# 新型手延べ機の開発における引張継手部の実験的検討 EXPERIMENTAL STUDY OF TENSION JOINT IN THE DEVELOPMENT OF A NEW LAUNCHING MACHINE

長谷川 智\* 高尾 智之\*\* 橘 肇\*\*\* 吉岡 夏樹\*\*\*\*
Hasegawa Satoshi Tomoyuki Takao Hajime Tachibana Yoshioka Natsuki

従来の手延べ機は、上部工の橋脚到達時に自重によるたわみを調整する設備を事前に架橋位置 に搬入・設置するため、大掛かりな機材やクレーンが必要となり、多大なコストと準備時間を要す る.そこで、手延べ機の主構部材連結部に非突出型エンドプレート継手<sup>1)2)</sup>を採用した新型手延べ 機を考案した.非突出型エンドプレート接合は、短締め形式の引張継手を応用した形式であり、既 存の設計基準の適用範囲外とされている構造となるため安全性について著者らは各種取組を継続 している.本報告では、新型手延べ機を実用化させるために実施した非突出型エンドプレート継手 の要素試験とFEM解析について示す.

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

従来の手延べ機は、橋脚到達時に自重によるたわみを 調整する設備を事前に架橋位置に搬入・設置するため, 大掛かりな機材やクレーンが必要となり、多大なコスト と時間を要する. そこで, 手延べ機の上弦材側をレベル としたトラス構造とし,上下弦材の現場継手に引張接合 を応用した新しい手延べ機を考案した.引張接合形式を 採用することで上弦材の上面および下弦材の下面にボル トや連結板の突起をなくし、上弦材上面の橋脚上に機材 を搬入するための軌条を設けられる構造としている. 著 者らは,新型手延べ機の現場継手に用いる引張接合を応 用した非突出型エンドプレート継手<sup>1)2)</sup>について、継手 構造をモデル化した FEM 解析により,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について検討を 進めている. その結果, 50m 級の手延べ機が成立するこ とを確認した.本報告では、新型手延べ機の実用化に向 け実施した FEM 解析と非突出型エンドプレート継手の 縮小模型を用いた実験により検証した内容について報告 する.

#### 2. 手延べ機と継手概要

今回検討した引張継手を有する新型手延べ機の概要を 図-1に示す.鋼桁架設時に用いる手延べ機は,上弦材側 をレベルとしたトラス構造とし,上下弦材の現場継手部 に非突出型エンドプレート継手を採用している.この継 手構造は,短締め形式の引張接合を応用した形式であり, 継手部断面のエンドプレートの突出部を省略し,施工時 の合理化を図った構造となっている.





#### 3. 実験内容

非突出型エンドプレートの性能を確認するため一軸引 張試験を実施した.載荷試験概要,試験体詳細,および 実験状況を図-2,図-3と写真-1に示す.試験体は,50m 級の手延べ機の試設計結果より継手部断面を設定した. 材質は,SN490材とし,エンドプレートの板厚は既往の 研究結果を参考に32mmとした<sup>1)</sup>.載荷実験では,載荷 設備の容量を考慮し,試験体を縮小した.縮小方法は非 突出型のエンドプレート継手構造におけるボルト軸力の 変化およびエンドプレートの応力分布が縮小前と後で類 似している報告事例<sup>3)</sup>を参考に,高力ボルト(S10T)の径 をM22からM16に変更し,継手断面の縮尺も16/22程

<sup>\*</sup> 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 \*\*\*\*技術開発本部 橋梁設計部 東京設計課



計算体

写真-1 実験状況

度とした.手延べ機は製作すれば複数の現場で活用され るため、継手部のエンドプレート表面にフェーシング仕 上げなどの特殊な加工を施していない. 試験体は、製作 精度のばらつきを考慮し3体製作した.荷重載荷は,図 -2 に示すように 3,000kN 油圧ジャッキを 2 台用い, 載荷 梁を下側から押し上げることにより中央に設置した継手 部が1軸引張状態となるように行った. 試験体は、てこ 反力<sup>4)5)</sup>により各ボルト軸力が変動することを確認する ため、複数のボルトにひずみゲージを貼り付けボルト施 工時からのボルト軸力を計測した.荷重載荷は、継手部 が弾性挙動を示す上限値を P=1,200kN までとした予備載 荷を3回行い、その後、本載荷を行った.なお、載荷は ロードセルを用いた荷重制御により単調載荷とした.ま た,継手部のボルト軸力は,施工終了時に通常の摩擦接 合のHTBと同様にボルトの降伏耐力公称値900N/mm<sup>2</sup>の 75%となるように導入し、ボルトを施工して2週間後に 載荷実験を実施した.

# 4. FEM 解析

(1) 解析概要と解析モデル

実験により検出された測定値を検証するため事前解 析を実施した.解析モデルの概要を図-4に示す.解析は, 弾塑性有限変位解析(以下,FEM 解析)を基本としたマイ ダスアイティジャパン社の汎用有限要素解析プログラ ム midas NFX を使用した. FEM 解析では構造の対称性 を考慮し, 1/4 領域をモデル化した. 解析モデルに用い た材料特性を表-1 に示す.降伏点は,鋼材材料試験値と した.

#### (2) 解析条件

1)接触条件·境界条件

解析ではエンドプレート接合面間, ボルトとエンドプ レート孔壁間, ボルトと座金間の接触面間にはすべりを 考慮できる接触条件を設定し, 諸数値を定義した. ボル トとエンドプレート孔壁間以外の摩擦係数は道路橋示 方書を参考に 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. 拘束条 件は, 図-4 に示す対称性を考慮した境界条件に加え, 全 ての高力ボルト軸部中央断面の節点を Z 方向に拘束し た.

表─1 材料特性							
部位	鋼材	ヤング率	ポアソン比	降伏点	構成則		
		E(N/mm <sup>2</sup> )	v	$\sigma_y(N/mm2)$			
エンドプレート	SN490	200,000	0.3	368			
フランジ ウェブ 水平リブ	SN490	200,000	0.3	388	降伏棚を有する ひずみ硬化型		
高力ボルト	S10T	205,000	0.3	1,031	バイリニア型 E/100(2次勾配)		
座金	(Elastic)	200,000	0.3	-	—		



#### 2)初期ボルト軸力導入方法と荷重条件

FEM 解析は、実験と対応させるため高力ボルトの初期 ボルト軸力導入時と一軸引張試験を再現した強制変位を 与えた時の2段階で行った.まず、初期ボルト軸力の導 入は、一体化させたボルトとナットの全ての節点に温度 差を荷重条件として考慮のし、ボルトを収縮させること により軸力を導入した.初期ボルト軸力は、M16(S10)軸 力の75%(設計ボルト軸力)である106kNに設定した.軸 力導入後の一軸引張試験を再現する解析は、図-4に示す ようにフランジとウェブの上下端コバ面をZ方向へ強制 変位させた.

#### 5.実験結果と FEM 解析の比較

## (1) 載荷荷重

製作した試験体3体に載荷実験を実施し,表-2のよう に case1~3 とした. case1 は試験装置の安全性を確認す るため,ボルトの降伏荷重までの載荷とした. case2 はボ ルトの破断直前までとし, case3 はボルトが破断するまで 載荷した.

表-2には実験及び FEM 解析による降伏荷重および最 大荷重を併せて示す.ここで示している降伏荷重は,継 手部における,いずれかのボルト軸力が降伏軸力に到達 した時点の荷重値を示す.引張耐力は,材料試験値とボ ルト本数の積であり,継手部を構成するボルトの全強を 示す.まず,降伏荷重を比較すると FEM 解析と実験値で 500~1,000kN 程度の乖離が生じている.降伏荷重の差は, FEM では未考慮としたエンドプレート継手面の製作誤 差が関係していると考えられる.つぎに,引張耐力は, case2 及び 3 の実験値とボルト引張耐力の差は 130kN 程 度であった.これは,試験体の終局状態は継手の部材間 圧縮力ではなくボルトによる荷重伝達が支配的な状態と 考えられる.

#### (2)荷重変位関係

図-5 に試験体に作用する載荷荷重と部材端での変位 の実験値と FEM 解析および弾性計算による値を示す. ボルト降伏軸力およびボルト引張耐力は,ボルト本数と 材料試験値を反映させた値を示し,弾性計算はオイラー 梁による計算値である.なお,FEM 解析では,降伏荷重 以降の塑性域のボルト軸部のモデル化仕様などにより評 価が困難であるため,降伏荷重以降は参考値としている. case1~3 の変位は,ボルト軸力計測値より降伏が確認さ れた 2,000kN 程度までは線形性を有した挙動を示し,弾 性範囲内であることがわかる.2,000kN 以降は,接合面 の離間に伴う非線形性の挙動が実験値,FEM 解析とも確 認され実験値と FEM 解析の乖離は大きくなる傾向とな った.



				(単位:kN)	
載荷を	降伏	荷重	最大荷重	ボルト引張耐力	
戦制リース	実験値	FEM	実験値	(材料試験値)	
case1	1954.9		_	4046.8	
case2	2124.8	2931.6	3905.8		
case3	2462.6		3910.9		



図-5 荷重-変位曲線

変位(mm)

6

8

10

4

0

2



図-6 FEM 解析によるボルト軸力と載荷荷重



図-7 ボルト配置

# (3) ボルト軸力と載荷荷重関係(FEM 解析)

図-6 に FEM 解析によるボルト軸力と載荷荷重,図-7 にボルト配置図を示す.図-6 に示す参照値は,試験体継

手部のエンドプレートを剛体と仮定した場合,すなわち, ボルト単体で荷重伝達させる場合の軸力の計算値を示し ている. FEM 解析では、載荷初期の段階では、6本全て のボルト軸力の変動はなく一定である.載荷荷重が 600kN を超えたあたりで、てこ反力が関係した軸力変動 が確認することができる.軸力変動の順序は、ウェブ近 傍の B-2-1 ボルトの軸力に変動が見られ、その後、他の ボルトも変動している.

#### (4) ボルト軸力と載荷荷重関係(case2 実験値)

一例として, case2 に着目して示す. 図-8,9 には case2 の1列目と2列目のボルト軸力と載荷荷重の関係を示す. 荷重載荷により1列目,2列目ともにウェブ近傍のボル ト(B-2-1 および B-1-1)から降伏軸力に達していることを 確認した.

解析値は、荷重が増加してもボルト軸力は設計軸力に 沿った挙動となっているが、実験値のボルト軸力は載荷 当初から増加している. その理由として, 試験体製作時 にフランジ、ウェブをエンドプレートに溶接したことで エンドプレートが変形し,継手面に隙間が発生し載荷当 初より、てこ反力が生じて材間圧縮力による荷重伝達が 行われなかったと考えられる.



100

80

60

40

20

0 0

1000

エンドプレートの製作精度,剛性を改善すれば,継手効 果の向上が期待できると考えており, FEM 解析と実験に よる検討を継続する. 6. おわりに

新型手延べ機の継手部に採用する非突出型エンドプレ ート継手部の実験による検証例について示した.今後は、 手延べ機の実用化に向け、継手面の接触圧の確保方法の 検討やボルト軸力のばらつきを設計に反映し、実工事へ の適用を図る.現状では、50m級の新型手延べ機が実現 可能であることを設計により確認しているが、大型の手 延べ機が可能となるよう改良もさらに検討を進めていく.

なお、手延べ機の設計荷重時におけるボルト軸力は、

全てのボルトにおいて安全側であることを確認している.

#### 参考文献

- 1) 岑山友紀, 橘肇, 高尾智之, 山口隆司: 一軸引張部材の連結 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,構造工学論文集 Vol.67A, pp.412-420, 2021.3
- 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.106, pp.61-74, 2020.6
- 3) 廣澤直人,山口隆司,飛永浩伸,村山稔:高力ボルト引張接 合継手を適用した鋳鉄床版モジュール接合部の載荷実験,構 造工学論文集 Vol.66A, pp.497-506, 2020.3
- 4)社団法人日本道路協会:道路橋示方書Ⅰ共通編・Ⅱ鋼 橋編, 2012.11
- 5)社団法人日本鋼構造協会:橋梁用高力ボルト引張接合 指針, 2004.8
- 6) 玉越隆史, 石尾真理, 横井芳輝, 山崎健次郎・水口知 樹:高力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, 2014.12



実線:case2

B-1-1

B-1-3

B-1-2

参照值

3000

破線:FEM

2000

荷重(kN)

設計軸力

B-1-2

B-1-1

B-1-3

4000