

令和5年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「建設用部材に用いる緩み防止機能を有する  
冷間圧造高力六角ボルトセットの開発」

研究開発成果等報告書

令和6年 5月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 一般財団法人大阪科学技術センター

## 目 次

## 第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1頁
1-2	研究体制	6頁
1-3	成果概要	6頁
1-4	当該研究開発の連絡窓口	7頁

## 第2章 本論

(1)	導入した設備	7頁
(2)	緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの研究開発の取り組み	8頁
【1】	緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの製造技術の確立	8頁
【2】	緩み防止機能付き高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保	12頁
【3】	高力六角ボルトセットの傾斜段差面数や段差高さ、傾斜面角 R の微修整	26頁
【4】	締付け方法	28頁
【5】	建設現場での実用化検証	28頁
(3)	研究開発の成果	29頁
(4)	研究開発に係る知的財産権等について	31頁

## 最終章 全体総括

(1)	アドバイザーの講評	31頁
(2)	事業化について	31頁

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1. 研究開発の背景

橋梁や鉄骨構造物を建設する際、鋼材をつなぎ合わせるには、かつては溶接やリベットによる接合が一般的だったが、現在は高力ボルトセット(ボルト・ナット・平座金のセットの略称)が広く使用されている。高力ボルトと呼ばれるボルトは、普通のボルトより2～3倍の強い力で締め付けることができるものであり、高強度で耐久性がある。建築基準法第 37 条で、建築物の基礎や主要構造部に用いるボルトは、国土交通大臣が定めるものでなければならないと規定され、(1) 高力六角ボルト、(2) 高力六角ボルト(溶融亜鉛めっき付)、(3) 高力トルシア形ボルト、の3種類に限定される。現在、国内で、これらの高力ボルトを製造しているのは主に6社で、月盛工業(株)以外の 5 社は大手鉄鋼メーカー系列の日鉄ボルテン(株)や JFE スチール系列の日本ファスナー工業(株)、神鋼ボルト(株)などである。

高速道路等でのボルトの緩みによる落下事故の対策で、国土交通大臣から高力六角ボルトセットの緩み止め機能の開発要請が2015年にあった。機械系部品等の締結においては、緩み止め効果をもつボルト(ナット、平座金を含む)が多く提案され実用化されてきたが、高力六角ボルトセットで緩み止め機能を持ったものは、いまだに存在しない。建設用に緩み止め機能を有する低コストの高力六角ボルトセットのニーズは大きい。

以下に、上述の3種の高力ボルトについて説明する。

#### (1) 高力六角ボルト(JIS規格品 10.9、国交大臣認定品)

橋梁・高速道路・風力発電所などに使用されている。冷間圧造で製造されたものは低コストである(図1)。冷間圧造では、主にM24(\*1)までのサイズしか製造できないが、熱間圧造ではM64まで製造されている。ただし、熱間圧造品は高価格である。また、現在の高力六角ボルトは緩みが発生することがある。一般的には表面処理をしないので、屋外使用において、20～30年程度の耐久性である。

(\*1) M24: JISでのねじの呼称で、M24はねじ部の直径が24mmであることを示す。

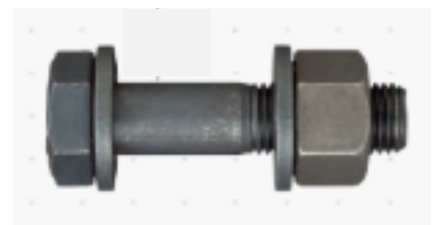


図1 高力六角ボルトセット

#### (2) 高力六角ボルト(溶融亜鉛めっき付、JIS規格品 8.8、経産大臣認定品)

上記の(1)の高力六角ボルトの表面に溶融亜鉛めっきを施したもの。機械的特性は、(1)の高力六角ボルトとほぼ同等である。耐食性が高く、屋外使用において50年程度の耐久性がある。

#### (3) 高力トルシア形ボルト(国交大臣認定品)

高力トルシア形ボルトの写真を図2に示す。本ボルトは、特殊なレンチでナットの締付けを行い、ナットの締付けが完了すると、図2の矢印で示す部分が反力により破断して、図3のようになる。このような特殊な締付け方法により、高力六角ボルト(上記(1)、(2))に比べて、締付軸力のバラツキが少ない。しかし、緩み防止効果はない。なお、冷間圧造で低コストで製造できるため、高力トルシア形ボルトは、冷間圧造でしか製造されていない。また、冷間圧造製法での金型の耐久性に課題があるため、ボルト径は主にM24までのものしか作られていない(M27以上のボルトは製造できない)。さらに、溶融亜鉛めっきをすると先端破断のバラツキが発生し軸力の安定性がなくなるので、表面はめっき処理をしないで生地のみであり、耐久性は20～30年ほどである。

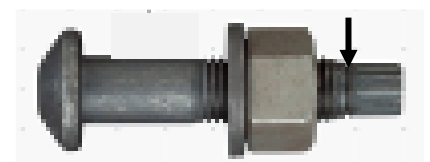


図2 高力トルシア形ボルトセット



図3 締付後の高力トルシア形ボルトセット



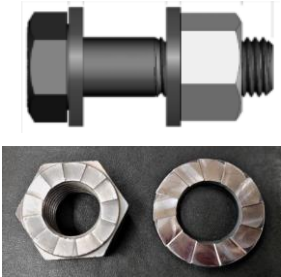
## 2. 従来の高力ボルトの課題（高力六角ボルトセットの緩みについて）

高力ボルトセットは締付軸力が保証されているが、上述のように、緩みが出る可能性があり、道路公団等では定期的に点検し、緩みの発生があるボルトに対しては再締付けをしている。例えば、西日本高速道路(株)の毎年の定期点検では、緩みがあるものが発見されている。脱落はしないが締付軸力は規定の約10%程度となり、事故防止の観点から放置するわけにはいかない。

## 3. 本研究開発の目的と概要

表1に従来技術と、本研究開発による新技術の比較を示す。表1に記載のように、本技術開発による高力六角ボルトの主な特徴は、①傾斜段差噛み合わせにより緩み防止機能があること、②冷間圧造により低コストであること、の2点である。

表1 従来の高力六角ボルトセットと本研究開発の高力六角ボルトセットの比較

建築用高力ボルトセット	従来技術			新技術 六角ボルトセット (緩み防止機能付)
	トルシア形ボルトセット	六角ボルトセット		
	冷間圧造品	冷間圧造品	熱間圧造品	冷間圧造品
認定者	国交大臣	国交大臣	経産大臣	(国交・経産大臣に申請予定)
生産可能企業数(国内)	6社	6社	6社	当社のみ
市場占有率	80%	8%	12%	0%
概要図				
表面処理	めっき不可能	溶融亜鉛メッキ	溶融亜鉛メッキ	溶融亜鉛メッキ
性能等	緩み止め機能	×	×	○
	初期軸力安定性	◎	○	
	耐食性	△ (20~30年)	○ (30~50年)	○ (30~50年)
サイズ種	M12~M24	○	○	○
	M27~M36	×	○(*1)	○
コスト(M24)	610円	720円	910円	760円
コスト(M36)		1,488円	2,078円	1,642円

<注記>(\*1):M27~M36の冷間圧造の高力六角ボルトは、国内では月盛工業(株)のみが製造可能である。

## 4. 本研究開発の技術的目標値

### 【1】緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの製造技術の確立

#### 【1-1】冷間圧造にて高力六角ボルトの頭裏面の傾斜段差の転写性の確立

- 目標値 1)冷間圧造時の引張強度1040Mpa以上、圧造時の硬さ23HRC、熱処理後の硬さ35HRC  
 2)傾斜段差加工:段差数12面で、段差高さ0.1~0.3mm、段差角部のR0.1以下  
 3)金型の耐久性 2万ショット

#### 【1-2】高力六角ナットの傾斜段差の転写性の確立

- 目標値 1)引張強度 570Mpa以上。圧造時の硬さ18HRC、熱処理後の硬さ30HRC  
 2)傾斜段差加工:段差数12面、段差高さ0.1~0.3mm、段差角部のR0.1以下  
 3)金型の耐久性 5万ショット

### 【1-3】高力平座金のオモテ面において傾斜段差の転写性の確立

- 目標値
- 1) 引張強度 690Mpa以上。圧造時の硬さ25HRC、熱処理後の硬さ40HRC
  - 2) 傾斜段差加工: 段差数18面、段差高さ0.1~0.3mm、段差角部のR0.1以下
  - 3) 金型の耐久性 3万ショット

### 【2】高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

目標値: 圧造金型が想定耐久ショット数高力六角ボルトセットにおいて、下記の性能を満足すること

- 1) 締付トルク(締付軸力): 締付軸力630kN以上(ボルト試験JISB1186のF10T同等)
- 2) 高力六角ボルトの緩み回転角: 15度以下(ボルト試験、ボルトと被接合材のマーキング角度測定)
- 3) 高力六角ナットの緩み回転角: 15度以下(ボルト試験、ボルトとナットのマーキング角度測定)  
締付け完了後にボルトとナットにマーキングをして緩み回転角を測定
- 4) トルク試験(JISB1186): トルク係数0.11以上
- 5) NAS式振動試験(NAS3350): 30,000サイクルで残存軸力85%以上
- 6) 塩水噴霧試験(JISHO401): 4000時間連続後に残存軸力85%以上  
通常気象の条件 4000時間連続、海上使用の条件 4000時間連続(国交大臣認定申請基準)

## 5. 本研究開発の実施結果

### (1) 緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセット(圧造金型想定寿命段階)

- ・M22、ボルト長さ90mm、ナット段差18面ー高さ0.29mm、平座金18面ー高さ0.17mm
- ・製作ショット数 ボルト20,000本、ナット50,000個、平座金30,000個のもので試験。試験数=5ヶ

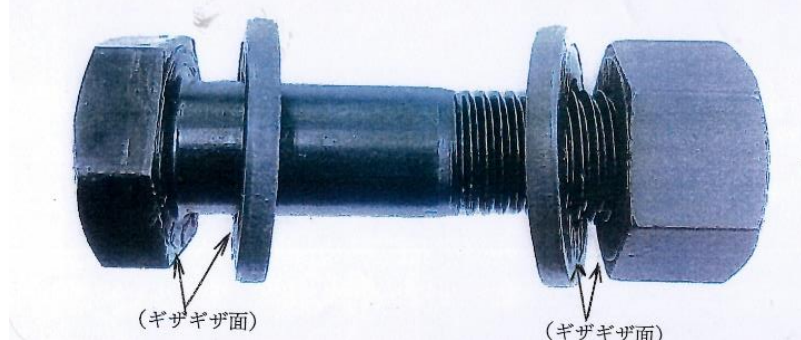


図4 圧造金型想定寿命段階の緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセット

### (2) 緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセット(圧造金型想定寿命段階)の試験結果

金型想定寿命ショットの圧造による高力M22ボルトセット、段差数ボルト12面ナット18面および平座金18面で、緩み防止機能の技術的目標値を達成した。

- 1) 締付トルク(締付軸力): JIS1186のF10T同等を達成(締付トルク730Nm、締付軸力226kN)
- 2) ボルトの緩み回転角ー0度で達成、
- 3) ナットの緩み回転角ー0度で達成
- 4) トルク試験ートルク係数0.140で達成(トルク係数0.110以上で合格)
- 5) NAS式振動試験ー試験数30セットで、残存軸力の平均98%で全て達成(残存軸力95%以上)
- 6) 塩水噴霧試験(JISHO401)ー4,000時間連続後の残存軸力平均97%で達成(残存軸力85%以上)

### (3) 緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセット(圧造金型想定寿命段階)の緩み防止性能

- ・製作ショット数 ボルト20,000本、ナット50,000個、平座金30,000個の各段階における緩み防止性能を試験し、そのデータを下表に示す。締付軸力はいずれも規定通り226kNである。
- ・緩み防止トルク/締付トルクの比は、普通ボルト67%に対し、各金型加工回数および想定寿命ショット数のいずれでも100%以上と技術的目標値を達成できた。

金型ショット数での緩み防止性能（各5個平均）

金型想定寿命ショット数でのボルト試験

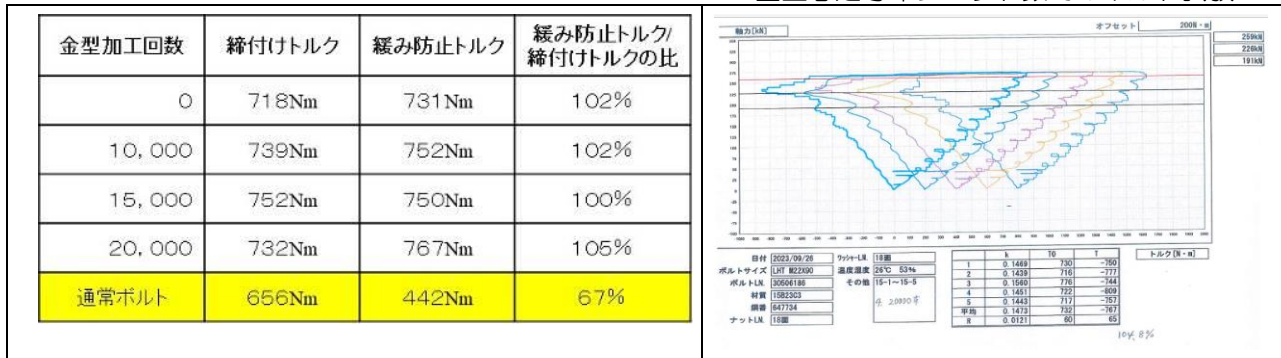


図5 金型想定寿命までの緩み防止トルク比

(4) 高力六角M22ボルトセットの緩み防止性能の安定性を評価

- ・圧造金型想定寿命段階のM22ボルトセットの30セットを任意に選択し、トルク試験を実施した。
- ・締付け軸力226kN。緩み防止性能（緩み防止トルク/締付けトルクの比）は、30個平均で104.7%の性能を確認できた（技術的目標値100%以上）。普通ボルトは67%であり、平均1.56倍の緩み防止性能となった。

緩み防止トルク/締付けトルクの比 %

試験データ30個のうち、5個のトルク試験

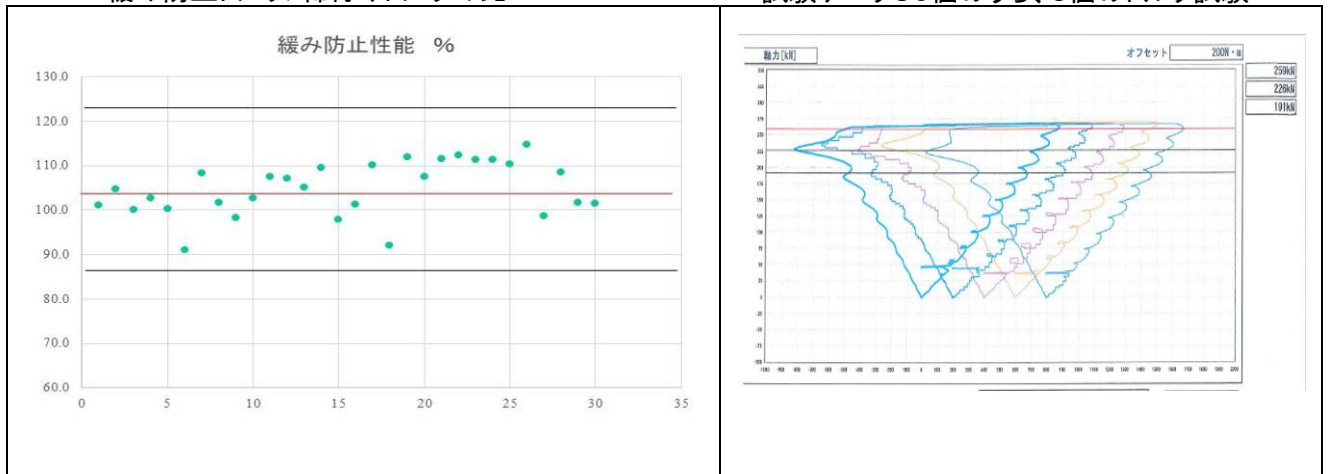


図6 緩み防止性能の安定性を評価

(5) 緩み防止機能付き高力六角ボルトセット(M16~M36)の緩み防止性能を評価

表2 緩み防止機能付き高力六角ボルトセット(M16~M36)の緩み防止性能(試験は5セット平均値)

	M16	M20	M22	M24	M36
段差高さ規定	0.25+0.10 -0.05 mm				0.35±0.10 mm
平均トルク係数値	0.130~0.150				0.125~0.150
締付け軸力	JIS規定				

トルク試験	標準締付け軸力	117kN	182kN	226kN	262kN	615kN
	締付けトルク	309Nm	540Nm	791Nm	958Nm	3,104Nm
	緩めトルク	380Nm	603Nm	822Nm	1,015Nm	3,839Nm
	緩み防止トルク比	123%	112%	104%	106%	124%
	普通高力ボルト	65%	64%	70%	69%	---

振動試験	NAS振動試験	緩まない	緩まない	緩まない	緩まない	緩まない
	締付けトルク	300Nm	500Nm	700Nm	860Nm	3,050Nm
	増締めトルク	291Nm	490Nm	680Nm	834Nm	2,989Nm
	増緩めトルク比	97%	98%	97%	97%	98%
	普通高力ボルト	97%	97%	97%	97%	---

## サブテーマ【1】 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの製造技術の確立

研究開発実施内容	目標値	実施結果
【1-1】冷間圧造にて高力六角ボルトの頭裏面の傾斜段差の転写性の確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>傾斜段差加工: 段差数12面で、段差高さ0.1～0.3mm、段差角部のR0.1以下</li> <li>金型の耐久性 2万ショット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高力M36ボルトにて、傾斜段差12面・段差高さ0.35mm、段差角R0.1mmと仕様通りに製作でき、高力ボルト段差の転写性の確立が達成できた。</li> <li>高力M16・M20・M22・M24でも段差転写性と緩み防止性能の確立ができた。</li> <li>高力M22で耐用回数2万回が達成できた。</li> </ul>
【1-2】高力六角ナットの傾斜段差の転写性の確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>傾斜段差加工: 段差数18面、段差高さ0.1～0.3mm、段差角部のR0.1以下</li> <li>金型の耐久性 5万ショット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高力M36ナットにて、傾斜段差18面・段差高さ0.35mm、段差角R0.1mmと仕様通りに製作でき、高力ナット段差の転写性の確立が達成できた。</li> <li>高力M16・M20・M22・M24でも段差転写性と緩み防止性能の確立ができた。</li> <li>高力M22で耐用回数5万回が達成できた。</li> </ul>
【1-3】高力 M36 平座金のオモテ面において傾斜段差の転写性の確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>傾斜段差加工: 段差数18面、段差高さ0.1～0.3mm、段差角部のR0.1以下</li> <li>金型の耐久性 3万ショット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高力M36平座金にて、傾斜段差18面・段差高さ0.25mm、段差角R0.1mmと仕様通りに製作でき、高力平座金段差の転写性の確立が達成できた。</li> <li>高力M16・M20・M22・M24でも段差転写性と緩み防止性能の確立ができた。</li> <li>高力M22で耐用回数3万回が達成できた。</li> </ul>

## サブテーマ【2】 高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

研究開発実施内容	目標値	実施結果
【2-1】金型初期状態での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保	<ol style="list-style-type: none"> <li>締付トルク(締付軸力): 締付軸力630kN以上</li> <li>高力六角ボルトの緩み回転角: 15度以下</li> <li>高力六角ナットの緩み回転角: 15度以下</li> <li>トルク試験: トルク係数0.11以上</li> <li>NAS式振動試験: 30,000サイクルで残存軸力85%以上</li> <li>塩水噴霧試験: 4000時間連続後に残存軸力85%以上</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高力M36ボルトセットの金型初期段階で、段差数をナット18面・平座金18面に微調整し、緩み防止性能(緩めトルク/締付けトルクの比100%以上)、およびNAS式振動試験での締付残存軸力(95%以上)などの技術的目標値を全て達成した。</li> <li>M16・M20・M22・M24の高力ボルトセット各サイズもナット18面・平座金18面に微調整し、金型初期段階での、緩み防止性能などの技術的目標値を全て達成した。</li> </ul>
【2-2】各部品の金型が想定寿命ショット数での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保	<ol style="list-style-type: none"> <li>5) NAS式振動試験: 30,000サイクルで残存軸力85%以上</li> <li>6) 塩水噴霧試験: 4000時間連続後に残存軸力85%以上</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高力M36ボルトセットの現場実用化を検証できる建築現場が殆どないという理由から、建築現場での実用化検証が可能なM22サイズに変更した。</li> <li>想定寿命ショット数圧造金型の高力M22ボルトセットにて緩み防止性能、およびNAS式振動試験と塩水噴霧試験とリラクゼーション試験の締付け残存軸力などの技術的目標値を全て達成した。</li> <li>建設現場での実用化検証を実施し、締付け残存軸力平均97%以上を達成した。</li> </ul>
【3】高力六角ボルトセットの傾斜段差面数や段差高さ、傾斜面角Rの微調整	緩み防止性能の確保と傾斜段差の確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩み防止性能を確保するために、ナット12面・平座金18面から、ナットと平座金を同面数18面に微調整を実施した。</li> <li>高力M16～M24の緩み防止性能の発揮には、段差高さの寸法公差「±0.1mm」の場合の公差下限では緩み防止性能が小さめになるので、公差を「+0.1mm、-0.05mm」に微調整を実施した。</li> </ul>

## 1-2 研究体制

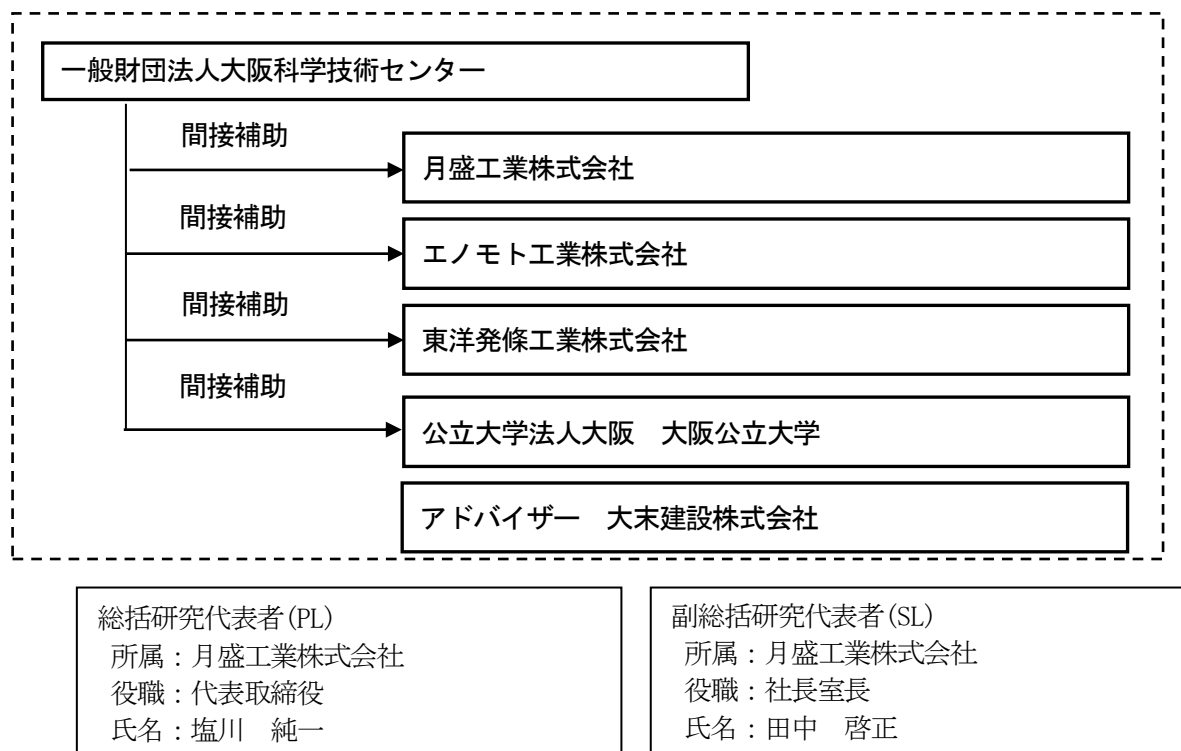


図7 研究体制

## 1-3 成果概要

□サブテーマ【1】およびサブテーマ【2】により、日本初（世界も初）の新製品「緩み防止機能付き高力六角ボルトセット」が実現できた。

□サブテーマ【1】 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの製造技術の確立

- ・事業計画書通りの技術施策によって、緩み防止機能付き高力六角M36ボルト(長さ150mm)・ナット・平座金の傾斜段差(段差数12面/18面、段差高さ0.35mm)の転写性は達成できた。
- ・M16、M20、M22、M24の緩み防止機能付きの各高力ボルト、ナット、平座金の傾斜段差の転写性も達成できた。
- ・高力六角M22ボルト(長さ90mm)の圧造金型想定寿命ショット数(2万本)での傾斜段差の転写性は達成できた。これにより、当初計画通りのコストも実現できる。

□サブテーマ【2】 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの緩み防止性能

- ・本研究開発の緩み防止機能付き高力六角ボルトセットは、普通の高力ボルトが締付けトルクの約67%で緩むのに対し、締付けトルクの104%以上(普通の高力ボルト比155%以上)でしか緩まないという緩み防止性能を確立できた。
- ・締結を維持する軸力は、NAS式振動試験17分の2倍の時間34分、5400時間のリラクセーション試験、連続4000時間の塩水噴霧試験のいずれの後においても、普通の高力ボルトと同等以上の締付残存軸力97%以上の性能を持つことを実証できた。

□緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの技術的目標値の達成結果

表3 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの技術的目標値の達成結果

【1-1】冷間圧造にて高力六角ボルトの頭裏面の傾斜段差の転写性の確立

M36目標値	M36	M16	M20	M22	M24
1)冷間圧造時の引張強度1040Mpa以上、熱処理後の硬さ35HRC	37	35	36	35	36
2)傾斜段差加工:段差数12面で、段差高さ0.1~0.3mm、 段差角部のR0.1以下(金型初期状態で)	0.35	0.25	0.25	0.25	0.25
3)生産能力 1個取りの1金型について35個/分以上、 圧造金型の耐用回数2万回、その時の生産能力	36	60	60	60	40
				60	

【1-2】高力六角ナットの傾斜段差の転写性の確立

M36目標値	M36	M16	M20	M22	M24
1)引張強度 570Mpa以上、熱処理後の硬さ30HRC	30	30	30	30	30
2)傾斜段差加工:段差数12面、段差高さ0.1~0.3mm、 段差角部のR0.1以下(金型初期状態で)	0.35	0.25	0.25	0.25	0.25
3)生産能力 1個取りの1金型について150個/分以上、 圧造金型の耐用回数5万回、その時の生産能力	70	150	150	150	120
				150	

【1-3】高力平座金のオモテ面において傾斜段差の転写性の確立

M36目標値	M36	M16	M20	M22	M24
1)引張強度 690Mpa以上、熱処理後の硬さ40HRC	40	41	40	41	40
2)傾斜段差加工:段差数12面(または18面)、段差高さ0.1~0.3mm 段差角部のR0.1以下(金型初期状態で)	0.25	0.20	0.22	0.24	0.17
3)裏面(傾斜段差のない面)の表面の凸凹:粗さRa60(μm)~80(μm)	170	260	300	160	220
4)生産能力:1個取りの1金型について35個/分以上、 圧造金型の耐用回数3万回、その時の生産能力	6	160	160	160	60
				160	

【2-1】金型初期状態での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

M36目標値	M36	M16	M20	M22	M24
1)締付トルク(締付軸力):締付軸力630kN以上	630	117	182	226	262
2)高力六角ボルトの緩み回転角:15度以下	緩みなし	緩みなし	緩みなし	緩みなし	緩みなし
3)高力六角ナットの緩み回転角:15度以下	緩みなし	緩みなし	緩みなし	緩みなし	緩みなし
4)トルク試験(JISB1186):トルク係数0.11以上	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140
5)NAS式振動試験(NAS350):30,000サイクルで残存軸力85%以上	98%	97%	102%	97%	97%
6)塩水噴霧試験(JISHO401):4000時間連続後に残存軸力85%以上			97%		

【2-2】各部品の金型が想定寿命ショット数での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保 ⇒M22変更実施

M36目標値	M36	M16	M20	M22	M24
1)締付トルク(締付軸力):締付軸力630kN以上	630			226	
2)高力六角ボルトの緩み回転角:15度以下	緩みなし			緩みなし	
3)高力六角ナットの緩み回転角:15度以下	緩みなし			緩みなし	
4)トルク試験(JISB1186):トルク係数0.11以上	0.140			0.140	
5)NAS式振動試験(NAS350):30,000サイクルで残存軸力85→95%以上	98%			97%	
6)塩水噴霧試験(JISHO401):4000時間連続後に残存軸力85%以上				97%	

1-4 当該研究開発の連絡窓口

住所 大阪府八尾市竹湊西5丁目6番地  
 氏名 月盛工業株式会社 代表取締役社長 塩川 純一  
 電話 06-6709-6277  
 E-mail tsukimorikogyo@coda.ocn.ne.jp

第2章 本論

(1) 導入した設備

高力六角ボルトセットにおいてM36サイズまで緩み防止性能の確保を試験・評価できる設備の導入

- ・技術的目標値の測定に必要な、NAS式振動試験機、ボルト試験機、(材料)万能試験機を導入することで、自社でM36サイズまで評価できるようになった。そして評価する期間が大幅に短縮できるようになり、効率的な研究開発が行える。
- ・研究開発および技術的目標値の測定に必要な3次元形状測定機(エノモト工業(株)、東洋発條工業(株)両者の測定機は測定サイズが異なるタイプ)を導入し、ボルト・ナット・平座金の段差測定に活用している。月盛工業(株)はエノモト工業(株)に測定を依頼することで、効率的に推進できている。

- ① **3D形状測定機を導入**（エノモト工業㈱および東洋発條工業㈱に、2021年9月）  
（キーエンス製 VR-5000/VR-5200、VR-6000/VR-6200）
- ・3次元形状を非接触で測定でき、測定結果を3次元に表示できる。
  - ・ナットの傾斜段差をサブミクロン単位で3次元測定ができる。
- ② **NAS式ボルト振動試験機を導入**（月盛工業㈱に、2022年2月）  
（大研科学産業(株)製、サポイン研究開発費で導入）
- ・対象大きさ M27～M36（M16～M36を試験できる設備は、日本で当社の1台だけである）  
高力ボルトの全範囲（M16～M36）を試験可能
  - ・NAS3350試験： 加速振動試験（30,000サイクル約17分）ストローク量±5.7mm、衝撃幅19mm  
振動速度30Hz（1800rpm）  
⇒振動試験後の増締めトルクと残存軸力を測定  
技術的目標値： 30,000サイクル後の締付軸力85%以上
- ③ **ボルト試験機を導入**（月盛工業㈱に、2022年7月。月盛工業(株)が自己負担で導入）  
（(株)東京衝機試験機製、半導体入手難により、導入時期が5カ月遅れた）
- ・M36ボルトセットのボルト試験も可能（M36を試験できる設備は当社も含め日本に2台だけである）。高力ボルトの全範囲（M16～M36）まで試験可能
  - ・締付トルク、緩めトルクを測定
  - ・締付角および締付軸力、トルク係数を測定
- ④ **(材料)万能試験機を導入**（月盛工業㈱に、2022年10月）  
（(株)島津製作所製、サポイン研究開発費で導入）
- ・最大荷重1,000kN、ボルト材料の引張り強さ・耐力などを測定
  - ・高力ボルトM36は最大荷重1,000kNで測定可能。



図8 測定機器 3D形状測定機



ボルト振動試験機



ボルト試験機



(材料) 万能試験機

## （2）緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの研究開発の取り組み

### 【1】緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの製造技術の確立

新型コロナウイルス感染症によるサプライチェーン毀損で半導体が入手困難になった影響により、サイズの緩み防止性能を試験するボルト試験機の導入が当初計画の2022年3月から7月に大幅に遅れた。当該高力ボルトを試験・評価できる試験機器がM20サイズまでしかない状況で、M36とM20のボルトセットの段差転写製造技術の確立に取組み、試験機器の関係で緩み防止性能確保と微調整は専らM20で取組んだ。

2022年12月以降にM36のボルト特性と緩み防止性能を当研究開発共同体で評価できるようになり、研究開発の効率が上がった。

【1-1】冷間圧造にて高力六角ボルトの頭裏面の傾斜段差の転写性の確立—月盛工業(株)

頭裏面に傾斜段差付きの高力M36ボルト圧造金型は、段差転写の金型製造の効率化と緩み防止性能向上を図るという理由から、事業計画書通りの技術施策に加え、M20の段差転写取組みで先行して得た圧造金型の知見とノウハウを活用した。具体的には、ボルト段差の突起による高力ボルトの硬い鋼材への応力集中を段差角R0.1加工により軽減し、また、異常な加工力増加を抑えるため、金型ダイスに微小な粗さを設けパンチ圧造時に鋼線と金型ダイスに滑りが発生しないようにすることの対策を実施した。その結果、傾斜段差12面・段差高さ0.35mm、段差角R0.1mmと仕様通りに製作でき、高力M36ボルト段差の転写性の確立が達成できた(機械的性質—JIS-B1180)。また圧造金型の初期段階の傾斜段差付高力M36ボルトセットの緩み防止性能の達成ができた(ボルトの機能)。

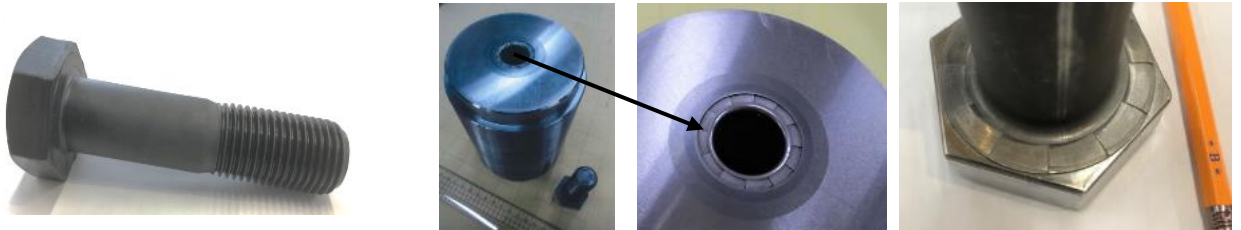


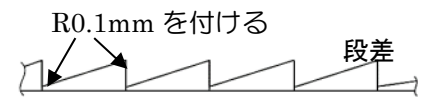
図9 緩み防止機能付き高力M36ボルト  
段差12面 高さ0.35mm

M36圧造金型ダイスの傾斜段差  
12面 段差高さ0.35mm

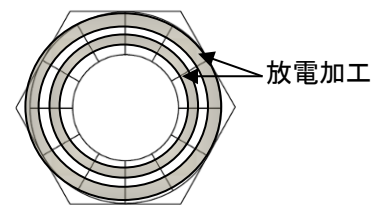
M36ボルト頭裏部の傾斜段差  
高さ実測0.35mm

1) 高力六角ボルトの硬い鋼材への段差の転写性の課題について、以下の創意工夫を盛り込み解決

- a. 段差の突起による応力集中の低減: 段差は尖っていて段差の有効高さが大きいほど、緩み防止には効果が大きいですが、圧造金型ダイスに高い応力が発生する可能性が予想される。この対策として、図 10 a に示すような応力集中を軽減するR、最大 R0.1mm を加工した。
- b. 応力異常増加を抑える対策: パンチ圧造時にボルト頭とダイスとの接触面に微小滑りが起こると、形状に歪みなどが発生して、ダイスの接触する部所への応力が異常に大きくなる。そのため材料が滑らないように、段差加工のダイス表面が粗さRa60(μm)となる放電加工(図 10 b)を行った。
- c. 異常な加工力増加の発生を抑える対策: 太径ボルトの場合、鋼線は円形に巻かれており、弓型に反るのをストレナーで真直ぐにしている。しかし棒材長さは約350mmあるので、切断した後反りが戻る傾向があり長さが所定の長さより数mm長くなる時がある。その場合、図 10 c に示すように圧造時にボルト頭部が膨らみ、圧造力が約30トン以上大きくなる。この対策として鋼線送り装置に棒材の戻りを抑える工夫を行い、切断精度を±0.5mm以下にすることができた。
- d. 加工力の低減: 図 10 d に示すように、六角ボルト頭になる部分(ア)以外に丸みを付けると共に、かつ赤色で示す部分(イ)を小さくした。この対策にて、六角ボルト頭になる部分の横端をパンチ部に当たらないようにして塑性変形させることで、パンチとダイスに発生する加工力を異常に増加させることなく加工できた。
- e. ダイスは外径200mm長さ400mmで、ダイスの中央には超硬材を使っている。段差加工の応力に耐えられるようダイス外径を15%大きく、超硬部も10%大きくした。
- f. ダイス中央の超硬材はG7からG8に変えた。G7・G8は高荷重で大きな衝撃を受ける冷間圧造ダイスなどに多く使用されている。G8はG7に比べ硬度と抗折力は少し小さくなるが、耐衝撃性はさらに強化される。
- g. 応力集中を緩和させる加工油の選定: 高荷重の使用条件でも強固な油膜を形成できる加工油を選定し、応力集中を緩和させ型寿命を伸ばせる最適な粘度を設定した。性能は、密度 0.89g/cm<sup>3</sup>・引火点 180℃、粘度 56mm<sup>2</sup>/sec である。



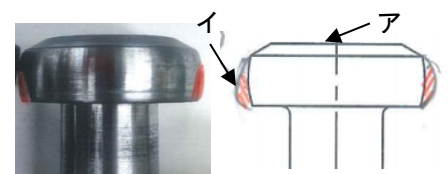
a. 傾斜段差に R を付ける



b. 放電加工で粗さ確保



c. 棒材長さバラつきの影響低減



d. 丸みを付け加工力低減

図 10 段差転写性への創意工夫

加工油が糸を引く程度の粘度で常時流している状態を保った。粘度等の油膜の条件を一定にするため、ヒーターで一定の加工油温度 25℃になるように管理して供給している。

## 2) 高力六角ボルトの頭裏面の傾斜段差の転写性の確立

高力六角M20金型とM36金型の知見とノウハウをもとに、M22、M16、M24の各サイズにて頭裏面に傾斜段差付きの高力ボルト圧造金型を製作し、段差の転写性の確立が達成できた。

緩み防止機能付高力六角ボルト(M22長さ90mm)において、金型想定寿命ショット数2万本での傾斜段差(傾斜段差12面、段差高さ0.33mm)の転写性を確立できた。

表4 圧造金型での製作ショット数4,000個での段差高さ平均 0.338mm

段差の高さ (mm)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
①	0.334	0.341	0.326	0.338	0.310	0.394	0.308	0.409	0.249	0.379	0.311	0.352	0.338

山の角度 (°)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
①	1.417	1.836	1.551	2.101	1.824	2.383	1.706	2.102	1.561	2.653	1.576	1.451	1.847

金型本数	段差平均mm	
	M22×90mm	M36×150mm
1本	0.338	0.338
5,000本	0.335	0.338
10,000本	0.343	
15,000本	0.347	
23,000本	0.335	

### 【1-2】高力六角M36ナットの傾斜段差の転写性の確立—エノモト工業(株)

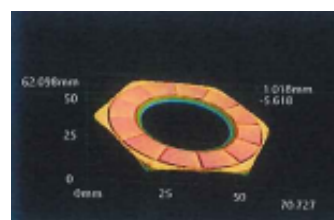
傾斜段差付きの高力六角M36ナット圧造金型は、段差転写の金型製造の効率化と緩み防止性能向上を図るという理由から、事業計画書通りの技術施策に加え、M20の段差転写取組みで先行して得た圧造金型の知見とノウハウを活用した。具体的には、段差面にR25加工を施して締付けトルクを安定化させ、その結果、傾斜段差18面・段差高さ0.35mm、段差角R0.1mmと仕様通りに製作でき、高力六角M36ナット段差の転写性の確立が達成できた。また圧造金型の初期段階の傾斜段差付高力六角M36ボルトセットの緩み防止性能の達成ができた。



図 11 M36 圧造金型ダイス



製作した傾斜段差付高力六角M36 ナットと段差形状



製作した高力六角M36ナット

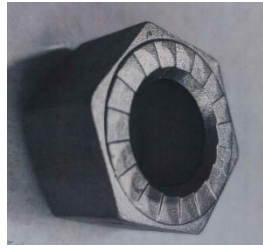
#### 1) 緩み防止機能付き高力ナットに特有な圧造金型の創意工夫点

- 傾斜段差の突起に R0.1mm を付けた。
- 圧造プレスで段差形状と寸法を精度よく転写できるようにするため、圧造時に起こるナットの微小な滑りを抑える。  
この手段として、ダイスの段差形成面を放電加工して粗さ Ra60(μm)とした。
- 平座金に接触しない外周面は図 14 に示す段差なし部を設け、狙い通り圧造加工力を低減できた。
- 段差なしの外周面をねじ切り加工の位置決め基準にし、ナットの段差とねじ軸との同心度精度を確保できた。

#### 2) 高力ナットのお他サイズへの展開と、圧造金型想定寿命ショット数での転写性の確立

高力六角M20金型と金型の知見とノウハウをもとに、M22、M16、M24の各サイズにて段差数18面の傾斜段差付きの高力ナット圧造金型を製作し、段差の転写性の確立が達成できた。また各サイズの圧造金型の初期段階の傾斜段差付高力ボルトセットの緩み防止性能の達成ができた。

高力六角M36の実用化を検証できる建築現場が殆どないという理由から、替りに建築現場での実用化検証が可能なM22において、圧造金型の想定寿命ショット数の傾斜段差の転写性の確立を重点的に実施した。その結果、金型想定寿命ショット数5万個において、緩み防止機能付き高力六角M22ナットの傾斜段差(傾斜段差18面、段差高さ0.29mm)の転写性を確立できた。



	段差平均mm
1本	0.277
10,000本	0.284
30,000本	0.300
50,000本	0.293

試験数5個の平均

図12 高力M22ナットの想定寿命ショット数の傾斜段差高さ

【1-3】高力M36平座金のおモテ面において傾斜段差の転写性の確立—東洋発條工業株

傾斜段差付きの高力M36平座金圧造金型は、M20圧造金型の知見を適用したが、板厚8mmのサイズの平座金段差高さ0.35mmでは金型への応力負荷が増大し金型の一部が損傷した。金型損傷防止するために前処理として焼鈍（焼きなまし）をすることが不可欠と判明した。焼鈍処理をすることにより、加工時の硬さをHRB95（HRC15相当）からHRB75（HRC0相当）に低減することで、傾斜段差0.3～0.5mmでも金型損傷を発生させずに加工することができた。

焼鈍処理材は一般材と異なり金属組織が変異しているため、一般材と同様の熱処理ではHRC40までしか硬化できず、高力平座金の所定の硬度（HRC35～45）が確保できなかった。試行錯誤して熱処理に特別なヒートパターンを考案・実施することで、平座金が所定の硬度となる良好な結果が得られ、高力M36平座金の段差の転写性の確立が達成できた。

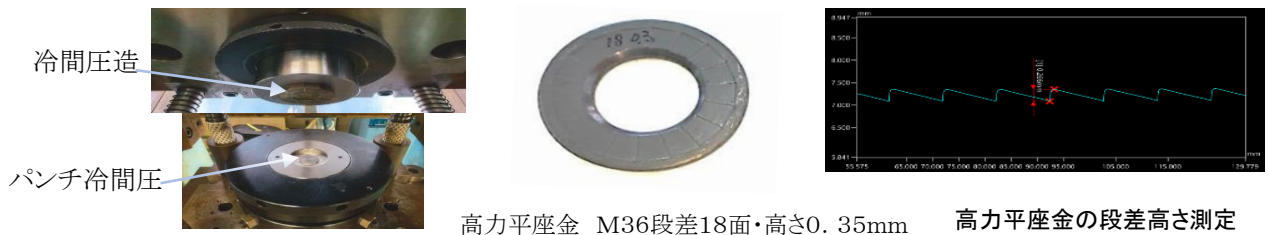


図13 高力M36平座金の圧造金型と高力M36平座金

1) 緩み防止機能付きの高力M36平座金の段差加工に特有な創意工夫点

- a. 傾斜段差の突起に R0.1mm を付けた。
- b. ナット等の段差に接触しない外周には図14に示す段差なし部を設け、圧造時に発生する材料の膨らみを吸収して、ダイスに発生する応力を低減し、耐久性を向上できた。
- c. 高力平座金の外径 D で圧造型ダイスとの位置決めを確実にし、段差圧造時の微小な滑りを抑えて、特定の場所に過大な加工力が集中することを低減できた。

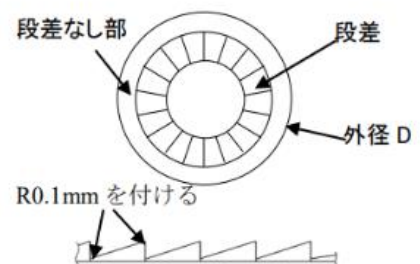


図14 緩み防止付平座金の構造

2) 高力平座金のおモテ面への展開と、圧造金型想定寿命ショット数での転写性の確立

高力M20金型と金型の知見とノウハウをもとに、M22、M16、M24の各サイズにて段差数18面傾斜段差付きの高力平座金圧造金型を製作し、段差の転写性の確立が達成できた。また各サイズの圧造金型の初期段階の傾斜段差付高力ボルトセットの緩み防止性能の達成ができた。

高力M36の実用化を検証できる建築現場が殆どないという理由から、替りに建築現場での実用化検証が可能な高力M22において、圧造金型の想定寿命ショット数の傾斜段差の転写性の確立を重点的に実施した。その結果、金型想定寿命ショット数3万個において、緩み防止機能付き高力M22平座金の傾斜段差（傾斜段差18面、段差高さ0.17mm）の転写性を確立できた。



高力平座金  
M22段差18面、高さ0.17mm

	①段差平均
1本	0.170
5,000本	0.177
10,000本	0.175
20,000本	0.175
30,000本	0.172

試験数5個の  
平均(mm)

図15 高力M22平座金の想定寿命ショット数の傾斜段差高さ

【2】 緩み防止付き高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

【2-1】 金型初期状態での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

緩み防止性能を試験・評価する機器が揃っていない理由から、最初に高力六角M20ボルトセットで研究開発を推進し、締付時のトルク係数のバラつきが大きいという課題をナット段差のR25加工により解決した。また2022年10月に、M36～M16サイズまで試験・評価できる機器を当研究開発共同体に揃えた。それにより各種サイズの緩み防止性能の試験が大幅に効率化され、研究開発を進展させることができた。

当初の段差数のナット12面・平座金18面では、NAS式振動試験での締付残存軸力が普通タイプの高力ボルトに劣るという理由から、ナット18面・平座金18面に段差数を微調整し、緩み防止性能の確立を重点的に実施した。

その結果、ナット12(18面)面・平座金18面にてM16・M20・M22・M24・M36の高力六角ボルト各サイズの高力初期段階での、技術的目標値を全て達成した。

1) 高力六角M20ボルトセット(長さ65mm)の締付け性能および緩み防止性能

高力M20ボルトセットは、締付軸力の規定値182kNで締付けを完了する。  
高力ボルトセットのトルク係数\*によって、締付トルクは変化する。



図16 高力M20 ボルトセット

注\*トルク係数K: ボルトを締め付ける場合のトルク (T) は、生じる締付軸力 (F) と、ねじの直径(呼び径: d) より、 $T(N \cdot m) = K d F(N)$  の関係で示される。この「K」が、トルク係数と呼ばれるもので、摩擦係数(ねじ部・座部)とめっきや油等が関係するが、その値は高力ボルトではA種0.110～0.150とされている。

下図のボルト線図は、縦軸に締付軸力(kN)、横軸右に締付けトルク(Nm)、横軸左に緩みトルク(Nm)を示す。

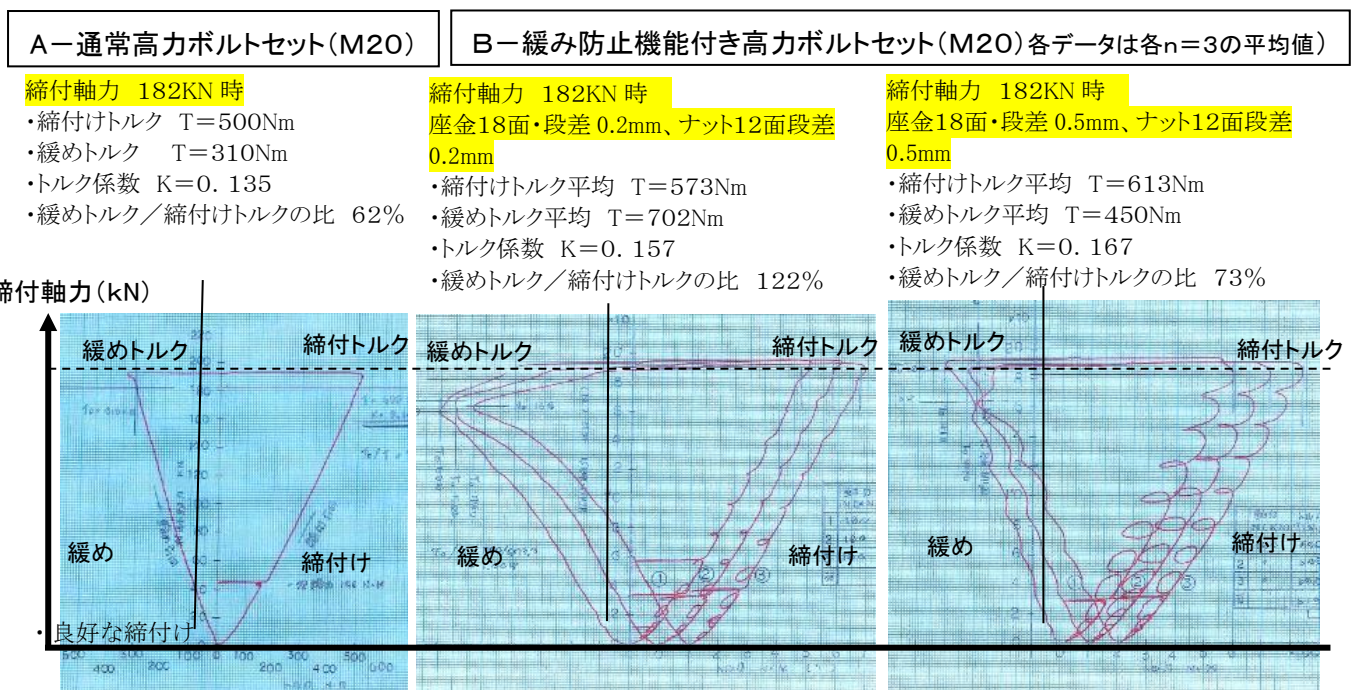


図17 高力M20ボルトセットのボルト線図

- ・図17に示す、Bー緩み防止機能付き高力ボルトセット(M20)の締付け性能および緩み防止性能の結果  
 段差0.2mm: 良好な締付け、しかしトルク係数0.157と高めである。緩めトルク/締付トルクの比は122%と良好。  
 段差0.5mm: 締付け時にギョギョと不安定であり、段差が潰れ(?)不安定な締付であった。  
 トルク係数0.167と高く、締付トルク613Nmと大きい。  
 緩めトルク/締付トルクの比は73%と、通常高力ボルトと変わらず、段差の効果はない。
- ・図17右に示す段差0.5mmの高力ボルトセットは、73%と緩み防止性能も殆ど無くNGであった。段差高さは0.20~0.25mmが良いと判断した。
- ・高力M20長さ65mmで金型初期状態での傾斜段差付高力ボルトセットのボルト試験では、通常の高力ボルトの緩めトルク/締付トルクの比は62%に対し、段差0.2mmの高力ボルトセットは締付も良好であり、緩めトルク/締付トルクの比も122%と緩み防止性能が確保できている。
- ・ただし所定の締付軸力にするのに締付トルク(トルク係数)のバラつきが大きく、かつ値が大きいのが課題である。

2) 高力六角M20ボルトセットの締付け性能の課題(締付時のトルク係数のバラつきが大きい)

- ・締付けトルクに対し、緩めトルク/締付けトルクの比は108%以上あり緩み防止効果を確認できた。
- ・技術的目標値ートルク係数(0.11以上)は合格だが、圧造ロットによってはA種(0.110~0.150)より大きいものもあり、ロットによって0.120~0.158と変動しており、締付トルクのバラつきが大きいのが課題である。

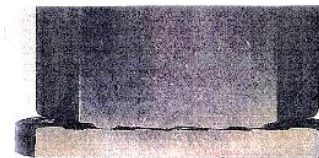


図18 ナットと平座金の噛合い状態(断面)  
 ナット12面 高さ0.20mm  
 平座金18面 高さ0.20mm

① トルク係数バラつきの要因(段差バラつき)と対策

- ・ナットを締付けた際、ナットと平座金の段差のバラつきにより、当る接触位置の中心との長さがバラつき、締付けトルク値(トルク係数)が変動している。
- ・対策: ナットの段差をR25に加工して、平座金段差との接触する位置を内側で均一にすることで、締付けトルク値を安定化させる。  
 R25加工にて、段差高さ平均は内0.28mm、中0.33mm、外0.17mmとなった。

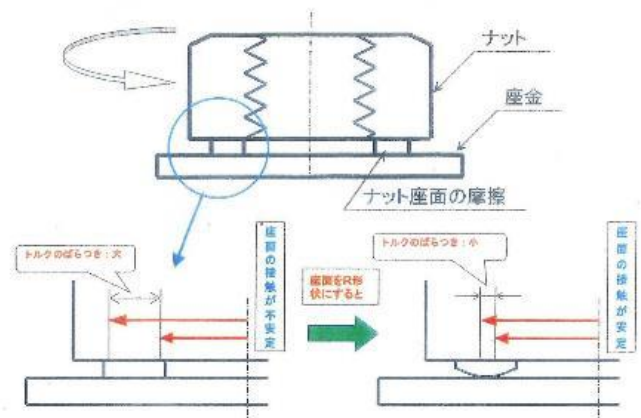
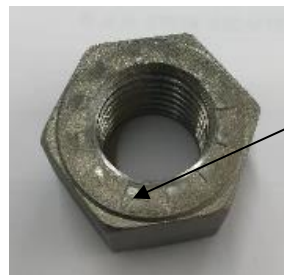


図19 バラつきの要因想定図

対策前のナット(締付前)



対策後のナット(締付後)



対策結果:

- ・狙い通り、内側で接触面が光っている。
- ・段差の加工バラつきに影響されなくなった

図20 ナット段差へのR25加工の結果

## ②ナット段差 R25 加工による締付け性能の安定化

上図で示したナット段差R25加工のボルトセットは、締付の安定化(トルク係数の一定化)と緩み防止性能に良好な結果を得た。トルク係数平均は0.148であり、緩み防止性能(緩めトルク/締付けトルクの比118%(目標値100%以上)。下図のボルト試験は、縦—締付軸力、横に緩みトルク(左)—締付トルク(右)(Nm)を示す

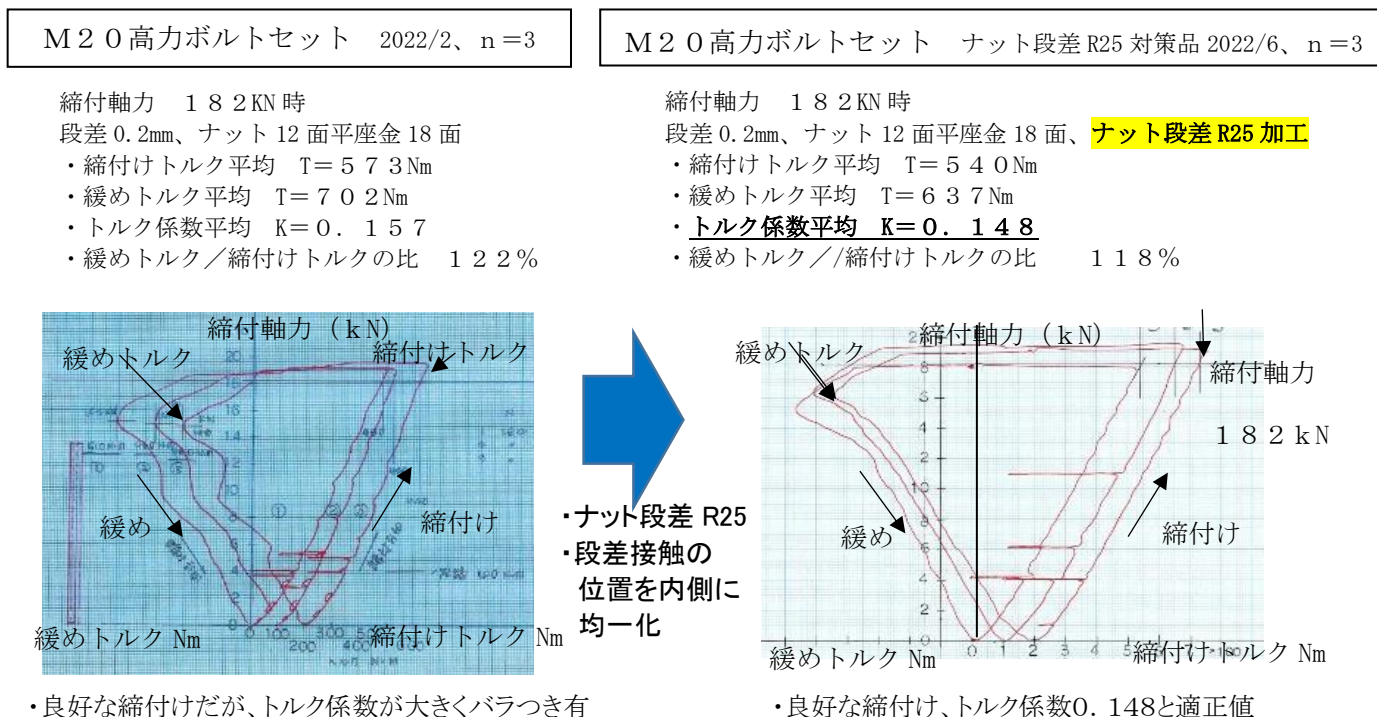


図21 ナット段差R25加工の高力M20ボルト線図

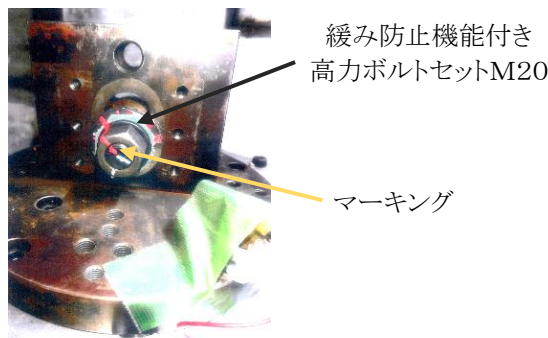
## 3) 高力六角M20ボルトセット金型初期段階での緩み防止性能の確保—NAS式振動試験の結果

- ・高力六角M20および高力六角M36の通常の高力ボルトと緩み防止機能付き高力ボルトで、NAS式振動試験を実施した。両者とも、振動試験後もマーキングは一致しており、緩みは0度であった。
- ・緩み防止機能付き高力六角M20ボルトは2022/5以降、各n=3×10回、振動試験をしたが、試験後もマーキングは一致しており、緩みは0度で全て合格であった。振動試験後の緩み角15度以下の技術的目標値は達成した。
- ・振動試験後に規定の締付軸力まで増締めする方法で締付残存軸力を評価した。技術的目標値の締付残存軸力85%を達成したが、振動試験後の増締めトルク\*は通常高力ボルトの97%に比し、緩み防止機能付き92%と下回った。

注\*：増締めトルクで残存締付軸力と想定している。



図22 月盛工業に導入したボルト振動試験機



緩み防止機能付き高力ボルトの振動試験

NAS式振動試験結果(高力六角M20ボルトセット、ナット12面・平座金18面)

NAS3350式振動試験

- ・米国航空規格(NAS3350)
- ・振動幅 ±5.7mm、速度 30Hz
- ・振動時間 17分(3万サイクル)

振動試験サンプルM20 締付軸力 182KN 時

- 段差 0.2mm、ナット 12 面平座金 18 面
- ・締付けトルク平均 T=500Nm
- ・トルク係数 K=0.13

表5 NAS式振動試験結果(M20、ナット12面・平座金18面)

高力ボルト種類	NAS 式振動試験 (マーク不変で合格)	振動試験後の増締めトルク Nm (残存軸力比%)
通常の高力ボルト	緩みなし	485(97%) (n=5)
緩み防止高力ボルト	緩みなし	460(92%) (n=30)

- ・締付トルクに比し残存軸力の技術的目標値85%以上は、日本国内にはM20以上の振動試験機が殆どなく、振動試験後の残存軸力のデータがないなかで目標値を設定した。振動試験で得られた知見により、振動試験後の残存軸力の目標値を95%以上に変更する。

4) 高力六角M20ボルトセットにて緩み防止性能を発揮する要因の調査

- ・緩み防止性能として、締付けでナットと平座金の傾斜段差同士が噛合い、緩めトルクより段差が塑性変形を起す力が主な緩み防止性能と想定していた。
- ・締付前と締付後のナット段差を測定した。締めトルクによる締付軸力で噛合っていない段差が塑性変形を起して、ナット段差の最も高いφ23mmの周上12カ所平均で段差高さが0.17mm減っている。一方段差が噛合っている部分では段差高さは0.03mmしか減っていない。
- ・緩み防止性能は、ナットと平座金の段差噛合いと、高度の低いナットが締付時に塑性変形し平座金の段差傾斜部に入り込むものの、2種類で構成されることが判明した。その比率は不明だが、ロットごと、または3個セットで試験しているが、緩み防止性能が少しばらつくことの要因になっていると考えられる。

① 締付前後の緩み防止性能を発揮する段差高さの比較(高力六角M20)

高力六角M20、ボルト12面、ナット12面・平座金18面、段差高さ0.25mm

同じ個所の締付前後の段差高さを測定した。塑性変形をして段差が潰れている。

表6 段差高さの塑性変形量(ナット12面・平座金18面)

段差高さ 単位:mm

φ23mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
段差高	0.32	0.31	0.31	0.33	0.34	0.33	0.33	0.34	0.34	0.33	0.33	0.34	0.33
締付後段差高	0.23	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.14	0.23	0.29	0.31	0.16
段差塑性変形	0.09	0.20	0.20	0.22	0.23	0.23	0.22	0.24	0.20	0.10	0.04	0.03	0.17

② ナットの塑性変形を抑える対策の実施(高力六角M20)

- ・ナットの塑性変形があることで、振動により締付軸力が減少していると想定できる。対策として、ナット硬さを硬くして塑性変形を抑えることで、振動後の残存軸力減少を試験した。
- ・ナット硬さを硬くすることは、締付の安定が得られなかった。現状ナット硬度HRC30が最も良い。
- ・結果: ナット硬度HRC30、締付トルク500Nm、緩みトルク480Nm(締付トルク比96%)  
ナット硬度HRC33、締付トルク540Nm、緩みトルク497Nm(締付トルク比92%)  
ナット硬度HRC36、締付トルク620Nm、緩みトルク504Nm(締付トルク比85%)
- ・結論: ナット硬度を上げて塑性変形を少なくすることは、締付の安定が得られず適切な対策でなかったことが判明した。現仕様のHRC30が最も良い。

③ 緩み防止機能付き高力六角M20ボルトセットの段差噛み合わせ状態

- ナット12面-段差高さ0.2mmと平座金18面-段差高さ0.2mmおよび12面-段差高さ0.2mmを締付け後に、断面切断した写真を示す。12面-18面は段差が噛合っていない部分が塑性変形して潰れている。12面-12面では良好な段差噛合いとなり、段差が塑性変形していない様子がわかる。

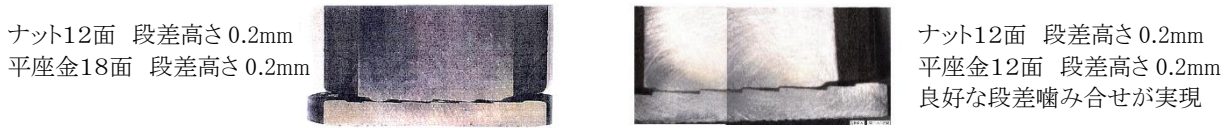


図23 段差噛み合わせ状態

④ 緩み防止機能付き高力六角M20ボルトセットの段差噛み合わせに関する解析検討—大阪公立大学

- 締付け時の段差に発生する応力のCAE解析を行った。青は応力0で、緑⇒黄⇒橙⇒赤と順次応力が増える。赤は弾性限度を超え塑性変形を起す応力。
- 段差が噛合っていない部分でナットと平座金が接触し、締付け軸力を受ける面積が小さくなって、応力が高くなり塑性変形(赤色)が発生している。
- 上記の段差高さ比較での、塑性変形の要因が締付け軸力による弾性限度を超える応力によることがCAE解析で確認された。

応力分布図 右 540Nm 導入時(M20、締付け軸力182kN)

段差付近の拡大応力分布図(M20) 540Nm 導入時

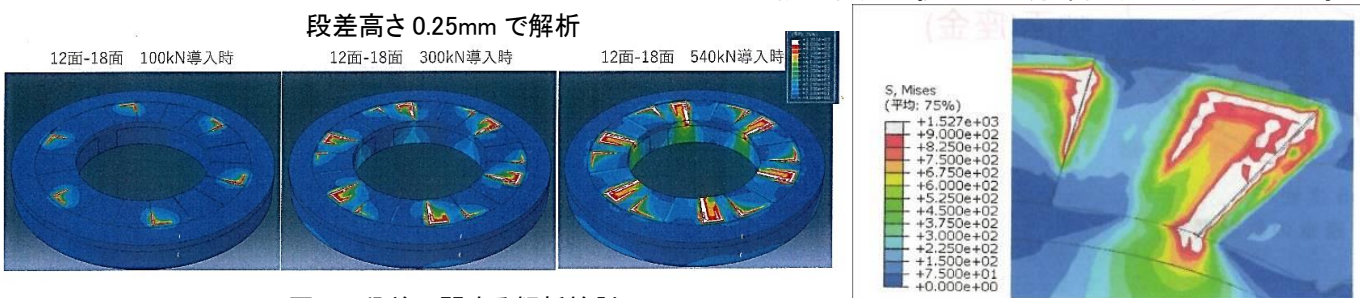
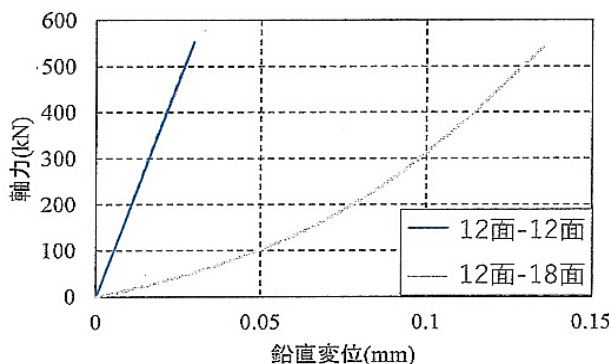


図24 段差に関する解析検討

- CAE解析により、12面-18面は段差同士の接触面積が小さいので、軸力負荷時から段差同士の塑性変形が始まっている。段差が同面数12面-12面は弾性的に線形で変形しており、塑性変形は殆どなく、内側の線状の一部に応力が高くなっているが、弾性限度内に留まり、塑性変形量は少ない。同面数の方が応力集中による塑性変形が少なくなり、緩み防止性能確保に有利と想定される。

締付け軸力—鉛直変位図 (段差高さ0.25mm)



ナット12面・平座金12面応力分布図 (段差高さ0.25mm、540Nm 導入時)

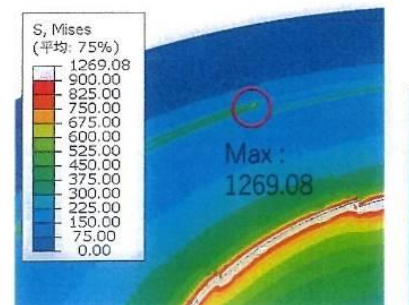


図25 段差噛み合わせのCAE解析

5) 緩み防止機能付き高力六角M20ボルトセットの技術的目標達成の課題

- 通常の高力ボルトセットに比べ、緩み防止機能付き高力ボルトセットは緩み防止性能が1.6倍あり、NAS式振動試験も全て合格し、目標を達成した。

- ・ただし、通常の高力ボルトはNAS式振動試験後の残存軸力97%であり、緩み防止機能付き高力ボルトセット（ナット12面・平座金18面）は92%であり、緩み防止性能が劣ることが判明した。
- ・仮説として12面/18面の段差が緩み防止に効果的と考えていたが、研究を進めた結果、緩み防止には塑性変形が重要なことが分かってきたため、今後は塑性変形に着目した緩み防止構造を研究していく。塑性変形に着眼した高力ボルトの研究開発は、日本初の試みである（山口隆司教授）。
- ・締付トルクに比し残存軸力の技術的目標値85%以上は、日本国内にはM20以上の振動試験機が殆どなく、振動試験後の残存軸力のデータがないなかで目標値を設定した。振動試験で得られた知見により、振動試験後の残存軸力の目標値を95%以上に変更する。

6) 緩み防止機能付き高力六角M20ボルトセットの段差同面数の締付け

ナット12面・平座金12面の同面は、振動試験後の残存軸力は95%であり基準を達成した。

□ナット12面・平座金12面、締付け前後のナット段差高さ(φ=23mm、段差高さ0.23mm)

ナット12面平座金12面、段差0.2mm、R25

- ・締付軸力: 182kN
- ・締付けトルク平均 T=370Nm
- ・緩めトルク平均 T=395Nm
- ・トルク係数平均 K=0.137
- ・緩めトルク/締付けトルクの比 107%

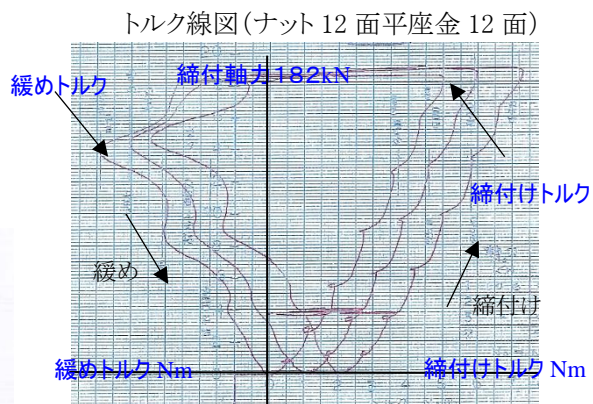
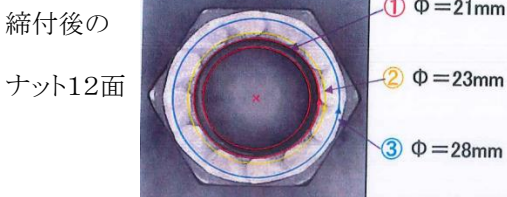


図26 締付け後のナットとトルク線図(ナット12面平座金12面)

- ・ナット12面・平座金12面の段差塑性変形量は、平均0.15mm
- ・平座金の段差高さも平均0.06mm塑性変形

表7 段差高さの塑性変形量(ナット12面・平座金12面)

φ23mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
段差高	0.30	0.28	0.31	0.31	0.33	0.33	0.33	0.34	0.32	0.33	0.30	0.29	0.32
締付後段差高	0.14	0.13	0.17	0.16	0.18	0.16	0.14	0.15	0.19	0.24	0.20	0.17	0.17
段差塑性変形	0.16	0.15	0.14	0.15	0.15	0.17	0.19	0.19	0.13	0.09	0.10	0.12	0.15

段差高さ 単位:mm

□ナット18面・平座金18面、締付け前後ナット段差高さ(φ=23mm、段差高さ0.22mm)

ナット18面平座金18面、段差0.25mm、R25

- 試験数2セット
- ・締付軸力: 182kN
- ・締付けトルク平均 T=645Nm
- ・緩めトルク平均 T=715Nm
- ・トルク係数平均 K=0.159
- ・緩めトルク/締付けトルクの比 110%

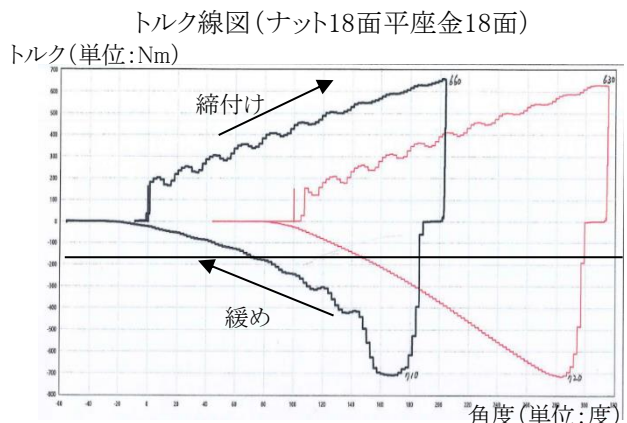
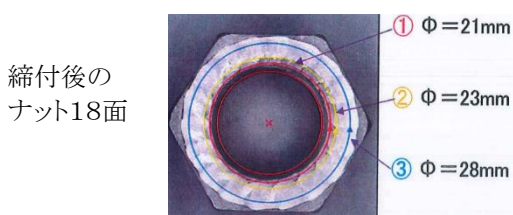


図27 締付け後のナットとトルク線図(ナット18面平座金18面)

- ・ナット18面・平座金18面の段差塑性変形量は、平均0.10mm
- ・平座金の段差高さも平均0.02mm塑性変形

表8 段差高さの塑性変形量(ナット18面・平座金18面)

段差高さ 単位:mm

φ23mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	平均
段差高	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.23	0.23	0.23	0.21	0.20	0.23	0.23	0.22	0.21	0.22
締付後段差高	0.12	0.06	0.07	0.06	0.03	0.02	0.07	0.05	0.04	0.05	0.03	0.07	0.09	0.16	0.14	0.10	0.12	0.12	0.12
段差塑性変形	0.09	0.15	0.14	0.15	0.18	0.19	0.14	0.17	0.18	0.18	0.19	0.16	0.12	0.04	0.09	0.13	0.10	0.09	0.10

- ・ナット12面・平座金18面の場合、締付前後のナット段差塑性変形量は、平均0.17mmであった。平座金の段差高さも平均0.06mm塑性変形している。
- ・振動試験後の残存締付軸力が歪ゲージ試験により、振動試験後の増締めトルク／締付トルクの比とほぼ同一であることが確認できた。

### 7) 緩み防止機能付き高力六角M20ボルトセットの段差同面数の試験結果

- ・ナット12面・平座金12面、および18面・18面の同面は、振動試験後の残存軸力は95%以上であり、いずれも技術的目標値を達成した。

表9 緩み防止機能付き高力六角M20ボルトセットの技術的目標の達成結果

高力ボルトの種類	締付安定性	緩み防止性能(2022.12.17までのデータ)			技術的目標値変更後の緩み防止性能	
	締付トルク Nm	緩みトルクNm (締付トルク比%) 100%以上	NAS式振動試験17分	振動試験後の増締めトルク Nm(締付トルク比%) 85%以上	振動試験後の増締めトルク Nm(締付トルク比%) 95%以上	段差高さの塑性変形量
通常ボルト	○ 500	— 310(62%)	○ 緩みなし	◎ 97%	◎ 97%	◎ (0%)
ナット12面・平座金18面	○ 540	○ 603(112%)	○ 緩みなし	○ 92%	△ 92%	△ 0.17mm(77%)
ナット12面・平座金12面	○ 500	○ 500(100%)	○ 緩みなし	○ 95%	○ 95%	○ 0.15mm(47%)
ナット18面・平座金18面	○ 578	◎ 614(106%)	○ 緩みなし	◎ 97%	◎ 97%	○ 0.10mm(44%)

- ・締め付け時の塑性変形量に反比例して、12面・18面→12面・12面→18面・18面(通常ボルト)の順に増締めトルク／締付トルク比が大きくなることが判明した。そして12面・12面および18面・18面のいずれも振動試験後の残存締付軸力の比は、技術的目標値95%以上を達成している。
- ・12面・12面および18面・18面の緩み防止性能は、いずれも技術的目標値100%以上を達成している。
- ・上記を踏まえて、段差面数をボルト18面、ナット18面・平座金18面の同面数に微修正を行う。

### 【2-2】各 부품の金型想定寿命ショット数での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能確保

高力M36ボルトセットの現場実用化を検証できる建築現場が殆どないという理由から、代わりに建築現場での実用化検証が可能で、最も使用されている高力M22において、圧造金型の想定寿命ショット数の緩み防止性能の研究開発を重点的に推進した。その結果、圧造金型寿命ショット数段階での緩み防止性能(緩めトルク／締付トルクの比100%以上)、およびNAS式振動試験と塩水噴霧試験とリラクセーション試験の締付け残存軸力などの技術的目標値を全て達成した。なお使用した高力M22ボルトセットは、圧造金型想定寿命ショット数のボルト2.3万本・ナット5万個・平座金3万個のものである。

事業化の観点から、建設用途で最も多く使用されている高力M22ボルトセットのサンプルを本研究開発アドバイザーである大末建設(株)等に無償で提供し、建設現場での実用化の性能を評価して頂いた。約1か月後に増締め試験を行い、締付軸力残存率は平均97.5%であり、高力ボルトとして良好な結果だった。

#### 1) 緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセットの圧造金型製作ショット数

- ・ボルト M22計2.3万本まで製作(金型寿命回数目標値2万本)。性能に関して問題はない。
- ・ナット M22計5万個まで製作(金型寿命回数目標値5万本)。性能に関して問題はない。
- ・平座金 M22計3万個まで製作(金型寿命回数目標値3万本)。性能に関して問題はない。

2) 普通タイプ高力六角M22ボルトセットのトルク試験・NAS式振動試験

- ・普通の高力六角M22ボルトセット、ボルトはM22×90mm
- ・締付軸力は226kN、緩み開始トルクは、締付トルクの67.3% (5セット平均)であった。
- ・NAS式振動試験(17分)後に、増締めトルクを測定。残存軸力の推定は、3セット平均96%であった。

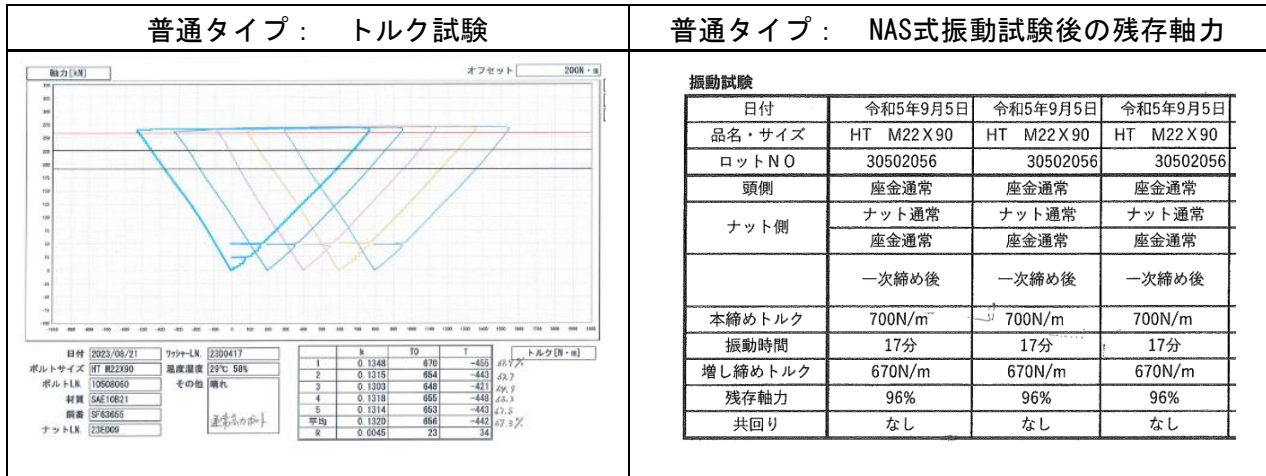
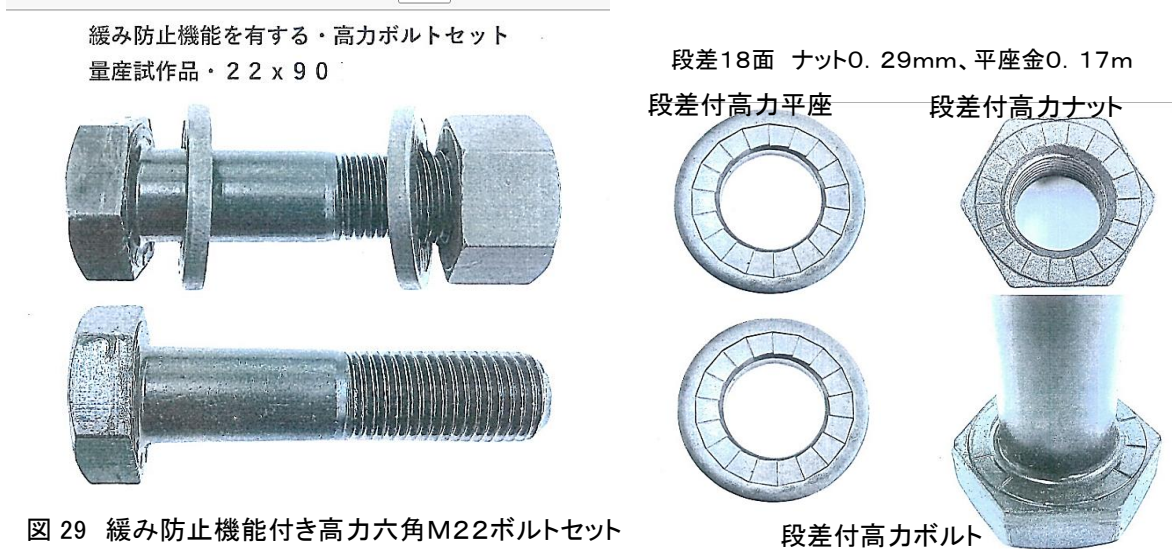


図28 普通の高力六角M22ボルトセットのトルク試験結果、およびNAS式振動試験結果

3) 緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセットの圧造金型想定寿命段階の緩み防止性能の確保  
以下、緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセットをロックM22ボルトセットと略称。

①ロックM22ボルトセットの緩み防止性能—ボルト試験

- ・M22、ボルト長さ90mm、ナット段差18面—高さ0.29mm、平座金18面—高さ0.17mm
- ・製作ショット数 ボルト23,000本、ナット50,000個、平座金30,000個のもので試験。試験数=5ヶ

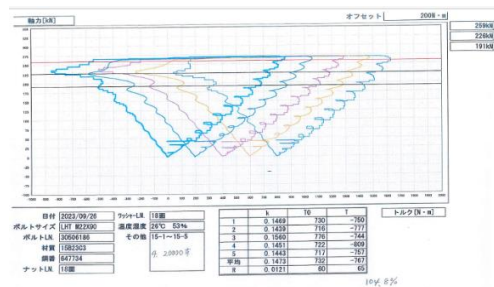


- ・製作ショット数 ボルト20,000本、ナット50,000個、平座金30,000個の各段階における緩み防止性能を試験したデータを下表に示す。締付軸力はいずれも規定通り226kNである。
- ・緩み防止トルク/締付トルクの比は、普通ボルト67%に対し、想定寿命ショット数および金型加工回数のいずれでも100%以上と技術的目標値を達成できた。

金型ショット数での緩み防止性能（各5個平均）

金型加工回数	締付けトルク	緩み防止トルク	緩み防止トルク/締付けトルクの比
0	718Nm	731Nm	102%
10,000	739Nm	752Nm	102%
15,000	752Nm	750Nm	100%
20,000	732Nm	767Nm	106%
通常ボルト	656Nm	442Nm	67%

金型想定寿命ショット数でのボルト試験



金型初期	1	2	3	4	5	平均
締付けトルクNm	702	667	769	722	729	718
緩み防止トルクNm	746	748	761	695	707	731
締付けトルク比%	106	112	99	96	97	102
締付けトルク係数	0.141	0.134	0.155	0.145	0.147	0.144

金型10000本	1	2	3	4	5	平均
締付けトルクNm	710	731	751	764	741	739
緩み防止トルクNm	788	718	728	726	798	762
締付けトルク比%	111	98	97	95	108	102
締付けトルク係数	0.141	0.143	0.149	0.153	0.153	0.148

金型15000本	1	2	3	4	5	平均
締付けトルクNm	697	762	734	792	774	752
緩み防止トルクNm	736	754	705	768	789	750
締付けトルク比%	106	99	96	97	102	100
締付けトルク係数	0.141	0.143	0.149	0.153	0.153	0.148

金型20000本	1	2	3	4	5	平均
締付けトルクNm	730	716	776	722	717	732
緩み防止トルクNm	750	777	744	809	757	767
締付けトルク比%	102	109	96	112	106	106
締付けトルク係数	0.147	0.144	0.156	0.145	0.144	0.147

図30 金型想定寿命までの緩み防止トルク比

② ロックM22ボルトセットの緩み防止性能の安定性を評価

- ・M22、ボルト長さ90mm、ナット段差18面－高さ0.29mm、平座金18面－高さ0.17mm。
- ・圧造金型想定寿命段階のM22ボルトセットの30セット任意に選択し、トルク試験を実施した。
- ・締付け軸力226kN。緩み防止性能（緩み防止トルク/締付けトルクの比）は、30個平均で104.7%の性能を確認できた（技術的目標値100%以上）。普通ボルトは67%であり、平均1.56倍の緩み防止性能となった。

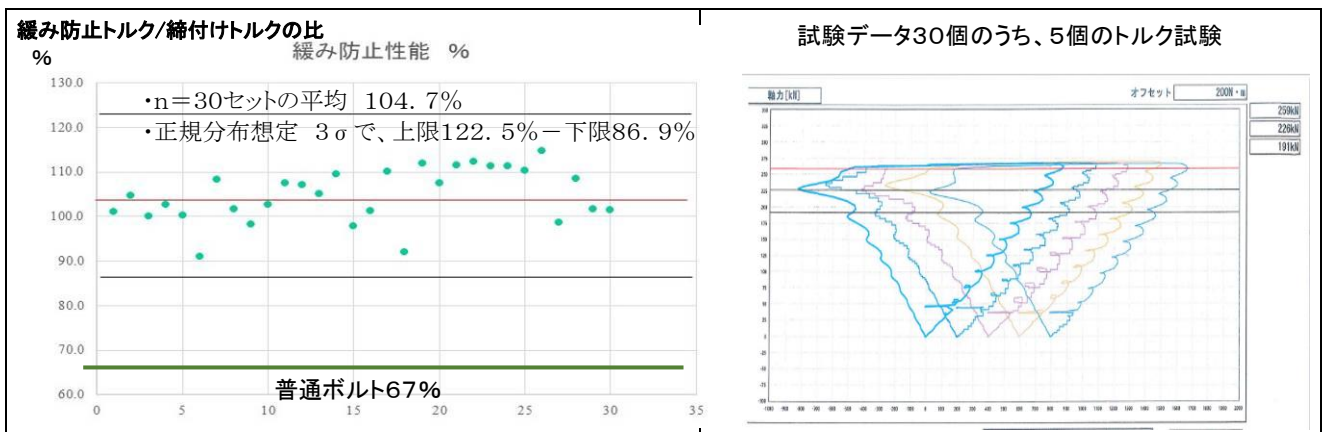


図31 緩み防止性能の安定性を評価

③ ロックM22ボルトセットの締付け停止位置における緩み防止性能バラつき評価（角度－3位置）

- ・M22、ボルト長さ90mm、ナット段差18面－高さ0.29mm、平座金18面－高さ0.17mm。締付け軸力226kN
- ・トルクレンチの締付け法では、ナットと平座金の段差がどのように噛合うかは決定できない。そこで、段差の噛合いが異なる位置を意図的に設定して、緩み防止性能（増締めトルク/締付けトルク）の違いを評価した。
- ・トルクレンチによる締付け停止の段差近辺の位置が変化しても、緩み防止性能にはバラつきが少ないことが判明した。試験数は各n=3、トルク値は3個の平均。

金型23000本	段差角度 0度	段差角度 12度	段差角度 19度	平均
締付けトルクNm	740	650	700	697
増締めトルクNm	762	656	693	704
増締めトルク/締付けトルクの比%	103	101	99	101

段差角度 0度	段差角度 12度	段差角度 19度
		

図32 締付停止位置における緩み防止性能バラつき評価

④ ロックM22ボルトセットをNAS式振動試験で評価

- ・M22、ボルト長さ90mm、ナット段差18面 0.29mm、平座金18面 0.17mm。ボルト20,000本、ナット50,000個、平座金30,000個の製作ショット数でのボルトセットを、締付け軸力226kNで締付けた。
- ・高力六角M22ボルトセットにおいて、ナットと平座金にマーキングをした後、圧造金型の想定寿命ショット数に到る各段階のNAS式振動試験を行い、マーキングのズレで緩みがあったかを判定する。振動試験後に増締めトルクを測定し、残存締付け軸力の推定(増締めトルク/締付けトルクの比)をする。
- ・NAS式振動試験の結果：全数(20セット)で緩み回転角0度(マーキングのズレはなかった)。
- ・試験後に通常の高力ボルトと同等の、残存締付け軸力95%以上を確認できた(技術的目標値は85%以上)。

圧造金型想定寿命ショット数のNAS式振動試験

- ・NAS3350試験(加速振動試験)  
30,000サイクル(約17分)  
振動速度30Hz(1800cpm)  
ストローク量±5.7mm、  
衝撃幅19mm



マーキング

NAS式振動試験後の残存軸力

金型加工回数	締付けトルク	増締めトルク	増締めトルク/締付けトルクの比
5,000	700Nm	668Nm	95%
10,000	700Nm	680Nm	97%
15,000	700Nm	680Nm	97%
20,000	700Nm	680Nm	97%
通常ボルト	700Nm	670Nm	96%

試験数  
各段階  
n=5

M22 X90 3-0506186 15B23C3 647734 全部で15缶(1缶約1336本) 総数20050本							NW 18度						
振動試験							振動試験						
4缶目 約5344本							11缶目 約14696本						
日付	令和5年8月18日		令和5年8月21日		令和5年8月21日		令和5年8月30日		令和5年8月30日		令和5年8月30日		
品名・サイズ	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	
ロットNO	30506186 4-1	30506186 4-2	30506186 4-3	30506186 4-4	30506186 4-5	30506186 11-1	30506186 11-2	30506186 11-3	30506186 11-4	30506186 11-5	30506186 11-6	30506186 11-7	
頭側	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	
ナット側	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	
	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	
	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	
本締めトルク	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	
振動時間	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	
増し締めトルク	670N/m	670N/m	660N/m	680N/m	660N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	
残存率	96%	96%	94%	97%	94%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	
共回り	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	

全部で15缶(1缶約1336本) 総数20050本							NW 18度						
振動試験							振動試験						
8缶目 約10888本							15缶目 約20040本						
日付	令和5年8月18日		令和5年8月21日		令和5年8月21日		令和5年8月21日		令和5年8月21日		令和5年8月21日		
品名・サイズ	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	LHT M22 X90	
ロットNO	30506186 8-1	30506186 8-2	30506186 8-3	30506186 8-4	30506186 8-5	30506186 15-1	30506186 15-2	30506186 15-3	30506186 15-4	30506186 15-5	30506186 15-6	30506186 15-7	
頭側	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	
ナット側	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	ナット18面	
	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	座金18面	
	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	一次締め後	
本締めトルク	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	700N/m	
振動時間	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	17分	
増し締めトルク	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	680N/m	
残存率	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	
共回り	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	

図33 圧造金型ショット数の各段階におけるNAS式振動試験後の残存締付け軸力

⑤ ロックM22ボルトセットのNAS式振動試験中の締付け軸力をリアルタイムに測定

- ・高力六角M22ボルトセットにおいて、NAS式振動試験後に増締めトルクを測定し、残存締付け軸力の推定(増締めトルク/締付けトルクの比)をしているが、その推定が本当に締付け軸力を示すものかを検証する。
- ・緩み防止機能付き高力ボルトセットに歪ゲージを貼付け、緩み防止性能としての締付け軸力の変化を、NAS式振動試験中にリアルタイムに測定する。
- ・この取組みは、高力ボルト業界で初である。



図34 歪ゲージ

締付け軸力のリアルタイム測定の実例 軸力の単位: kN

- ・軸力をNAS式振動試験前、試験中、試験後に測定した。その締付け軸力のリアルタイム測定を示す。
- ・振動開始後、歪は少し低下するが、その後は時間経過と共に緩やかに低下し、平均98%前後となる。

表10 NAS振動試験中の歪ゲージによる締付け軸力のリアルタイム測定

No	導入トルク	歪測定値					歪低下率	増締めトルク	増締めトルク比
		締付け導入	0分	5分	10分	17分			
16	750Nm	206.0	205.8	202.9	202.8	202.3	98.2%	720Nm	96.0%
17	750Nm	199.4	195.2	191.1	189.2	187.8	96.2%	730Nm	97.3%
18	740Nm	210.7	206.5	205.8	205.7	205.1	99.3%	720Nm	97.2%

歪ゲージによるNAS式振動試験の締付け残存軸力の測定結果

- ・リード線破断対策をした歪ゲージを入手し(25個)、歪ゲージをボルトに貼り付け、NAS式振動試験を実施
- ・試験数25のうち10本が断線し、15本が測定できた。15本の締付け軸力残存率は平均97.7%であった。
- ・振動試験後の増締めトルク/締付けトルクの比は、平均96.3%であった。
- ・歪ゲージによる締付け軸力残存率と、増締めトルク/締付けトルクの比は、ほぼ一致した。
- ・従って、測定の容易な増締めトルクの測定により、振動試験後の残存締付け軸力の推定ができると判断できた。

表11 NAS振動試験後の締付け軸力残存率

試験No	4	6	9	11	12	13	15	16
締付け歪	41.5	38.7	39.9	39.8	43.9	40.4	36.1	38.9
導入軸力(計算値) kN	221	220	202	212	219	205	199	206
導入トルク Nm	750	750	730	730	740	740	750	750
17分後の軸力 kN	209	211	187	208	212	197	196	209
軸力残存率	95.0%	97.3%	93.2%	98.0%	97.1%	98.9%	98.7%	95.0%
増締めトルク Nm	730	730	710	710	710	720	710	720
増締め/締付けのトルク比	97.3%	97.3%	97.2%	95.9%	95.9%	97.2%	94.6%	96.0%
試験No	17	18	19	20	21	22	24	平均
締付け歪	37.5	39.0	38.9	38.5	40.6	35.7	41.8	
導入軸力(計算値) kN	199	211	200	219	227	186	209	
導入トルク Nm	750	740	720	740	750	720	750	
17分後の軸力 kN	188	205	197	215	225	182	204	
軸力残存率	96.2%	99.3%	99.9%	99.2%	99.9%	99.3%	98.9%	97.7%
増締めトルク Nm	730	720	700	720	710	700	710	
増締め/締付けのトルク比	97.3%	97.2%	97.3%	97.2%	94.6%	97.2%	94.6%	96.3%

⑥ ロックM22ボルトセットの摩擦接合継手のすべり耐力試験—大阪公立大学

- ・高力ボルトの規格の「すべり係数0.45以上」を達成しており、高力ボルトの摩擦接合継手部の性能として最も重要であるすべり耐力が、普通高力ボルトのそれより劣らないことを実証できた。
- ・薬品鍍を対象とした場合においても、普通ボルトとロックボルトのすべり係数に大きな差は見られない。

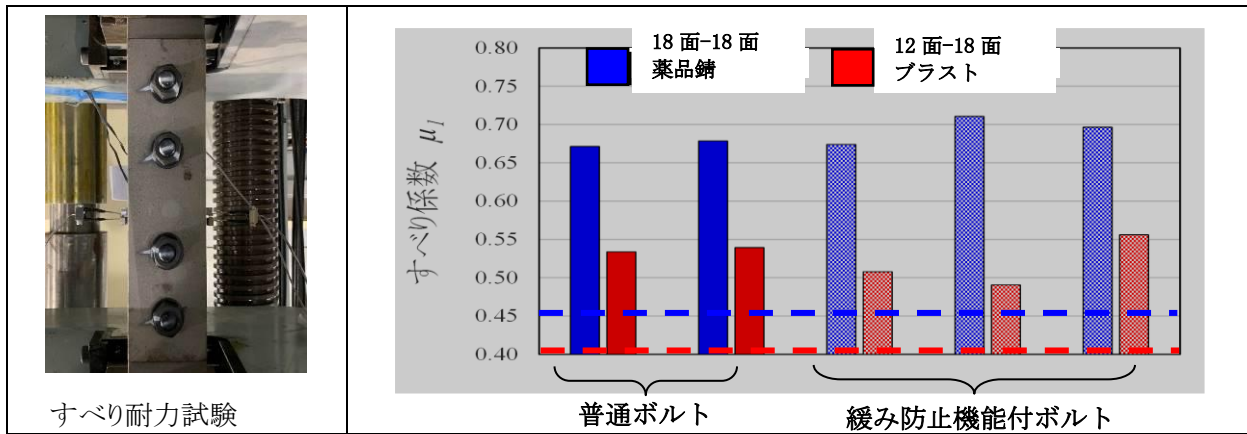


図35 緩み防止機能付き高力M22ボルトセットの摩擦接合継手のすべり耐力試験

- ⑦ ロックM22ボルトセットの長期的な軸力低下特性（リラクセーション試験）—大阪公立大学
- 軸部に作用するボルト軸力の変動を観測し、緩み防止機能の有無が、軸力低下が落ち着くまでの期間やその後の軸力低下特性に及ぼす影響を評価する
  - M22ボルトセットで、通常タイプと緩み防止機能付きタイプ(段差はナット18面・平座金18面)を比較する。比較対象はボルト軸力、計測期間は軸力を32日間(1,000時間)。但し段差12-18面は、圧造金型初期段階のサンプルである。
  - 普通ボルトと緩み防止機能付きボルト(ロックボルトと略称、18面-18面)の軸力残存率は同等であった。

サイズ	種類	32日後の軸力残存率(%)	平均(%)
M22	普通	94.4, 95.7	95.1
M22	ロック	94.3, 94.5, 95.6, 93.8	94.6

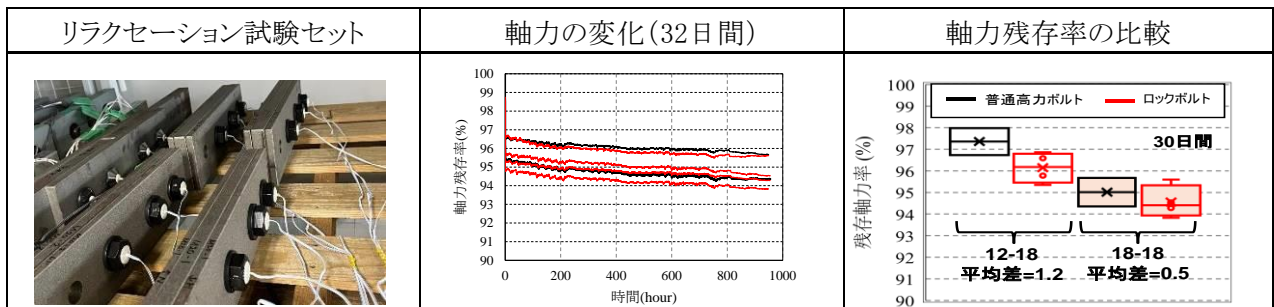


図36 緩み防止機能付き高力M22ボルトセットのリラクセーション試験

- ⑧ ロックM22ボルトセットの塩水噴霧試験
- 技術的目標値 塩水噴霧試験:4000時間連続後に残存軸力85%以上  
通常気象の条件4000時間連続、海上使用の条件4000時間連続(国交大臣認定申請基準)
  - 圧造金型寿命想定ショット数での、緩み防止機能付き高力六角ボルトセットM22×90mmに溶融亜鉛めっきを施し、試験品とする。試験品は、ナット18面・平座金18面で計2個、締付軸力226kN。
  - 塩水噴霧試験(JIS Z2371)に従い、試験片の暴露面を上向きにして鉛直線に対し20±5度の角度を付けて試験。
  - 4000時間連続試験を2023年9月に開始した(高島工業(株)に試験委託)。
  - 2000時間(83日間)2023年12月に確認、4000時間(167日間)2024年2月27日に完了した。

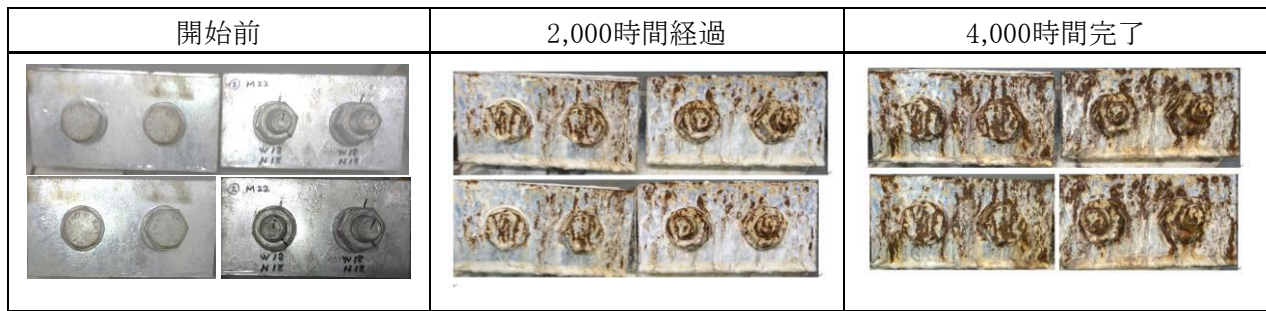


図37 圧造金型想定寿命ショット数の緩み防止機能付き高力ボルトセットの塩水噴霧試験  
噴水噴霧試験4,000時間後の結果 (技術的目標値 試験後の残存軸力85%以上)

・ボルトセットの接合状態は良好で問題なかった。試験後の残存軸力は98%以上と技術的目標値を達成した。  
M22試験2セット平均: 締付トルク505Nm、増締めトルク495Nm、残存軸力98%

#### 4) ロックボルトセットM16～M36の緩み防止性能の評価

- ・上記に示したように、緩み防止機能付き高力六角ボルトセットM20およびM22において、高力ナット段差18面、高力平座金18面にて、技術的目標値の緩め防止トルク/締付トルク比は100%以上、およびNAS式振動試験後の締付軸力残存率95%以上と、緩み防止性能の技術的目標値を達成した。
- ・M20、M22に加え、M16、M24でも緩み防止性能の技術的目標値を達成した。  
試験結果を下表に示す。数値は試験数5セットの平均である。
- ・M16、M24の試験結果を下表に示す。数値は試験数5セットの平均である。

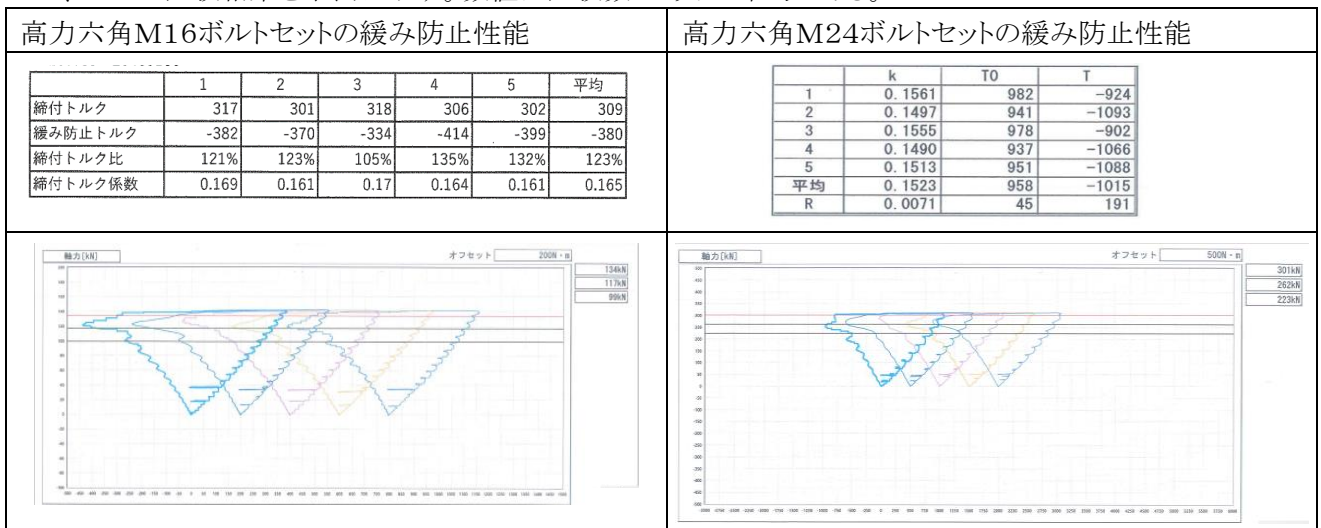


図38 緩み防止機能付き高力ボルトの緩み防止トルク比

表 12 緩み防止機能付き高力ボルトの緩み防止トルクとNAS式振動試験後の締付残存軸力

	M16	M20	M22	M24	M36
段差高さ規定	0.25+0.10 -0.05 mm				0.35±0.10 mm
平均トルク係数值	0.130~0.150				0.125~0.150
締付け軸力	JIS規定				

試験サンプル段差	ボルト長さ	65mm	65mm	90mm	100mm	150mm	
	ボルト	0.18	0.26	0.33	0.26	0.33	段差高さ 単位: mm
	ナット	0.20	0.20	0.27	0.31	0.35	
	平座金	0.17	0.17	0.17	0.17	0.26	

トルク試験	標準締付軸力	117kN	182kN	226kN	262kN	615kN
	締付けトルク	309Nm	540Nm	791Nm	958Nm	3,104Nm
	緩めトルク	380Nm	603Nm	822Nm	1,015Nm	3,839Nm
	緩め防止トルク比	123%	112%	104%	106%	124%
	普通高力ボルト	65%	64%	70%	69%	---

振動試験	NAS振動試験	緩まない	緩まない	緩まない	緩まない	緩まない
	締付けトルク	300Nm	500Nm	700Nm	860Nm	3,050Nm
	増締めトルク	291Nm	490Nm	680Nm	834Nm	2,989Nm
	増緩めトルク比	97%	98%	97%	97%	98%
	普通高力ボルト	97%	97%	97%	97%	---

5) ロックボルトセットM20～M36の摩擦接合継手のすべり耐力試験—接合部の評価

- ・高力ボルトセットの摩擦接合継手部の性能として、最も重要であるすべり耐力(外力(引張荷重)と軸力低下の関係)が、通常高力ボルトを用いた摩擦接合継手のそれより劣らないことを実証する。
- ・摩擦接合継手部の軸力をボルト部に貼り付けた歪ゲージにて測定する。
- ・M20、M22、M36の、通常の高力ボルトと緩み防止機能付き高力ボルトを各3本ずつ、外力(引張荷重)を加えて試験する。
- ・取得データは、①すべり荷重、②ボルト軸力、③母板-連結板の相対変位、であり、**通常の高力ボルトと同等であることを確認できた。**
- ・普通高力ボルトと緩み防止機能付き高力ボルトのすべり係数に大きな差は見られない。M36においても、道路橋示方書の規定である0.40を上回った。



図 39 すべり耐力試験

歪ゲージ

・試験内容

○接合面処理

✓ショットブラスト

\*試験片

ナット 12 面、平座金 18 面



図 34(再掲)

表 13 摩擦接合継手のすべり耐力試験

ケース名	ボルト	締付け軸力 $N_0$ (kN)		試験前軸力 $N_1$ (kN)		すべり荷重 $P_{0.2}$ (kN)	すべり荷重 $P_{slip}$ (kN)	すべり係数 $\mu_{slip1}$	
		内側	外側	内側	外側				平均
M20	1 普通	182.8	182.9	177.2	175.7	284.4	284.9	0.40	0.46
		185.6	184.0	177.6	176.4	367.1	369.6	0.52	
	2 ロック	182.9	186.8	175.4	177.3	342.6	345.2	0.49	
		182.6	182.4	173.3	173.7	334.4	334.6	0.48	
		183.1	182.8	175.6	165.1	295.8	302.9	0.44	
M22	1 普通	227.8	226.5	224.8	222.7	477.2	477.8	0.53	0.54
		229.9	228.6	225.3	227.1	487.3	488.0	0.54	
	2 ロック	230.6	225.9	223.4	218.6	447.4	448.8	0.51	
		225.4	230.3	220.4	222.7	433.9	434.7	0.49	
		226.5	221.9	220.9	218.9	485.2	489.0	0.56	
M36	1 ロック	608.3	606.4	596.0	582.9	1107.28	1111.8	0.47	-
		609.3	604.0	518.1	583.7	965.28	969.4	0.44	
		598.1	625.3	581.4	606.7	1137.92	1165.2	0.49	
		616.5	610.7	611.6	588.4	1152.96	1161.9	0.48	
		624.0	603.2	556.5	581.7	1024.76	1040.2	0.46	

$\mu_{slip1}$ : 試験前軸力  $N_1$  より算出

6) ロックボルトセットM20～M36のリラクゼーション試験—大阪公立大学

暴露試験 (長期的な軸力低下特性の把握): 計測期間は軸力を225日間(5,400時間)

- ・軸部に作用するボルト軸力の変動を観測し、緩み防止機能の有無が、軸力低下が落ち着くまでの期間やその後の軸力低下特性に及ぼす影響を評価する
- ・高力六角M36、M20、M22の圧造金型初期段階のボルトセットで、通常タイプと緩み防止機能付きタイプ(ロックボルトと略称、段差はナット12面・平座金18面)を比較する。
- ・普通ボルトと緩み防止機能付きボルトの軸力残存率はほぼ同等であった。

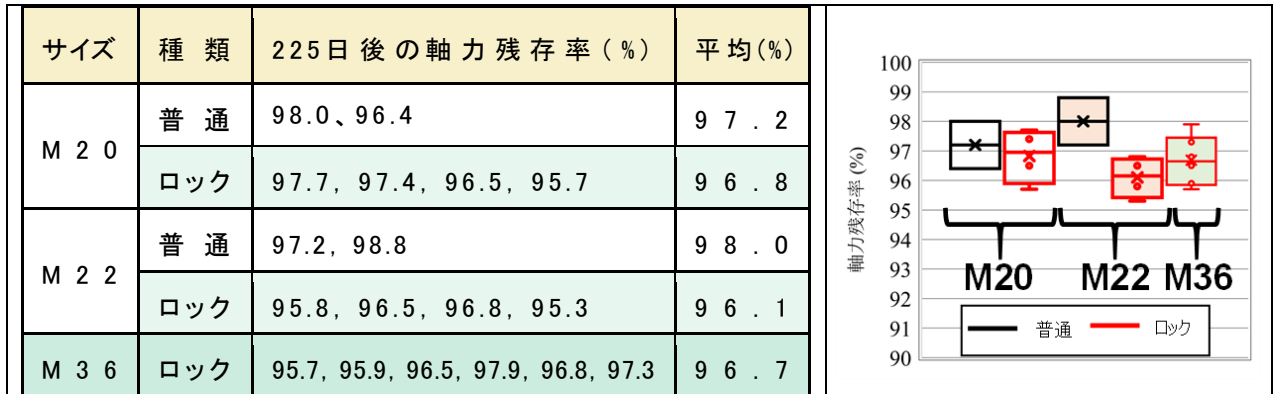
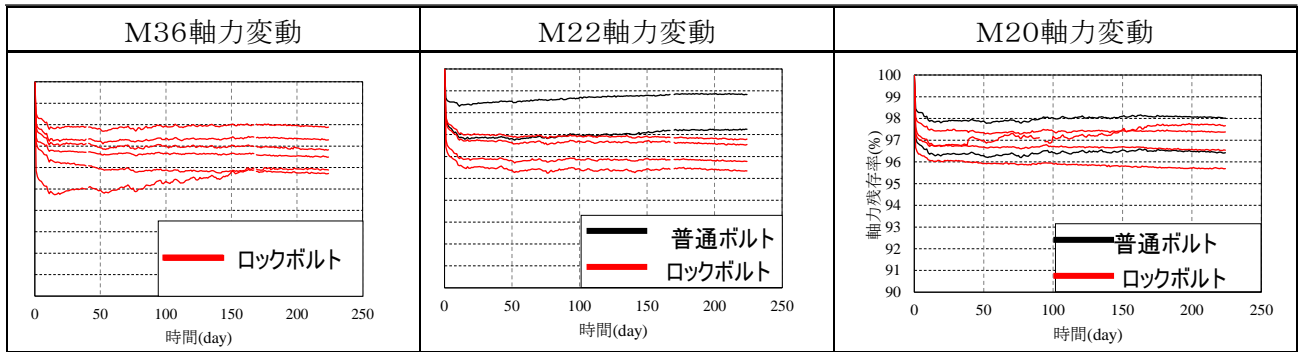


図40 緩み防止機能付き高力Mボルトセットのリラクゼーション試験結果

【3】高力六角ボルトセットの傾斜段差面数や段差高さ、傾斜面角Rの微調整

【3-1】高力六角ボルトセット（ロックボルト）の傾斜段差面数や段差高さ、傾斜面角Rの微調整

- ・高力ボルトに求められる性能を普通のボルトと比べて同等以上にすること、緩み防止性能に関して最高レベルを達成すること、そして緩み防止性能のバラつきを低減し安定した品質を保証するという理由から、締付け軸力を負荷した時の塑性変形の影響を最低限にするため、ナットと平座金の段差の面数と段差高さの最適化を重点的に実施した。
- ・その結果、M16～M24の緩み防止性能の発揮には段差高さの寸法公差、従来の「±0.1mm」の場合、公差下限では緩み防止性能が小さめになることがわかり、公差を「+0.1mm、-0.05mm」に微調整を実施した。得られた知見にて上記の微調整を実施し、再製作した圧造金型で製造した試験サンプルにて、技術的目標値を全て達成した。

1) ロックボルトセットの傾斜段差面数

- ・ナット12面、平座金18面から、ナットと平座金の同面数18面に微調整を実施した。

2) ロックボルトセットの傾斜段差高さ

- ・当初の切削加工試作サンプルでの評価にて、ロックM36ボルトセットの段差は0.35～0.50mm±0.1mmとしていたが、締付け試験で段差高さ0.5mmだと適切に締付けられず、0.35mmが適切と判明した。
- ・ロックM22ボルトセットの段差仕様は、0.25mm±0.1mmで設定した。高力平座金はS45Cと硬い材質であり圧造金型損傷のリスクを低減するため、仕様の公差下限に近い段差高さ0.17mmで製作された。
- ・ロックM22ボルトセットの緩み防止性能(緩めトルク/締付けトルク)は104%と、先に検証したM36の124%、M20の112%に比べ、低い性能となった。
- ・緩み防止トルク/締付けトルクの比を安定して100%以上を達成するため、ロックボルトM16～M24の段差0.25mm、M36段差0.35mmに則して、公差を(+0.10mm -0.05mm)に変更する。
- ・期せずして、公差ギリギリのもので緩み防止性能が試験でき、緩めトルク/締付けトルク比が104%と技術的目標値を上回る結果が得られたのは良かった。

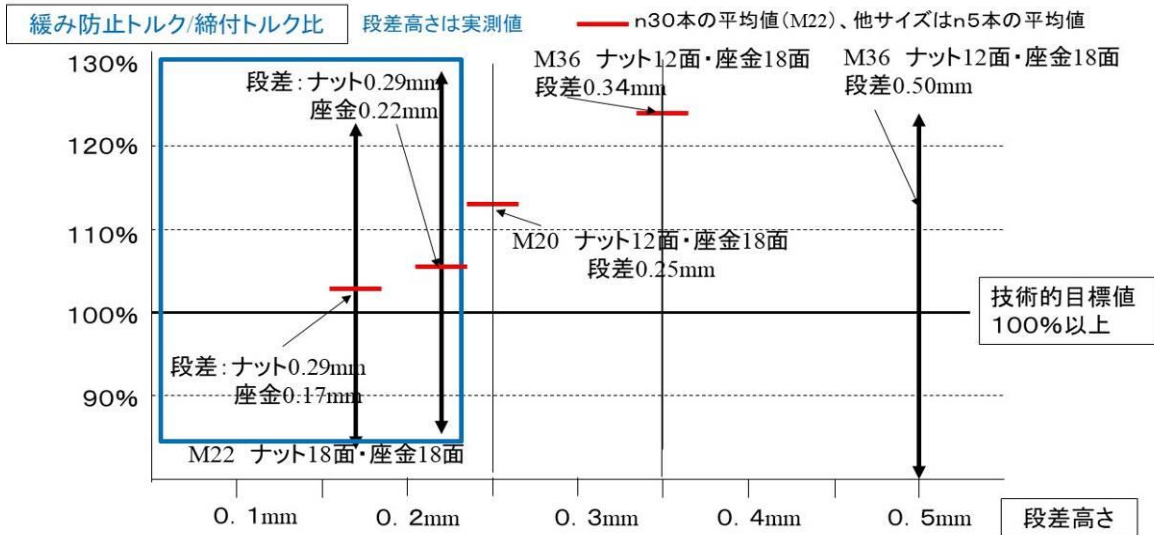


図41 段差高さとの緩み防止性能

### 3) ロックM22ボルトセットの傾斜段差高さの微調整の確認

- 平座金18面の段差高さ0.17mmと公差下限に近かったため、金型を再製作して段差高さ0.22mmを製作した。
- M22、ボルト長さ90mm、ナット段差18面－高さ0.29mm、平座金18面－高さ0.22mmの高力ボルトセット締付け軸力226kNで、緩み防止性能を試験すると、106%と少し改善された。

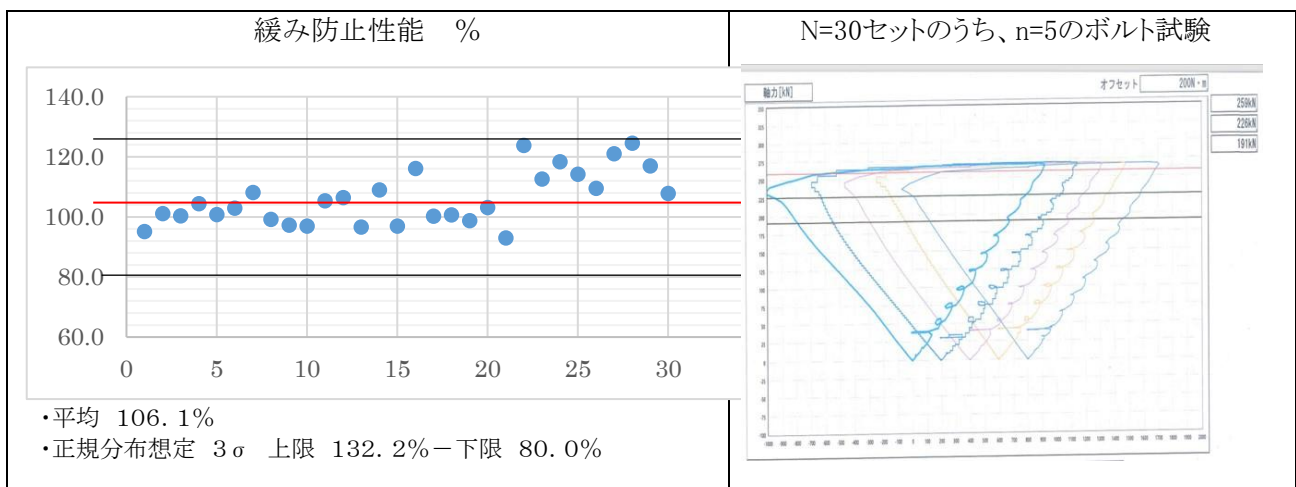


図42 平座金段差高さの微修正(高さ0.22mm)による緩み防止性能の安定化

### 4) 高力六角ボルトセットの傾斜段差高さが緩め防止性能に与える影響の数値解析—大阪公立大学

- 段差高さに対する公差を考慮した場合の緩めトルクの変化を、数値解析により検討する。
- 高力M22ボルトセットで、段差高さが公差中心のナット0.25mm平座金0.25mmと、公差下限のナット0.25mm平座金0.15mmにおいて、段差同士が噛合った場合と段差が真ん中に乗る状態の場合と、応力とそれによる塑性変形量を数値解析する。
- 解析結果—塑性変形の量: 公差下限ギリギリの場合は、段差が噛合った状態でも、広く塑性化する。
- 解析結果—軸力-変位関係: 段差同士の位置に関わらず塑性化するため段差の位置による影響は小さい。
- 解析結果により、段差高さに差があると塑性化範囲が広がるが、締付け軸力導入過程に及ぼす影響は小さい。従って、適切な段差があれば、段差の噛合せの位置に関係せず、緩み防止性能が発揮されるとわかる。

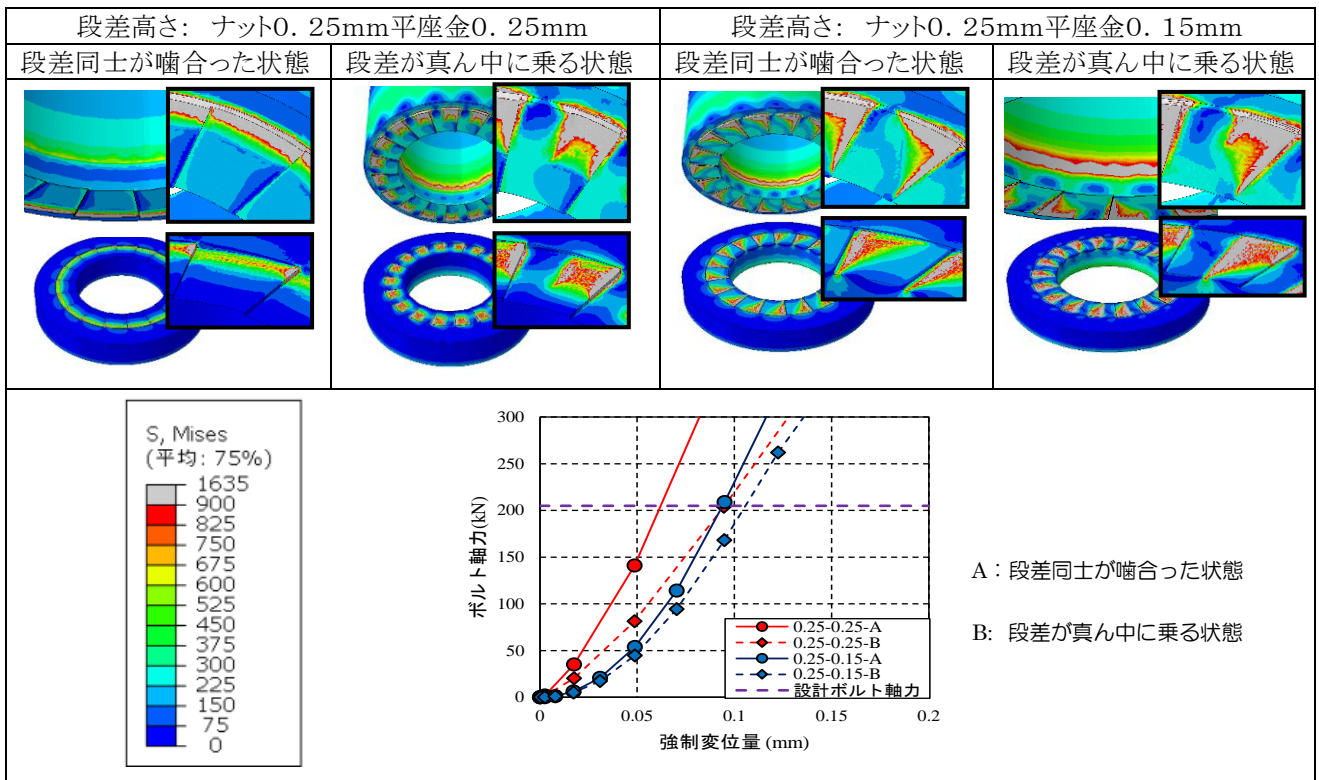


図43 傾斜段差高さが緩め防止性能に与える影響の数値解析

#### 【4】締付け方法

- ・締付け施工は、高力ボルト協会の講習を受け認定された技術者が、マニュアル「高力ボルトのQ&A」に則して、認定された電動トルクレンチを使用して行うと定められている。
- ・高力ボルトの締付け作業は、部材の密着に注意した締付け手順で行い[施工編Q34図4参照]、標準ボルト張力（軸力）が得られるように、1次締め、マーキングおよび本締めの3段階で行う。締付けは、ナット回転法またはトルクコントロール法により行う。
- ・高力ボルトの締付けに用いる機器のうち、トルクレンチは±3%の誤差内の精度が得られるように充分整備されたものを用いる。



図44 高力ボルト電動トルクレンチ

#### 【5】建設現場での実用化検証

- ・事業化の観点から、建設用途で最も多く使用されているサイズで、緩み防止機能付高力六角ボルトセットのサンプルを本研究開発アドバイザーである大末建設(株)等に無償で提供し、建設現場での実用化の性能を評価して頂いた。

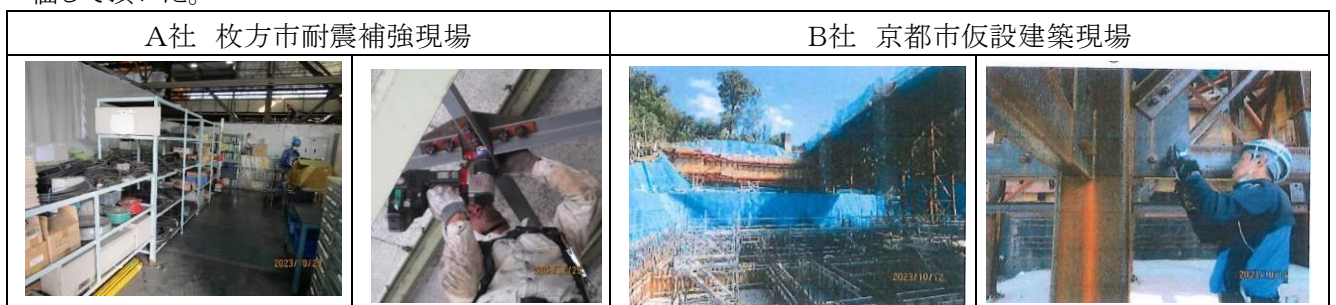


図45 ロックボルトセットでの建設現場実用化検証

- a) 枚方市の建築現場で、M20×50mm高力ボルト24セットを2023年10月29日から実用試験を開始した。1か月後に増締め試験を行い、軸力残存率は平均97.5%であり、高力ボルトとして良好な結果だった。
- b) 建設仮設事業者であるB社の京都市の仮設建設現場で、緩み防止機能付き高力ボルトの性能を評価して頂いた。高力ボルト(M22×70mm)32セットの実用化検証試験を、2023年10月12日から開始した。2か月後の12月13日に増締めを行い、残存軸力は平均99.5%と、高力ボルトとして良好な結果を得た。仮設建設物を撤去するのは3年後であり、その際3年間の建設現場実用化の緩み防止性能を評価する。
- 両者の結果は高力ボルト業界のノウハウでは、残存軸力は使用期間中に維持されることになる。

### ロックボルトセットの建設現場実用化実験結果

- 1か月以上経過した後、残存軸力は97%以上と高力ボルトセットとして良好な結果であった。

表14 緩み防止機能付高力ボルトセットでの建設現場実用化検証の結果

	枚方市現場:n=24セット	京都市現場:n=24セット
サイズ	M20×50mm	M22×70mm
締付けトルク	平均538Nm	平均736Nm
増締めトルク	平均525Nm	平均733Nm
軸力残存率(増締めトルク/締付けトルク)	平均97.6%	平均99.6%
締付け日	10月25日	10月12日
増締め日	11月19日	12月13日

### (3) 研究開発の成果：日本初(世界初)新製品「緩み防止機能付き高力六角ボルトセット」の実現

- ① 本研究開発の緩み防止機能付き高力六角ボルトセットは、普通の高力ボルトが締付けトルクの約67%で緩むのに対し、**締付けトルクの104%以上(普通の高力ボルト比155%以上)でしか緩まないという緩み防止性能を確立できた。**
- ② 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットを締め付けた後、NAS式振動試験17分の2倍の時間34分、5400時間のリラクゼーション試験、連続4000時間の塩水噴霧試験のいずれの後においても、普通の高力ボルトと同等以上の**締付残存軸力97%以上の締結を維持する軸力性能を持つことを実証**できた。
- ③ NAS式振動試験で規定の2倍の34分試験を、緩み防止機能付き高力六角ボルトセット50本以上実施しているが、まだ**緩んだものはなく、かつ締付け残存軸力も95%以上という結果を得ている。**従って、航空宇宙や機械や船舶の分野で、緩みを懸念し定期的に増締め等の保全を必要とする用途に適している。

#### 【1】緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの製造技術の確立

##### 【1-1】冷間圧造にて高力六角ボルトの頭裏面の傾斜段差の転写性の確立

##### 【1-2】高力六角ナットの傾斜段差の転写性の確立

##### 【1-3】高力平座金のオモテ面において傾斜段差の転写性の確立

- 事業計画書通りの技術施策によって、高力M36の緩み防止機能付きの傾斜段差の転写性は達成できた。またM16・M20・M22・M24の緩み防止機能付きの傾斜段差の転写性も達成でき、製造技術が確立できた。
- 圧造金型想定寿命ショット数での緩み防止機能付き高力六角M22ボルトセットにおいて、傾斜段差の転写性を達成できた。同様にも、M22の実証と長年の経験とノウハウから、他のサイズでも耐久性を達成できると判断する。

## 【2】高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

### 【2-1】金型初期状態での高力六角M36ボルトセットにおいて緩み防止性能の確保

・金型初期の圧造によってロックM36ボルトセットを製作し、段差数ボルト 12 面ナット 18 面および平座金 18 面で、緩み防止機能の技術的目標値を達成した。

- 1) 締付トルク(締付軸力): JIS1186 の F10T 同等を達成(締付トルク 3,100Nm、締付軸力 630kN)
- 2) ボルトの緩み回転角-0度で達成、
- 3) ナットの緩み回転角-0度で達成
- 4) トルク試験-トルク係数 0.140 で達成(トルク係数 0.110 以上で合格)
- 5) NAS 式振動試験-試験数 30 セットで、残存軸力の平均 98%で全て達成(残存軸力 95%以上)
- 6) 塩水噴霧試験(JISH0401)-4,000 時間連続後の残存軸力平均 97%で達成(残存軸力 85%以上)

\* 計画書では NAS 式振動試験後の残存軸力 85%を技術的に目標値にしていたが、日本で初めてM22以上の高力ボルトセットを試験できる NAS 式振動試験機を導入して、普通の高力ボルトを試験すると残存軸力は平均 95%であった。日本国内にはM20以上の振動試験機が殆どなく、振動試験後の残存軸力のデータがない中で目標値を設定した。残存軸力の技術的目標値を 95%以上に変更して研究開発を推進した。

・金型初期の圧造によって、段差数ボルト 12 面ナット 18 面および平座金 18 面で、ロックM16・M20・M22・M24ボルトセットを製作し、上記の緩み防止機能の技術的目標値を全て達成した。

### 【2-2】各部品の金型が想定寿命ショット数での高力六角ボルトセットにおいて緩み防止性能確保

- ・高力六角M22ボルトの圧造回数2万本、高力M22ナット5万個、高力M22平座金3万個製作した段階での高力M22ボルトセットで、仕様通りの性能と上記【2-1】6項目の技術的目標値を全て達成した。
- ・当初の計画に追加した、高力ボルトの特性として必要なリラクセーション試験と摩擦接合継手のすべり耐力試験を大阪公立大がM36とM22とM20で実施し、普通の高力ボルトに劣らないことを実証した。

\* 計画書ではM36で試験としていたが、主対象としている洋上風力発電所の建設が予想よりも遅れ、まだ殆ど進んでいない状況で、製作したサンプルでの建設現場での実用化検証できる現場がないことが判明した。研究開発2年目の2023年1月の第2回研究開発推進委員会で、上記の実用化検証サンプル製作の理由から建築現場で最も多く使用されているM22への変更を承認して頂いた。

#### ・緩み防止機能を有する高力六角ボルトセット (M16～M36) 研究開発の達成結果

4 頁表 2 に示す通り、技術的目標値を計画通り達成した。

## 【3】高力六角ボルトセットの傾斜段差面数や段差高さ、傾斜面角Rの微調整

①段差面数の微調整: 普通の高力ボルトはNAS式振動試験後の締付残存軸力は平均95%以上であり、緩み防止機能付き高力ボルトセット(ナット12面・平座金18面)は平均92%であり、緩み防止性能が劣ることが判明した。研究開発共同体で別途製作したナット18面・平座金18面の段差同面数は、振動試験後の残存軸力は平均97%であった。段差面数のナット18面・平座金18面への微調整を行い、【2-1】で説明した緩み防止性能の技術的目標値を達成した。

②段差高さの微調整: 高力M22ボルトセットの傾斜段差の高さと公差は、 $2.5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ に設定していた。圧造金型の想定寿命ショット数での傾斜段差の転写性を確認する高力M22平座金において、段差高さが公差下限に近い $0.17\text{mm}$ となった。高力ナットの段差は $0.29\text{mm}$ であり、このセットで緩み防止性能は平均104%と、他のサイズのボルトセットに比べ低くなった。M16～M24の段差高さの公差を微調整し、「 $+0.1\text{mm}$ 、 $-0.05\text{mm}$ 」の公差に変更し、この仕様で再製作した高力M22平座金の段差は $0.22\text{mm}$ となり、緩み防止性能は平均106%と向上した。

#### (4) 研究開発に係る知的財産権等について

- ・月盛工業(株)は戦略的基盤技術高度化支援事業に公募する前に技術開発で得た知見で特許申請をし、2022年6月に特許が成立した。(特許第7090962号「ボルトの締結構造」)。
- ・2024年11月の鋼構造シンポジウムに、「緩み防止機能を有する冷間圧造高力六角ボルトセットのリラクゼーションおよびすべり試験」を大阪公立大学が論文発表する予定である。

## 最終章 全体総括

### (1) アドバイザーの講評

○大末建設(株)北谷アドバイザー講評

色々多くの苦勞をされた中で製品が完成に近づいたということで、嬉しく思う。実際には現場で使用できるものになっていかなければならない。それには施工性と管理方法をきっちり構築する必要があり、実地検証を進めて行くにはハードルが高い。出来れば普通ボルトと同等くらいの施工性と確認方法を出来るだけ早めに確立すべき。実際に使用するのは職人なので、職人が使いやすいものに仕上げていけば良いかと思う。

我々は建築物を建設する役割になっている。そういうところでは、JIS や大臣認定が必ず必要になってくる。既にそれは視野に入れているとのこと、是非認定のステップに進んでいただき、最も良いのは、建設業界では圧倒的に使いやすいのでトルシア型にも進んで頂ければ、有り難いし期待もしている。

今回このような素晴らしい取り組みに委員長から声を掛けて頂き、大末建設としてもご指導頂けるし、良い経験をさせて頂き、有り難い。

### (2) 事業化について

#### 1) 想定している具体的ユーザー等の状況

- ・高力ボルト国土交通大臣認定の立会試験審査官から、「高力ボルトは緩まないという前提で使用されているが、実験的に測定すると緩んでいたものがあった」、とお聞きした。当社が緩み防止機能付きの高力ボルトの研究開発を推進しているのを、ご存じの上で話して頂いた。「締付軸力の抜けか、施工ミスか、要因は確定できていない」ことのことであった。
- ・一般社団法人日本鋼構造協会の委員会において、高力ボルトセットの緩み防止機能の規格化検討が開始されるとのことである。本研究開発のボルトセットもその一方策となる可能性を期待できる。
- ・ボーイング737MAX9の非常ドア破損事故(2024年1月5日)ーボルトの緩みによる脱落が原因か？

米航空機大手ボーイングのデイヴィッド・カルフーン最高経営責任者(CEO)は9日、米アラスカ航空が運航していたボーイング「737MAX9」の非常ドアが吹き飛んだ事故について、自社の責任を認め、事故原因の究明に取り組むと誓った。事故は5日、オレゴン州ポートランドからカリフォルニア州オンタリオに向かっていたアラスカ航空1282便で起きた。737MAX9型機の使用されていなかった非常ドアが吹き飛び、同機は緊急着陸した。けが人はいなかった。これを受け、米連邦航空局(FAA)は6日、「アメリカの航空会社が所有する、あるいはアメリカ国内に駐機しているボーイング737MAX9を一時的に運航停止とする」と指示し、171機が対象となった。その大部分を占めるユナイテッド航空の点検で、同様なボルトの緩みが検出された、と報道されている。

#### 2) 想定しているマーケット状況

- ・事業化の用途のボルト接合は図46に示すように、建築分野は高力ボルトの摩擦接合、鉄塔や鉄道架線ビームなどは支圧接合、洋上風力発電棟などは引張接合が主となっている。各ボルト接合に関する用途及び用途の特徴から、特に外力の繰返し変動があり、緩みの発生とメンテナンスが課題となっている。支圧接合の用途に緩み止めの機能が極めて有効であることが、改めて確認できた。この分野における事業化には、第2、3年度で実施した自然環境の変化、特に外力の繰返し変動による締付軸力の変化を、歪ゲージを用いてリアルタイムに測定する研究は、ボルトの緩み防止に実用化に多いに寄与できるものである。

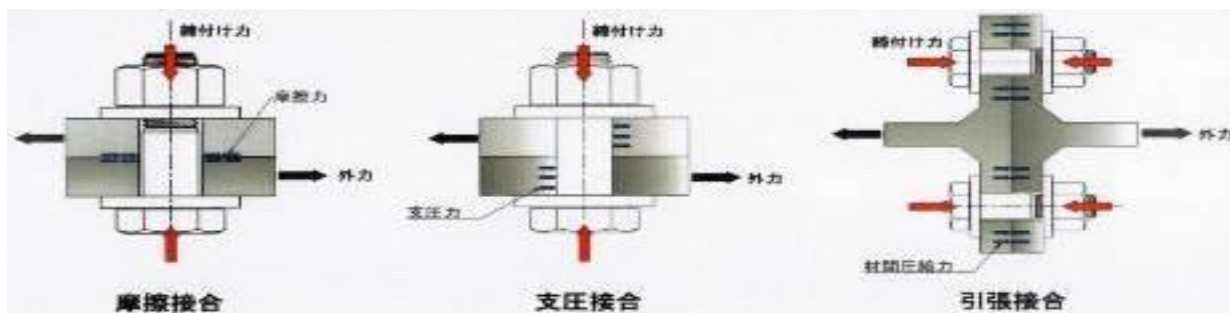


図46 ボルト接合の主な種類

- 各ボルト接合に関する用途及び用途の特徴から、本研究開発の緩み防止機能付き高力六角ボルトに関する事業化への反映すべき点を表 15 に整理した。特に外力の繰返し変動があり緩みの発生とメンテナンスが課題となっている支圧接合の用途に緩み止めの機能が極めて有効であることが、改めて確認できた。

表 15 ボルト接合の種類と特徴

種類	主な用途	用途の特徴	本高力ボルトセットへの反映
摩擦接合	建造物・高速道路・橋梁など	高力ボルトを使用	外力の変動がある箇所には緩み防止機能は有効、期待度大。
支圧接合	鉄塔・鉄道ビーム、トンネル換気扇など	外力の繰返し変動（風力・寒暖差）	緩み防止機能は極めて有効。ただし場合により、ボルトセットの取外しも必要で、ボルト頭回転による取外しタイプを検討する。
引張接合	洋上風力発電棟など	外力の繰返し変動（風力・寒暖差）	緩み防止機能は有効。特にメンテナンスが困難な用途に期待。

### 3) 事業化の推進

#### ① 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの事業化の推進

- 事業化の観点から、建設用途で最も多く使用されている高力ボルトM22のロックボルトサンプルを、本研究開発アドバイザーである大末建設(株)等に無償で提供し、建設現場での緩み防止性能を評価して頂いている。
- 研究開発の事業化は、研究開発の終了後、サンプルの評価を受けて令和6年度から販売を開始する計画である。
- 建築物用途の使用には、法的にJIS認定および国交大臣認定が必要であり、認証取得の申請を行う予定(2024年後半から申請準備開始)。

#### ② 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットの用途の展開、および緩み防止機能付き新製品の事業化

- 緩み防止機能付き高力六角ボルトセットを、振動に強い特徴を活かして、機械・重機用途への新市場に展開。
- 本事業で研究開発した高力ボルトの緩み防止機能を、建設用途として市場規模が最も大きい高力トルシアボルトセット(16～24)に展開し、緩み防止機能付きとして事業化する計画である。
- 同様に、高力ボルトの緩み防止機能を、遮音材や防風材の締結用途に使用される普通級六角ボルトセット(M12～24)に展開し、緩み防止機能付きとして事業化する計画である。

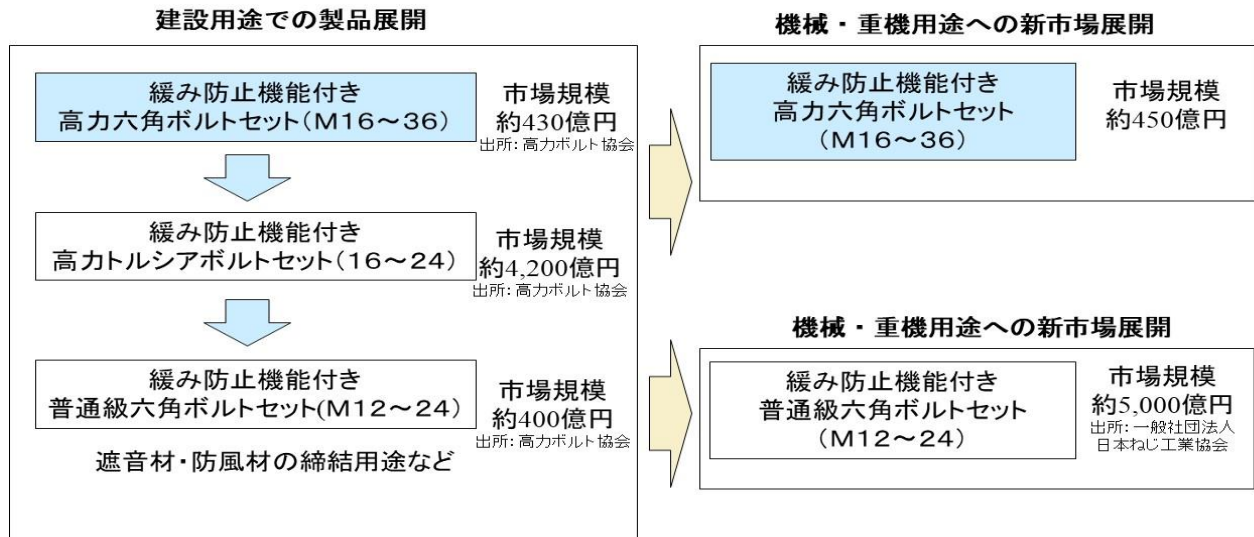


図47 事業化と今後の製品および用途の展開

③ 波及効果—緩み防止機能付きトルシアボルトS10 (22×90mm) の開発

・高カトルシアボルト:

高カトルシアボルトは、特殊なレンチでナットの締付けを行い、ナットの締付けが完了すると、図の矢印で示す部分が反力により破断する。このような特殊な締付け方法により、高力六角ボルトに比べて、締付軸力のバラツキが少ない。しかし、緩み防止効果はない。

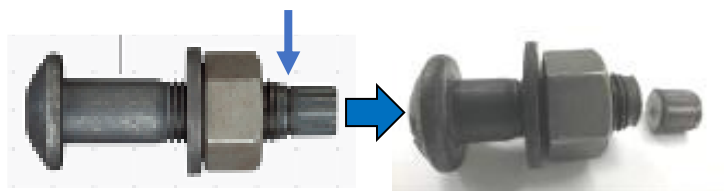


図48 高カトルシアボルト

・緩み防止機能付き高カトルシアボルトS10 22×90mmの冷間圧造による試作品を製作した。



図49 緩み防止機能付き高カトルシアボルト

・普通の高カトルシアボルトと緩み防止機能付き高カトルシアボルトのトルク試験

締結材にはすべり試験用赤錆の板を使用。通常通り電動トルクレンチで締付けてピンテールを飛ばし、トルクレンチで増締めをし緩み防止トルク(普通のトルシアボルトは緩み開始トルク)とした。

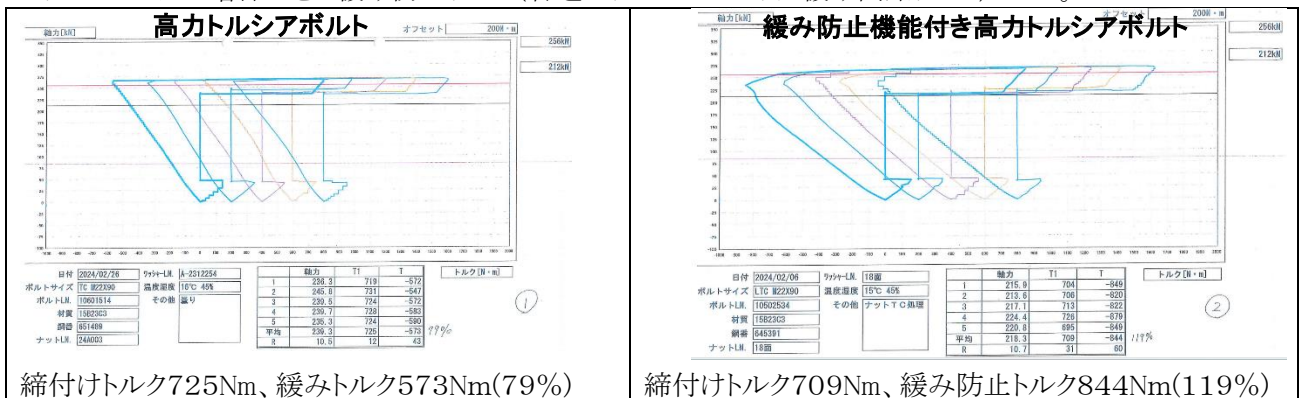


図50 緩み防止機能付き高カトルシアボルト

- ・緩み防止機能付き高力トルシアボルトS10 22×90mmの緩み防止性能の評価

締付トルク 709Nm、緩み防止トルク 844Nm

緩み防止トルク/締付トルク比119% (5セット平均)と良好な結果を得た。

表16 緩み防止機能付き高力トルシアボルトの緩み防止性能

トルク試験	1	2	3	4	5	平均
締付け軸力 kN	216	214	217	224	221	218
締付けトルクNm	704	706	713	726	695	709
増締めトルクNm	849	820	822	879	849	844
増締めトルク//締付トルクの比%	121%	116%	115%	121%	122%	119%

- ・本事業計画で推進した事項を参考に、技術的目標値の試験を緩み防止機能付き高力トルシアボルトでも実施し、16～24サイズの事業化を推進する。

以上