

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。最終年度である令和元年度は、ねじ部品の減肉速度の予測モデルの構築及び 3D 計測技術による検査結果に基づく供用適性評価を試行し、以下の成果を得た。ナット及びボルト頭部の減肉に対して、3枚のステレオ写真から画像処理により、3D データに変換する非接触 3D 画像計測技術を確立した。現地調査でサンプリングした減肉ボルト・ナットに対して、3D 計測技術を適用し、減肉ナットサンプルの残存体積を計測し、昨年度の成果である円錐台状減肉の減肉許容基準と比較して合否判定を実施することができた。ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から供用適性評価までの一連の工程の妥当性を検証できた。臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉速度は、炭素鋼同士の組合せの締結体において 0.26 mm/y、異種金属で構成される締結体において 0.3 mm/y を見込めばよく、余寿命評価にこの数値を用いることが可能である。

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。計画の最終年度である本年度は、ねじ部品の減肉速度の予測モデルの構築及び 3D 計測技術による検査結果に基づく供用適性評価を試行し、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から供用適性評価までの一連の工程の妥当性を検証する。

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。最終年度である令和元年度は、次に示す方法で研究を実施した。

まず、ねじ部品の減肉速度の予測モデルの構築については、試料の局所的な腐食特性を測定できる走査型電気化学顕微鏡

(SECM) を用い、直径 10 μm の白金電極微小プローブ電極を取り付けた。測定溶液は 3% NaCl 水溶液にフェロシアン化カリウムを加えた。各種材料の組合せで構成されるボルト・ナット締結体を測定溶液に浸漬し、ボルトとナットの上端面での電流分布、ならびにエレクトロメータ法によってボルトとナットの自然電位を測定した。試験体として、炭素鋼ねじと炭素鋼 (S25C) 被締結体、ステンレス鋼 (SUS304) ねじとステンレス鋼 (SUS304) 被締結体、炭素鋼ねじとステンレス鋼 (SUS304) 被締結体を組み合わせた 3 種類の試験用ボルト・ナット締結体を用意した。

3D 計測技術の検査への適用では、3次元サーフェイス立体画像 DEM (Digital Elevation Map) 作成ソフトウェア (Mex 6.1) を用い、ねじ部品減肉計測を支援する画像処理手法を検討し、減肉ナットの幅、高さなどの断面プロファイル、残存体積の非接触計測を目指した。

供用適性評価手法の妥当性については、昨年度、現地調査を行った鹿島地区の冷却塔のボトム配管のフランジ継手の呼び径 M12 の減肉ボルト・ナットをサンプルとして減肉評価を試行、検証した。評価には、実際の減肉ナットの形状に近い円錐台状減肉の減肉許容基準を用いる。昨年度までの弾塑性有限要素解析の成果として、許容基準が体積比として与えられている。

(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 : ねじ部品の減肉速度の予測モデルの構築

SECM の微小プローブ電極によって、半球上に広がる試料表面の酸化還元反応を検出する。溶液をメディエータとして使用するため、試料表面上に還元反応が起こると

ころでは大きなプローブ電流が検出される。測定溶液に浸漬した 3 種類の試験体に対して、微小プローブ電極を走査速度 100 $\mu\text{m/s}$ で水平に走査させ電流を測定した。また、3 種類の試験体のボルトまたはナットの上端面の自然電位の経時変化を測定した。

結果をまとめると、ナットはボルトより自然電位が低く、電流値もわずかに高く腐食しやすいことが確認できた。炭素鋼ねじとステンレス鋼の被締結体の組み合わせでは、ねじと締結体で異種金属接触腐食が起き、同種の組み合わせより電流が高く、自然電位が低い値を示した。

2 : 3D 計測技術の検査への適用

ねじ部品の 3D データを作成するための画像データとして、ねじの軸線方向の 0° 及び $\pm 3^\circ$ の傾斜角からデジタルカメラにより撮影した 3 枚のステレオ写真を用いる。撮影における傾斜角、ワーキングディスタンスは、計測精度、ステレオ写真の死角領域の縮小などを考慮して決定した。撮影した写真は、3次元サーフェイス立体画像作成ソフト (Mex 6.1) で画像処理を行い、DEM 形式による 3D データとした。3D データ化ソフトウェアでの 1 サンプルの体積計算に要する時間は、ノート PC によって平均 6 分であり、検査手法としての実用性を確認した。以上の手法により、昨年度の現地調査でサンプリングしたボルト・ナットの 3D データ化を行い、減肉ナットの特徴量として体積を求めた。

3 : 供用適性評価手法の妥当性の検証

ねじ部品の減肉評価を、昨年度の現地調査でサンプリングしたボルト・ナットを対象として実施する。3D データによる減肉ナット体積 (嵌合部ボルト体積を含む) の新品のねじ部品に対する割合が、体積比 31.1% という減肉許容基準を満足するかによって減肉評価を行った。この減肉許容基準は、昨年度までの弾塑性有限要素解析により得られた成果であり、ボルト又はナットが塑性崩壊せずに健全なボルトの降伏軸力の 70% の軸力を負荷できるという基準

に基づき、実際の減肉ナットの形状に近い円錐台状減肉の減肉許容基準が体積比として与えられている。

現地調査を行ったフランジ継手のボルト・ナット8組は、2019年3月に新品に交換された。その後、定期的にボルト・ナットを1組ずつ抜き取り、減肉の追跡調査を実施している。5ヶ月経過、9ヶ月経過後に取り外したボルト・ナットでは、体積比は、最も低いもので99%であった。

D. 考察

1：ねじ部品の減肉速度の予測モデルの構築

単位面積当たりの腐食速度は腐食電流密度に比例する。各鋼の腐食速度の金属換算係数 k_w , k_L による換算式を用いて、腐食電流密度から腐食速度を求めたところ、海水中の炭素鋼の定常腐食速度 0.1 mm/y に対して、ねじ部品の腐食速度は異種金属で 3.0 倍、炭素鋼同士で 2.6 倍と大幅に増加することを明らかにした。ここで、海岸または工業地帯での炭素鋼の腐食速度は飛来海塩粒子量に依存し、ばらつきはあるものの 0.1 mm/y 以下とされている。

以上の知見より、臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉速度は、炭素鋼同士の組合せの締結体において 0.26 mm/y、異種金属で構成される締結体において 0.3 mm/y を見込めばよい。地中埋設の場合、及び CUI が関与する事象は、現時点では対象外とする。

なお、ナットが腐食により「菊割れ」と呼ばれる外観となる、あるいは円錐台状に減肉が進行するようなシミュレーションモデルはできていない。

2：3D 計測技術の検査への適用

体積比という1つの特徴量によって容易に定量的な合否判定を行うことができる。実際のねじ部品の減肉評価において、様々な減肉形状が想定されるが、ナット高さ、ナット幅（高さの関数）などの多数のパラメータを利用するよりは、実用性に優れて

いる。

3：供用適性評価手法の妥当性の検証

ねじ部品の減肉許容基準、減肉の予測モデル、及び 3D 計測技術による検査結果に基づく供用適性評価を実施することによって、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から評価までの一連の工程の妥当性を検証できた。ナットの減肉速度、表面積及び残存体積から余寿命または検査周期を決めることも原理的に可能である。

昨年度、実態調査において採取した 15 年経過の減肉ボルト・ナットに対し、TDA による水素分析を行ったところボルトの非拡散性水素量と腐食度合いに相関性が認められた。追跡調査のボルトについても水素分析を同様に実施し、経過時間が短いにも拘わらず、一部のボルトについては非拡散性水素量が増加していることを確認した。サンプル数と経過時間が少ないことより、信頼性を高めるために、追跡調査を継続する。

E. 結論

令和元年度の研究により、以下の結論を得た。

減肉の予測モデルの構築については、SECM などの電気化学的手法により、ボルト・ナット締結体の腐食特性を種々の条件で詳細に解析した。炭素鋼製のナットとボルト軸の腐食速度を比較すると、ナットの方が、わずかであるが腐食速度が高い。炭素鋼製ボルト・ナットと SUS304 製被締結体の組合せの場合、異種金属接触腐食が起き、同種金属同士の組合せの場合よりボルト・ナットの自然電位が大きく低下し、腐食電流密度が高い。臨海コンビナートにおけるねじ部品の減肉速度は、炭素鋼同士の組合せの締結体において 0.26 mm/y、異種金属で構成される締結体において 0.3 mm/y を見込めばよい。

3D 計測技術の検査への適用では、ナット及びボルト頭部の減肉に対して、3枚のステレオ写真から画像処理により 3D データに変換する手法を確立した。画像処理は汎用ノート PC で実行可能である。減肉ナッ

トの外形プロファイル、残存体積等を非接触で計測できる。

供用適性評価手法の妥当性の検証については、昨年度、実態調査を行った中で最も腐食減肉が進んでいた鹿島地区の設置後15年経過した冷却塔のボトム配管のフランジ継手の呼び径 M12 の減肉ボルト・ナットをサンプルとして実施した。昨年度までの研究により、実際の減肉ナットの形状に近い円錐台状減肉の減肉許容基準が体積比として与えられている。3D 計測技術を適用し、減肉ナットサンプルの残存体積を計測し、円錐台状減肉の減肉許容基準と比較して合否判定を実施することができた。ナットの減肉速度、表面積及び残存体積から余寿命または検査周期を決めることも原理的に可能であることを示した。

以上より、ねじ部品の減肉評価ガイドラインの骨格となる検査から評価までの一連の工程の妥当性を検証した。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

菊池務，辻裕一，鶴見大地：ボルト締めフランジ締結体のシール性能に及ぼす限界ナット高さとの二面幅の評価，圧力技術，Vol.58, No.2, P.101-109, 2020.

2. 学会発表

菊池務，新村稔，辻裕一：腐食減肉した高力ボルト・ナットの3次元計測と軸力評価に基づく合否判定，非破壊検査協会2019年度第2回保守検査ミニシンポジウム，2019.

日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス M&M2019, PS12, 腐食減肉したねじ部品への水素侵入挙動の評価，2019, 斎藤翔太，齋藤博之，辻裕一.

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