# トラス構造の軸力伝達型部材の連結構造に適用した

## 非突出型エンドプレート接合に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON THE DOUBLE END PLATE CONNECTION APPLIED TO CONNECTION OF AXIAL FORCE TRANSMISSION MEMBER OF TRUSS STRUCTURES

岑山 友紀\* 山口 祐希奈\*\* 高尾 智之\*\*\* 橘 肇\*\*\*\*Yuki Mineyama Yukina Yamaguchi Tomoyuki Takao Hajime Tachibana

鋼構造物の現場連結部に用いられる高力ボルト接合には、ボルト軸直角方向の力を伝達する摩 擦接合、支圧接合とボルト軸方向の力を伝達する引張接合がある.一般的には、摩擦接合が多く用 いられているが、引張接合を用いることで、部位によっては連結部のボルト本数削減の可能性があ り、現場での作業効率を向上させることができる.

本稿では、トラス部材などの一軸引張部材の連結構造に適用する 非突出型エンドプレート接合 に着目し、弾塑性有限変位解析を行い、水平リブなどの構造諸元が、その力学的挙動に与える影響 を明らかにする.

#### キーワード:高力ボルト,引張接合,弾塑性有限変位解析,一軸引張部材

#### 1. はじめに

高力ボルト引張接合は、高力ボルトに導入された軸力 により生じる継手面の接触力を介して荷重を伝達する接 合方法であり、橋梁の主桁連結構造として一般的に用い られている高力ボルト摩擦接合と比較して、部位によっ ては連結部のボルト本数を削減することが可能である.

また, 主桁連結構造に適用する短締め形式の引張接合を 応用した非突出型エンドプレート接合とすることで必要 なボルト本数を削減できるだけではなく, フランジから 連結板やボルトが突出することがないため, フランジ面 を平坦にできるという利点も有する<sup>1), 2)</sup>.

そのため、図-1のような鋼橋の架設時に使用される手 延べ機のトラス部材などの軸力伝達型の連結構造にも適 用されることでジャッキの盛替え作業などが省略するこ とができ現場での省力化が可能になると考えられる.し かし、建築分野では、フランジからエンドプレートが突 出しているエンドプレート接合の設計法<sup>3)</sup>が示されてい るが、土木分野における一般的な断面形状と異なり、そ れをそのまま適用することは難しい.また、主桁連結構 造にエンドプレート接合が用いられた事例は限定的であ り<sup>4)</sup>、主たる連結構造に適用する際の設計方法が整備さ れていない.このような背景から土木分野向けに橋梁用 高力ボルト引張接合設計指針<sup>5)</sup>(以下,JSSC 設計指針) が日本鋼構造協会などから示されているが、T 接合に関 する規定のみで、本研究で扱うような非突出型エンドプ レート接合に関する規定はない.このような理由により、 本接合方法が広く普及するに至っていないと考えられる. そこで本研究では、トラス部材などの一軸引張部材の 連結構造に適用する非突出型エンドプレート接合に着目 し、弾塑性有限変位解析を行い、水平リブなどの構造諸 元が、その力学的挙動に与える影響を明らかにする.

#### 2. 検討対象構造と解析モデル

2.1 検討対象構造

本研究で検討対象とした連結構造を図-2 に示す.対象 とした構造は、手延べ機や仮設橋などの仮設構造物の軸 力部材に使用することを想定している.部材高は 300mm とし、水平リブ有のケースでは、ウェブ高の中心に水平



図-1 手延べ機イメージ

<sup>\*</sup> 技術開発本部 橋梁設計部 大阪設計課 \*\* 技術開発本部 技術研究部 \*\*\* 橋梁工事本部 橋梁工事部 \*\*\*\* 技術開発本部





リブを設置した. 接合部には, 各ボルトが均等に荷重を 分担するものと仮定し,降伏ボルト軸力にボルト本数を 乗じた荷重(以下,ボルト降伏荷重)が,部材許容荷重 以上となるよう, M22, F10Tのボルトを8本配置した. 部材許容荷重は,2012年版の道路橋示方書のに規定され ている許容応力度を用いて算出した水平リブ無の断面に おける許容荷重(以下,部材許容荷重)とした.ボルト 配置は,JSSC設計指針を参考に,ウェブおよび水平リブ から 50mmの位置に1列目ボルト,フランジから 50mm の位置に2列目ボルトを配置した.

#### 2.2 解析モデル

解析は構造の対称性を考慮して、1/4 領域をモデル化 した.解析モデルおよび要素の分割状況を図-3 に示す. 解析には、汎用有限要素解析コード Abaqus<sup>7)</sup>を用い、弾 塑性有限変位解析を行った.また、ここで用いた解析モ デルおよび解析手法の妥当性を検討するため、実物大模

型載荷実験を行った. その再現解析結果から, ボルト降 伏荷重までの荷重範囲で荷重-支間中央鉛直変位関係お よびボルト軸力-荷重関係が解析と実験でほぼ一致して いることを確認した.解析モデルは、全て8節点のソリ ッド要素を使用し,要素辺長は 5mm となるよう要素分 割を行った.高力ボルトのモデル化は、図-3に示すよう に,ボルト頭部,ナットおよびねじ部の形状を円柱で再 現し、2017年版の道路橋示方書8)(以下、道示)を参考 に、ねじ部の断面積を M22 の有効断面積である 303mm<sup>2</sup> とした. エンドプレート継手面間, ボルトとエンドプレ ート孔壁間、ボルトと座金間には、すべりを考慮できる 接触条件を定義し, Abagus に用意されている接触機能を 用いた接触面を設定し,これらの接触面間における接触・ 離間および固着・すべりを再現できる境界非線形性を考 慮した.なお、これらの接触面における接触面接線方向 のすべり挙動の定式化にはペナルティ法を用いることで,

部位	鋼材	ヤング率 E(N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 v	降伏点 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	構成則
フランジ ウェブ 水平リブ エンドプレート	SM400	200,000	0.3	235	降伏棚を有する ひずみ硬化型
高力ボルト	F10T	205,000	0.3	973	バイリニア型 E/100(2次勾配)
座金	(Elastic)	200,000	0.3	_	_

表-1 材料特性

摩擦係数を考慮した有限すべりとし、微小な相対変位を 弾性すべりとするクーロンモデルで定式化している. 一 方,接触面法線方向の接触・離間挙動の定式化は、ラグ ランジュ未定乗数法における剛接触モデルにより定式化 している<sup>7)</sup>.本研究ではボルトとエンドプレート孔壁間 以外の摩擦係数は道示を参考に 0.4 とし、ボルトとエン ドプレート孔壁間の摩擦は非常に小さいと考え 0.01 と 設定した.

引張荷重は、初期ボルト軸力導入後に、図-3 に示すようにフランジとウェブのコバ面に長手方向に一様な強制 変位させることで作用させた.初期ボルト軸力は、道示 を参考に、M22、F10Tの設計ボルト軸力である 205kNを 導入した.初期ボルト軸力は、ボルト長さの中央におけ るボルト軸部断面を予張力断面と定義し、予張力断面全 体に初期ボルト軸力に相当する締結力を作用させた <sup>9</sup>. 解析は、初期ボルト軸力導入と強制変位付与の 2 段階に 分けて行った.なお、本解析では初期不整による影響は 考慮していない.

解析モデルに用いた材料特性を表-1 に示す. 鋼材は全 て SM400, 高力ボルトおよびナットは M22 (F10T), 座 金は弾性体とした.高力ボルトの応力-ひずみ関係はひず み硬化係数 E/100 のバイリニアモデルとした. それ以外 の鋼材には降伏棚のあるひずみ硬化モデルを用いた.

図-3 に示すように、固定側は X, Y, Z 方向の並進成 分および回転成分を拘束し、1/4 モデルとなるように対 称条件を与えた. なお本研究では、構造諸元が荷重分担 メカニズムに与える影響を解明することを目的としてお り、ねじれや面外変位については考慮していない.

#### 2.3 解析ケース

解析ケースを表-2に示す.解析における構造パラメー タとして,エンドプレート板厚,水平リブの有無,水平 リブ板厚,水平リブ長を選定した.解析ケースの名称で,

E, R, Lに続く数字は、それぞれエンドプレート板厚 te
(単位:mm)、水平リブ板厚 tr (単位:mm)、水平リブ
長L(単位:mm) を示している。

E45-R24-L440 を基本ケースとし,基本ケースに対して 水平リブ無のケースを E45-norib とした.工事用仮桟橋 の主桁連結構造<sup>2)</sup>と同様に,水平リブ板幅はフランジ板 幅と同じとし,水平リブ板厚は,フランジ板厚の2倍を 基本ケースとしフランジ板厚と同じに変化させた.水平 リブ長は,その板幅の3倍を基本ケースとし,1.5倍,6 倍に変化させた.エンドプレート板厚は,JSSC 設計指針 によると,てこ反力係数が0になる板厚 53mm を求め, それより薄い45mmを基本ケースとし,32mm,55mm に 変化させた.

#### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 荷重-変位関係

各ケースの荷重-変位関係を図-4 に示す.図-4 には, 降伏点応力の公称値を用いて算出した水平リブ無の断面 における降伏荷重(以下,部材降伏荷重)の計算値,ボ ルト降伏荷重および部材許容荷重を1点破線で示す.な お,降伏ボルト軸力は,F10T高力ボルト耐力の公称値 (900N/mm<sup>2</sup>)にM22 ボルトの有効断面積(303mm<sup>2</sup>)を 乗じて算出した.

エンドプレート板厚に着目すると、図-4(a)より、エン ドプレート板厚が変化しても、荷重-変位関係は、大きな 差異はないものの、エンドプレート板厚 32mm の場合、 ボルト降伏荷重程度で初期勾配が変化した. ボルト降伏 荷重時におけるエンドプレートのミーゼス応力コンター 図を図-5に示す.図-5(a)より、ボルト降伏荷重程度で、 エンドプレート板厚 32mm のケースでは、エンドプレー トが降伏するため、初期勾配が変化したと考えられる.

水平リブの有無に着目すると、図-4(b)より、水平リブ 無では、部材許容荷重程度で初期勾配が変化し非線形挙 動を示した.その後も、部材降伏荷重まで緩やかに荷重 が上昇した.

水平リブ板厚に着目すると,水平リブ板厚に関わらず, 基本ケースとほぼ同様の挙動を示した.

水平リブ長に着目すると,水平リブが短いケースでは,

解析ケース	エンド プレート板厚 <i>t</i> e(mm)	水平リブ板厚 <i>t<sub>r</sub></i> (mm)	水平リブ長 <i>L</i> (mm)
E45-R24-L440 (基本ケース)	45	24	440
E32-R24-L440	32	24	440
E55-R24-L440	55	24	440
E45-norib	45	—	_
E45-R12-L440	45	12	440
E45-R24-L220	45	24	220
E45-R24-L880	45	24	880

表-2 解析ケース



(a) エンドプレート板厚の影響

已 Ⅲ 拒 1,500 E45-R24-L440(基本ケース) 1,000 E45-norib E45-R12-L440 500 E45-R24-L220 E45-R24-L880 0

0

3,500

3,000

2,500

2,000



変位(mm)

10

表-3 ボルト降伏荷重

解析ケース

E45-R24-L440

(基本ケース) E32-R24-L440

E55-R24-L440

E45-norib

E45-R12-L440

E45-R24-L220

E45-R24-L880

部材降伏荷重

ボルト降伏荷重

 $P_{by}(kN)$ 

2,054

1,789

2,130

1.550

1,968

1,910

2,040

ボルト降伏荷重

部材許容荷重

30

20



図-4 荷重-変位関係



図-5 ボルト降伏荷重時におけるエンドプレートのミーゼス応力コンター図(寸法単位:mm)

部材許容荷重程度で初期勾配が変化し、非線形挙動を示 した.これは、水平リブの荷重分担が小さく、フランジ の荷重分担が大きいため、フランジからの作用力により エンドプレートが大きく変形し,基本ケースに比べて, 小さな荷重でエンドプレートが降伏したと考えられる. また,水平リブが長いケースでは,基本ケースに比べて, 初期勾配が大きく、初期勾配が変化した後も荷重が上昇 した.これは、水平リブも断面剛性に寄与したと考えら れるが, 基本ケースでも部材降伏荷重までは線形挙動を 示しており、水平リブ長はその板幅の3倍程度でよいと

### 考えられる.

#### 3.2 ボルト軸カ-荷重関係

各ケースのボルト軸力-荷重関係を図-6,7 に示す. さ らに、いずれかのボルトが最初に降伏ボルト軸力に到達 した荷重を、ボルト降伏荷重として表-3に示す.図-6,7 には,参考のため,エンドプレートを剛と仮定した場合, すなわち, てこ反力が発生しない場合のボルト軸力と荷 重との関係を破線で、降伏ボルト軸力および最大ボルト 軸力を1点破線でプロットしている.

エンドプレート板厚に着目すると, エンドプレート板



図-7 ボルト軸カ-荷重関係(2列目ボルト(B-2))

厚が 32mm では、基本ケースに比べて1列目ボルトのボ ルト軸力増分が大きく、ボルト降伏荷重は、エンドプレ ート板厚 32mm では 1,789kN、基本ケースでは 2,054kN であり、基本ケースに比べて、15%程度低下した.2列目 ボルトのボルト軸力は全ての荷重段階で基本ケースとほ ぼ同じであった.エンドプレート板厚 55mm では、ボル ト降伏時荷重は 2,130kN であり、1列目、2列目ボルトと もにボルト軸力増分は、基本ケースとほぼ同じであった.

水平リブの有無に着目すると、基本ケースと水平リブ 無では、同程度の荷重でボルト軸力が増加し始めるもの の、水平リブ無では、基本ケースに比べて、ボルト軸力 増分が大きく、ボルト降伏荷重は、水平リブ無では 1,550kN、基本ケースでは 2,054kN であり、水平リブ無で は基本ケースに比べて 32%程度低下した.

水平リブ板厚に着目すると,水平リブが薄いケースで

は、基本ケースに比べて、ボルト軸力増分が大きく、水 平リブが薄いケースのボルト降伏荷重は、1,968kN であ り、基本ケースに比べて4%程度低下した.

水平リブ長に着目すると、水平リブ長が板幅の 1.5 倍 と短いケースでは、基本ケースに比べて、ボルト軸力増 分が大きく、ボルト降伏荷重は 1,910kN であり、基本ケ ースに比べて 7%程度低下した.水平リブ長が板幅の6倍 と長いケースでは、基本ケースに比べて、ボルト軸力増 分が小さく、ボルト降伏荷重は 2,040kN であり、基本ケ ースとほぼ同様であった.

#### 4. おわりに

本研究では、トラス構造の軸力伝達型部材の連結構造 に非突出型エンドプレート接合を用いることを想定し、 水平リブなどの構造諸元をパラメータとした弾塑性有限 変位解析を行い,非突出型エンドプレート接合の力学的 挙動に与える影響を検討した.本研究により得られた主 な結果を以下に示す.

- 非突出型エンドプレート接合部は、水平リブを設置することで、水平リブも荷重分担し、フランジをTウェブとしたL接合と、水平リブをTウェブとしたT接合が複合した挙動を示すことがわかった.これにより、水平リブを設置することで、水平リブ位置に生じるてこ反力が相殺されボルト軸力の上昇が抑制される.その結果、水平リブ無のケースに比べて、ボルト降伏荷重は32%程度上昇した.
- 2) JSSC 設計指針により決定されるエンドプレート板厚 とそれより薄いケースでは、ボルト軸力がほぼ同じで あったことから、エンドプレート板厚を 45mm (JSSC 設計指針により決定される板厚の 85%) 程度まで薄く できると考えられる.
- 3) 水平リブ板厚は、基本ケースとそれが薄いケースの比較から、それをフランジ板厚の2倍とすることでよいと考えられる.水平リブ長は、基本ケースとそれを変化させた場合の比較から、工事用仮桟橋の主桁連結構造と同様に、水平リブはその板幅の3倍程度の長さでよいと考えられる.

今後,本研究の結果を踏まえ,実物大実験を実施し, 継手部の安全性の検証を行なうなどして,トラス構造の 軸力伝達型部材への実用化を目指していきたい. 参考文献

- 岑山友紀,杉本悠真,東博年,江頭慶三,杉田圭哉,山口 隆司:仮桟橋部材を活用した緊急仮設橋の主桁連結構造に 関する実験的研究,構造工学論文集, Vol.64A, pp.594-604, 2018.
- 2) 岑山友紀,杉本悠真,山口隆司:水平リブを有するエンド プレート接合の曲げ強度およびそのボルト軸力簡易評価 法に関する研究,鋼構造論文集, Vol.27, No.107, pp.61-74, 2020.
- (社)日本建築学会:鋼構造接合部設計指針, pp.209-218, 2012.
- 4) 鈴木勝,玉越隆史,沢田道彦:緊急仮設橋の開発について, 橋梁と基礎, Vol.49, pp.46-51, 2015.
- (社)日本鋼構造協会:橋梁用高力ボルト引張接合設計指針, 2004.
- (社)日本道路協会:道路橋示方書(II 鋼橋編)・同解説, 2012.
- Dassault Systems Simulia Corp. : Abaqus/Standarduser's manual Ver.6.14, 2014.
- (社)日本道路協会:道路橋示方書(II 鋼橋・鋼部材編)・ 同解説,2017.
- 9) 玉越隆史, 石尾真理, 横井芳輝, 山崎健次郎・水口知樹:高 カボルト摩擦接合のボルト軸力導入に着目した解析モデル に関する研究, 鋼構造論文集, Vol.21, No.84, pp.95-110, 2014.