

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

研究者代表者 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。初年度である平成29年度は、ねじ部品の減肉許容基準の検討を進めると共に電気化学的な腐食解析技術の検討を開始し、以下の成果を得た。破壊モードに基づくナットの減肉許容基準を提案した。減肉ボルトの計測方法を検討し、漏えいが発生した保温タンクの保温材下のスタッドの腐食の実態調査を実施した。ボルト・ナット系を模擬した異種材料接合部の腐食電位の二次元分布を測定した。次年度以降は、実態調査を実施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検討を進め、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。

分担研究者氏名・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、ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調

査、及び腐食解析技術の検討を行う。

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。初年度である平成29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 R2017** 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、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。

ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調査については、建設から40年の漏えいが発生した経年保温タンクの保温材下のスタッドボルトの腐食の事例を取り上げた。スタッドボルトについては、軸部の最小断面積が強度を支配するため、デジタルノギスにより減肉部外径を測定することとし、実態調査を実施した。

腐食解析技術の検討については、減肉が発生する主要因となる腐食の発端および進展を明確にすることをめざして、腐食生成物の分析、腐食反応（酸化・還元反応）の計測を行う。腐食生成物の分析、腐食反応（酸化・還元反応）の計測にあたっての手法としては、いくつかのものが考えられる。このうち、平成29年度は、腐食生成物の結晶構造から物質同定が可能なX線回折法（XRD）、微小部での腐食反応（酸化反応）を腐食により生じる金属の電位変化から微小範囲で計測できる走査型電気化学顕微鏡（SECM）を分析手段としてとりあげた。

実態調査を行ったタンクのスタッドボルトについて、これに付着していた腐食生成物を採取し、XRDにより分析することにより腐食の進行にともなう腐食反応の推定を行った。この過程において、ボルトに複数の腐食反応（酸化）が生じる懸念が生じたことから、今回はモデル的に腐食電位が異なる2相が同時に存在する状態のサンプルを金属種を変えて作成し、その場合の腐食反応（酸化反応）をSECMにより分析・検討した。

（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

ボルト・ナットのモデルの塑性崩壊では図1に示す3通りの破壊モードが現れる。

モード1は、ボルトの遊びねじ部が引張りにより塑性崩壊を起こす場合であり、減肉のない規格ナットでは、このモードが現れる。モード2は、はめ合いねじ部のおねじ側のねじ山にせん断の塑性崩壊が生じ、ストリップングを起こす場合であり、ナット高さが減肉により不足する場合に現れる。モード3は、ナットの座面外周側に圧壊が生じる場合であり、ナット外径が減肉している場合に現れる。ナット高さ及びナット外径の減肉により、破壊モードが変化する条件をそれぞれ求めた。また、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。

2：ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調査

スタッドボルト約600本の減肉データを取得した。減肉は、片側ないし偏心して発生しているため、ねじ部の外径を直交する2方向を測定し、それぞれ楕円の短軸と長軸として、残存の断面積を計算し、評価に用いた。なお、最小径がねじの谷径を下回っていない場合には、ねじの強度は確保されているため、減肉がないと見なすこととした。

3：腐食解析技術の検討

スタッドボルトについて、代表的な2本をXRD分析した。このうちの1本は、保温タンクの海岸に向かう側（海側）に使用されていた典型的な1本であり、もう1本は、その反対側（陸側）に使用されていた典型的な1本である。

海側に使用された場合も、陸側に使用された場合も、主要な腐食生成物はマグネタイト（ Fe_3O_4 ）である点は共通している。また、海から飛来すると予想される塩化物（Cl）は分析により検出されなかった。

マグネタイトにおける鉄の酸化数は2価と3価の混合状態であり、マグネタイトがさらに酸化する腐食反応とボルトに残存する鋼が酸化する腐食反応とが競合して、二種の電位を駆動力とする腐食が発生する可

能性がある。そのため、今年度はモデル的に電位差のある二種の金属（アルミニウム Al とタングステン W）をクラッド化して、その界面での腐食状況を SECM により分析・調査して、二種の電位を駆動力とする腐食挙動は電位の低い腐食反応のみが進行して腐食生成物を増大させることを見出した。

D. 考察

1：ねじ部品の減肉許容基準の提案

減肉のないナットでは、モード1でボルト遊びねじ部が塑性崩壊するように規格が作られている。従って、破壊モードがモード2、またはモード3となる減肉は、ナットが所定の性能を満たしていないと考えれば、許容できない。この判定基準より、ナット高さ60%、ナット外径93.65%までの範囲がナットの減肉の許容範囲であることが明らかになった。ナット減肉が高さ60%、外径93.65%まで同時に生じている場合、モード1で塑性崩壊するため、高さと外径の減肉の許容範囲には相互作用がない。

ナットの減肉の許容限界におけるボルト・ナット系の剛性の低下率は、いずれの場合も10%未満であり、ボルト締付け力低下など締結性能に及ぼす影響は小さいことが予想される。

2：ねじ部品の減肉の計測技術の検討と実態調査

タンクのスタッドボルトの減肉量の影響因子について検討した。タンクの下部より上部で減肉が顕著である。上部から雨水が浸入することと、タンク外板の温度分布が影響している。タンクの海側、陸側という方角の影響は認められない。

3：腐食解析技術の検討

XRD, SECM の双方の腐食解析技術で腐食の発端および進展の過程（酸化反応）を分析できる可能性が示された。

通常の大気中で鋼上に生成する腐食生成物は熱力学的な安定性から考えると Fe_2O_3

のはずであるが、実際の環境では XRD 分析によるとマグネタイト (Fe_3O_4) が生成していることから、保温材下では、鉄の酸化数が2価と3価の混合であり耐食的な状況と推定される。この理由のひとつとしては酸素の供給が大気開放中よりも制限されているからと考えられる。塩化物は海岸への向きによらずに検出されなかったが、保温材により塩化物の飛来が制限されたと考えられる。

このような環境の腐食生成物がマグネタイト (Fe_3O_4) であることから、マグネタイト中の2価の鉄の酸化が3価に進む腐食反応と、残っているボルト肉厚を構成する鋼の鉄が参加される腐食反応が同時に生じる懸念があるが、今年度を実施したアルミニウムとタングステンのクラッド品について SECM 測定した結果からすると、電位のより低い金属の側のみが腐食することから、マグネタイトと鋼が競合して腐食する場合にも、いずれか電位の低いほうのみが腐食すると想定される。

ただし、実際の作製には技術的課題が残るが、マグネタイトおよび鋼のそれぞれの純粋なサンプルを作成し、その電位測定、およびマグネタイトと鋼が共存するサンプルでの SECM 測定を行い確認することにより、腐食反応がより確実となる。

E. 結論

平成29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、ボルト・ナット系の破壊モードは3種類あること、破壊モードの変化を基準とするとナット高さ60%、ナット外径93.65%までがナットの減肉の許容範囲であること、ナット減肉によるボルト・ナット系の剛性低下率は、たかだか10%未満であることを明らかにした。

ねじ部品の減肉の実態調査については、漏えいが発生した経年保温タンクの保温材下のスタッドボルトの腐食の事例を取り上げた。スタッドボルトの減肉測定にはデジ

タルノギスを用い、ねじ部の外径を直交する2方向を測定し、それぞれ楕円の短軸と長軸として、残存の断面積を計算し評価に用いた。スタッドボルト600本の減肉データを収集、分析を実施した。XRD、SECMによる分析は腐食生成物に適用可能であり、腐食で生成しているのはマグネタイト(Fe_3O_4)であった。なお、マグネタイトの再度の酸化を腐食速度の中に考慮する必要はないと考えられる。

今後は、ボルト頭部の減肉の許容限界、及びボルト・ナット系の剛性低下が締結性能に及ぼす影響について検討を進める必要がある。

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, R. Zhou: Effects of Nut thinning due to Corrosion on the Sealing Performance in Bolted Flange Joints under Internal Pressure, ASME PVP 2017 Conference, PVP2017-65160, 2017.

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