

# 高力ボルト摩擦接合を対象とした非線形 FEM 解析モデルに関する研究

構造工学研究室 厚地大樹

## 1. 序論

我が国では、高度経済成長期に架設された多数の鋼橋の腐食劣化が問題となっている。鋼橋の腐食劣化は桁端部近傍で生じることが多く、損傷が進んだ場合、写真 1-1 に示すように、ウェブ-下フランジ接合部で破断する場合がある。

一般的に、腐食損傷の補修には、当板ボルト工法が用いられる場合が多い(写真 1-2)。この工法は、摩擦接合を基本にすべりを起こさないことを前提として設計されている。既往研究において、補修効果は実証されている<sup>1)</sup>が、当板の板厚等が補修効果に及ぼす影響は明らかではない。

そこで本研究では、当板ボルト工法を対象とした非線形 FEM 解析モデルを提案し、提案モデルの妥当性の検証と、板厚が補修効果に及ぼす影響を検討する。また、本研究では、パラメトリックに解析を行うため、ばね要素を用いたモデル化を目指す。

## 2. ばね要素を用いた当板補修のモデル化の提案

### 2.1 解析モデル概要とばねの設定

ばね要素を用いた M22 のボルト 2 本の解析と、実際に行った実験とを比較検証し、当板のすべり挙動の再現性の検討を行う。試験体を写真 2-1 に、ばねの概略図を図 2-1、解析モデルを図 2-2 に示す。ボルト 1 本の実験結果より、ボルト 1 本分のばね要素に設定するすべり荷重を 263kN、剛性を 2233kN/mm とした(図 2-3)。

また、当板のばね要素に設定するすべり荷重については、道路橋示方書より、次式で求める。

$$P_s = \mu \cdot m \cdot N_d \cdot n$$

$\mu$ :すべり係数  $P_s$ :すべり荷重  $m$ :接触面数  
 $n$ :ボルト本数  $N_d$ :設計ボルト軸力

剛性は接触面処理が同じ条件の実験値を用いた。支圧開始は添接板と母材のずれが 2.5mm 生じたときと仮定し、支圧剛性は既往研究より 300kN/mm と設定した。

### 2.2 ばね要素によるすべり挙動の再現性の検討

図 2-4 は、ボルト 2 本の実験と解析の荷重-開口変位グラフである。剛性は、概ね一致し、すべり荷重は 30kN 程実験が強いが、摩擦係数に換算すると 0.03 の差であり、顕著ではない。このことより、ボルト 1 本分のばね要素をボルト 2 本にそれぞれ設定することによって、当板のすべり挙動を概ね再現することができたため、複数のボルトを扱う当板ボルト工法にばね要素を用いることが可能であると考えられる。

## 3. 提案手法によるウェブフランジ破断部に対する当板補修の再現性の検証

提案手法の妥当性を検証するために、写真 3-



鋼プレートガーター橋 ウェブと下フランジの破断  
 写真 1-1 鋼桁端部の腐食事例



写真 1-2 当板ボルト工法

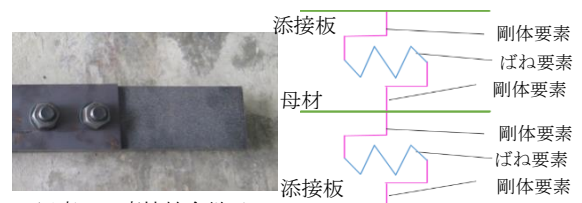


写真 2-1 摩擦接合継手

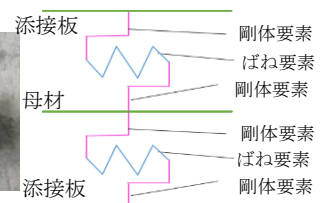


図 2-1 ばね要素の概略図

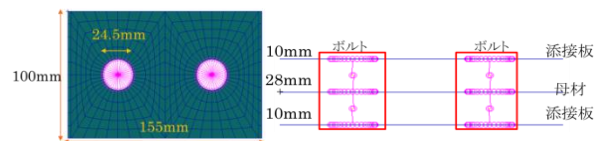


図 2-2 摩擦接合継手の解析モデル

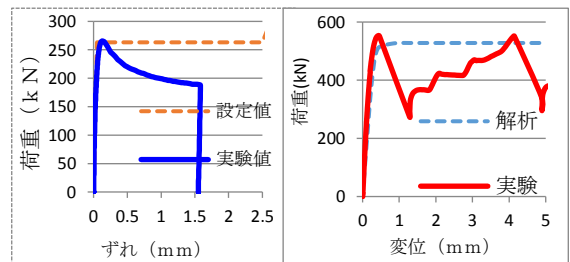


図 2-3 ばね要素の設定

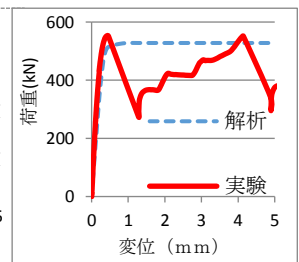


図 2-4 ボルト 2 本の荷重-開口変位グラフ

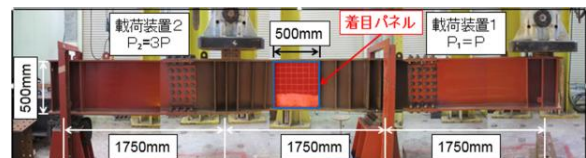


写真 3-1 セン断耐荷力試験体

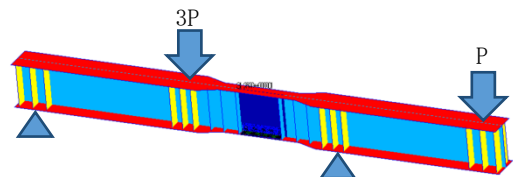


図 3-1 セン断耐荷力試験体の FEM 解析モデル

1) に示す腐食模擬試験体を用いたせん断耐荷力実験結果と、作成した図 3-1 の FEM 解析モデルの結果について比較検証を行った。なお、当板ボルトモデルを導入前の健全モデルや損傷モデルの妥当性については事前に解析し、確認を行っている。

### 3.1 FEM 解析モデルの概要

本研究モデルは、既往の研究によりすべり係数:0.4, 接触面数:2, ボルト本数:1, 設計ボルト軸力:165kN として計算し、当板のすべり荷重を 132kN とした。初期剛性は、事前に行った接触面の条件が等しい引張試験を行い、その結果より 2000kN/mm とした。ばね要素にこれらの条件を荷重一ずれの関係で設定した。ウェブの板厚は 3.2mm で、尚且つ、実測した初期たわみを 25mm ピッチで挿入した。当板とウェブ、当板と下フランジは、面方向にすべるようにばねを 2 方向に作成した(図 3-3)。部材ごとの降伏応力を挿入した。以上の条件を適用し、解析モデルの妥当性の検証を行った。

### 3.2 提案手法の妥当性

図 3-4 に当板ボルトモデルの実験と解析の荷重一変位グラフを示す。実験の方が、非線形性が早いですが、比較的簡単な本研究モデルを考えると、妥当な結果だといえる。面外方向の変形を実験と解析で比較すると(図 3-5)、当板の上でせん断座屈がおきており、概ね変形において一致する。ウェブの中心(図 3-5 の白丸)の面外変形量を実験と比較した。図 3-6 に結果を示す。非線形の傾向が類似的である。以上のことにより、実験を解析で概ね再現することができたといえる。

また、ばね要素の相対変位を用いれば、すべりを判断できる可能性がある(図 3-7)。

### 4. 当板の板厚が当板補修に及ぼす影響

当板の板厚をパラメータとした解析を行った。当板の板厚が増減すると曲げ剛性や伸び剛性が変化する。ヤング率を各板厚パラメータの増減にあわせる事によって、曲げ剛性に対する換算板厚とした。1 倍が実験と同じ板厚(web:4.5mm, flg:9mm)で、0.1 倍, 0.5 倍, 2 倍, 3 倍の計 4 パラメータの解析を行った。荷重一変位グラフを図 4-1 に示す。解析の結果、本研究モデルでは、換算板厚を 2, 3 倍に増やしても変化はみられなかった。換算板厚を半分にすると 10kN 程, 0.1 倍にすると 30kN 程荷重低下が見られたが、顕著ではない。以上のことより、本研究モデルでは、板厚が補修効果に及ぼす影響はほとんどないことが結果として出た。しかしながら、換算板厚を極端に低くしても、荷重が 100kN 程度しか低下しないという、実現象との乖離がみられた。解決するためには、さらなる解析モデルの検討を行う必要がある。

### 5. 結論

1) ばね要素を用いた当板ボルト工法の FEM 解析モデルを提案した。

2) 提案した解析モデルによりせん断座屈形状、面外変形量、せん断耐荷力を再現することが可能である。

3) ばね要素の挙動ですべりの判定ができる可能性がある。

4) 本研究モデルにて、当板の板厚が補修効果に及ぼす影響はほとんどみられなかった。

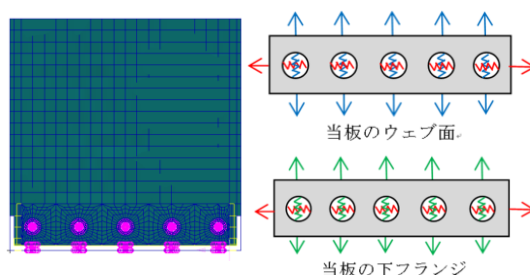


図 3-2 当板ボルトモデル 図 3-3 2 方向のばねの概略図

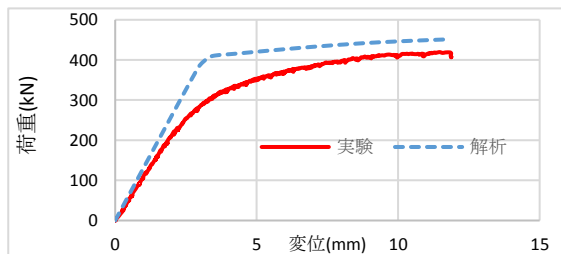


図 3-4 荷重-変位グラフ

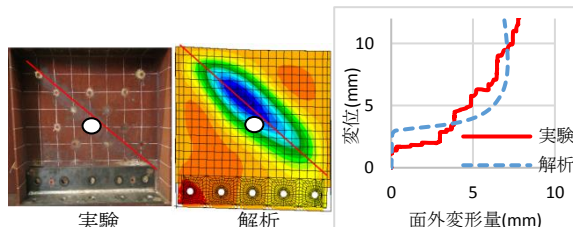


図 3-5 せん断座屈の形状 図 3-6 面外変形-変位グラフ

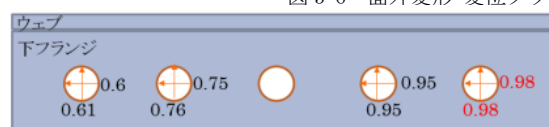


図 3-7 変位 4mm 時の下フランジのすべり

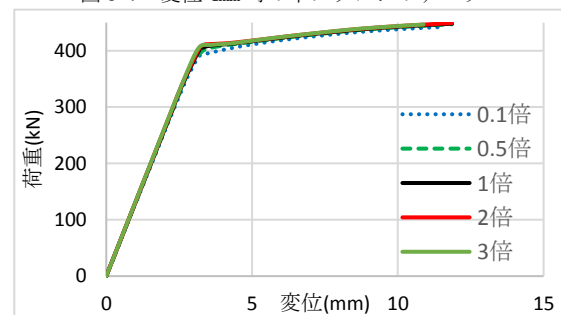


図 4-1 当板の板厚をパラメータとした荷重-変位グラフ  
参考文献 1) 利光崇明, 下里哲弘, 有住康則, 玉城喜章, 島袋秀也, 長嶺由智: 損傷を受けた鋼 I 桁端部腹板の補修法に関する実験研究, 土木学会西部支部沖繩会, 第 3 回技術研究発表会, Session3, pp. 88-91, 2013.