

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
総括研究報告書

臨海コンビナート設備のねじ接合部の腐食減肉に関する  
供用適性評価技術の開発

研究代表者 辻 裕一 東京電機大学工学部教授

研究要旨 本研究は、臨海コンビナートにおけるフランジ継手、鋼構造物のねじ部品の減肉の実態の把握、減肉速度の予測モデル、減肉許容基準・余寿命評価の開発と減肉評価ガイドライン作成を目的とする。2年目である平成30年度は、ねじ部品の減肉許容基準と締結性能の検討を進めると共に腐食解析技術の検討を進め、以下の成果を得た。ねじ部品の減肉許容基準を現実的な減肉形状について提案するとともに締結性能の評価を行った。ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査を複数のコンビナート地区で実施し、腐食が進行しやすい箇所の共通の因子を明らかにした。現地調査で採取した減肉ボルト・ナットのサンプルについて水素分析を行い、水素量と腐食度合いの間に相関性があることを示した。水素分析は腐食の解析に有効である。最終年度は、現地調査を継続すると共に製造現場で容易に適用可能な汎用性のある減肉評価方法の検討、及び腐食解析技術の成果を根拠とする減肉速度の予測モデルを構築し、余寿命評価を可能とするねじ部品減肉評価ガイドラインの作成を目指す。

研究分担者氏名・所属機関名及び所属機関  
における職名

齋藤 博之・東京電機大学工学部教授

A. 研究目的

臨海コンビナートのプラントでの腐食減肉では、フランジ継手等に使用されるねじ部品の減肉が現実には発生しているにも拘わらず、定量的評価は行われていない。フランジ継手の締結状態は漏洩に直接影響するが、ねじ部品の減肉に関する合否判定基準が国内のみならず海外にも無い。ねじ部品の減肉は、デッキ、プラットホーム、サポートなどの屋外鋼構造物にも多く見られる。ねじ部品の破壊は直ちに重大な事故・災害に結びつく。

本研究では、コンビナートにおけるねじ部品の減肉に着目し、減肉の実態の把握、減肉速度の予測モデル、減肉の許容基準・余寿命評価方法の開発を行う。成果を踏まえ、ねじ締結部の供用適性評価を行える減肉評価ガイドライン作成を最終目標とする。

本年度は、ねじ部品の減肉許容基準の提案と締結性能の定量的評価、ねじ部品の減肉に対する腐食解析技術の検討を行う。並行して、ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査を複数のコンビナート地区で実施し、腐食状況の確認、及び立地環境との関連について調査する。

成果は、ボイラー及び圧力容器安全規則、あるいは高圧ガス保安法で規制される設備に係わる事業所の設備の維持管理技術の高度化につながることを期待される。作業員が接近する鋼構造物のねじ部品も対象とするので、労働安全衛生全般にも貢献できる。

B. 研究方法

本研究は3年計画で、東京電機大学で実施する。2年目である平成30年度は、次に示す方法で研究を実施した。

まず、ねじ部品の減肉許容基準については、非線形有限要素解析により得られるボルト・ナット締結モデルの塑性崩壊までの挙動に基づき提案する。解析コードとして

Abaqus R2018 を用い、軸対称要素による弾塑性解析を行った。解析では、ボルト又はナットの塑性崩壊によって解が収束しなくなるまでボルトの引張力を漸増させることによって、塑性崩壊荷重を決定する。ナットの減肉のモデル化は、①高さのみ減肉、②外径のみ減肉、③高さと外径が同時に減肉、④円錐台形状に減肉の3通りである。高さと外径の減肉の影響、及び両者の相互作用を調査する。減肉許容限界を求めるとともに、ボルト・ナット系の剛性低下に伴う締付け力低下を締付け線図に基づき求め、締結性能の評価を試みる。

ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査は、国内の代表的なコンビナート地区であり、立地環境が大きく異なる鹿島地区、京葉地区、水島地区の各地区を対象として実施する。減肉したねじ部品について、現地で寸法、形状を測定するとともに、後日、詳細な腐食解析のための試料として入手する。

腐食解析技術の検討については、昇温脱離法 (Thermal Desorption Analysis: TDA) の手法をボルトとナットに対して適用した。

#### (倫理面への配慮)

本研究の実施によって、生体及び環境へ影響を及ぼすことは無いので、倫理面への問題は無いと考える。

### C. 研究結果

#### 1 : ねじ部品の減肉許容基準の提案

弾塑性有限要素解析により、ボルト又はナットが塑性崩壊せずに、減肉のないボルトの降伏応力の 50% の軸力を負荷できる減肉形状を許容限界と新たに定義した。降伏応力の 50% の軸力は、実際の締付け力のレベルに合わせて設定している。ナットの減肉のモデル化は、前年度の2通り (高さ、あるいは外径の減肉) に加え、高さと外径が同時に減肉する場合、円錐台形状に減肉する場合をを加えた。減肉許容限界を求めるとともに、ボルト・ナット系の荷重一変

位関係、及びボルト・ナット系の剛性と減肉による剛性低下率を求めた。

さらに、ボルト・ナット系の剛性低下が締結性能に及ぼす影響に関し、締付け線図を応用した図式解法を提案し、ボルト・ナットが JPI フランジにおいて使用されることを想定して締結性能の評価を行った。

#### 2 : ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査

調査した鹿島地区、京葉地区、水島地区の各コンビナート地区のうち、鹿島地区における腐食減肉の進行が顕著であった。ただし、鹿島地区でも事業所全体でねじ部品の腐食が進行していることはなく、特定の環境下で著しい腐食減肉が認められた。最も腐食減肉が進んでいたのは、冷却塔のボトム配管のフランジ継手であり、常時、霧状の水滴が舞っている環境であり、2003年の設置から 15 年経過している設備である。他に腐食が進んでいたのは、排水設備の配管フランジ継手、鋼製猿梯子などの基礎ボルト、保温材下のバルブのフランジ継手などである。

冷却塔のボトム配管のフランジ継手のボルト・ナットについては、腐食解析のために取り外し、サンプルとした。

#### 3 : 腐食解析技術の検討

現地調査で鹿島地区で採取した減肉ボルト・ナットのサンプルについて、昇温脱離分析法 (TDA) により水素分析を行った。

分析にあたっては、散水配管のフランジに使用されたナット (Test 1)、ボルト (Test 2) の嵌合部、および外部に露出したナット (Test 3)、ボルト (Test 4) を切断して、それぞれ各部を分析して比較する。TDA における真空中での昇温は時間あたり 100°C で行い、この間の放出水素を測定する。この手法で実際に水素分析を行うことにより、次の結果が明確にできた。

嵌合部のナット、ボルトともに水素は微量である。外部露出した部分のナットに関しては水素は微量であるが、ボルトへの水素は多量である。

## D. 考察

### 1：ねじ部品の減肉許容基準の提案

減肉の許容限界をボルトの降伏応力の50%の軸力を負荷できる場合と定義したことにより、より大きな減肉を許容できることが示された。許容限界は、ナット高さが43.12%、ナット二面幅が82.92%までの減肉とする。ボルト頭部についても同一の許容限界とできる。

実地調査で見られるナットの減肉形状に即して円錐台状減肉の許容限界を求めたところ、体積比で75.3%の減肉(24.7%残存)まで許容できることを示した。

ナット高さと同二面幅の同時減肉に対する許容限界の場合について、ボルト・ナット系の剛性率低下率は67.3%となるが、この場合の締付け力低下が22.3%となることを締付け線図に基づき示すことができた。塑性変形を伴う非線形問題に対しても本方法の有用性をしめすことができた。締付け力の22.3%低下は、締付け時の締付け力のばらつきと同程度以下である。フランジ継手の場合に当てはめると、締付け力低下に伴い密封性能が初期組立状態より若干低下するとしても、いわゆる漏洩につながることは無い。一般の締結体においても締結性能に及ぼす影響は小さいと予想される。

### 2：ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査

調査した鹿島地区、京葉地区、水島地区の各コンビナート地区のうち、鹿島地区における腐食減肉の進行が顕著であったが、腐食状況は飛来海塩粒子量と関連づけることができた。鹿島地区は飛来海塩粒子量の年平均量が29 mg NaCl/m<sup>2</sup>・dであるのに対し、水島地区や京葉地区では6 mg NaCl/m<sup>2</sup>・d未満である。この飛来海塩粒子量の差により、外面腐食深さの比は4倍になるとされている。

腐食が進行しているねじ部品は、呼び径でM16以下であり、ナットの腐食が進行する一方で、ボルトの軸(おねじ)の減肉は少ない。ナット座面があたる面が水平で上側の場合に腐食が顕著であり、これは雨水等が溜まりやすいためと推測される。基礎

ボルトのナットの腐食も同様の理由と考えられる。

ナットの腐食では、錆の体積は元の10倍に膨らむので、そのままの外観から減肉量を判断することはできない。後日、ケレンで錆を除去して減肉量を確認した。ケレン前のナットには錆の浮き上がりによる特有の外観が見られ、これらは「菊割れ」、「菊開き」、「花咲き現象」と呼ばれている。

### 3：腐食解析技術の検討

嵌合部のナット、ボルトともに水素は微量である。外部露出した部分のナットに関しては水素は微量であるが、ボルトへの水素は多量である。このように、水素の量は部位によって異なっている。このことから、TDAによる水素分析がナット、ボルトに適用できることが明らかになった。

さらに、この結果を実際の腐食と比較して、水素の多寡と腐食度合いに一定範囲で相関があることを示すことができた。このことから、水素分析は腐食解析に利用できる。

分析した水素量と腐食を比較し、より内側にある部材(ボルト)の水素量が大きくなることが明らかとなった。

## E. 結論

平成30年度の研究により、以下の結論を得た。

ねじ部品の減肉許容基準の提案については、実際の締付け力レベルに対応し、また現実的な減肉形状に対する減肉許容限界を示した。締付け線図を用いて、ナット減肉によるボルト・ナット系の剛性低下に伴う締付け力低下を評価する方法を提案した。本方法により減肉許容限界における締付け力低下を求めたが、低下量は、締付け時の締付け力のばらつきと同程度以下であり、締結性能は維持され则认为られる。

ねじ部品の腐食減肉状況の現地調査については、調査した各コンビナート地区のうち、鹿島地区における腐食減肉の進行が顕著であり、腐食状況は飛来海塩粒子量と関

連づけることができた。鹿島地区でも事業所全体でねじ部品の腐食が進行していることはなく、特定の環境下で著しい腐食減肉が認められた。腐食が進行しているねじ部品は、呼び径で M16 以下であり、ナットの腐食が進行する一方で、ボルト側の減肉は軽微である。ナット座面があたる面が水平で上側の場合に腐食が顕著であった。

腐食解析技術の検討については、水素分析が腐食の解析に有効であることがわかった。この手法で分析された水素量と腐食の間に相関性があり、一般に水素が微量のとき腐食は軽微である。また、ボルトとナットの位置関係で、より内側にあるボルト側での水素の発生が優勢に生じることがわかった。

今後は、3D 計測装置の計測ソフトウェアへの減肉評価機能の組み込み、及び日常点検で容易に適用可能な汎用性のある減肉評価方法の検討を進める。また、腐食解析技術の成果を根拠とする減肉速度の予測モデルを構築し、余寿命評価を可能とするねじ部品減肉評価ガイドラインの作成を目指す。

#### F. 健康危険情報

無し

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

なし

##### 2. 学会発表

T. Kikuchi, H. Tsuji, D. Tsurumi:  
Effect of Nut thinning due to  
Corrosion on the Sealing Performance  
in Bolted Flange Joints under  
Internal Pressure, ASME PVP 2018  
Conference, PVP2018-85064, 2018.

斉藤翔太, 辻裕一, 菊池務: ねじ部品の  
減肉許容基準の検討 —ボルト頭部減肉  
の場合—, 山梨講演会講演論文集,  
No.180-3, YC2019-088, 2018.

#### H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

##### 1. 特許取得

無し

##### 2. 実用新案登録

無し

##### 3. その他

無し