

多列配置高力ボルト引張継手の力学的挙動

Mechanical Behavior of High Strength Bolted Tensile Joints with Multiple Bolt Lines

渡邊 英一^{*}, 杉浦 邦征^{**}, 山口 隆司^{***}, 諸岡 伸^{****}, 斉藤 浩^{*****}

Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, Takashi YAMAGUCHI, Shin MOROOKA and Hiroshi SAITOH

^{*}工博 Ph.D. 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)^{**}Ph.D. 京都大学大学院助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)^{***}博士 (工学) 大阪市立大学助手 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138)^{****}京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)^{*****}工修 住友金属工業(株) 建設・インフラ事業部 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

Investigated in this study is the mechanical behavior of high strength bolted tensile joints considering the number of connecting bolts in the row direction and their arrangement by the loading test on split tee joint models with multiple bolts. In particular, the load carrying capacity is discussed in detail from the viewpoint of load-separation relation and variation of bolt axial force. It is found that adding bolts in the row direction is effective to improve the load carrying capacity of the split tee joints. However, the results also show that there is a limitation of increase of load carrying capacity by adding bolts in the row direction, e.g., a third row bolt could not work effectively.

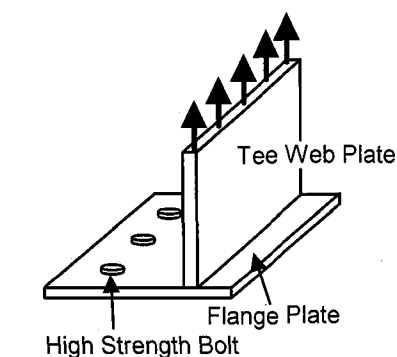
Key Words : high strength bolt, tensile joint, multiple bolt line, split tee joint

1. はじめに

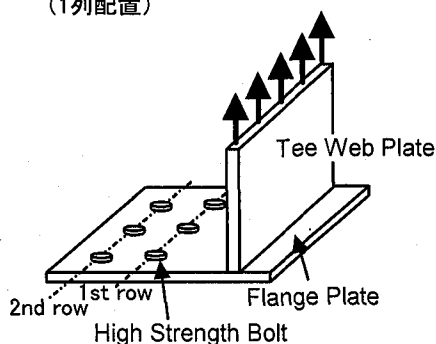
高力ボルト引張継手は、あらかじめ高力ボルトに導入する高い軸力を有効に利用した継手形式であり、接合部の剛性は非常に高く、変動荷重作用下においてもボルト軸力の変動がほとんどなく疲労耐久性に優れている。また、他の高力ボルト接合と同様に、溶接接合に比べて施工およびその管理が容易であり、施工性にも優れている。この引張接合の最も基本的なスプリットティー継手の構造例を図-1(a)に示す。

このような高力ボルト引張継手では、フランジ板が厚ければ反力が小さく、継手の終局強度がボルトの終局強度に支配されるようになり、ボルト1本あたりの伝達荷重は摩擦接合に比べて大きくなる。これは、ボルトの必要本数の減少を意味し、工場での孔あけ工程や施工時のボルト締め付け作業の減少をもたらす、橋梁接合部の合理化に大きく貢献できると考えられる。

このような点から、現在、この高力ボルト引張継手は、合理化橋梁である少数主桁橋梁の主桁・横桁接合部に積極的に使われるなどその適用範囲は拡大しつつある¹⁾。しかし、主部材の接合法として採用されるには至っていない。これは、一つには、引張接合の設計指針である「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針²⁾」が、ボルト1本が負担する荷



(a)JSSC指針案で規定されている配置例 (1列配置)



(b)JSSC指針案で規定されていない配置例 (多列配置(2列))

図-1 多列配置高力ボルト引張継手の例

重伝達効率³⁾という点から高力ボルトの1列配置しか認めておらず、使用可能な高力ボルトのボルト径（呼び径）には限界があり、継手としての耐荷力が不足するためと考えられる。特に、厚板少補剛を基本コンセプトとする合理化橋梁では、フランジ板厚が50mmを越える場合も想定され、そのような大断面では、伝達すべき断面力も大きく、図-1(a)のような1列配置では対応できない可能性がある。したがって、引張継手においても、図-1(b)に示すように耐荷力向上を目的として摩擦接合と同様に、列方向にも多くボルトを配置した継手形式を取り上げ、その伝達荷重や変形能に注目して力学的挙動を明らかにする必要がある。

このような観点から、本研究では高力ボルト引張継手の性能向上を目的とし、多列配置引張継手の力学的挙動を実験的に検討する。その際、最大耐力、ボルト軸力の変化、ボルト軸の曲げ変形、フランジ板の変形

に注目し、多列配置による継手性能の向上策の実用性を明らかにする。

2. 引張載荷試験

2.1 実験供試体

本研究では、高力ボルト引張継手の最も基本的な継手形式であるスプリットティー継手タイプを対象に、ボルト配置とボルト本数およびフランジ板厚を変化させた供試体、20体を準備した。供試体の形状を図-2に、ボルト配置などの構造寸法詳細を表-1に示す。供試体は、ボルトの配置パターンによりAシリーズからEシリーズの5種類に分類している。

基準供試体である1列配置スプリットティー継手のA-1は「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針²⁾」をもとに設計した。高力ボルトには、試験機の載荷能力を考慮してF10T(M12)を用いることとし、供試体の

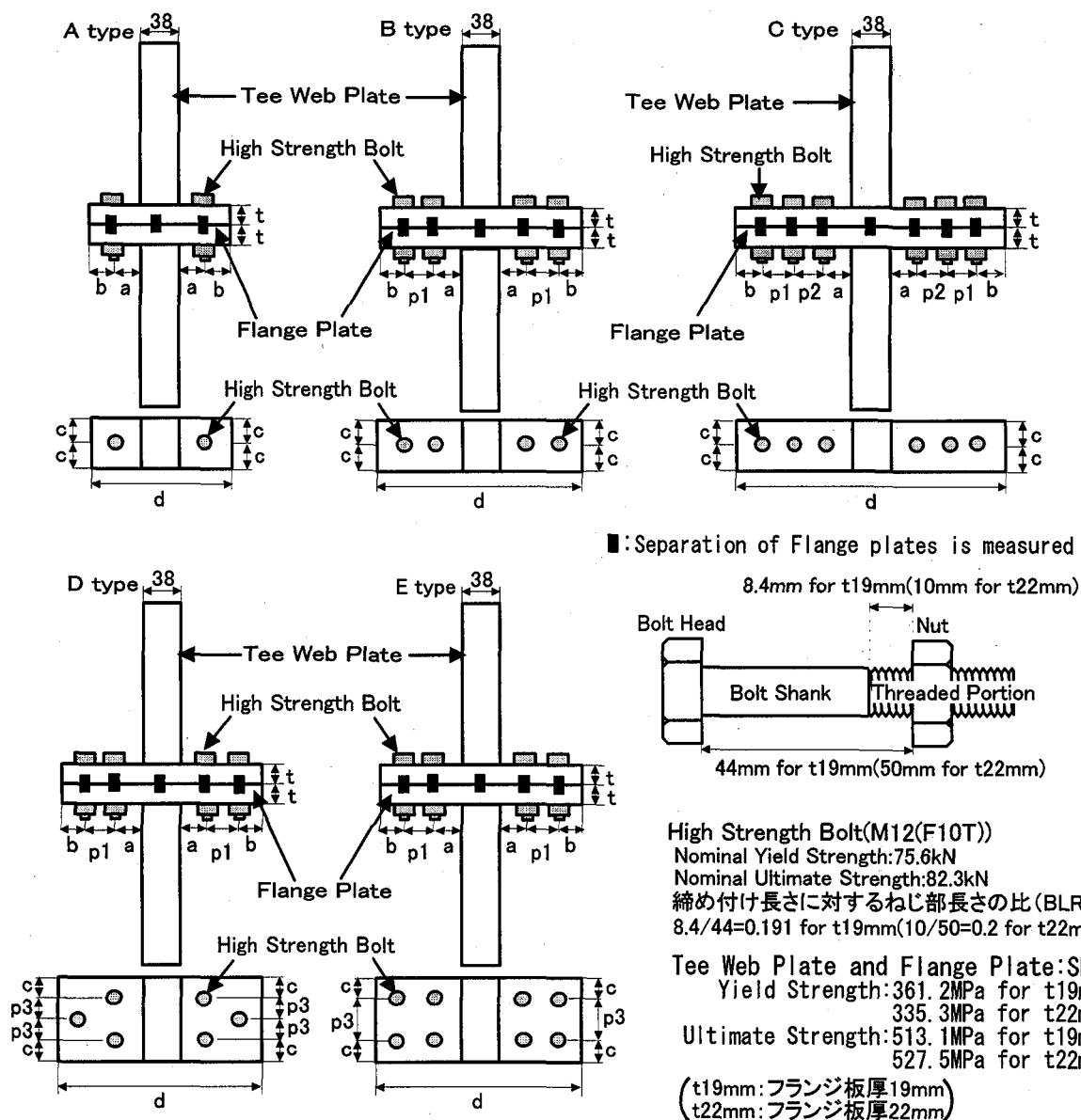


図-2 供試体の形状 (unit : mm)

表－１ 供試体形状

供試体	a	b	c	d	p1	p2	p3	t	R
A-1	25	25	22.5	138	—	—	—	19	0.069
A-2	25	25	22.5	138	—	—	—	22	0.001
A-3	30	25	22.5	148	—	—	—	19	0.221
A-4	25	20	22.5	128	—	—	—	19	0.057
A-5	25	25	27.0	138	—	—	—	19	0.050
B-1	25	25	22.5	203	32.5	—	—	19	—
B-2	25	25	22.5	203	32.5	—	—	22	—
B-3	25	25	22.5	216	39.0	—	—	19	—
B-4	25	25	22.5	216	39.0	—	—	22	—
C-1	25	25	22.5	268	32.5	32.5	—	19	—
C-2	25	25	22.5	268	32.5	32.5	—	22	—
C-3	25	25	22.5	294	39.0	39.0	—	19	—
C-4	25	25	22.5	253	25.0	32.5	—	19	—
D-1	25	25	22.5	203	32.5	—	21.5	19	—
D-2	25	25	22.5	203	32.5	—	21.5	22	—
D-3	25	25	22.5	203	32.5	—	26.0	19	—
D-4	25	25	22.5	216	39.0	—	26.0	19	—
E-1	25	25	22.5	203	32.5	—	43.0	19	—
E-2	25	25	22.5	203	32.5	—	52.0	19	—
E-3	25	25	22.5	216	39	—	52.0	19	—

R：最大ボルト軸力時のてこ反力係数 単位（mm）
a,b,c,d,p1,p2,p3,t の寸法記号は図 2 を参照

サイズについては高力ボルトに合わせて形状寸法を決定している。

フランジ板厚は、ボルトの引張強度を効率よく利用できるように、てこ反力の発生を抑えた 2 種類の板厚を設定し、基本板厚である 19mm と、その 15% 増しの 22mm を採用した。ティーウェブとフランジ板は、ウェブプレートに開先を取り、完全とけ込み溶接により一体化している。また、溶接によるフランジ板の角折れについても、設計指針²⁾にもとづき許容範囲内となるように製作している。なお、フランジ板の接触面については、塗装および表面処理などを行わず、グラインダー研磨を行い平坦性を保証している。フラ

ンジ板の材料特性は、19mm と 22mm の板それぞれに対して、降伏強度がそれぞれ 361.2MPa、335.3MPa であり、終局強度がそれぞれ 513.1MPa、527.5MPa である。

ボルト初期導入軸力に関しては、M12 に対する規定が土木構造物を対象とした設計基準に存在しないことから、建築構造物に対する高力ボルト接合設計施工指針⁴⁾の標準導入軸力である 61.3kN を準用した。

2.2 実験方法

本実験は、図－3 に示すように、1000kN 万能試験機を用いて引張荷重を載荷した。その際、供試体に偏心載荷が生じないように、ヒンジと球座を上下の治具取り付け部にそれぞれ設置した。

計測項目は引張荷重、フランジ板間の離間量、ボルト平行部の軸ひずみであり、これらを GP-IB を介したオンライン計測により計測した。ここで、フランジ板間の離間量は、亀裂開口変位を計るためのクリップ式変位計により計測した。ボルト軸力については、4 枚の 1 軸ひずみゲージを図－4 に示すようにボルト軸平行部に 90 度間隔に接着し、導入軸力は、これらのひずみ値の平均値をボルト軸力に換算している⁵⁾。なお、このひずみ値により、ボルト軸力をチェックしながらトルクレンチにより規定の軸力まで導入した。

3. 実験結果

3.1 接合部の終局状態

載荷実験の結果、すべての供試体において 1 列目の高力ボルトのナットとネジ部のかみ合い部近傍においてクラックが発生し破断した。フランジ板の変形については、基本シリーズである A タイプではフランジ板の残留変形は見られず、継手強度が高力ボルトの引

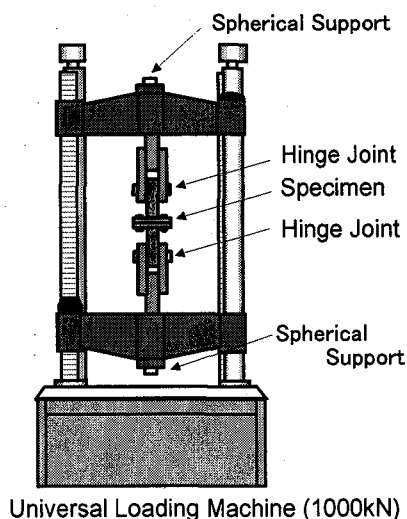


図-3 引張試験装置

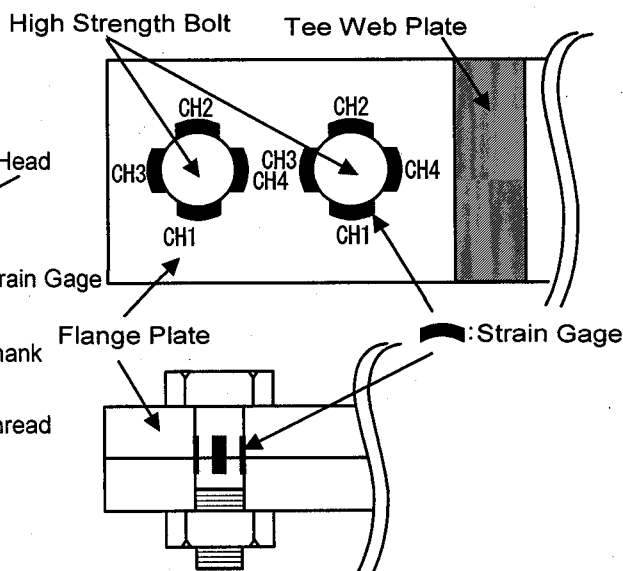


図-4 ひずみゲージ配置図

張強度に支配されるという設計時に想定した終局状態が得られている。一方、その他の供試体タイプでは若干のフランジ板の残留変形が認められた。

耐力の実験値と設計指針²⁾より計算した推定値をまとめて表-2に示す。この比較結果、設計指針に基づく設計は、高力ボルトが1列の引張継手に対して十分に妥当であることがわかる。

高力ボルトについては、載荷実験終了後の観察から、ネジ部でのクラック発生箇所付近において、くびれが認められ、ネジ部においてのみ顕著な伸び変形が生じていた。なお、亀裂の発生部位はすべてネジ底であった。

表-2 実験値と設計値の強度比較

供試体名	実験値 (A)kN	設計値 (B)kN	A/B
A-1	165.52	153.86	1.08
A-2	179.30	164.44	1.09
A-3	151.22	134.84	1.12
A-4	172.20	155.82	1.11
A-5	167.66	156.80	1.07

3.2 荷重-離間量関係

(1) 荷重-離間量 (ティーウェブ位置)

AタイプからEタイプ、すべての供試体の荷重-離間量関係を図-5に示す。縦軸は載荷荷重であり、横軸はティーウェブ直下の離間量の平均値である。

これらの荷重-離間量関係より、すべての供試体に

おいて、ある荷重レベルまでは離間がほとんど発生せず、剛性は高く、それ以後、離間が次第に発生していくという引張接合の特徴が現れている。このティーウェブ直下で離間を生じる荷重レベルは、基本シリーズであるAタイプで、ほぼ第1列目ボルト初期導入軸力の総和の約70%であり、ボルト列数を増やすことで、その荷重レベルが第1列目ボルトの総和に近くなることがわかる。しかしながら、そのティーウェブ直下で離間を生じる荷重レベルがボルト導入軸力の全ボルト数の総和にまで到達することはない。また、それぞれのシリーズにおいて、ボルト配置による違いは、ボルトの破断が継手の強度を支配するように供試体を設計しているために顕著な差異が見られなかった。

(2) 最大荷重

最大荷重と最大荷重時のティーウェブ直下での平均離間量の関係を図-6に示す。図6(a)には、絶対量をプロットし、図6(b)には無次元化荷重と無次元化離間量としてプロットした。なお、この無次元化には、フランジ板厚19mmの供試体に対してはA-1供試体の最大荷重と最大荷重時の離間量で、フランジ板厚22mmの供試体に対してはA-2供試体のそれらによって除して行った。また、最大荷重および、最大荷重時のティーウェブ直下での離間量、強度比、ボルト比強度を表-3に示す。表中の強度比は基準供試体(フランジ厚19mmに対してはA-1供試体、フランジ厚22mm

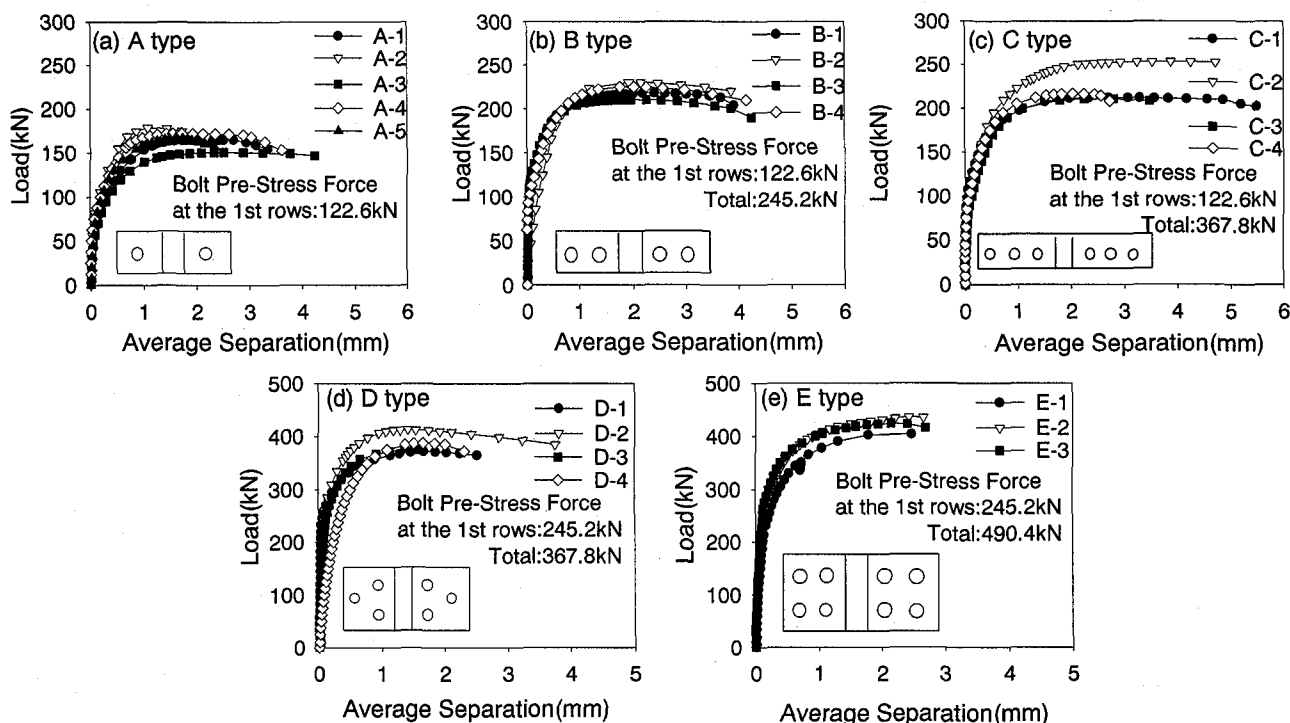
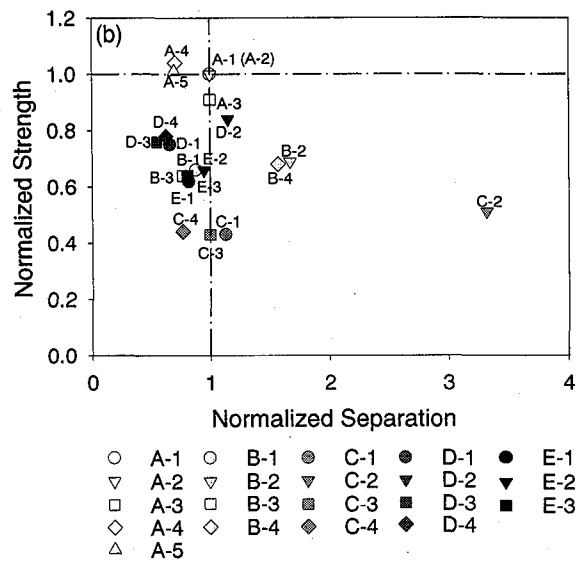
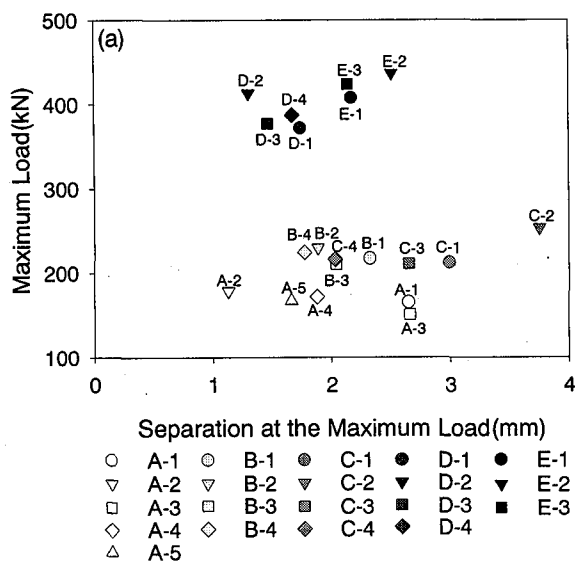


図-5 荷重-離間量曲線



図－6 最大荷重と最大荷重時離間量の関係

表－3 多列配置引張接合供試体の強度比較

供試体	最大荷重 (kN)	最大荷重時 離間量(mm)	強度 比	ボルト 比強度
A-1	165.52	2.65	1.0	1.0
A-2	179.30	1.13	1.0	1.08
A-3	151.22	2.66	0.91	0.91
A-4	172.20	1.88	1.04	1.04
A-5	167.66	1.85	1.01	1.01
B-1	217.60	2.32	1.31	0.66
B-2	230.15	1.89	1.28	0.69
B-3	210.40	2.04	1.27	0.64
B-4	224.75	1.77	1.25	0.68
C-1	212.15	2.99	1.28	0.43
C-2	253.30	3.75	1.41	0.51
C-3	211.15	2.65	1.28	0.43
C-4	216.45	2.03	1.31	0.44
D-1	371.85	1.74	2.25	0.75
D-2	414.40	1.30	2.31	0.84
D-3	377.45	1.46	2.28	0.76
D-4	387.40	1.67	2.34	0.78
E-1	407.65	2.17	2.46	0.62
E-2	436.65	2.51	2.64	0.66
E-3	423.95	2.14	2.56	0.64

に対しては A-2 供試体) の最大荷重に対するそれぞれの供試体の最大荷重の比を表している。ボルト比強度は最大荷重をボルトの総引張耐力 (ボルト 1 本の引張耐力にボルト本数を乗じたもの) で除したものであり、ボルトの強度をどれだけ有効に使っているのかを表す指標である。なお、ボルト 1 本の引張耐力は、JIS 規格⁹⁾に基づき最小引張強度である 82.3kN とした。

これらの比較より、フランジ板が厚いほど最大荷重は大きく、最大荷重時の離間は小さくなる傾向にある。ただし、C タイプでは他のタイプと異なり、フランジ板が厚いものほど最大荷重時の離間が大きくなって

いる (C-2 供試体)。また、A-1 供試体と A-3 供試体の比較より、ティーウェブと 1 列目ボルトの距離が短いほど最大荷重は大きくなっていることがわかる。これは設計指針²⁾より求めた、てこ反力係数の大小関係と整合している (表－1 参照)。

このように、ボルトを多列配置することで強度は増加する。しかし、その増加の度合い、すなわち強度比は、ボルト本数の増加の割合に比べてそれほど大きくなく、多列配置によるボルト本数の増加が、ある程度の本数までほぼ比例的に強度の増加となる、摩擦接合とは大きく異なっている。このことは、ボルト 1 本あたりの荷重伝達効率を表しているボルト比強度からも確認できる。ボルト比強度が最も高いものは、D-2 供試体の 0.84 で、最も低いものは、C-1 供試体の 0.43 である。C-1 供試体に関しては、最大荷重がボルト総引張耐力の半分にも満たない結果となっている。したがって、多列配置においては、第 1 列、第 2 列のボルト軸心間隔が大きい場合や、3 列目にボルトを配置することは有効でなく、2 列目のボルトの引張耐力を有効に利用するという点から、D 供試体のような千鳥配置が有効と考えられる。

B-1 供試体と B-3 供試体の比較から、ボルト中心間隔は、強度増加に大きな影響を及ぼすことはなかった。これは、供試体の設計において、継手部強度がボルトの強度にほぼ等しくなるように設計し、ボルト配置などの影響を受けにくいフランジ板厚を採用していることが関係していると思われる。しかし、ティーウェブからボルト 1 列目までの距離は、てこ反力係数と密接な関係にあり、ボルト 1 列目までの距離が大きい

場合 (A-3 供試体), てこ反力係数も同様に大きくなるので, 継手の最大荷重は小さくなる傾向にある。

また, ボルト配置において縁端距離に注目して, A-1 供試体と A-4 供試体を比較すると, 最大荷重は縁端距離が短い A-4 供試体の方が大きくなっている。縁端距離が短くなると, てこ反力係数は小さくなっており (A-1 : 0.069, A-4 : 0.057), ボルト軸力の増加が低く抑えられるためと考えられる。したがって, 縁端距離については, 現行の摩擦接合の規定を準用した縁端距離ではなく, 引張接合独自の規定を設けることにより, その性能を最大限に引き出すことが可能であると考えられる。

フランジ板幅方向 (奥行き) の行方向ボルト配置に関しては, 行方向のボルト間隔が広い E-2 供試体の方が E-1 供試体よりも強度および離間は大きくなっている。この E タイプ供試体と 1 行配置である B-1 供試体を比較すると, 行間隔が狭い E-1 供試体ではその強

度の比は 1.87 であり, 2.0 を下回っている。一方, 行間隔の広い E-2 供試体との比較では, その強度の比は, 2.0 となっている。したがって, 行間隔が狭くなると, その接合部強度は小さくなる傾向にあることがわかる。これは, ボルト行間隔が狭いために材間圧縮力の及ぶ範囲が重なり合うので, 継手間の材間圧縮力を効率よく利用できないことによると考えられる。また, フランジ板幅の大小による板の曲げ耐力の差異によるものとも考えられる。したがって, ボルト行間隔に関しても, フランジ板の有効幅を明確にし, 引張接合独自の行間隔について詳細に検討する必要があると考えられる。

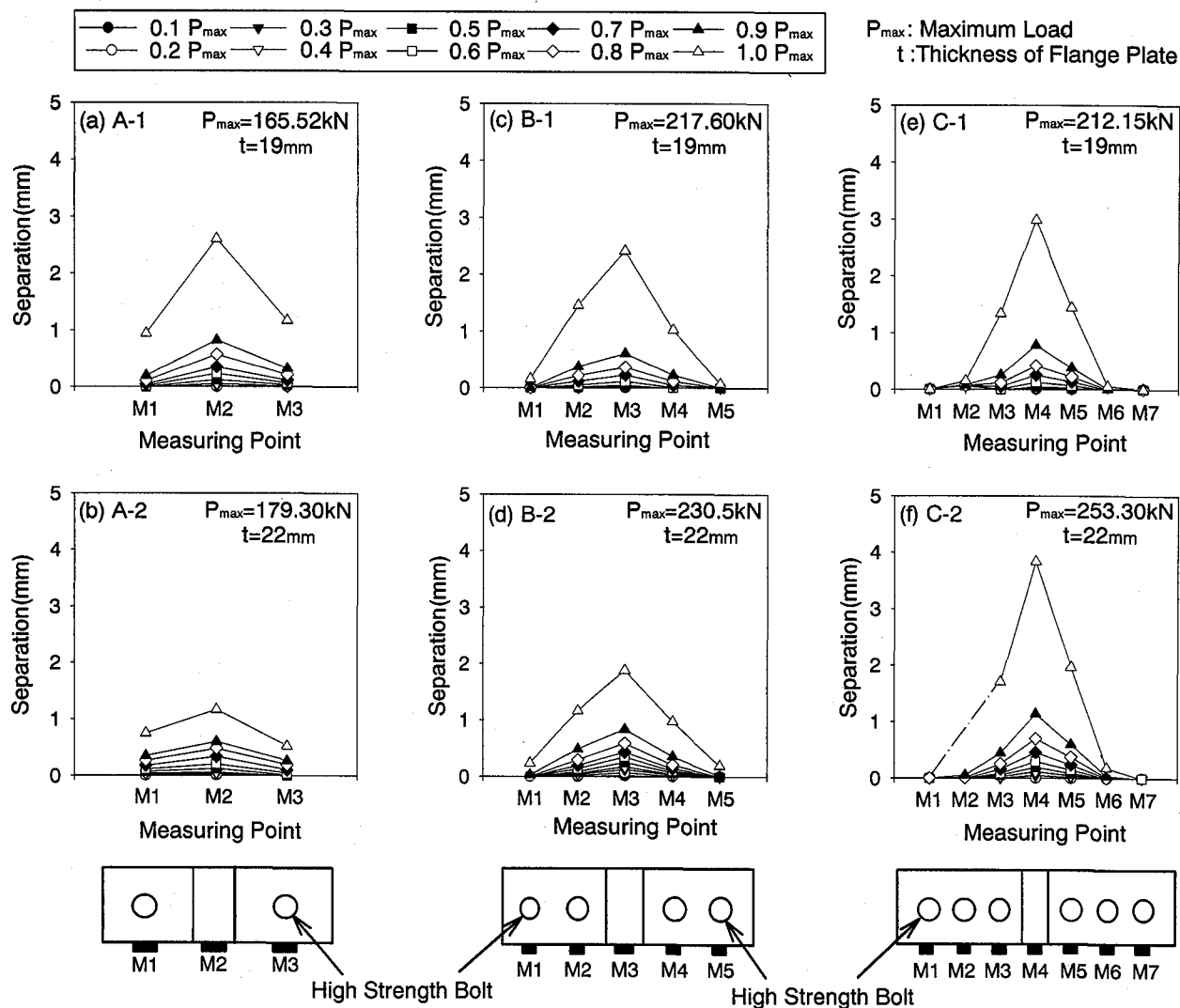


図-7 フランジ板の変形挙動

3.3 フランジ板の変形挙動

フランジ板の変形挙動を A タイプ, B タイプ, C タイプのボルト基本配置の供試体を例に図-7に示す。横軸は計測点を, 縦軸は各荷重段階でのフランジ板の離間量を表している。荷重段階としては, 各供試体の最大荷重までを 10 分割し, 各荷重段階ごとに離間量をプロットした。

載荷初期段階では, いずれの計測点においてもフラ

ンジ板の変形はほとんど発生しておらず, 剛性が高いという引張継手の特徴が現れているといえる。また, フランジ板の変形は, ティーウェブを中心に対称に進行しているのがわかる。しかしながら, 同時に, ボルト位置での離間量は若干の非対称性を示していることもわかる。この原因としては, 供試体の初期不整, 導入ボルト軸力のばらつき, ボルト自身が有する材料特性のばらつき, 接触面の密着状態の差異, 載荷時具に

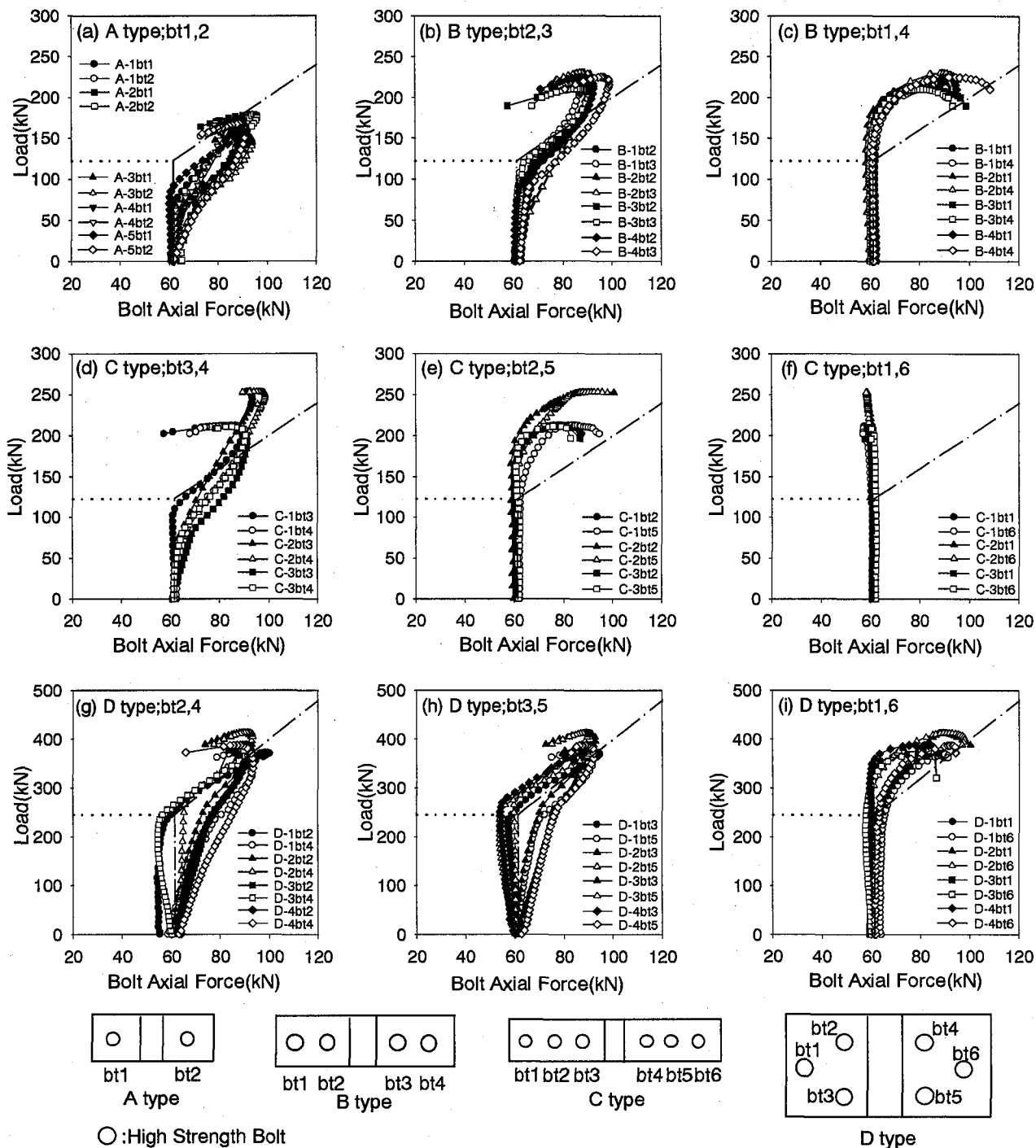


図-8 荷重-ボルト軸力曲線

表－４ 第１列目ボルト位置での離間荷重

供試体	離間開始荷重 (kN)	離間発生 位置
A-1	70.05	bt2
A-2	70.59	bt1
A-3	77.52	bt2
A-4	95.04	bt1
A-5	87.58	bt2
B-1	147.56	bt2
B-2	120.19	bt2
B-3	157.69	bt2
B-4	152.98	bt3
C-1	140.05	bt4
C-2	125.13	bt4
C-3	145.30	bt3
C-4	147.58	bt1
D-1	295.00	bt4or5
D-2	270.20	bt2or3
D-3	272.55	bt2or3
D-4	280.15	bt4or5
E-1	317.65	bt5
E-2	342.55	bt3
E-3	312.40	bt3

*bt1～6 の各記号は図 8 を参照

よる偏心引張などの要因が考えられる。

3.4 荷重－ボルト軸力関係

荷重－ボルト軸力関係を A タイプ、B タイプ、C タイプ、D タイプの各供試体を例に図－8 に示す。縦軸は載荷荷重であり、横軸はボルト軸力である。図中には、初期ボルト導入軸力の総和とフランジ板を剛とした場合のボルト軸力の変化を、点線と一点鎖線でそれぞれ表している。また、ティーウェブに最も近いボルト位置でフランジ板が離間した時の荷重を表－4 にまとめて示す。

すべての供試体において、ある荷重レベルまではボルト軸力が維持されており、作用荷重の増加に対してボルト軸力は変動しないというボルト導入軸力の効果が確認できる。ボルト軸力が増加し始める荷重レベルについては、A タイプでは、ボルト位置での離間荷重とほぼ同じであり、それ以外のタイプでは、第 1 列目ボルト位置での離間が生じる前にボルト軸力が増加していることが確認できる。これは、てこ反力によるボルト軸力の増加の影響によるものと考えられる。

多列配置供試体である、B、C、D タイプに着目すると、荷重増加に伴い 1 列目ボルトの軸力が増大し、その後、ボルトの最大耐力に到達する前後で次第に 2 列目ボルトの軸力が増加していることがわかる。また、最大荷重時のボルト軸力に着目すると、例えば B-1 供試体の場合、1 列目ボルト軸力 86.2kN、2 列目ボルト軸力 88.4kN となる。このように、2 列目ボルトも荷重伝達に寄与し、強度の増大に貢献していることがわ

かる。しかし、C タイプ供試体の場合、3 列目ボルトの軸力はほとんど変動しておらず (C-1 供試体では最大荷重時の 3 列目ボルト軸力 58.0kN)、これより、3 列目ボルトは、直接的にほとんど荷重伝達に寄与していないことがわかる。また、ティーウェブに最も近い 1 列目ボルトは、最大荷重以後、軸力が大きく減少しているが、これはネジ部での伸びが顕著になり、ボルトの最大引張強度に達した後、破断までの耐力低下によるものと考えられる。

フランジ板厚に関しては、フランジ板が厚いものほどボルト軸力が早く増加する傾向が見られる。これは、締め付け長さに占めるボルトのネジ部長さが 22mm の場合の方が大きいことが関係していると推定される。

一方、ボルト配置に関しては、ボルト軸心間隔が大きいものほど、てこ反力の発生により、軸力が早期に増大するため、多列配置引張接合のボルト軸心間隔の設定は施工限界内で最小値を取ることが望ましいと考えられる。

3.5 ボルト軸平行部の曲げひずみ

ボルト軸平行部の曲げひずみの変化を、A-2、B-2、C-2、D-2、E-1 供試体を例に図－9 に示す。横軸は CH3 と CH4 のひずみの差で、曲げひずみの増加を表している。つまり、ティーウェブを挟んで両側に配置されているボルトが外側に曲げられていく様子をプロットしたものである (記号 be.)。また、図中には軸平行部の伸び変形もあわせて示すために CH1 と CH2 ひずみの和の変化もプロットしている (記号 el.)。なお、CH1,2,3,4 のひずみゲージの配置は既に図－4 に示している。

多列配置継手タイプでは、荷重の増加に伴い、ティーウェブに近い 1 列目ボルトからその外側の 2 列目ボルトへと、順にボルトに曲げ変形が発生していることが確認できる。しかし、3 列配置である C-2 供試体では、3 列目ボルトの曲げひずみはほとんど発生していない。したがって、3.4 で示したボルト軸力の挙動も含めて 3 列目のボルトが直接荷重伝達にほとんど貢献していないことがわかる。

また、D タイプを除く、すべての供試体では、曲げひずみと引張ひずみがほぼ同時に発生している。つまり、曲げひずみと伸びひずみの関係から、ボルト軸平行部は曲げ引張状態にあることがわかる。一方、D タイプ供試体では、引張ひずみの発生が先行し、その後、曲げひずみが発生している。

B-2 供試体および C-2 供試体の 1 列目ボルトの曲げひずみ発生荷重レベルを比較すると、B-2 供試体は C-2 供試体に比べ、初期段階から曲げひずみが発生している。これは、3.2 の荷重－離間量関係、3.3 のフランジ板の変形挙動、3.4 の荷重－ボルト軸力関係と同

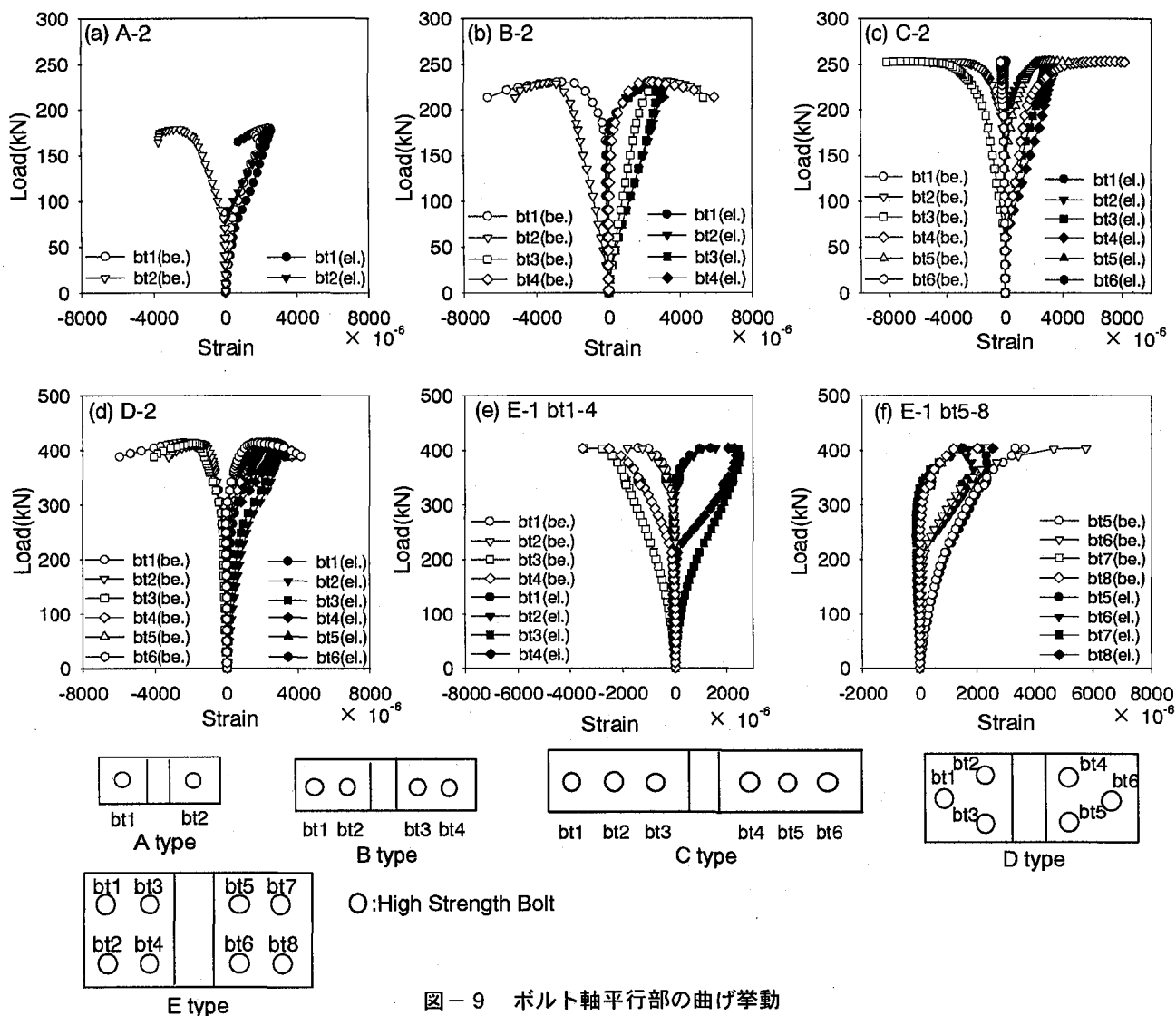


図-9 ボルト軸平行部の曲げ挙動

様に、板厚が大きい供試体は载荷初期段階での剛性が低い傾向にある場合があり、今後の検討が必要である。D-2 供試体では他の B タイプ、C タイプの多列配置に比べ、曲げひずみが発生する荷重が大きくなっている。したがって、2 列配置における曲げひずみの発生は、ボルト配列を千鳥配置にすることで、ボルト行方向の軸心間隔が小さくなり、その発生する荷重レベルを増加させることができる。

3.6 多列配置の効果に関する検討

多列配置高力ボルト引張接合の実験結果を総合的に判断すると、実用化に際して次のような解決すべき課題が考えられる。

(1) 引張接合独自のボルト配置

高力ボルト引張接合は、摩擦接合とその荷重伝達のしくみが異なっており、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針²⁾のように摩擦接合の規定を準用した場合、引張接合の性能を最大限に活用することはできない。特に、载荷実験結果から、縁端距離と行方向の軸心間隔

がその力学的挙動に大きく影響し、縁端距離はなるべく短く、行方向間隔については、材間圧縮力の広がり を考慮する必要があることがわかった。したがって、これらを考慮した引張接合独自の規定をパラメトリック解析などの結果をもとに検討する必要がある。

(2) 強度増加を目的とした高変形能高力ボルトの適用

高力ボルトの多列化による強度増加は約 30%前後と小さい値にとどまっている。これは、主として高力ボルトの変形能の不足が大きく関係していると考えられる。つまり、荷重の伝達は、ティーウェブ近傍の 1 列目高力ボルトがネジ部において早期に塑性化し、伸びることで、荷重が外側のボルトへ伝達される。しかし、ボルトのネジ底において亀裂が発生し、十分な荷重再配分が行われる前に 1 列目ボルトが破断してしまうために、外側の高力ボルトの荷重伝達への寄与が低く抑えられているからだと推察される。

したがって、高力ボルトの変形能を増せば、より外側の高力ボルトにも荷重伝達が効率的に行われ、強度

の増加が期待できるのではないかと考えられる。著者らは既に、軸平行部を細くした高変形ボルトに対して、その変形性能と引張継手の変形能改善への効果を解析するとともに⁷⁾、引張実験によりその変形性能を検討している⁸⁾。したがって、今後はこの高変形能ボルトを多列配置引張接合に適用し、その強度増加に及ぼす影響などを検討し、多列配置引張接合の実用化に向けて検討する必要がある。

4. 結論および今後の課題

本研究では、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針に規定されない多列配置高力ボルト引張継手の力学的挙動を、単調引張載荷実験によって詳細に検討した。また、高力ボルトに要求される性能、およびボルト配置に注目し、多列配置引張接合実用化に対する今後の課題について検討した。以下に得られた内容を述べる。

- 1) フランジ板を厚くすることで、ボルトの引張強度が支配的となる継手強度が発揮でき、高強度である高力ボルトの強度特性を十分に生かしたものとなる。
- 2) 高力ボルトを多列配置にすることで、引張継手の強度は増大する。しかし、最小ボルト間隔でボルトを配置した場合、その強度は、板厚 22mm のケースで、2 列配置で約 1.3 倍、3 列配置で約 1.4 倍となり、ボルト比強度という点からは、その強度増大の効果はそれほど大きいものではない。
- 3) 高力ボルトを多列配置とすることで、離間の少ない剛性の高い継手とすることができる。ただし、ボルト軸力の変化およびフランジ板間の離間量特性については、フランジ板厚や、高力ボルトの締め付け長さに占めるネジ部長さの影響を受ける。
- 4) ボルト軸力の変化、およびボルトの曲げ変形の性状から判断すると、2 列配置までが効果的であり、3 列目にボルトを配置する効果は非常に小さい。

- 5) 多列配置の引張継手を実用化するには、高力ボルトの伸び性能を改善することも不可欠である。したがって、高い変形性能を有する高力ボルト、例えば軟鋼ボルトや軸平行部を細くしたボルトを内側のボルトに用いることで強度の増加が期待できると考えられる。今後、載荷実験、およびパラメトリックな有限要素解析などにより検討する必要がある。

(参考文献)

- 1) 高橋昭一、橘吉宏、志村勉、小西哲司：PC 床版 2 主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討、橋梁と基礎、No.2, Vol.30, pp.23-30, 1996.
- 2) (社) 日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針, 1993.
- 3) (社) 日本鋼構造協会：高力ボルト引張接合実験報告, JSSC, Vol.8, No. 74, pp.17-37, 1972.
- 4) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針, 丸善, 1993.
- 5) 黒田充紀、広橋渉、増田陳紀：2 種類のボルト軸部ひずみ測定法の妥当性について、土木学会論文集, No.441/I-18, pp.193-198, 1992.1.
- 6) 日本規格協会：JISB1186-1979 摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット, 1979.
- 7) 藤谷健二、渡邊英一、杉浦邦征、山口隆司：高変形能ボルトの提案とその引張継手への適用、鋼構造年次論文報告集、日本鋼構造協会、第 5 巻, pp.459-464, 1997.11.
- 8) 諸岡 伸、渡邊英一、杉浦邦征、山口隆司、斉藤 浩：軸平行部径が細い高力ボルトの力学的挙動、鋼構造年次論文報告集、日本鋼構造協会、第 6 巻, pp.9-16, 1998.11.

(1998 年 9 月 18 日受付)