

引張力およびせん断力が高力ボルト引張継手の 曲げ強度・剛性に与える影響

山口隆司¹・鈴木康夫²・北田俊行³・杉浦邦征⁴・秋山寿行⁵

¹正会員 博士(工学) 大阪市立大学大学院工学研究科 講師 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

²学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科 前期博士課程 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

³正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁴正会員 Ph.D. 京都大学大学院工学研究科 助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 博士(工学) 駒井鉄工株式会社 技術本部橋梁設計部 (〒555-0041 大阪市西淀川区中島2-5-1)

高力ボルト引張継手では、予め、高力ボルトに高い軸力が導入され、継手面には材間圧縮力が発生する。したがって、引張力あるいは圧縮力などのボルト軸方向の外荷重のみではなく、せん断力に対しても摩擦接合として抵抗するため、高力ボルト引張継手は、これら以外の断面力も伝達できる多面的な継手形式と言える。しかし、この種の継手に関する既往の研究の多くは引張力のみを対象としており、組合せ荷重下での検討は十分になされていない。したがって、本研究では、本継手を実構造物の接合法として適用するために、実際に近い荷重状態下での力学的挙動を、断面力として、引張、曲げ、およびせん断力を想定し、これらを作用させた載荷実験により明らかにし、実橋部材の継手構造に適用可能であることを確認した。

Key Words : *high strength bolted tensile joint, box member, combined load, shear force, ultimate bending moment*

1. はじめに

現在、橋梁構造物に用いられている高力ボルト引張継手は、「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)¹⁾(以下、JSSC 指針案と言う)」に基づいて設計されている。

JSSC 指針案では、高力ボルト引張継手を構造詳細の違いにより、長締め形式および短締め形式の2つに分類している。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。吊橋主塔の接合部などへの適用例²⁾がある。一方、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、短いボルトで、接合面を有する板(以下、ティーフランジ板と言う)を直接、締め付けて接合する形式である。少数主桁橋梁の主桁と横桁との接合部などへの適用例³⁾がある。

特に、短締め形式は長締め形式と比較して、構造が簡単であるため製作・施工上有利である。また、摩擦接合と比較した場合、添接板が不要であり、その施工上のメリットは大きいと思われる。したがって、橋梁の合理化のため、構造部材の接合法として積極的に採用されることが期待される。

しかしながら、JSSC 指針案では、①高力ボルトの複数配置に関する規定がなく、単列配置のみでは、一次部材の接合法として伝達できる荷重が不足する場合が想定されること、②一次部材の接合部を設計する際に重要な接合部の剛性や変形についてその明確な記述がなされていないことなどの理由から、これまでに短締め形式は橋梁構造物の一次部材の接合法として採用されていないのが現状である。

このような背景を踏まえ、高力ボルトの複数配置が接合部の強度や剛性に与える影響を明らかにすべく、著者らを中心に基礎的な研究⁴⁾⁷⁾が行われてきた。これらの研究では、基礎的研究という位置付けから、継手全体ではなく継手を構成する部分要素を対象として、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(両締め継手形式⁴⁾⁶⁾および片締め継手形式⁷⁾の力学的挙動の解明が主として実験的手法により行われている。そして、高力ボルトの複数配置による継手部耐力の増大効果や高変形能ボルトの使用の効果などについて議論されている。さらに、最近では、実構造物への適用性を検討するために、図-1に示すようなトラス弦材やアーチリブ等の箱型断面部材の接合部を想定し、高力ボルト片締め引張継手を採用した接合部供試体を製作し、曲げ

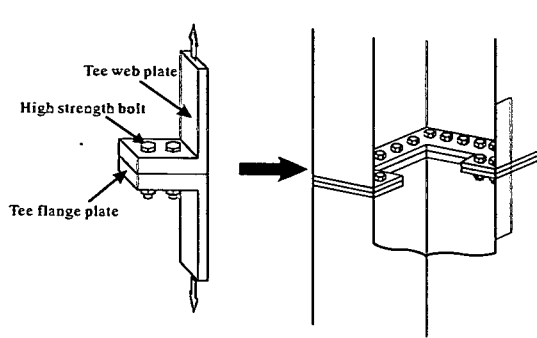


図-1 高力ボルト引張継手を用いた箱型断面部材接合部の例

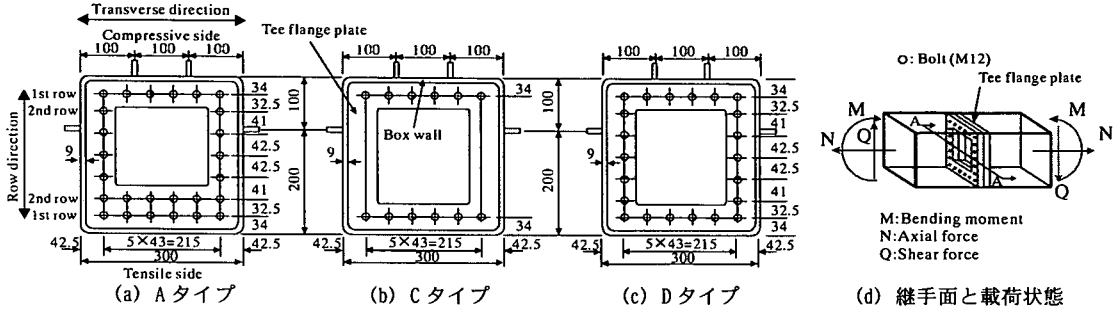


図-2 供試体の継手断面形状 (A-A 断面) (単位: mm)

表-1 実験に用いた供試体の一覧

| 供試体名 | ボルト配置 | 作用引張荷力 | 作用せん断力 | 荷重載荷経路 |
|--------|--------|-------------------|----------|--------|
| A-20* | A type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | せん断力なし | — |
| C-20* | C type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | せん断力なし | — |
| D-20* | D type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | せん断力なし | — |
| A-20-a | A type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | ボルト降伏後漸増 | a |
| C-20-a | C type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | ボルト降伏後漸増 | a |
| D-20-a | D type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | ボルト降伏後漸増 | a |
| A-30-a | A type | 一定 (ボルト総導入軸力の30%) | ボルト降伏後漸増 | a |
| D-30-a | D type | 一定 (ボルト総導入軸力の30%) | ボルト降伏後漸増 | a |
| A-20-b | A type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | 一定 | b |
| D-20-b | D type | 一定 (ボルト総導入軸力の20%) | 一定 | b |

*印は文献8)による実験供試体を示す。

と引張を同時に載荷した実験⁸⁾も行われている。その結果、ティーフランジ板の厚板化およびボルトの複数列配置化による継手部耐力および剛性の増大効果を確認し、橋梁構造物の一次部材の接合法として、短締め形式の高力ボルト引張継手が、曲げと引張との組合せ荷重作用下において、適用できる可能性があるとして結論付けられている。

さらに、高力ボルト引張継手は、せん断荷重に対して摩擦接合として荷重に抵抗すると考えられ、曲げと引張力のみでなく、せん断力を受ける部材の接合法としても適用可能であると考えられる。

したがって、本研究では、さらに実際に近い荷重状態下における本継手の力学的挙動を調べ、その適用の可能性を確認することを目的とした。すなわち、高力ボルト片締め引張継手を採用した箱型断面部材の接合部供試体を対象に、曲げ、引張、

およびせん断力を同時に載荷し、これらの組合せ断面力作用下での離間性状や最大耐力などについて、せん断力および引張力が与える影響を実験的に検討した。そして、継手としての使用性や終局状態を確認した。

2. 実験供試体と実験方法

(1) 実験供試体

実験に用いた供試体の継手断面の形状を図-2に示す。

供試体は、ボルト配置をパラメータに、角形鋼管(材質:STKR490)を用いて7体製作した。なお、ボルト配置は文献8)で用いられた供試体と同様である。すなわち、引張側にボルトを2列配置したAタ

表-2 実験に用いた鋼材およびボルトの機械的性質

| 材質 | 降伏点 (MPa) | 引張強度 (MPa) | ポアソン比 | 破断伸び (%) |
|------------|-----------|------------|-------|----------|
| SM490Y | 341.5 | 524.1 | 0.29 | 32 |
| STKR490 | 450.0 | 568.0 | 0.30 | 34 |
| 10.9 (M12) | 1047 | 1121 | — | — |

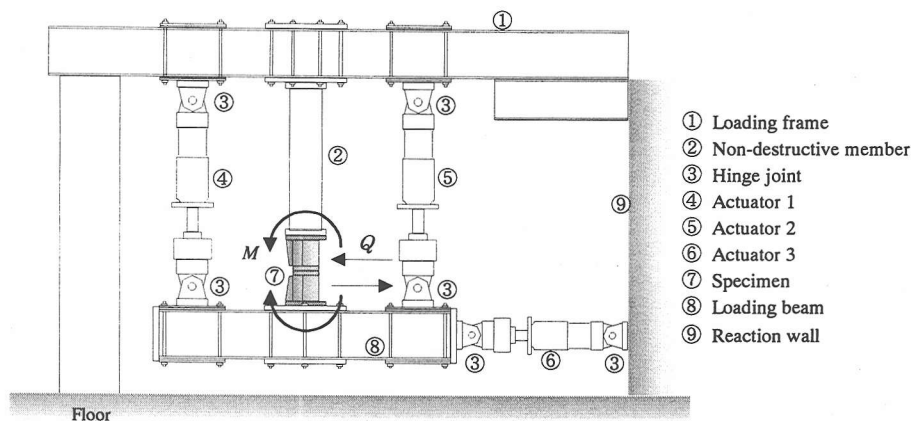


図-3 載荷装置

イブ(3体), 鋼管のウェブ側にボルトを配置せず, 圧縮側および引張側にそれぞれ1列配置したCタイプ(1体), および全周にボルトを1列配置したDタイプ(3体)の3種類とした。これらの供試体を用いて荷重載荷パターンを変えて実験を行った。本研究で用いた供試体とその荷重載荷条件を表-1に示す。

なお, 供試体名の最初の英字は図-2に示すボルトの配置パターンを, 次に続く数字は初期ボルト軸力の総和に対する作用引張力の大きさの割合(%)を, 最後の英字は荷重載荷経路を表している。載荷荷重経路の詳細は次節で述べる。なお, *のついた供試体A-20*, C-20*, およびD-20*はそれぞれ文献8)のA-34, C-34, およびD-34であり, 参考のために示している。

供試体の設計にあたっては, JSSC指針案を参照し, 接合部の終局状態をボルトの破断時と定義した。そして, 鋼管部での局部座屈等有害な変形が発生しないよう, 鋼管径, 鋼管肉厚, および補強リブプレート形状を決定した。ティーフランジ板厚は, JSSC指針案が採用しているてこ反力係数算定式を参考にして決定した。すなわち, Aタイプ供試体において, 1列目ボルトを無視し, 2列目ボルトにててこ反力によるボルト付加軸力が発生しないよう, その板厚を34mmと決定した。また, ボルトは行方向に等間隔に配置するものとし, JSSC指針案で規定されている最小軸心間隔を満足する43mmとした。なお, ボルトの呼び径はM12を使用した。ただし, 首下長さ95mmのF10T(M12)高力ボルトの入手が困難であったため, 普通六角ボルト(強度区分: 10.9)に対して引張試験を行い, その性能を高力ボルトと同等程度と確認した後, F10T高力ボ

ルトの代用として用いた。なお, 供試体の縮尺率は試験機の載荷能力を考慮して実構造物の1/2とした。

ボルトの導入軸力は, M12に対する規定がJSSC指針案に存在しないため, 建築構造物の設計基準である高力ボルト接合設計施工指針⁹⁾を参照し, その標準導入軸力(61.3kN)を導入した。ボルトはトルクレンチにより軸力を管理し, 締め付けた。

供試体の製作に関して, 鋼管とティーフランジ板との接合は, 鋼管にレ形の開先をとり, 完全溶け込み溶接とした。その際, JSSC指針案に示されているような, 溶接による有害な局部変形が発生しないように注意した。また, 継手面の処理は高力ボルト摩擦接合同様に道路橋示方書II鋼橋編¹⁰⁾に規定されている摩擦係数が確保されるようにショットブラスト処理により仕上げた。

使用した鋼材およびボルトの機械的性質を表-2に示す。

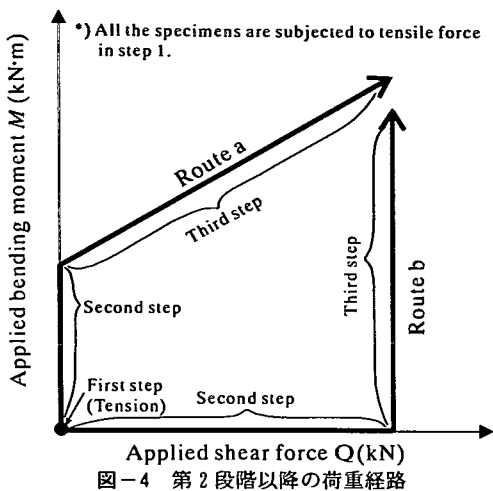
(2) 実験方法

実験は図-3に示す載荷装置を用いて行った。

本実験では, 3機のアクチュエータを用いて引張力, 曲げモーメント, およびせん断力を載荷した。

載荷は引張力の大きさおよび荷重の載荷経路をパラメータ(経路aと経路b)として, 3段階に分けて行った。

経路aでは, まず, 引張力のみを加え(第1段階), 次に, 引張力を一定に保ち, アクチュエータ1および2を用いて継手が降伏曲げモーメントに至るまで曲げモーメントを載荷した(第2段階)。なお, 継手の降伏はいずれかのボルトが降伏する時の作用曲げモーメントと定義し, その値には文献8)で得られた実験結果を用いた。そして, 最後に, 継手が



破断に至るまでせん断力および曲げモーメントを比例漸増荷重した（第3段階）。その際、継手面での作用曲げモーメントの増加速度が第2段階で荷重した曲げモーメントの増加速度と等しくなるよう3機のアクチュエータを制御した。また、せん断力と曲げモーメントの大きさは、荷重装置の荷重能力を考慮して継手面に最も不利な荷重状態となるよう決定した。

一方、経路bでは、まず、引張力のみを加え（第1段階）、次に、引張力を一定に保ち、アクチュエータ3を用いてせん断力を荷重した（第2段階）。その際、継手面断面に曲げモーメントが作用しないようにアクチュエータ1および2を制御した。なお、A-20-bおよびD-20-bに対して荷重したせん断力の大きさ（最大値）は、それぞれA-20-aおよびD-20-aに荷重された最大せん断力とした。そして、最後に、引張力とせん断力を一定に保持し、継手が破断に至るまで曲げモーメントを漸増荷重した（第3段階）。

なお、経路a、および経路bにおける、第1段階の引張力の大きさは、A-30-aおよびD-30-aに対してボルトの総導入軸力の30%とし、その他の供試体に対してボルトの総導入軸力の20%とした。

荷重経路（第2段階以降）の模式図を参考までに図-4に示す。図の縦軸および横軸はそれぞれ継手面における曲げモーメントおよびせん断力を表す。なお、荷重の正方向は図-3の中に示したとおりとする。

計測項目は荷重荷重、ティーフランジ板間の離間量、継手面のすべり量、ボルト軸力、および鋼管壁外側表面のひずみとした。ティーフランジ板間の離間量の測定には、亀裂開口変位を測定するためのクリップ式変位計を用いた。離間量および鋼管壁ひずみの測定位置を図-5に示す。また、ボルト軸力は、ボルトヘッドにひずみゲージを貼り、あらかじめ万能試験機によりキャリブレーションしたものをを用いて測定した。

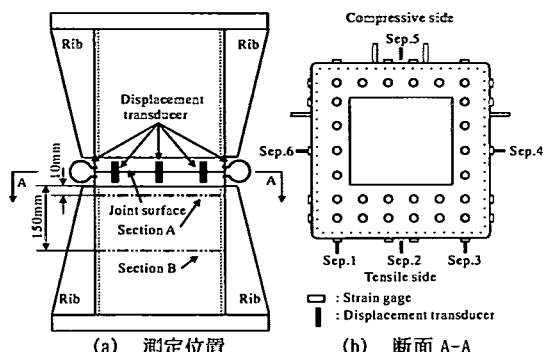


図-5 離間量および鋼管壁ひずみの測定位置

表-3 摩擦係数測定結果

| 実験ケース | 圧縮荷重(kN) | 滑り荷重(kN) | 摩擦係数 |
|-------|----------|----------|------|
| MS30 | 27.8 | 7.0 | 0.25 |
| MS50 | 46.6 | 15.6 | 0.33 |
| PS60 | 59.1 | 28.6 | 0.48 |
| PS120 | 117.9 | 56.9 | 0.48 |

3. 継手面の摩擦係数

本実験で用いた供試体の継手面はショットブラスト処理により仕上げた。そして、実験を行うに先立ち継手面の摩擦係数の測定を行った。

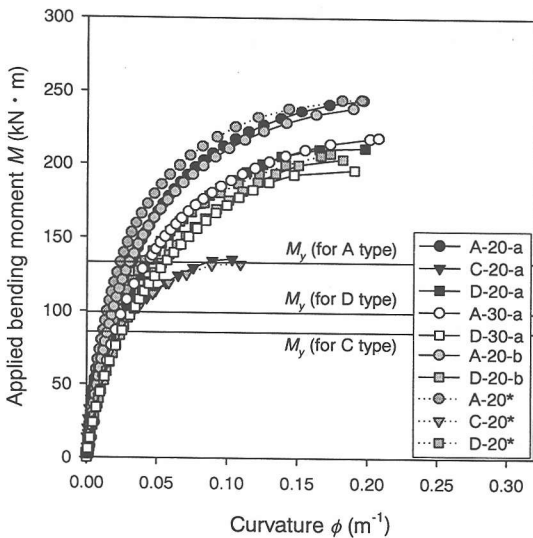
測定は、Cタイプの供試体と同形状の供試体を使用し、図-3に示す荷重装置を用いて荷重荷重条件を変えて4回行った。

荷重荷重条件は、継手面に離間が発生しない場合を想定して、圧縮力およびせん断力のみが作用するようにした場合（以下、PSタイプと言う）と、継手面に離間が発生する場合を想定して、圧縮力、せん断力、および、せん断力を作用させるための荷重に伴って発生する曲げモーメントとが作用するようにした場合（以下、MSタイプと言う）の2パターンとした。

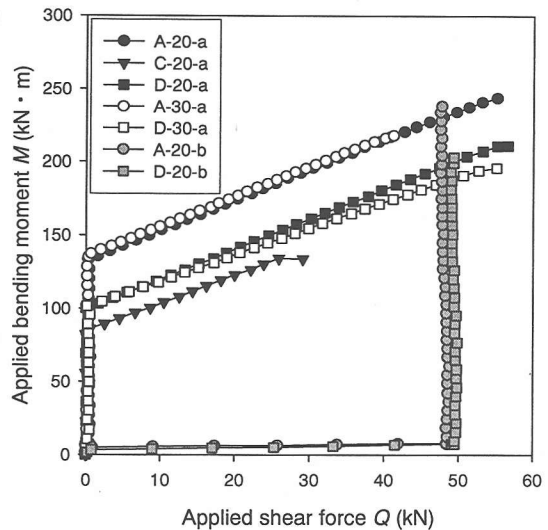
なお、用いた供試体では、ボルト本数が多く、ボルトに軸力を導入すると、滑り荷重が試験機の荷重能力を超えたと考えられたため、継手にはボルトを使用せず、継手面の材間圧縮力は荷重装置による圧縮力のみで発生させた。

荷重荷重条件と得られた摩擦係数の結果を表-3に示す。表中の実験ケースの英字は継手面の離間状態（MS：離間あり、PS：離間なし）を示し、数字は圧縮力の大きさ（kN単位）を示している。摩擦係数は、最大せん断力を作用させた圧縮力で除したものと定義している。

表より、継手面に離間が発生しない場合を想定したPSタイプは、いずれも道路橋示方書に規定されている摩擦係数0.4以上を確保できていることがわかる。一方、継手面に離間が発生した場合を想定したMSタイプはそれを下回っており、継手面に離間が発生すると摩擦係数が低下しているといえる。これは、継手にボルトを使用しておらず、せ



(a) 曲げモーメント-曲率曲線



(b) 曲げモーメント-せん断力関係

図-6 曲げモーメントと曲率およびせん断力との関係

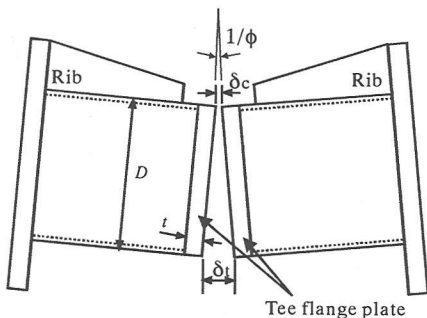


図-7 接合部の平均曲率φの定義

せん断力荷重によって生じる曲げにより、継手面に離間が進行し、接触面全体で均一な圧縮応力とせん断応力が発生するのではなく、圧縮側最外縁のみでの不均一な荷重伝達機構のため極めて低い摩擦係数が得られたと考えられる。

しかしながら、高力ボルト引張継手では、継手の降伏をボルトの降伏と定義すれば、継手降伏時に継手面のボルト位置における離間はほとんどないと考えられ、また離間発生後も、予め導入されたボルト軸力により発生する材間圧縮応力のため、離間が継手面全体に直ちに進行することはないと考えられる。したがって、継手面をショットブラスト処理で仕上げた高力ボルト引張継手の継手面の摩擦係数は、0.4以上の摩擦係数を有しており、せん断力に対して、摩擦接合継手と同等レベルの耐力を有しているものと結論付けられる。

4. 実験結果および考察

(1) 終局時での破壊性状

全ての供試体は引張側のボルトが破断して終局状態に至った。ボルトはねじ部とナットとの噛合

部近傍から破断しており、せん断力によるものと思われる変形は特に認められなかった。また、鋼管壁およびティーフランジ板には残留変形は認められず、継手接触面には明確なすべりの痕も見られなかった。

(2) 曲げモーメント-曲率関係

載荷実験より得られた曲げモーメント(M)と曲率(ϕ)との関係を図-6(a)に示す。図の縦軸は曲げモーメント M を、横軸は2枚のティーフランジ板厚間(離間も含む)における平均曲率 ϕ を表している。また、図中には、比較のために文献(8)で得られた曲げモーメント-曲率曲線(A-20*, C-20*, および D-20*) および降伏曲げモーメント(M_y)も示している。さらに、継手面に実際に作用した曲げモーメント(M)とせん断力(Q)との関係を参考までに図-6(b)に示す。

なお、平均曲率 ϕ は図-7を参考に、式(1)で定義し、クリップ式変位計により計測された継手部離間量をもとに算出した。また、継手部離間量は、測定位置(図-5中の Sep.1~Sep.3)による違いは僅少であったため、それらの平均量で評価している。

$$\phi = \frac{(\delta_r - \delta_c)}{2t \cdot D} \quad (1)$$

ここに、

- ϕ : 2枚のティーフランジ板厚における平均曲率
- δ_r : 継手部における引張側平均離間量
- δ_c : 継手部における圧縮側平均離間量
- t : ティーフランジ板厚
- D : 鋼管径

図-6より、A-20*とA-20-a、C-20*とC-20-a、およびD-20*とD-20-aの曲げモーメント-曲率曲線

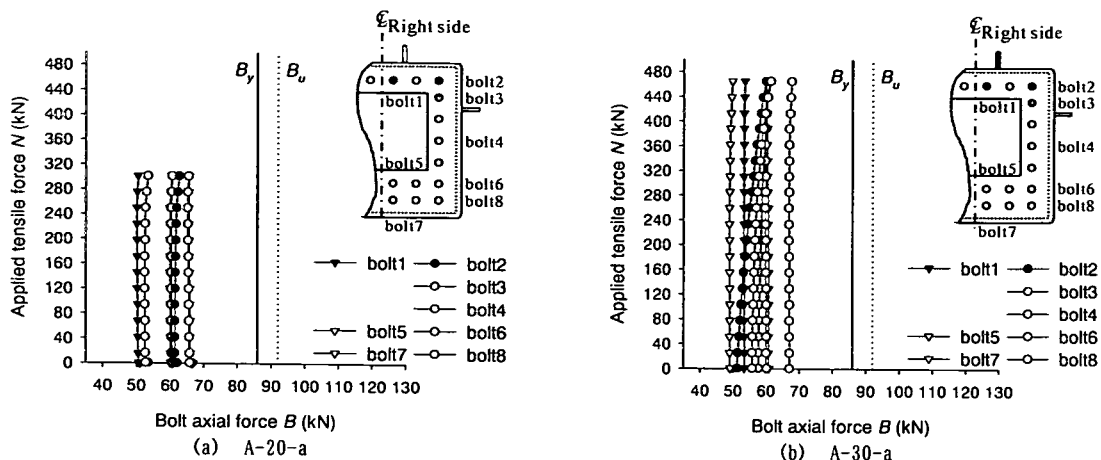


図-8 引張力-ボルト軸力関係

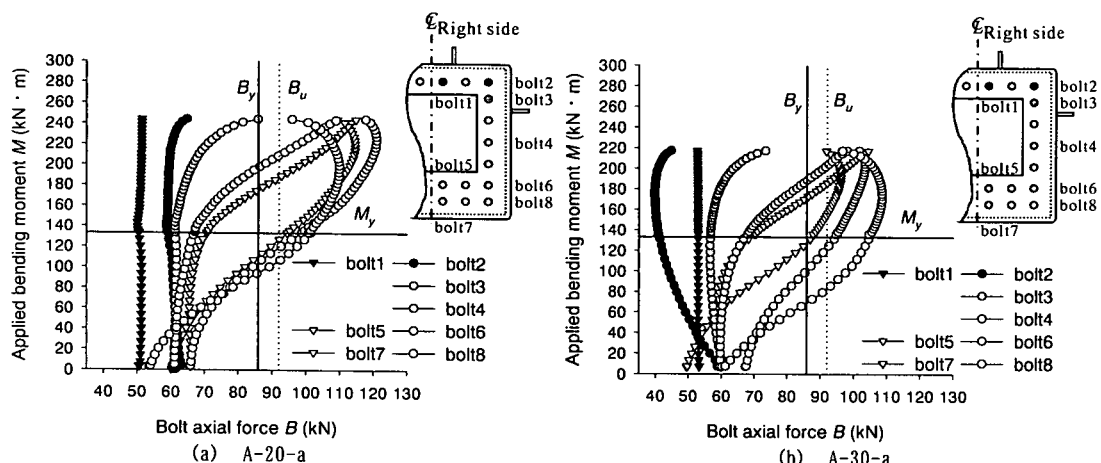


図-9 曲げモーメント-ボルト軸力関係

をそれぞれ比較すると、いずれのタイプの供試体においても最大曲げモーメントに有意な差異は認められず、せん断力の有無が継手耐力に与える影響は僅少であると言える。これは、継手はその滑り荷重を下回るせん断力に対して、ティーフランジ板間の摩擦力により抵抗するためである。すなわち、せん断力が小さく曲げモーメントあるいは引張力が卓越する場合、つまり、ボルトが支圧状態にならない場合、継手に作用するせん断力がボルトに伝達されず、てこ作用の発生状態にも影響を及ぼさないためと考えられる。

また、剛性には若干の差異がみられるが、これは主として、ボルトの初期導入軸力のばらつきによるものであり、せん断力の存在に起因するものではないと考えられる。

次に引張力の影響について、A-20-aとA-30-a、およびD-20-aとD-30-aとをそれぞれ比較すると、A-30-aおよびD-30-aの最大曲げモーメントがA-20-aおよびD-20-aのそれらよりそれぞれ10.7%および7.2%低下しており、作用引張力が10%増加したことによ

り、最大曲げモーメントが約10%低下している。また、A-20-a、D-20-a供試体に比べて、A-30-a、D-30-a供試体の方が、ボルト周辺部の離間がより早い段階から始まり、結果として、曲げ剛性が低下している。このように、作用引張力の増加は、ボルト軸力によって導入される材間圧縮力の減少をもたらし、継手部曲げ耐力に与える影響は大きいと言える。

載荷経路（経路aと経路b）の違いに注目して、A-20-aとA-20-b、およびD-20-aとD-20-bとをそれぞれ比較すると、 $M-\phi$ 曲線に有意な差異は認められず、荷重の載荷経路の違いは継手部強度に影響を与えないことが確認できる。

(3) ボルト軸力の変化

a) 引張力-ボルト軸力関係

引張力載荷段階（第1段階）における作用引張力とボルト軸力との関係を、A-20-aとA-30-aを例に、図-8に示す。他の供試体の作用引張力とボルト軸力との関係も基本的には同様の傾向である。図中

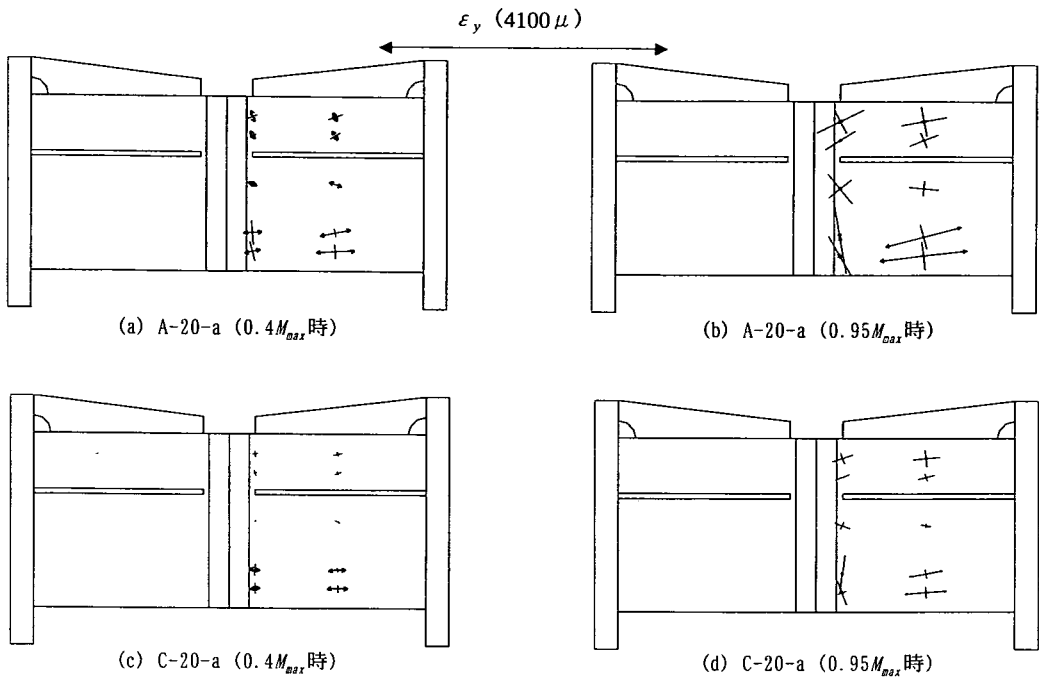


図-10 鋼管壁のひずみ分布

には、比較のため、実験で使用したボルトの降伏軸力(B_y)と引張耐力(B_u)も併せて示した。なお、ボルトの降伏軸力は、表-2に示した降伏点でボルトの有効断面積(84.3mm^2)を乗じて算出したものであり、引張耐力は、ボルトの引張試験より得られた値を用いた。また、図中には、軸力を測定したボルトの位置も併せて示している。

図より、各供試体のそれぞれのボルト間で、初期導入軸力のばらつき(導入目標値 61.3kN に対して 50kN - 68kN)が確認できる。これは、トルクレンチを用いたトルク管理による軸力管理法そのものの持つばらつきが主な要因と考えられる。特に、使用しているボルトが普通ボルトであることから、事前にトルク係数を測定しているものの、そのトルク係数のばらつきにも起因していると考えられる。また、本実験では、ボルトヘッドに3軸ひずみゲージを貼付け、そのひずみ値を、キャリブレーション結果を基にボルト軸力に換算している。そのため、万能試験機を用いたキャリブレーション試験時のボルトヘッドの変形状態と、トルクレンチによりナットを締め付けた場合のねじり応力存在下でのボルトヘッドの変形状態の違いによる影響もあると考えられ、今後、さらに検討していく必要がある。

また、図より、総導入軸力に比べて低い引張力が作用した段階(20%から30%)では、基本的にはボルト軸力の変化はほとんどないことがわかる。これは、作用引張力が、ボルト導入軸力により発生したティーフランジ板間の材間圧縮力の減少により伝達されていることを意味している。しかしながら、A-30-aの鋼管角部に配置されたボルト(凡

例: bolt2, bolt8)の軸力は、初期の段階から微増し、作用引張力が 200kN を超えたあたりから著しく増加している。これは、製作時の要因等の影響により角部のボルト近傍部においてフランジ板が完全に密着せず、そのため、材間圧縮力が発生することなく初期の段階からボルト軸力が増加したと思われる。

b) 曲げモーメント-ボルト軸力関係

曲げモーメントおよびせん断力の荷重段階での作用曲げモーメントと高力ボルトの軸力との関係を、前項で対象とした供試体を例に、図-9に示す。他の供試体についてもこれらと同様の傾向を示している。図中には、図-8と同様に、比較のため、実験で使用したボルトの降伏軸力(B_y)と引張耐力(B_u)、継手降伏時の曲げモーメント(M_y)も併せて示した。なお、継手の降伏は、2.(2)節で定義している。

得られた曲げモーメントとボルト軸力との関係は、第1段階での作用引張力が高いA-30-a供試体を除き、文献8)で得られた結果と同様の傾向が見られた。ボルト軸力は、引張側の鋼管壁寄りに配置されたボルト(bolt6, bolt7, bolt8)から増加し始め、その後、継手が降伏に至る直前から鋼管腹板中央に配置されたボルトおよび引張側2列目ボルト(bolt4, bolt5)の軸力が著しく増加する傾向にある。この傾向は、引張側2列目ボルトが荷重伝達に対して有効であることを表している。圧縮側に配置されたボルトについては、継手が降伏に至る直後からbolt3の軸力が増加し、引張側での離間の進行に伴う中立軸の圧縮側への移動が確認できる。しかし、圧縮側1列目の中央部に配置されたボルト

(bolt1)の軸力は、ほとんど変化しておらず、圧縮力の伝達は圧縮側1列目ボルトよりは、むしろ、鋼管壁上縁を通じて行われていると考えられる。

一方、第一段階で載荷した引張力の高いA-30-aでは、引張側のボルト軸力の傾向は、A-20-aと同様であるが、圧縮側の鋼管角部に配置されたボルト(bolt2)の軸力が減少し、最終的には増加に転じている。この減少は、載荷第1段階で、ボルトに導入した軸力以上の作用引張力がボルト近傍に作用したため軸力が増加し、その後曲げモーメントが作用することで、離間が減少したためと考えられる。

さらに、ボルト軸力の評価についてであるが、引張側の最大軸力が引張耐力 B_0 を超えていること、その最大ボルト軸力にばらつきが認められることなどから、本研究で用いた、ボルトヘッドにひずみゲージを貼り、純引張力作用下でのキャリブレーション結果に基づきボルト軸力を評価する手法は、トルクによって導入されたボルト軸力の測定、および曲げ引張状態、特に曲げが卓越した状態にあるボルトの軸力測定に関して、限界があると思われる。

このように、今後は、このような状態下におけるボルトの軸力測定法を検討する必要がある。

(4) 鋼管壁の主ひずみと主方向

鋼管壁の主ひずみ方向を、圧縮側1列、引張側2列配置のA-20-a供試体および、圧縮側1列、引張側1列のC-20-a供試体を例に図-10に示す。主ひずみの大きさは鋼管の材料試験結果をもとに、その降伏ひずみで無次元化した。

図-10より、ティーフランジ板から遠い断面では、一般的な曲げ変形による主ひずみと主方向の分布が確認できる。一方、ティーフランジ板近傍の引張側断面では、供試体軸方向のひずみよりも、周方向のひずみが卓越している。これはボルト軸心と鋼管壁の偏心のために生じた鋼管壁の付加曲げにより部材軸方向のひずみが小さくなったため考えられる

5. 結論

本研究では、高力ボルト引張継手を用いた箱型断面部材の接合部を想定した供試体に対して、現実に近い組合せ荷重状態として、引張力、曲げ、そしてせん断力を載荷した実験を行い、引張力およびせん断力が、主として継手の曲げ強度と剛性に与える影響を検討した。以下に得られた主な成果と今後の課題をまとめる。

- (1)高力ボルト引張継手では、作用引張力が継手部の曲げ強度に与える影響が大きい。作用引張力をボルトの総導入軸力の20%から30%に増加させた場合、最大曲げモーメントは、総導入軸力の20%を引張力として作用させた場合に比べて、ボルト配置による違いは見られるものの約10%低下した。

- (2)一般的に、継手部の設計では少なくとも全強の75%を確保することが求められており、これに対して十分な本数のボルトを配置しなければならないことを考えると、高力ボルト引張継手では十分なせん断抵抗を有すると考えられる。また、本研究で想定したような引張と曲げが支配的な状態では、継手部の曲げ強度、曲げ剛性に与えるせん断力の影響は小さいことを確認した。
- (3)本研究では、載荷経路を変えて載荷実験を行ったが、本研究で想定したような引張力と曲げとが支配的な状態下ではその経路の違いによる曲げ強度や曲げ剛性の違いは見られなかった。
- (4)したがって、上記3項目から、引張力と曲げとが支配的な状態下では、せん断力による曲げ強度や曲げ剛性に与える影響は小さく、高力ボルト引張継手を箱断面継手に適用することは可能であると思われる。
- (5)本実験で用いた供試体では、継手面全体の平均の摩擦係数は、継手面に離間が発生しない場合を想定したすべり試験結果から0.48を確保していることを確認した。一方、継手部に部分的な離間が進行した状態を想定したすべり試験結果からは0.25~0.33という数値を得た。離間が進行するにしたがって、荷重伝達の不均一さなどによりすべり係数が低下していると考えられる。したがって、設計では離間が進行する前とその後の2つの状態を想定する必要があり、継手面の離間の進行過程と継手面の平均摩擦係数との関係を定量的に把握する必要がある。
- (6)本研究で用いた高力ボルトの軸力評価法は、ボルトヘッドに貼り付けたひずみゲージのひずみ値をもとにキャリブレーション結果をもとに換算する方法であった。しかしながら、トルクによる軸力導入の場合の初期ボルト軸力、および、曲げ変形が顕著な領域でのこの方法によるボルト軸力の評価には問題があることも示された。したがって、今後は、このような場合に対して有効な高力ボルト軸力の測定法および評価法を確立する必要がある。
- (7)今後は、設計に必要な継手部剛性の定量的な評価法、および初期ボルト導入軸力のばらつきが継手部剛性に与える影響などについて解析などにより明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) (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.
- 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，土木学会，pp.991-1000，1995.3.
- 3) 高橋昭一，橋 吉宏，志村 勉，森下弘行，伊藤博章，三木千壽：少数主桁橋の横桁取付構造に関する実験的検討，土木学会論文集，No.570/1-40，pp.107-118，1997.7.
- 4) 渡邊英一，杉浦邦征，山口隆司，諸岡 伸，斉藤 浩：多列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.
- 5) 諸岡 伸, 山口隆司, 杉浦邦征, 渡邊英一, 齊藤浩: 多列配置高力ボルト引張継手の高強度化に関する解析的検討, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, 日本鋼構造協会, pp.357-362, 1999.11.
- 6) 山本成昭, 西脇威夫, 増田陳紀, 白旗弘実, 川田延也: 1列配置と2列配置高力ボルト引張接合・短締め形式においてティーフランジ厚が終局継手強度とボルト継手の効率に及ぼす影響, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第1部(A), pp.396-397, 1999.9.
- 7) 鈴木康夫, 北田俊行, 山口隆司, 杉浦邦征, 秋山寿行: 高力ボルト片締め引張継手に与えるボルト配列の影響, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, 日本鋼構造協会, pp.461-468, 2000.11.
- 8) 山口隆司, 鈴木康夫, 北田俊行, 杉浦邦征, 秋山寿行: 高力ボルト引張継手を用いた箱型断面接合部の組合せ荷重下における力学的挙動, 構造工学論文集, Vol.47A, 土木学会, pp.103-112, 2001.3.
- 9) 日本建築学会: 高力ボルト接合設計施工指針, 丸善, 1993.3.
- 10) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 丸善, 1996.12.

(2002.1.15 受付)

EFFECT OF TENSILE FORCE AND SHEAR FORCE ON BENDING STRENGTH AND STIFFNESS OF HIGH STRENGTH BOLTED TENSILE JOINTS

Takashi YAMAGUCHI, Yasuo SUZUKI, Toshiyuki KITADA,
Kunitomo SUGIURA and Hisayuki AKIYAMA

High Strength bolted tensile joints are classified into both tension type joints and friction type joints because of the existence of compression force between two tee flange plates due to high bolt pre-stress force. That is, high strength bolted tensile joints subjected to shear force also work as the friction type joint. Most of the past studies concerning this type joint have been mainly investigated on the mechanical behavior subjected to only tensile force. Therefore, in order to apply this type of joints to actual connections of steel bridge members, the behavior under various combinations of axial force, bending moment and shearing force must be investigated. In this study, an experiment has been carried out for the specimens modeled as connections of box members subjected to tensile force, bending moment and shear force. And the effect of tensile force and shear force has been discussed.