器			○	○	○
降雨時の作業禁止		○	○	○	○
降雨予報時の対応		○			○
1日の施工本数				○	○
ナット締めの原則				○	
頭締めについて				○	
皮膜の補修					○

5-2-6 検査

検査に関する詳細項目については、「マーキングの確認」「ナット・座金の表裏の確認」「異常時のボルトの交換」の3項目が3種類のボルトで共通していた。また、締付けの確認として、トルシアボルトでは「ピンテール破断の確認」、六角ボルトでは「1群 10%のトルク検査」、めっきボルトでは「ナット回転量の検査」が3種類のボルトそれぞれに記載されていたが、施工計画書 B, H, N については検査に関する記述がなかった。

表 5-2-17 にトルシアボルトの検査に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目はなく、半数以上の施工計画書に記載のあった項目は「ピンテール破断の確認」「マーキングの確認」の2項目であった。少数であった項目は「ナット・座金の表裏の確認」「ネジ山の余長の確認」「異常時のボルトの交換」の3項目だった。

表 5-2-18 に六角ボルトの検査に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目はなく、半数以上の施工計画書に記載のあった項目は「10%/群のトルク検査」「マーキングの確認」「異常時のボルトの交換」「検査不合格時の対応」の4項目であった。

表 5-2-19にめっきボルトの検査に関する記載項目を示す。すべての施工計画書に記載されていた項目はなく、半数以上の施工計画書に記載のあった項目は「ナット回転量の検査」「マーキングの確認」「異常時のボルトの交換」「検査不合格時の対応」の4項目であった。少数であった項目は「ナット・座金の表裏の確認」「ネジ山の余長の確認」の2項目だった。

関連基準に関する検査項目一覧を表 5-2-20 に示す。

トルシアボルトでは、ピンテールの破断の確認とマーキングによる共回りの確認が各基準で記載されている。検査による異常時の対応は道示¹⁾のみに記載されていた。

六角ボルトでは、トルクレンチを使用すること、各ボルト群の10%の本数を確認すること、設定トルク値の±10%の範囲であることが記載されている。検査の合否判定や不合格時の対応は、共通仕様書³⁾のみ記載されていない。

めっきボルトでは、全数で $120^{\circ} \pm 30^{\circ}$ の範囲であることを確認することが記載されている。

表 5-2-17 トルシアボルトの検査に関する記載項目

詳細項目	A	B	C	D	E	F	G
ピンテール破断の確認	○		○	○	○	○	○
マーキングの確認	○		○	○	○	○	○
ナット・座金の表裏の確認				○	○		
ネジ山の余長の確認	○						
異常時のボルトの交換				○	○		○

表 5-2-18 六角ボルトの検査に関する記載項目

詳細項目	H	I	J	K	L
10%/群のトルク検査		○	○	○	○
マーキングの確認		○	○	○	
ナット・座金の表裏の確認			○	○	
異常時のボルトの交換		○	○	○	
検査不合格時の対応		○	○	○	○

表 5-2-19 めっきボルトの検査に関する記載項目

詳細項目	M	N	O	P	Q
ナット回転量の検査	○		○	○	○
マーキングの確認	○		○	○	○
ナット・座金の表裏の確認				○	
ネジ山の余長の確認	○				
異常時のボルトの交換	○		○	○	○
検査不合格時の対応	○		○	○	○

表 5-2-20 関連基準の検査に関する記載項目

	道示 ¹⁾	施工便覧 ²⁾	共通仕様書 ³⁾
トルシアボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後に速やかに行う ・全数のピンテールの切断の確認 ・全数のマーキングの確認 ・締忘れは締付け，共回りは取り替え 	<ul style="list-style-type: none"> ・ピンテールの切断の有無の確認 ・マーキングによる共回りの確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後速やかに行う ・全数のピンテールの切断の確認 ・マーキングの確認
六角ボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後に速やかに行う ・各ボルト群の10%のボルト本数をトルクレンチで検査する ・合否基準は目標トルク値の±10% ・不合格の場合は倍数検査 ・さらに不合格の場合はその群の全数検査，目標トルク以下の場合増し締め，+10%以上は取り替え 	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後に速やかに行う ・トルクレンチで目標トルク値の±10%の範囲ことを確認 ・不合格の場合は倍数検査 ・倍数検査でも合格しない場合は，その継手の全数検査，トルク値不足は増締め，10%以上は交換 	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後速やかに行う ・各ボルト群の10%のボルト本数をトルクレンチで確認
めっきボルト	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後に速やかに行う ・全数のマーキングで設定したトルク±30°の範囲内か確認 ・回転不足は増し締め，回転角が過大の場合は取り替え 	<ul style="list-style-type: none"> ・設定したトルクの±30°を全数のマーキングで確認 ・ボルト長が径の5倍以下の場合：1/3回転(120°±30°)，ボルト長が径の5倍を超える場合：予備試験によって回転角を決定 	<ul style="list-style-type: none"> ・締付け後に速やかに行う ・全数のマーキングによる外観検査 <p>[締付けの項目に1/3回転(120度)±30度を記載]</p>

5-3 考察

以上より，施工計画書に記載された項目と関連基準について比較してきた。

トルシアボルトについては，ほぼ関連基準の内容に沿って施工計画書に詳細項目が記載されていた。ボルトの保管から開封時等の取り扱いに注意することでボルトの品質確保に努め，現場予備試験によって工場から現場に移動したボルトの品質を確認している。締付け作業要領では「接合面」「予備締め」「締付け順序」「マーキング」等によりボルト締付けの品質を確保し，検査によって確認する流れとなっている。

六角ボルトとめっきボルトも同様の流れであるが，以下についてはすでに実態と関連基準に乖離があると考えられる。

めっきボルトについては，関連基準に記載のないボルト径の5倍以下の長さのボルトでも締付け日ごとに予備試験を実施している例が多く，その必要性や内容について検証する必要がある。また，ナット回転法の予備締めの管理基準として道示¹⁾の「接触面の肌隙がなくなる程度にトルクレンチで締付けた状態又は組立用スパナで力いっぱい締付けた状態」で管理することは難しく，定量的な管理基準値である鉄道標準⁴⁾の「M20, M22：約 150N・m，M24:200N・m」が各施工計画書に記載されていることから，管理基準の表現方法についても検討する必要があると考えられる。

道示¹⁾の付録の記述(表 5-3-1)に関して，六角ボルトでは，最初の現場予備試験から，供試ボルト本数が5本となっており，これは第3章の現場予備試験(F10T, W)のトルク係数値および標準偏差の結果から高い品質が確認されており，10本から20本程度の供試ボルトは必要なくなったと考えられる。

表 5-3-1 関連基準の供試ボルトの本数に関する記載項目

	道示 ¹⁾	道示 ¹⁾ -付録2-4	施工便覧 ²⁾
トルシアボルト	3)縮付けボルト軸力 iii)トルシア形高カボルトの常温時(10℃～30℃)の縮付けボルト軸力は、一つの製造ロットから 5組の供試セット を無作為に抽出して試験を行った場合の平均値が、表-20.9.4に示すボルト軸力の範囲に入らなければならない。	5.2 現場予備試験 (1)現場予備試験は、その日に使用するセットの全製造ロットのうち、軸力計にかかる首下長さの1つの製造ロットから 5組の供試セット を無作為に抽出して行うのを標準とする。	道示(H24)を引用(左の道示欄と同じ)
トルク法六角ボルト	1)ボルトの縮付け ii)ボルトの縮付けをトルク法によって行う場合には、縮付けボルト軸力が各ボルトに均一に導入されるよう縮付けトルクを調整する。	5.4 縮付け機の調整 (2)縮付け機の調整にあたっては、その日に使用する一施工ロットの中から、軸力計にかかる首下長さの ボルト5本以上 を使用することを標準とした。現場において初めて縮付け機を使用する場合には 10本から20本程度 の供試ボルトによる調整を行い、2日日以降は供試ボルトの数を少なくして調整値がずれていないかどうかを確認する方法をとればよい。	供試ボルトは、その日に施工する予定の同一施工ロットごとに、無作為に 5本以上 抽出する。

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) 日本道路協会：鋼道路橋施工便覧, 2015.3.
- 3) 国土交通省：土木工事共通仕様書平成 30 年版, 2018.4
- 4) 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.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編,2012.3.

6. 作業効率化へ向けた方策案

本部会における検討成果を踏まえ、鋼橋の高力ボルト継手における施工管理基準に対して以下の2項目の提案を行う。

- ・トルシア形高力ボルト(S10T)における現場予備試験の実施頻度の見直し
- ・高力六角ボルト(F10T)における締付け完了後の検査方法の見直し

6-1 トルシア形高力ボルトにおける現場予備試験の実施頻度の見直し

6-1-1 はじめに

トルシア形高力ボルトでは、締付け機械による締付けトルクの制御機能をもたないため、ボルトの性能により締付け軸力が左右される。このため、工場出荷時から現場施工時まで、その性能が保持されていることの確認が規定されており、ボルト締付け作業前に使用するボルトの性能を確認する現場予備試験が実施されている。一方、現場予備試験では、試験に用いる検査機器の制約により全ての首下長さのボルトに対して試験を行うことが困難である。このため、使用ボルトと同じ製造会社から同一時期に現場へ搬入され、試験可能な首下長さのボルトで代表して締付け試験を実施して使用ボルトの性能を確認している。一般には、構造物で使用するボルトの他に、キャリブレーション用として現場予備試験で使用するボルトが注文されており、現場予備試験におけるボルトの性能確認も、1種類の首下長さのボルトで実施されるため限定的なものとなっている。

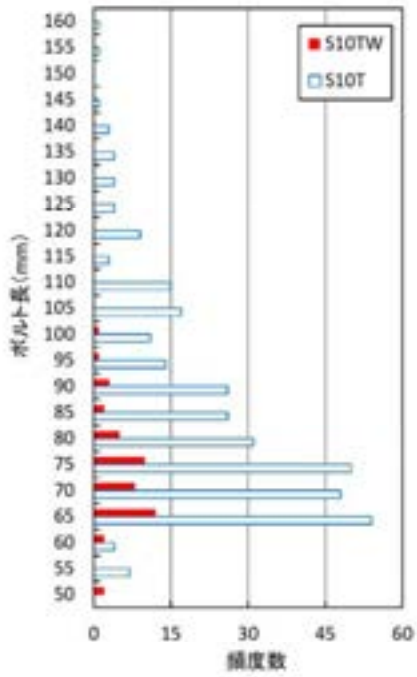
6-1-2 本部会における検討成果

3章では、鋼橋の高力ボルト継手において、使用頻度の高いトルシア形高力ボルト（呼び径 M22）の導入軸力および機械的性質を把握することを目的に、高力ボルトの検査証明書、製品出荷前の立会い試験、および現場予備試験のデータを収集し調査した。製品出荷前の立会い試験および現場予備試験データの調査により、以下の結果が確認された。

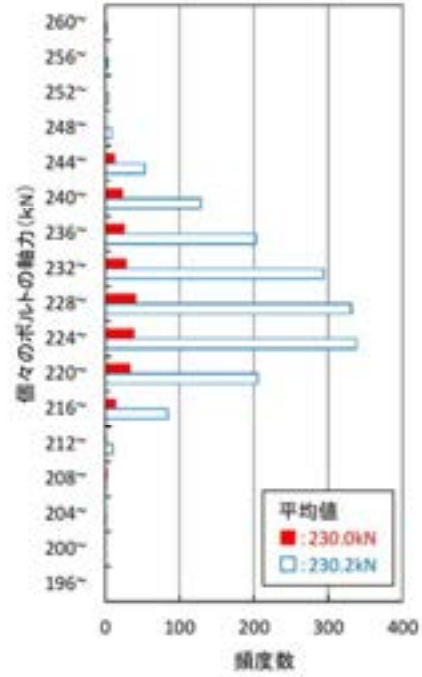
(1) 製品出荷前の立会い試験

図 6-1-1 に製品出荷前の立会い試験データの集計結果を示す。収集したデータ数は 376 である。図 6-1-1(a) は収集したデータにおける試験ボルトの首下長さの頻度、(b) は各試験ボルトにおいて計測された締付けボルト軸力の頻度、(c) は試験の合否判定となる 5 本の試験ボルトにおける締付けボルト軸力の平均値の頻度、および(d) は締付けボルト軸力の平均値と試験ボルトの首下長さとの関係で整理したものである。

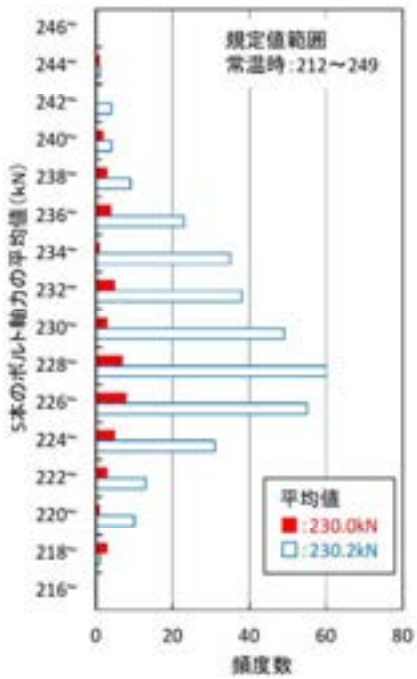
今回の調査の範囲では、各試験ボルトの締付けボルト軸力において常温時の規定の上限値および下限値を示すものが数データ確認されたものの、5 本の締付けボルト軸力の平均値は全て常温時の規定範囲内にある。最近のデータによる調査において、規定値の範囲を超えるデータのばらつきがないことから、現在製造されているトルシア形高力ボルトの品質に信頼性があるものと考えられる。



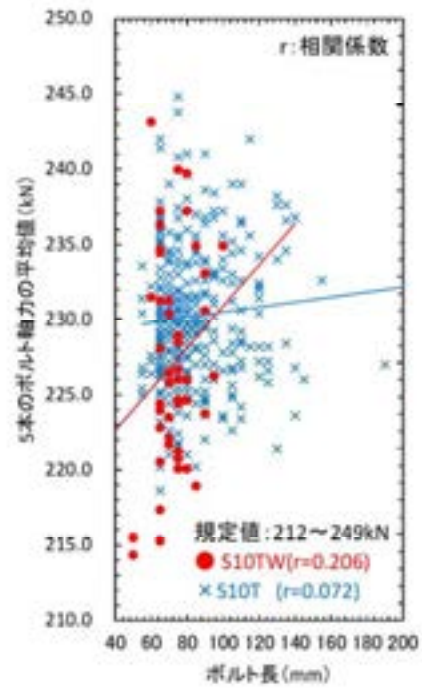
(a) ボルト長の頻度分布



(b) 個々のボルト軸力の頻度分布



(c) 5本のボルト軸力平均値の頻度分布



(d) 軸力とボルト長の関係

図 6-1-1 製品出荷前の立会い試験データの集計結果

(2) 現場予備試験

現場予備試験データを、図 6-1-2 では各試験ボルトの締付けボルト軸力の頻度で、図 6-1-3 では試験の合否判定となる 5 本の試験ボルトにおける締付けボルト軸力の平均値の頻度で整理している。図 6-1-2 および図 6-1-3 では、試験時の気温を常温時(10~30℃)、低温時(9℃以下)、および高温時(31℃以上)に分けて示している。収集したデータ数は S10T において 773 でその内訳は、常温時 516、低温時 195、および高温時 62、S10TW においては総数量 259 でその内訳は常温時 198、低温時 39、高温時 22 の気温の内訳となっているが、ボルトの首下長さは 80mm の 1 種類のみである。

今回の調査範囲では、締付けボルト軸力の分布は試験時の気温により異なり、低温時では締付けボルト軸力は低めに、高温時では高めに分布することが確認された。この結果より、トルシア形高力ボルトの締付けボルト軸力は、締付け時の気温により変動するもと考えられる。

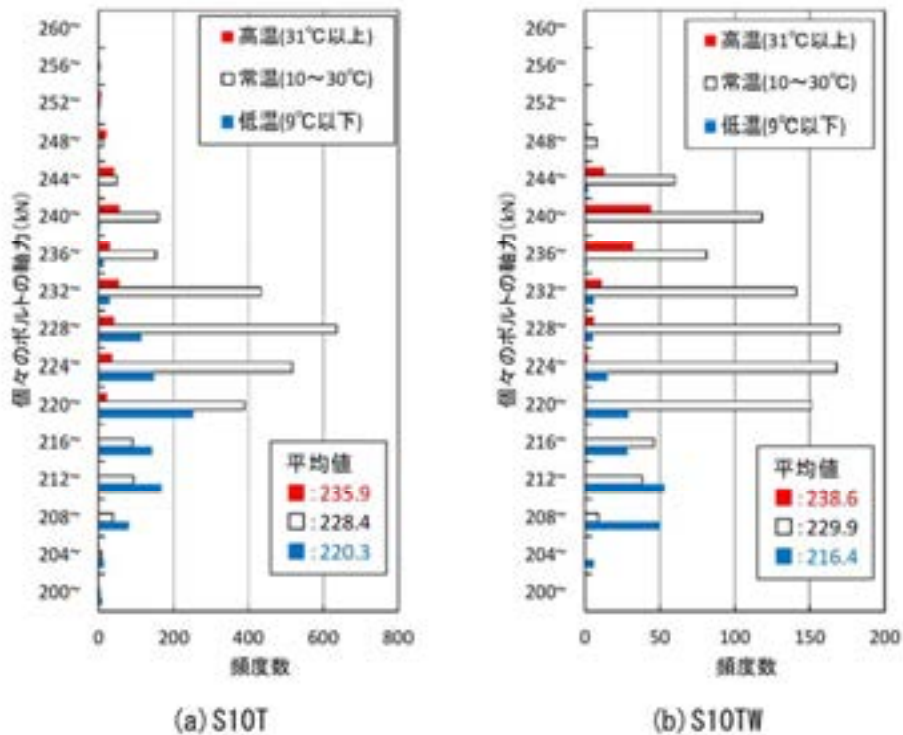


図 6-1-2 現場予備試験データの集計結果（各試験ボルトの締付けボルト軸力）

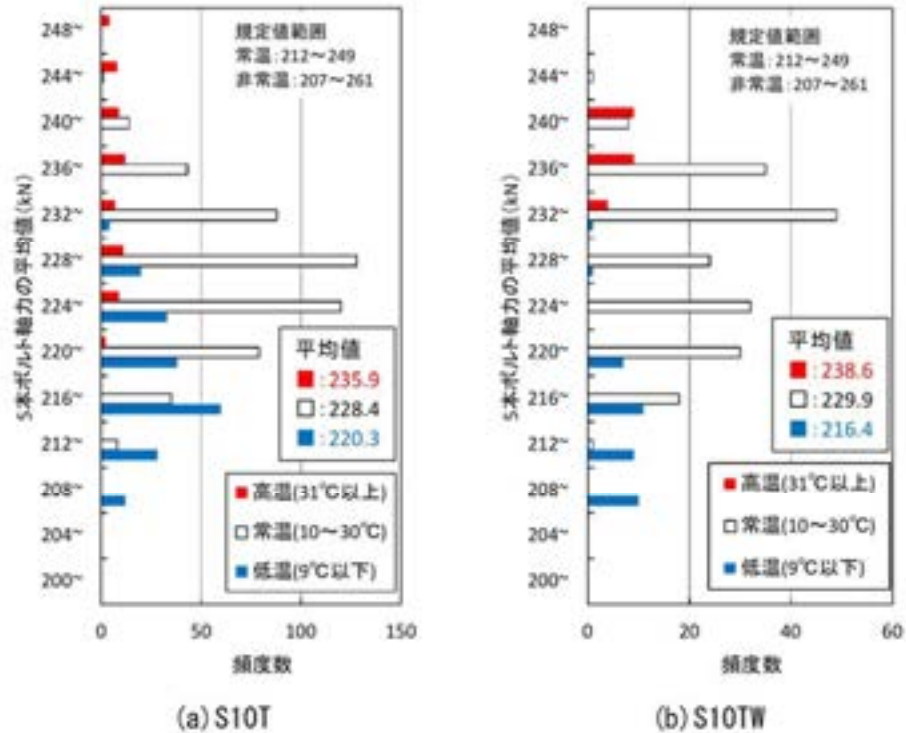


図 6-1-3 現場予備試験データの集計結果（締付けボルト軸力の平均値）

6-1-3 施工管理基準に対する提案

製品出荷前の立会い試験データの調査により，現在製造されているトルシア形高力ボルトの品質の信頼性が，現場予備試験データの調査により，トルシア形高力ボルトの締付けボルト軸力は締付け時の気温の影響を受けることが確認された．この本部会での検討結果を踏まえて，トルシア形高力ボルトの締付け作業を行う日に毎回実施している現場予備試験の頻度を以下のように見直せるのではないかと考察する．

(1) 提案内容

- ・ 常温時(10~30°C)においては 1 週間に 1 回の頻度で実施する．
- ・ 低温時(9°C以下)および高温時(31°C以上)の気温でトルシア形高力ボルトの締付けを行う場合には，その作業日毎に現場予備試験を実施する．

(2) 前提条件

- ・ 工場出荷時の品質が現場施工時まで保たれるよう現場において適切に保管する．
- ・ 高力ボルトの保管期間については，今回，本部会で検討を行っていないため，鋼道路橋施工便覧および鉄道標準に記述されている 6 ヶ月を上限とする．

6-2 高力六角ボルト (F10T) における締付け完了後の検査方法の見直し

6-2-1 はじめに

高力六角ボルトを用いた継手では、高力ボルトの締付け完了後、各ボルト群の 10% のボルト本数に対してトルクレンチによって締付け検査を実施することが規定されている。しかしながら、トルクレンチを用いた作業であるため、足場の条件や作業空間によっては、全ての継手において検査が実施できるとは限らない。また、その検査の方法は、検査ボルトをトルクレンチにより増締めし、ナットが回り始めた時のトルク値を締付けトルクとして記録するが、これにはある程度の経験が必要であるとともに、作業によるばらつきを伴う。

6-2-2 本学会における検討成果

Ⅱ編では、ナットの回転量とボルト軸力について調査している。M22 および M24 のボルトに対して、それぞれ 3 種類のボルト長さについて試験を実施しており、図 6-2-1 に示すように、スナッグタイト後におけるナットの回転量とボルト軸力の間には、ナットの回転角度が 90° または 120° 付近までは両者の間に線形的な関係があることを示している。さらに、Ⅱ編では F10T にナット回転法を適用した場合のナット回転量について、リラクセーションの影響も考慮して表 6-2-1 に示すナット回転量を提案している。

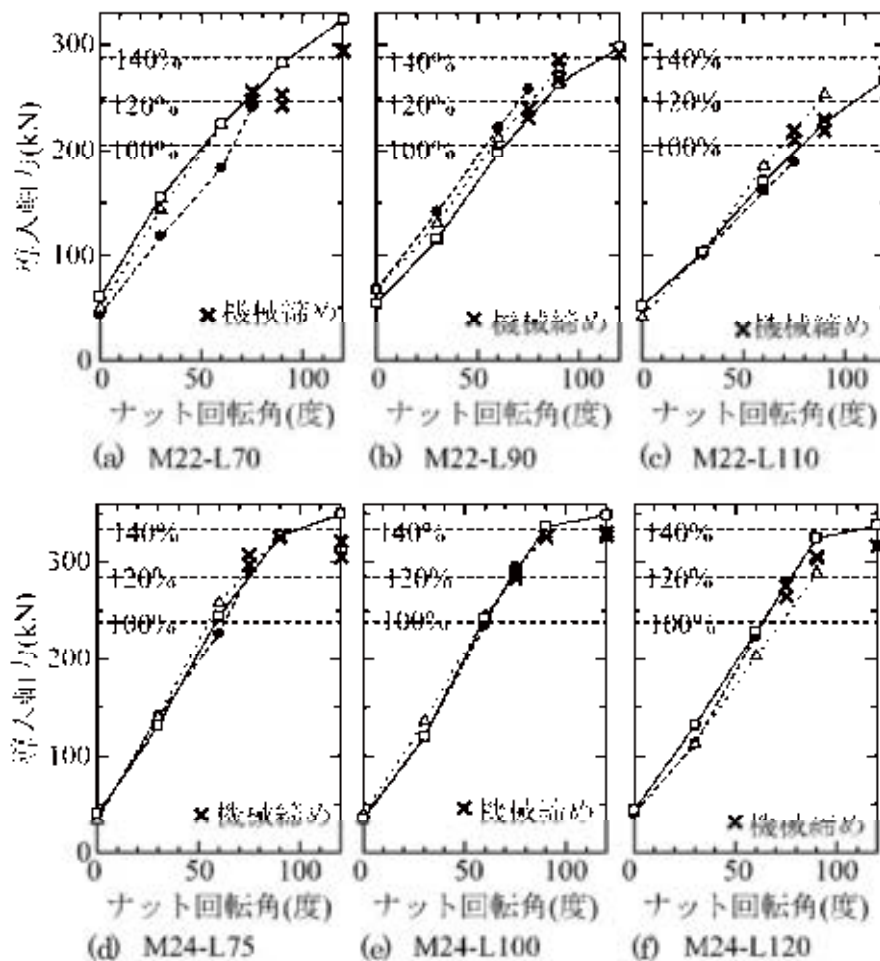


図 6-2-1 ナットの回転量とボルト軸力の関係

表 6-2-1 提案するナットの回転量

ボルト締め付け	ボルト径			
	M22		M24	
ボルト長	≦4.1d	≦5.0d	≦4.2d	≦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

6-2-3 施工管理基準に対する提案

Ⅱ編のナット回転法適用の提案は、4章で示したようにトルク法による締め付け法と比較して現場予備試験や締め付け後作業等の工程がないため、最も作業項目が少ない施工方法である。Ⅱ編の検討結果を踏まえて、六角高力ボルトの締め付け完了後の検査を以下のように見直せるのではないかと考察する。

(1) 提案内容

- ・六角高力ボルトの締め付けは、これまでのトルク調整型の締め付け機械ではなく、ナット回転角法用の締め付け機械により行う。
- ・一次締め後に行われるマーキングにより、本締め後のナットの回転角度を確認することにより、六角高力ボルトの締め付け検査を実施する。
- ・これまで各ボルト群の10%のボルト本数に対して実施してきたトルクレンチによる締め付け検査を廃止する。

(2) 前提条件

- ・高力ボルトの一次締めにおいて接触面に肌隙のない状態（スナッグタイト）とする必要があり、一次締めの管理方法が重要となる。今後の検討課題も含めて詳細についてはⅡ編を参照されたい。

7. まとめ

ボルト施工に関する検討 WG では、施工基準の調査、高力ボルトの統計調査、施工性の調査、施工計画書の調査の4つの調査を実施した。

- (1) 施工基準の調査では、道路橋の施工基準の変遷に加え、鉄道橋および建築分野も含めた施工基準についても比較を行った。ボルト施工に関する基準は昭和48年の道路橋示方書に登場し、昭和59年に高力ボルトに関する要領・規格集としてまとめられて以降は大きな変更がなされていないこと、道路橋、鉄道橋、建築分野ではわずかながら基準値が違う場合があることを確認した。
- (2) 高力ボルトの統計調査では、近年施工したトルシア形高力ボルト、六角高力ボルト、溶融亜鉛めっき高力ボルトにおいて、製品検査証明書、工場出荷時の立会い試験、架設現場での現場予備試験結果をまとめた。トルシア形高力ボルトでは締付け機構において温度依存性の影響があることを確認した。各ボルトが高い品質であることをあらためて確認した。
- (3) 施工性の調査では、施工現場でのボルトの締付け作業に関する時間計測を行い、トルシア形高力ボルトと六角高力ボルトの施工時間の比較を行った。トルシア形高力ボルトのピンテール破断跡の処理に時間を要することを確認した。
- (4) 施工計画書の調査では、施工計画書の内容を調査し、関係基準と実際の作業との違いについて確認した。多くの工事で使用されるトルシア形高力ボルトは、基準に準拠して施工がなされていることを確認した。一方で、溶融亜鉛めっき高力ボルトの1次締めは定量的なトルク値で管理していること、基準に記載のない予備試験を実施していること。六角高力ボルトの予備試験では、初日から5本の供試ボルトで締付け機の調整が可能であることを確認した。
- (5) トルシア形高力ボルトの予備試験、および六角高力ボルトの検査方法に関して、作業効率化に向けた方策案について示した。トルシア形高力ボルトの予備試験については、ボルトの高い品質を根拠として常温(10℃～30℃)の場合は試験の頻度を緩和する提案をした。六角高力ボルトのトルク確認検査では、4章で示したボルト施工の作業項目の少なさからⅡ編で検討したナット回転角法の適用について提案した。