

ボルト部の腐食減肉による締め付け軸力低下に関する FEM による検討

長岡技術科学大学 学生会員 荻野尋紀
長岡技術科学大学 正会員 岩崎英治

1. はじめに

昨今、高度経済成長期に建設された構造物の老朽化が指摘されており、こうした構造物に対する維持管理は喫緊の課題となっている。鋼構造物においては、特に腐食劣化が問題となっており、その中でもボルト継手付近は、その複雑な形状から、塗装被膜が均一になりにくいことや、腐食の原因となる飛来塩分が付着しやすいなどといった理由で、腐食が発生しやすい。また、腐食によるボルトの減肉に起因する、摩擦接合継手耐力の低下も指摘されている。故に、鋼構造物の維持管理において、ボルト接合部の腐食は大きな課題となっている。

こうしたボルトの腐食による耐力低下に関しては、腐食促進試験により再現した腐食継手部の実験¹⁾や、実橋の腐食ボルトを用いた残存軸力試験²⁾、腐食ボルトをモデル化した解析的検討がなされている。これらの研究では、ボルト頭部やナットに腐食が発生することで、ボルト軸力が低下することが指摘されている。しかし、その具体的なメカニズム等は未解明で、実橋での腐食状況に適用するに至っていない。また、超音波を用いてボルト軸力を測定する技術³⁾も開発されているが、これはボルト表面の研磨を必要としており、腐食したボルトに対し、現地で測定を行うことには適していない。そこで、本研究では、実橋での点検・診断への活用を目指し、FEM 解析を用いて腐食による軸力低下のメカニズムを検討する。

2. ボルト接合部の解析

腐食減肉時のボルト軸力減少について解析するため、ボルト接合部付近のモデルを作成し、FEM 解

析を行う。

(1) 解析上の仮定

ボルト接手部においては、ボルトを中心に、同心円状に締め付けによる応力が伝達する。また、ナットにおける腐食は、大きな偏りを持たずに全方向から進展する。そのため、腐食に伴う応力変化についても同心円状に発生するものと仮定することで、軸対称の問題とした。

(2) 解析モデル

解析にあたり、図-1 のような解析モデルを設定し、軸対称解析を行うこととした。ボルトの締め付けにあたっては、ボルトの降伏耐力の 75% 程度の強い力で締め付けを行っており、部分的に降伏が発生している可能性がある。これを考慮し、本研究では弾塑性解析を行うこととする。このときの応力ひずみ関係にはひずみ硬化を考慮しない弾性完全塑性体を仮定する。また、ナットと座金、座金と添接板、添接板と母材、座金とボルトの境界を接触面とし、接触判定を行うこととした。

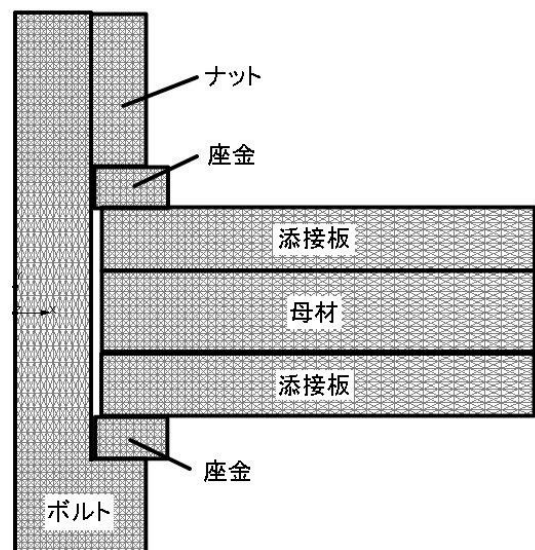


図-1 解析モデル

(3) 検討に用いる各種条件

本研究においては、実橋において使用されることの多いボルトセットを用いて、解析を行うこととした。ボルトおよびナット、座金についてはF10TM22に準拠し、母材および添接板についてはSS400、SM490Y、SM570を適用した。また鋼材厚については、母材を12mm、添接板を9mmとした。

(4) 解析手順

モデルに対し、まずボルト中心部における引張応力の平均値が所定の締付け応力と同等になるように、ボルトとナットの境界部に対して強制変位を与える。次に腐食減肉状態を再現するため、1mm四方に区切られたナットの有限要素を取り除いていく。このとき、有限要素はナット外縁の列から、ナット上部より順に取り除く。これによりモデル内で生じる軸力等の変化から、腐食減肉と軸力低下の関係性を検討する。

3. 解析結果および考察

(1) 有限要素除去量と残存軸力低下の関係性

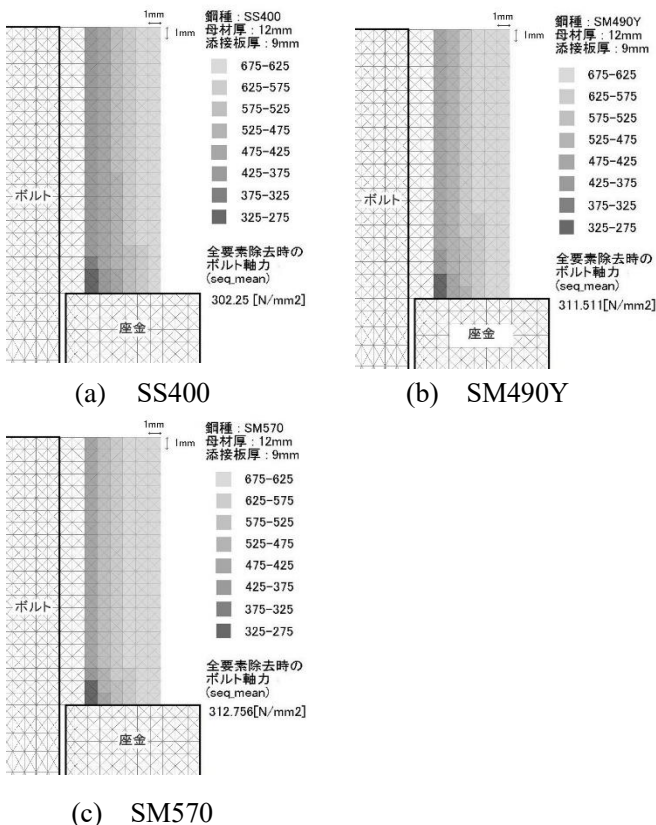
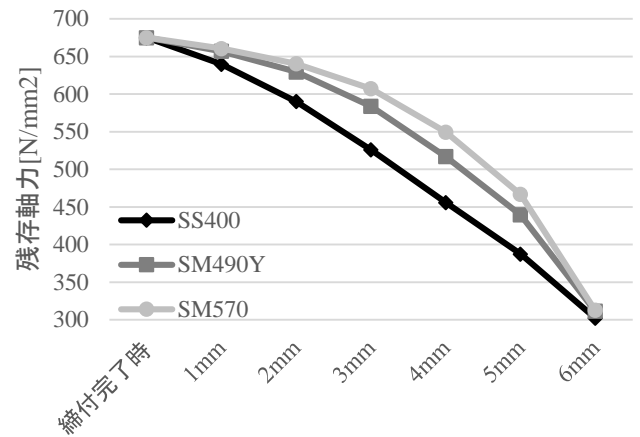


図-2 有限要素除去位置と残存軸力の関係

ナット部の要素除去量と残存軸力の関係



ナット外縁からの要素除去量

図-3 要素除去量と残存軸力の関係

図-2に、ナット外縁より1mmずつ、座金接合部まで有限要素を除去した際の残存軸力を、各鋼種において比較した結果を、図-3に、ナット部の各有限要素を除去した際の残存軸力量を示す。図-2および図-3より、有限要素除去量の増加に伴い、残存軸力が低下し、またボルト外縁から5mmまででは、鋼材の降伏応力が上昇するほど、残存軸力も大きくなる傾向が見て取れる。こうした結果から、腐食減肉による軸力減少は母材、および添接板における使用鋼材の降伏応力に影響を受けると考えられる。

一方、図-3において、有限要素をナット外縁から6mmまで除去した際の残存軸力は、上記の傾向とは異なり、いずれの鋼種においてもほぼ同等の値をとっている。ここで図-2を見ると、いずれの鋼種においてもナット外縁から6mm、ナット上部から20mmを超えて有限要素を除去した際に、急激に残存軸力が減少しており、母材、および添接板における使用鋼材の降伏応力以外にも要因があると考えられる。

(2) 残存軸力低下の要因

上記の結果から、軸力減少が発生する要因としてまず考えられるのが、鋼材の部分的な降伏である。そこで、塑性ひずみの発生、進展に着目し、残存軸力との関係性を検討した。

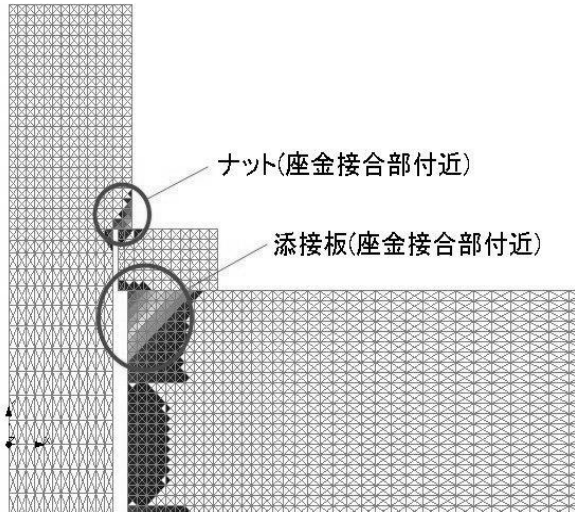


図-4 塑性ひずみ発生状況

図-4 に、有限要素除去時の塑性ひずみの発生状況を示す。図-4 より、顕著な塑性ひずみはボルトと添接板のそれぞれ座金との接合部付近に発生していることがわかる。この2か所のひずみについての進展と、残存軸力の関係性について、図-5 に示す。

図-5 より、ナット外縁から5mmまでは、有限要素除去に伴い添接板の塑性ひずみ量が増大し、有限要素除去量がナット外縁から6mmになると、添接板の塑性ひずみは増大しなくなる傾向が見て取れる。一方、ナットの塑性ひずみはゆるやかに増大した後、ナット外縁から6mm、ナット上端から20mmより多く有限要素を除去した際に大きく増大している。またこの傾向は使用鋼材の降伏応力が大きくなるに従い、より顕著に表れている。さらに、残存軸力はこれらの塑性ひずみ量が増大するに従い、減少していることがわかる。

これらの結果から、ボルトの残存軸力減少は、ナットおよび添接板の塑性ひずみの発生および進展に起因すると考えられる。すなわち、有限要素除去によるナット-座金接触面の減少により増大した応力が、添接板およびナットに加わり、ナットよりも降伏応力の低い添接板から塑性化していく。さらに要素を除去していくと、ナットにも塑性ひずみが発生する。図

-3 に示した結果において、ボルト外縁から6mmまで

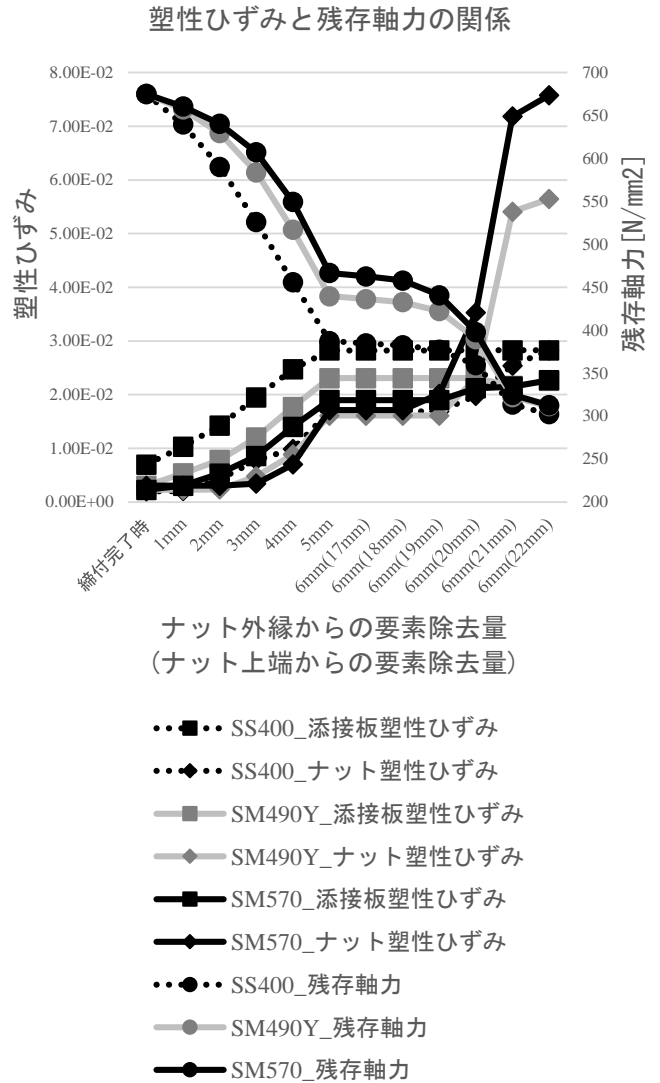


図-5 塑性ひずみ発生量と残存軸力の関係

の有限要素を除去した際に、鋼種に関係なく残存軸力はほぼ同様の値をとったが、これは図-5 から明らかなように、ナットにおいて塑性ひずみが急速に発生、および進展したためであると考えられる。

腐食減肉による軸力減少は、こういった局所的な塑性化により応力抜けが発生することに起因するものと考えられる。

4. 結論

ボルト接手部における、ナットの腐食減肉に伴う、ボルト軸部の残存軸力低下について、その発生要因は鋼材の部分的な降伏にあるということが明らかと

なった。また、腐食減肉量が小～中程度の場合には、添接板において部分降伏が進展するため、軸力低下量は使用鋼材の降伏応力に影響を受け、一方で腐食減肉量が極めて大きくなると、ナットの部分降伏が急速に進展するため、使用鋼材の降伏応力による軸力低下量への影響が小さくなる傾向が見られた。

今後は使用鋼材の部材厚の違いによる影響等も検討するため解析を行い、腐食減肉と残存軸力低下の関連付けを進め、実橋における維持管理への適用を目指す。

参考文献

- 1) 橋本国太郎, 築地貴裕, 杉浦邦征: 腐食劣化した高力ボルト摩擦接合継ぎ手の残存耐力に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.2, pp.159-173, 2013.
- 2) 下里哲弘, 田井政行, 有住康則, 矢吹哲哉, 長嶺由智: 腐食劣化した高力ボルトの残存軸力評価に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.59A, pp.725-735, 2013.
- 3) ダコタ・ジャパン「超音波ボルト軸力計」
<https://www.dakotajapan.com/maxseries.html> (参照 2018-9-27)