

高力ボルトT継手の力学挙動と てこ反力算定式の適用性に関する研究

宇都宮大学 ○学生員 LIV CHANBOTRA
宇都宮大学大学院 正会員 鈴木康夫

1. 研究の背景と目的

鋼橋は、一般に工場で製作された部材を現場で接合することにより建設され、鋼橋の部材を現場で接合する方法として、主として高力ボルト接合と溶接接合が用いられている。これら2つの接合を比較すると、部材の組み立てや解体の容易さ、現場施工における品質管理の容易さ、あるいは環境に与える負荷の観点で高力ボルト接合の方が優れていると考えられる。高力ボルト接合は、作用力の伝達方式の違いから、摩擦接合、支圧接合、および引張接合に分類される。これらの中でも、特に、引張接合は、ボルト一本あたりが伝達できる作用力が大きく、必要ボルト本数を低減できる可能性があるため、施工性や経済性の観点から、引張接合を積極的に利用することが期待されている。

高力ボルト引張継手は長締め形式と短締め形式の二つに大別される。短締め形式の一つであるスプリットティー継手(T継手)は、長締め形式と比較して構造が簡単であるが、図-1に示すように、てこ反力の発生により、継手強度がボルト自身の強度と比較して小さくなることが知られている。したがって、短締め形式を設計する際には、てこ反力を精度良く評価する必要がある、これまでもてこ反力を算定するための研究が行われている¹⁾²⁾。

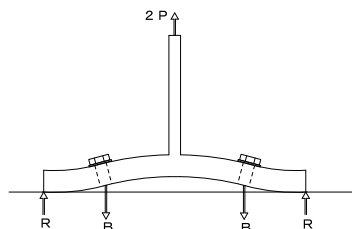


図-1 てこ反力 R の発生機構

例えば加藤ら¹⁾は、高力ボルトT継手のTフランジ板を弾性挙動をする梁として捉え、継手の作用引張力、ボルト軸力、および継手面間の接触力に関する力の釣り合いと、ボルト位置におけるTフランジ板のたわみ量とボルトの伸び量に関する変位の適合条件からてこ反力算定式を導いている。

加藤らによるてこ反力係数算定式は、1994年に日本鋼構造協会より制定された「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)」³⁾(以下、JSSC指針(案)と記す)に採用されていたが、JSSC指針(案)に示されているてこ反力算定式は、ボルトの降伏状態および終局限界状態におけるてこ反力を求めるものであり、任意の作用力に対するものではない。そこで、岩崎ら²⁾は2次元モデルを用いたFEM

解析を実施し、解析結果を基に、任意の作用力に対するてこ反力の定式化を行っている。

岩崎らの研究では、てこ反力係数 p を、作用力 P が初期ボルト軸力 B_0 よりも小さい領域ではボルト軸力 B と初期ボルト軸力 B_0 との差を初期ボルト軸力 B_0 で除した値で定義し、それを P/B_0 を変数とする3次式で表している。また、作用力 P が初期ボルト軸力 B_0 よりも大きい領域では、ボルト軸力 B と作用力 P との差を作用力 P で除した値で定義し、それを P/B_0 を変数とする1次式で表している。

岩崎らによるてこ反力算定式は、2004年に改訂された「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針」⁴⁾(以下、JSSC指針と記す)に採用されており、実験結果も概ね良く再現できるとされているが、岩崎らによるてこ反力算定式は、限られた構造寸法のT継手のみを対象としたものであり、その適用範囲は明確にされているとは言い難い。

そこで、本研究では、ティーフランジ板厚およびティーフランジ板幅を様々に変化させたパラメトリック解析を行い、引張接合継手の力学的挙動を調べるとともに、現行の設計指針で設定されているてこ反力算定式の適用範囲について検討することを目的とした。

2. 解析モデルおよび解析手順

(1) 解析モデルの概要

本研究で検討した解析ケースとパラメータを表-1に示す。解析ケース名の最初の英字(S)に続く数字はフランジ厚を、次の英字(w)に続く数字はフランジ板幅を表している。なお、フランジ板厚(t_1 および t_2)は、22, 28, 32, 38, 40, 46, 50, および62mmとし、フランジ板幅(w)は、75mm, 100mm, および120mmとした。

解析モデルの要素分割状況を図-2に示す。解析モデルは、構造の対称性を考慮して、継手の1/4の領域とし、高力ボルト、フランジ、ティーウェブ、およびワッシャーは、全て8節点アイソパラメトリックの低減積分要素(C3D8R)で分割している。また、継手接触面間、ボルトヘッドワッシャー間、ナットワッシャー間、フランジワッシャー間、およびボルト軸表面-ボルト孔壁間には、接触/離間による境界非線形性を考慮できる接触面を形成している。

解析に用いた主な材料定数を表-2に、その応力-ひずみ関係を図-3に示す。ティーフランジとティーウェブに使用した鋼材はSS400とし、使用ボルトはM22(F10T)とした。

なお、本研究では、解析プログラムとして、汎用有限要素解析プログラムABAQUSを用いている。

Key Words: 高力ボルト引張継手、短締め形式、てこ反力係数、3次元有限要素解析

〒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

表-1 解析ケースとパラメーター一覧

解析ケース	t_1 (mm)	t_2 (mm)	a (mm)	b (mm)	w (mm)
S22-w75	22	22	50	50	75
S28-w75	28	28	50	50	75
S32-w75	32	32	50	50	75
S38-w75	38	38	50	50	75
S40-w75	40	40	50	50	75
S46-w75	46	46	50	50	75
S50-w75	50	50	50	50	75
S62-w75	62	62	50	50	75
S22-w100	22	22	50	50	100
S28-w100	28	28	50	50	100
S32-w100	32	32	50	50	100
S38-w100	38	38	50	50	100
S40-w100	40	40	50	50	100
S46-w100	46	46	50	50	100
S50-w100	50	50	50	50	100
S62-w100	62	62	50	50	100
S22-w120	22	22	50	50	120
S28-w120	28	28	50	50	120
S32-w120	32	32	50	50	120
S38-w120	38	38	50	50	120
S40-w120	40	40	50	50	120
S46-w120	46	46	50	50	120
S50-w120	50	50	50	50	120
S62-w120	62	62	50	50	120

表-2 解析に用いた主な材料定数

材料	種類	降伏応力 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
flange/web	SS400	260.3	202.4	0.29
Bolt shank	F10T	900.0	206.7	0.30
Bolt thread	F10T	779.1	149.4	0.30

(2) 初期ボルト軸力導入および引張荷重載荷方法

解析は、ボルト軸力導入段階と引張荷重載荷段階との2段階に分けて行った。初期ボルト軸力 (B_0) は、M22 (F10T) 高力ボルトの設計ボルト軸力である 205kN とし、ボルトねじ部最上面と軸平行部最下面間の全節点に相反する強制変位を与えることによって導入した。また、引張荷重はティーウェブ最上面の全節点に等しい強制変位を与えることにより載荷した。

なお、本研究で用いた解析モデルによる解析結果は、実験結果を良好に再現できることが確認されている⁵⁾。

3. 解析結果と考察

(1) 荷重-ボルト軸力関係

解析により得られたボルト一本当たりの載荷荷重 P とボルト軸力 B との関係を、フランジ板幅が 75 mm の場合を例に図-4 に示す。図の縦軸および横軸は、それぞれボルト一本あたりの載荷荷重 P およびボルト軸力 B を表している。図中には、ボルト降伏軸力 (凡例: B_y) およびてこ反力が発生しないと仮定した場合の直線 ($P = B$) も併

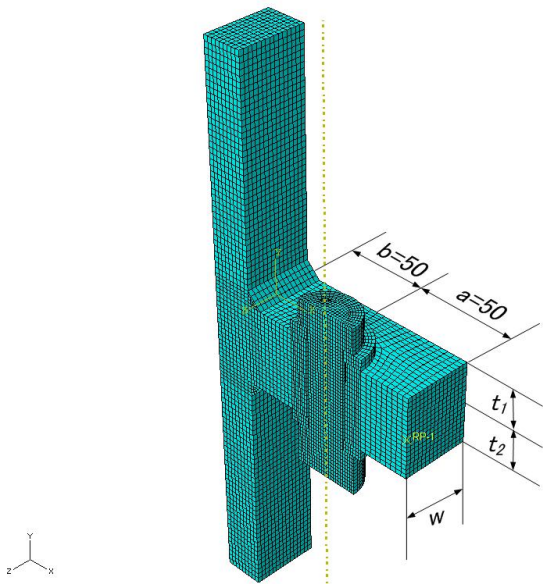


図-2 要素分割状況の例 (S22-w75)

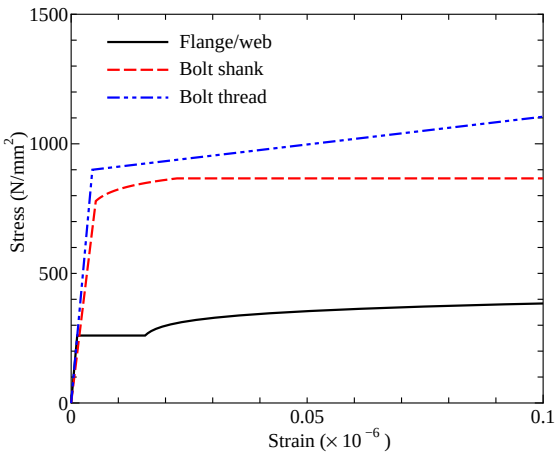


図-3 解析に用いた材料の応力-ひずみ関係

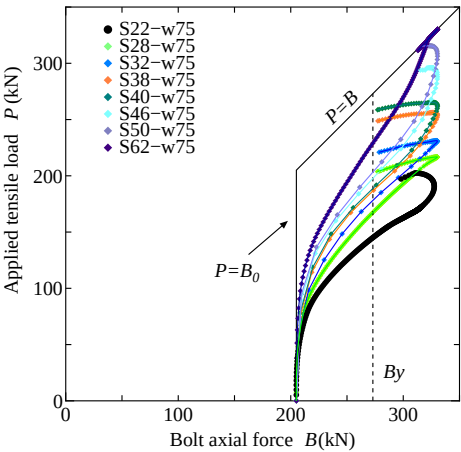


図-4 荷重-ボルト軸力関係

せて記している。

図-4 より、全ての解析ケースの荷重-ボルト軸力曲線は、てこ反力が発生しないと仮定した場合の直線 ($P = B$) を下回っており、解析対象とした継手には、てこ反力が発生していることがわかる。また、ティーフランジ板厚が小さいほど、てこ反力が大きいことがわかる。特に、ボルトが

降伏するまでのてこ反力が大きく、ティーフランジ板厚が62mmの解析ケース（S62-w75）を除く全てのケースで、ボルト降伏時の継手作用力 P はボルト初期導入軸力 B_0 よりも小さくなっていることがわかる。

(2) 荷重－変位関係

載荷荷重 P と継手の変位量との関係を、フランジ板幅が75 mm の場合を例に図-5 に示す。図の縦軸および横軸は、それぞれボルト一本あたりの載荷荷重および継手の変位量を表している。なお、本研究では、ティーウェブ最上面（ティーフランジ板から150mm）の変位量を継手の変位量としており、これには継手面間の離間量、ティーフランジの曲げによる変位、およびティーウェブの伸び量が含まれている。

図-5 より、ティーフランジ板厚が小さいほど初期剛性が小さく、最大荷重時の変位量が大きくなっていることがわかる。一方、ティーフランジ板厚が大きいほど、初期剛性は大きく、最大荷重時の変位量は小さくなっている。このことから、ティーフランジ板が薄い場合、ティーフランジは曲げ変形を生じて変位量が大きくなるのに対し、ティーフランジ板が厚い場合には、ティーフランジの曲げ変形が小さく抑えられるため、継手の荷重－変位量曲線はボルト自体のそれと同様の傾向を示すと考えられる。

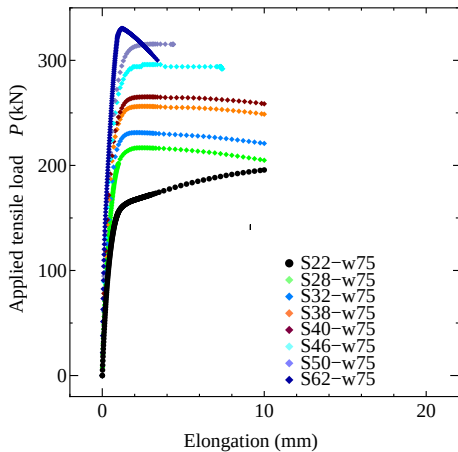


図-5 荷重-変位量関係

4. てこ反力算定式の適用性に関する考察

本解析により求められたボルト降伏時のてこ反力係数 p_y と JSSC 指針 (案) ³⁾ により算出されるてこ反力係数との比較結果を、フランジ板幅 75mm および 100mm の場合を例にそれぞれ図-6-a および図-6-b に示す。同様に、JSSC 指針⁴⁾により算出されるてこ反力係数との比較結果を図-7-a および図-7-b に示す。これらの図の横軸は、ティーフランジ板厚 t を表しており、縦軸はボルト降伏時のてこ反力係数 p_y を表している。

なお、本解析におけるてこ反力係数は、それぞれの指針による定義に基づいて求めている。すなわち、図-6においては、JSSC 指針 (案) ³⁾ に基づいて、てこ反力係数 p を作用力の大きさによらず、式 (1) で定義している。

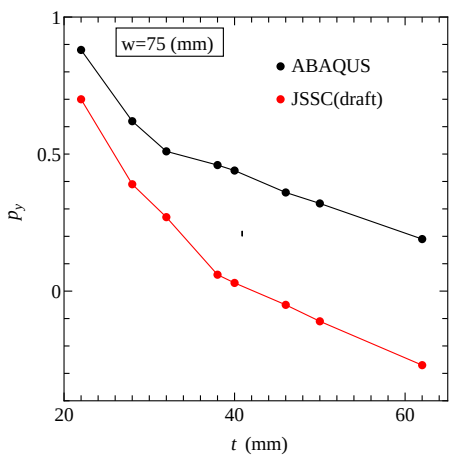


図-6-a てこ反力係数－板厚関係 ($w = 75$)

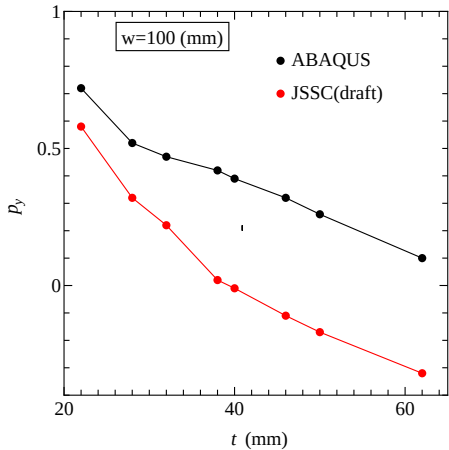


図-6-b てこ反力係数－板厚関係 ($w = 100$)

図-6 てこ反力係数－板厚関係 (JSSC 指針 (案))

$$p = \frac{B_y - P}{P} \tag{1}$$

一方、図-7においては、JSSC 指針⁴⁾に基づいて、てこ反力係数 p を作用力の大きさに応じて式 (2) および式 (3) で定義している。

(i) $P < B_0$ の場合

$$p = \frac{B_y - B_0}{B_0} \tag{2}$$

(ii) $P \geq B_0$ の場合

$$p = \frac{B_y - P}{P} \tag{3}$$

ここに、 p : ボルト降伏時のてこ反力係数
 B_y : 降伏ボルト軸力 ($B_y=273\text{kN}$)
 P : ボルト一本あたりの作用引張力 (kN)
 B_0 : 初期ボルト軸力 ($B_0=205\text{kN}$)

式 (2) および式 (3) からわかるように、JSSC 指針では作用引張力の大きさに応じててこ反力係数の定義が違っており、作用引張力 (P) が初期ボルト軸力 (B_0) よりも小さい場合には、JSSC 指針 (案) で定義されているてこ反

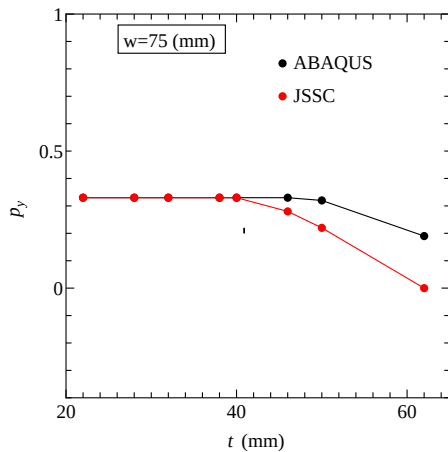


図-7-a てこ反力係数-板厚関係 ($w = 75$)

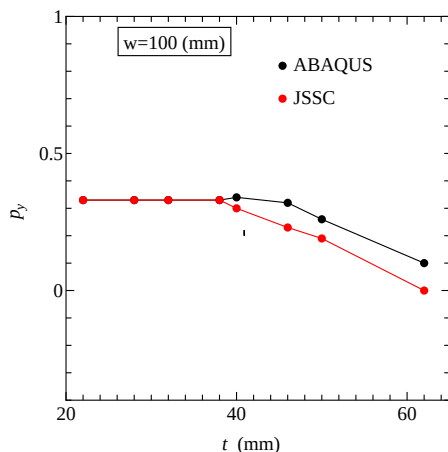


図-7-b てこ反力係数-板厚関係 ($w = 100$)
図-7 てこ反力係数-板厚関係 (JSSC 指針 (案))

力係数と意味合いが違っていることに注意する必要がある。なお、JSSC 指針 (案) で示されているてこ反力係数算定式では、計算上 $p < 0$ となる場合もあり得るが、JSSC 指針では、てこ反力係数 p が 0 より小さい場合には $p = 0$ とし、0.33 より大きい場合には $p = 0.33$ とするよう定義されている。

図-6-a より、JSSC 指針 (案) に示されているてこ反力算定式より求めたボルト降伏時のてこ反力係数は、ティーフランジ板厚によらず全てのケースにおいて解析結果より求められたそれよりも小さいことがわかる。特に、ティーフランジ板厚が 46mm を超えるケースでは、JSSC 指針 (案) に基づいて算出したてこ反力係数は負の値となっており、加藤-田中式の適用範囲を逸脱していることがわかる。これは、加藤-田中式は、ティーフランジ板を梁として仮定した初等梁理論に基づいて定式化しているのに対して、極厚の場合には、ティーフランジ板にはほとんど曲げ変形が発生せず、ティーウェブ板とティーフランジ板との接合部における回転変形が支配的になっているためと考えられる。なお、ティーフランジ板が薄いほど解析結果と加藤-田中式との差異は小さくなっているが、ティーフランジ板厚が 22mm の場合でも、その差は約 20% となっている。また、紙面の都合上、ティーフランジ板幅 120mm の場合の結果については示していないが、板幅が大きくなる

ほど、JSSC 指針 (案) と本研究による解析結果との差異が大きくなっている。

一方、図-7 より、JSSC 指針に示されている岩崎らによるてこ反力算定式より求められるボルト降伏時のてこ反力係数と本研究による解析結果とを比較すると、ティーフランジ板厚が 40mm までは、両者が一致していることがわかる。しかし、板厚が大きくなると、本研究による解析結果との差異が大きくなっており、JSSC 指針に示されているてこ反力係数算定式に基づいて算出されるてこ反力は過小評価していると考えられる。なお、ティーフランジ板幅が大きいほど、この差異は小さくなっている。

5. 結論および今後の課題

本研究では、高力ボルト T 継手の力学挙動を解明するとともに、日本鋼構造協会により制定された「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針」に示されているてこ反力係数算定式の適用範囲を明らかにすることを目的として、ティーフランジ板厚およびティーフランジ板幅をパラメータとしたパラメトリック解析を実施した。本研究で得られた主な結論と今後の課題を以下にまとめる。

1. ティーフランジ板が厚いほど、継手の初期剛性は高くなり、また降伏荷重および最大荷重が高くなることが確認できた。
2. JSSC 指針 (案) に採用されていた加藤-田中式より算出したてこ反力係数は、本研究による解析結果と比べて小さめの値となっており、特にティーフランジ板厚が厚くなるほど精度が悪くなる傾向がみられた。
3. JSSC 指針に採用されている岩崎らによるてこ反力係数算定式は、ティーフランジ板が比較的薄い場合には精度が良いが、ティーフランジ板が厚くなるほど小さめの値となり危険側の評価となる可能性がある。
4. 今後は、母材の降伏強度、ティーフランジ板厚、およびティーフランジ板幅をさらに変化させたパラメトリック解析および載荷実験を実施し、JSSC 指針におけるてこ反力係数算定式の適用範囲を明確にする必要がある。
5. また、実構造物への適用を考慮して、ティーフランジ板厚と被接合部材厚が異なる場合や、高力ボルトがティーウェブに対して非対称に配置される場合についても 3 次元有限要素解析を実施し、これらの場合についても適用できるてこ反力係数算定式を確立する必要がある。

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.33-41, 1968.
- 2) 岩崎 充, 西脇威夫: 任意荷重に対するてこ反力算定式の提案, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.1177-1178, 2004.
- 3) 日本鋼構造協会: 橋梁用高力ボルト引張接合設計指針 (案), 1994.
- 4) 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) 柏木将幸, 鈴木康夫, 中島章典: 可撓性フィラーによるスプリットティー継手のてこ反力低減効果に関する研究, 第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, 1-2, 2010.