

課題番号	Q19T-01
課題名（和文）	生産設備における腐食減肉したねじ部品の衝撃強度に関する研究
課題名（英文）	Impact strength of threaded fasteners subjected to corrosion and metal loss in production facilities
研究代表者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 工学部機械工学科教授 氏名 辻 裕一
共同研究者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 工学研究科機械工学専攻 大学院生 氏名 大隅 成人
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名

#### 研究成果の概要（和文）

生産設備およびエネルギーインフラを始めとする社会基盤の安全性・信頼性確保を目指すことを目的に、設備の老朽化に伴うねじ部品の減肉に着目し、地震や事故を想定し、減肉ねじ部品による締結部の静的および衝撃強度を実験および数値シミュレーションによって明らかにした。実験では M6 ねじ部品を用い、準静的～10m/s の衝撃引張試験を実施した。減肉ねじ部品の衝撃強度と破壊モードに及ぼす減肉量とひずみ速度の影響を明らかにした。

#### 研究成果の概要（英文）

With the aim of ensuring the safety and reliability of social infrastructure such as production facilities and energy infrastructure, this study focused on the metal loss of threaded parts caused by corrosion of the aging of production facilities. Static and impact strength of fastening parts with metal loss was clarified by experiments and numerical simulations in cases of earthquakes or accidents. In the experiments, M6 bolt/nut assembly were used, and quasi-static to 10 m/s impact tensile tests were conducted. The effects of metal loss and strain rate on the impact strength and fracture mode of threaded parts were clarified.

## 1. 研究開始当初の背景

鋼材料や構造物の衝突安全性、あるいは衝撃強度の確保は、エネルギーインフラを始めとする社会基盤の安全性・信頼性確保にとって重要な課題である。最近では、2011年の東北地方太平洋沖地震及び津波による原子力発電所の重大事故を経験し、津波漂流物、竜巻飛来物等の衝突からの防護、水素爆発による構造物への影響等、検討が進められている。地震や事故による動的荷重による、構造物のねじ締結部の破壊、基礎ボルトの破断・過大な伸びの発生といった事例が多くみられ、衝撃荷重を受けるねじ締結部の構造健全性評価が急務である。

一方、製造業において、生産設備、あるいは附属施設の経年劣化を直接の原因とする労働災害、死亡災害が多く発生している。附属施設であるデッキ、プラットフォーム、サポートなどの屋外鋼構造物では、ねじ部品の減肉が多く見られる。ねじ部品は部材同士との接合に用いられ、その破壊は直ちに重大な災害に結びつく。そこで、臨海コンビナートのプラン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・余寿命評価方法の研究・開発を進めてきた。これまでの検討は準静的荷重を前提としており、衝撃荷重については未着手、未知の領域であった。

## 2. 研究の目的

ねじ締結部の衝撃強度を実験および数値シミュレーションによって検討し、地震や事故におけるねじ締結部の衝突安全性、あるいは衝撃強度を明らかにし、生産設備およびエネルギーインフラを始めとする社会基盤の安全性・信頼性確保を目指すことを目的とする。特に、生産設備の老朽化に伴い問題となっているねじ部品の減肉が、締結部の衝撃強度に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを優先課題とする。並行して進めてきたねじ部品の減肉に関する調査研究では、減肉の許容基準を準静的荷重に対して決定している。本研究の成果を踏まえ、準静的荷重の許容基準を衝撃荷重に拡大する検討を行う。

## 3. 研究の方法

ねじ部品およびねじ締結部の衝撃強度、ならびにねじ部品の減肉の影響を高速引張試験および準静的特性の数値シミュレーションの両面から検討する。

実験では、現有の高速衝撃負荷装置（最大荷重 50kN、最大ストローク速度 10m/sec）を用い、ねじ部品（最大呼び径 M6）、あるいは減肉させたナットとの組合せにおける衝撃強度および破壊モードの関連を明らかにする。試験荷重は、治具に貼付した半導体ひずみゲージと広帯域差動増幅器によって測定し、変位は試験機のシリンダーストロークとする。試験結果は、準静的引張試験で得られた強度および破壊モードとの比較を行うとともに、ストローク速度を変化させることにより衝撃強度に及ぼす荷重速度の影響を明らかにする。おねじ材料の引張特性とひずみ速度の影響を明らかにするため、軸部を細く削り出した試験片について衝撃引張試験を実施する。一方、衝撃試験により破断したねじ試験体について、破壊形態を詳細に調査して破壊モードを分類する。現在行っている準静的試験では、遊びねじ部の破断をモード1、ねじ山のせん断破壊（ストリップング）をモード2、ナットの圧壊をモード3としており、同様の分類が適用を試みる。

## 4. 研究成果

### (1) 減肉のないねじ部品の衝撃引張強度特性

図1は、減肉のないM6六角ボルトおよびボルト軸部削り出し丸棒試験片の準静的～衝撃引張試験の結果について、ひずみ速度と引張強さの関係を示す。六角ボルトおよび丸棒試験片ともに、ひずみ速度が上昇すると引張強さが高くなり、両者の強度レベルは等しい。山本ら<sup>(1)</sup>は切欠き試験片のRが大きいほど衝撃引張強さが小さくなることを示している。ねじの衝撃引張りでは、切欠き効果を示さないことを明らかにした。破断伸びについても両者の特性は同等であり、切欠き効果の影響は認められない。

破断ねじのマクロ破面はひずみ速度により大きく変化し、低ひずみ速度ではねじ山に沿ったらせん型の破面であるのに対し、 $1.1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ の高ひずみ速度

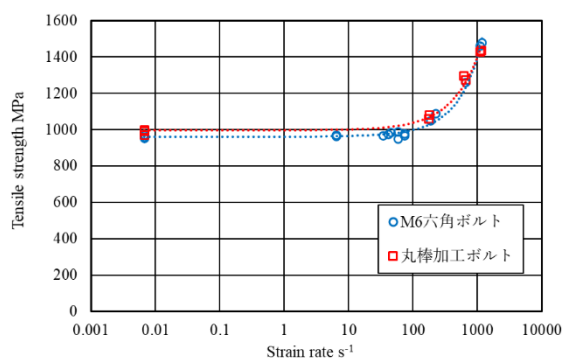


図 1 ボルト/丸棒試験片の衝撃強度・準静的強度とひずみ速度の関係

ではせん断型の破面に変化する。SEMによる破面観察では、等軸ディンプル、あるいは伸張ディンプルが観察された。

## (2) 減肉ねじ部品の衝撃引張強度特性

減肉ナットを想定して、高さ  $h = 4.8 \text{ mm}$  の M6 ナットを切削加工し、ナット高さ  $h = 4.2 \text{ mm}$ 、 $3.6 \text{ mm}$ 、 $3.0 \text{ mm}$  の 3 種類の減肉ナットを用意した。図 2 にナット高さに対するボルト/ナットの衝撃強度・準静的強度の関係に及ぼす引張速度の影響を示す。引張速度の上昇に伴い引張強度が高くなり、ナット高さ  $h$  の減少に伴い引張強度は低くなる。ナットの減肉の有無、減肉量にかかわらず衝撃強度は準静的強度を常に上回ることが確認された。減肉ナットでは、準静的引張試験 ( $h = 4.2 \text{ mm}$ ) を除き、衝撃引張りにおける破断形態は全てねじ山のせん断破壊 (ストリッピング) であった。これは、ナット高さの減少、すなわちかみ合いねじ山数の減少により、1 山当たりの分担荷重が増加するためである。伸びに関しては、減肉のないナットと比較すると、引張速度が低い領域では伸びが大きく、引張速度が高い領域では伸びが小さい。

## (3) 衝撃荷重に対するナットの減肉許容基準の検討

図 2 に減肉のないナットの準静的強度  $18.4 \text{ kN}$  のレベルを示すが、減肉ナットの準静的強度は、 $h = 4.2 \text{ mm}$  未満の場合に、この値を下回る。すなわち、設計段階で想定した引張強度に達することなく、ねじ

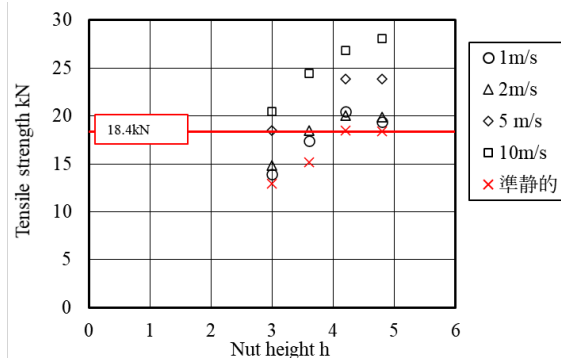


図 2 減肉ナットのナット高さに対する準静的強度と衝撃強度の関係

部品が破壊することを意味する。さて、弾塑性 FEM 解析により減肉ナットの静的強度を検討した結果では、ナット高さがねじの呼び径の 70% を下回ると破壊モードが変化してストリッピングが生じるとともに引張強度が低下することが示されている。この解析結果は、準静的引張試験結果とよく一致している。ここで、減肉ナットの衝撃引張強度が準静的引張強度を常に上回ることから、弾塑性 FEM 解析で求めた静的強度に基づくナットの減肉許容基準 (ナット高さ 70%) を、衝撃荷重を受ける減肉ナットに適用することが可能であると考えられる。なお、強度低下発生の境界である  $h = 4.2 \text{ mm}$  において、準静的引張りとは衝撃引張りで破壊モードが変化することは興味深い現象である。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 大隅成人, 辻裕一, ねじの衝撃引張強度, 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス, OS1533.
- ② 齋藤翔太, 齋藤博之, 辻裕一, 3D 計測を用いるねじ部品の減肉評価, 山梨講演会 2020 講演論文集, No.200-3, B31.
- ③ 辻裕一, 新村稔, 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, Vol.69, No.10, 507-513.