

鋳鉄床版モジュール接合部に適用した高力ボルト引張接合継手の 力学的挙動およびその設計法に関する研究

STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF BOLTED TENSILE JOINTS APPLIED TO THE CAST IRON DECK MODULE CONNECTION AND ITS DESIGN METHOD

橋梁工学分野 廣澤 直人
Bridge Engineering Naoto HIROSAWA

軽量かつ耐疲労性の高い床版として開発されている鋳鉄床版は、複数のモジュールで構成されるが、現状、その連結に用いられている摩擦接合では、ボルト本数が多く施工時間の増加要因となっている。そこで、ボルト本数削減が可能な高力ボルト引張接合継手に着目し、それを適用したモジュール接合部の力学的挙動を明らかにするために、弾塑性有限変位解析を実施した。その結果、必要ボルト本数を1/4程度削減できるエンドプレート接合構造を提案し、その設計法について検討した。

The cast iron deck was developed as lightweight and highly fatigue resistant deck slab. The mechanical connections between these modules are inevitable because the cast iron deck is composed of multiple modules due to manufacturing limitations. In this study, high strength bolted tensile joint is applied to improve constructability by FEM analysis. It is confirmed that the tensile joint could be used at the connections between the cast iron deck modules, and the load transferring mechanism of this connection is clarified. As a result, end plate joints capable of reducing the number of required bolts by about 1/4 were proposed and its design method was examined.

1. はじめに

近年、既存橋梁の老朽化に伴い、RC床版では、ひびわれや抜け落ちといった劣化損傷事例が多数報告されており¹⁾、その取替え需要が高まっている。そこで、軽量かつ耐疲労性の高い床版として鋳鉄床版が開発されている^{2),3)}。鋳鉄床版モジュールは、図-1に示すように、デッキプレートが、橋軸直角方向の主リブおよび橋軸方向の副リブにより縦横に補剛されており、鋳造によってそれらが一体成型されている。

交通量の多い都市高速道路や主要国道における床版取替えにあたっては、通行規制による社会的損失を抑えるべく、施工時間短縮を優先する傾向にある⁴⁾。鋳鉄床版は、図-2に示すように、製作上の制約もあり複数のモジュールで構成されるが、その連結には高力ボルト接合が用いられる。そのため、モジュールの接合構造が、鋳鉄床版の施工時間に及ぼす影響は大きい。現状、橋軸方向接合線には、高力ボルト摩擦接合継手が用いられているが、ボルト本数が多く施工時間の増加要因となっている。したがって、床版取替えにおける施工時間短縮を目的に、接合部のボルト本数削減が可能な高力ボルト引張接合継手に着目した。

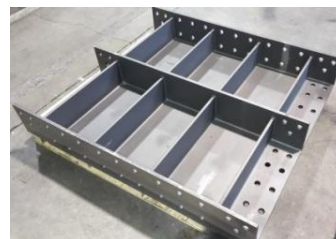


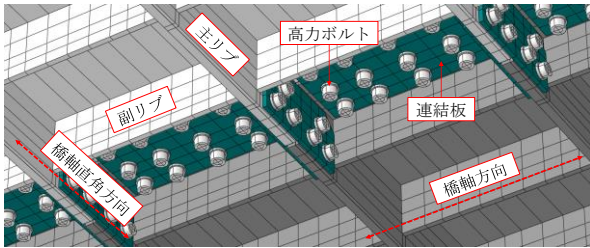
図-1 鋳鉄床版モジュール



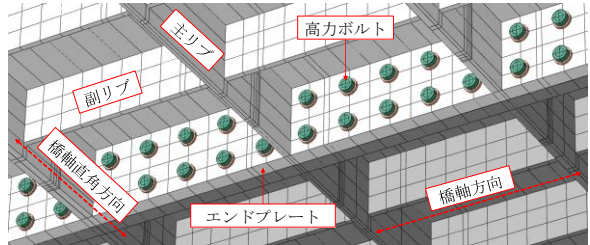
図-2 鋳鉄床版組立図

高力ボルト引張接合継手は、高力ボルトに導入された軸力により生じる接触面の接触力を介して荷重を伝達する接合法であり、摩擦接合継手と比較して、ボルト1本当たりの荷重伝達効率が優れる⁵⁾。しかしながら、日本鋼構造協会が定める橋梁用高力ボルト引張接合設計指針⁵⁾(以下、JSSC設計指針)では、T継手に関する規定は存在するものの、本研究で扱うようなエンドプレート接合に関する明確な規定は存在しない。

本研究では、鋳鉄床版モジュールの橋軸方向接合線を対象とし、高力ボルト引張接合継手を適用した新たなエンドプレート接合構造を提案した上で、弾塑性有限変位解析を行い、その力学的挙動を明らかにするとともに設計法について検討する。



(a) 摩擦接合継手



(b) 引張接合継手

図-3 鋳鉄床版モジュール橋軸方向接合構造例

表-1 接合部の設計条件^{3),5)}

項目	値
床版支間 L (mm)	3000
デッキプレート厚 (mm)	13
デッキプレート有効幅 $2l$ (mm)	455.5
※単純支持として算出	
主リブ断面 (高さmm×板厚mm)	190×17
主リブ間隔 (mm)	572.5
副リブ断面 (高さmm×板厚mm)	150×14
副リブ間隔 (mm)	340, 320
T型断面梁の断面2次モーメント (mm ⁴)	3.123×10^7
主リブ下端からの中立軸位置 (mm)	160.7
鋳鉄材料の許容応力度 σ_a (N/mm ²)	205
初期ボルト軸力 B_0 (kN)	205
高力ボルトの許容ボルト軸力 B_a (kN)	246
接合面のすべり係数 μ	0.4
ボルト1本1摩擦面当たりの許容力 ρ_a (kN)	48.2
引張作用力 N (kN)	210
せん断力 S (kN)	140

2. モジュール接合部の設計計算

2.1 設計条件と設計仮定

対象とする鋳鉄床版は、床版支間 3m を想定し、道路橋示方書が定める T 荷重に対して、連続版として設計されている。鋳鉄床版モジュールは、主桁上に配置される桁上タイプと、床版支間に配置される支間タイプの 2 種類があり、それらの接合部である橋軸方向接合線に適用した引張接合継手の構造例と、現状の摩擦接合継手の構造例を図-3 に併せて示す。設計計算に際し、鋳鉄床版モジュール接合部を主リブとデッキプレートの有効幅からなる T 型断面梁のエンドプレート接合と見なした。エンドプレートは副リブとして、荷重を主リブに伝達する役割も兼ねている。

接合部の設計条件を表-1 に示す。被接合部に生じる断面力は、曲げモーメントとせん断力を考慮した。曲げモーメントについては、図-4 に示すように、主リブ先端の曲げ応力度が全強の 75% となる場合を設計荷重とした。せん断力については、T 荷重(100kN)に衝撃係数 0.4 を考慮した 140kN を設計荷重とした。

仮定したボルト配置を図-5 に示す。なるべく多くのボルトを配置するために、主リブ間において 2 行 5 列とし、有効幅内のボルト本数が 8 本となるように配置した。主リブあるいはデッキプレートからボルト中心までの距離は、施工性を考慮し 50mm とした。接合部に用いた高力ボルトは、M22(F10T)である。

2.2 接合部における荷重伝達挙動の仮定

正曲げが作用する場合、主リブ先端側からエンドプレートに引張力が伝達することから、主リブをティーウェブとする T 継手としての挙動を呈すると考えられる。一方、負曲げが作用する場合、デッキプレートからエンドプレートに引張力が伝達することから、デ

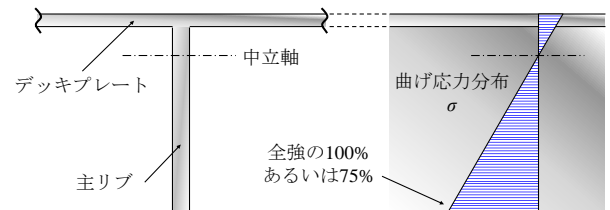


図-4 曲げ応力度の仮定

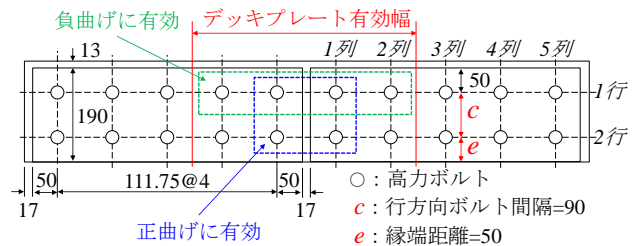
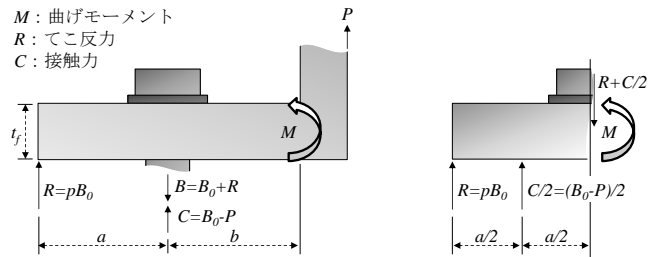


図-5 ボルト配置 (単位: mm)



(a) ティーウェブ結合位置 (b) ボルト中心位置

図-6 エンドプレートの応力度照査の仮定

ッキプレートをティーウェブとする L 継手としての挙動を呈すると考えられる。以上を踏まえると、荷重伝達に寄与するボルトは、正曲げでは主リブから 1 列目に位置する 4 本であり、特に中立軸位置から離れた 2 行目に位置するボルトの荷重分担が大きいと考えられる。負曲げではデッキプレート有効幅内の 1 行目に位置する 4 本であり、それらの荷重分担は均等であると考えられる。また、せん断が作用する場合、エンドプレート接合では摩擦接合継手として荷重に抵抗する。

表-2 JSSC 設計指針に基づく設計計算結果

設計荷重	正曲げ (2行目)		負曲げ (2行目)		正曲げ (2行目)		負曲げ (2行目)	
	正曲げ (2行目)	負曲げ	正曲げ (2行目)	負曲げ	正曲げ (2行目)	負曲げ	正曲げ (2行目)	負曲げ
エンドプレート 板厚 t_f (mm)	28		32		36			
ボルト1本当たり の作用力 P (kN)	87.5	52.5	87.5	52.5	87.5	52.5	87.5	52.5
てこ反力係数 p	0.0465	0.0078	0.0333	0.0051	0.0248	0.0038		
ボルト軸力 B (kN)	214.5	206.6	211.8	206.0	210.1	205.8		
ティーウェブ 結合位置の応力 σ_{bf} (N/mm ²)	-313.9	-	-248.6	-	-200.7	-		
ボルト中心位置 の応力 σ_{bf} (N/mm ²)	217.4	178.3	154.9	134.6	116.5	105.6		

※赤字は許容値を超えていることを表す

2.3 設計計算

引張継手では、ボルト軸力、エンドプレート応力度およびせん断力に対して照査する。ボルト軸力の照査には式(1)を用い、てこ反力係数 p の算出には JSSC 設計指針が提案する算定式を適用した。エンドプレートの応力度照査は、図-6 に示すようにエンドプレートを集中力が作用する梁と仮定し、ボルト中心位置とティーウェブ結合位置のそれぞれに対して式(2)、(3)を用いた。せん断力に対する照査は式(4)を用いた。

- 1) ボルト軸力の照査式(ただし、 $P < B_0$)

$$B = B_0(1+p) \quad (1)$$

- 2) ボルト中心位置の応力照査式(ただし、 $P < B_0$)

$$\sigma_{bf} = \frac{6a \left\{ (p+0.25) \frac{B_0}{P} - 0.25 \right\} P}{w_n t_f^2} \quad (2)$$

- 3) ティーウェブ結合位置の応力照査式(ただし、 $P < B_0$)

$$\sigma_{wf} = \frac{6 \left(ap \frac{B_0}{P} - b \right) P}{w t_f^2} \quad (3)$$

- 4) せん断力に対する照査式

$$\rho_s = \frac{S}{n} \leq \rho_a \quad (4)$$

ここに、 $a=b=50\text{mm}$ 、 p : てこ反力係数、 B_0 : 初期ボルト軸力、 P : ボルト1本当たりの引張作用力、 w : 継手長(mm)、 w_n : 純断面の継手長(mm)、 t_f : エンドプレート板厚(mm)、 ρ_s : ボルト1本当たりのせん断力(kN)、 S : 接合部に作用するせん断力(kN)、 n : ボルト本数(4本)、 ρ_a : ボルト1本1摩擦面当たりの許容力(kN)である。

JSSC 設計指針を準用し、接合部の設計計算を行った結果を表-2 に示す。設計計算結果より、ボルトには十分な余裕があると考えられ、エンドプレート板厚は、正曲げ作用時におけるティーウェブ結合位置の応力度照査により定まり、設計荷重に対して 36mm 以上とする必要がある。せん断力に対する照査は、ボルト1本当たりに生じるせん断力が $\rho_s=35.0\text{kN}$ となることから、ボルト1本1摩擦面当たりの許容力を満たす。

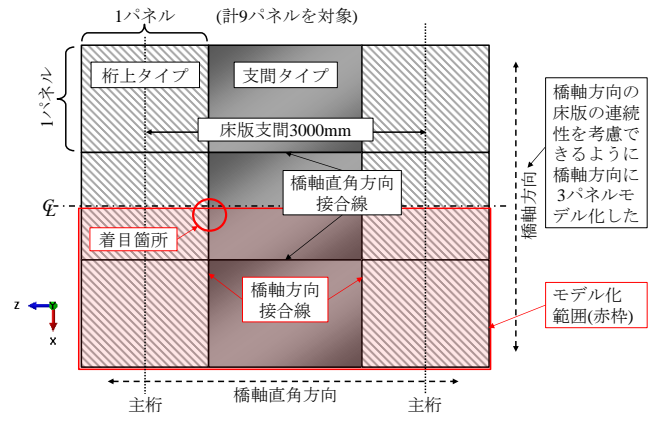


図-7 解析対象とした鑄鉄床版

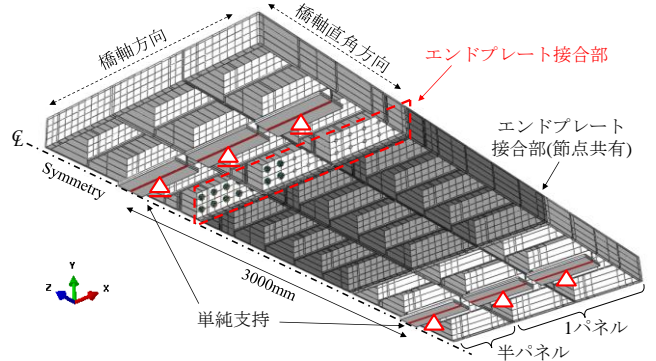


図-8 解析モデル

エンドプレート板厚が厚くなると、鑄鉄材料の強度低下に繋がることや、床版重量が増加することから、エンドプレート板厚はなるべく薄い方が望ましい。そこで、エンドプレート板厚 36mm を標準モデルとし、解析により設計計算の整合性を確認するとともに、エンドプレートの薄板化についても検討する。

3. モジュール接合部の弾塑性有限変位解析

3.1 解析手法

解析には汎用有限要素解析コード Abaqus 6.14 を用い、境界非線形性を考慮した弾塑性有限変位解析を実施した。解析対象とした鑄鉄床版は、図-7 に示すように、橋軸方向には連続性を考慮するために3パネル、橋軸直角方向には単純支持となるように3パネルとした。解析モデルは、図-8 に示すように1/2モデルとした。要素は8節点低減積分ソリッド要素を用い、要素辺長が着目する接合部付近で 5mm となるように要素分割を行った。境界条件は、主桁と床版を連結する支持部材下面に単純支持となるように与え、対称面に対称条件を与えた。荷重は輪荷重を想定し、載荷範囲 500mm×200mm に鉛直下向きの表面力として与えた。載荷ケースは図-9 に示すように正曲げおよび負曲げとした。載荷位置は、橋軸方向には対称面に位置する主リブの荷重分担が大きくなるようにその直上とし、橋軸直角方向には着目する接合部において最も厳しくなるように影響線より決定した。

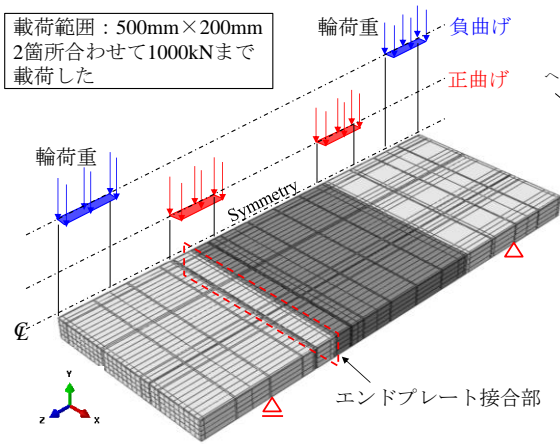


図-9 载荷条件と载荷位置

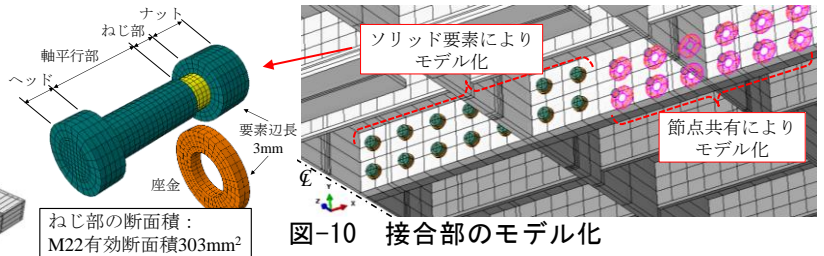


図-10 接合部のモデル化

表-3 解析に用いた材料特性

	ヤング率 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	降伏点 σ_y (N/mm ²)	構成則
铸铁床版 (FCD550相当)	170,000	0.28	350	多直線近似
高力ボルト(F10T) 座金	200,000	0.3	900	バイリニア $E/100$

接合部における高力ボルトのモデル化は、図-10に示すように、対称面近傍でソリッド要素を用い、その他の領域で節点共有とした。接合面間の摩擦係数は0.4とした。ボルト孔は拡大孔とし、孔径を26.5mmとした。解析に用いた材料特性を表-3に示す。铸铁材料の応力-ひずみ関係は図-11に示す多直線近似モデルとした。引張接合継手に用いた高力ボルトはM22(F10T)を想定した。解析は、ボルト軸力導入段階と、輪荷重载荷段階との2段階に分けて行った。

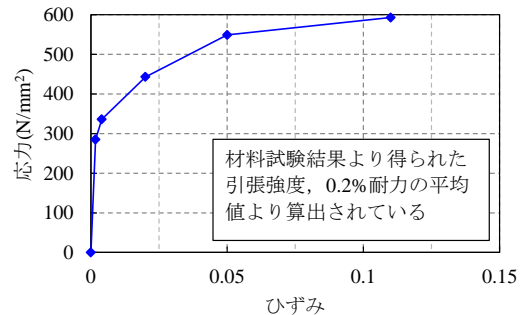


図-11 铸铁材料の応力-ひずみ関係³⁾

3.2 解析ケース

解析パラメータは、エンドプレート板厚 t_f の他に、行方向ボルト間隔 c と縁端距離 e とした。さらに、ボルト本数および床版重量の削減が可能なエンドプレート形状として、図-12に示すように、荷重伝達にあまり寄与しないと考えられるボルト位置を切り欠いたケースも検討した。設定した解析ケースを表-4に示す。解析ケースの名称は、 t_f , c , e に続く数字はそれぞれ、エンドプレート板厚、行方向ボルト間隔、縁端距離の寸法を表しており、切り欠きを設けたケースは末尾に cut と付けた。tf36-c90-e50 は、2章の設計計算に基づく標準的なモデルである。

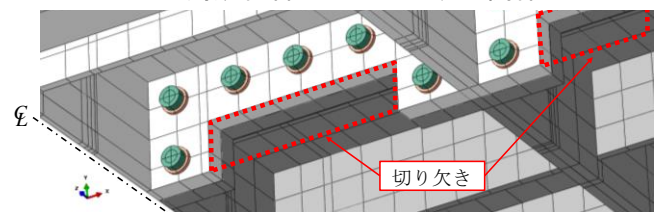


図-12 エンドプレートに設けた切り欠き

表-4 解析ケース

解析ケース	エンドプレート板厚 t_f (mm)	行方向ボルト間隔 c (mm)	縁端距離 e (mm)	切り欠き
tf36-c90-e50 (標準モデル)	36	90	50	無し
tf36-c75-e50	36	75	50	無し
tf36-c105-e35	36	105	35	無し
tf36-c105-e35-cut	36	105	35	有り
tf32-c105-e35-cut	32	105	35	有り
tf28-c105-e35-cut	28	105	35	有り

※赤字：着目パラメータ

3.3 解析結果と考察

3.3.1 荷重-鉛直変位関係

正曲げ作用時の荷重-鉛直変位関係を図-13に示す。鉛直変位は、対称面支間中央のデッキ上面の節点から抽出し、鉛直下向きを正とした。図中には、比較のために、エンドプレート接合部を副リブに置き換えた継手無しモデルの鉛直変位も併せて示している。全てのケースで線形の応答を示しており、継手無しモデルの鉛直変位と大差ないことから、接合部において必要な剛性を確保できていると考えられる。また、切り欠きを設けたケースでは、エンドプレートの剛性が低下するため、鉛直変位が大きくなっている。

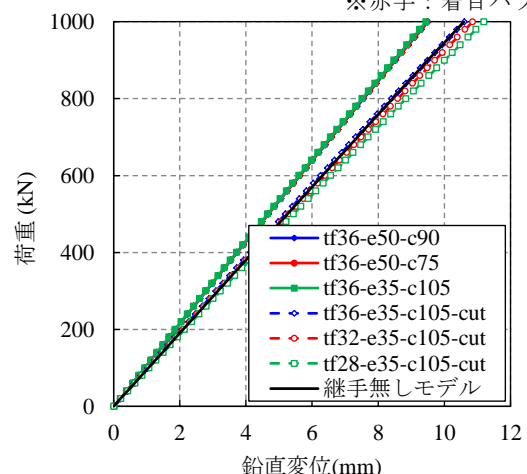


図-13 荷重-鉛直変位関係 (正曲げ)

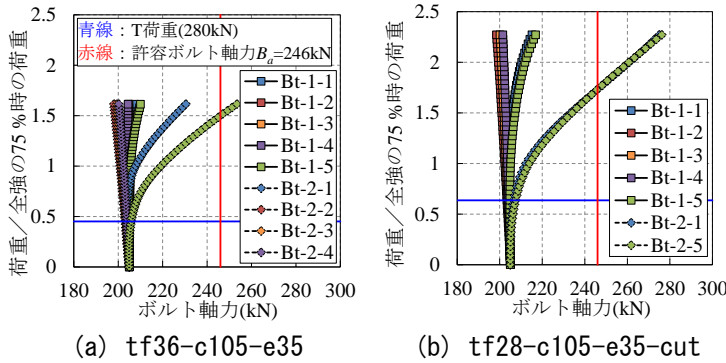


図-14 荷重－ボルト軸力関係（正曲げ）

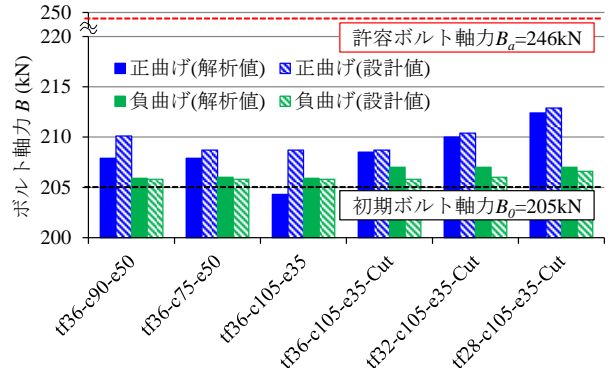


図-15 全強の75%時におけるボルト軸力

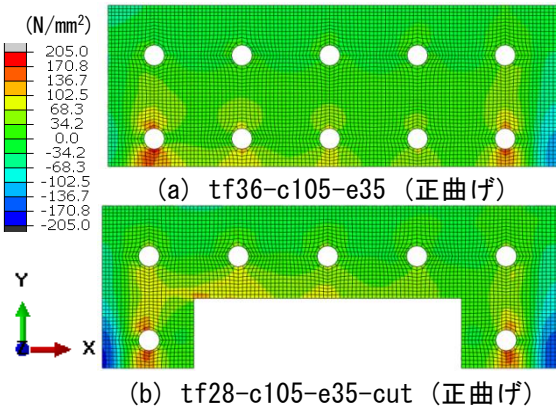


図-16 全強の75%時における橋軸方向の直応力分布

表-5 全強の75%時における接合面の直応力（単位：N/mm²）

解析ケース	ティールウェブ結合位置			ボルト中心位置		
	解析値 (最大)	設計値	誤差 (%)	解析値 (最大)	設計値	誤差 (%)
tf36-c90-e50	-68.4	-200.7	65.9	227.5	116.5	-95.3
tf36-c75-e50	-69.7	-210.4	66.9	234.7	129.5	-81.2
tf36-c105-e35	-55.0	-210.4	73.9	210.3	129.5	-62.4
tf36-c105-e35-cut	-105.4	-210.4	49.9	104.2	129.5	19.5
tf32-c105-e35-cut	-134.2	-260.7	48.5	129.6	172.0	24.7
tf28-c105-e35-cut	-179.4	-329.5	45.6	166.9	240.3	30.5

※誤差=(設計値-解析値)/設計値，赤数字>許容応力度

3.3.2 荷重－ボルト軸力関係

正曲げ作用時における荷重－ボルト軸力関係の一例を図-14に示す。凡例のボルト番号は、例えば Bt-2-1 なら2行目1列目のボルト軸力を表す。また、全強の75%時の Bt-2-1 ボルト軸力を図-15に示す。正曲げ作用時において、行方向ボルト間隔 c は軸力増加にほとんど影響しないが、縁端距離 e を 35mm としたケースでは、軸力増加が抑えられている。また、エンドプレートに切り欠きを設けたケースでは、JSSC 設計指針を適用して求めた設計値と解析値が比較的良好に一致しており、その評価精度は 5% 程度である。一方、負曲げ作用時では、軸力増加はほとんど見られない。

3.3.3 エンドプレートの応力性状

正曲げ作用時におけるエンドプレートの橋軸方向の直応力分布の一例を図-16に示す。図-16(a)では、主リブ結合位置に圧縮応力が生じておらず、ボルト位置に高い引張応力が生じている。これは、エンドプレートが副リブとして荷重を分担し、曲げ応力が生じたためと考えられる。一方、切り欠きを設けた図-16(b)では、ボルト位置の引張応力が低減し、主リブ結合位置の圧縮応力が大きくなっている。このことから、エンドプレートに切り欠きを設けることで、設計計算で仮定したモデルに近づいたと考えられる。

正曲げ作用時における、Bt-2-1 ボルト位置の直応力の結果を表-5に示す。接合面の直応力は、標準モデル

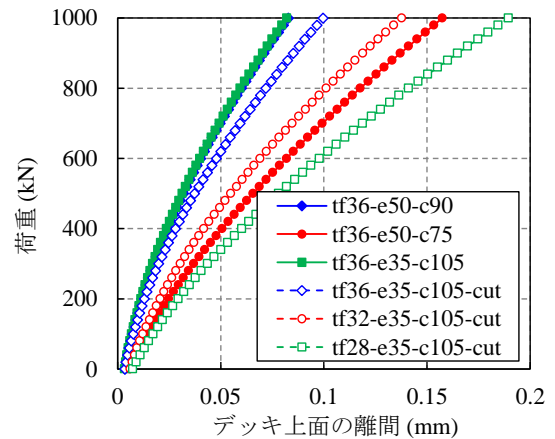


図-17 荷重－離間量関係（負曲げ）

と比較して、行方向ボルト間隔を小さくしてもほとんど変わらないが、縁端距離を小さくすると低減されている。これは、曲げによる引張力が接合部に作用するためと考えられる。また、切り欠きを設けたケースでは、直応力は設計値よりも小さくなっており、エンドプレート板厚を 28mm まで薄くすることができる。

3.3.4 荷重－離間量関係

引張接合継手を適用した接合部では、デッキ上面の離間により、舗装にひびわれが発生することが懸念される。負曲げ作用時において、デッキ上面の荷重－離間量関係は、図-17のように概ね線形の挙動を示しており、デッキ上面の離間量は、1000kN 載荷時でも 0.2mm 程度である。また、行方向ボルト間隔 c を 75mm とした場合、デッキから1行目ボルトが離れるため、離間が大きくなっている。

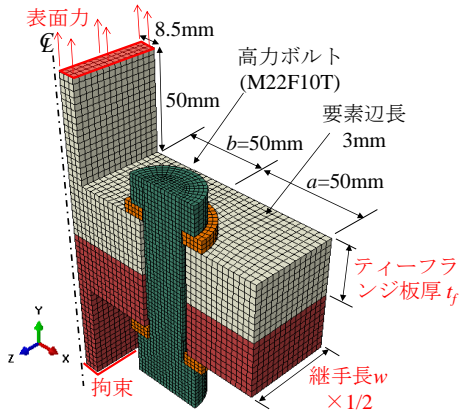


図-18 T継手要素解析モデル

表-6 T継手要素解析ケース

解析ケース	ティーフランジ板厚 t_f (mm)	継手長 w (mm)
tf22-w68	22	68
tf28-w68	28	
tf32-w68	32	
tf22-w87.5	22	87.5
tf28-w87.5	28	
tf32-w87.5	32	
tf22-w110	22	110
tf28-w110	28	
tf32-w110	32	

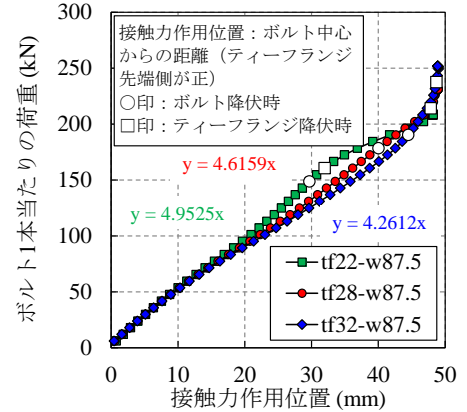


図-19 荷重—接触力作用位置関係

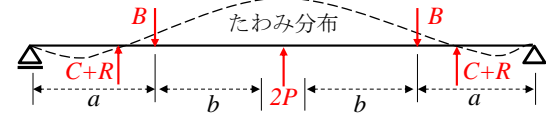


図-20 ティーフランジを単純はりに置き換えたモデル

4. エンドプレートの応力度照査に関する検討

3章の解析結果より、JSSC設計指針によるエンドプレート応力度の評価精度を改善する必要があることを示した。そこで、T継手要素の解析を行い、接触力作用位置について検討した。解析モデルを図-18に、解析ケースを表-6に示す。離間挙動に影響を及ぼすと考えられるティーフランジ板厚 t_f と継手長 w に着目した。解析より得られた荷重—接触力作用位置関係を図-19に示す。弾性範囲内であれば、荷重—接触力作用位置関係は概ね線形の挙動を示すことから、はり理論により接触力作用位置を評価できると考えられる。

図-20に示すように、ティーフランジを引張力 P 、ボルト軸力 B 、接触力 $C+R$ が作用する単純はりに置き換えて、接触力作用位置について考察した。たわみ分布より、たわみが零となる点を接触力作用位置と仮定した。はり理論より求めた接触力作用位置と、それを用いたティーウェブ結合位置の応力度照査を図-21に併せて示す。接触力作用位置は解析とはり理論でよく一致しており、ティーウェブ結合位置の直応力は、弾性範囲内であれば精度よく評価できると考えられる。

5. 結論

本研究では、铸铁床版モジュール接合部に適用した高力ボルト引張接合継手を対象に、弾塑性有限変位解析を実施し、その力学的挙動および設計法について検討した。得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 引張接合継手の縁端距離は、正曲げに対して継手強度が向上することから最小縁端距離とすることが望ましい。また、デッキから1行目ボルト中心までの距離は、継手強度にあまり影響せず、負曲げに対してデッキ上面の離間を抑えるために小さくする方が望ましい。

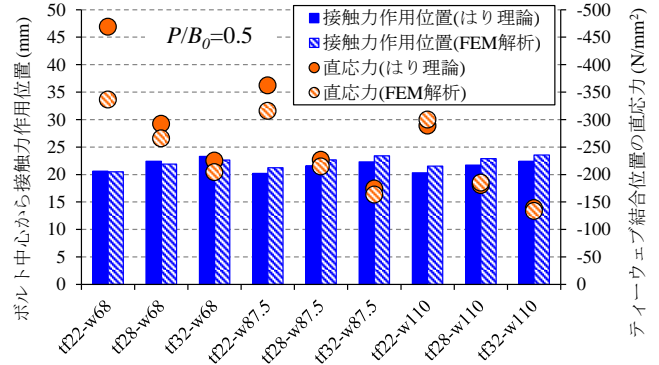


図-21 接触力作用位置とティーウェブ結合位置の直応力

- (2) エンドプレートに切り欠きを設けることで、副リブとしての荷重分担を小さくでき、設計計算で仮定したモデルに近づくことを明らかにした。その場合、継手強度はエンドプレートの主リブ結合位置の降伏で決まる。
- (3) モジュール接合部に適用した、高力ボルト引張接合継手は、エンドプレートに切り欠きを設けることで、主リブ曲げ応力度の全強75%に対して、エンドプレート板厚を設計計算に基づく36mmから28mmまで薄くしても成立する。
- (4) JSSC設計指針に基づくボルト軸力の照査は、解析結果と比較して5%程度の精度で安全側に評価することができる。一方、エンドプレートの応力度照査は、接触力作用位置の影響が大きく、JSSC設計指針の評価精度の改善が必要である。
- (5) ティーフランジを単純はりに置き換え、はり理論に基づくたわみ分布より求めた接触力作用位置を用いることで、エンドプレートの応力度照査の評価精度を10%程度まで改善することができる。

参考文献

- 1) 玉越隆史, 大久保雅憲, 星野誠, 横井芳輝, 強瀬義輝: 道路橋の定期点検に関する参考資料 (2013年版) — 橋梁損傷事例写真集一, 国土技術政策総合研究所資料, 第748号, 2013.7.
- 2) 飛永浩伸, 村山稔, 佐伯英一郎, 玉越隆史, 山口栄輝, 三木千壽: 球状黒鉛鑄鉄の道路橋床版への適用に関する基礎的研究, 鋼構造論文集, 第24巻第95号, pp.13-24, 2017.9.
- 3) 飛永浩伸, 山口栄輝, 村山稔: 球状黒鉛鑄鉄を用いた道路橋床版の塑性変形性能に関する考察, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.109-119, 2018.3.
- 4) 広瀬剛: 床版取替工事概論, 橋梁と基礎, Vol.51, pp.22-25, 2017.5.
- 5) 日本鋼構造協会: 橋梁用高力ボルト引張接合設計指針, 2004.5.