

継手面にシール材を挿入した高力ボルト引張継手の実験的検討

宇都宮大学 ○学生員 清水崇寛，正会員 鈴木康夫，正会員 中島章典
大阪市立大学大学院 正会員 山口隆司

1. はじめに

高力ボルト引張継手は短締め形式および長締め形式の2つに大別される。短締め形式は、スプリットティー接合、もしくはT接合とも呼ばれ、アンカープレートおよびリブプレート等を介さず、接合面を有する板(以下、ティーフランジ板と言う)を直接、短いボルトで締め付けて接合する形式である。一方、長締め形式はダブルフランジ形式とも呼ばれアンカープレートおよびリブプレート等を介して長い高力ボルトあるいは鋼棒などで締め付けて接合する形式である。

これら両者の最も大きな力学的特徴の違いはてこ反力¹⁾の有無である。短締め形式は荷重作用線とボルト軸心が一致しないため、ティーフランジ板には曲げが発生し、ボルト周辺からティーフランジ先端にかけててこ反力が発生する。ボルト軸力(B)は載荷荷重(P)とてこ反力(R)との和に等しくなるため、てこ反力は接合部の耐荷力を低下させる。したがって、短締め形式では、てこ反力が大きくなるとボルト一本当たりの伝達力はボルト強度と比べて小さくなり、短締め形式の伝達できる作用力は長締め形式のそれと比較して小さくなる場合がある。そのため、その適用箇所が橋梁の二次部材の接合部や、ボルト軸方向以外の断面力が卓越する箇所に限られている一因となっている。したがって、短締め形式のてこ反力を抑制し、高強度化を実現することができれば、より合理的な継手形式となり、橋梁一次部材の接合法としても利用できるなど、その適用範囲の拡大につながると思われる。

てこ反力は、ティーフランジ板の厚板化により低減できることが知られている²⁾が、**図-1-a**のようなT接合型のティーウェブ直下にスペーサー等を挿入し、ティーウェブ直下以外の継手面を接触させない形状(**図-1-b**)とした場合(以下、ティーウェブ突合せ型と記す)も、てこ反力が低減され、継手強度および疲労強度が上昇することが報告されている。^{3),4)}

しかし、このようにティーウェブ直下のみを突合せ、それ以外の継手面を予め離間させた形状とした場合、荷重の増加に伴って、ティーウェブ直下に離間が発生すると、継手面全体およびボルトへの浸水、さらにそれに起因する発錆の問題が懸念される。特にボルトねじ部への浸水はボルトの遅れ破壊の原因にもなるため、何らかの防錆対策が必要となる。継手面およびボルトの防錆対策としては、継手面間にゴム等のシール材を挿入することが考えらるが、シール材の存在は、ティーフランジ板の変形に大きく影響するため、てこ反力、しいては継手強度に影響を与えられられる。

そこで本研究では、T接合型およびティーウェブ突

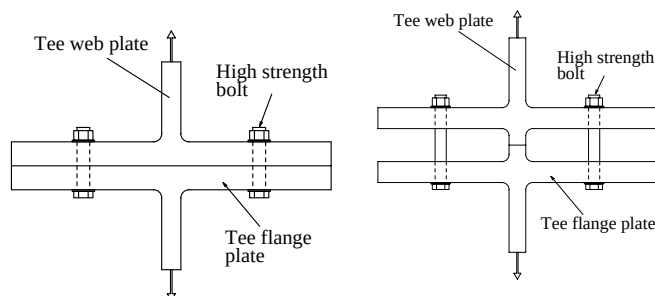


図-1-a T接合型

図-1-b ティーウェブ突合せ型

図-1 短締め形式の形状比較

合せ型の高力ボルト引張継手を対象に、継手形状、シール材の有無が継手強度や離間剛性に与える影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

本研究では**図-1**に示すT接合型およびティーウェブ突合せ型の2種類を試験体の基本形とした。試験体は、継手形状およびシール材の有無をパラメータとして、5種類を製作した。その継手形状は、**図-2**に示すようなT接合型ゴム無(**図-2-a**)、T接合型ゴム有(**図-2-c**)、ティーウェブ突合せ型ゴム無(**図-2-b**)、ティーウェブ突合せ型ゴム有(**図-2-d**)、T接合型ゴム有にワッシャーを挿入したタイプ(**図-2-e**)であり、本研究で用いた試験体一覧を**表-1**にまとめる。

試験体の製作について、T接合型はティーフランジ(寸法:45×19×122mm)にK型開先を設けたティーウェブ(寸法:45×22×200mm)を溶接した。ティーウェブ突合せ型はティーウェブ(寸法:45×22×225mm)にK型開先を設けたティーフランジ(寸法:45×19×50mm)を溶接した。これらの溶接は、全断面溶け込み溶接とした。試験体の寸法はJSSC指針⁵⁾を参照し、縮尺率が実構造物の1/2となるよう決定した。ティーフランジ厚19mmは、てこ反力係数がゼロと算出される板厚(22mm)を下回る板厚であり、T型引張継手においてもてこ反力の影響を受ける板厚である。ティーフランジ板長さ(50mm)、ボルト縁端距離(25mm, 22.5mm)はすべての試験体で同一としている。これらの寸法の設定にあたっては、縮尺率を実構造物の1/2として行われた載荷実験⁶⁾の実験結果を参照し、比較できるよう、試験体の寸法を参考にしている。なお、使用したボルトは試験体の縮尺率(実構造物の1/2)を考慮し、M12ボルトとした。ただし、首下長の長い高力ボルトセット(M12)の入手が困難なため、普通六角ボルト(強度区分:10.9)に高力ボルト用ナットをセットして代用した。シール材厚および突合せ部長さは、継手が終局状態に至

Key Words: 高力ボルト引張継手，てこ反力，シール材，終局強度，実験的研究

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210

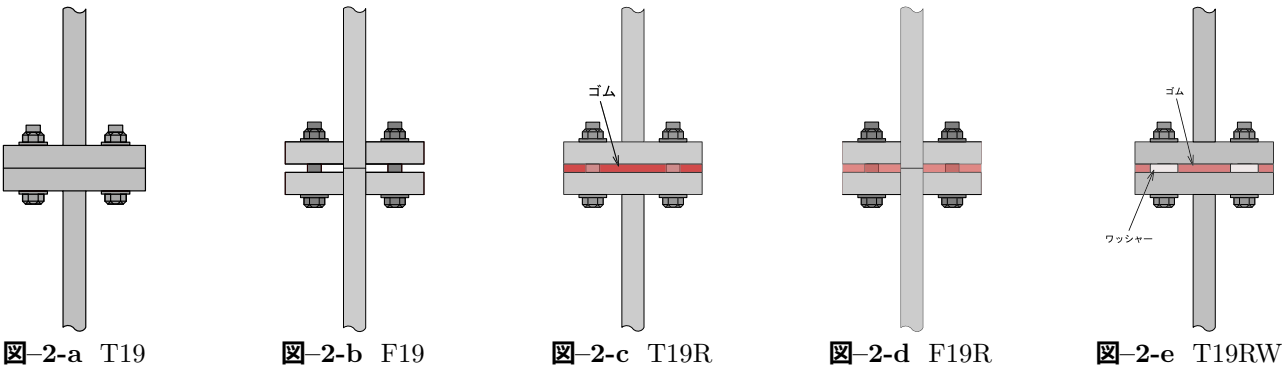


図-2 試験体形状

表-1 試験体一覧

試験体	フランジ厚 mm	形状	ゴム 硬度 (Hs)	ワッシャー
T19	19	T 接合型	-	-
T19R	19	T 接合型	60	-
F19	19	ティーウェブ突合せ型	-	-
F19R	19	ティーウェブ突合せ型	60	-
T19RW-60	19	T 接合型	60	○

表-2 実験結果一覧

試験体	降伏限界状態				終局限界状態			
	降伏強度 P_y (kN)	離間量 δ_y (mm)			終局強度 P_u (kN)	離間量 δ_u (mm)		
		ウェブ直下	ボルト位置	フランジ端		ウェブ直下	ボルト位置	フランジ端
T19	59.5	0.10	0.03	-0.01	85.7	1.51	0.68	-0.08
F19	59.8	0.16	0.09	-0.07	88.4	-	0.57	-0.70
T19R	75.9	0.07	0.04	-0.01	94.6	0.72	0.47	0.11
F19R	71.9	0.09	0.06	-0.04	92.9	0.81	0.48	-0.11
T19RW-60	72.5	0.18	0.08	-0.10	94.0	1.38	0.54	-0.71

るまで、ティーフランジ直下以外でティーフランジ板同士が接触することのないよう決定し、スプリットティー継手の解析結果⁷⁾の結果を参考にした。すなわち、継手面間の最大離間量 (3.15mm) より十分に大きい 6mm としている。また、シール材として用いたゴムの硬度は Hs60 とした。

測定項目は、載荷引張荷重、ボルト軸力、継手面間の離間量 (中央位置、ボルト位置、ティーフランジ端部)、ティーフランジのひずみとした。なお、ボルト軸力は、ボルトヘッド表面のひずみ値より換算する方法により測定した。なお、実験前に予め全てのボルトに対してキャリブレーションを行っている。また、継手面間の離間量の測定には、亀裂開口変位を測定するため、クリップ式変位計を用いた。初期ボルト軸力は、ボルトヘッドのひずみ値にキャリブレーションで得られた校正

係数を乗じた値を確認しながらレンチにより規定の軸力まで導入した。なお、初期ボルト軸力は、M12 に対する規定が土木構造物の設計基準には存在しないため、渡邊らによって行われた既往の研究⁶⁾と同様に、建築構造物の設計基準である高力ボルト設計施工指針⁸⁾を参照し、その標準導入軸力 (61.3kN) を準用した。

3. 実験結果および考察

(1) 荷重 - ボルト軸力関係

載荷荷重 (P) とボルト軸力 (B) との関係を図-3 に示す。また、各限界状態における載荷荷重および継手面離間量を表-2 にまとめる。本研究では、降伏限界状態および終局限界状態を、それぞれ降伏ボルト軸力 (79.2kN) に達した時および最大荷重時と定義している。

図の縦軸はボルト一本当たりの載荷荷重を表してお

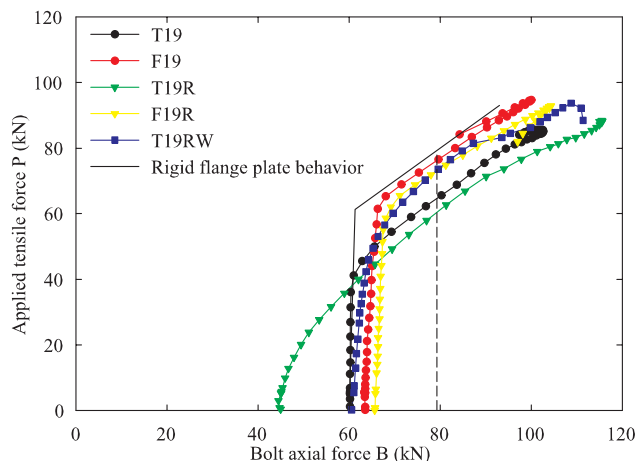


図-3 荷重 - ボルト軸力関係

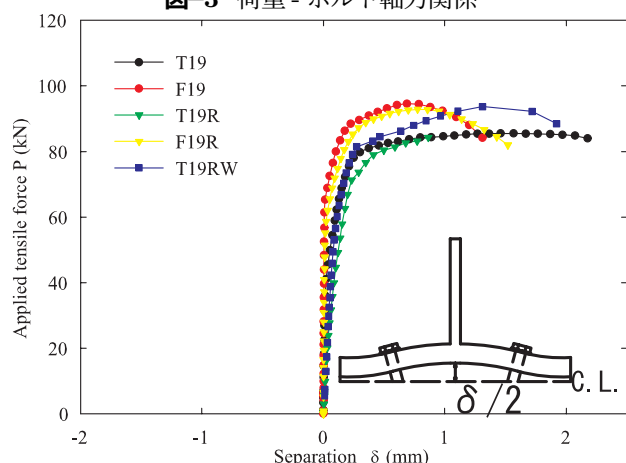


図-4-a ティーウェブ直下

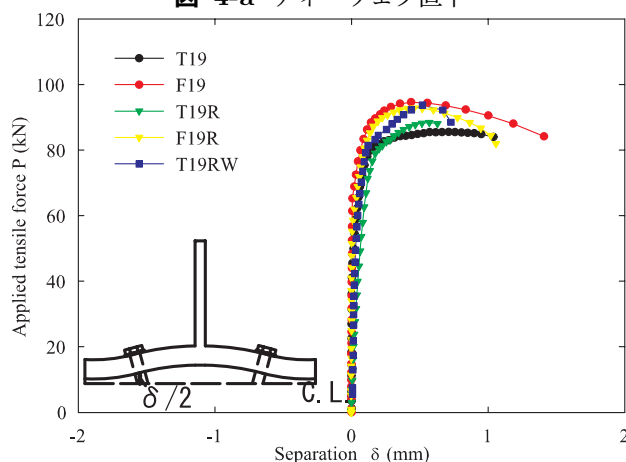


図-4-b ボルト位置

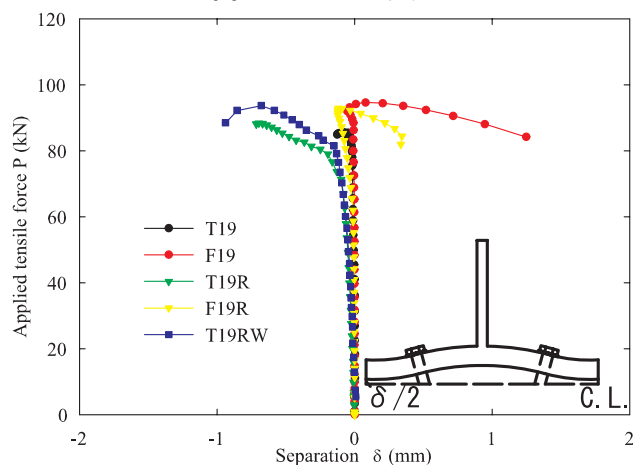


図-4-c ティーフランジ端部

図-4 荷重 - 離間関係

り、ティーウェブに作用する引張力の 1/2 をプロットしている。図中には、参考のために、ティーフランジが剛体であると仮定した場合、すなわちてこ反力が発生しない場合の荷重とボルト軸力との関係を実線でプロットしている。さらに、ボルト降伏軸力 (B_y) も破線でプロットしている。このボルト降伏軸力 ($B_y = 79.2\text{kN}$) は 10.9 普通ボルトの公称降伏応力 (940MPa) に M12 ボルトの有効断面積を乗じて算出している。

T 接合型 T19 の場合、ボルト降伏時および終局限界状態における載荷荷重はそれぞれ 59.5kN および 85.7kN であり、荷重 - ボルト軸力曲線はティーフランジを剛体と仮定した場合のそれを下回っており、てこ反力の発生が確認できる。

T 接合型にゴムを挿入した T19R は、初期軸力導入時にゴムが圧縮され、ボルト軸力は減少してしまうため、所定の軸力を導入できなかった。また、ボルト軸力 (B) が初期ボルト軸力値 (61.3kN) を超えてからの挙動が T19 に似ていることから、硬化したゴムによって T19 と同等のてこ反力を受けていることが確認できる。

一方、ティーウェブ突合せ型 F19 の場合、ボルト降伏時および終局限界状態における載荷荷重はそれぞれ 75.9kN および 94.6kN であり、荷重 - ボルト軸力曲線はティーフランジを剛体と仮定した場合のそれとほぼ一致し、継手が破断に至るまで、てこ反力はほとんど発生していない。これはティーウェブ突合せ部の長さを 6mm と十分に長く設定したためであり、荷重が増加し、ティーフランジ板に曲げが発生しても、ティーウェブ直下以外では継手面同士の接触が発生しなかったためである。

また、ティーウェブ突合せ型にゴムを挿入した F19R では、ゴムを挿入しなかった F19 の場合と比較すると、荷重 - 軸力曲線はやや下を推移している。つまりゴムによるてこ反力を受けていることが確認できる。しかし、T19 と比較すると、降伏限界状態および終局限界状態における載荷荷重はそれぞれ 20 % および 9 % 程度小さくなっており、継手面間に鋼よりよりも剛性の低い材料を挿入することで、てこ反力を低減できることがわかる。しかし一方で、ティーウェブ突合せ型は、T 接合型と比較して、溶接箇所が増加する、ボルトへの初期軸力導入時に偏りが生じるなど、製作および施工面での短所も有している。したがって、製作および施工性の観点からは、ティーウェブ突合せ型よりも T 接合型の方が望ましい。

一方、T 接合型にシール材を挿入した T19R に所定の初期ボルト軸力を導入する方法として、ゴム中にワッシャー (リング) を挿入した T19RW-60 の場合、初期ボルト軸力値 (61.3kN) 付近までは、リング端部に発生したと思われるてこ反力を受けているものの、その後てこ反力が減少し、F19R と同等の挙動を示していることが分かる。

(2) 荷重 - 離間量関係

載荷荷重 (P) とティーウェブ直下、ボルト位置およびティーフランジ端部における継手面離間量 (δ) との関係を図-4に示す。図の縦軸はボルト一本当たりの載荷荷重を表しており、ティーウェブに作用する引張力の1/2をプロットしている。なお、離間量 (δ) の測定位置は図中に示した。

図より、T型継手 T19 の場合、載荷荷重が 40kN 程度でティーウェブ直下における継手面に離間が発生しているのに対し、ティーウェブ突合せ型 F19 では、載荷荷重が初期ボルト導入軸力である 60kN 程度に達するまで離間が発生せず、継手剛性が高くなっていることが確認できる。これは、ティーウェブ板を突合せ、ティーウェブ板直下以外で接触させない構造にすることにより、てこ作用の影響を受けず、継手面間の接触力がティーウェブ板直下のみに集中するためである。

ティーウェブ突合せ型 F19 にゴムを挿入した F19R の場合、ゴムを挿入していない F19 の離間剛性と比較した場合、わずかに下回っているものの、ほぼ同等の離間剛性を示している。したがってゴムのような十分に柔らかい材質を用いれば、継手面接触力はティーウェブ直下に集中するため、シール材を用いなかった場合とほぼ同等の継手剛性が確保できると言える。

一方、T19RW-60 では、ティーウェブ直下での初期離間剛性は F19 および F19R よりも低くなっている。これは、継手面間の接触力がワッシャー部分に集中し、ティーウェブ直下には接触力が伝達されていないため、ティーウェブ直下での離間剛性が低くなっていると考えられる。しかし、最大荷重時におけるティーウェブ直下での離間量は F19 および F19R と比較して、1.7 ～ 1.9 倍程度とおおきくなっており、エネルギー吸収能に優れた継手形状と言える。また、ボルト位置での離間剛性はティーウェブ突合せ型と同等である。

4. おわりに

本研究では、てこ反力の低減を目的とし、T型継手およびティーウェブ突合せ型継手を対象に、継手の形状およびシール材の有無が継手強度および離間剛性に与える影響について実験的に検討した。本研究で得られた主な成果を以下にまとめる。

- ・高力ボルト引張継手短締め形式において、ティーウェブ板同士を突合せ、ティーウェブ直下以外の継手面で接触させない形状とした場合、てこ反力の発生は抑制され、継手強度および離間剛性が上

昇し、ティーフランジ板を剛体とした場合と同等の強度および離間剛性を確保することが可能であることを実験的に確認した。

- ・ティーウェブ突合せ型の継手強度、離間剛性などの力学的挙動は T 接合型と比較して優れているが、溶接箇所が多い点や、初期ボルト軸力導入時の軸力に偏りが生じる点など、製作および施工性の面で問題がある。
- ・T19R の初期ボルト軸力導入方法として、ゴム中にワッシャー (リング) を挿入した T19RW の場合、初期ボルト軸力値 (61.3kN) 付近までは、リング端部に発生したと思われるてこ反力を受けているものの、その後の挙動は F19R と同等の挙動を示しており、てこ反力による強度の低減を抑制できることを確認した。
- ・T19RW-60 のティーウェブ直下での初期離間剛性はティーウェブ突合せ型の F19 および F19R より低下するものの、最大荷重時の離間量は大きく、エネルギー吸収能に優れている。また、ボルト位置での離間剛性はティーウェブ突合せ型と同等であり、施工性や製作過程を考慮すれば、ティーウェブ突合せ型よりも優れた形状と言える。

参考文献

- 1) 加藤 勉, 田中淳夫: 高力ボルト引張接合に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 147 号, pp.21-27, 1968.5.
- 2) 渡邊英一, 杉浦邦征, 山口隆司, 葛西俊一郎: 高力ボルト鋼管フランジ継手の設計法に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.38A, 土木学会, pp.1-12, 1992.3.
- 3) L. P. Bouwman : Fatigue of bolted connections and bolts loaded in tension, Report 6-79-9, TU Delft. , 1979.7.
- 4) G. Lacher : Dauerschwingversuche an axialbeanspruchten Schrauben 10.9 in T-Verbindungen, STAHLBAU, pp.257-266, 1987.9.
- 5) 日本鋼構造協会: 橋梁用高力ボルト引張接合設計指針, 2004.8.
- 6) 渡邊英一, 杉浦邦征, 山口隆司, 諸岡 伸, 齊藤 浩: 多列配置高力ボルト配置高力ボルト引張継手の力学的挙動, 構造工学論文集, Vol.45A, 土木学会, pp.51-60, 1998.3.
- 7) 鈴木康夫, 山口隆司, 北田俊行: 継手面にシール材を挿入した高力ボルト引張継手の力学的挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 12 巻, 日本鋼構造協会, pp.453-458, 2004.12.
- 8) (社) 日本建築学会: 高力ボルト接合設計施工指針, 丸善, 2004.8.