

高力ボルトエンドプレート接合の性能向上を目的とした

接合部の構造詳細に関する研究

STUDY ON THE CONNECTION DETAILS FOR PERFORMANCE IMPROVEMENT OF BOLTED MOMENT END PLATE CONNECTION

橋梁工学分野 杉本悠真
Bridge Engineering Yuma Sugimoto

工事桁や緊急橋にて、施工時間の短縮が可能な高力ボルトエンドプレート接合の利用が期待されており、設計法の整備、より合理的な接合部構造が求められている。本研究では、接合部の構造詳細に着目し、耐力の向上策を提案した。まず、FEM解析にてスカーラップを有したエンドプレート接合構造を提案し、実物大実験によりその実現可能性を示した。また、補剛リブの構造パラメータが継手耐力に与える影響を、FEM解析にて定量的に明らかにした。

It is expected to use bolted moment end plate connection, which can make reduce the construction period, for the connection of construction girders and emergency temporary bridges. And this connection is desired to be stronger. This study focused on the connection details to improve the performance of bolted moment end plate connection. First, the end plate with a scar wrap is proposed by FEM analysis, and the feasibility of this end plate is confirmed by full scale experiment. In addition, the effect of structural parameters of the stiffening rib on the connection strength is quantitatively clarified by FEM analysis.

1. 研究背景と目的

橋梁の部材接合形式の一つである高力ボルト引張接合は、ボルト1本当たりの作用伝達能が大きく、必要ボルト本数を低減でき、施工性や経済性の観点から有利な接合形式であることが知られている。

近年、緊急橋(図-1)の主桁接合部に高力ボルト引張接合を採用した事例が報告されたり。本緊急橋では、引張接合を主桁連結部に採用することで、添接板およびボルト本数を40%削減した。しかし、本接合部では、ボルト軸力の過大な増分を防ぐため図-1(b)に示す、エンドプレート部を主桁フランジから突出させた構造を採用しているが、これが仮置き時の制約となっている。さらに図-1(b)に示す補剛リブが継手耐力に与える影響は設計指針²⁾において定量化されていない。

本研究では接合部の構造詳細に着目し、エンドプレ

ート接合の耐力の向上策を提案した。まずFEM解析で主桁接合部の耐力向上が期待できる接合部構造詳細を提案し、実大実験により提案した接合構造の有用性および、実際の接合部の挙動を明らかにする。さらにFEM解析にて、補剛リブの構造パラメータと継手耐力に及ぼす影響を検討する。

2. 主桁エンドプレート接合部の耐力向上策に関する解析的検討

2.1 解析モデルおよび解析ケース

有限要素解析にはAbaqus/Standart6.9を使用し、図-2のように、構造の対称性を考慮した1/2領域をモデル化した。使用要素はソリッド要素とし、エンドプレート・ボルト・ワッシャーはメッシュサイズを10mmとし、全て8節点アイソパラメトリック低減積分要素(C3D8R)で分割している。接触部にはAbaqusの接触機能を用いて、境界非線形性を考慮した。初期ボルト軸力導入後にP1、P2荷重を載荷する。P1、P2は連結部の設計断面力である曲げモーメント5,614kNm、せん断力255kNが発生するように、P1:P2=1,735kN:1,098kNの比率で増加させた(図-3)。解析で与えた鋼材の材料特性を表-1に示す。ボルト材料はM24・S14Tでバイリニア型弾塑性モデルを使用し、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。



(a)緊急橋全景 (b)連結部の構造
図-1 国土交通省により開発された緊急橋

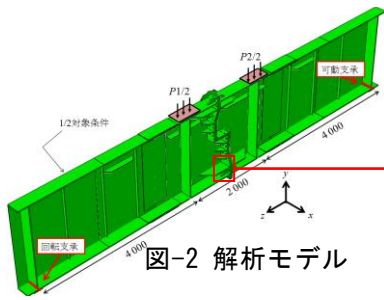


図-2 解析モデル

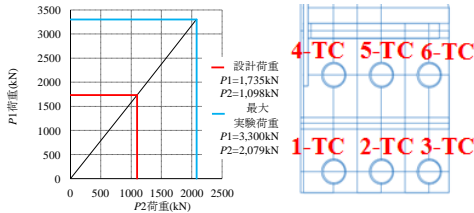


図-3 P1, P2 関係

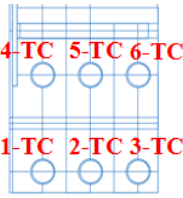


図-4 ボルト番号

表-1 与えた材料特性

	鋼材	降伏応力の (MPa)	終局状態 の (MPa)	ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 μ	構成則	要素
ウェブ	SM570	460	-	200	0.3	降伏棚を有する ひずみ硬化型	8節点 アイソパラメ トリック 要素
フランジ エンドプレート 補強リブ	SM570	451	-				
補剛材 (補強リブを除く)	SM490	366	-				
ボルト	S10T	904	1047	2000		バイリニア型	
	S15T	1268	1335				
座金	(Rigid)	-	-				

表-2 解析ケース

	ORG	Case 1	Case 2	Case 3
連結部 形状				
連結部 詳細				
連結部における ねじ曲げ モーメント M_x (kN・m)	9133.7	8237.3	8237.3	8219.2

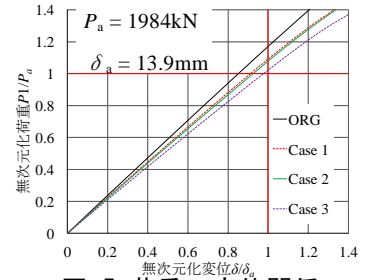
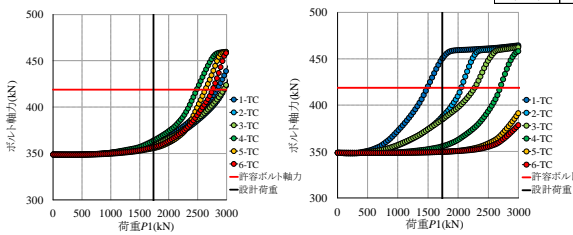


図-5 荷重-変位関係

表-3 各ケースの連結部耐力

	ORG	Case 1	Case 2	Case 3
最も早く 降伏するボルト	4-TC	1-TC	1-TC	1-TC
許容ボルト軸力 到達時のP1荷重 (連結部耐力) (kN)	2487.2	1492.8	1892.5	2176.0
連結部耐力/全強 (%)	125.4	75.2	95.4	109.7
全強 (kN)	1984.0			

表-4 設計荷重時の離間コンター図



(a) ORG

(b) Case 1

(c) Case 2

(d) Case 3

図-6 荷重-ボルト軸力関係

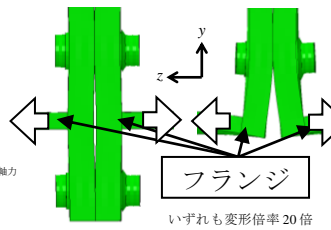


図-7 ORG と Case 1 の変形図

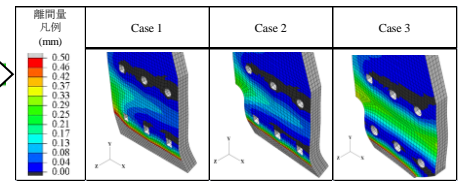


図-8 Case 1 と Case 2 の主応力線比較

引張域のボルト名称を図-4に示す。フランジ側ボルト列を第1列とし、ウェブ側ボルトから1-TC, 2-TC, 3-TC, 第2列のウェブ側から4-TC, 5-TC, 6-TCとする。解析ケースはリブ配置, フランジ形状, エンドプレート形状を変化させ, 表-2のように設定した。表中の連結部詳細図において, 青色部分は主桁のフランジ, ウェブ断面, 赤色部分は水平補剛リブ, 補剛リブを表している。

ORGは基本ケースであり, 突出したエンドプレートを有するケースである。

Case 1はエンドプレート突出部を取り除いた解析ケースである。Case 2はエンドプレートのウェブ・フランジ交差部にスカーラップを設置したケースで, スカーラップの大きさは1-TCボルトからの縁端距離を考慮して半径35mmの1/4円形としている。Case 5はフランジ板厚, 板幅を連結部付近で小さくし, 連結部の断面二次モーメントを他のケースと同様にするため, 板厚40mmの水平補剛リブを設置し, さらにCase 2と同様にスカーラップを設けたケースである。

2.2 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-5に荷重-鉛直変位関係を示す。グラフの縦軸, 横軸はそれぞれ, 一般部の断面を有し継手を有さない場合の対応する許容荷重と許容たわみで無次元化している。全てのケースで P_a 時に δ_a 以下の変位を示し, 設計で想定する断面力までは, 連結部において一般部と同等の主桁剛性が確保されている。

(2) 荷重-ボルト軸力関係

表-3に全てのケースの連結部耐力およびその全強に対する割合を示す。ここで, 連結部耐力はボルト軸力が許容ボルト軸力に到達した際の P_1 荷重と定義する。表中の灰色部分は連結部耐力が設計荷重以下であることを示し, Case 1は必要な連結部耐力を満足していない。また, 全てのケースで連結部耐力は全強の75%以上であった。

図-6に荷重-ボルト軸力の関係を示す。荷重-ボルト軸力関係は, 図-4の6本のボルトに着目した。図-6の横軸は P_1 荷重とし, 図中の赤水平線は許容

ルト軸力で、文献 2)より、降伏ボルト軸力 B_y の 90% の値を採用し、S14T の場合は $0.9B_y = 418.8\text{kN}$ とした。

図- 6 (b) より Case 1 では、ウェブ、フランジ交差部から最も近い 1-TC ボルトの軸力が早期に増加し、設計荷重以前に許容ボルト軸力に到達している。連結部耐力は 1492.8kN であり、突出部構造を有する ORG と比較すると約 1000kN 減少している。これは、非突出構造では連結部の断面二次モーメントが ORG よりも小さくなること、剛性が大きなウェブ・フランジ交差部に引張力が集中し、交差部から最も近い 1-TC ボルトに引張荷重が集中したこと、さらに引張側フランジが、図- 7 に示すように T 継手から L 継手になり、下フランジ側のボルト軸力増分が大きくなったと考えられる。また、フランジ・ウェブ交差部から離れた位置にある 5,6-TC ボルトはほぼ軸力を分担していない。このため 6 本のボルトがほぼ同様の軸力増分である ORG と比較して、Case 1 では継手がボルト 6 本分の強度を十分に発揮していないことがわかった。以上のことから、ウェブ・フランジ交差部から近い位置にある 1-TC ボルトの軸力を低減させ、交差部から遠い位置にある 5,6-TC ボルトに荷重を分担させることが重要であることがわかる。

Case 2 の耐力は $1,892.5\text{kN}$ と Case 1 と比較して 399.8kN 向上した。図- 8 は Case 1 および Case 2 のウェブ、フランジ、エンドプレート部分の主応力線図である。なお、図では主応力の分布を見やすくするために水平補強リブを取り除いている。図- 8 に示すように、剛性が高く荷重が集中するウェブ・フランジ交差部にエンドプレートにスカーラップを設けることで、ウェブからの引張力が 1-TC ボルトに作用せず、ボルト軸力増分が低減し耐力が向上したと考えられる。

Case 3 は、非突出構造の中では最もボルト軸力増分が均一となり、全てのボルトで設計荷重時に許容ボルト

ト軸力以下となった。連結部耐力は $2,176\text{kN}$ であり、Case 1 と比較すると約 700kN 向上している。これは、表- 4 に示す設計荷重時の離間コンターから、Case 3 では第 1, 2 行間に離間が発生し、水平補剛リブを継手ウェブとした T 継手の機構が生成されて、連結部耐力が向上したと考えられる。

3. スカーラップを有したエンドプレート接合部の力学的挙動に関する実験的検討

3.1 実験供試体及び荷重ケース

前章で提案した、スカーラップを有したエンドプレート接合の有用性を検証するために、実物大の供試体を用いた実験を行う。図- 9 に供試体の概要を示す。ここでは、支間中央に連結部を有した、支間 10m の H 形桁の供試体を使用する。特に、荷重の分担を目的に板厚 32mm の水平補剛リブを前章の解析モデルと同様に第 1 列、第 2 列ボルト間に設置している (図- 10)。主桁部材、エンドプレート、水平補剛リブは SM490Y 材、高力ボルトは M24S10T を使用した。本実験でひずみゲージにより軸力を測定するボルトは、引張側で軸力増分が顕著であると考えられる図- 10 の赤枠で囲った 12 本である。本実験では、 2000kN 油圧ジャッキ 2 台を用いて、図- 9 のように単純支持した実験桁に対して 4 点等曲げ荷重を行う。

設計荷重 P_d は応急橋で想定される最大曲げモーメントを再現するための荷重、全強 P_s は水平補剛リブを考慮しない一般部主桁断面 (H1500-500-19-11) に許容曲げ圧縮応力度が発生する時の荷重、そして、終局荷重 P_u は一般部断面の曲げ座屈時の断面力状態から決定される荷重。最大荷重 P_{max} は実験供試体の荷重-鉛直変位曲線のピーク荷重 P とそれぞれ定義する。これらの荷重と曲げモーメントを表- 5 に示す。

荷重ケースを表- 6 に示す。1 回目荷重は $P=1500\text{kN}$ を目標に荷重し、除荷行う。2 回目荷重は一回目の載

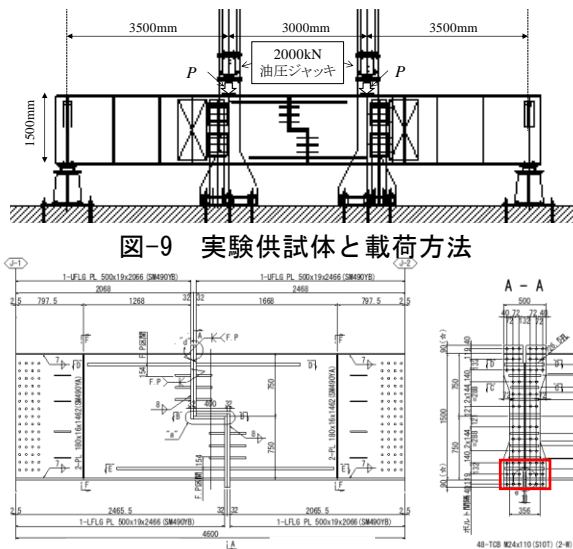


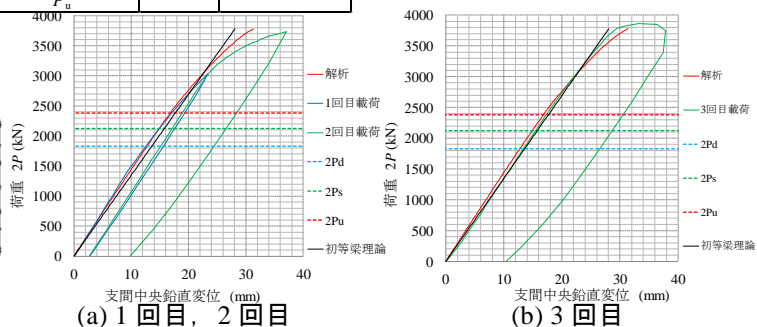
図-9 実験供試体と荷重方法

表-5 荷重と曲げモーメント

	載荷荷重 P (kN)	接合部に発生する曲げモーメント M (kNm)
設計荷重 P_d	914	3200
全強 P_s	1063	3719
終局荷重 P_u	1189	4162

表-6 載荷ケース

載荷ケース	P	供試体
1回目載荷	1520	同様の供試体
2回目載荷	1870	
3回目載荷	1950	



(a) 1 回目, 2 回目

(b) 3 回目

図-11 実験結果荷重-変位関係

図-10 接合部詳細

荷が終わった供試体に再び $P=1700\text{kN}$ を目標に載荷し、除荷する。これは、想定外の外力が作用した後の接合部の性能確認を目的としている。3 回目載荷は桁のリユースを想定し、残留変位を有する供試体でボルトのみを取り換え、最大荷重まで載荷を行う。

3.2 実験結果

実験結果は再現解析と照らし合わせ評価する。

(1) 荷重変位関係

図-11 に実験と再現解析の荷重-支間中央鉛直変位の関係を示す。実験と再現解析の初期剛性の誤差は約 5.7% であることから解析モデルは線形な範囲で桁の全体挙動を再現できている。図-11 (a) は 1 回目と 2 回目の荷重-変位関係である。赤線は再現解析より得られた曲線である。1 回目 ($P = 1520\text{kN}$ まで載荷) を青線、2 回目 ($P = 1870\text{kN}$ まで載荷) を緑線で表す。また、梁理論のたわみ値は主桁の一般部断面で一樣と仮定してせん断変形を考慮して算出した。図-11 (a) より終局荷重までは再現解析と実験結果の曲線がよく整合しており、1 回目載荷後に除荷を行った場合、2.9mm の残留変位が生じた。また、2 回目載荷時の初期剛性は 1 回目除荷時の剛性とほぼ整合している。

図-11 (b) は 3 回目の荷重-変位関係である。3 回目

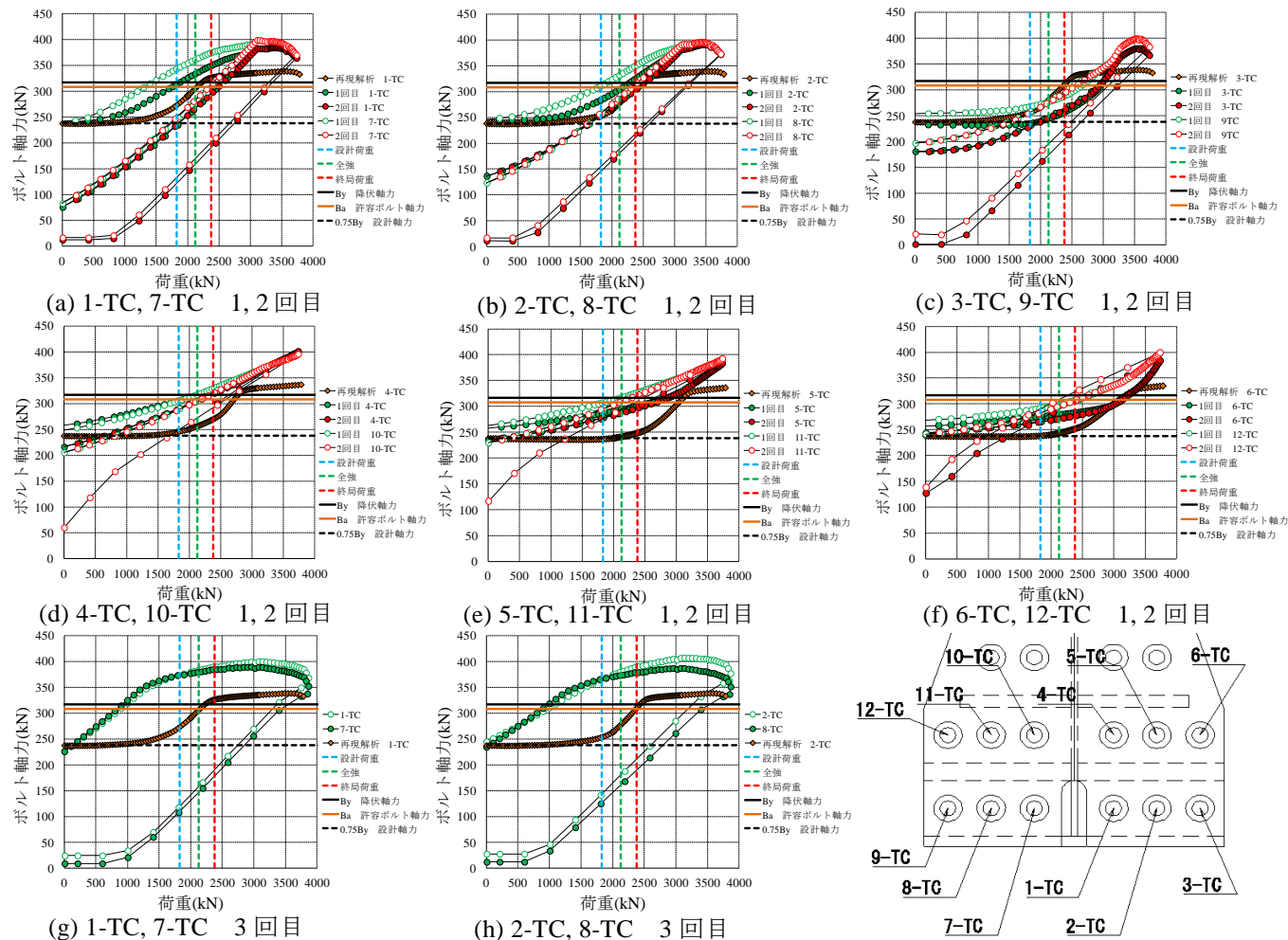


図-12 荷重-ボルト軸力関係

の最大荷重は $P_{\max}=3850\text{kN}$ であり、主桁の曲げ座屈により決定した。また、いずれのケースも設計荷重時までは線形な挙動を示した。

(2) 荷重-ボルト軸力関係

図-12 に、1 回目、2 回目の 1-TC から 12-TC ボルトの荷重 $2P$ -ボルト軸力 B の関係を示す。ボルト番号は図-13 に示す。橙色のプロットは再現解析の曲線である。また、図-12 中の青、緑、赤点線がそれぞれ設計荷重、全強、終局荷重を示す。そして、橙、黒水平実線がそれぞれ許容ボルト軸力、降伏ボルト軸力を示す。1-TC、7-TC、8-TC ボルトが設計荷重以前に許容ボルト軸力を超え、特に、7-TC ボルトは設計荷重到達前に降伏ボルト軸力に達した。また、1-TC、7-TC のようにウェブ対称の位置にあるボルト同士で軸力の増分が異なり、解析結果と大きく異なったが、これらは図-14 の接触圧の分布に偏りがあることが原因と考えられる。また、1 回目除荷後は全ボルト軸力が初期ボルト軸力よりも軸力が低下する。特に、第 1 列のボルトで軸力の低下が顕著であり、1, 7-TC ボルトの軸力低下率 ($100 - 1 \text{ 回目除荷後軸力} / \text{試験前軸力} \times 100$) はそれぞれ 68.4%、65.4% であった。

2 回目の載荷では設計荷重時に許容ボルト軸力に到

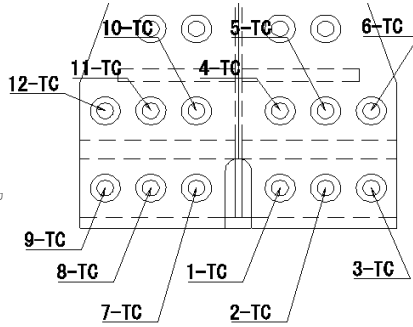


図-13 高力ボルトの番号

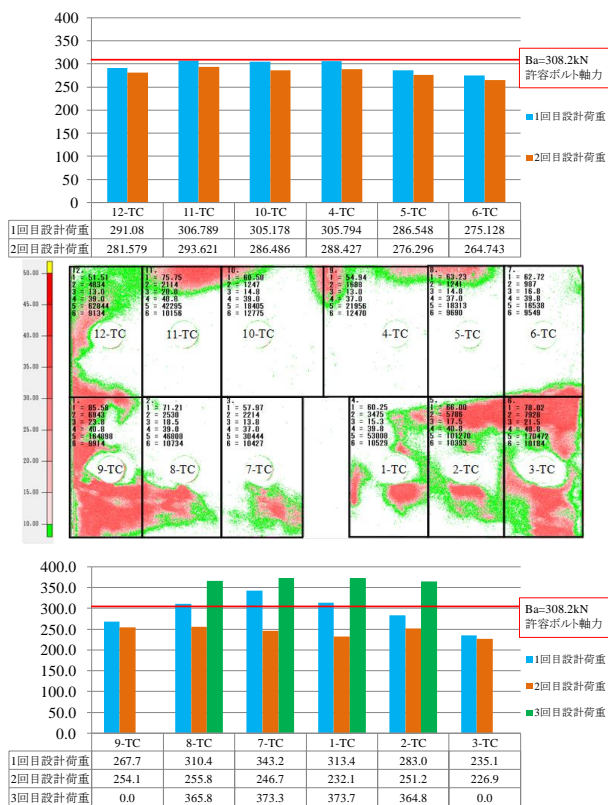
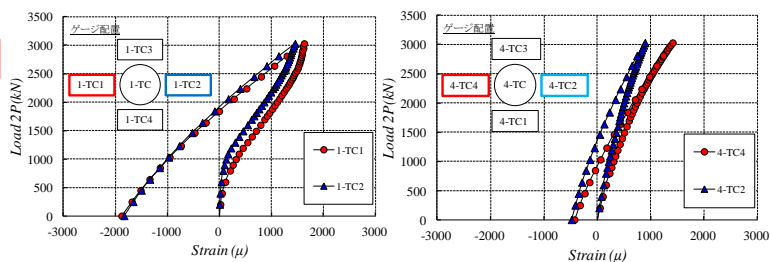


図-14 接触圧分布と設計荷重時のボルト軸力

達するボルトはなかった。これは1回目の荷重にて降伏に至ったボルトが荷重を除荷した際に、大きく軸力が低下したためであり、ボルト軸力が顕著に増加するボルトにおいて許容される軸力の変動範囲が大きくなったためである。さらに、荷重変位関係に着目した場合、1回目荷重時の初期剛性と2回目荷重時の初期剛性に大きな変化は見られなかった。これらのことから、本連結部構造は一部の高力ボルトが降伏ボルト軸力に至った場合、除荷後に2.9mmの残留変位が生じるものの、継手部の断面力の伝達性能は損なわれないと判断できる。また、ボルトの脆性破壊は起こらなかった。

図-12に3回目荷重の1-TC、2-TC、7-TC、8-TCボルトの荷重2P-ボルト軸力関係を示す。すべてのボルトで早い段階から軸力が増加し、設計荷重以前に降伏ボルト軸力に至った。しかし、降伏ボルト軸力到達後、すぐに最大軸力には到達せず、緩やかな軸力の上昇を続け終局荷重以降に最大ボルト軸力に到達した。このことから、初期変形を有した接合部においても、脆性的なボルト破断は起こさず、降伏後は他のボルトへ荷重が分担していることを確認した。

図-13に設計荷重時のボルト軸力分担を示す。1回目は第1列目のウェブ側の1、7-TCボルトの軸力分担が大きく、フランジ端部に向かって軸力分担が低減している。また、2回目は1回目と比較してボルトに分担する荷重が均等になる傾向が見られた。さらに、2回目は設計荷重時に許容ボルト軸力に到達するボルト



(a) 1-TC (b) 4-TC

図-15 荷重-ボルト軸ひずみ関係

は見られず、繰り返し荷重を行うことで、軸力の分担が均等になった。

(2) スカーラップの効果

図-15に荷重-ボルト軸ひずみの関係を示す。ウェブから近い1-TC、4-TCボルトの軸ひずみを示している。図より、1-TCではウェブ側の軸ひずみの大きさはその対称位置のひずみと大きく変わらず、ウェブ側からの引張力による曲げの影響が小さい。それとは逆に、ウェブ側にスカーラップのない4-TCボルトの軸ひずみでは、ウェブ側のひずみが大きく、ウェブからの引張により、曲げが作用していることが分かる。これらより、スカーラップの効果を確認した。

4. 補剛リブを有した要素継手の力学的挙動に関する解析的検討

補剛リブはエンドプレートの曲げ剛性と、荷重分担の2つの効果が期待できる。ここでは、エンドプレート接合部に補剛リブを設置してその効果を確認する前に、要素モデルを使用し、補剛リブの構造パラメータと継手耐力の関係を明らかにする。

4.1 解析モデル及び解析ケース

T接合、L接合を対象としてFEM解析を行う。使用する解析ソルバーはAbaqus/Standard 6.16である。また、補剛リブの効果を確認するために図-16(c)(d)に示すような補剛リブを有した解析も行う。解析対象は図の橙色の部分で、T接合の場合は仮定した要素継手の1/4領域、L接合の場合は1/2領域をモデル化し、対称面には境界条件として対称条件を導入している。補剛リブ配置について図-16(c)(d)のuni配置、bi配置も検討する。継手フランジ板厚、補剛リブ寸法、リブ配置を表-7のように変化させ計90ケースの解析を行った。継手ウェブ板厚は19mmで一定、継手ウェブ長さは継手フランジ上面から400mmで一定とした。

解析モデル中の、接触面には、Abaqusの接触機能を用いた接触面を設定し、使用材料は継手ウェブ、継手フランジはSM490材、使用した高力ボルトはM24F10T、座金は弾性体とした。解析は、ボルト軸力導入段階と引張荷重導入段階との2段階に分けて行った。初期ボルト軸力は高力ボルトの締め付け長さ中央に238kNの

締結力を導入し、引張荷重は、継手ウェブ最上面の全節点に等しい強制変位により与えた。

4.2 感度分析

感度分析を行うに際し、各構造パラメータが継手耐力にどの程度寄与するかを次式に示す決定係数 R^2 により調べる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2}$$

ここで、 y_{ij} は着目する構造パラメータ j での i 番目のデータ、 \bar{y}_j 、 \bar{y} はそれぞれ、着目する構造パラメータ j における平均、全てのデータの平均を示す。

図-18にそれぞれT接合とL接合の得られた感度分析結果を示す。T、L接合ともにリブ配置、継手フランジ板厚が継手耐力に与える影響が大きい。また、T接合では補剛リブ幅 l_{lr} が継手耐力に与える影響が大きい。これはボルトと作用点間の距離が短く、てこ反力の発生を抑制できるためである。

L接合は補剛リブが離間荷重に与える影響は小さいことが分かった。これはL接合では継手の偏心曲げにより継手フランジ先端部で大きなたこ反力が発生するが、この変形は補剛リブの構造パラメータによって抑制できないためと考えられる。

5. まとめ

本論で得られた結果とまとめる

- 1) エンドプレート接合における剛性の高いウェブ、フランジ交差部にスカーラップを設けることで、ウェブ、フランジ交差部から最も近いボルト

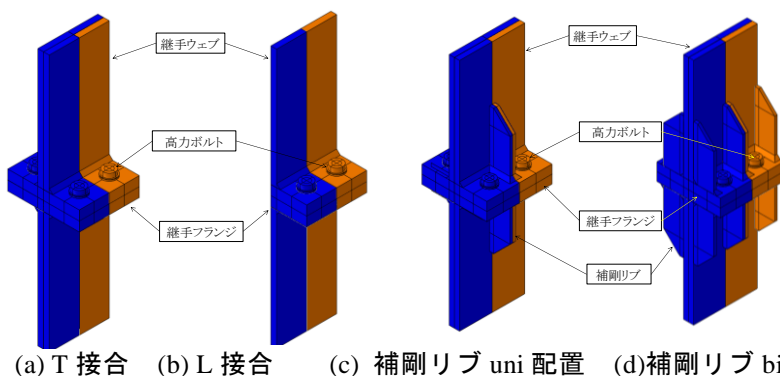


図-16 対称とした継手要素とモデル化範囲

表-7 解析ケース

継手フランジ板厚 t_f (mm)	基準		パラメータ		
	22	32	42	-	-
補剛リブ板厚 t_r (mm)	11	22	39	-	-
補剛リブ幅 l_{lr} (mm)	25	50	75	100	-
	75	25	50	75	100
補剛リブ長さ l_{wr} (mm)	100	200	400	-	-
補剛リブ配置	uni	norib	uni	bi	-

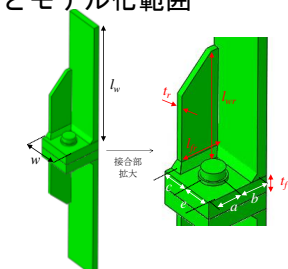


図-17 要素継手寸法の定義

の軸力が低減した。さらに、下フランジ断面積を減少させることで、水平補剛リブへ荷重が伝達し、2列目のボルトに軸力を分担させることができた。

- 2) 接合部を有した主桁の荷重-鉛直変位関係より、設計荷重時以降も充分な剛性を有していることを示した。また、接触圧の低い位置に配置されたボルトの軸力増分が顕著であったが、高力ボルト降伏後もボルトの脆性的な破壊は見られなかった。
- 3) 補剛リブを有した要素継手にて、T、L接合ともにリブ配置 (bi配置) および、継手フランジ板厚が継手耐力に与える影響が大きかった。また、T接合では補剛リブ幅が継手耐力に与える影響が大きかった。これは、引張力の作用点の移動に伴いてこ反力の発生が抑制されたためである。また、L接合では、補剛リブ設置による耐力の向上効果は大きくは見込めなかった。これは、継手の偏心曲げで発生するてこ反力は、補剛リブによって抑制できないためと考えられる。

本研究でエンドプレート接合では、一部の高力ボルトが降伏しても、接合部の剛性は充分確保できることがわかった。今後は、接合部全体の性能を担保するための新たな限界状態について検討を行う。

参考文献

- 1) 今井祐三：緊急橋の開発について，平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集，防災保全部門，No.5，近畿地方整備局，pp.1-6，2015.6.
- 2) 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.

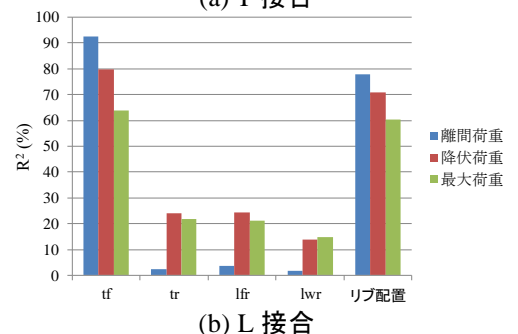
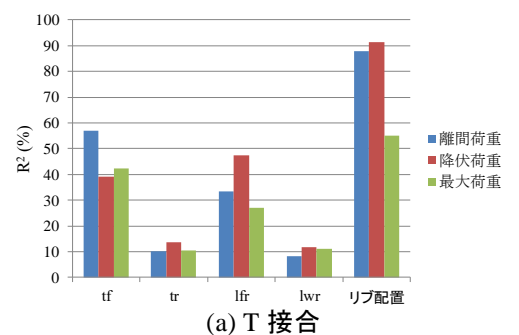


図-18 感度分析結果