

## Ⅱ. ナット回転法の適用に関する検討WG

### F10T へのナット回転法適用に向けた検討

## ナット回転法の適用に関する検討WGメンバー

WGリーダー	白旗 弘実	東京都市大学
部会員	藤野 大地	川田工業 (株)
〃	矢野 将太	川田テクノシステム (株)
〃	宮井 大輔	(株) 横河ブリッジ

## ナット回転法の適用に関する検討WG 目次

1. はじめに	II-1-	1
2. 施工基準の調査	II-2-	1
2-1 高力ボルトの締付け	II-2-	1
2-2 高力ボルトナット回転法に関する調査対象	II-2-	2
2-3 高力ボルトナット回転法に関する規定	II-2-	2
2-4 ナット回転法の既往研究	II-2-	6
2-5 高力ボルト遅れ破壊に関する既往研究	II-2-	6
3. スナッグタイト試験	II-3-	1
3-1 目的	II-3-	1
3-2 試験体	II-3-	1
3-2-1 試験体の使用材料および形状・寸法および種類	II-3-	1
3-2-2 塗装膜厚測定	II-3-	2
3-2-3 ボルト軸力の計測	II-3-	3
3-3 試験方法	II-3-	3
3-4 試験結果	II-3-	5
4. 軸力導入試験およびリラクセーション試験	II-4-	1
4-1 目的	II-4-	1
4-2 試験体	II-4-	1
4-2-1 試験体の使用材料および形状・寸法	II-4-	1
4-2-2 試験体の種類	II-4-	2
4-2-3 塗装膜厚測定	II-4-	3
4-2-4 ボルト軸力の計測	II-4-	4
4-2-5 ボルトの締付け作業	II-4-	4
4-3 軸力導入試験	II-4-	5
4-3-1 試験方法	II-4-	5
4-3-2 試験結果	II-4-	5
4-4 リラクセーション試験	II-4-	6
4-4-1 試験方法	II-4-	6
4-4-2 試験による軸力残存率の結果	II-4-	6
4-5 F10T でのナット回転量の提案	II-4-	8

5. すべり耐力試験	II-5-	1
5-1 目的	II-5-	1
5-2 試験体	II-5-	1
5-2-1 試験体の使用材料および形状・寸法	II-5-	1
5-2-2 試験体の種類および接触面の表面処理	II-5-	2
5-3 試験概要	II-5-	2
5-3-1 ボルトの締め付けおよびひずみ計測	II-5-	2
5-3-2 リラクゼーション試験	II-5-	3
5-3-3 すべり耐力試験	II-5-	3
5-4 試験結果	II-5-	4
5-4-1 ボルト軸力計測結果	II-5-	4
5-4-2 すべり係数算出結果	II-5-	4
5-4-3 すべり係数に及ぼす導入軸力, 膜厚の影響	II-5-	5
5-4-4 すべり耐力試験後の接触面の観察	II-5-	6
6. 長期リラクゼーション試験	II-6-	1
6-1 試験目的	II-6-	1
6-2 試験体および軸力導入試験	II-6-	1
6-3 軸力導入試験結果	II-6-	5
6-4 リラクゼーション試験結果	II-6-	6
6-4-1 締め付け直後のリラクゼーション	II-6-	6
6-4-2 締め付け1か月のリラクゼーション	II-6-	6
6-4-3 締め付け1年間のリラクゼーション	II-6-	7
6-5 まとめ	II-6-	10
7. まとめ	II-7-	1

巻末付録：既往研究概要

## 1. はじめに

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

道示および鉄道標準において, ナット回転法を用いる場合, ナット回転角は  $120^{\circ} \pm 30^{\circ}$  ( $L \leq 5d$  ( $L$ : ボルト長さ,  $d$ : ボルト径)) を規定している。ただし, これはブラスト処理されためっき面を対象とした規定である。これは, 接触面によってリラクセーションによる軸力低下特性が異なるからであり, 適切なボルト軸力が期待できるナット回転角は接触面によって異なると考えられる。

現在, 鋼橋の建設工事では, 使用ボルトはトルシア形ボルト S10T を使用しているケースが最も多い。理由としては作業効率がよいと考えられているからであるが, 日々, 締付け作業前に 5 本のボルト軸力の導入軸力の確認作業や, 締付け後は, 全数ピンテール破断面のグラインダー処理作業を行っているのも事実である。一方, ナット回転法は, 機械締めを図 1-1-2 に示すような専用レンチで行い, 締付け精度も高く, さらに, 日々の締付けの前作業や締付け後の作業もなく, ナット回転法を適用すれば作業効率が向上すると考えられる。ただし, 道示や鉄道標準では, ナット回転法の適用は F8T のみであり, 強度の高い F10T での適用は認められていない。これは, ナット回転法での締付けは, 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。道示ではボルト規定が初めて示された昭和 48 年度版から変更されていない。

F10T のナット回転法の適用に向けた検討は, 昭和 41 年から日本鋼構造協会 (JSSC) の接合小委員会で行われた<sup>4)</sup>。ここでは, ナット回転角は  $180^{\circ}$  が提案され, また, 遅れ破壊に関しては, 通常の使用条件であれば生じる可能性は少ないとし, 適用事例を増やして一般化させることがよいとされた。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, ナット回転角  $180^{\circ}$  で実施工が行われた。また, 適用された当時の接触面は, 黒皮を除去した粗面状態であり, 現在の主流である厚膜型無機ジンクリッチペイント (以下, 無機ジンク) を施した接触面で F10T を適用した適用事例はなく, また, その適用性は不明である。

ナット回転法の施工の際には, 鉄道標準では  $150\text{N} \cdot \text{m}$  (M22 の場合) といった一次締めつけトルク値の規定がある一方で, 道示では「接触面の肌隙がなくなる程度にトルクレンチで締めた状態又は組み立て用スパナで力いっぱい締めた状態」から回転角を与える記述となっている。

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

力試験を実施した。これらの結果から、提案したナット回転角の妥当性を検証し、F10T のナット回転法の適用に向けた検討を行った。

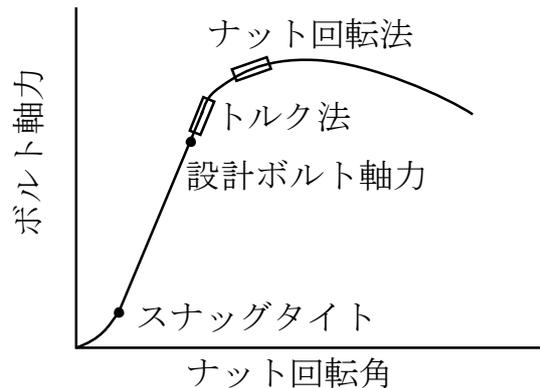


図 1-1-1 ボルト軸力とナット回転角の関係および施工法による締付け軸力



図 1-1-2 電動レンチ

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋・鋼部材編，2017. 11.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物)，2009. 7.
- 3) 西川和廣，高岡司郎，菅原一昌：高力ボルト締付け工法—耐力点法—，橋梁と基礎，Vol. 24, No. 7, pp. 35-43, 1990.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 南邦明，遠藤輝好，小峰翔一，吉岡夏樹，宮井大輔，澁谷敦，内田大介：トルシア形ボルト S10T (M22) の導入軸力および機械的性質の統計調査，土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 2, pp. 280-289, 2018. 8.
- 10) 橋田芳朗，橋本郁郎，今村壮宏，山下恭敬，松田哲夫，山口弘信：38 年供用後の HTBF11T の遅れ破壊特性，土木学会第 67 回年次学術講演会，I-344, 2014.

## 2. 施工基準の調査

### 2-1 高力ボルトの締付け

高力ボルトナット回転法に関する調査に先立ち、各締付け方法の施工手順を図 2-1-1 に整理する。

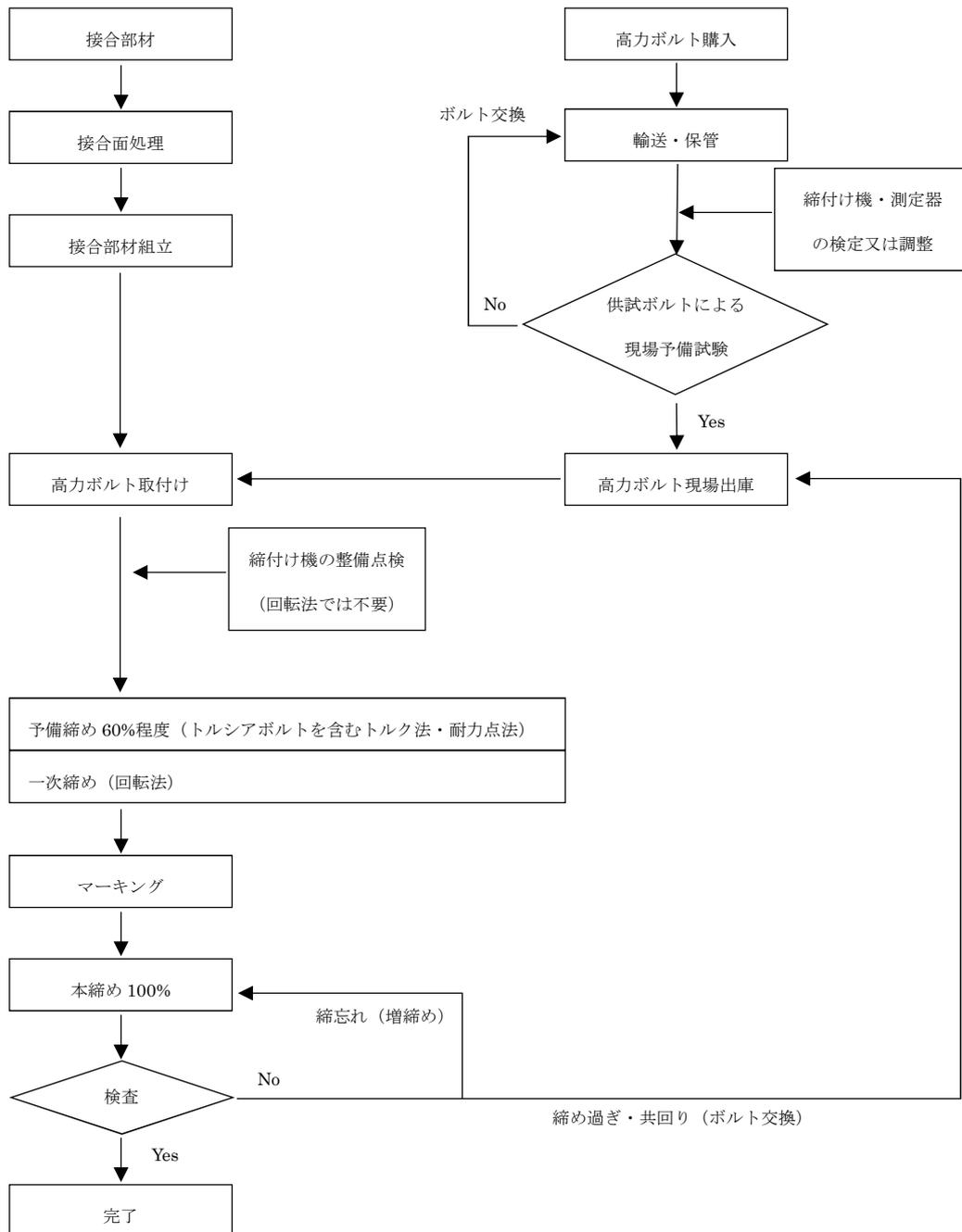


図 2-1-1 施工手順

## 2-2 高力ボルトナット回転法に関する調査対象

国内外の高力ボルト摩擦接合継手に関する規準類の調査・比較を行った。なお、比較においては、道路橋示方書（2017年）を基準とした。

調査対象とした国内外の設計規準類は、以下の通りである。

- ・ 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編・鋼部材編，2017年
- ・ 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
- ・ 日本建築学会：鋼構造設計規準（SI単位版），2002年
- ・ 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2018年
- ・ AASHTO：LRFD Bridge Construction Specifications，2010年

以後、これらの規準類を表2-2-1に示すように略記する。

表 2-2-1 調査した設計規準とその略称

日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編・鋼部材編），2017年	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，2009年	鉄道標準
日本建築学会：鋼構造設計規準（SI単位版），2002年	鋼規準
日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2018年	鋼接合指針
AASHTO：LRFD Bridge Construction Specifications，2010年	AASHTO
土木学会 鋼・合成構造標準示方書	土木学会

## 2-3 高力ボルトナット回転法に関する規定

ナット回転法では、各基準とも肌すきがない程度にトルクレンチで締め付けた状態、あるいは、組み立て用スパナで力一杯締め付けた状態から規定の回転量でボルトを締め付けることとしている。各基準で規定されている回転量を表2-3-1に示す。いずれの基準においても、ボルトの長さに応じた回転量を規定しており、国内基準に比べて海外基準は、ボルト長さに対する回転量をより細かく規定している。AASHTOではボルト頭またはナットと接触面との間に傾斜が生じている場合についても規定を設けている。

各基準で示されているボルトの締め付け順序を表2-3-2に示す。道示では、継手部のボルト軸力が不均一であると、すべり耐力が減少する恐れがあることから、ボルト群でできるだけ均等に締め付けられるようにボルトの締め付け順序を規定している。このような締め付け順序は、鉄道標準およびAASHTOでも同様である。

表 2-3-1 ボルトの締付け方法

	ボルト長	回転量			許容誤差
		A	B	C	
道示 (2017年)	径の5倍以下	120°			±30°
	径の5倍より大きい	試験により決定			—
鉄道標準 (2009年)	—	120°			±30°
鋼規準 (2002年)	径の5倍以下	120° (M12は60°)			
	径の5倍より大きい	特記による			
鋼接合指針 (2018年)	—	—			—
AASHTO (2010年)		A	B	C	—
	径の4倍以下	120°	180°	240°	
	径の4倍を超え8倍以下	180°	240°	300°	
	径の8倍を超え12倍以下	240°	300°	360°	

※ A：両側の面がボルト軸と直角な場合

※ B：片側面がボルト軸と直角、もう一方が1：20以下の傾斜を持つ面

※ C：両側の面が1：20以下の傾斜を持つもの

表 2-3-2 ボルト締め付け順序の比較

道示 (2017年)	ボルトの締付けは、連結板の中央のボルトから順次端部のボルトに向かって行い、予備締めと本締めの2度締めを行うこととする。
鉄道標準 (2009年)	ボルト群の締付けは、中央部から順次端部のボルトに向かって行うこと。 はじめは、所要トルクの60%程度に全ボルトを締付けて2回目の締付けで所定トルクを与え、材片の密着に注意し、継手端部のボルトを最後に締付けること。
鋼規準 (2002年)	該当なし
鋼接合指針 (2018年)	該当なし
AASHTO (2010年)	ボルトの締付けは、継手の最も剛な部分から自由端に向かって順次行う。

ボルトの規格について、代表的なボルトを表 2-3-3 に示す。道示を含む国内の設計基準類はメートル並目ねじを使用しており、対して AASHTO などの国外の設計基準ではユニファイ並目ねじを使用している場合が多い。このことから、締付けにおける回転量が同値の場合でも、採用されるボルトの規格の違いからボルトの伸び量は異なり、導入される軸力に差が生じる。

表 2-3-3 ボルトの規格

規格	ねじの呼び	基本径	ねじ山数 n (1 インチあたり)	ピッチ P mm
メートル 並目ねじ (JIS B 0205-1997)	M20	20 mm		2.5
	M22	22 mm		2.5
	M24	24 mm		3.0
ユニファイ 並目ねじ (JIS B 0206-1973)	3/4	0.75 inch (=19.1mm)	10	2.5400
	7/8	0.875 inch (=22.2mm)	9	2.8222
	1	1.0 inch (=25.4mm)	8	3.1750

各基準で規定される鋼板表面処理の種類とそれに対応するすべり係数を表 2-3-4 に示す。すべり係数は接触面の表面処理状態によって異なることが知られている。しかし、道示では接触面の表面処理の状態を 2 種類に分割するに留めており、一方、鋼接合指針や諸外国の設計基準では、接触面処理状態を細分し、それに応じて、すべり係数の値を変えている。例えば、鋼接合指針では、鋼板表面処理状態を 7 つに分け、0.23~0.45 のすべり係数を規定している。道示の規定では、状況に応じた接触面の処理およびすべり係数の選択ができず、また同じ処理面であってもすべり係数の値が海外基準よりも小さい場合がある。

表 2-3-4 すべり係数

(a) 道路橋示方書 (2017 年)

すべり係数	接触面の処理または状況
0.40	接触面を塗装しない場合
0.45	接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装

(b) 鉄道構造物等設計標準 (2009 年)

すべり係数	接触面の処理または状況
0.40	さび・黒皮等を除去した表面
0.40	厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗装

## (c) 鋼構造設計規準 (2002 年)

すべり係数	接触面の処理または状況
0.45	黒皮を除去した後、屋外に自然放置して発生させた赤錆状態
0.45	ショットブラストまたはグリットブラスト処理 (50 $\mu$ mRy 以上)

(旧 JIS 規格では Rz)

## (d) 鋼構造接合部設計指針 (2018 年)

すべり係数	表面処理方法	鋼材の種類
0.45	浮きさびを除去した赤錆状態	構造用鋼材
	ブラスト処理面 (50 $\mu$ mRz 以上)	
	無機ジンクリッチ塗料塗装面 (塗膜厚 45~75 $\mu$ mRz 程度)	
0.23	第 3 種ケレン処理後の黒皮面	
0.40	ブラスト処理面 (50 $\mu$ mRz 以上)	溶融亜鉛めっき構造用鋼材
0.45	無機ステンレス粉末入り塗料塗装面 (塗膜厚 75 $\mu$ mRz 程度)	建築構造用ステンレス鋼材
	プラズマ溶射処理面 (塗膜厚 100 $\mu$ mRz 程度)	
0.23	上記のいずれかの処理による	板厚 6mm 未満の鋼材

## (e) AASHTO (2010 年)

すべり係数	接触面の処理または状況
0.33	清浄な黒皮表面、もしくは、ブラスト処理後 ClassA のコーティング
0.50	未塗装のブラスト処理表面、もしくは、ブラスト処理後 ClassB のコーティング
0.33	溶融亜鉛メッキ後、ワイヤーブラッシングによる粗な面

## 2-4 ナット回転法の既往研究

ナット回転法に関する既往の研究を調査した。調査した文献の概要は、巻末資料に収録する。

※ 参考文献：7)～10)

調査した文献では、具体的なナット回転角の提案等を述べてはいなかったが、振り試験や室内促進試験等の実験から F8T と変形性能や遅れ破壊性能が似ているため、ナット回転法による施工が適用できる可能性があることが述べられている。また、ナット回転法による施工は、現場締付けをした場合と室内における締付けの結果に差が小さいため、ボルトに導入される軸力の信頼性が十分にあることが述べられている。

## 2-5 高力ボルトの遅れ破壊に関する既往研究

高力ボルトの遅れ破壊に関する既往の研究を調査した。調査した文献の概要は、巻末資料に収録する。

※ 参考文献：11)～17)

遅れ破壊は、材料・環境・応力の相互作用によって生じる一種の環境脆化であり、水素による材質劣化の一形態と考えられている。このため、遅れ破壊は水の存在下で腐食反応の結果生じる水素により、誘起されるもので、乾燥状態では使用されていれば遅れ破壊は生じないとされている。収集した文献に記載される損傷事例の集計結果では、箱桁における損傷例が多く、これは箱内部に水が溜まることで高温高湿条件となり腐食反応が生じやすいためであると述べられている。

また促進暴露試験では、締付けの際のナット回転角が  $120^\circ$  と  $180^\circ$  の供試体について、ナット回転角が大きい方が初期破断日数は短くなり遅れ破壊が発生しやすく、最終的な遅れ破壊発生率も高くなる傾向が認められている。ただし、鋼種の違いによる影響は大きく、例えば参考文献 15) の実験では、Y 鋼の場合において促進暴露期間 194 日で 25% の供試体で遅れ破壊が生じたのに対して、Z 鋼の場合では促進暴露期間 2355 日の時点でも一体も遅れ破壊が生じていないことを述べられている。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編・鋼部材編，2017. 11.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 日本建築学会：鋼構造設計規準 (SI 単位版)，2002.
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2018.
- 6) AASHTO：LRFD Bridge Construction Specifications，2010.
- 7) 板垣秀克，和泉公比古：回転法の F10T への適用，首都高技報 No. 7，1975.
- 8) 大貫一生：F10T ボルトのナット回転法による施工，首都高技報 No. 9，1977.
- 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. 9，1977 .
- 10) 田島二郎，青木博文，田中淳夫，小林昌一，北後寿：高力ボルト接合：ナット回転法の提案，JSSC 協会誌 No. 9，1973.
- 11) 中里福和：ボルトの遅れ破壊，鉄と鋼 Vol. 88，2002.
- 12) 松山晋作：橋梁における高力ボルトの遅れ破壊，鉄と鋼 Vol. 69，1983.
- 13) 松岡和巳，宇野暢芳，秋山英二，萩原行人，原田宏明：高力ボルトの遅れ破壊に影響を及ぼす浸水水素量の確率論的評価，鋼構造論文集 第 79 号，2013.
- 14) 平井敬二，脇山広三，宇野暢芳：高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究 (その 1 限界拡散性水素濃度法の提案)，日本建築学会構造系論文集 第 490 号，1996.
- 15) 平井敬二，脇山広三，宇野暢芳，宮川敏夫：高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究 (その 2 暴露破壊)，日本建築学会構造系論文集 第 555 号，2002.
- 16) 平井敬二，宇野暢芳：高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究 (その 3 ボルトに侵入する拡散性水素及びボルト張力)，日本建築学会構造系論文集 第 560 号，2002.
- 17) 福井彰一：高力ボルトの遅れ破壊強度と熱処理，電気製鋼 第 43 卷，1972.
- 18) 日本鋼構造協会：高力ボルト接合技術の現状と課題，2013. 3.
- 19) 日本橋梁建設協会：高力ボルト施工マニュアル，2013. 6.

### 3. スナッグタイト試験

#### 3-1 目的

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

本試験は、F10Tを用いナット回転法でボルト締付けを行った高力ボルト摩擦接合接手の適用に向けた基礎データを取得することを目的に行った。

#### 3-2 試験体

本試験に用いた試験体を以下に示す。

##### 3-2-1 試験体の使用材料および形状・寸法および種類

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

表 3-2-1 使用鋼材の機械的性質および化学成分(スナッグタイト試験)

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)					適用場所
		耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	C	Si	Mn	P	S	
SM490YA	9	457	535	22	0.15	0.19	1.08	0.023	0.007	A1の母板・連結板, B2の連結板
SM490YA	12	482	537	22	0.14	0.18	1.10	0.016	0.003	A2の連結板, B1の母板
SM490YB	16	354	534	20	0.15	0.19	1.08	0.015	0.004	B1の母板
SM490YB	19	461	542	23	0.15	0.19	1.07	0.016	0.005	A3, B3の連結板
SM490YB	22	426	513	25	0.15	0.19	1.08	0.016	0.004	A2の母板

表 3-2-2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値(スナッグタイト試験)

ボルト径	首下長さ (mm)	有効 断面積 (mm <sup>2</sup> )	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)
			4号試験片				製品		製品	製品	
			耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	
M22	70	303	993	1050	18	69	328	32	30	40	0.13
	90		987	1052	18	69	323	32	29	40	0.13
	110		1024	1056	18	69	324	33	30	40	0.129

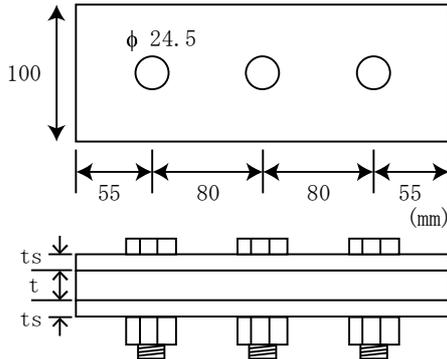


図 3-2-1 スナッグタイト試験片

表 3-2-3 試験体の板厚およびボルトの組合せ

試験 体名	板厚 (mm)		ボルト サイズ
	母板 (t)	連結板 (ts)	
A1	9	9	M22-L70 (3. 2d)
A2	22	12	M22-L90 (4. 1d)
A3	32	19	M22-L110 (5. 0d)

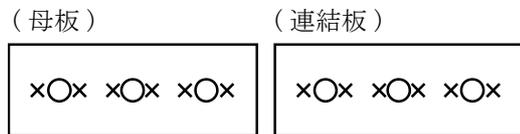
### 3-2-2 塗装膜厚測定

試験体には無機ジンクを塗装した。膜厚測定結果を表 3-2-4 に示す。測定位置は、図 3-2-2 に示すようにボルト孔周辺とし、測定数は、1つのボルト孔に対し、母板の両面および添接板の片面各2点とし、試験体一体あたり計24点測定した。1点につき5回計測し、平均を取った。測定時期は、塗装作業後とした。

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

表 3-2-3 スナッグタイト試験片の膜厚

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



x: 計測位置であり、円孔端から20~30mmを測定

図 3-2-2 無機ジンク膜厚測定箇所

### 3-2-3 ボルト軸力の計測

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

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

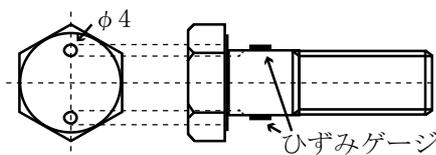


図 3-2-3 ひずみゲージの取り付け

### 3-3 実験方法

ボルトの締付けは、3 社の橋梁製作会社の工場あるいは建設現場で行った。会社をここでは A 社、B 社、C 社と呼ぶことにするが、日常的にボルト締付けを行っている作業員（以下、作業従事者）を A 社から 2 名、B 社では 3 名、C 社では 6 名の合計 11 名が締付け作業を行った。参考として、日常的にボルト締付けを行っていない作業員（以下、非作業従事者）のデータも収集した。

ボルト締付け作業状況を図 3-3-1 から図 3-3-5 に示すが、高さ 70~100cm の机あるいは台に万力で試験片を固定した。また、図 3-3-3 および図 3-3-4 に示す通り、試験体の設置方向を変えてデータを取得した。最初のボルトを締める前にデータロガーのイニシャルを取ったのち、3 本のボルトを連続的に締めた。3 本のボルトの締付け順序は決まりをもうけず任意とした。3 本のボルトを締め終わってからデータロガーでひずみの記録を取った。



図 3-3-1 ボルト締付け時の状況 (A 社その 1)



図 3-3-2 ボルト締付け時の状況 (B 社その 2)



図 3-3-3 試験体設置状況 (B 社その 3:鉛直)



図 3-3-4 試験体設置状況 (B 社その 4:水平)



図 3-3-5 試験体設置状況 (C 社その 5)

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

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

前述した通り、日常的にボルト締付けを行っていない作業員についてのデータも取得できたが、作業員によってバラつきが大きく、ここでは考慮しないこととした。また、締付け方向を変えたことによって導入軸力に有意な差が見られず、橋梁製作会社によっては 1 種類の締付け方向しかデータが取得できなかったこともあり、締付け方向による影響はここでは考慮しないこととした。

最終的には、作業従事者として A 社 108 件、B 社 80 件、C 社 53 件の合計 241 件、非作業従事者として A 社 208 件、C 社 27 件の締付けデータを得た。ただし、非作業従事者のデータは作業員によるバラつきが大きく、ここでは参考データとして取り扱う。

### 3-4 実験結果

ボルトの導入軸力を計算し、鉄道標準<sup>1)</sup>などで規定されている値との比較を行った。ボルトの軸力およびトルクの関係は次の式で表される。

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

ここに、Nはボルト軸力、Tはトルク、kはトルク係数、dはボルト呼び径である。使用したボルトのkとして表3-2-2の値0.129または0.130を用いると、M22の規定値である $150\text{N}\cdot\text{m}^{1)}$ に相当する軸力は52kNと算出された。

まず、作業従事者の試験結果を示す。図3-4-1はボルト軸力の頻度をボルト長ごとに示したものである。たとえばL70は、首下長さ70mmのボルトであることを意味している。ボルトの軸力は52kNを境とし、5kNの範囲でまとめた。図3-4-1より、ボルト軸力は47~52、52~57kNあたりをおおむねピークとした分布になっている。3種類のボルト軸力に対して、それぞれの平均と標準偏差を表3-4-1に示す。また、 $150\text{N}\cdot\text{m}$ を上回る軸力となった割合を表3-4-2に示す。表3-4-2における計とは、ボルト長によらず軸力が52kNを上回った割合である。表3-4-1および表3-4-2より、平均値としては52kNを上回るものの個数としては半数程度であることがわかる。標準偏差は18kN程度であるが、ここでの実験では最大と最小の軸力の差は50kNであり、ボルト軸力は非常にばらついていることがわかる。なお、表3-4-1より各長さにおける軸力の平均値は52kNを2~3kN程度上回っていることを示しており、ボルトが長くなるにつれて軸力が減少傾向であることがわかるが、それほど顕著ではないことがわかる。軸力の標準偏差は、120mmで最大の18.7kN、90mmで最小の15.3kNとなったが、各長さによる差がそれほどないといえる。

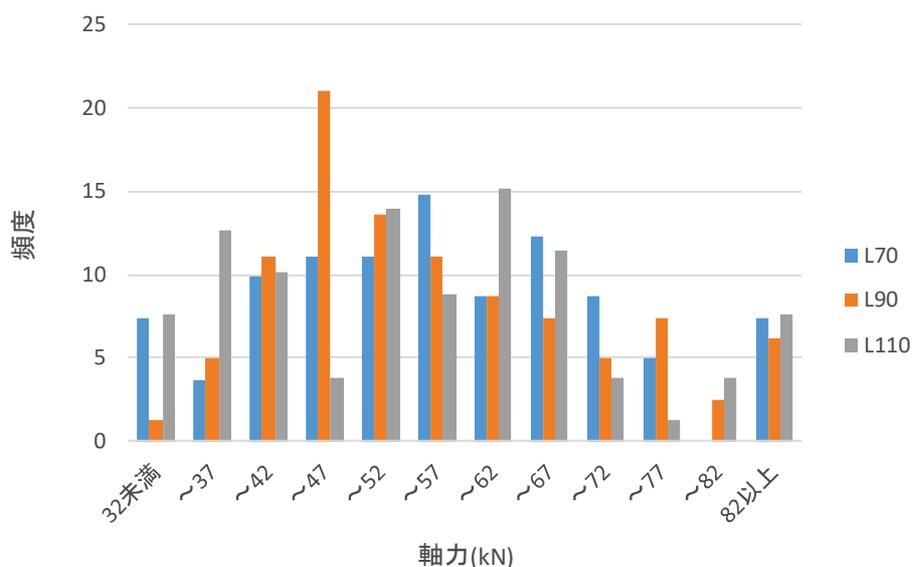


図3-4-1 スナッグタイト試験導入軸力分布 (作業従事者)

表 3-4-1 各ボルトに導入された軸力の平均および標準偏差

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L110	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
軸力値 (kN)	55.7	17.7	54.9	15.3	54.2	18.7

表 3-4-2 軸力 52kN(トルク 150N・m)を上回るボルトの割合(作業従事者)

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L110
割合 (%)	56.8	48.1	51.9

さらに、締付け姿勢による違いを把握するため、鉛直および水平でのデータを記録した。作業従事者の結果を図 3-4-2、図 3-4-3 および表 3-4-3～表 3-4-6 に示す。

水平姿勢について、図 3-4-3 ではバラつきが大きいように見えるが、導入された軸力の平均値および標準偏差については有意な差が見られなかった。軸力 52kN を上回るボルトの割合について、水平姿勢における M22-L70 が突出する結果となった。ただし、水平姿勢のサンプル数が少なかったので参考として捉える。

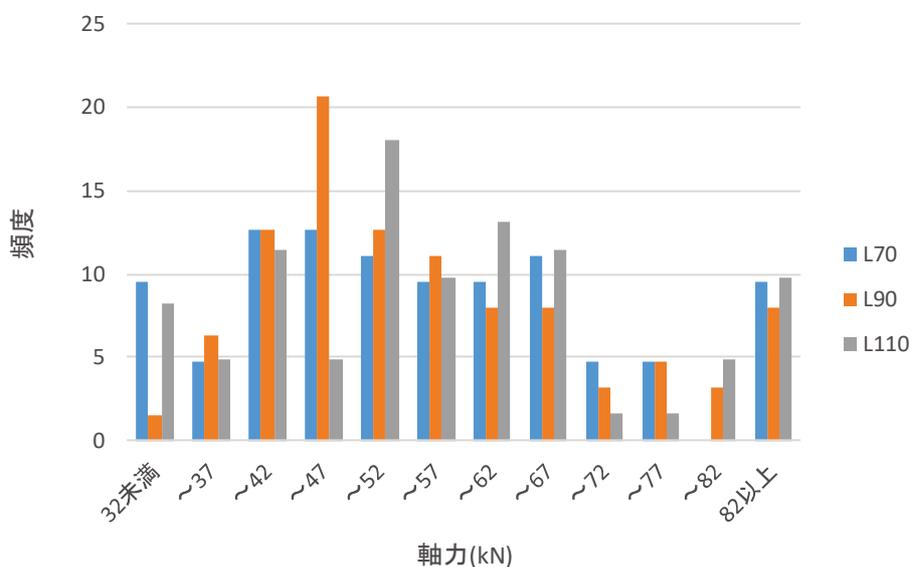


図 3-4-2 スナッグタイト試験導入軸力分布(作業従事者, 鉛直)

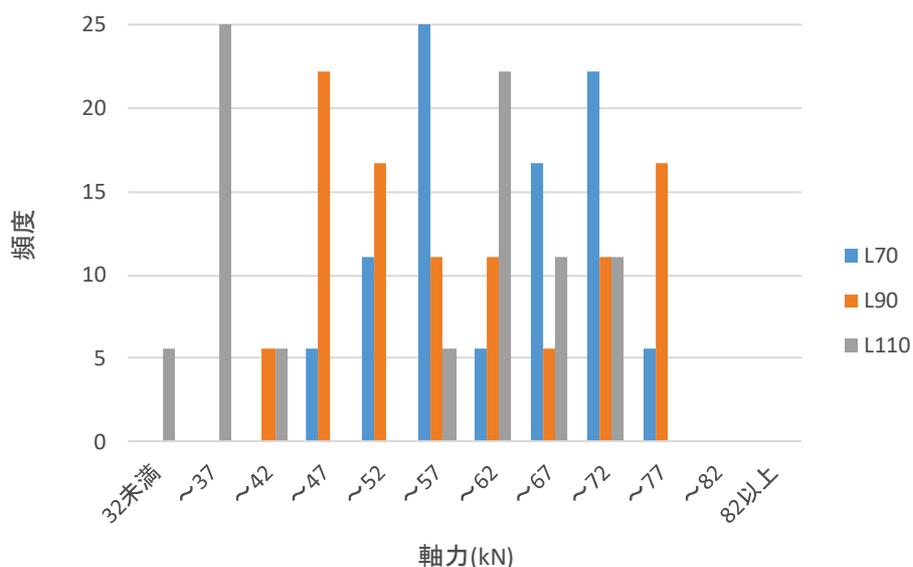


図 3-4-3 スナッグタイト試験導入軸力分布(作業従事者, 水平)

表 3-4-3 各ボルトに導入された軸力の平均および標準偏差(作業従事者, 鉛直)

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L110	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
軸力値(kN)	54.5	19.5	54.4	16.3	55.8	19.5

表 3-4-4 各ボルトに導入された軸力の平均および標準偏差(作業従事者, 水平)

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L110	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
軸力値(kN)	59.8	8.2	56.5	11.1	48.7	14.1

表 3-4-5 軸力 52kN(トルク 150N・m)を上回るボルトの割合(作業従事者, 鉛直)

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L110
割合(%)	49.2	46.0	52.5

表 3-4-6 軸力 52kN(トルク 150N・m)を上回るボルトの割合(作業従事者, 水平)

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L110
割合(%)	83.3	55.6	50.0

続いて、参考として非作業従事者の結果を図3-4-4～図3-4-6および表3-4-7～表3-4-12に示す。

図3-4-1と図3-4-4を比較すると、相対的に作業従事者よりも非作業従事者の方が低い導入軸力の頻度が多いことがわかる。前述した通り、非作業従事者は個々のデータのバラつきは大きかったが、導入軸力の平均値や標準偏差は作業従事者と比べて有意な差が見られなかった。

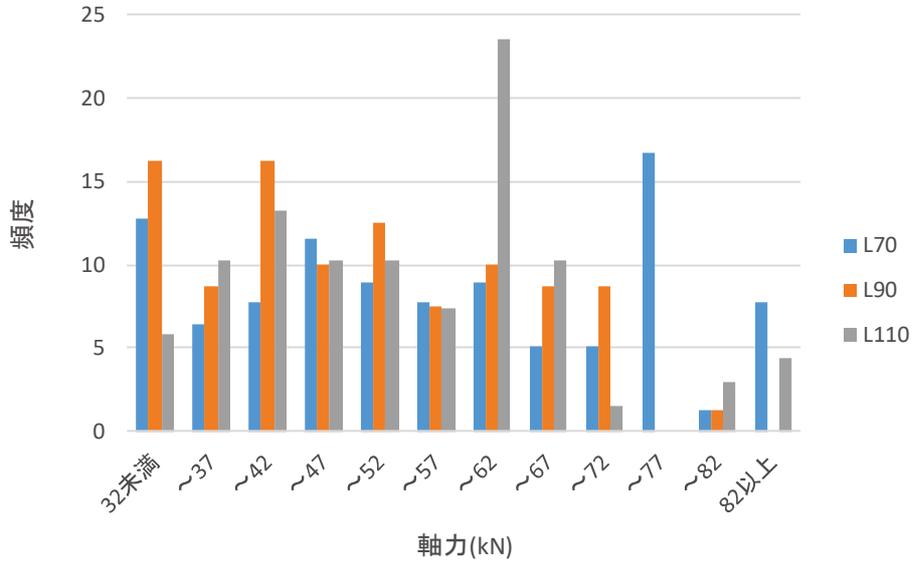


図3-4-4 スナッグタイト試験導入軸力分布 (非作業従事者)

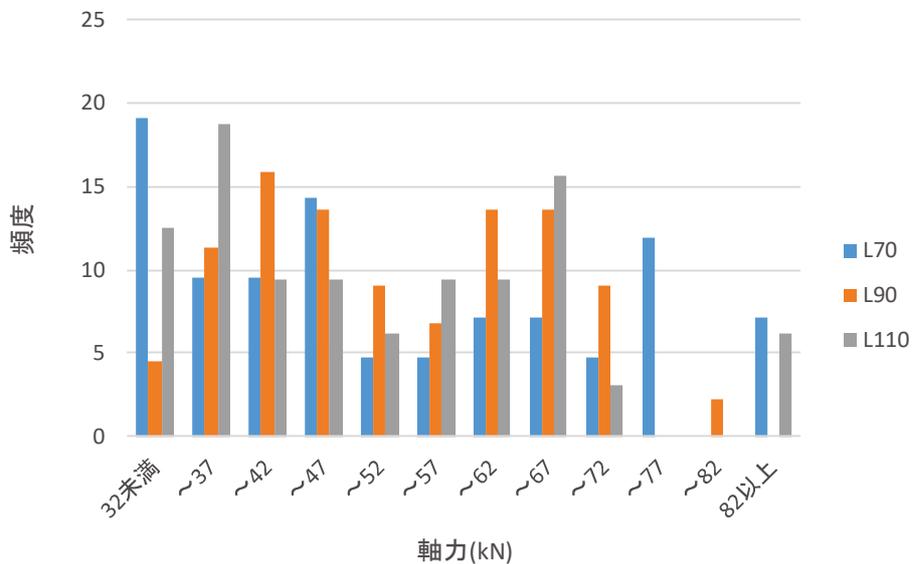


図3-4-5 スナッグタイト試験導入軸力分布 (非作業従事者, 鉛直)

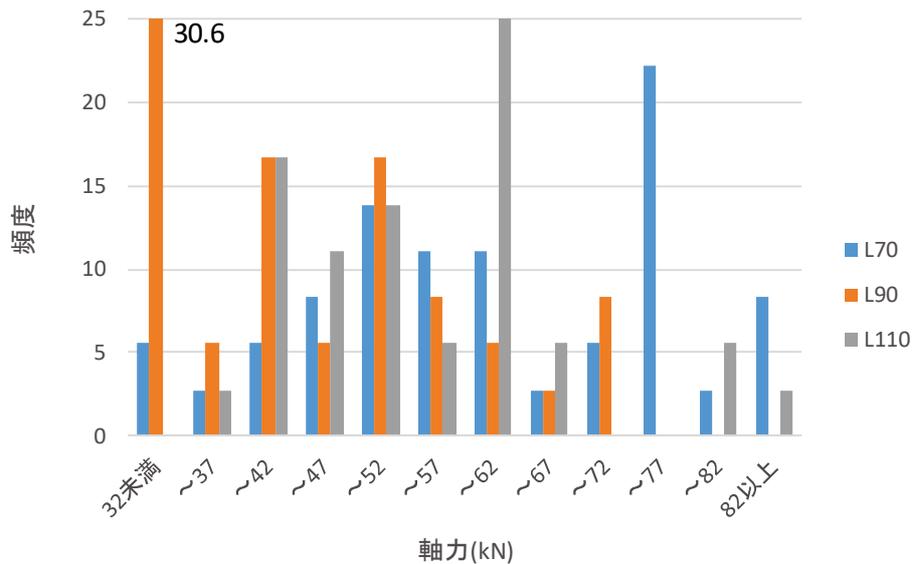


図 3-4-6 スナッグタイト試験導入軸力分布（非作業従事者，水平）

表 3-4-7 各ボルトに導入された軸力の平均および標準偏差（非作業従事者）

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L110	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
軸力値(kN)	54.9	19.2	46.9	14.1	52.2	14.6

表 3-4-8 各ボルトに導入された軸力の平均および標準偏差（非作業従事者，鉛直）

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L110	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
軸力値(kN)	51.1	20.4	50.5	12.9	50.0	16.9

表 3-4-9 各ボルトに導入された軸力の平均および標準偏差（非作業従事者，水平）

ボルト種類	M22-L70		M22-L90		M22-L110	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
軸力値(kN)	59.3	16.7	42.3	14.2	54.3	11.9

表 3-4-10 軸力 52kN(トルク 150N・m)を上回るボルトの割合（非作業従事者）

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L110
割合(%)	52.6	36.3	50.0

表 3-4-11 軸力 52kN(トルク 150N・m)を上回るボルトの割合（非作業従事者，鉛直）

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L110
割合(%)	42.9	45.4	71.7

表 3-4-12 軸力 52kN(トルク 150N・m)を上回るボルトの割合（非作業従事者，水平）

ボルト種類	M22-L70	M22-L90	M22-L110
割合(%)	63.9	25.0	75.0

以上より, いずれのパターンにおいても, 1次締めで締付け量(トルク)の影響は大きいと考えられる. そこで, 次章以降で行う実験では, 1次締めを鉄道標準<sup>1)</sup>の規定値で実施することとした.

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋・鋼部材編, 2017. 11
- 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. 軸力導入試験およびリラクセーション試験

### 4-1 目的

高力ボルト摩擦接合の締め付け方法においては、トルク法とナット回転法がある。トルク法ではトルク係数値に依存しているため、わずかな変動を受けると軸力に影響を受けやすいという問題がある<sup>1),2)</sup>。ナット回転法はF8Tでのみ適用できるが、降伏域までボルト軸力を導入することが許されていることによる。F10Tは降伏域に入ると遅れ破壊の可能性が高くなるが、降伏域に達しないナット回転角がわかれば、F8Tの使用とともに施工性などを高めることが期待できる。

ここではF10Tのナット回転法の提案を目的として、ボルトの径や長さ、ナット回転角をパラメータとして軸力導入試験およびリラクセーション試験を行った。

### 4-2 試験体

#### 4-2-1 試験体の使用材料および形状・寸法

本試験で使用した鋼材および高力ボルトの材料特性をそれぞれ表4-2-1および表4-2-2に示す。試験体の母板および連結板には板厚9～36mmのSM490Yを使用した。使用ボルトは、六角ボルトF10T(M22, M24)とし、ボルト長は70～120mmを用いた。

図4-2-1に試験体形状を示す。試験体は、ボルト径により2種類を使用し、ボルト長により、適用板厚を選定した。1つはM22に対するものであり、もう1つはM24に対するものである。孔径は、各試験体ともに標準孔を用いた。ボルトピッチ(P)や縁端距離(e)は、標準試験片<sup>3)</sup>を参考に決定した。

表 4-2-1 使用鋼材の機械的性質および化学成分

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)					適用場所
		耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	C	Si	Mn	P	S	
SM490YA	9	457	535	22	0.15	0.19	1.08	0.023	0.007	A1の母板・連結板, B2の連結板
SM490YA	12	482	537	22	0.14	0.18	1.10	0.016	0.003	A2の連結板, B1の母板
SM490YB	16	354	534	20	0.15	0.19	1.08	0.015	0.004	B1の母板
SM490YB	19	461	542	23	0.15	0.19	1.07	0.016	0.005	A3, B3の連結板
SM490YB	22	426	513	25	0.15	0.19	1.08	0.016	0.004	A2の母板
SM490YB	25	426	513	25	0.15	0.19	1.08	0.016	0.004	B2の母板
SM490YB	32	418	527	21	0.15	0.18	1.07	0.016	0.006	A3の母板
SM490YB	36	443	535	25	0.15	0.19	1.12	0.016	0.005	B3の母板

表 4-2-2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値

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

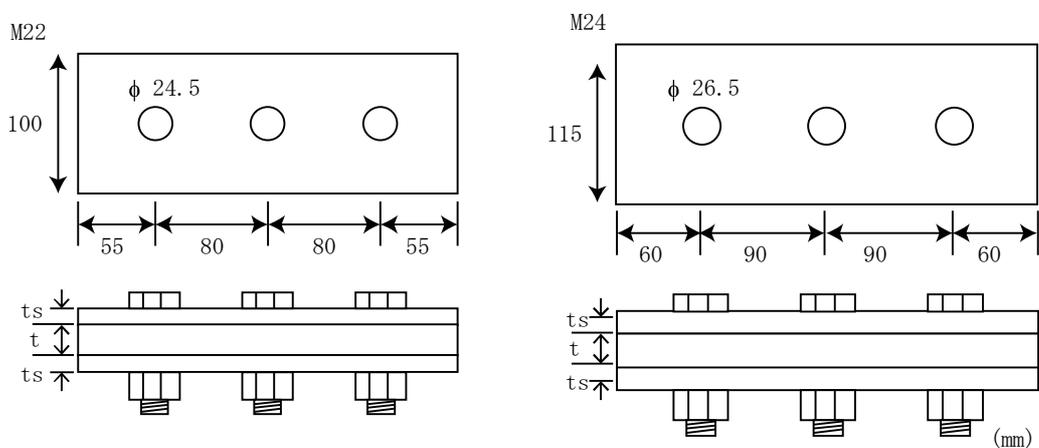


図4-2-1 試験体形状

#### 4-2-2 試験体の種類

試験体の種類を表 4-2-3 に示す。試験体のパラメータは、ボルト径、ボルト長およびナット回転角とした。M22 および M24 の両者ともに 5.0d (d: ボルト径) までを対象とし、M22 で 3 種類のボルト長、M24 でも 3 種類のボルト長の合わせて 6 種類のボルトを用いた。これらのボルトに対し、ナット回転角を 75, 90, 120° の 3 角度で締付けることとした。試験体は、各ボルト径および首下長さのパターンで 3 体製作することになり、合わせて 18 体を試験に供した。

接触面処理は、素地調整 (ブラスト処理 (ISO Sa2 1/2)) を行った後に、無機ジンクを標準膜厚 75 μm 塗布した。

表 4-2-3 試験体の種類

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

#### 4-2-3 塗装膜厚測定

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

膜厚測定結果を表 4-2-4 に示している。無機ジंकの設計膜厚は 75 μm であるが、計測値は 77~98 μm であり、若干厚めであった。

表 4-2-4 無機ジंक膜厚測定結果

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

#### 4-2-4 ボルト軸力の計測

導入軸力およびリラクセーションの評価を行うため、スナッグタイト試験の試験体の際と同様に、ボルト軸部にひずみゲージを取り付け、ボルト軸力を計測した。

6種のボルトそれぞれに対し、荷重とひずみの関係から換算率を求めるキャリブレーション試験（1種類のボルトのつき3本のボルトを使用）を実施し、ひずみからボルト軸力を算出するための換算率を求めた。

#### 4-2-5 ボルトの締付け作業

軸力導入試験において用いたナット回転法によるボルトの締付け手順を図4-2-2に示す。作業は、一次締めおよびマーキング後、本締めを行った。1試験体でボルトは3本あるが、本締め作業では、その内1本(No.1)は、トルクレンチを用いて手締めで行い、残り2本(No.2,3)は、設定した回転角に締付けるナット回転角専用レンチを用いた機械締めとした。手締めは図4-2-3に示すように、中心を削り取った分度器をあてながら回転角の計測を行った。

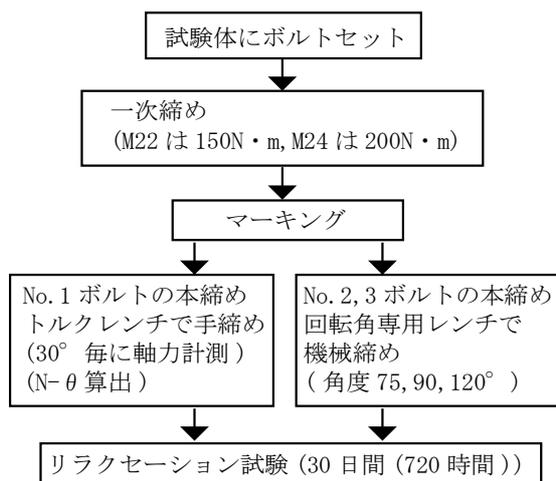


図 4-2-2 軸力導入試験のフロー



図 4-2-3 ナット回転角計測のため分度器

## 4-3 軸力導入試験

### 4-3-1 試験方法

軸力導入試験では、各試験体の No. 1 ボルトについては、回転角を  $30^\circ$  ごとにボルト軸力を計測した。一方、No. 2, 3 ボルトでは、表 4-2-3 に示す所定の角度の軸力のみ計測した。これら両者の結果より、導入軸力と回転角の関係を定量的に評価することとした。

軸力の初期を表す時刻としては、個々のボルトの本締め直後のひずみ値が最高となったのちに、リラクゼーションによるひずみ値減少が安定して始まる時点とした。手締めによるボルトを  $30^\circ$  ごとに締める際もひずみが一旦安定し、下がり始めたと判断できる時点でひずみを軸力に換算した。データロガーのひずみ計測間隔は 10 秒間で、ボルト本締め後あるいは  $30^\circ$  締付け後には声で合図を送ったが、初期時刻としては、締付け直後から 30 秒以内におさまっていた。一連の締付け作業終了後は 1 時間に 1 回の軸力測定を行った。3 日後には 1 日 1 回計測している。

### 4-3-2 試験結果

軸力導入試験の結果を表 4-3-1 に示す。表 4-3-1 においてたとえば A2-3 試験体の No. 2 ボルトの軸力が横線「-」になっているものがあるが、これらはひずみゲージなどの不具合で計測ができなかったものである。

表 4-3-1 の初期導入時の軸力で、No. 1 から 3 の平均値の欄を見ると、M22 および M24 において、ボルト長が長くなるにつれて導入軸力が低くなる傾向およびナット回転角が大きくなるにつれて、導入軸力が高くなる傾向が見られる。

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

表 4-3-1 軸力導入試験およびリラクセーション試験の計測結果の一覧

試験体名	ボルトサイズ	初期導入時の軸力(kN)										リラクセーション(720h)後の軸力(kN)									
		回転量(°)	手締め(トルクレンチ)						機械締め		設計値比率(%)	手締め		機械締め				設計値比率(%)			
			No.1ボルト						No.2ボルト	No.3ボルト		No.1ボルト	割合(%)	No.2ボルト	割合(%)	No.3ボルト	割合(%)				
			0°	30°	60°	75°	90°	120°													
M22	M22x70 3.2d	A1-1	75	43.89	117.8	183.0	241.3		256.7	248.0	248.7	121.3	218.3	106.5	-	-	222.4	108.5	220.4	107.5	
		A1-2	90	50.13	143.6	224.0		282.5		253.3	243.2	259.7	126.7	259.5	126.6	204.5	99.8	218.5	106.6	227.5	111.0
		A1-3	120	60.63	154.9	225.6		282.3	324.0	295.1	293.2	304.1	148.3	306.2	149.4	280.6	136.9	265.7	129.6	284.2	138.6
	M22x90 4.1d	A2-1	75	68.74	140.9	221.7	258.4		231.5	239.2	243.0	118.5	236.7	115.5	209.8	102.3	219.2	106.9	221.9	108.2	
		A2-2	90	67.85	130.1	211.6		277.4		267.2	285.8	276.8	135.0	250.8	122.3	240.5	117.3	260.8	127.2	250.7	122.3
		A2-3	120	54.63	115.3	197.6		263.5	297.0	-	291.6	294.3	143.5	278.6	135.9	-	-	269.8	131.6	274.2	133.8
	M22x110 5.0d	A3-1	75	52.71	101.5	160.8	188.9		209.9	219.4	206.0	100.5	167.2	81.6	195.4	95.3	207.3	101.1	190.0	92.7	
		A3-2	90	41.64	104.1	185.4		253.8		219.5	229.7	234.3	114.3	239.3	116.7	183.4	89.5	216.8	105.7	213.2	104.0
		A3-3	120	51.92	104.0	170.6		226.9	268.0	272.7	-	270.4	131.9	251.8	122.8	253.4	123.6	-	-	252.6	123.2
M24	M24x75 3.1d	B1-1	75	36.38	140.8	226.5	291.7		307.5	297.1	298.8	125.5	271.6	114.1	277.2	116.5	262.7	110.4	270.5	113.7	
		B1-2	90	33.81	139.5	259.3		327.6		-	325.6	326.6	137.2	301.9	126.8	-	-	302.0	126.9	302.0	126.9
		B1-3	120	40.14	131.0	244.6		326.7	349.2	321.1	305.2	325.2	136.6	324.8	136.5	299.5	125.9	282.4	118.6	302.2	127.0
	M24x100 4.2d	B2-1	75	38.02	119.0	235.2	294.8		288.3	284.0	289.0	121.4	267.7	112.5	263.3	110.6	262.3	110.2	264.4	111.1	
		B2-2	90	40.69	135.3	244.8		329.1		326.0	326.5	327.2	137.5	302.5	127.1	300.3	126.2	299.7	125.9	300.8	126.4
		B2-3	120	35.36	119.6	242.8		336.2	348.5	326.8	331.0	335.4	140.9	320.1	134.5	-	-	305.5	128.4	312.8	131.4
	M24x120 5.0d	B3-1	75	40.84	112.6	223.8	279.4		264.8	276.0	273.4	114.9	256.6	107.8	-	-	-	-	256.6	107.8	
		B3-2	90	41.12	112.8	202.7		289.0		303.9	305.9	299.6	125.9	267.9	112.5	281.7	118.4	278.5	117.0	276.0	116.0
		B3-3	120	44.30	131.4	228.4		324.5	337.3	316.5	315.9	323.2	135.8	312.5	131.3	293.1	123.1	295.4	124.1	300.3	126.2

#### 4-4 リラクセーション試験

##### 4-4-1 試験方法

リラクセーション試験は、表 4-2-3 で示した 18 ケースであり、合わせて 54 本のボルトとし、計測期間は 720 時間(30 日)とした。

##### 4-4-2 試験による軸力残存率の結果

図 4-4-1 に、リラクセーションによるひずみの経時変化を示す。表 4-4-1 には、リラクセーション後の軸力を数値で示している。図 4-4-1 の縦軸は初期のひずみ値により無次元化したものである。これらの曲線は試験体にある 3 つのボルトの値を平均したものである。

図 4-4-1 (a)～(c)は M22、図 4-4-1 (d)～(f)は M24 の結果である。M22-L75 および-L110 の一部で残存率が 90%を若干下回る程度に落ち込んでいる試験体、あるいは、90%程度にまで低下している試験体が見られる。しかしながら、他の大部分のボルトにおいては、軸力低下は 92～94%程度におさまっている。

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

ナット回転角との関係を見ると、多くの試験体において、回転角が大きいほうが、軸力残存率が高い傾向が見られた。

リラクゼーション試験において、720時間後の軸力残存率の数値を表にしたものが表4-4-1であるが、既往の研究において、南ら<sup>4)</sup>が同様に無機ジンのリラクゼーション試験を行ったが、軸力残存率はおおむね90%程度であり、既往の研究と同様の傾向を示した。

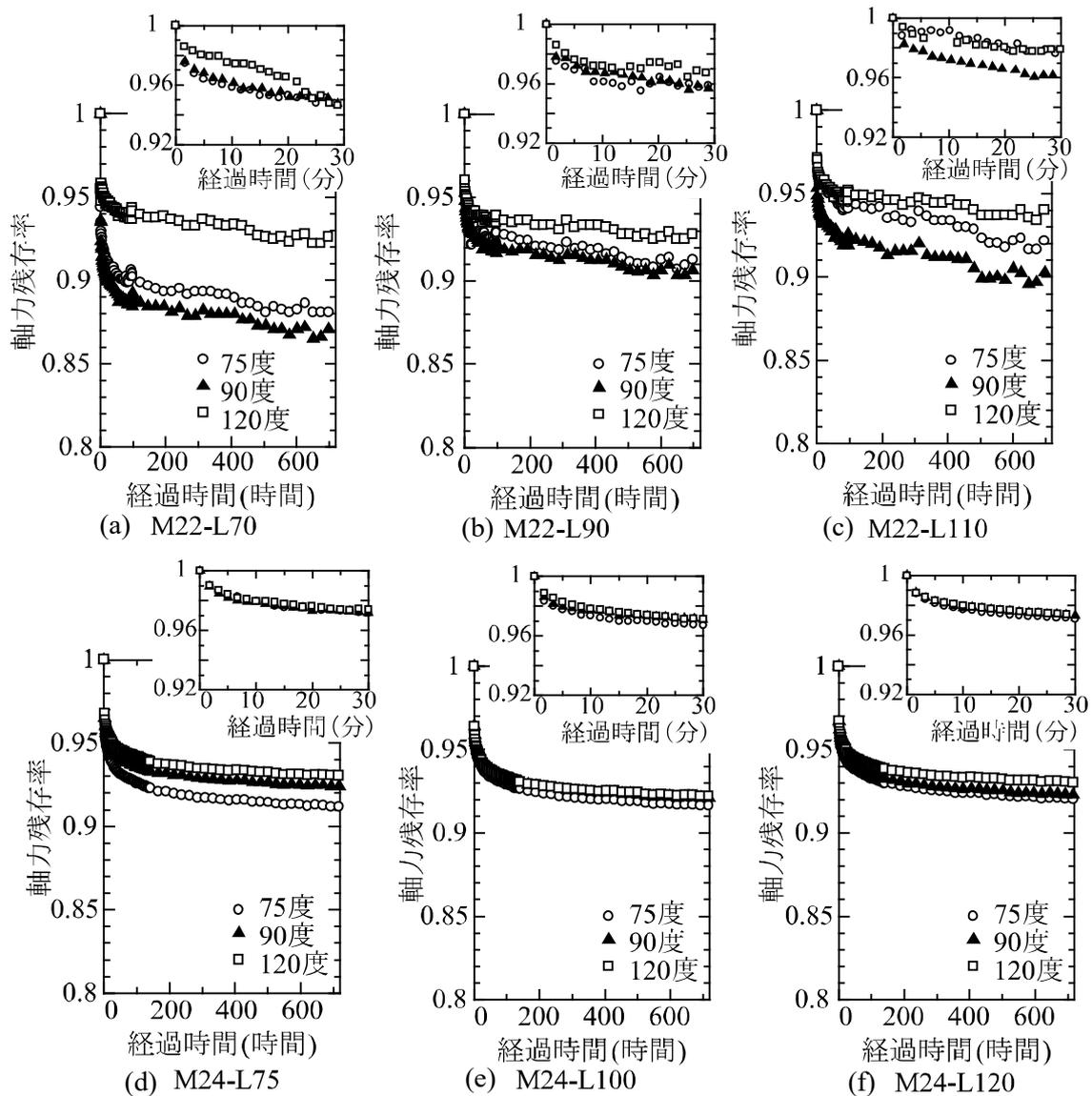


図 4-4-1 リラクゼーション試験による軸力残存率の低下

表 4-4-1 残存軸力の割合

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

#### 4-5 F10T でのナット回転量の提案

図 4-5-1 に、軸力導入試験時のナット回転量と導入軸力の関係を示す。図 4-5-1 (a)～(c) は M22、(d)～(f) は M24 の場合である。

図 4-5-1 (a)～(b) の M22 において、L70 および L90 では、ナット回転量が 60° ではおおむね設計軸力が導入されていることがわかる。また、ナット回転量が 75° になると設計軸力の 120%が導入されているといえる。しかし、図 4-5-1 (c)に示すように、L110 になると、ナット回転量が 75° で設計軸力とほぼ同じ軸力が導入され、90° で 120%になる結果となった。ナット回転量が 120° になると、L70 および L90 において、ボルト軸力は設計軸力の 140%になる。図 4-5-1 (b)の L90 においては、ナット回転量が 90° を超えると導入軸力との関係が線形ではなくなっている。図 4-5-1 (d)～(f)の M24 においては、L75、L100 だけでなく、L120 の場合でもナット回転量 60° において設計軸力と同等の軸力が導入されていること、およびナット回転量 75° で 120%が導入されていることがわかる。M24 ではすべてのボルト長において、ナット回転量が 90° を超えると、それまでの導入軸力-ナット回転角関係から傾きが減少し、非線形領域に入っていることがわかる。

以上の結果から、実施工でのナット回転法の適用に向けたナット回転量の提案を行う。ここでのボルト締付けは締付け精度が高い、ナット回転角専用レンチを使用することを前提としている。適切なナット回転量とは、ボルトねじ部が降伏域(非線形性が生じない)に入らないこと、およびリラクセーション後も設計ボルト軸力を満足することの条件を満たす回転量<sup>5),6)</sup>となる。なお、トルク法では、設計ボルト軸力の 110%の軸力となるように締付け、その締付けトルクの規定上限値は、5 個の平均値において M22 で 261kN(127%)である。実施工では、個々のボルトでは 200～260kN で締付けられ、その平均値は 231kN(112%)である<sup>4)</sup>。

図 4-5-2 にリラクセーション後、つまり 720 時間後のボルト軸力と締付け時のナット回転量の関係を示す。図 4-5-2 (a)の M22 においては、L70 および L90 では 90° が上記で示した軸力範囲に入っているといえる。L110 では 90° においては設計軸力とほぼ同じ値になってしまうことからそれより若干大きい 105° が、L70 と同等の軸力であると考えられる。

表 4-3-1 の M24 においては、M22 より同じ角度でも軸力が高く、L75 および L100 において 90° では 126%を上回る。よって 90° よりも若干小さい 85° がよいと考えられる。85° における近似線では 120%となる角度となる。ただし、L120 においては、回転量 90° において軸力は 116%となっているので、90°

でよいと判断した。

既往の研究で遅れ破壊に関するものとして池田ら<sup>7)</sup>のものがある。池田らはF10T-M22相当のボルトを用いて海上環境などで暴露試験を20年間続けている。その中に軸力350kNのものであっても拡散性水素濃度が0.6ppm程度で遅れ破壊の可能性が生じてくる1.0ppmに対して余裕があることを示している。他の文献<sup>8),9)</sup>でも遅れ破壊は報告されていない。西川ら<sup>10)</sup>も腐食環境への配慮が必要と述べつつも、鋼材品質の向上もあり、遅れ破壊は起こりにくいのではないかと述べている。

提案されたナット回転量をまとめると表4-5-1のようになる。なお、施工に関しては、従来と同様に適切な施工管理を行い、特に一次締めめの軸力管理には十分な配慮が必要であると考えている。上記の既往の研究結果もふまえて、提案する方法でボルトを締め付けたとしても遅れ破壊の可能性は少ないと考える。なお、5.0dを越える場合は、試験を行い、回転量を設定する必要があると考えられる。

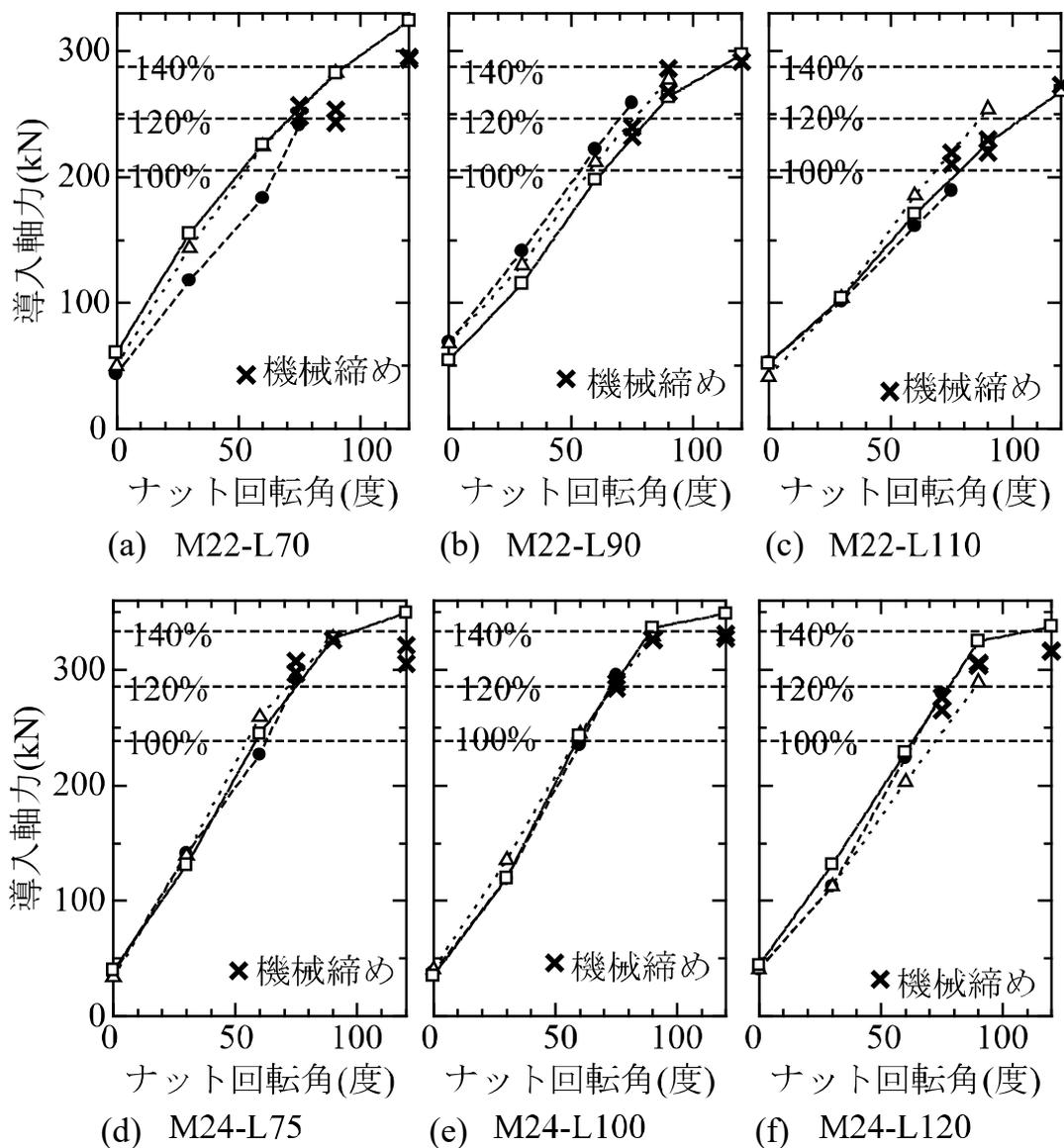


図 4-5-1 ナット回転量とボルト軸力

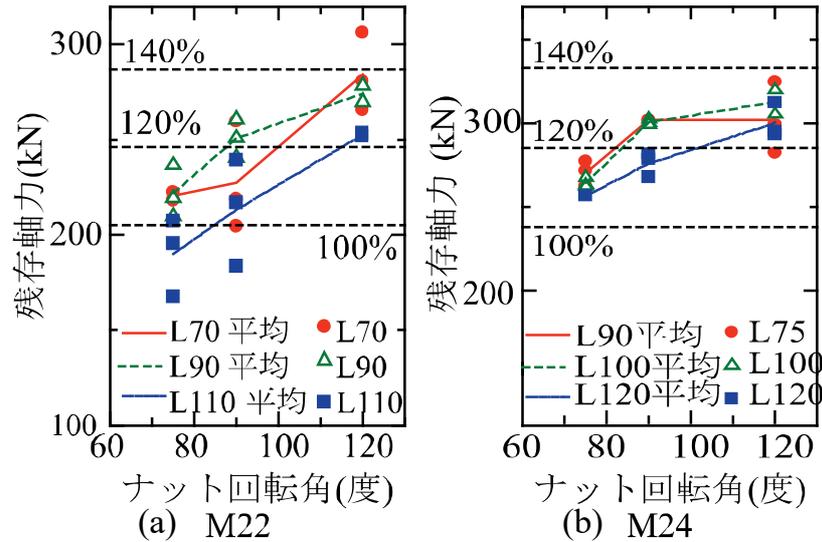


図 4-5-2 720 時間後のボルト軸力とナット回転角

表 4-5-1 提案するナット回転量

ボルト締め付け	ボルト径			
	M22		M24	
ボルト長	≤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

参考文献

- 1) 田島二郎, 青木博文, 田中淳夫, 小林昌一, 北後寿: 高力ボルト接合: ナット回転法の提案, JSSC No. 9, 1973.
- 2) 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, 1975.
- 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) 南邦明: 厚膜型無機ジンクリッチペイントを施した高力ボルト継手における導入軸力の影響の考察, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 1, pp. 58-63, 2018.
- 5) 南邦明, 斉藤雅充, 横山秀喜, 杉本一朗, 能島隆男, 増永寿彦, 長崎英二: 亜鉛アルミ擬合金溶射を施した高ボルト摩擦接合継手に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 2, pp. 427-439, 2012. 6
- 6) 南邦明, 吉原伸行, 徳富恭彦, 鈴木茂弘: りん酸塩処理した溶融亜鉛めっき接合面の高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 69, No. 3, pp. 467-480, 2013. 10
- 7) 池田秀継, 畑中清: 耐力点締付法に用いる摩擦接合用高力ボルトの暴露試験報告, 鋼構造論文集, Vol. 21, No. 84, pp1-7, 2014.
- 8) 橋田芳朗, 橋本郁郎, 今村壮宏, 山下恭敬, 松田哲夫, 山口弘信: 38 年供用後の HTB F11T の遅れ破

壊特性，土木学会第 67 回年次学術講演会，I-344，2014.

9) 本州四国連絡橋公団，海洋架橋調査会：工場部構造委員会報告書，本州四国連絡橋の海洋架橋技術に関する調査研究，1992. 3.

10) 西川和廣，高岡司郎，菅原一昌：高力ボルト締付け工法—耐力点法—，橋梁と基礎，Vol. 24, No. 7, pp. 35-43, 1990.

## 5. すべり耐力試験

### 5-1 目的

4章に引き続き、F10Tのナット回転法の適用を目的とし、4章で提案された回転角により締め付けた試験片に対して、軸力導入試験、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を行ったので、その結果を報告する。

### 5-2 試験体

#### 5-2-1 試験体の使用材料および形状・寸法

本試験で使用した鋼材および高力ボルトは、2章、3章と同じ表4-2-1、表4-2-2で示した材料を使用した。

試験体形状を図5-2-1に示す。ボルト径による2種類を使用し、ボルト長により適用板厚を選定した。また、孔径は、各試験体ともに標準孔を用い、その他の寸法については、標準試験片<sup>1)</sup>の寸法とした。母板あるいは連結板の降伏荷重に対するすべり荷重の比( $\beta$ 値)は0.6~0.9であり、すべり先行で限界状態となる条件となっている。なお、試験体は固定側とすべり側を設定し、固定側については3本のボルトを配置し、すべりが生じないように配慮した。

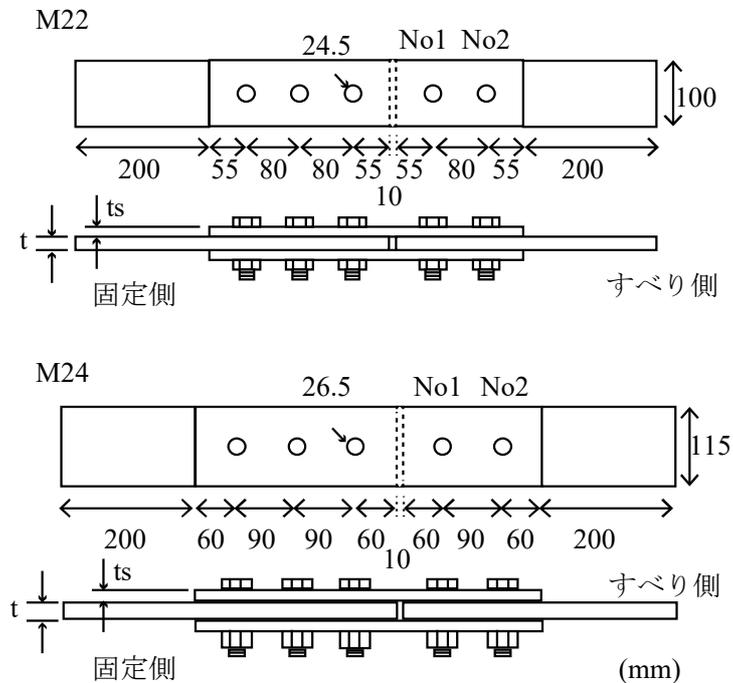


図 5-2-1 試験体形状

## 5-2-2 試験体の種類および接触面の表面処理

試験体の種類を表 5-2-1 に示す。試験体の種類は、2 章、3 章を参考に、ボルト径およびボルト長を変えた 4 種類とし、試験体は、各種類で 3 体製作し、合わせて 12 体を試験に供した。

塗装作業、膜厚計測についても、2 章、3 章と同様とした。また、これらの作業は、2 章、3 章の試験体と同時にを行った。膜厚計測結果を表 5-2-2 に示す。

表 5-2-1 試験体種類

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

表 5-2-2 無機ジंक膜厚測定結果

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

## 5-3 試験概要

### 5-3-1 ボルトの締め付けおよびひずみ計測

一次締めおよび本締めは、4 章で提案した表 4-5-1 に従って行った。なお、固定側(すべらせない側)のボルトについては、120° で締め付けた。

ひずみゲージ取り付け位置やひずみ計測方法等は、2 章、3 章と同様とした。ただし、計測は、1 つの試験体ですべり側の 2 本のみとした。

### 5-3-2 リラクゼーション試験

リラクゼーション試験は、表 5-2-1 で示した 12 ケースであり、合わせて 24 本のボルトとし、計測期間は 720 時間(30 日)とした。

### 5-3-3 すべり耐力試験

すべり耐力試験は、ボルト締付け 720 時間後に実施した。載荷状況を図 5-3-1 に示す。試験には載荷能力 2000kN の THU 型万能試験機(東京衡機)を用いた。本試験では、試験体両端部それぞれ 130mm の範囲をチャックで固定し、試験体のすべりが生じるまで引張荷重を徐々に加えた。試験時には、図 5-2-1 に示す No. 1 ボルト位置で母板と連結板間の相対変位を測定した。図 5-3-1 にクリップゲージ側面の拡大図を示しているが、アクリル製の支え材を 2 個使用し、一つを母板に接着、もう一つを連結板に接着することで相対変位を測定した。クリップゲージは動ひずみ測定器およびデータロガーに接続し、100Hz サンプルングでデータを取得した。

すべり耐力は、荷重が急激に下がるか、荷重の降下がなくすべりが不明確な場合はボルト位置での相対変位が 0.1mm になったときの荷重値<sup>2)</sup>とした。

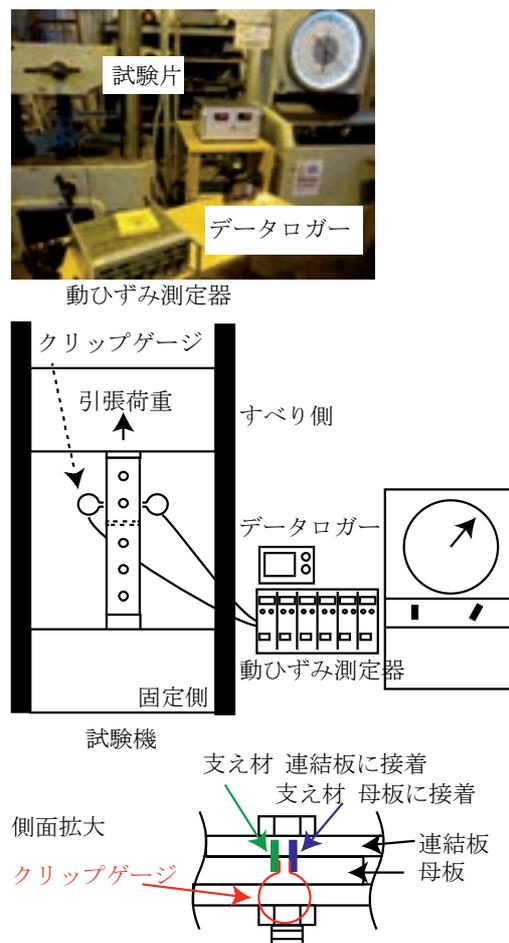


図 5-3-1 すべり耐力試験載荷状況

## 5-4 試験結果

### 5-4-1 ボルト軸力計測結果

ボルト軸力導入試験結果を表 5-4-1 に示す。初期導入軸力は設計軸力の 113～133%となったが、大半が 120%台になった。120～130%となるように、ナット回転量を決めたのでこの範囲に入ったことになるが、D2 シリーズ、つまり M24-L120 では低めになってしまった。

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

表 5-4-1 すべり耐力試験結果およびすべり係数

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

### 5-4-2 すべり係数算出結果

すべり荷重およびすべり係数算出結果を表 5-4-1 に示す。

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

すべり係数は、式(5-4-1)を用いて計算した。ボルト軸力としては、載荷直前のボルト軸力( $N_a$ )を用いて計算した $\mu_a$ と、設計ボルト軸力( $N_b$ )を用いて計算した $\mu_b$ を示している。

$$\mu = \frac{P}{mnN} \quad \dots \text{式(5-4-1)}$$

$\mu$  : すべり係数,  $P$  : すべり荷重  
 $m$  : 接触面数,  $n$  : ボルト本数,  $N$  : ボルト軸力

いずれの試験体においてもすべり係数( $\mu_a$ )は、道路橋示方書<sup>3)</sup>でも示されている無機ジンクリッチペイント下地 0.45 を上回り、0.48~0.64 の範囲にあった。ボルト径が太いほうが、また、ボルト長が長いほうがすべり係数が高くなる傾向はみられたが、差はほとんどないといえる。

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

### 5-4-3 すべり係数に及ぼす導入軸力、膜厚の影響

すべり係数と軸力の関係を図 5-4-1 に、すべり係数と膜厚の関係を図 5-4-2 に示す。軸力が高くなれば、すべり係数も若干低くなる傾向が報告されているが<sup>4)</sup>、本試験ではその傾向は見られなかった。また、一般に膜厚が薄くなるとすべり係数は低くなり、厚くなり過ぎても低くなる傾向<sup>1)</sup>にあるが、図 5-4-2 に示すように本試験の膜厚のばらつきの範囲程度ではすべり係数には影響しなかった。

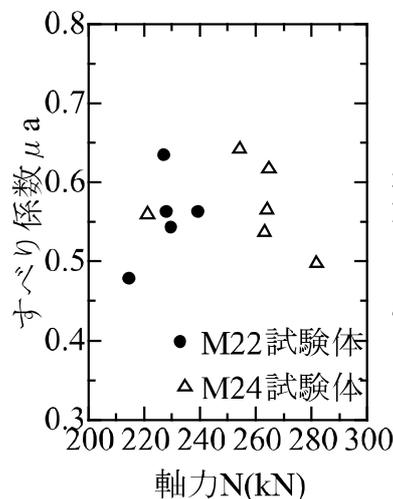


図 5-4-1 载荷直前のボルト軸力を用いて計算したすべり係数とボルト軸力

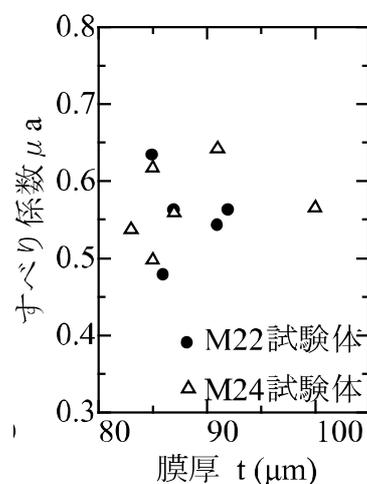


図 5-4-2 载荷直前のボルト軸力を用いて計算したすべり係数とジンク膜厚

#### 5-4-4 すべり耐力試験後の接触面の観察

試験体の試験後の接触面(すべり面)を図 5-4-3 に示す。図 5-4-3(a)に示すように、ボルト孔周辺のすべったと思われる箇所では無機ジンクの剥離が生じた。塗膜の剥離状況が著しい場合の方が、すべり係数は低くなる傾向となった。図 5-4-3(c)に示すように、厚い板では塗膜剥離の程度が小さかった。また、ボルト孔のこぼ面にボルトが接触した状態(支圧状態)になったと思われる試験体はなかった。

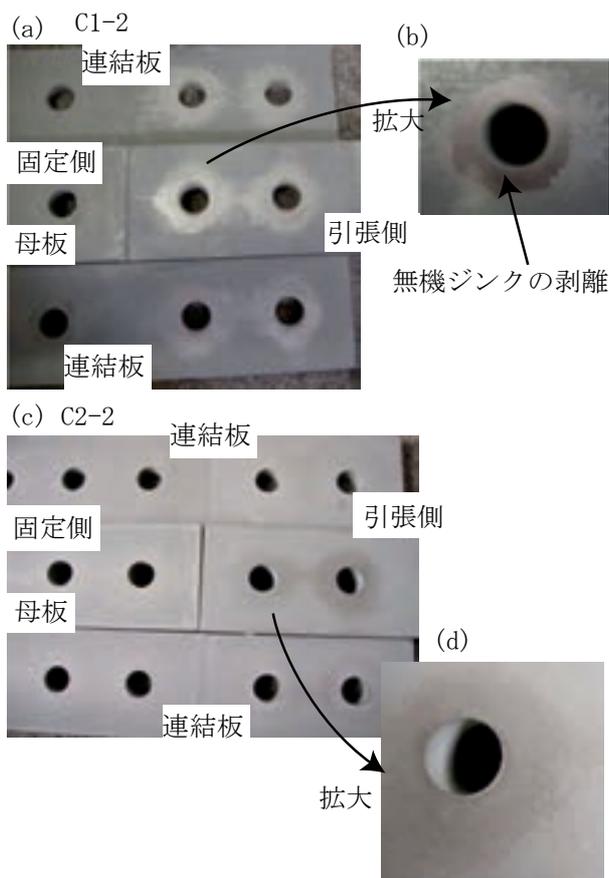


図 5-4-3 すべり耐力試験後の接触面の観察

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 南邦明，田村洋，白旗弘実，内田大介，吉岡夏樹，濱達矢：摩擦処理面に応じた変位量によるすべり判定値の提案，土木学会第 74 回年次講演会，2019. 9.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編・鋼部材編，2017. 11
- 4) 南邦明：厚膜型無機ジンクリッチペイントを施した高力ボルト継手における導入軸力の影響の考察，土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 1, pp. 58-63, 2018.

## 6. 長期リラクセーション試験

### 6-1 試験の目的

材料が一定ひずみを保持しているとき、応力が時間とともに減少する現象をリラクセーションという。応力弛緩、応力緩和とも呼ばれている。高力ボルトのリラクセーションの発生原因としては、ボルトねじ部や接合面の局所的な塑性変形やクリープ、ボルト軸部のクリープ、塗膜のクリープが考えられている。ボルト軸力低下量に影響を与える因子として他に、導入軸力、接合面の表面処理およびボルト孔の余裕が考えられている。

摩擦継手の高力ボルト軸力の経年変化についてはいくつかの文献がある。鋼構造接合資料集成<sup>1)</sup>では、軸力低下のグラフとともに赤錆で 5%、塗装処理で 10%、溶融亜鉛処理で 15%の軸力低下があることを示している。柳沼<sup>2)</sup>は詳細な文献調査で、主に、無塗装系(赤錆、ブラスト)、塗装系(無機ジンクリッチペイント、溶融亜鉛めっきなど)をパラメータに F8T、F10T、S10T のボルトの軸力低下の度合いをまとめている。残存軸力  $y$  は、時間  $x$  の関数で、片対数グラフ上で  $y=a \times \log(x) + b$  で回帰して、100 年後の残存軸力として、無塗装系で約 95%、無機ジンクで厚い(300  $\mu$  m)もので 80%、比較的薄い(50  $\mu$  m)もので 90%、溶融亜鉛めっきでは 80~90%であることを示している。柳沼はすべり係数の経年変化も調べているが、平均すればすべり係数にはほとんど変化がないことを示している。

ボルト軸力に関して、軸力が安定するのに数日しかかからないものもあれば、1 週間程度かかる場合、1 か月程度かかる場合など<sup>3,4)</sup>、ばらつきも多い。数か月といったオーダーになれば、経年変化の影響も受けるものと思われる。ここでは 1 年ほどの時間をかけて行ったリラクセーション試験の結果を報告する。ボルト締付け方法および軸力の変化、気温の変化(経年変化)との関係をまとめる。

### 6-2 試験体および軸力導入試験

リラクセーション試験で使用した試験体を図 6-2-1 に示す。試験片の鋼種は SM490Y である。試験体の機械的性質および化学組成は表 6-2-1 に示すとおりである。ボルトピッチや縁端距離は標準試験片を参考にしている。試験体の形状は 4 章の M24 で用いたものと同じであるが、ボルト長さに応じた 3 種類を用意した。母板および連結板の組み合わせを表 6-1-2 に示す。表 6-2-3 に使用したボルトの機械的性質を示す。試験片の総数は 9 体となる。試験体には無機ジンクリッチペイントを、厚さ 75  $\mu$  m を目安となるように塗装している。

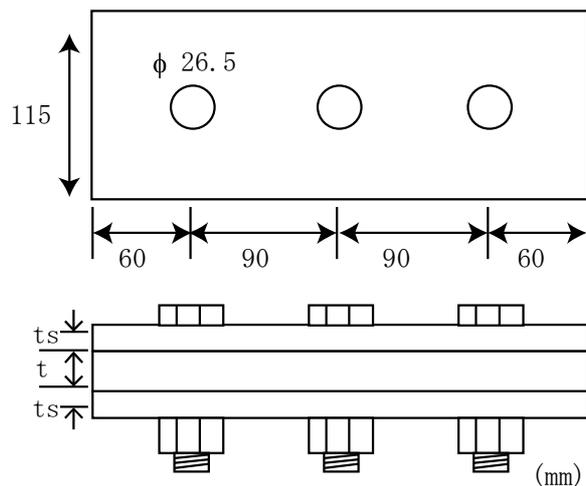


図 6-2-1 リラクゼーション試験で用いた試験体

表 6-2-1 試験体の母板，連結板の鋼種，機械的性質および化学成分

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分(%)				
		耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	C	Si	Mn	P	S
SM490YA	9	457	535	22	0.15	0.19	1.08	0.023	0.007
SM490YA	12	482	537	22	0.14	0.18	1.10	0.016	0.003
SM490YB	16	354	534	20	0.15	0.19	1.08	0.015	0.004
SM490YB	19	461	542	23	0.15	0.19	1.07	0.016	0.005
SM490YB	25	426	513	25	0.15	0.19	1.08	0.016	0.004
SM490YB	36	443	535	25	0.15	0.19	1.12	0.016	0.005

表 6-2-2 試験体の母板，連結板の種類および本締めナットの回転角

試験 体名	板厚(mm)		ボルト サイズ	ボルト締め付け	
	母板 (t)	連結板 (ts)		1次締め	本締め
B1-1	12	9	M24-L75 (3.1d)	200N・m	75°
B1-2					90°
B1-3					120°
B2-1	25	16	M24-L100 (4.2d)		75°
B2-2					90°
B2-3					120°
B3-1	36	19	M24-L120 (5.0d)		75°
B3-2					90°
B3-3					120°

表 6-2-3 ボルトの機械的性質

ボルト径	首下長さ (mm)	有効 断面積 (mm <sup>2</sup> )	ボルト						ナット	座金	トルク 係数值 (平均値)
			4号試験片				製品		製品	製品	
			耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	
M24	75	353	1049	1093	18	73	373	33	26	41	0.122
	100		1033	1072	18	64	376	33	27	40	0.129
	120		1030	1079	21	67	379	32	27	39	0.131

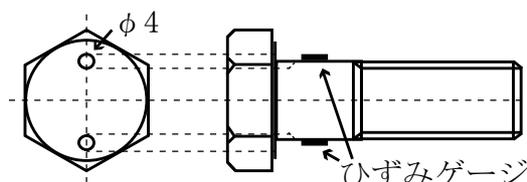


図 6-2-2 ボルトへのひずみゲージ貼り付け

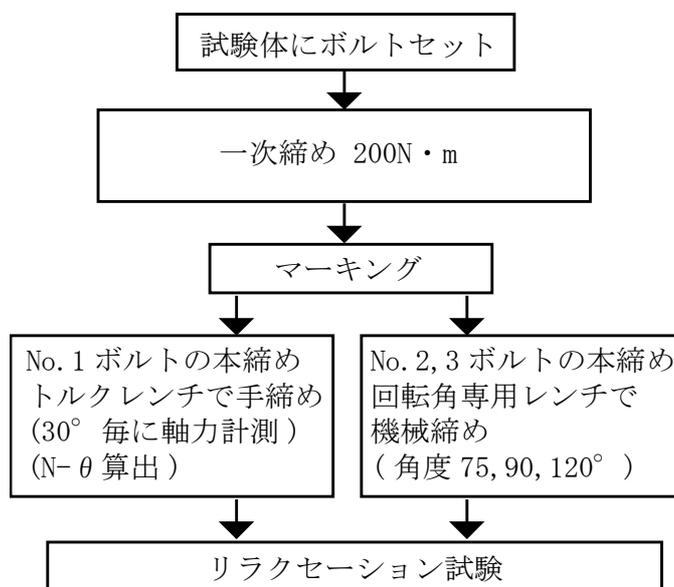


図 6-2-3 試験のフロー

ボルトのひずみゲージ貼り付けを図 6-2-2 に示す。3 章と同様に、ボルト頭部 2 箇所直径 4mm の穴を明け、ボルト軸部に長さ 5mm のゲージを貼り付けた。

軸力導入試験のフローを図 6-2-3 に示す。ナット回転法によりボルトを締めた。1 次締めは 200N・m とした。1 次締めの後、マーキングを行った。表 6-2-2 に示すように、ナット回転量をパラメータとし、75、90、および 120 度としている。ボルトの 1 つはトルクレンチによる手締めを行い、30 度ごとに軸力を求めた。軸力は、別途行ったキャリブレーション試験で得られたひずみ-軸力関係により計算している。残りの 2 本のボルトはナット回転角専用レンチによる機械締めである。

軸力導入試験開始後、ひずみデータを記録するデータロガーは 10 秒おきにデータを取得するように

設定した。30度おきの手締めやレンチによる機械締めが終わった際に、データロガーの確認者に合図を送り、確認者はひずみ値が安定するのを確認し、そこを初期値とした。ひずみの初期値となる時刻は合図が出されてからおおむね30秒以内には始まっていた。

9体の試験片のボルトすべてを締付けた後には、ひずみ計測は1時間に1回に変更した。これを3日間続けた後には、1日1回のひずみ計測の設定とした。締付けたボルトの他に、温度補正のためのダミーのボルト1本から出ているひずみゲージもデータロガーにとりつけた。図6-2-4に締め付け時の実験状況および試験体の設置状況を示す。



図 6-2-4 軸力導入試験状況およびリラクセーション試験体設置状況

### 6-3 軸力導入試験結果

初期軸力導入試験結果を表 6-3-1 に示す。表中に「-」となっているものはひずみゲージの断線などでデータが取れなかったものである。ボルトに導入された軸力の値としては、ナット回転量が大きくなるにつれて大きくなる傾向が、また、同一のナット回転量ではボルト長さが長くなるにつれて、軸力が小さくなる傾向が読み取れる。

設計値比率では、M24-L75 および 100 では 120~140%程度の範囲になっており、M24-L120 では、110~130%程度になっている。

ナット回転角とボルト軸力の関係を図 6-3-1 に示す。図 6-3-1(a), (b)および(c)はそれぞれボルト長さが 75mm, 100mm, 120mm の場合である。多少のばらつきがあるものの、ナット回転角が 60 度程度になれば、設計ボルト軸力が導入されている可能性が高いといえる。また、ナット回転角が 90 度を超えると、回転量と軸力の間には線形性が見られなくなる。これらは 4-4 の結果とおおむね一致している。

表 6-3-1 軸力導入試験結果

試験体名	ボルトサイズ	初期導入軸力(kN)										設計値比率(%)	
		回転量(°)	手締め(トルクレンチ)						機械締め		平均値		
			No.1ボルト						No.2ボルト	No.3ボルト			
		0°	30°	60°	75°	90°	120°						
M24	B1-1	M24-L75 3.1d	75	58.7	107.8	242.6	287.3			307.6	259.0	284.7	119.6
	B1-2		90	54.7	170.9	264.6		306.8		334.1	262.5	301.1	126.5
	B1-3		120	47.7	164.5	262.5		334.0	349.2	315.7	303.4	322.8	135.6
	B2-1	M24-L100 4.2d	75	67.7	209.0	288.4	318.5			251.9	-	285.2	119.8
	B2-2		90	65.2	168.2	238.5		311.2		336.1	369.7	339.0	142.4
	B2-3		120	70.6	163.8	249.3		304.4	317.3	301.7	292.3	303.8	127.6
	B3-1	M24-L120 5.0d	75	44.2	129.8	205.4	285.6			256.8	221.4	254.6	107.0
	B3-2		90	48.8	110.0	175.0		244.8		279.1	272.7	265.5	111.6
	B3-3		120	60.8	149.9	235.1		302.7	317.6	303.0	-	310.3	130.4

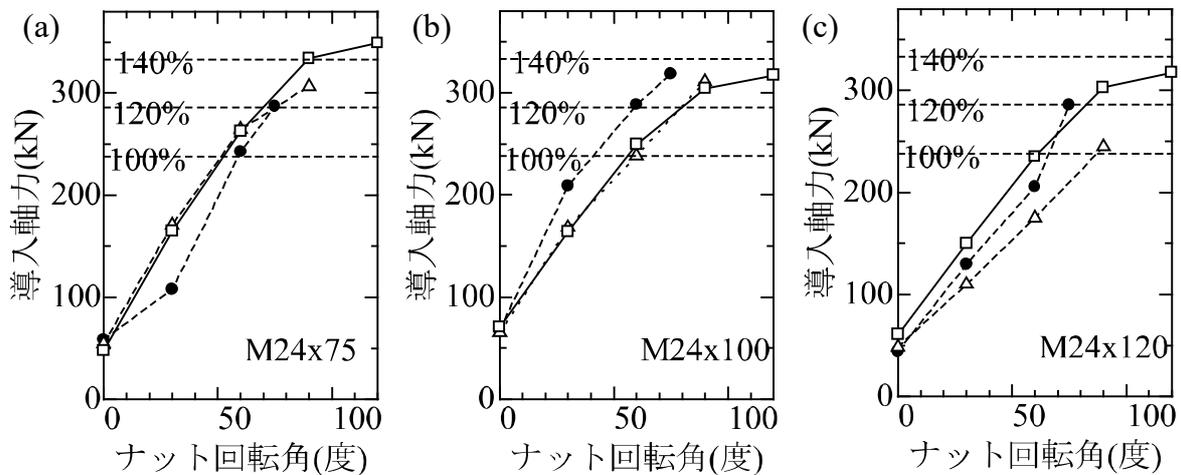


図 6-3-1 ナット回転角とボルト軸力

## 6-4 リラクゼーション試験結果

### 6-4-1 締め付け直後のリラクゼーション

リラクゼーション結果を示す。図 6-4-1 は締め付けた直後の 30 分間のものである。図 6-4-1(a), (b) および(c)はそれぞれ長さ 75mm, 100mm, 120mm のボルトである。縦軸は軸力残存率を示している。つまり、締め付け開始とした時刻のひずみに対する当該時刻のひずみの割合を示している。すべてのケースにおいて 30 分間で、残存率として 95%から 99%の範囲におさまっているが、96~97%であるパターンがもっとも多い。これは他の例、4-5 の結果などとも同様である。

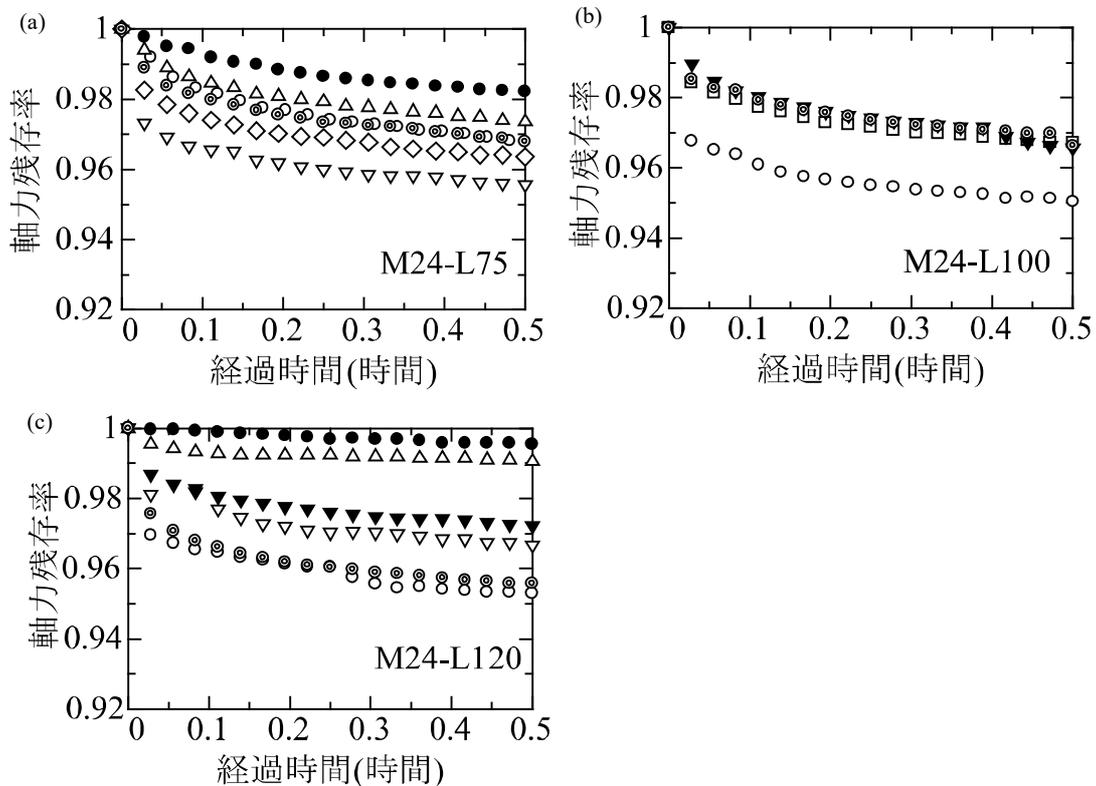


図 6-4-1 締め付け直後 30 分間のリラクゼーション

### 6-4-2 締め付け 1 か月のリラクゼーション

図 6-4-2 に 1 か月間(720 時間)の軸力残存率の変化を示している。いずれのケースにおいても残存率は 90~95%の範囲となっている。1 か月経過後には残存率の変化はほぼない状態であるといえる。図 6-4-3 に初期ボルト導入軸力と 1 か月後の軸力残存率の関係を示す。初期ボルト軸力は設計軸力に対する比率で示している。初期ボルト軸力は設計値に対して、120~140%に分布している。初期ボルト軸力にかかわらず、残存率は 90~95%の範囲にある傾向は認められるが、90%未満あるいは 95%以上となる例も数件見られる。

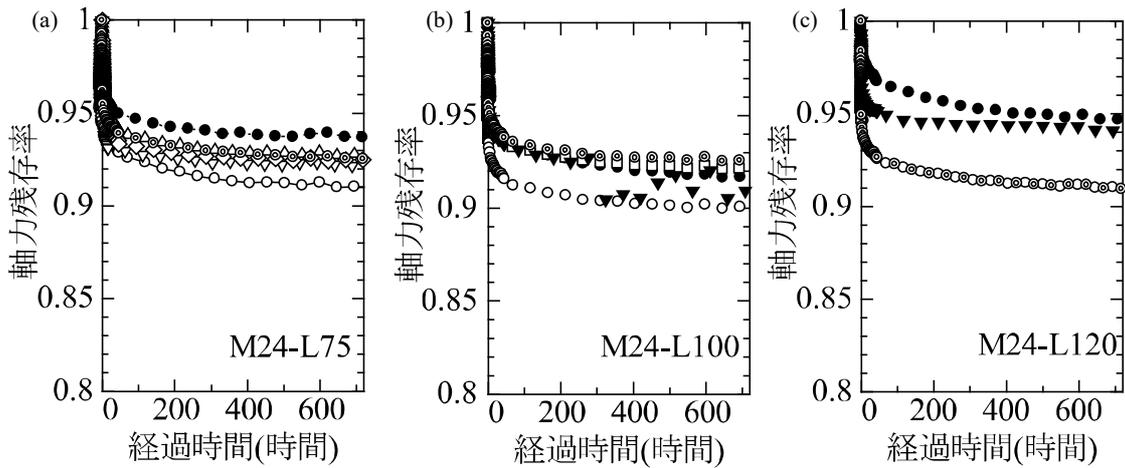


図 6-4-2 1 か月間のリラクセーション挙動

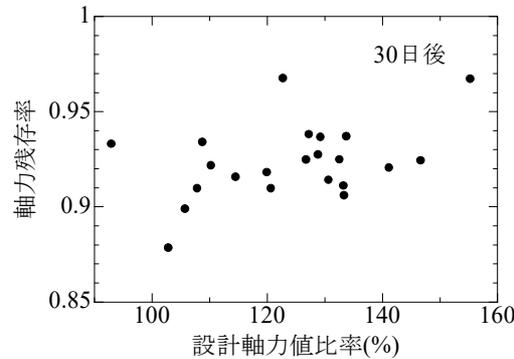


図 6-4-3 初期導入軸力(設計軸力比とリラクセーションによる軸力低下率(1 か月間

### 6-4-3 締め付け1年間のリラクセーション

図 6-4-4 に1年を超えるボルトの軸力残存率を示す。図 6-4-4(a)~(c)は長さ 75mm のボルト、(d)~(f)は長さ 100mm のボルト、(g)~(i)は長さ 120mm のボルトの結果であり、図 6-4-4(a), (d), (g)は 75 度の回転角で締めたもの、(b), (e), (h)は 90 度、(c), (f), (i)は 120 度で締めたものである。試験開始から 100 日から 160 日の間では、一部のチャンネルでデータ欠損が発生してしまった。図 6-4-4(a)から(e)に示すチャンネルのものはデータ計測ができたが、図 6-4-4(f)から(i)に示すチャンネルおよび温度補正のためのダミーゲージのチャンネルは計測ができなくなった。試験経過 160 日あたりでデータロガーを再起動させ、それ以降は値の差分でひずみ値として計測を続けた。図 6-4-4(a)~(e)の 100~160 日間のデータは温度補正されていないこととなる。図 6-4-4(f)~(i)は 100 日後と 160 日後のひずみに変化がないものと仮定してのデータ計測となる。

上記の問題はあるものの、図 6-4-4 に示すように、160 日以降になるとひずみの値はほぼ一定となっていることがわかる。図 6-4-2 および図 6-4-4 と比較して、ほとんどが 30 日程度でほぼ一定に落ち着く挙動を見せている。

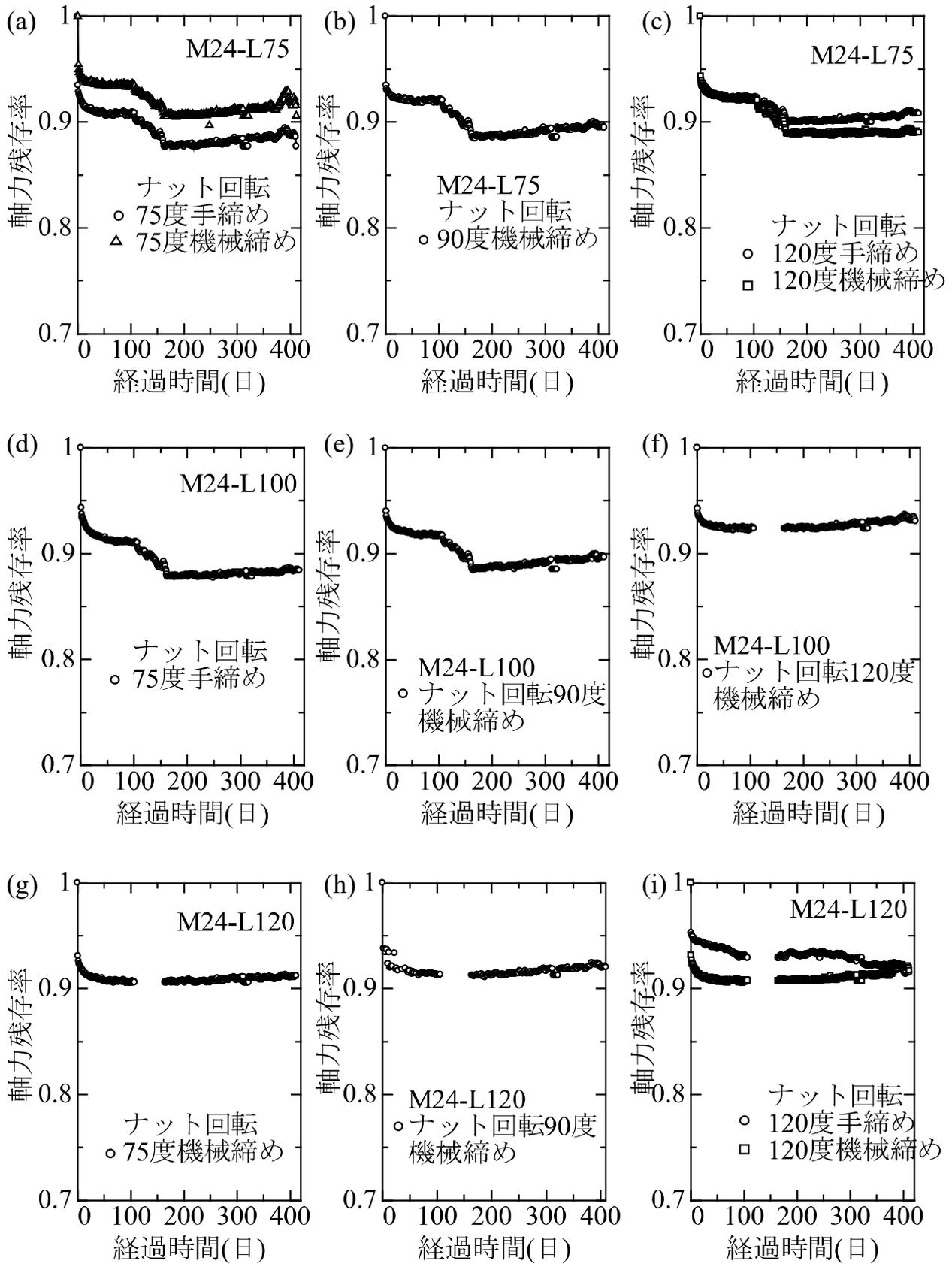


図 6-4-4 1年以上のリラクゼーション挙動

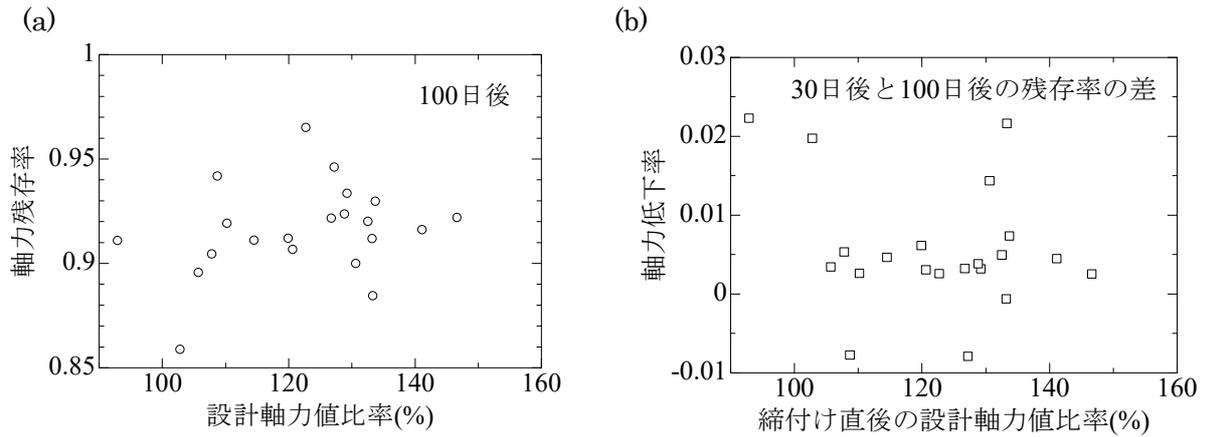


図 6-4-5 締付け直後を基準とした 100 日後の軸力残存率と 30 日後と 100 日後の軸力残存の変化

図 6-4-5 に 100 日後の軸力残存率を示す. 図 6-4-5(a)は設計軸力に対する初期ボルト軸力の比を横軸に, 100 日後の軸力残存率を縦軸にとったものである. 図 6-4-3 と 図 6-4-5(a)を比較するとそれほど変化は見られないようである. そこで, 図 6-4-5(b)には縦軸に 30 日後の軸力残存率と 100 日後の軸力残存率をひいたものを示している. 値が正となるのは軸力が低下したことを示し, 負となるのは軸力が増加したことを示している. 図 6-4-5(b)より, 初期ボルト軸力にかかわらず, プロットは 0.005 を中心に分布している. つまり, 30 日から 100 日の間でボルトの軸力は 0.5%の低下にとどまっていることを示している.

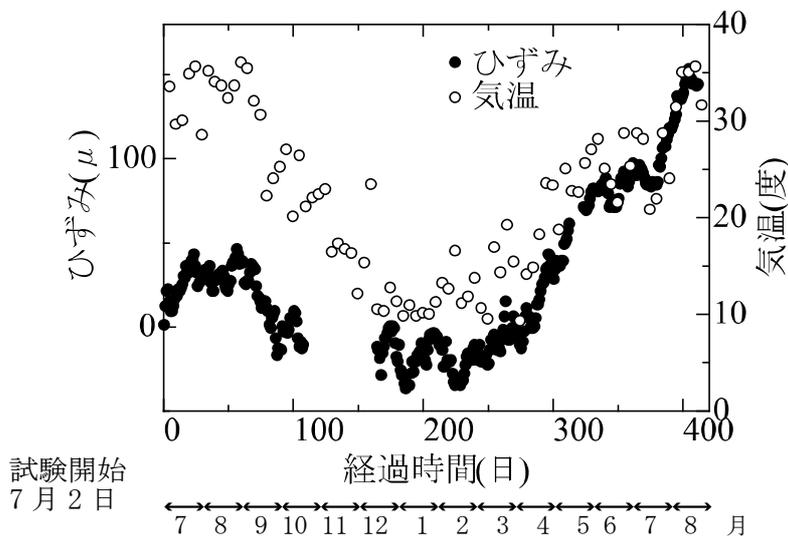


図 6-4-6 ダミーボルトのひずみの 1 年間の推移

リラクセーション試験では温度の影響を取り除くために, 軸力のかからないボルトにダミーとなるゲ

ージを貼り付けて補正を行う。図 6-4-6 にダミーとなるボルトに貼付したゲージの値の変化を示す。図 6-4-6 には気象庁のウェブにおいて東京の気温の変化を抽出している<sup>5)</sup>。毎日ひずみを計測しているのが 14 時前後で 1 日の最高気温になることが多いので、その日の最高気温をプロットしている。

リラクセーション試験を開始したのは 2018 年の 7 月 2 日である。8 月となる時期にはひずみが増加しているが、温度による膨張と考えられる。ひずみの値は 9 月、10 月と経過するにつれて低くなっていくことがわかり、翌年の 1 月や 2 月において、最低にまで下がっている。つまり、ひずみデータは経年変化を示していることがわかる。

図 6-4-6 において計測開始から 100 日までの変化は 160 日以降の変化よりも小さい。これは計測開始時にはダミーボルトを立てた状態で保管したからと思われる。160 日以降はダミーボルトを寝かせた状態とした。最初の 100 日間はボルトの自重の影響もあって、ひずみ値の変化が小さくなったと考えられる。

図 6-4-6 においてもっともひずみが小さいものは  $-10\mu$  であり、もっとも大きいものは  $160\mu$  程度である。年間でひずみは  $170\mu$  程度変化することになる。 $170\mu$  の変化は軸力に換算すると、15kN 程度の変化となる。経年変動は導入時の軸力に対して 5~6%となる。

## 6-5 まとめ

超長期リラクセーション試験の結果をまとめる。

- (1) データ欠損などの問題はあったが、ボルト軸力は初期導入軸力の高低にかかわらず締め付け後 30 日で落ち着き、締め付け後 100 日までは 0.5%の低下にとどまった。
- (2) ダミーゲージは経年の温度変化と同様の傾向を示す。ただし、ダミーゲージを貼り付けたボルトの置き方により、ひずみ値の変化分は影響を受ける。ひずみ値の経年の最大変化分は  $170\mu$  程度であり、軸力に換算すると 15kN 程度であり、設計軸力に対しても約 5%であり、それほどの影響はないものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会接合小委員会 編，鋼構造接合資料集成：リベット接合・高力ボルト接合，技報堂出版，1977. 3.
- 2) 柳沼安俊：高力ボルト摩擦接合継手のボルト軸力とすべり係数の経年変化について，東骨技報，No. 56，pp. 51-64，2015.
- 3) 南 邦明，斉藤雅充，横山秀喜，杉本一郎，能島隆男，増永寿彦，長崎英二：亜鉛アルミ擬合金溶射を施した高ボルト摩擦接合継手に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol. 68. No. 2，pp. 427-439，2012. 6
- 4) 南 邦明，吉原伸行，徳富恭彦，鈴木茂弘：りん酸塩処理した溶融亜鉛めっき接合面の高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角の提案，土木学会論文集 A1，Vol. 69. No. 3，pp. 467-480，2013. 10
- 5) 気象庁 | 過去の気象データ・ダウンロード <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>

## 7. まとめ

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

(1) スナッグタイト試験で締め付けたボルトのトルクは、鉄道標準で規定されている一次締めの値(150N・m)で平均値に近いものとなったが、大きくばらついており、標準偏差としては18kN程度のばらつきがあった。ナット回転法の適用に際しては、締付け精度を向上させるため、一次締めのトルク値を規定し、実施工を行うのがよいと考えられる。

(2) ナット回転量とボルト軸力の間には、ナット回転量が90°までの場合には、両者の間には線形関係が見られた。ナット回転量が90°を超えると、ボルトねじ部は塑性域(非線形領域)に達するものと考えられる。このときの設計ボルト軸力比は140%程度であった。

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

(4) 超長期リラクセーションでは、締め付け後30日から100日後の間では0~2%の軸力低下の範囲にあり、ほとんどが0.5%低下であった。ダメージゲージは経年温度変化と同様の傾向を示した。ダメージゲージの経年の最大変化は170μ程度であり、軸力に換算すると15kNであった。

## 卷末付録：既往研究概要

※本付録は既往の研究を要約した文献集であり，著者らの表現をそのまま引用している。

## 巻末付録一覧

### ナット回転法の既往研究

- (a) 回転法の F10T への適用 ..... II-付録- 1
- (b) F10T ボルトのナット回転法による施工 ..... II-付録- 3
- (c) 回転法の F10T への適用 (その 2) ..... II-付録- 5
- (d) 高力ボルト接合 : ナット回転法の提案 ..... II-付録- 7

### 高力ボルトの遅れ破壊に関する既往研究

- (a) ボルトの遅れ破壊 ..... II-付録- 9
- (b) 橋梁における高力ボルトの遅れ破壊 ..... II-付録- 10
- (c) 高力ボルトの遅れ破壊に影響を及ぼす侵入水素量の確率論的評価 ..... II-付録- 11
- (d) 高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究 (その 1) ..... II-付録- 12
- (e) 高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究 (その 2) ..... II-付録- 13
- (f) 高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究 (その 3) ..... II-付録- 14
- (g) 高力ボルトの遅れ破壊強度と熱処理 ..... II-付録- 16

## 【概要】 回転法の F10T への適用

板垣秀克，和泉公比古（第三建設部設計課）

### 1. 概要

高力ボルト継手の締め付け方法には「トルク法」と「ナット回転法」があるが、現場の締め付け作業および施工検査の簡素化をはかるためには、ナット回転法による締め付けに以降するのが望ましいとされている。現行の「道路橋示方書・同解説」（昭和48年2月）によれば、ナット回転法で施工してよいボルトの種類はF8Tまでであるが、これを一次部材の継手としても適用できるよう、その基礎データを得るための実験を行った。

本報では、その実験概要と試験結果および考察を概説する。

### 2. 実験概要

以下の3種類の実験を行った。

#### (1) 振り（ねじり）試験

ボルトの機械的性質・形状寸法の異なるボルトについての振り試験を行った。ロットとして、強度レベルが下位のものとして上位のものを用意した。

#### (2) 実 splice 締め付け試験

抵抗線歪計を貼付したボルトを用いて splice 供試体（ボルト総数106本）の締め付けを行い、各段階での導入軸力を測定した。その際、同時にボルトの弛み度合なども調べた。

#### (3) 遅れ破壊試験

ナット回転法で締め付けたF10Tボルトの遅れ破壊特性を求めるために、F8T、F11Tボルトとの比較試験を行った。これらについて引張試験・振り試験を行った後、ボルト実体と切欠付丸棒試験片による遅れ破壊試験を行った。試験環境としては、海浜大気・海水乾湿くり返し・0.1N-HC1水溶液を選んだ。定荷重引張方式の応力腐食試験でその腐食環境としては、0.1N-HC1水溶液、イオン交換水を使用した。

### 3. 試験結果および考察

各種試験結果および考察を以下に概説する。

#### (1) 振り試験

ボルト締め付け時に導入された軸力より、F10Tボルトが強度レベル、ボルトの形状に関わらず、遊びネジ長さの1%オフセット耐力に対応するナット回転角が180°以下、最大ボルト軸力に対応するナット回転角が240°以上を満足しており、F8Tと同じ施工法が適用できると言える。

ナット回転法の一次締め導入軸力はバラつきが非常に小さく導入トルクに対してほぼ一次的な関係にあり、一次締めは強度レベル・ボルト形状に関係なく施工できると思われる。

次に、ボルト振り試験における耐力に対応する点と最大軸力に対応する点より、二次締め回転角として180°が確実に得られるならば、一次締めトルク100kg・cmの場合でもすべてのボルトにオフセット耐力以上の軸力が導入されること、また一次締めの差によって生ずる導入軸力は小さいことがわかった。最終導入軸力の試験結果より、F10Tボルトを回転角法で締め付ける場合には、降伏点に対する設計ボルト軸力の比をF8Tボルトと同程度まで高め得ることがわかった。

#### (2) 実 splice 締め付け試験

一次締めはスパナを使用し、導入トルク1500kg・cmを目標に行った。先に締めたボルトがあとから締めたボルトよりどの程度弛むか測定したところ、最大340kg程度であった。

次に、二次締めはトルクレンチを使用し、二次締め回転角180°で行った。締め付け完了時のボルト導入軸力はほとんどのボルトで30ton程度となっており、現行示方書のF10T標準ボルト軸力22.5tonをはるかにこえており、設計ボルト軸力を高めうるこ

とを示している。なお、二次締めによる弛みは最大で約 1ton であった。

### (3) 遅れ破壊試験

人孔海水乾湿くり返し、0.1N-HC1 水溶液試験とも 1000 時間経過後いずれのボルトにも異常は発生しなく、その後の純引張試験でも何ら異常はなかった。海浜大気暴露試験は 4 ヶ月経過後も何ら異常はなかった。

切欠付丸棒試験片による遅れ破壊試験においても、明確な破壊特性を得るまでに至らなかった。

室内促進試験その他から判断し、F10T ボルトにナット回転法を適用しても遅れ破壊の懸念はないものと思われる。

## 【概要】 F10T ボルトのナット回転法による施工

大貫一生（第二建設部設計課）

### 1. 概要

公団における鋼橋の現場継手はその大部分を高力ボルトによっている。しかし、ボルト軸力のバラツキを抑える為に施工管理に多くの時間と労力を要しており、施工管理の省力化が今後の大きな課題であると思われる。現道路橋示方書から F8T に限って導入された「ナット回転法」も軸力の安定と省力化の為の有効な方法であるが、F8T ボルトは 2 次部材についてだけ使用されている為に、現状ではその効果は少ない。F10T ボルトを「ナット回転法」で締付けることが出来ると、1 次部材の添接部に使用することによって省力化の面から効果が大きくなり、設計ボルト軸力も現状の  $0.75\sigma_y$  から  $0.85\sigma_y$  にとることによって、現在の F11T と同等の許容応力とすることも考えられる。

F10T ボルトは、その伸び性能や遅れ破壊性能が F8T ボルトと似ており、「ナット回転法」による施工が可能であるとされながらも、これまでに施工実績がほとんどないので、現示方書では「ナット回転法」による施工を F8T ボルトに限定している。ここでは、実施工のランプ桁において、1 次部材の添接に F10T ボルトを使用し、「ナット回転法」によって試験的に施工したので、その結果を報告する。

### 2. 試験施工の条件

#### (1) 試験対象桁

現場施工はランプ桁（単純合成 I 断面 2 主桁）で行った。なお、この添接部については、F10T ボルトを従来のトルク法で締めた時の設計ボルト軸力  $20.5t$  ( $0.75\sigma_y$ ) による許容応力で照査し安全を確認している。

#### (2) 使用ボルト

現場施工に使用したボルトは F10T：294 本（1 次部材用）と F8T：356 本（2 次部材用）である。F10T

については上記以外に室内試験・現場試験の供試ボルトとして 174 本を用いた。

### 3. 試験および考察

各種試験結果および考察を以下に概説する。

#### (1) 室内試験

現場試験に先立ち、ボルトの「ナット回転法」への適否を判断する為に、ボルトの機械的性質・変形能に関する室内試験を行った。

#### (ア) 素材試験

JIS に定められた試験片引張、製品引張、かたさ試験、トルク試験を行った。各結果とも JIS 規格を十分満足していた。

#### (イ) 軸力-歪試験

前もって歪と軸力の関係を調べておき、現場締付け時にゲージの歪から軸力を算出する目的でこの試験を行った。ねじりによるせん断力の影響を考えるとボルト軸力計の精度は低いのでアームスラー試験機を用いた。

#### (ウ) 捻り（ねじり）試験

回転法に適したボルトの条件として導入軸力に対応するナット回転角が  $180^\circ$  以下、最大ボルト軸力に対応するナット回転角が  $240^\circ$  以上といわれているが、M22-70 の遊びネジ長 60mm の場合の回転角  $230^\circ$  を除いてこれを満足している。現場で使用する時の遊びネジ長 10mm~11mm に対応した 10mm の結果では、測定した 5 本全てがこれを満足していた。以上の結果からこのボルトは回転法によって締付けても問題ないと判断した。

#### (2) 現場試験

#### (ア) 締付試験（I）

ゲージ貼付ボルトを各ボルトに 3 ゲージの歪を測定し、「軸力-歪試験」の結果から耐力を求めた。一次締めトルク  $20\text{kg}\cdot\text{m}$  から回転法で  $180^\circ$  締付ける

と、ボルトは完全に塑性域に入ることがわかった。

#### (イ) 締付試験 (II)

中間ベント上で仮組が終わった桁に対して、G1 桁には全て通常の F10T ボルト、G2 桁には通常のボルトとゲージ貼付ボルトを取り付ける。

G1 桁添接部について、1 次締めはトルクレンチで行い 20kg.m を導入し、2 次締めは「ナットランナー」で 180° を目標に締付けを行った。ここでは、締付角度の誤差、締付時間などの施工性を調査した。回転角の施工誤差は±30° 以下であり、2 次締めに要する時間は 9～10 秒/本であった。

G2 桁添接部について、1 次締めは右半分はトルクレンチ (20kg.m) で、左半分を組立用スパナで行い、2 次締めは「ナットランナー」を用いて締付けた。ウェブについては隣接ボルトを締付けた時のゆるみによる軸力の変化も調査したが、これはほとんど認められなかった。

## 【概要】 回転法の F10T への適用（その 2）

和泉公比古（第三建設部設計課）

板垣秀克（神奈川県建設局調査課）

### 1. 概要

ナット回転法を F10T ボルトに適用する場合に必要な条件として次の二つがあげられる。第一に、回転法はボルト降伏点をこえる大きな軸力を与えるためボルト自体がそれに耐えるものでなくてはならない。第二には、実際の工事の現場締付けにおいて十分な導入軸力が得られ、そのバラツキも少なく、さらには他の施工性についても通常の締付け方法に比べて劣らないことである。

技報第 7 号 3-1-1「ナット回転法の F10T への適用」（昭和 49 年度）ではボルト変形能および耐遅れ破壊性能の試験より、F10T ボルトには回転法に十分適応できるデータを得た。さらに、模型スプライス締付け試験において導入軸力の値は設計軸力をかなり上回っていることを確認した。

本報告はその結果をふまえ、F10T 回転法を高速道路のランプ主桁添接部に適用し、ボルト導入軸力の測定、締付け機器の施工性試験、遅れ破壊の観測等を行い、実際の現場締付けにおける F10T 回転法の可能性を検討するとともに今後の問題点および見通しを概説する。

### 2. 実験概要

以下の 2 種類の実験を行った。

#### (1) 予備試験

現場締付けに先立ち、今回の試験に使用するボルトの変形能を確認するための室内試験を行った。試験項目は素材試験、捻り（ねじり）試験及び軸力一歪測定試験で、各首下長さのボルトについて行われた。

#### (2) 現場締付け試験

実施工工事にて、桁を地上に仮置きし以下の試験を行った。

#### (ア) 締付け試験

各ボルト一次締め、二次締めを行い、抵抗線歪計を貼付したボルトにより各段階の導入軸力を測定した。また同時にボルトの弛みについても測定した。

#### (イ) 締付け機器の施工性試験

今回は、2 機種（電動式、空気式）について締付け時間、回転角、騒音等を測定した。

#### (ウ) 遅れ破壊の観測

遅れ破壊については、規定の二次締め回転角（ $180^\circ$ ）の 2 倍を締付けた供試体を桁に取りつけておき、桁本体の添接部と同様長期にわたり観測を行うものとした。

### 3. 試験結果および考察

各種試験結果および考察を以下に概説する。

#### (1) 予備試験

首下長さ 70, 75, 80mm の場合は、回転角法を適用するに十分なボルトの条件として提案されている、遊びネジ長さの 1%オフセット耐力に対応するナット回転角が  $180^\circ$  以下、最大ボルト軸力に対応するナット回転角が  $240^\circ$  以上をいずれも満足している。首下長さ 150mm の場合は、他の首下長さのボルトに対して  $30^\circ \sim 40^\circ$  大きな値が得られたがこれは首下長さが他よりかなり長いためと思われる。しかし、この場合でも二次締め完了後には導入軸力は遊びネジ長さの 1%オフセット耐力付近に達するため、回転法を適用するに十分な変形能を有しているといえる。

#### (2) 現場締付け試験

(ア) 一次締めはトルクレンチを使用し、力いっぱい締付けを行った。回転角制御の可能な締付け機を用いて二次締め回転角  $180^\circ$ （許容  $\pm 30^\circ$ ）で二次

締めを行った。

一次締めの導入軸力は 3～10ton で模型スプライス試験に比べてバラツキは大きくなっている。

二次締めの導入軸力はほとんど 30ton をはるかに上回っている。軸力のバラツキについては模型試験の際のバラツキとほとんど同程度であると思われる。

上記の結果より、回転法では一次締めの際の導入軸力のバラツキは二次締めの導入軸力に大きな影響を与えないこと、さらに現場締付けにおける軸力のバラツキは室内におけるものとあまり差がなく、現場施工における信頼性は十分であると思われる。なお、二次締めの際のボルトの弛みは最大で約 2ton であった。

(イ) 締付け時間について、電動式のものは通常のインパクトレンチで使用した場合が約 9 秒／本であることから施工性は十分であると思われる。空気式の場合は回転角のバラツキが大きいことと騒音が大きいことが難点であるが、締付け作業自体は電動式よりは簡単であった。

(ウ) 遅れ破壊については、試験後約 8 ヶ月間は異常が見られていない。しかし、現在まだ観測中であり今後の結果が待たれるところである。

## 【概要】高力ボルト接合：ナット回転法の提案

田島二郎（本州四国連絡橋公団 設計第 1 部）

青木博文（横浜国立大学 建築学科）

田中淳夫（大成建設(株) 技術研究所）

小林昌一（(株)竹中工務店 技術研究所）

北後寿（日本電信電話公社 建築局）

### 1. 概要

高力ボルトへナット回転法を適用するにあたり、これまでの基準の変遷、高応力ボルトの遅れ破壊、ナット回転量とボルト軸力の関係、施工方法、施工例について概説する。

### 2. ナット回転法の基準

#### (1) アメリカおよびイギリスの基準

トルク係数値の変動によるボルト軸力の大きなばらつきに悩まされたアメリカでは、早くからボルトの伸びと軸力との関係に着目したナット回転法の検討が行われた。

アメリカではボルト径、締付け長に関わらず Snug tight からの回転角が規定に定められた。ここで Snug tight とは、インパクトレンチによる 2~3 回の打撃または普通のスパッドレンチで人が力いっぱい締付けた状態としている。

イギリスにおいてもナット回転法は一般基準に採用されており、1960 年の B.S.3294 には、継手材変が密着するまでボルトを締付けた後の回転量が規定されている。

#### (2) 日本における基準

1971 年道路橋示方書では、長年にわたる F9T の実績、高力ボルトの遅れ破壊の研究に関する成果、ならびにアメリカ等における 80 キロ級ボルトの多年の経験等を参考として、高力ボルトの施工にナット回転法を取り入れることにした。ただし、回転法は F8T、B8T のみに許され、回転量はアメリカのそれと同じである。なお、ここで 10T ボルトまでを対

象としなかったのは、順次試用により安全性を確認した上で一般化すべきであるとの考えから、今回の示方書には示されなかったものである。

建築関係では、高力ボルトの締付けはなおトルクコントロール法によるものを原則としているが、「高力ボルト接合設計指針」昭和 47 年 12 月では“ナット回転法、その他の方法で締付けることも可能であるが、これらの実施については現在検討中である。”と述べられている。

### 3. 高力ボルトの遅れ破壊

1967 年から実施された接合小委員会・ボルト強度班の実験結果から、F8T（引張強さ 80~100kg/mm<sup>2</sup>）はナット回転法の適用は可能であると考えられ、F10T（引張強さ 100~120kg/mm<sup>2</sup>）は F8T とほぼ同等の性質をもつので、通常の使用条件では遅れ破壊を生ずる可能性は少ないとしている。

ただ、アメリカにおいても A490 の歴史が A325 に比べて短いこと、日本での回転法施工の実例がほとんどないことを考えると、F10T に対しては徐々にその適用を広げ、一般化への発展を期するのがよいと考える。

### 4. ナット回転量とボルト軸力

「ボルトの変形特性」、「ナット回転法における締付け目標とボルト軸力」、「2 次締めで得られるボルト軸力」について、実験結果と考察を詳述している。

### 5. 施工方法

前節までに述べたナット回転法に関わるわが国で

の実績，研究成果，関連規定，および諸外国の規定等を参考として，ここでは下記の3点をナット回転法についての施工の基準として考える．

- (1) 対象とするボルト鋼種はF8T，B8T，F10T およびB10T とする．
- (2) 被締付け材は，締付け面が平行であることを原則とし，締付け総厚は200mm 以下とする．
- (3) ナット回転量は，被締付け材が密着した状態から，1/2 回転とする．ただし許容誤差範囲は±30° とする．

この指針にしたがって，高力ボルトの締付けをナット回転法で行うにあたっての，「1次締め」，「2次締め」，「締付け機器」，「検査事項」を詳述している．

## 6. 施工例

施工例として，本州四国連絡橋の吊橋耐風性調査のひとつとして建設された12m×13m 高さ14m の2次元耐風実験橋の装置における「使用したボルトの強度と変形性状」，「現場におけるボルト軸力の計測」，「1/2 回転制御のインパクトレンチによる2次締め」を詳述している．

## 【概要】ボルトの遅れ破壊

中里福和（(株)住友金属小倉）

### 1. 概要

1991年4月1日、突然NHKニュース21でF11Tボルトの遅れ破壊が特別報道された。

「単重約500gの鉄製ボルトが突然、大音響とともに体育館の屋根から落下、こうしたF11Tボルトの突然破壊は過去15年間で8件起こり、約150本が破断している。これは遅れ破壊という現象で、水素が関与している。詳細なメカニズムは未解明、対策としてはボルトの総取替え、定期点検、保護網設置などである」きわめて簡潔に事象が説明されているが、一般の人々には、ボルト使用時の危険性のみが喧伝された嫌いがある。また上記の対策は、後手の対策である。

本報では遅れ破壊の一般論から最近の研究開発動向までを概説する。

### 2. 遅れ破壊の特徴

遅れ破壊の一般的特徴としては下記の5項目が挙げられる。

- (1) 強度レベルが高いものほど、著しくその感受性が增大する。ボルトの場合引張強さが1226N/mm<sup>2</sup>を越えるものは、自然大気中においても潜在的に遅れ破壊の危険性を秘めている。
- (2) 常温近傍で発生する。しかも100℃(373K)近傍までは温度が高いほど感受性は増大する。
- (3) マクロ的には、大きな塑性変形を伴わないで破壊する。(クリープ破壊との相違点)
- (4) 静荷重(歪速度ゼロ)のもとで起こる。(疲労破壊との相違点)
- (5) 降伏強さよりかなり低い負荷応力でも起こる。

### 3. 遅れ破壊評価法

「環境」と表示されている影響因子を水素量として定量化することができる。鋼材の有する耐遅れ破壊性と実環境の苛酷さとを比較して、遅れ破壊発生有無を推定しようとする流れであり、その多くは拡散性水素量という指標により定量的な議論を行われる。実環境から鋼材に侵入する水素量の定量化は、遅れ破壊発生の可能性有無を判断する際きわめて重要なデータベースとなる。

### 4. 遅れ破壊克服へのアプローチ

#### (1) 応力面

ボルトの遅れ破壊はねじ部や首下部の応力集中部から発生する。したがって、部位の応力集中を緩和する方法がとられている。特に、最近では、FEM解析が普及し弾塑性解析が行われている。ボルトに関しては、ねじ形状の工夫により応力集中係数の低下や有効断面積の増大が図られるようになっている。

#### (2) 環境面

ボルトを外部環境から遮断するため、一部のボルトでは表面処理が行われているが、とくに電気めっきをする場合にはめっきに付随する工程で侵入する水素を最小限にする、あるいは脱水素処理を完全に行わなければならない。

#### (3) 冷間鍛造潤滑剤-浸リン防止潤滑剤

ボルトの成形は冷間鍛造が主流となってきており、冷間鍛造前のワイヤ潤滑処理が冷間鍛造性確保のため必須工程である。この工程において、リン酸亜鉛中のリン(4)が冷間鍛造後の熱処理中にボルト表層に入込む。これにより浸入したリンは、遅れ破壊を促進するので表層の浸リン層は有害とされている。

## 【概要】橋梁における高力ボルトの遅れ破壊

松山 晋作（鉄道技術研究所）

### 1. 概要

11T 級以下のボルトについては、に熱処理不良による遅れ破壊事例はあつたものの、正常な 11T ならば遅れ破壊は生じないと考えられていた。ところが、1977 年以降規格範囲を完全に満足する F 11T ボルトの遅れ破壊事例が報告されるに及んで、11T 級でも遅れ破壊の危険性があることがわかり、1979 年の JIS 改訂時より、F11T を使用しないように勧告がなされるに至った。

本報は、過去約 15 年にわたり鉄道橋で生じた高力ボルトの遅れ破壊の事例解析を総括したものである。

### 2. 高力ボルトの使用状況と破損経過

橋梁の桁構造別にみると箱桁における損傷例が多かった。これは桁内部に水が溜まるために日照時には高温高湿条件となり腐食反応が生じやすいためである。したがって、箱桁には水抜き孔を設けて桁内部が乾燥状態を保つようにすることが破損防止上必要である。橋梁によって破損が上フランジ、ウェブ、下フランジなどのある箇所集中する傾向が認められた。この原因は明らかではないが、ボルトの遊びねじ長さ、水滴の溜まりやすさ、温度上昇度など、ボルトの製造ロット別に生ずる材質的差異以外の要因が考えられる。

### 3. ボルトの破断部位

ボルトの破断部位は不完全ねじ部が一般的には多いが、橋梁によっては首下破断が多発する場合もあつた。規格上は、首下はねじ部より強い筈であるから、首下破断を生ずる理由には、第一に頭が下向きの場合首下に水滴が溜まりやすいこと、第二に首下の丸み部に座金の角があたり荷重が集中したことが考えられる。とくに後者の場合には座金が遅れ破壊

してボルト孔内部への水の浸入を容易にするともあるので、座金の内側隅は十分面とりする必要がある。

### 4. 最初のボルト破損を生じるまでの寿命分布

F11T を使用した橋梁で最初の破損を生ずるまでの寿命分布は母数ワイブル分布で表され、故障率が時間と共に低下する傾向を示した。現在 F11T の使用は中止されているから、すでに F 11T を使用している既設の橋梁での遅れ破壊事例は今後減少傾向にあると推定される。

### 5. 高力ボルトの使用環境

高力ボルトを適用した初期の橋梁や遅れ破壊を生じた橋梁についてボルトを採取して軸部の鉄さびの分析を行った。直接雨に曝された箇所や箱桁ではボルトが湿った状態にあるものが多いが、鉄さびの組成からも水の存在が認められた。遅れ破壊は水の存在下で腐食反応の結果生ずる水素により誘起されるもので、乾燥状態で使用されていれば遅れ破壊は生じない。

### 6. 遅れ破壊感受性と材質の問題点

遅れ破壊を生じたボルトの最小硬さは HRC 37.5 であつた。従来の実験から得られた遅れ破壊を生ずる限界硬さは HRC 41 であるから、HRC<41 で破損したボルトは材質的鋭敏化原因があつたと考えられる。原因の検討から、熱処理炉の雰囲気は脱炭傾向にすること、可能な限り低燐の高純度鋼を用いること、B 添加は必要最少量にすることなどが高力ボルトの信頼度を高めるために必要であると結論される。しかし市販鋼では高純化には限度があるから粒界炭化物が十分凝集するまで焼もどし温度を高めることが必要である。

## 【概要】高力ボルトの遅れ破壊に影響を及ぼす侵入水素量の確率論的評価

松岡 和巳(工博 新日鉄住金(株)) 秋山 英二(理博 (株)物質.材料研究所) 松山 晋作(工博)  
宇野 暢芳(工博 日鐵住金建材(株)) 萩原 行人(工博) 原田 宏明((株)NS ボルテン)

### 1. 概要

高力ボルトは使用環境に応じた腐食を受け、その結果発生した水素が鋼中に侵入して応力集中部に集積する。高力ボルトの遅れ破壊は、この集積した水素によって応力集中部周辺の鋼材の破壊強度が低下して、作用している応力に抵抗できなくなることで発生すると考えられている。

本論文の目的は、この侵入水素量  $H_e$  の確率分布を決定し、最終的に屋外環境の腐食強度の指標である pH 範囲を推定することにある。pH 範囲を決定できれば、室内試験のみで  $H_e$  の把握が可能となり、長期間を要する暴露試験を経ないで、短期間で合理的な遅れ破壊判定が実施可能となる。

### 2. 暴露試験の概要

用いた材料は現在建設分野で使用されている F10T ボルト用鋼のボロン鋼と機械分野で代表的なボルト用鋼のクロムモリブデン鋼の SCM435 鋼である。暴露本数は各鋼種とも 250 本ずつで、直径 22mm の JIS メートルねじ形状のボルトを板厚 45mm の鋼板(SS400)に、ねじ部有効断面の公称応力で引張強さの 82%をねらいにナット回転法で締め付けている。

暴露場所は沖縄県宜野湾市にある工場の屋上(海岸から約 50m)と茨城県つくば市の建築研究所内の暴露サイト(海岸から約 35km)の 2カ所である。腐食環境としては沖縄の方がつくばより厳しく、A13 鋼の腐食量は沖縄がつくばの約 5 倍である。

### 3. 結論

各種ボルト試験材を用いた暴露試験の累積破断率および試験材の CSRT 試験の統計解析結果を用い

て、暴露ボルトの遅れ破壊を生じさせる局所最大応力部における局所侵入水素濃度  $H_e$  の確率分布、およびこれを模擬する屋外環境強度の指標である鋼材の表面 pH の範囲について確率論的に評価した結果、以下のことが結論づけられる。

(1) 遅れ破壊の累積破断率を破壊確率として捉えて、破壊確率計算式を用いて局所侵入水素濃度を評価する手法は、局所侵入水素濃度  $H_e$  の確率分布を評価すること、及び屋外環境強度の指標である鋼材表面 pH の範囲を推定することを可能とし、有効な手法であることが示された。

(2) 沖縄暴露環境で錆の影響を受けて鋼材に侵入する局所侵入水素濃度  $H_e$  や侵入水素量  $H_e$  の最大値を模擬する腐食溶液の pH は、pH2 弱に対応していると考えられる。

## 【概要】高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究

### （その1 限界拡散性水素濃度法の提案）

平井 敬二(西日本工業大学建築学科 教授・博士)

脇山 広三(大阪産業大学工学部環境デザイン学科教授・工博)

宇野 暢芳(工修 新日本製鐵(株))

#### 1. 概要

現在のJISにおいて、F11Tは使用環境によっては遅れ破壊の可能性があるということで括弧つきの表現になっている。従って、現在、高力ボルトはF10T、F8Tの2種類が主となっている。JIS原案による方法では、遅れ破壊に大きな影響を及ぼす拡散性水素と遅れ破壊感受性の関係は明確に把握できない。この拡散性水素を鋼材の遅れ破壊に対する感受性の評価に用いるような遅れ破壊促進試験法が確立されれば、より高強度の高力ボルトの開発に際し非常に有用なものとなると考えられる。

鋼材中の拡散性水素を考慮した促進試験として鈴木信一博士らは引張型の試験片及び手順で数多くの試験を行っている。本論ではこの促進試験法の考え方を基にして載荷装置、試験片製作、試験手順等の簡便さを考慮にいれ、引張型ではなく角棒による曲げ型の試験法（以降、限界拡散性水素濃度法）を提案し、同法を用いて行った促進試験結果について述べる。

#### 2. 結語

(1) 本論にて提案する限界拡散性水素濃度法により得られる限界拡散性水素濃度により、遅れ破壊感受性が評価出来ることを示した。また、試験片の切欠き形状が異なればHcの値は異なり、応力集中係数の大きい試験片シリーズに関するHcの値が小さくなる傾向が認められることを示した。

(2) 市販されているF10T高力ボルトより削り出した製造ロットの異なる10種類の試験片について同法による試験を行った結果、同じF10Tの高力ボルトでも製造ロットが異なればHcの値は異なり、本試験範囲では最低のHcの値と最大のHcの値を比較すると約2倍弱の値のバラツキが認められることを示した。

(3) 高強度試作ボルトに関する試験結果より、現在の塩酸浸漬による水素チャージ法では、これら鋼材に関する正確なHcの値が把握できず、より多くの水素がチャージ出来る電解チャージ等による方法を用いて試験を行う必要があることを示唆した。

## 【概要】高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究

### (その2 暴露試験)

平井 敬二(西日本工業大学建築学科 教授・博士)

宇野 暢芳(工修 新日本製鐵(株))

脇山 広三(大阪産業大学工学部環境デザイン学科教授・工博) 宮川 敏夫(日鐵ボルテン(株))

#### 1. 概要

本論では前報の限界拡散性水素濃度法による試験結果より、遅れ破壊に対する感受性が通常の F10T 高力ボルト用鋼材と同等かそれ以下で、遅れ破壊しにくいと評価された 2 種類の鋼材を用いて製作した約 1500N/mm<sup>2</sup> 級の引張強度を有する高力ボルト(超高強度ボルト)について行った暴露試験について述べる。

#### 2. 供試ボルト

試験に用いた試作の超高強度ボルトセットの形状は当初 JIS 形の六角ボルトセットであったが、実用性を考え最終的にはトルシア形のボルトセットとなっている。遅れ破壊が生じやすい部分である。首下 R 部は 2.5R で通常の JIS 形状の 1.0~2.0R に比べ若干大きくなっている。また不完全ねじ部では軸部への移行部を設けており、首下や不完全ねじ部での応力集中を緩和している。

本試験では超高強度ボルトとの比較検討用の供試体として、通常的环境下では遅れ破壊しないと考えられている JISB1186 に規定される F10T 高力ボルトセットと、JSS II O9 に規定され、現在日本の建築分野で最も多く使用されているトルシア形の構造用高力ボルトセット (S10T) を使用する。

#### 3. 結語

1500N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度ボルトについて促進暴露試験および実暴露試験を行い、遅れ破壊の有無を確認するとともに試験体パラメータが遅れ破壊に与える影響を考察した。

(1) ナット回転法により締め付けた供試体ではナット回転量の大きい方が初期破断日数は短くなり遅れ破壊が早く発生し、また遅れ破壊発生率は高くなる傾向が認められる。

(2) ポンデ処理後の熱処理によるボルトへの浸リン現象が遅れ破壊に与える影響の有無をポンデ被膜の有無で調べたが、ブラスト処理を施し、ポンデ被膜のない方が初期破断日数は長くなり、遅れ破壊の発生が生じるのを遅らす傾向は認められるが、最終的な遅れ破壊発生率には有意差は認められない。

(3) 同一鋼より製作した供試体では基本的に引張強度の高いほど初期破断日数は短く遅れ破壊が生じやすくなり、遅れ破壊発生率も高くなる傾向が認められるが、促進暴露試験では他の因子も影響して必ずしも引張強度の高い方が遅れ破壊発生率は高くはない。実暴露試験では同一の暴露経過時点で比較すると明瞭に引張強度の高い方が遅れ破壊発生率は高くなる傾向が認められる。

(4) 鋼種の違いの影響は大きく Y 鋼の場合、引張強度 1333N/mm<sup>2</sup> の供試体シリーズ (AY61CB5) で観覧車による 194 日の促進暴露経過時点で 25% の供試体において遅れ破壊が発生しているが、Z 鋼の場合、引張強度が 1440N/mm<sup>2</sup> の供試体シリーズ (AZ6DCB) では 2355 日の促進暴露経過時点でも一体も遅れ破壊は発生していない。

## 【概要】高力ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究

### （その3 ボルトに侵入する拡散性水素及びボルト張力）

平井 敬二(西日本工業大学建築学科 教授・博士)

宇野 暢芳(工修 新日本製鐵(株))

#### 1. 概要

遅れ破壊は鋼材中に侵入した拡散性水素に主として起因すると考えられている。限界拡散性水素濃度法で得られた限界拡散性水素濃度の値は、鋼材間の遅れ破壊感受性に対する相対評価を与えるには非常に有効である。しかし、現時点では鋼材の限界拡散性水素濃度の値が得られていてもその値だけでは製作されたボルトが遅れ破壊するかどうかの評価には直接結びつかない。限界拡散性水素濃度の値と遅れ破壊の有無を結びつけるためには、そのボルトに対し実際の使用環境中で時間経過とともにどの程度の拡散性水素が侵入するのかを把握したデータが必要になる。暴露時間の経過とともにボルトへの導入張力がどのように変化するかについて追跡することは、その暴露試験の有効性を確認するために必要であり、さらには暴露環境下での高力ボルト接合部の耐力を評価する際の有用なデータともなる。本論では江藤式観覧車と屋外暴露試験実施中の福岡(行橋)を除く3カ所および新しく追加した2カ所での屋外暴露環境下に設置された試験体で測定した残留ボルト張力についても併せて述べる。

#### 2. 結語

(1)ボルトへの侵入水素量の観点から見れば、観覧車による暴露試験は屋外暴露試験の福岡(蓑島)と同程度、・沖縄、北海道の約10倍、東京の約20倍程度の促進性があると考えられる。

(2)ボルト全体で測定した場合とボルトを分割して部分的に測定した場合のボルトへの侵入水素量の濃度の値を比較すると、観覧車や福岡の蓑島におけるような厳しい環境の場合には、全体で測定した値と、

部分的に測定した中での最大値には殆ど有意差は無いが、環境が比較的緩やかな場合には、部分的に測定した最大値の方が全体で測定した場合の値より大きくなる傾向が認められる。

(3)観覧車によるZ鋼の超高強度ボルトシリーズ(AZ47CB)への侵入水素量は暴露開始直後には経過時間とともに直線的に増加し、130週経過後の1.8ml/100g程度でほぼ横這い状態となり、増加傾向は止まっている。また、沖縄での同シリーズ(OZ46CB)では、100週までは徐々に増加し、その後250週経過時点まで0.5ml/100g程度の侵入量のまま殆ど増加していない。

(4)前報(その1)で基本概念を示した限界拡散性水素濃度法による限界拡散性水素濃度(Hc)の値にほぼ等しい拡散性水素がボルトに侵入すれば遅れ破壊が発生するものと考えられる。ボルトに侵入した拡散性水素量(H)、限界拡散性水素濃度(Hc)、遅れ破壊の発生の有無をさらに正確に関連づけるためには、ボルトのどの部位でどの程度の分割の大きさで侵入水素の測定部位を行うのか、試験体の回収時期等種々の問題は残っているものの、遅れ破壊発生の有無は限界拡散性水素濃度と侵入拡散性水素量との関連で推定できるものと考えられる。

(5)観覧車試験による暴露試験体でのボルト張力は暴露開始直後より減少し大溝付きの試験体のボルト張力の方が通常の小溝付きの試験体のボルト張力よりも大きな減少量が認められる。恒温室に設置し、錆の発生が全く認められない試験体のボルト張力の減少量が通常のリラクセーションによる減少量と差がないことまた、SS400板とSUS304板での残留張力に有意差が認められないことを考慮すると、ボル

ト張力の減少は主としてボルトの腐食に起因していると考えられる。

(6) S10T(X 鋼 1039N/mm<sup>2</sup> ) と超高強度ボルト(Z 鋼 1431N/mm<sup>2</sup>)でのボルト張力減少量に有意差は認められず、環境の厳しい観覧車暴露試験では、約1年経過後で暴露開始時点より20%程度の張力減少が認められる。一方、通常の屋外暴露環境では沖縄のような厳しい環境下でもボルト張力減少量は2年経過時点で10%弱である。これは通常のリラクセーションでも認められる程度の張力減少である。このことより、本試験における屋外暴露試験結果は遅れ破壊評価に対するデータとして有効性が認められる。

## 【概要】高力ボルトの遅れ破壊強度と熱処理

福井 彰一(大同製鋼(株)研究開発本部中央研究所)

### 1. はじめに

鋼構造物の接合方法として古くから行われてきたリベットによる接合に代わって、近年では設計にもまた施工にも多くの利点をもつボルトによる摩擦接合が多く用いられるようになってきている。摩擦接合とは、接合すべき主板に添接板を添えてボルトで締付け、主板と添接板との間に生ずる摩擦力によって主板間に力を伝達するものであるからボルトの締付力が大きいほど効率の良い接合ができるわけである。そこで高強度のボルトが要望され、1964年には摩擦接合用高力ボルトとして引張強さ  $70\text{kg/mm}^2$  から  $130\text{kg/mm}^2$  威容までの4種類の強度レベルのボルトが日本工業規格として規格化された。

ところで、引張強さ  $180\text{kg/mm}^2$  級の超強靱鋼では、定常的な高応力を付加しておく、ある程度の時間をへてから突然脆性破断するいわゆる遅れ破壊現象を呈することが知られている。この遅れ破壊にわずかでも水分が含まれると著しく促進され、環境中の水分から鋼に侵入した水素によって起こされるものと考えられている。

ボルトの遅れ破壊は構造物の安全性からみてもきわめて重要な問題であり、日本構造協会で共同研究も行われたが、本稿では遅れ破壊の見地からおもにボルトの熱処理に配慮すべきいくつかの問題点を取り上げその対策について論ずる。

### 2. むすび

鋼の遅れ破壊強度の変化挙動はその焼きもどし温度によって4つの領域に分けられる。最も遅れ破壊感受性が小さく、遅れ破壊に対して安定なのは焼きもどし温度の高い第4領域( $500^\circ\text{C}$ ～)で処理した状態である。高強度のボルトを得ようとするとき特別に

工夫された鋼を用いる必要がある。現在では F12T までの高力ボルト用鋼が開発されている。さらに高強度のボルトをえようとするときオーステンパー処理のような特殊な処理を行えば F13T 級の強度として遅れ破壊に対して安定な状態とすることができる。

低炭素鋼を  $200^\circ\text{C}$  付近の低温度で焼きもどしすると経済的に F13T 級の高強度を得ることができる。チタン・ボロンなどの特殊元素の添加により比較的遅れ破壊強度の高い状態が得られるが、これは第4領域で焼きもどしたものに比べてまだいくぶん遅れ破壊限度比が小さいので、この状態が置く力ボルトとして安全化同化は今後なお実用面での検討をようする。

ボルトの熱処理の実用面における問題として不完全焼入れと脱炭あるいは侵炭の影響について述べており、不完全焼入れされたものは焼きもどし温度が低目となるので遅れ破壊の点からは危険である。また侵炭傾向の処理はとくに焼きもどし温度が低目に選ばれた鋼に対して危険性が大きい。