

ボルト締結による摩擦接合体の強靱化手法について Strengthening Technique for bolted friction joints

日本製鉄（正）藤井 彰，（正）*村上 大，（非）岩間 惇

Akira Fujii, Dai Murakami, Atsushi Iwama

Nippon Steel Corporation

1. はじめに

少子高齢化による労働力人口減少，働き方改革を背景に，製造業を取り巻く社会環境は大きく変化している．設備メンテナンスもこの変化に対応する変革が求められている．その解の一つが，設備の信頼性発揮であり，トライボロジー技術による摩擦・摩耗制御がカギとなる．本稿では，設備を構成する「ボルト締結体」の観点から，設備メンテナンスの在り方を論じたい．既存設備へのレトロフィットによる摩擦接合の強靱化で，信頼性の発揮と保全作業レス化の両立を目指していく．

2. 設備信頼性と保全作業のレス化

「信頼性」とは，JIS Z 8115 ディペンダビリティ（総合信頼性）用語で「アイテム（設備）が，与えられた条件の下で，与えられた期間，故障せずに，要求どおりに遂行できる能力」と定義される．ここでいう「与えられた条件」とは，設計前提内での運転に加え，給油脂，機器まわりの清掃，流量・圧力・温度の調整，そしてボルト締結の緩み防止（増締め）などの日常保全作業の確実な実行を意味する．強制劣化を排除し，自然劣化の範囲に制御して設備を稼働させることで，期待どおりの信頼性が発揮できる（Fig. 1）．

強制劣化の排除で，設備は本来の寿命（与えられた期間）まで使用可能となり，補修に伴う保全作業は最小化される．さらに，日常保全作業も極限まで削減し，より効率的な設備メンテナンスで社会環境の変化に対応していきたい．日常保全作業の一つであるボルト締結の緩み防止（増締め）について，(1)緩みの発生メカニズムに即した対策の適用，(2)最小限のレトロフィットによる摩擦接合の強靱化，というアプローチで保全作業をレス化する．

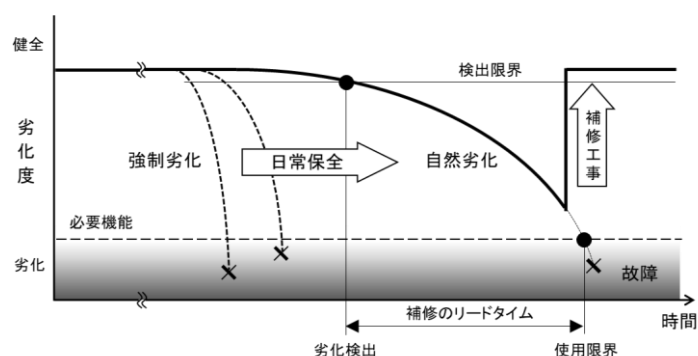


Fig.1 Ensuring equipment reliability ¹⁾

3. ボルト締結における緩みの発生と対策

3.1 ボルト締結の基礎と特性

ボルト締結体は，ボルト・ナットの締め付けによるボルトへの引張力（軸力）と，作用反作用による被締結物への圧縮力で成り立っている．ボルト締結における摩擦接合とは，軸力によって生じる接合面の摩擦力（耐せん断力）で外力を相殺し，締結体としての一体性を維持する接合法である（Fig. 2(a）．外力が接合面の摩擦力を超えない限り，締結体として成立する．

所期の摩擦力を得るためには，ボルト締め付け時の適正な軸力保証が重要となる．一般的にはトルクレンチを用いた締め付けトルクの管理が行われるが，軸力を直接測定できる超音波軸力計を用いることで，より確度の高い軸力保証が可能となる．

3.2 ボルト締結における緩みのメカニズムと対策

ボルト締結に緩みが生じた場合，ボルトにせん断力が作用し（Fig. 2(b)），折損等のトラブルが起こる．ボルトの緩みは，ナットが戻り回転して軸力が低下する「回転緩み」と，締め付け後の軸力低下を原因とする「非回転緩み」に大別される．

ナットの回転緩みは，外力負荷時にナット座面で微小な軸回りすべりが生じることで発生する．ダブルナットやワイヤーロックなどの各種廻り止めの採用が，対策として確立されている．一方で，非回転緩み，特に締結体接合面の摩耗に起因する軸力低下については，これまで有効な対策が確立されていない．非回転緩みのメカニズムについて，以下に詳述する．

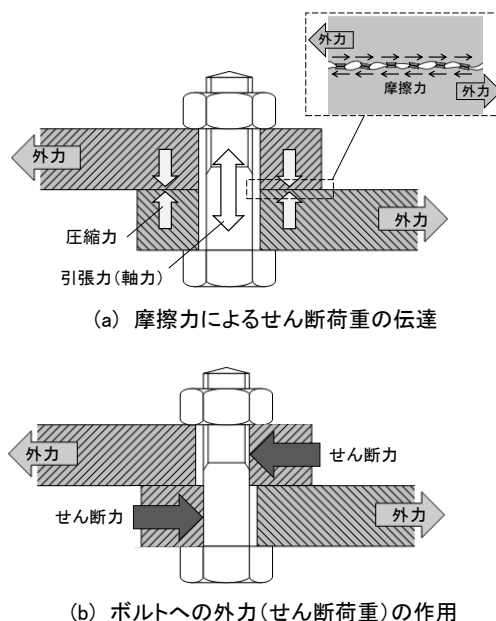


Fig.2 Mechanics of bolted joint

締結体の接合面には微小突起が存在し、二つの表面を接触させると、Fig.3 のような接触状態が生れる。締付力によって接触部（真実接触部）が凝着してジャンクションを形成し、せん断方向の外力に抵抗する摩擦力が発生する。しかし、摩擦力を超える繰り返し外力が加わると、凝着が引き剥がされ、接合面にすべりが生じる（Fig.4）。ジャンクションの破壊とともに耐せん断性は低下し、摩耗が加速、軸力が一層低下する。したがって、非回転緩み対策の要は「接合面のすべりを無くすこと」にある。

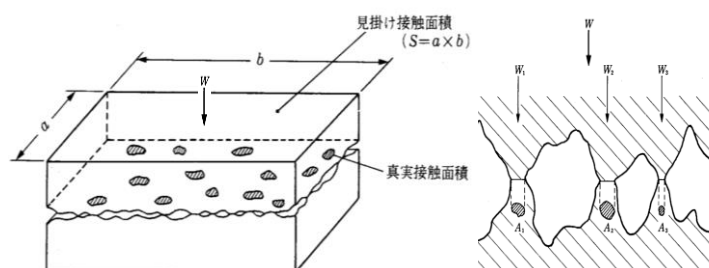


Fig.3 Contact of two surfaces and the real contact area ²⁾

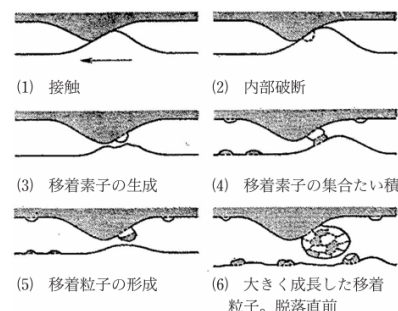


Fig.4 Friction and wear mechanism of joint surfaces ³⁾

4. レトロフィットによる摩擦接合の強靱化

締結体接合面のすべりを無くすためには、締結部を嵌め合い（インロー）構造とするなど、設計段階での工夫でも非回転緩みを抑制できる。しかしながら、長期使用される既存設備の中には、嵌め合い構造が採用されていない場合もある。締結体に衝撃や振動が加わる環境では、繰り返しの増し締め作業によって非回転緩みに対処してきた。これに対し、レトロフィットで摩擦接合を強靱化する「開発技術：耐せん断締結技術」を導入し、日常保全作業のレス化を狙う。

4.1 開発技術：耐せん断締結技術 ⁴⁾

Figure 5 に技術の概要を示す。被締結物の片面に微細なテクスチャリング（格子状の溝）を施し、樹脂を塗布してボルトで締結する。接合面の真実接触部は保持しつつ、僅かな空隙には樹脂が充填される。余剰樹脂は真実接触部を減少させるため、溝から排出する（Fig.6）。真実接触部の摩擦力と、樹脂の耐せん断力を活用し、見かけ上の摩擦力を大きく向上させる技術である。余剰樹脂を効率的に排出するため、排出溝は外周に向かって開口する構造とし、一辺あたりの開口幅は約 50–150 μm 、深さは約 30–80 μm 、縦横ピッチは約 200–800 μm とする。ボルト締結体の加振試験（NAS3350/3354）の結果を Fig.7 に示す。開発技術の適用で、ボルト緩みへの耐力は 10 倍以上に向上している。

ボルト締結体におけるジャンクション破壊の防止と、接触面間の空間に変形抵抗を導入することで、ボルト軸力を長期にわたり保持することが本技術の本質である。スペース制約のある既存設備にも適用可能であり、修理時に最小限のレトロフィットで導入できるため、経済性と締結機能の両面で優れた効果を発揮する。

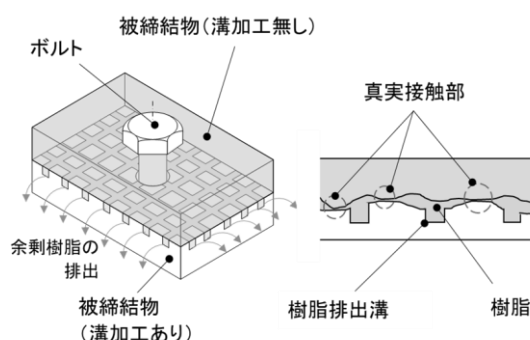


Fig.5 Technology for preventing non-rotational loosening

白色： 真実接触部	樹脂塗布	
	なし	あり
テクスチャリング	①真実接触面積率：1.12%	②真実接触面積率：0.12%
	③真実接触面積率：1.19%	④真実接触面積率：1.00%

Fig.6 Measured real contact areas for each test condition

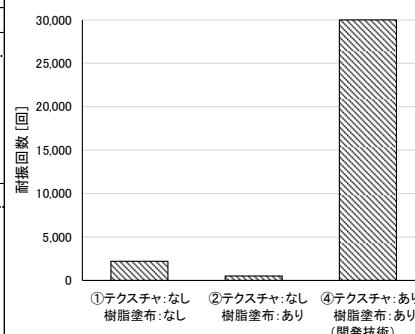


Fig.7 Results of NAS 3350/3354 Test

5. おわりに

摩擦接合の強靱化で軸力の長期保持を可能とし、設備信頼性と保全作業低減の両立を実現する。レトロフィットやリマニュファクチャリングなど、現場の課題に応えるアプローチは、変化する社会環境に対応した設備メンテナンスのキーテクノロジーとして、さらなる展開が期待される。

文献

- 1) 藤井：設備管理のための潤滑油分析と振動診断の実践，潤滑経済，No.534 (2010) 38-43.
- 2) 岡本・中山・佐藤：トライボロジー入門，幸書房(1990) 30.
- 3) 笹田：凝着と摩耗，潤滑，24，11(1979) 700.
- 4) 藤井・踞尾：接合体および接合方法，特開 2018-179153(2018)。