

# 連結板の腐食減肉に伴うすべり耐力低下メカニズムに関する解析的研究

設計工学講座 大城 泰樹

## 1. はじめに

高力ボルト摩擦接合継手は鋼橋の中でも腐食しやすい部位の一つである。しかしながら、腐食減肉が生じた継手部の評価法は確立されておらず、今後、著しく増加することが想定される腐食鋼橋の適切な維持管理を行うためにも、腐食減肉が生じた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力評価を行う必要がある。

高力ボルト摩擦接合継手の腐食減肉とすべり耐力に関する研究はこれまでにいくつか行われている。山下らは、写真-1 に示すような連結板の特徴的な減肉形状に着目し、ボルト孔近傍の減肉量を用いたすべり耐力評価法を提案している。しかしながら、限られた継手形式や減肉形状に基づく手法であり、汎用的な評価手法とするためにも、腐食減肉を有する摩擦接合継手のすべり耐力が評価可能な解析モデルの構築とすべり耐力の低下メカニズムの解明が不可欠である。

そこで本研究では、腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の解析モデルの構築を行い、連結板の腐食減肉に伴うすべり耐力低下メカニズムを明らかにすることを目的とする。

## 2. 腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の解析モデルの提案

本章では、文献 1) で行われた模擬腐食および実腐食連結板を用いたすべり試験の再現解析を行い、解析モデルの提案と妥当性について検討を行う。

### 2. 1 解析モデルと解析ケース

#### (1) 解析モデル

文献 1) で行われた摩擦接合継手の片側に模擬腐食連結板と実腐食連結板を用いた「片側腐食試験」の再現解析を行った。試験体寸法を図-1 に示す。試験体は 1 行 2 列 (2 面摩擦) 継手である。なお、母板での純断面降伏がすべり耐力に影響を及ぼさないよう、すべり強度/母板降伏強度比  $\beta$  値が 0.8 以下のすべり先行型となるような寸法としている。

解析モデル形状と要素分割例を図-2 にそれぞれ示す。解析モデルには、8 節点低減積分ソリッド要素を用い、要素サイズは 0.5-2mm とした。模擬腐食モデルは対称性を考慮し、対象試験体の 1/2 をモデル化し、境界面にはそれぞれ対称条件を設定している。なお、実腐食モデルは 1/1 モデルですべてモデル化している。

材料特性は、母板および連結板、高力ボルトともにヤング率を  $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比を 0.3 としている。各部材の降伏応力は母材を  $415 \text{ N/mm}^2$ 、模擬腐食連結板および新材連結板を  $396 \text{ N/mm}^2$ 、実腐

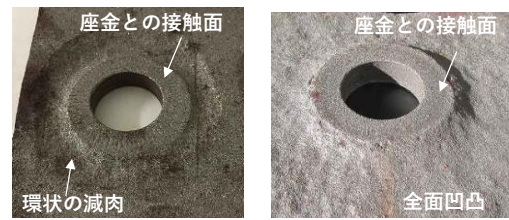


写真-1 連結板の腐食減肉例

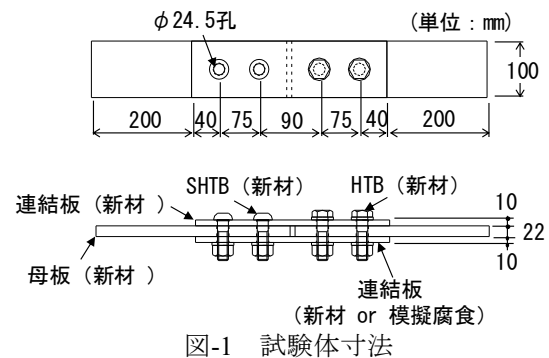


図-1 試験体寸法

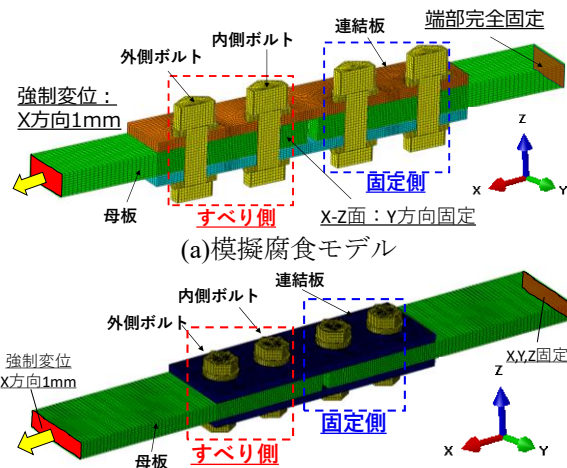


図-2 解析モデル

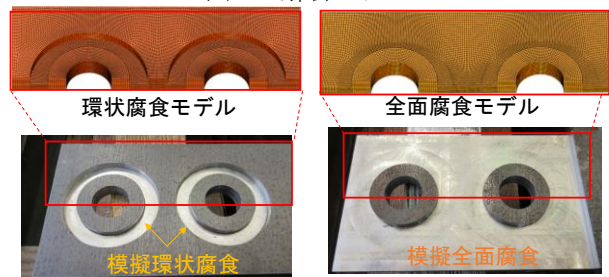


図-3 模擬腐食連結板のモデル化

食連結板を  $447 \text{ N/mm}^2$ 、高力ボルトを  $900 \text{ N/mm}^2$  とする。ここで、母板および連結板の降伏応力値は、試験片の引張試験を行い、算出した値である。なお、本解析に用いた解析コードは汎用有限要素解析ソフト Abaqus/Standard 2017 を用いている。

## (2)解析ケース

連結板の腐食減肉は写真-1のように2種類の特徴的な形状を示す。環状モデルは座金周辺が著しく環状に腐食減肉しているパターン、全面モデルはボルト孔芯から離れた位置まで広範囲に渡り全面的に広がったパターンである。なお、両パターンともに座金直下の連結板は減肉し難いという特徴的な減肉形状を示す。

連結板特有の2種類の腐食形状が摩擦接合継手のすべり耐力を低下させる要因の検討を行うため、模擬腐食モデル(図-3)と実腐食モデル(図-4)を作成した。模擬腐食モデルでは、健全部の板厚を10mm、減肉部の板厚を5mmとし、環状腐食モデルでは座金周辺に幅10mmの円弧の要素を、全面腐食モデルでは座金直下を除く全面の要素を削除することで減肉を再現している。実腐食モデルでは、レーザー計測計(測定間隔2mm)で計測した結果に基づき、減肉形状の再現を行った。上記の基準モデル(減肉なし)1ケース、模擬腐食モデル2ケース、実腐食モデル2ケースの合計5ケースの解析を行った。

### 2. 2 解析手法

解析手順は、先ずボルト軸力を導入する。その後、図-2に示す固定側の母板端部を固定し、すべり側の母板端部に強制変位1mmを与え、連結板と母板間ですべりを生じさせる。

ボルト軸力の導入法は、締結力モデル<sup>2)</sup>を用いている。本モデルでは、連結板の腐食減肉がすべり耐力特性に及ぼす影響を明確にするため、片側ですべりを発生させるよう文献1)の試験条件を参考に、片側をすべり側、もう一方を固定側とする。すべり側の導入軸力は試験時に計測した軸力より246kNとしている。固定側の軸力は、試験時に用いた超高張力高力ボルトの標準軸力329kNとした。

各部材間の接触条件には、等方性クーロン摩擦モデル<sup>2)</sup>を用いた。本解析で設定した摩擦係数は、基準(減肉なし)モデルの実験結果より算出した値で設定した。なお、解析でのすべり耐力の定義は、荷重と開口変位曲線の最大荷重とする。

### 2. 3 解析モデルの妥当性の検証

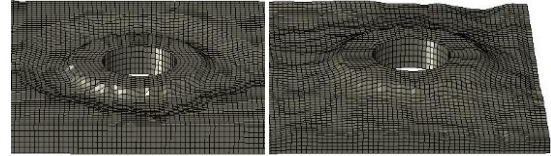
#### (1)荷重-開口変位

図-5に解析結果および実験結果より得られた、基準モデル(黒線)、環状モデル(青線)、全面(赤線)モデルにおける荷重と母材間の開口変位の関係を示す。同図-(a)の模擬腐食モデルでは、基準モデルと環状モデルは、初期剛性からすべりが生じるまでの挙動は実験と解析で良く一致している。全面モデルでは、実験と解析ですべり耐力に若干の差異が見られるが、両結果共に250kNを超えた辺りから非線形挙動を示し、開口変位の増加傾向は類似している。

同図-(b)の実腐食モデルでは、各ケース共に初期



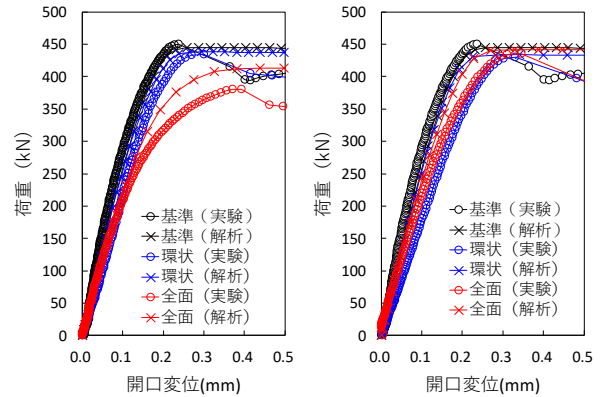
【連結板写真】



【解析モデル】

(a)環状腐食 (b)全面腐食

図-4 実腐食連結板のモデル化



(a)模擬腐食 (b)実腐食

図-5 荷重-開口変位関係

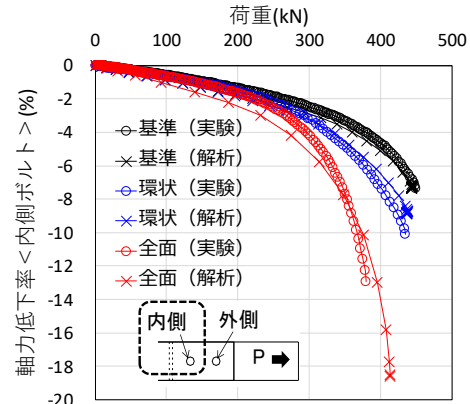


図-6 内側ボルト軸力低下率(模擬腐食)

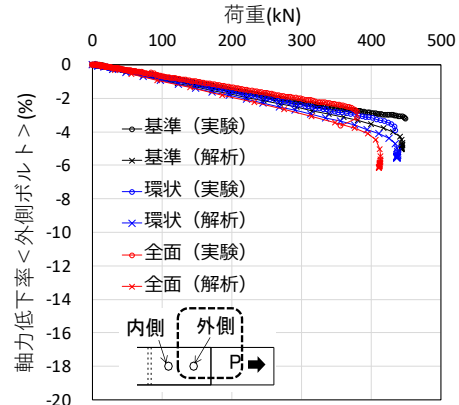


図-7 外側ボルト軸力低下率(模擬腐食)

の挙動からすべり耐力まで概ねすべりの挙動を再現出来ていると考えられる。なお、本解析では、すべりまでの挙動を検討するためにすべり後の挙動に大きく影響する動摩擦係数については設定していない。そのため、実験結果で見られた最大荷重後の急激な荷重低下は再現できていないが、すべり発生までの挙動を概ね再現できていると考えられる。

## (2)残存軸力

図-6、図-7 に模擬腐食試験の解析と実験により得られた高力ボルトの軸力低下率の推移を示す。内側及び外側ボルトともに、すべり試験中の軸力の低下挙動については概ね再現できているといえる。それぞれの挙動に着目すると、外側ボルトの軸力低下率は、3つのケースでほとんど差異はなく、解析結果では5%程度であった。一方、内側ボルトでは3つのケースで軸力低下率に差異が生じており、解析結果より得られたすべり発生時の軸力低下率は基準モデル7.3%、環状モデル8.9%、全面モデル18.6%となっている。実腐食モデルについては、後述する図-9に軸力挙動を示しており、模擬腐食モデル同様に再現性の高い結果となっている。

以上の結果より、模擬腐食連結板の全面腐食モデルにおいてすべり耐力に若干の差異があるものの、傾向は十分に再現できていると考え、本モデルを用いて腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下メカニズムの検討を行うこととした。

## 3. 連結板減肉に伴うすべり耐力低下メカニズム

本章では、連結板の腐食減肉に伴うすべり耐力低下メカニズムについて、模擬腐食モデルと実腐食モデルを用いて検討を行った。

### 3.1 模擬腐食モデルによる検討

高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は、ボルト軸力に大きく依存することは広く知られている。図-6の内側ボルトの軸力低下率からも、連結板の腐食減肉が進行すると軸力の抜けが大きくなっており、すべり耐力低下の要因の一つといえる。一方で図-7に示す外側ボルトの軸力低下率は連結板の腐食減肉による影響はほとんど見られない。ゆえに、本節では内側ボルトに着目し、軸力の低下と連結板の降伏状態について検討を行った。

#### (1)軸力低下と連結板の降伏挙動

図-8 に各モデルの内側ボルト軸力低下率と、軸力低下率の挙動が非線形的に急増する変曲点(➡印)とすべり発生時(⇨印)における連結板表面、断面、摩擦面のミーゼス応力コンター図を示す。応力コンター図は降伏状況が分かりやすいよう3色で示しており、赤色の領域が降伏に達していることを表す。

各モデルにおける変曲点時のコンター図を比較すると、いずれのモデルにおいても内側ボルト孔縁且

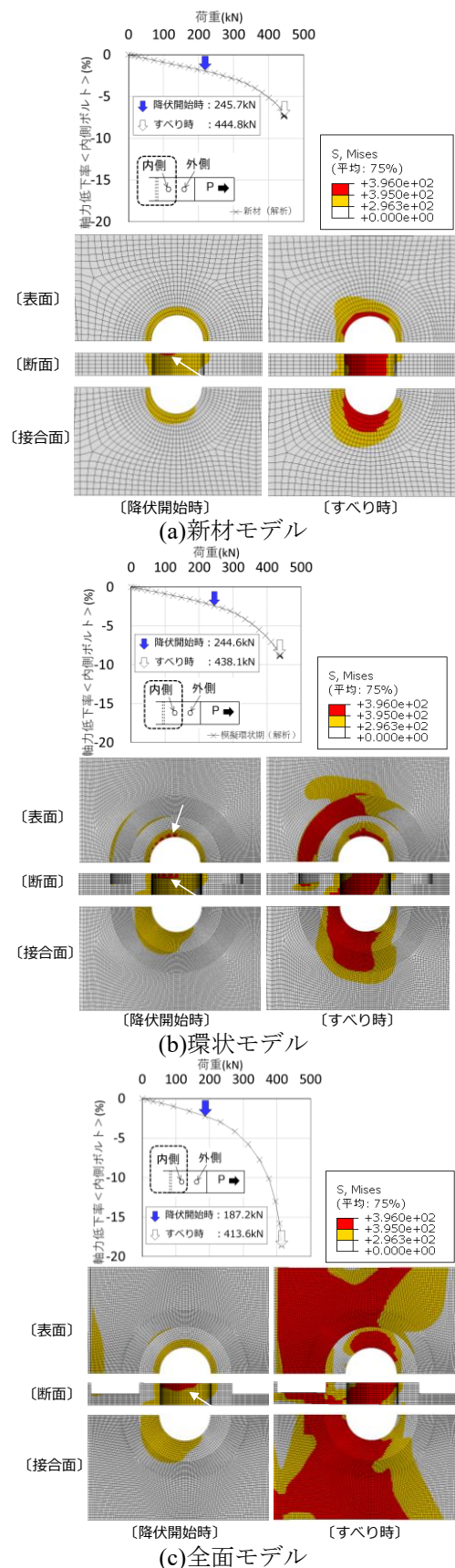


図-8 軸力低下率と連結板応力状態 (模擬腐食)

つ表面側を起点(白矢印部)として降伏している。降伏開始時の荷重は、新材モデルと環状型モデルでは、

245kN 程度でほぼ同値であるが、全面型モデルでは187kN と他のモデルより早期に降伏が生じていることがわかる。

すべり発生時のコンター図に着目すると、全てのモデルでボルト孔周りを起点に降伏が進展している。環状モデルは孔後面の座金周りやボルト孔縁でも板厚方向に降伏領域が進展している。軸力低下が特に大きかった全面モデルでは、孔後面の継手中心側とボルト孔周辺を起点として高い応力が発生しており、ボルト孔縁は環状モデルと同様に板厚方向に降伏領域が進展している。さらに純断面方向に応力が高くなっており、全断面で降伏が生じているといえる。

連結板に引張力が作用した場合、ポアソン効果により連結板の板厚は減少するため、断面に降伏が生じ、ひずみが急激に増大すると、連結板の板厚もこれに伴い、板厚減少量も増大すると考えられる。この連結板の板厚減少が高力ボルトの軸力低下を引き起こすと推察され、降伏領域が広範囲となった全面腐食モデルでの軸力低下が大きくなった要因であるといえる。

### 3. 2 実腐食モデルによるメカニズムの検証

図-9 に実腐食モデルの各ケースにより得られた軸力低下率とすべり発生時のミーゼス応力コンター図を示す。応力コンター図は図-8 と同様に、降伏状況が分かりやすいよう 3 色で示しており、赤色の領域が降伏に達していることを表す。実腐食モデルでは各ケース共に、内側ボルトの軸力低下率が約 6~8%、外側ボルトの軸力低下率が約 3~5%と大きな差は見られなかった。

すべり発生時の応力コンター図を比較すると、各モデルで内側ボルト孔縁の一部で降伏に達しているものの、連結板全体ではほとんど降伏が生じていない結果となった。それゆえ、各ケースの軸力低下率に大きな差異が生じておらず、すべり耐力に差異が生じていない結果となったと推察される。

以上の結果より、連結板の腐食減肉によるすべり耐力低下は、連結板の孔周辺での降伏に伴うボルト軸力低下が主要因であるといえる。

### 4. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- 1) 腐食連結板を有する摩擦接合継手のすべり耐力特性評価が可能な解析モデルを構築した。
- 2) 基準（減肉なし）モデルではすべり発生時にボルト孔近傍で局所的に降伏が生じるだけだが、環状腐食時は孔後面の減肉部で、全面腐食時は孔後面の減肉部で降伏領域が広がる。
- 3) 連結板の減肉により孔周辺で降伏が生じることで、ポアソン効果による板厚減少が助長され、高力ボルト軸力が低下する。これによりすべり耐力低下が引き起こされる。

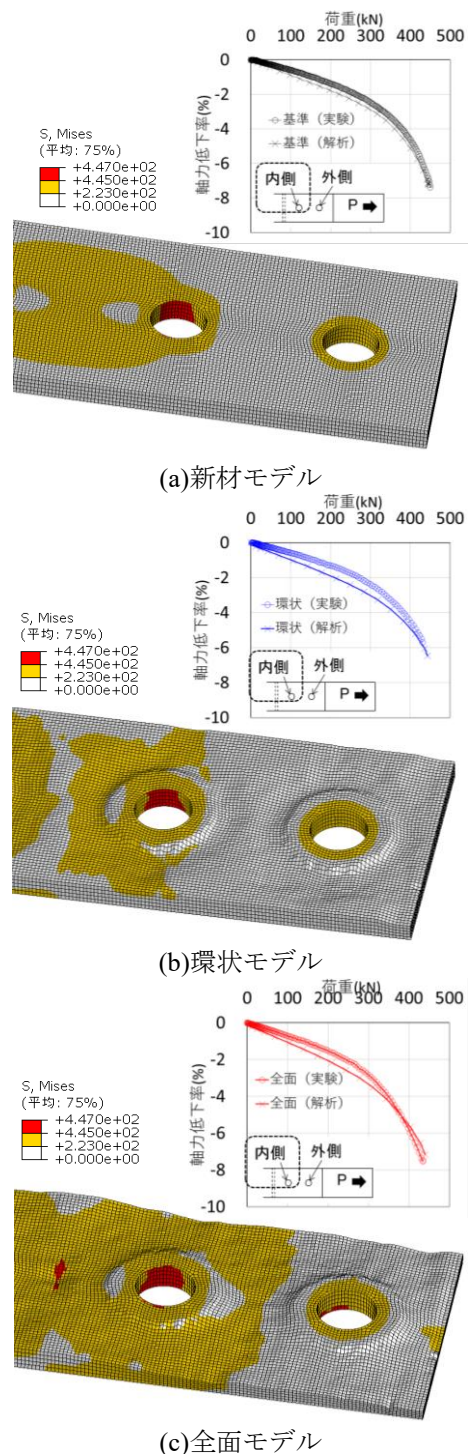


図-9 軸力低下率と連結板応力状態（実腐食）

今後は構築した解析モデルを用いて、減肉量や継手形状をパラメータとしたパラメトリック解析を行い、一般性のあるすべり耐力評価手法の構築を行う。

#### 参考文献

- 1) 高力ボルト摩擦接合継手における連結板の腐食減肉形状とすべり耐力特性に関する研究、土木学会論文集 A1, Vol.74 No.3, pp.359-375、2018.
- 2) Dassault Systems : Abaqus2017 オンラインドキュメンテーション