

高力ボルト引張継手の3次元離間挙動

渡邊英一¹・山口隆司²・杉浦邦征³・葛西俊一郎⁴

¹フェロー Ph.D, 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

²学生員 工修 京都大学大学院 土木工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)

³正会員 Ph.D 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 (株)神戸製鋼所 構造技術部 (〒657 神戸市灘区岩屋中町4-2-15)

高力ボルト引張接合は優れた力学的特性と施工性を有し、各種構造物の接合部への適用が期待される。また、現在では耐震対策の一つとして継手部が注目されており、継手部の離間挙動の検討も重要となってきた。しかし、確立された設計基準などが存在せず、橋梁等の主部材の接合形式として採用されることはない。したがって、本研究では、高力ボルト引張接合の最も基本的な形式である高力ボルトフランジ継手(スプリットティー継手)を対象に、載荷実験および3次元有限要素解析を行い、接合部挙動を詳細に検討した。さらに、スプリットティー継手と類似の形式である片締め継手に対し載荷実験および同様の解析を行い、力学的挙動を検討するとともに片締め継手に対する解析の適用性を検討した。

Key Words : split tee flange joint, tensile loading test, 3D FEM analysis

1. はじめに

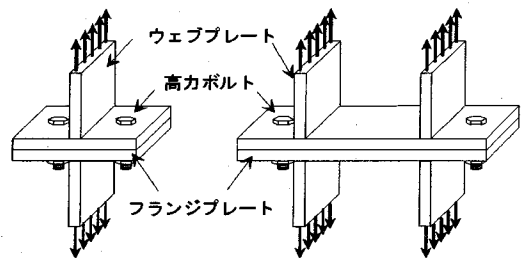
高力ボルト引張継手は、部材端にフランジプレート(エンドプレートとも言う)を通し、高力ボルトにより締結する接合形式であり、高力ボルトにはあらかじめ高い軸力が導入される。したがって、接合部の剛性が高く、ボルト軸力の変動が少ないなどの力学的に有利な点を有する。また、溶接接合に比べて施工が容易である。さらに、摩擦接合と異なり高力ボルトの配置を工夫することで継手部における部材表面を平面にすることが可能であり景観上優れるなどの利点も有する。しかし、このように優れた特性を持つ接合形式であるにも関わらず、橋梁主部材の接合形式として用いられることはほとんどなく、架設用部材の接合として用いられることが多い。これはこの接合形式に対する合理的な設計基準が存在しなかったためであり、現行の道路橋示方書¹⁾にも規定されていない。しかしながら、今後、構造物が山岳地帯や地下空間といった施工が困難な場所に建設される可能性が高いこと、熟練技術者の不足等から省力化の必要性が高いことなどから、この継手形式の適用の可能性は非常に高いと考えられ、合理的な設計基準の確立が望まれる。

この種の継手形式に関する研究は、主に昭和40

年代に建築構造物を対象に盛んに行われ²⁾⁹⁾、実験結果を基に簡易モデルを設定し、その強度設計式がいくつか提案されている。これらの研究の成果は建築構造物の指針である高力ボルト接合設計施工指針(日本建築学会)¹⁰⁾に取り入れられており、柱・梁の接合部に積極的に用いられている。しかし、提案された設計式は主に実験結果に基づいて決定されたものであり、限定された諸元の継手のみ適用可能で、一般的な引張接合に広く適用できないなどの問題を有している。一方、この種の継手形式の土木構造物への適用に関する研究はこれまではほとんど行われておらず、文献11)-14)の研究に見られるように最近注目されるに至っている。このような状況下、建築分野での研究成果に加え最近の研究で得られた新たな知見を基に、(社)日本鋼構造協会橋梁用引張接合標準作成小委員会(委員長:武蔵工業大学教授西脇威夫)では橋梁の設計基準として橋梁用引張接合設計指針(案)¹⁵⁾を策定した。さらに、本州四国連絡橋の来島大橋では主塔の接合部に初めて高力ボルト引張継手の一形式である長締め形式の継手が用いられている¹⁶⁾。また、近年、耐震性の向上という点からエネルギー吸収部としての継手の活用が注目されており^{17),18)}、継手部の剛性に関する研究の必要性も高まっている。このように高力ボルト引張継

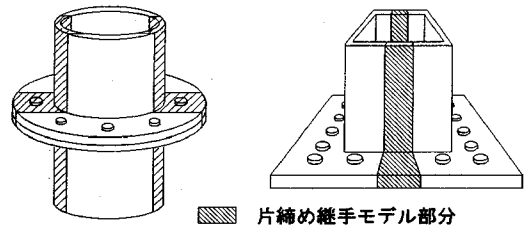
手のニーズは高まってきており、合理的な基準の確立のための基礎的資料の蓄積が望まれる。

このようなことから本研究では橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)で指摘されている課題の内、継手部剛性の評価のための基礎的資料の収集を目的とし、その接触・離間挙動について詳細に検討した。本研究では、高力ボルト引張継手の中でも最も基本的な構造形式であるスプリットティー継手とこれに似た継手形式の片締め継手も対象とした。このスプリットティー継手モデルおよび片締め継手モデルを図-1に示す。これらの継手は2枚のフランジプレート



(a)スプリットティー継手モデル (b)片締め継手モデル

図-1 スプリットティー継手モデルと片締め継手モデル



(a)鋼管フランジ継手 (b)橋脚基部

図-2 片締めモデルの例

を向かい合わせて短いボルトにより直接締結する短締め形式と呼ばれる継手形式であり、構造が簡単であることが特徴である。スプリットティー継手は図-1(a)に示すようにフランジプレートにウェブプレートを溶接で接合し、T字型を構成し、高力ボルトで締結する継手形式である。一方、片締め継手は図-1(b)に示すようにフランジプレートに2枚のウェブプレートを溶接し、パイ型を構成し、高力ボルトで締結する継手形式である。スプリットティー継手と異なり、ウェブプレートの片側だけを高力ボルトで締結することから片締め継手と呼ぶことにした。片締め継手については図-2に示すような鋼管フランジ継手や橋脚基部のアンカーフレーム部分の一部のような高力ボルトが片側にのみ配置された継手形式を対象としており、片締めの影響に注目した継手モデルである。

本研究では、まず、両継手モデルに対して接触・離間挙動に注目した単調引張载荷実験を行った。特に、スプリットティー継手に対してフランジ板厚、フランジ板幅をパラメータとして、同指針(案)の板厚制限を下回るフランジ板の薄い継手も対象として、パラメトリックに有限要素解析を行い、継手部の離間挙動を詳細に解明した。さらに、片締め継手に対してスプリットティー継手と同様の有限要素解析の適用を試みた。

2. 単調引張载荷実験

(1) 実験供試体の設定と実験方法

単調引張载荷実験に用いたスプリットティー継手モデルと片締め継手モデルの諸元を図-3に、供試体の一覧を表-1に示す。供試体の設定では、力学挙動に最も影響を与えると思われるフランジ板厚をパラメータとして取り上げ、22(mm)、10(mm)の2種類の板厚を設定した。フランジプレートの幅、ウェブプレート中心から高力ボルト軸心までの距離、初

期ボルト導入軸力はすべての供試体において共通である。また、ウェブプレート中心から高力ボルト軸心までの距離およびフランジ板幅は、スプリットティー継手モデルと片締め継手モデルとで共通とした。高力ボルトはM12を用いることとし、その標準導入軸力6.26(tonf)を導入することにした。導入軸力の設定は高力ボルト軸平行部に埋め込んだひずみゲージの値をもとに行った。ティーウェブとフランジ板の接合についてはK型の開先をとり部分溶け込み溶接により接合し、その後グラインダーにより表面処理を行った。また、接触面については平坦性を維持するためにグラインダー処理を施した。

载荷装置の概要を図-4に示す。偏心载荷を避けるため図に示すように4カ所にヒンジを入れている。载荷はアクチュエータの変位を制御する変位制御で準静的に载荷した。

計測項目は、引張荷重、2枚のフランジ板間の離間量、ボルト軸力である。接合部の剛性に注目することから、特に2枚のフランジ板間の離間量を計測することにした。フランジ板間の離間量はクリップ式変位計を用いて計測した。計測した部位は図-3に示すようにティーウェブ直下、およびボルト軸心位置である。ボルト軸力の測定は高力ボルトの軸心にひずみゲージを埋め込み測定した。なお、あらかじめ高力ボルトに対し予備载荷を行い、ひずみとボルト軸力のキャリブレーションを行っている。ボル

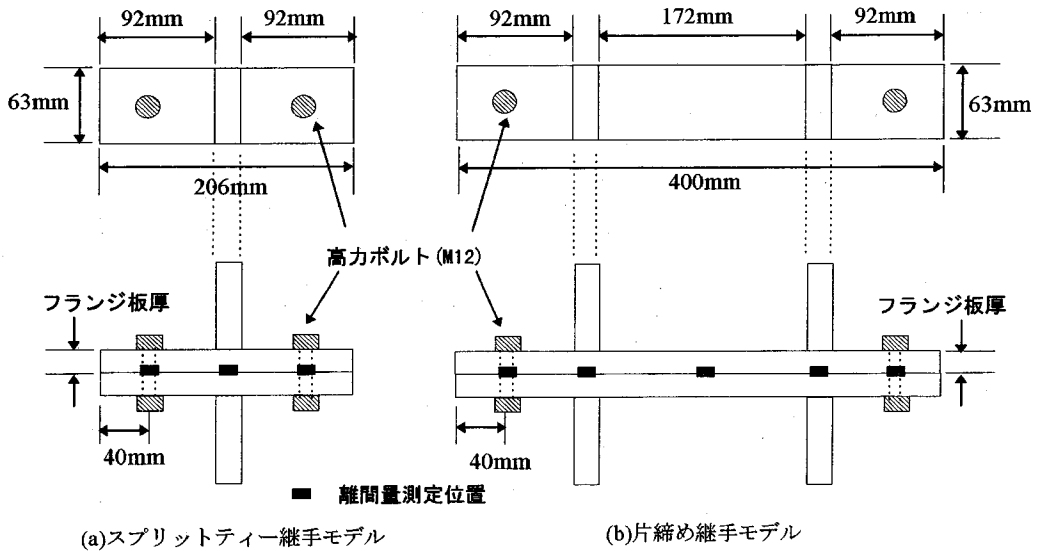


図-3 実験供試体の諸元および離間量測定位

ト軸力はひずみゲージから得られたひずみ値をキャリブレーションの結果を基に算出した。なお、計測はコンピュータを用いたオンライン計測により行った。

(2) 載荷実験結果

a) 荷重-離間量関係

得られたスプリットティー継手と片締め継手の荷重-離間量曲線を図-5に示す。離間量については荷重伝達点であるティーウェブ直下での離間を離間量として図示している。図中の f_{th} はフランジ板厚を意味し、 $f_{th}=10(\text{mm})$ 、 $f_{th}=22(\text{mm})$ はそれぞれフランジ板が 10(mm)、22(mm) の場合を示す。

フランジ板が厚いほど初期の剛性が高い。一方、フランジ板が薄い場合、載荷初期の段階から離間量が大きく、剛性が低くなっている。スプリットティー継手と片締め継手を比較すると、片締め継手の方が離間が大きく、剛性が低いことがわかる。フランジ板が薄い場合で約2倍、フランジ板が厚い場合で約3倍の差が見られるが、この差は構造形式の違いによるものと考えられる。片締め継手の場合、スプリットティー継手と同じフランジ板厚であってもボルト間隔が大きいためたわみ易く、フランジ板が薄いスプリットティー継手の挙動に近くなると考えられる。しかし、片締め継手では、フランジ板厚に関わらず、最終的にはスプリットティー継手とほぼ同じレベルの荷重に耐える、また、片締め継手の方が変形能に富むといえる。

表-1 載荷実験供試体の一覧

供試体名	継手タイプ	フランジ板厚	フランジ板幅	高力ボルト
ST-1	スプリットティー	10mm	63mm	M12
ST-2	スプリットティー	22mm	63mm	M12
K-1	片締め	10mm	63mm	M12
K-2	片締め	22mm	63mm	M12

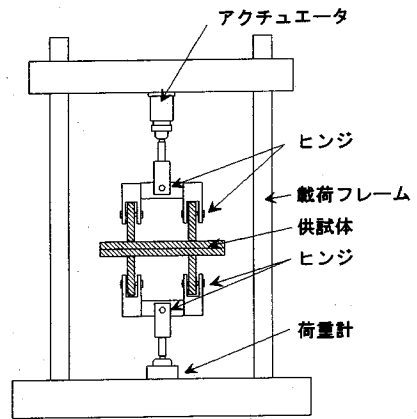


図-4 載荷装置の概要

b) 荷重-ボルト軸力関係

得られたスプリットティー継手と片締め継手の荷重-ボルト軸力曲線を図-6に示す。 f_{th} の意味は図-5と同じである。図より両継手形式ともにフランジ板が薄い場合、荷重が小さい段階からボルト軸力が増加しているのがわかる。さらに、ボルト軸力の最大値にはフランジ板の薄い方が大きい。完全に剛

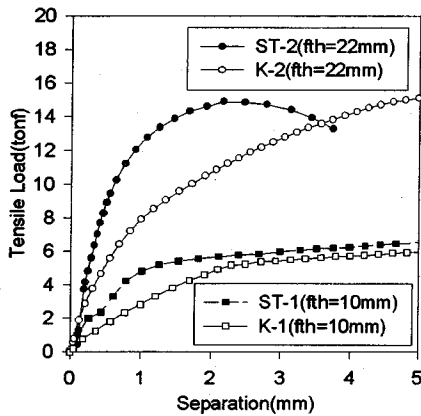


図-5 荷重-離間量曲線 (載荷実験結果)

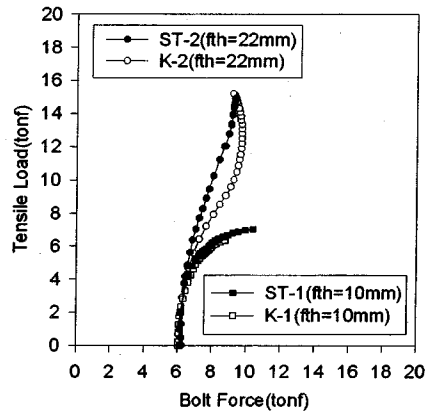


図-6 荷重-ボルト軸力曲線 (載荷実験結果)

なフランジ板であれば、載荷荷重がボルト導入軸力に到達するまでボルト軸力の増加はほとんどないと考えられるが、フランジ板が厚い ST-2 の場合 (ティーウェブ中心とボルト中心の距離とフランジ厚の比が約 3 倍)、引張荷重が導入軸力に相当する荷重に到達する以前にボルト軸力は増加している。初期導入軸力に到達するまでボルト軸力を増加させないとするにはさらにフランジ板を厚くする必要があるといえる。このボルト軸力の増加はフランジ板の変形による反力の増加とフランジ板がボルトヘッド部を引き上げ、ボルトが引っ張られることの 2 つが原因として考えられる。スプリットティー継手と片締め継手の比較では荷重-ボルト軸力曲線の形状は非常に良く似ており、挙動にそれほどの差異はないと思われるが、同じ引張荷重でのボルト軸力は片締め継手の方が大きくなっている。これは同じ引張荷重におけるフランジ板の変形が片締め継手の方が大きくフランジ板の変形に関係したボルトの曲げ引張の発生度の違いによるものと考えられる。

3. スプリットティー継手に対する 3 次元有限要素解析

(1) 有限要素解析手法および解析ケースの設定

ここでは、最も基本となるスプリットティー継手の力学的挙動を実験結果との整合性に留意して弾塑性有限要素解析を行うことにした。対象とするモデルの構造上、平面ひずみ問題などの二次元解析を行うことは有効フランジ板幅などの導入を必要とし、その決定に際し、多くの困難を伴う¹⁹⁾。したがって、本研究では計算機の記憶容量と計算時間を多く必要とするものの正確な挙動を知ることが可能であるということから 3 次元解析を行った。解析では継手モ

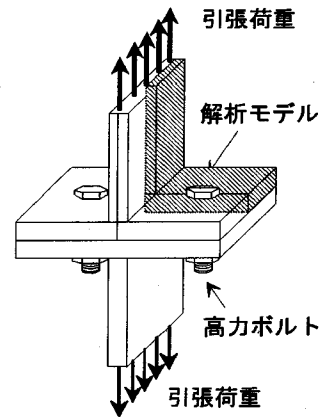


図-7 スプリットティー継手の解析モデル

デルの対称性を考慮し、図-7に示すように実構造の 8 分の 1 の領域を対象とした。スプリットティー継手では、荷重の増大に伴い、フランジプレートが離間していくことから、接触/離間状態の判定を行い、境界条件を変更して解析を進めていく必要がある。本解析では接触/離間状態を判定する面がモデルの対称軸であるので、この面を基準面と設定した。接触状態から離間状態への移行の判定は節点力の正負で、離間状態から接触状態への移行の判定は節点変位の正負で行った。本解析で用いた有限要素法は増分法によるもので、要素 1 個を降伏させるのに必要な荷重増分と節点 1 個の境界条件を変更するのに必要な荷重増分を比較し、小さい方の荷重増分を与える逐次増分として載荷する。なお、一定ひずみを仮定した 3 次元ソリッド要素 (4 面体要素) を用いた。また、本解析で用いた有限要素プログラムは EPIC4²⁰⁾を参考とし、境界条件の変更と 3 次元解析が可能となるようにこれを変更したものである。詳細は文献 20)を参照されたい。

表-2 解析ケースの一覧

解析ケース	STF1	STF2	STF3	STF4	STF5	STF6	STF7	STF8
フランジ板厚	10	15	22	10	22	10	15	22
フランジ板幅	63	63	63	78.75	78.75	94.5	94.5	94.5

単位:mm

表-3 材料定数

材料定数	ヤング率	降伏強度
フランジ板	21000	26.9
高力ボルト	21000	90.0

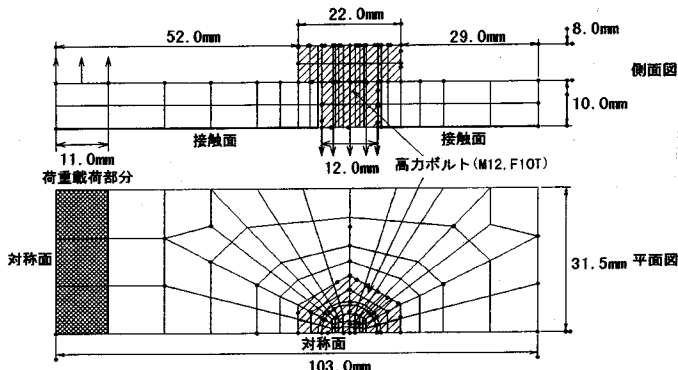
単位:kgf/mm²

【NOTE】

1 tonf = 9.8 kN

1 kgf/mm² = 9.8 MPa

図-8 解析モデルの概要と要素分割例 (STF1)



解析ケースの一覧を表-2に示す。本解析では、スプリットティー継手の力学挙動に最も影響を与えると考えられるフランジ板の形状に注目してフランジ板厚、フランジ板幅をパラメータとして設定した。フランジ板厚については10(mm)、15(mm)、22(mm)の3種類、フランジ板幅については63(mm)を基本としてその1.0倍、1.25倍、1.5倍の3通りを設定した。特に、フランジ板の厚いものから薄いものまで、フランジ板の幅の広いものから狭いものまでと多様な解析ケースを設定した。要素分割はまず対象モデルを6面体に分割し、その後、それぞれの6面体をさらに24個の4面体に分割するという方法を採用した。なお、分割は高力ボルト近傍部分において応力集中が予想されることから、ここでの分割を特に細かくした。フランジ板が最も厚く、フランジ板幅が最も広い解析ケース STF8 で節点数 4531、要素数 18240 である。解析ケース STF1 を例にその要素分割を図-8に示す。なお、図中には6面体による分割のみを示す。フランジ板同士が接触している面を接触/離間状態を判定する面とし、高力ボルトとフランジ板が接触している部分は、離間することがないものと仮定し、連続として扱い、材料定数を変化させることで両者を区別した。接触面上については2枚の板の間の摩擦は無限大と仮定し、滑りはないものとした。なお、水平面内の移動は自由としている。フランジ板および高力ボルトの材料定数を表-3に示す。フランジ板および高力ボルトを構成する材料は等方硬化弾塑性体とし、パイリニア型の応力-ひずみ関係を仮定した。なお、実構造では高力ボルトと

フランジ板の間にワッシャーが存在するが、ボルトヘッドに比べてワッシャーが薄いこと、両者の外径の差が小さいことなどから継手全体の接触・離間挙動に与える影響は小さいものと考えられ、ワッシャーを省略してモデル化を行った。また、ティーウェブおよびフランジ板の溶接部は構造寸法に比して小さく、局所ひずみの算定ではなく継手部を対象とした解析であることからモデル化を行わなかった。

解析手順は、高力ボルトの初期導入軸力をボルト下端部に等分布荷重としてまず載荷し、その後、下端部の鉛直方向変位を固定してティーウェブ接合部分に引張荷重を等分布荷重として載荷するという方法を採用した¹²⁾。

(2) 有限要素解析の検証

有限要素解析法の検証を行うためにスプリットティー継手の載荷実験結果との比較を行った。荷重-離間量曲線を図-9に、荷重-ボルト軸力曲線を図-10にそれぞれ示す。ここで、離間量は荷重伝達点であるティーウェブ位置での2枚のフランジ板の開口量であり、荷重-ボルト軸力曲線における荷重はボルト1本当たりの荷重であり、載荷荷重の2分の1となっている。また、有限要素解析におけるボルト軸力はボルト下端部での節点力の総和とした。

これらの図から荷重-離間量関係、荷重-ボルト軸力関係ともに、解析結果は載荷実験結果によく一致しており、本研究で採用した有限要素解析により載荷実験結果が精度よく再現されると考えられる。特に、フランジ板の曲げ変形が支配的となるフラン

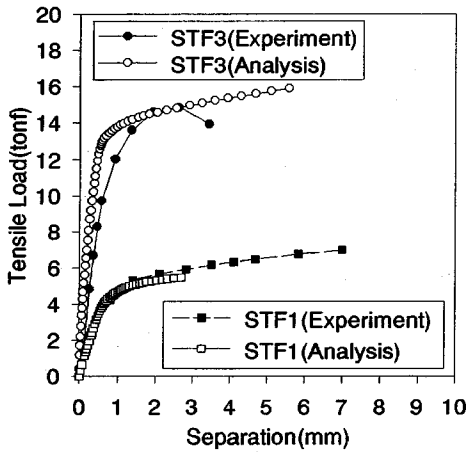


図-9 荷重-離間量曲線
(有限要素解析との比較)

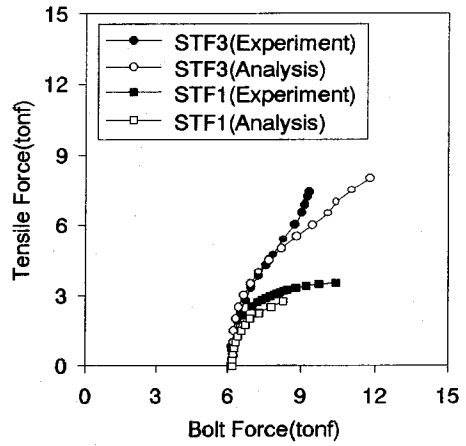


図-10 荷重-ボルト軸力曲線
(有限要素解析との比較)

ジ板が薄い場合の解析結果が実験結果と非常によく一致していることから精度の高い解析を行うための十分な要素分割がなされていると考えられる。ただし、フランジ板が厚い場合、荷重-離間量曲線における離間量が3(mm)程度以降の領域および荷重-ボルト軸力曲線におけるボルト軸力が約8.0(tonf)以降の領域で載荷実験結果と有限要素解析結果が異なっている。フランジ板が厚い場合、高力ボルトが継手の力学挙動を支配しており、終局状態に至るまで精度よい解析解を得るためには現実的な高力ボルトの材料定数が不可欠となる。本解析では高力ボルトを線形な等方硬化を考慮した弾塑性でモデル化しており、高張力鋼のような非線形な応力-ひずみ関係を正確に表現するには限界があり、これが実験結果と解析結果との差異の最大の原因と思われる。しかし、継手部の剛性が大きく減少するまでの挙動をとらえるには本解析で採用した弾塑性モデルを用いても十分と思われる。

以上のように高力ボルトが降伏した後での挙動に差異は見られるものの、これ以前の挙動はよく一致しており、本研究で用いた解析手法およびモデルにより継手部の剛性が大きく減少するまでの実際の挙動を再現することが可能であると考えられる。

(3) 有限要素解析結果

a) 荷重-離間量関係および降伏強度

すべての解析ケースの荷重-離間量曲線を図-11に示す。離間量は荷重伝達点であるティーウェブ位置でのフランジ板の間の開口量であり、荷重は載荷荷重をフランジ板幅で除した単位幅当たりの荷重である。さらに、解析ケースに対する降伏強度の一覧を図-12に示す。この図の横軸はフランジ板幅を

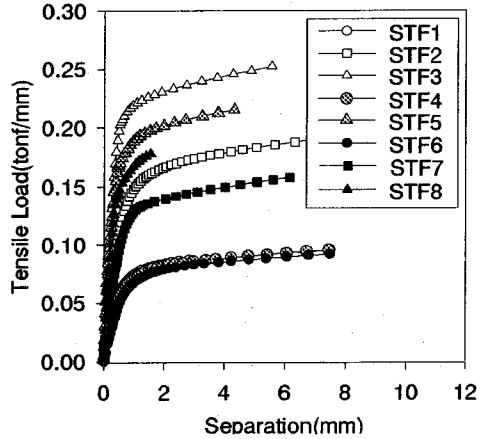


図-11 荷重-離間量曲線

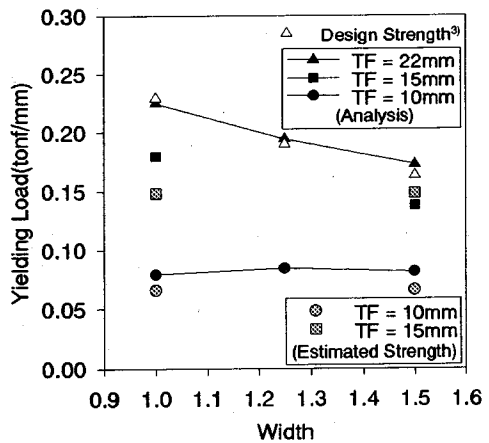


図-12 降伏強度の一覧

基本ケースの板幅(63(mm))で除した無次元化板幅であり、縦軸は荷重-離間量曲線(図-11)をもとに決定した単位幅当たりの降伏強度である。ここで、降伏強度は、図-11の荷重-離間量曲線の弾性域と塑性域の直線を回帰分析により求め、この2つの直線の交点での荷重を単位幅当たりの降伏強度とした。

これらの図より、フランジ板の最も薄い10(mm)の場合、フランジ板幅による違いはほとんど見られない。一方、フランジ板が最も厚い22(mm)の場合は降伏以後の挙動がフランジ板幅により大きく異なり、降伏強度は板幅が大きくなるにつれて直線的に減少している。さらにフランジ板厚が両者の中間的な15(mm)の場合、22(mm)の場合と同様にフランジ板幅の違いによる差異が22(mm)ほどではないが見られる。このように単位幅当たりの荷重で評価した場合、板厚が減少するにつれてフランジ板幅による差異は小さくなっていき、その差異がほとんどなくなるフランジ板厚が存在すると考えられる。このようなフランジ板幅の影響の違いはスプリットティー継手の崩壊形式がフランジ板厚に依存しているためと考えられる。フランジ板が薄い場合、その挙動はフランジ板の崩壊過程に左右される。つまり、板厚が薄いため、フランジ板は幅方向に一樣に曲げられる状態にあると考えられる。その結果、単位幅当たりの荷重で評価した場合、荷重-離間量曲線は一致し、降伏強度は変化しないと考えられる。一方、フランジ板が厚い場合、その挙動は高力ボルトの崩壊過程に左右され、単位幅当たりの荷重で評価した場合、板幅が大きくなるほどその降伏強度は小さくなると考えられる。

したがって、降伏強度のフランジ板幅に関する傾向から継手の力学挙動を決定する因子がフランジ板なのか高力ボルトなのか判断でき、板幅に関わらず、降伏強度が一定であればフランジ板が支配的であり、降伏強度が右下がりの曲線となれば高力ボルトが支配的であると言える。その程度は曲線の勾配に現れ、勾配が急なほど高力ボルトが支配的であると考えられる。さらに、フランジ板が非常に剛な場合は曲線の形状は双曲線に近づくと考えられる。

次に、橋梁用引張接合設計指針(案)¹⁵⁾に基づいてその適用範囲であるフランジ板厚が22(mm)の場合の解析ケースに対して降伏強度の算定を行い、解析から得られた降伏強度との比較を試みた。その結果を図-12に示す。これより設計指針は降伏強度を精度よく推定しており、その信頼性は高いと言える。ただし、板幅が大きくなるにつれて誤差が大き

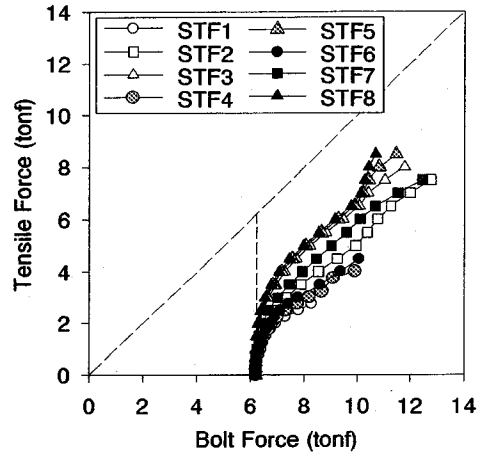


図-13 荷重-ボルト軸力曲線

くなり、板幅に関してさらに検討する必要がある。指針の適用外の板厚に関しても次のような方法で推定を試みた。ティーウェブ縁端から高力ボルト軸心までの長さを有し、フランジ板の断面形状と同じ断面の両端固定梁を想定し、固定端の一つが支点沈下した場合の発生する最大応力が降伏応力に達するときの集中荷重の大きさを降伏強度とした。得られた結果を図-12に示す。図よりこのような簡易的な方法での推定によっても精度良い降伏強度の算定が可能であることが明らかになった。

b) 荷重-ボルト軸力関係

荷重-ボルト軸力曲線を図-13に示す。横軸はボルト軸力であり、縦軸は載荷した荷重の2分の1をプロットしたものであり、ボルト1本あたりの荷重を対応させている。図中にはフランジ板が完全に剛である場合の荷重-ボルト軸力曲線を点線で記入した。フランジ板が完全に剛である場合、引張荷重が初期ボルト導入軸力と同じ荷重に到達するまでボルト軸力は導入軸力を維持し、その後は引張荷重の増分とボルト軸力の増分が等しくなるように推移する。図-13より、すべてのケースにおいて引張荷重が初期ボルト導入軸力に到達する以前にボルト軸力が増加している。さらに、フランジ板の厚いものと薄いものを比較した場合、薄いものの方が荷重の増加に比べてボルト軸力の増加が大きい傾向にある。ボルト軸力の増加はてこ反力とフランジ板によるボルトの引張曲げが原因と考えられ、これらはフランジ板の変形のしやすさに依存している。フランジ板が厚い場合は、てこ反力によるボルト軸力の増加が支配的であり、フランジ板が薄い場合はフランジ板によるボルトの引張が支配的であると考えられる。したがって、フランジ板の薄い方がフランジ板の変

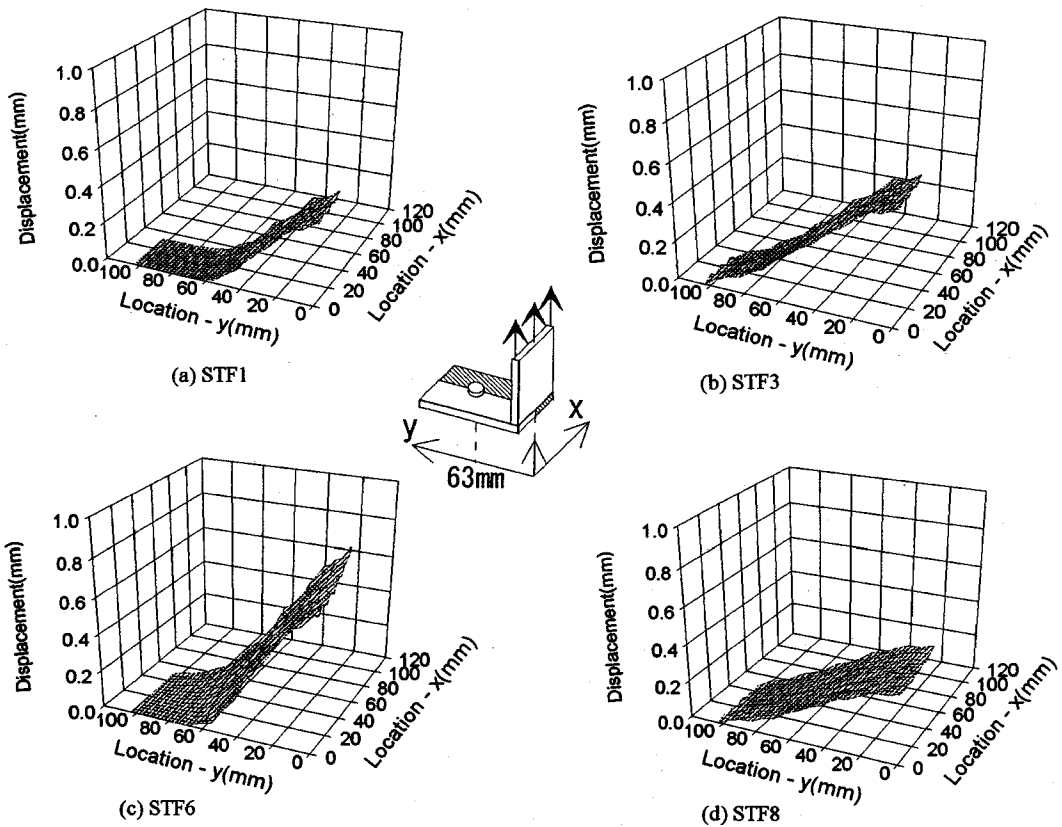


図-14 降伏荷重付近における接触面の変形状態

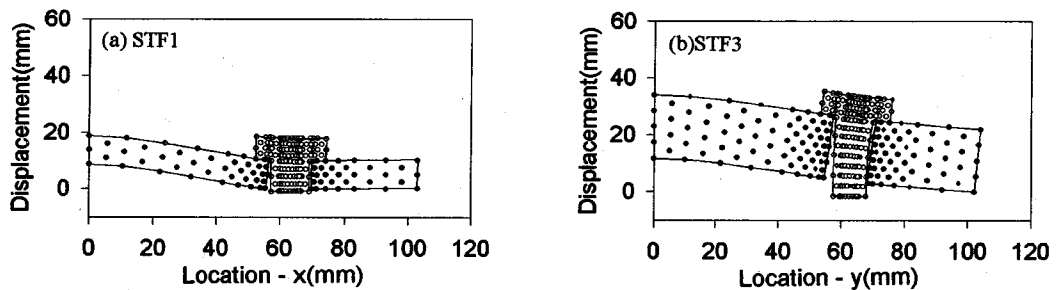


図-15 降伏荷重付近におけるフランジ板中央での変形状態

形が顕著であるためボルト軸力が増加したと考えられる。フランジ板幅の影響に関してはその大小の場合を比較した場合、初期の挙動はよく似ている。そして荷重-離間量関係において両者の差が生じ始めるあたりからこの荷重-ボルト軸力関係においても差が生じ始め、板厚に関わらず、フランジ板幅が大きいものほど同じ引張荷重におけるボルト軸力が小さいことがわかる。これはフランジ板幅が大きいものほど同じ引張荷重下におけるフランジ板の変形が小さく、これに伴うボルト軸力の上昇が小さいためと考えられる。

c) 接触面の3次元変形挙動および接触面での節点力分布

フランジ板厚が10(mm), 22(mm), フランジ板幅が63(mm), 94.5(mm)のSTF1, STF3, STF6, STF8の4ケースの降伏荷重時における接触面の変形状態を図-14に示す。さらにフランジ板の中心線上の変形状態をSTF1とSTF3のケースについて図-15に示す。図の変形量は変形状態をわかりやすくするため実際の変形量を20倍している。これによるとフランジ板が薄い場合、高力ボルト位置が固定点となりここを基点にフランジ板が曲げられており、高力ボルトとフランジ縁端でのフランジ板の変形(離

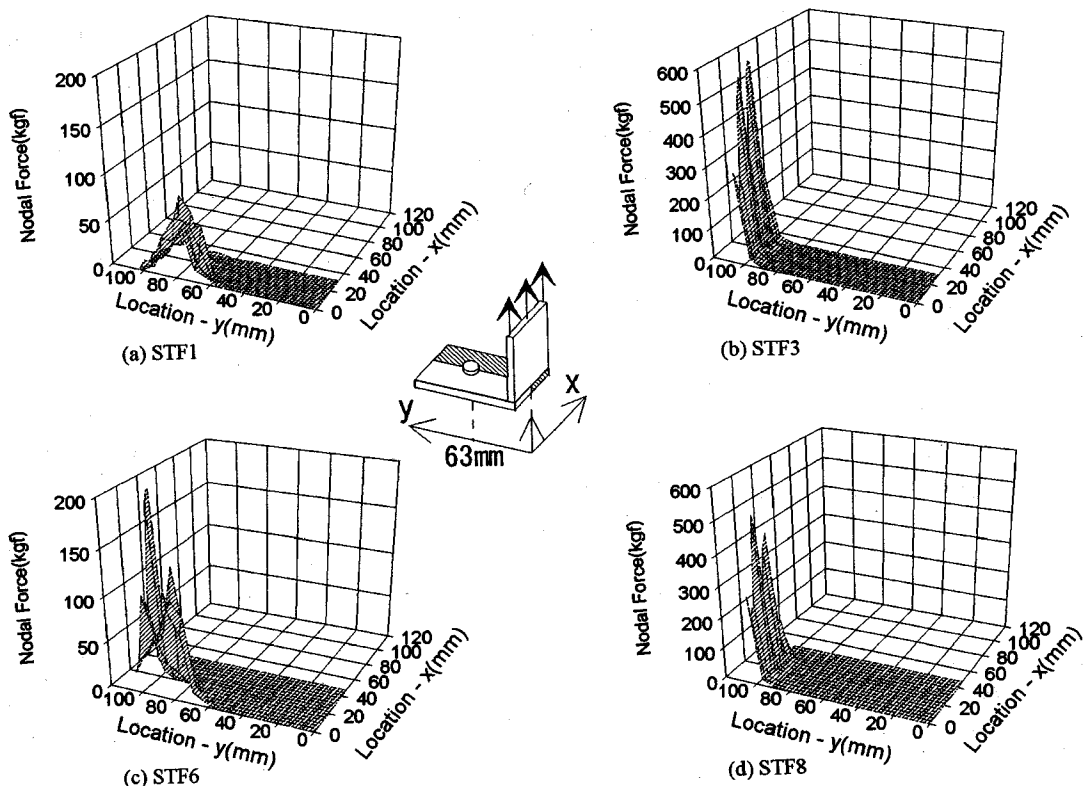


図-16 降伏荷重付近における接触面での節点力分布

間)はほとんど生じていないことがわかる。また、 x 方向の変形状態はボルト位置を中心にして外側へ行くほど変形が大きくなっており、その度合いはフランジ板幅が大きいものの方が大きい。一方、フランジ板が厚い場合は、フランジ板はあまり曲げ変形を受けず、フランジ板全体が浮き上がる状態になっている。ボルト位置におけるフランジ板の離間から、高力ボルトが大きく塑性変形していることがわかる。図-15より高力ボルトの変形状態を比較してみるとフランジ板が厚い場合、高力ボルトは大きな伸び変形を生じており、フランジ板が薄い場合、高力ボルトはほとんど変形していないことがわかる。

次にフランジ板厚が 10(mm)、22(mm)、フランジ板幅が 63(mm)、94.5(mm)の STF1、STF3、STF6、STF8 の4ケースの降伏荷重時における接触面上の節点力の分布を図-16に示す。フランジ板厚による違いを比較してみると、フランジ板が薄い場合は節点力が高力ボルト位置とフランジ縁端との間に分布している。一方、フランジ板が厚い場合はフランジ板の縁端部分に節点力が分布している。このように板厚の違いによりその分布形状は異なっており、この分布形状からフランジ板が厚い場合は反力が支配的であり、フランジ板が薄い場合はそうでないと考

えられる。フランジ板幅については、フランジ板幅が小さい場合は板幅方向にほぼ全体に節点力が分布しているのに対し、フランジ板幅が大きい場合は板幅方向全体に分布せず、フランジ板の端の方では節点力が存在しないことがわかる。これらは板幅の違いによりフランジ板の幅方向の変形が異なっているためと思われる。また、これらのことから節点力が板幅方向に分布する限界幅が存在すると考えられ、ボルト導入軸力の影響範囲と関係していると思われる。

d) 剛性-荷重関係

すべての解析ケースに対する継手部剛性-荷重関係を図-17に示す。横軸は無次元化荷重であり、載荷荷重を高力ボルトの降伏荷重の2倍(高力ボルト2本分に相当)で除すことによって算出した。縦軸の剛性は単位幅あたりの剛性であり、単位幅あたりの荷重-離間量曲線(図-11)をもとに、荷重増分を離間量増分で割ることにより算出した。

これによるとフランジ板が厚いものほど剛性が高く、薄いものほど低くなっているのがわかる。また、初期(荷重が0.2程度まで)の剛性に板厚の影響が大きく表れていることもわかる。また、フランジ板が厚いものは初期の剛性は非常に高いが荷重の増

表-4 解析ケースの各部の剛性

単位: tonf/mm/mm

解析ケース	STF1	STF2	STF3	STF4	STF5	STF6	STF7	STF8
ボルト剛性	1.88	1.26	0.856	1.51	0.685	1.26	0.837	0.571
板剛性	0.0336	0.113	0.358	0.0269	0.286	0.0224	0.0756	0.238
全体剛性	0.0330	0.104	0.252	0.0264	0.202	0.0220	0.0693	0.168

加に伴うその減少の度合いも大きいことがわかる。板幅に関しては、フランジ板が厚い場合は剛性-荷重曲線の形状は板幅によらずよく似ており、フランジ板が薄い場合は荷重が大きくなるにつれて板幅による違いが認められ、板幅が狭いものに比べて板幅が大きいものは高い剛性を維持することがわかる。このような方法で剛性を評価した場合、初期弾性域における板幅による差異はほとんどないと言える。荷重レベルに関しては、フランジ板が薄いもの、厚いもの共に剛性がゼロになる荷重は 1.0 を下回り、高力ボルトの性能を完全に使っているとは言えない。特にフランジ板が厚いものでも剛性がゼロになる荷重が 0.8 程度であり、付加的な軸力の増加が認められる。したがって、フランジ板をかなり厚くしないと付加的な軸力の増加をゼロにすることは困難であると言える。橋梁用引張接合設計指針(案)¹⁵⁾に基づく降伏強度レベル(板厚 22mm に対して 0.71-0.76)では剛性がほぼ零であり、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)が剛性がゼロになる状態までの強度を期待していることがわかる。したがって、変形の面からの強度の検討も必要になると思われる。

次に初期ボルト導入軸力の影響を評価する。高力ボルトおよびフランジ板の剛性、これらの値をもとに算出した全体剛性をそれぞれ表-4に示す。なお、これらはすべて単位幅当たりである。高力ボルトの剛性はボルト軸部(軸平行部とネジ部)を棒部材と仮定して得られる伸び剛性とし、フランジ板の剛性については3辺自由、1辺固定の板の固定端に向かい合った自由端の中央に集中荷重が作用したときの荷重-たわみ関係の傾きとした。なお、集中荷重はボルトに作用する荷重に相当している。全体剛性はボルトとフランジ板が直列システムであると仮定し、算出した。この全体剛性は継手部剛性のボルト軸力の効果を考慮しない場合の上限値であると考えられる。表-4で示した全体剛性と図-17の剛性を比較すると、どの解析ケースにおいてもある荷重レベルまでは、継手部剛性が全体剛性よりも上回っていることがわかる。この剛性増加の割合は荷重レベルが 0.2 においてフランジ板が薄いもので約3倍、フランジ板が厚いもので約2倍となっている。したがって、板厚に関係なく高力ボルトの導入軸力による

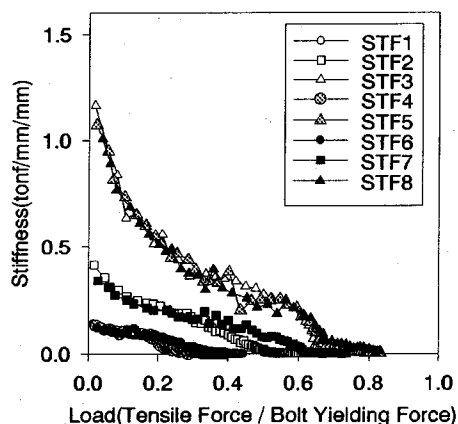


図-17 剛性-荷重曲線

剛性の増大効果が認められる。

4. 片締め継手に対する有限要素解析の適用

片締め継手の力学的挙動を考える際、スプリットティー継手と異なり、高力ボルト近傍部分の挙動だけでなくティーウェブ近傍部分の挙動も重要となってくる。すなわち、ティーウェブとフランジ板の剛性の違いにより片締め継手全体の力学的挙動は大きく異なると考えられる。したがって、スプリットティー継手と同様にウェブプレートを無視して、引張荷重に相当する等分布荷重をフランジプレートに直接載荷する方法を用いる場合、現実の力学的挙動を正しく再現しているかどうか疑問が残る。したがって、正確な解析を行うためにはティーウェブも含めてモデル化し、有限要素解析する必要がある。しかし、片締め継手の場合、スプリットティー継手に比べフランジ板が長く、解析モデルが大きくなっており、ティーウェブも含めてモデル化すれば非常に大きい解析モデルとなる。その結果、スプリットティー継手以上に計算機の記憶容量と計算時間を必要とし、簡易的な手法で解析するという面からは現実的ではないと思われる。

したがって、ここではスプリットティー継手の解析と同様にティーウェブ部分を解析モデルに含めず、簡易的に解析することとし、境界条件を変化させる

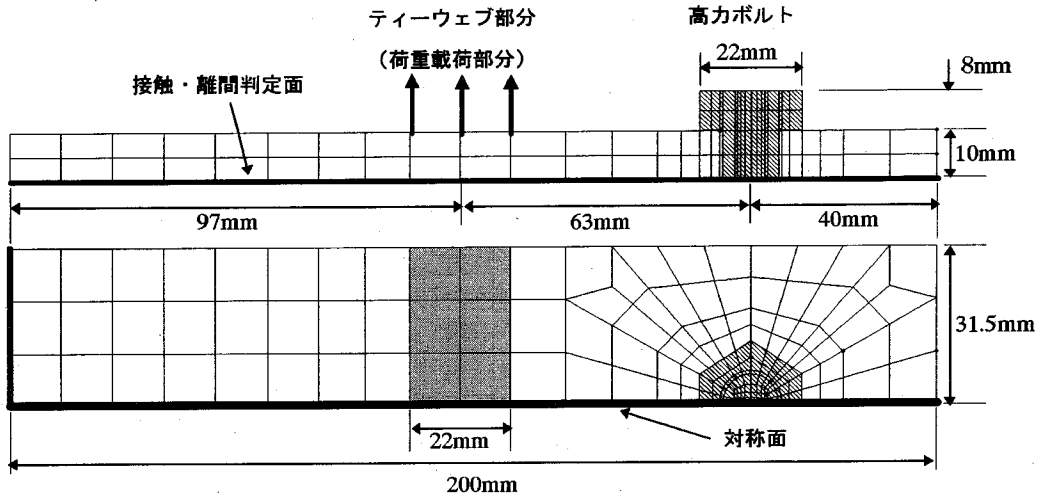


図-18 解析モデルの概要と要素分割図 (AK-1)

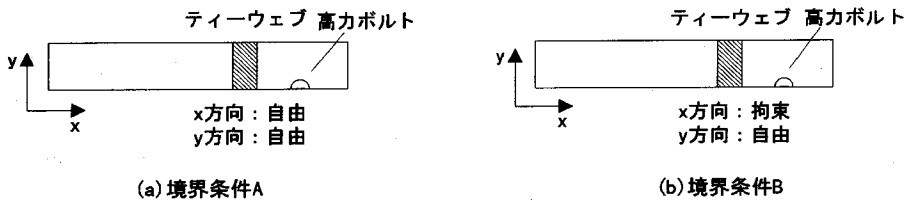


図-19 ティーウェブでの境界条件

ここでティーウェブの剛性を評価できるかどうかを
 載荷実験結果と3次元有限要素解析結果を比較する
 ことにより検討した。

(1) 解析ケースの設定

解析では、力学的挙動に最も影響を与えるフラン
 ジ板厚をパラメータとして取り上げ、10(mm)、
 22(mm)の2種類を設定した。そのほかの形状パラメ
 ータであるフランジ板幅、ボルト軸心からフランジ
 板縁端までの距離、ティーウェブ間の距離、ティ
 ーウェブからボルト軸心までの距離、および高力ボ
 ルトなどの諸元は載荷実験供試体(図-3)の諸元と
 共通とした。

解析手法についてはスプリットティー継手で行
 った解析と同様、2枚のフランジ板が接触する面を基
 準面とし、この面を接触・離間状態を判定する面と
 した。接触・離間状態の判定法、接触面における仮
 定、フランジ板と高力ボルトの接触部分における仮
 定などはすべてスプリットティー継手の解析と同様
 である。フランジ板と高力ボルトの応力-ひずみ関
 係は等方硬化弾塑性モデルを仮定した。解析モデル
 の概要と要素分割を解析ケース AK-1 を例として図
 -18に示す。なお、フランジ板の厚いケース AK-
 2で節点数 4727、要素数 18912 であり、フランジ板

表-5 解析ケースの一覧

解析ケース	フランジ板厚	ティーウェブでの 境界条件
AK-1A	10mm	A
AK-1B	10mm	B
AK-2A	22mm	A
AK-2B	22mm	B

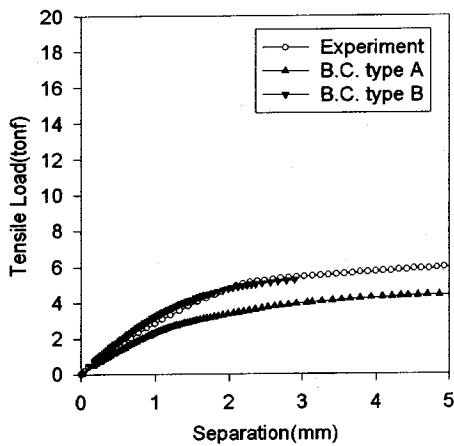
【Note】

共通諸元:

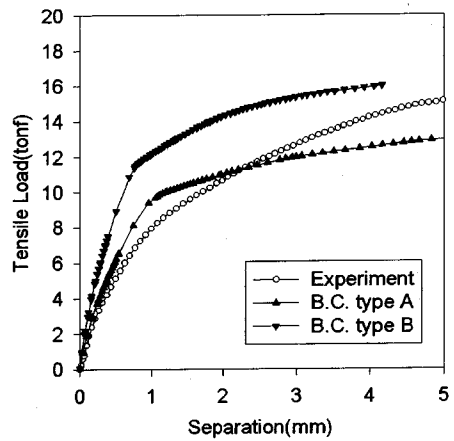
フランジ板幅: 63mm, 使用高力ボルト: M12

の薄いケース AK-1 で節点数 2981、要素数 11376 だ
 る。フランジ板厚 22mm の場合、スプリットティ
 ー継手と比較すると節点数、要素数ともに約 16% の
 増加となっている。

ティーウェブの境界条件としてはティーウェブの
 鉛直方向の拘束の度合いを考慮して次の2種類の方
 法で解析を試みた。その概略図を図-19に示す。
 第1の方法は、スプリットティー継手の解析で用い
 たものと同じ境界条件を設定する方法で、ウェブ部
 分に相当する節点に等分布荷重に相当する節点力を
 z 方向に作用させ、x、y 方向にはその節点を拘束し
 ないとする境界条件(以下、境界条件 A と呼ぶ)で
 ある。第2の方法は第1の方法にフランジ板の長手



(a)AK-1



(b)AK-2

図-20 荷重-離間量曲線

方向の変位を拘束する境界条件を新たに加えるものである（以下、境界条件 B と呼ぶ）。境界条件 A よりも境界条件 B の方が変形を拘束する分、ティーウェブ部分においてより剛な構造になると思われる。

解析ケースの一覧を表-5 に示す。解析ケースは板厚で 2 種類、境界条件で 2 種類あり、合計 4 ケースである。

(2) 有限要素解析結果

a) 荷重-離間量関係の比較

得られた荷重-離間量曲線を図-20 に示す。横軸の離間量はティーウェブ位置での 2 枚のフランジ板の間の開口量である。なお、図中には比較のため片締め継手の載荷実験結果も図示した。

フランジ板が最も薄い 10(mm) の場合、荷重-離間量曲線の形状は境界条件 B が載荷実験結果と非常によく一致している。一方、スプリットティー継手と同様の境界条件を与えた境界条件 A では荷重-離間量曲線の形状は実験結果と異なっており、実験結果よりも強度を低く評価している。初期の剛性（図-20(a) に基づく荷重 2.0(tonf) までの荷重-離間量曲線の勾配）を実験結果と比較してみると境界条件 A では 24% の差が見られ、境界条件 B では 14% の差が見られた。このようなことからフランジ板が薄い場合、境界条件 B の方が載荷実験結果を正しく再現していると言える。一方、フランジ板が厚い場合、荷重-離間量曲線の形状は境界条件 A、境界条件 B のいずれも載荷実験結果と一致することはなかった。特に境界条件 B の場合、強度を高く評価し、実験結果と大きく異なる結果となった。フランジ板が厚い場合は、境界条件 A の方が、境界条件 B に比べると

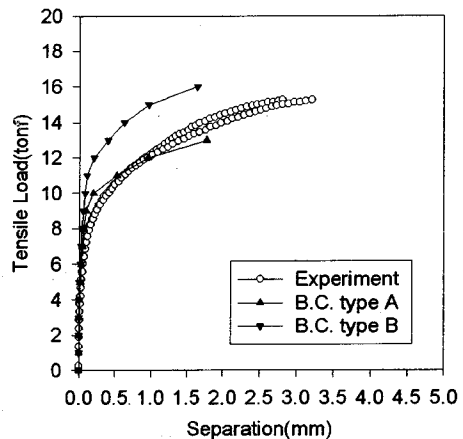


図-21 ボルト位置における荷重-離間量曲線(AK-2)

比較的一致していると言える。フランジ板が薄い場合と同様に、初期弾性域での剛性（図-20(b) に基づく）を比較してみると、境界条件 A が実験結果よりも 24% 高く、境界条件 B では約 100% 高くなっている。さらに、フランジ板が厚い場合のボルト位置での荷重-離間量曲線を図-21 に示す。これによると、境界条件 B ではボルト位置での離間が載荷実験よりもかなり少なくなっており、境界条件 A の方が載荷実験結果に近くなっている。したがって、フランジ板が厚い場合、フランジ板が薄い場合ほどの一致はないが境界条件 A の方がより望ましいと考えられる。

このようにフランジ板厚の大小に関わらず、境界条件 A と境界条件 B とではかなり荷重-離間量曲線の形状が異なり、ティーウェブの境界条件の与える影響がかなり大きいことがわかる。フランジ板が薄

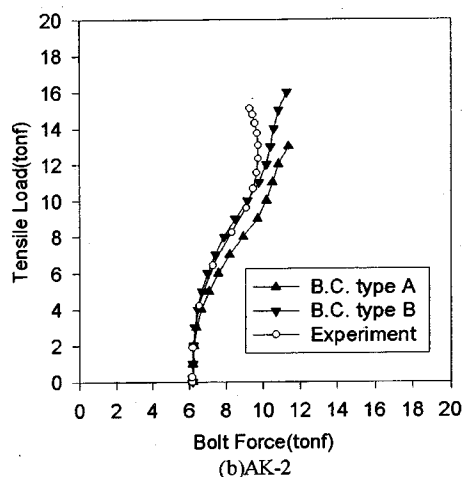
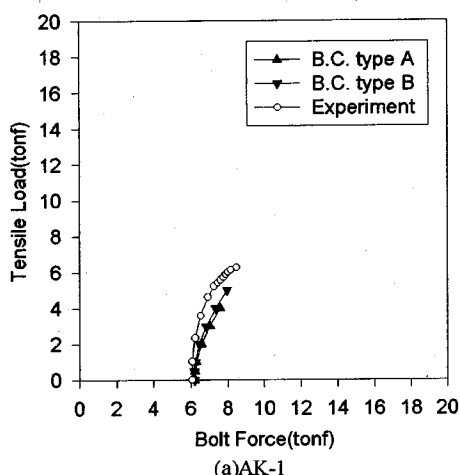


図-22 荷重-ボルト軸力曲線

い場合は、フランジ板の変形が生じやすいため、実験結果を正しく再現するにはティーウェブによる拘束を考慮する必要がある。一方、フランジ板が厚い場合は、ウェブの持つそれぞれの板自身の持つ剛性の比によってフランジの拘束度が異なり、荷重-離間関係が左右されると思われる。したがって、ウェブによる拘束の効果として境界条件 A/B のようなものを考慮した場合、実際よりもさらに強度を高く評価すると考えられる。

また、フランジ板が厚い場合、荷重実験結果では荷重-離間量曲線において明確な折曲点が現れず、滑らかに変化している。しかし、有限要素解析結果では折曲点がはっきりと現れている。このような差異の原因として、フランジ板が厚い場合の力学的挙動を支配する高力ボルトの応力-ひずみ関係の仮定およびその精度の問題が考えられる。解析ではヤング率を $21000(\text{kgf}/\text{mm}^2)$ 、高力ボルトの応力-ひずみ関係を線形バイリニア型弾塑性としたが、実際の高力ボルトの応力-ひずみ関係はこの仮定と異なっていると考えられる。

b) 荷重-ボルト軸力関係の比較

次に、解析結果から得られた荷重-ボルト軸力曲線を図-22に示す。なお、図中には比較のため荷重実験から得られた荷重-ボルト軸力曲線も図示した。フランジ板が薄い場合、境界条件の違いによる曲線の形状の違いはほとんど見られず、境界条件の違いがボルト軸力に与える影響はほとんどないと言える。ただし、境界条件 B がより実験結果に近くっており、荷重-離間量曲線での傾向と一致している。一方、フランジ板が厚い場合は境界条件による曲線の違いが顕著に現れており、境界条件 B がより

荷重実験結果に近づいている。このようにフランジ板が厚い場合、高力ボルトの挙動が支配的であり、境界条件の違いがボルト軸力に与える影響は大きいと言える。この境界条件 B がより荷重実験結果に近いという結果は荷重-離間量関係では境界条件 A が実験結果により近い結果となっていることと異なった結果である。境界条件 A の場合、ボルト軸力が荷重実験結果よりも高い傾向にあるのは、フランジ板の変形が大きいため反力の発生が大きいためと思われる。一方、境界条件 B の方がボルト軸力が低くなっているのは、板の剛性が増し、反力の発生が小さくなったためと考えられる。

5. 結論および今後の課題

本研究では高力ボルト引張継手の最も基本的な形式であるスプリットティー継手に対し、荷重実験および有限要素解析を行い、その力学的挙動を詳細に検討した。また、スプリットティー継手とよく似た片締め継手に対しても荷重実験を行い、力学的挙動を検討するとともに、スプリットティー継手と同様な解析手法の適用性について検討した。以下に得られた結論と今後の課題について述べる。

1) スプリットティー継手および片締め継手の離間挙動は、フランジ板厚の大小により、フランジ板が支配的な挙動と高力ボルトが支配的な挙動に大きく分類される。ボルト中心とティーウェブ中心間の距離(偏心距離)を共通としたスプリットティー継手と片締め継手の比較においては、初期の剛性はスプリットティー継手の方が高く異なるが、終局強度はほ

ば同じであり、両者の差異はほとんどない。また、フランジ板が薄い場合、大きな変形能が期待でき、高いエネルギー吸収能を持つと思われる。したがって、今後、耐震部材としての応用に関する研究が期待される。

2)本研究で提案した解析手法および解析モデルにより、継手部の剛性が大きく減少するまでのスプリットティー継手の有限要素解析が可能である。

3)スプリットティー継手に関しては、フランジ板厚が大きいものほど剛性が高く、強度も高い。特に終局状態に関してはフランジ板厚が支配的である。また、フランジ板厚の違いにより、フランジ板の変形状態およびフランジ板間における接触圧の分布が大きく異なる。さらに、ボルト軸力の導入による剛性増大の効果はフランジ板が薄いものに対しても認められる。フランジ板幅に関しては、降伏強度を単位幅あたりで評価した場合、フランジ板が薄いものは板幅に関係なく一定であり、フランジ板が厚い場合は板幅が大きくなるにつれて減少する。

4)橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)は精度よく降伏強度を推定しておりその信頼性は高いと言える。

5)スプリットティー継手と同様の解析手法により、片締め継手に対して有限要素解析を行った結果、ティーウェブでの境界条件を変えることで継手の変形性状が大きく異なり、フランジ板が薄い場合は、ティーウェブでの拘束を考慮した境界条件が、フランジ板が厚い場合は、ティーウェブでの拘束を考慮しない境界条件の方が載荷実験結果をよく近似する。

6)今後は、ティーウェブを含めた片締め継手の解析を行い、構造モデルおよび境界条件を検討する必要がある。特にティーウェブとフランジプレートの相互作用を明らかにする必要がある。

謝辞：載荷実験を行うに当たり、(株)神戸製鋼所には供試体の設計および製作において全面的な支援をしていただいた。ここに感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1993.2.
- 田中尚，田中淳夫：高力ボルト引張接合部の設計式について，JSSC，Vol.11，No.120，pp.5-10，1975. 12.
- 接合小委員会・引張ボルト接合班：引張接合，JSSC，Vol.2，No.12，1966.
- 田辺宏志，上杉英樹，橋本篤秀，田中淳夫，高田周三：Split Teeを用いた高力ボルト引張接合に関する研究（その1．ボルトおよびTeeフランジ挙動に関する理論的研究，日本建築学会論文報告集号外，p.447，1967.10.
- 田辺宏志，上杉英樹，橋本篤秀，田中淳夫，高田周三：Split Teeを用いた高力ボルト引張接合に関する研究（その2．ボルトおよびTeeフランジ挙動に関する実験，日本建築学会論文報告集号外，p.448，1967.10.
- 加藤勉：高力ボルト引張接合の設計式（スプリットT接合），JSSC，Vol.5，No.46，pp.73-80，1969.
- 藤本盛久，橋本篤秀：高力ボルト引張り接合に関する研究・第1部・板のパネ定数設定のための軸対象3次元弾性理論解析（その1），日本建築学会論文報告集第164号，pp.27-33，1969.10.；同（その2），日本建築学会論文報告集第165号，pp.67-76，1969.10.
- 藤本盛久，橋本篤秀：高力ボルト引張接合に関する研究・第2部・Split Tee型引張接合の解析（その1），日本建築学会論文報告集，第190号，pp.59-68，1971；同（その2），日本建築学会論文報告集，第191号，pp.7-18，1972.
- (社)日本鋼構造協会・技術委員会・安全性分科会接合小委員会・引張ボルト接合班：高力ボルト引張接合実験報告，JSSC，Vol.8，No.74，1972.2.
- 日本建築学会：高力ボルト引張接合設計施工指針，丸善，1993.3.
- 関西道路研究会，道路橋調査研究委員会：接合小委員会報告書，鋼橋の接合に関する調査研究，pp.85-182，1989.3.
- 黒田充紀，増田陳紀，皆川勝，西脇威夫：接触面平坦度を考慮したスプリットティー接合部挙動の解析的検討，土木学会論文集，第416号/I-13，pp.365-374，1990.4.
- 黒田充紀，増田陳紀，利守尚久：スプリット・ティー接合の力学的挙動に及ぼす溶接角変形の影響，土木学会論文集，第441号/I-18，pp.127-136，1992.1.
- 渡邊崇志，黒田充紀，西脇威夫，横尾真治：T接合の設計式の特性とその改良，土木学会第47回年次学術講演会概要集第1部門，pp.934-935，1992.9.
- (社)日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)，1993.2.
- 大橋治一，谷中幸和，水川洋介，梅田聡：引張接合を用いた吊橋主塔の力学特性に関する研究，構造工学論文集 Vol.41A，pp.991-1001，1995.3.
- 大井謙一，近藤日出夫，陳以一，高梨晃一，嶋脇興助，A.S.エルナチャイ：半剛接部を有する鋼構造骨組の地震応答実験，構造工学論文集 Vol.39B，pp.155-164，1993.3.
- 山成實，小川厚治，黒羽啓明：半剛接合された角形鋼

管柱・H形鋼梁骨組の弾塑性挙動, 構造工学論文集
Vol.40B, pp.703-710, 1994.3.
19) 渡邊英一, 山口隆司, 杉浦邦征: スプリットティー継
手の平面2次元解析における一検討, 構造工学論文集

Vol.41A, pp.95-102, 1995.3.
20) 山田嘉昭, 横内康人: 有限要素法による弾塑性解析プ
ログラミングEPIC4解説, 培風館, 1981.3.
(1995.10.3 受付)

3 DIMENSIONAL CONTACT/SEPARATION BEHAVIOR ON HIGH STRENGTH BOLTED FLANGE JOINTS

Eiichi WATANABE, Takashi YAMAGUCHI, Kunitomo SUGIURA
and Shun-ichiro KASAI

Studied herein is the 3 dimensional contact/separation behavior of high strength bolted flange joints considered to have many advantages over the other types of joints from the viewpoint of mechanical behavior, erection and aesthetic design. The tensile loading tests for the split tee flange joints are carried out and the parametric analysis by 3 dimensional finite element method considering material and boundary non-linearity is made. It is concluded that a contact/separation behavior of split tee flange joints significantly depends on the thickness of the flange plate, particularly the ratio of bending strength of the flange plate to the strength of bolts. It is also found that the increase of the bolt force may be affected more significantly by the local deformation of the flange plate than the prying action.