

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

Mechanical Behavior on High Strength Bolted Tensile Joints of Box Cross Sections subjected to Tension and Bending

山口 隆司*, 鈴木 康夫**, 北田 俊行***, 杉浦 邦征****, 秋山 寿行*****

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

*博士(工学) 大阪市立大学講師 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻前期博士課程 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

***工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

****Ph.D. 京都大学大学院助教授 工学研究科土木系専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*****博士(工学) 駒井鉄工(株) 橋梁設計部 (〒555-0041 大阪市西淀川区中島 2-5-1)

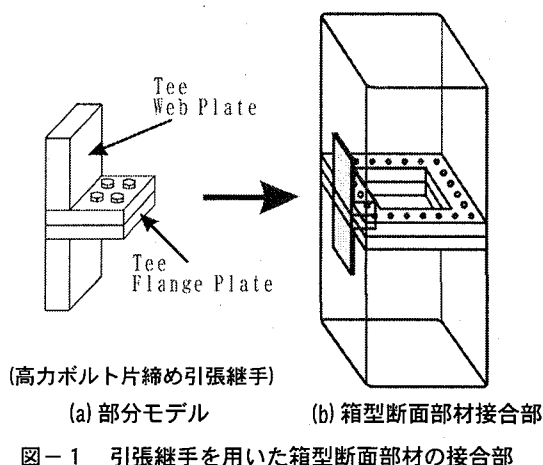
Most of the past studies on high strength bolted tensile joints have dealt with parts of connections, such as split tee joints subjected to only tension, due to simplicity. However, in order to apply these joints to bridge structures, the mechanical behavior of overall connections under actual loading state must be made clear. In this study, therefore, paying attentions to the mechanical behavior of joints subjected to combined load, that is, both bending and tension simultaneously, the loading tests for the connections using this type of joints for box cross sections are carried out. Based on the experimental results, the mechanical behavior considering geometrical configurations, especially, bolt arrangements and its applicability to the connections of bridge structural members are discussed in detail.

Key Words : high strength bolted tensile joint, box cross section, combined load, bolt arrangements

キーワード : 高力ボルト引張継手, 箱型断面, 組合せ荷重, ボルト配置

1. はじめに

高力ボルト引張継手は、溶接接合と比較して、経済性および施工性といった点において優れ、最近では、吊橋主塔の接合部、少数主桁橋梁の主桁と横桁との接合部に用いられるなど、その適用例^{1),2)}が増えつつある。しかし、そのほとんどは、圧縮力が卓越している部材の接合部や、二次部材の接合部もしくは仮設用部材の接合部であり、本研究で対象とした引張継手（短締め形式）は一次部材の接合法として積極的に採用されていないのが現状である。これは、橋梁構造物を対象とした高力ボルト引張継手の設計基準である「橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)³⁾（以下、JSSC 指針(案)と言う）」において、①高力ボルトの複数列配置に関する規定がなく、一次部材の接合法としては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



ていないことなどがその原因と考えられる。

このような点を踏まえ、高力ボルトの複数列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、載荷実験を中心に基礎的な研究^{4)~7)}が行われている。これらの研究では、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（両締め継手形式^{4)~6)}および片締め継手形式⁷⁾を対象に、基礎的研究という位置付けから、継手全体ではなく構成部分要素を対象としている。そして、高力ボルトの複数列配置による継手部耐力の増大効果が確認されている。

したがって、今後は、この種の継手を橋梁構造物の一次部材の接合法の一つとするために、実構造物に近い継手モデルに対して、しかも実際に近い荷重状態でその力学的挙動を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、図-1に示すような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を想定し、代表的な組合せ荷重である引張と曲げとを同時に載荷し、その力学的挙動を実験的に検討した。

2. 実験供試体と実験方法

2.1 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、ボルト配置パターンとフランジ板厚をパラメータに、冷間成形角形鋼管（材質：STKC490）を用いて7体製作した。供試体名の最初の英字はボルトの配置パターンを、次に続く数字はフランジ板厚（単位：mm）を表している。

A-34 と A-34w との比較から、引張側第1列目に配置した高変形能ボルトの効果を検討する。A-34 と A-22、A-34 と B-34、および A-34 と D-34 とをそれぞれ比較することにより、フランジの厚板化による効果、圧縮側第2列目に配置されたボルトの効果、引張側第2列目のボルトの効果、などについてそれぞれ検討する。また、A-34 と E-34 との比較により、ボルト軸心の行方向間隔による影響を検討する。供試体間の比較検討項目を表-1にまとめる。

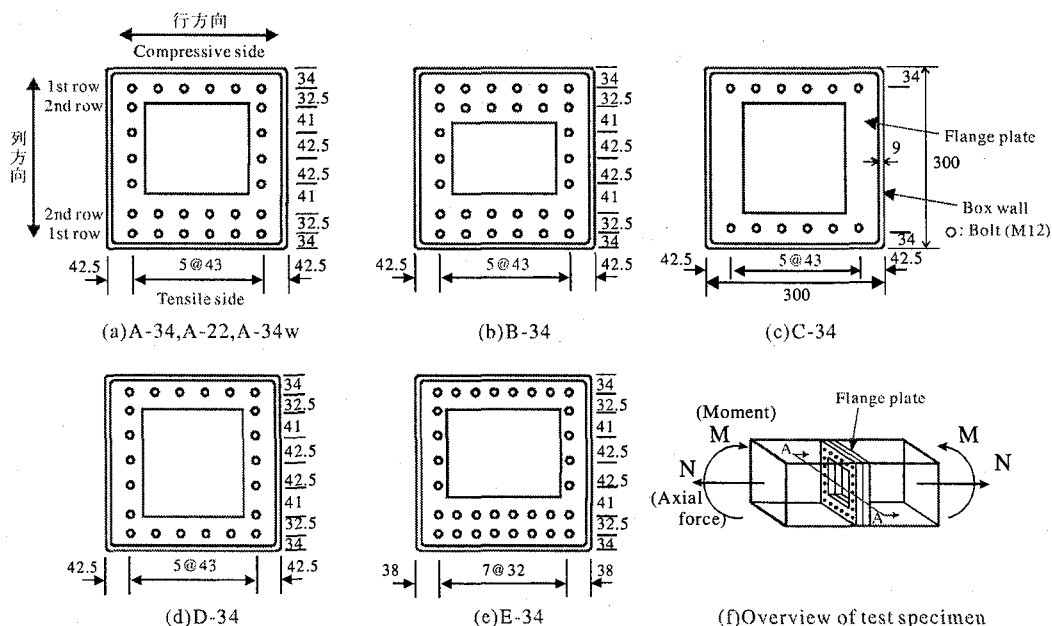


図-2 供試体の継手断面形状（A-A断面）（単位：mm）

表-1 供試体間の比較項目

供試体名	フランジ板厚 (mm)	比較項目					
		高変形能ボルトの効果	フランジ板厚の影響	圧縮側2列目ボルトの効果	引張側2列目ボルトの効果	腹板側ボルトの効果	行方向ボルト間隔の影響
A-34	34	○	○	○	○		○
A-34w*	34	○					
A-22	22		○				
B-34	34			○			
C-34	34					○	
D-34	34				○	○	
E-34	34						○

*供試体A-34wの引張側1列目には、高変形能高力ボルトを使用する。

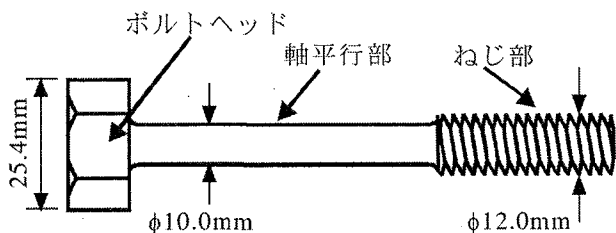


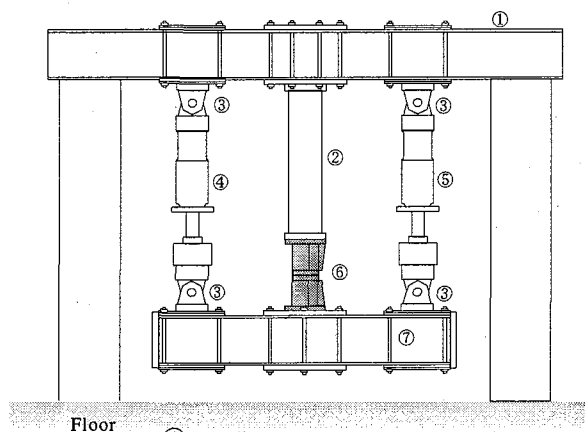
図-3 実験に用いた高変形能ボルト

表-2 実験に用いた鋼材の機械的性質

材質	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比
SM490Y(22mm)	354.2	530.2	2.09×10^5	0.293
SM490Y(34mm)	341.5	524.1	2.07×10^5	0.288
STKC490	526.4	600.6	1.94×10^5	0.296

表-3 実験に用いたボルトの機械的性質

呼び径 (M12)	首下長 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏軸力 (kN)	引張耐力 (kN)
通常ボルト	70	1034	1136	87.2	94.6
	95	1086	1139	91.5	95.3
高変形能 ボルト	95	1086	1139	85.3	89.4



- ① Loading Frame
- ② Non-destructive member
- ③ Hinge Joint
- ④ Vertical Actuator I
- ⑤ Vertical Actuator II
- ⑥ Test Specimen
- ⑦ Loading Beam

図-4 載荷装置

なお、使用した鋼材およびボルトの機械的性質を表-2 および表-3 に示す。

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状態と定義し、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。フランジ板厚は、JSSC 指針(案)によりこの反力係数がほぼ零に近いと算出される板厚とした。すなわち、フランジ板厚 22mm は、1 列目ボルトのみを有効として算出した場合であり、板厚 34mm は 2 列目ボルトのみを有効として算出した場合である。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、さらにボルト本数を増やすことを目的に、JSSC 指針(案)に規定されている最小軸心間隔よりも狭い 32mm の 2 種類とした。なお、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。

供試体の製作に関して、鋼管と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。

使用ボルトは、首下長さの長い 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以上と確認した後、F10T 高力ボルトの代用として用いた。

また、文献 5), 7), 8)および 9)の研究成果を踏まえ、引張側第 1 列目には、継手部の高強度化・高変形能化を期待して、図-3 に示すような軸平行部を細くしたボルト（以下、高変形能ボルトと言う）を使用した供試体、A-34w も設定した。なお、首下部の軸平行部径は文献 8), 9)において示された最適径(10.0mm)と同一にしている。

なお、ボルトの導入軸力は、M12 に対する規定が JSSC 指針(案)には存在しないため、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¹⁰⁾を参照し、その標準導入軸力(61.3kN)を導入した。高変形能ボルトに対しては、道路橋示方書鋼橋編 2.2.3¹¹⁾に述べられている摩擦接合用高力ボルトの標準導入軸力の算出式に従い、公称降伏軸力の 75%である 51.6kN をその導入軸力とした。なお、有効断面積は軸平行部の断面積と仮定した。

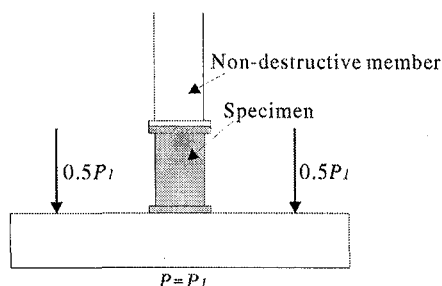
ボルトの締付は、現場での施工を想定し、トルクレンチによる締付を行った。

2.2 実験方法

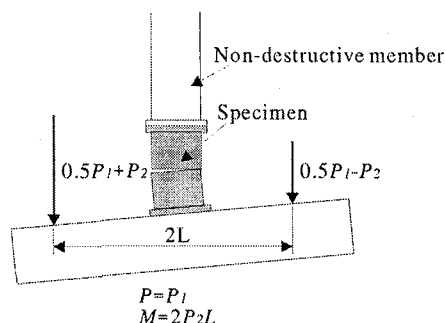
用いた載荷装置の概要を図-4 に示す。載荷は、2 機のアクチュエータを用いて、引張荷重載荷と曲げモーメント載荷を二段階に分けて行った。載荷手順を図-5 に示す。第一段階では、2 機のアクチュエータの荷重を等しく増加させるよう制御することで引張荷重のみを載荷する。第二段階では、アクチュエータ I の荷重を増加させ、それと同時に等しい速度で、アクチュエータ II の荷重を減少させる。これにより、第一段階で載荷された引張荷重(一定)に加え、曲げ荷重が載荷されることになる。

第一段階で導入した引張荷重は、ボルトの総導入軸力の 20%とし、試験機の能力を考慮した上で、継手に最も不利な載荷状態となるよう決定した。また、曲げ荷重は継手部が破断に至るまで単調に増加させた。

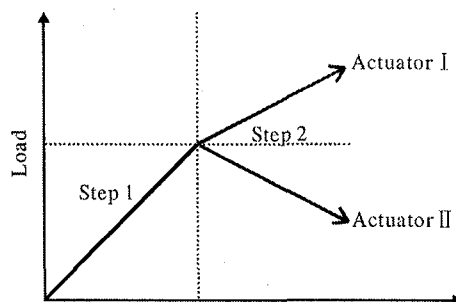
計測項目は、載荷荷重、鋼管壁(表面)のひずみ、ボルト軸力、およびフランジ板間の離間量とし、GP-IB を介したコンピュータオンライン計測により、これらを計測した。フランジ板間の離間量の測定には、亀裂開口変位を測定するためのクリップ式変位計(株式会社東京測器研究所 RA-5 型)を用いた。離間量および鋼管のひずみ測定



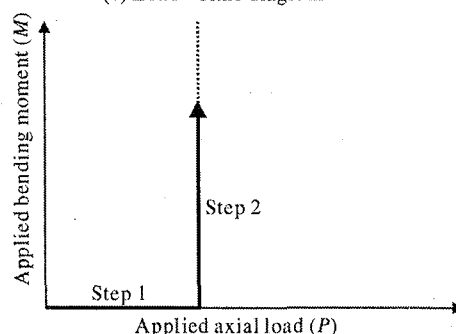
(a) Step 1 (Applying axial load)



(b) Step 2 (Applying bending moment)

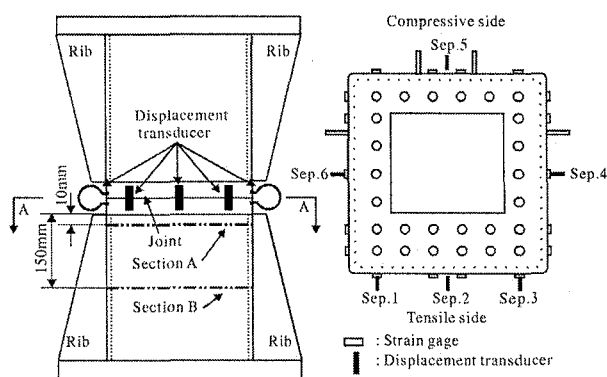


(c) Load - Time diagram



(d) Moment - Axial load diagram

図-5 荷重順序



(a) 測定位置 (b) 断面 A-A

図-6 離間量および鋼管壁ひずみの測定位置

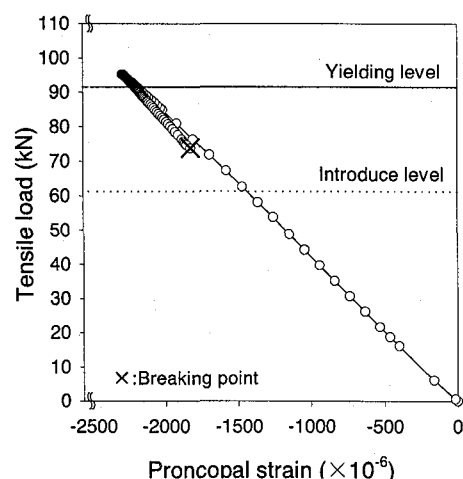


図-7 ボルトキャリブレーション結果の例

位置を図-6に示す。なお、図中の Section A および Section B は、鋼管壁とフランジ板との溶接線から、それぞれ 10mm および 150mm 離れた断面を表している。ボルト軸力は、ボルトヘッドに貼り付けた 3 軸ひずみゲージにより主ひずみを測定し、実験前にあらかじめ行ったキャリブレーション結果により換算した。キャリブレーション結果の一例を図-7 に示す。図より、破断に至るまでボルト軸力とボルトヘッド部の主ひずみとは線形関係にあり、ボルトヘッド部は弾性範囲にあると考えられ、本測定法によるボルト軸力の評価は可能であると考えられる。

3. 実験結果、および考察

3.1 終局状態

すべての供試体は、ボルトが破断し、終局状態に至っ

た。ボルトの破断部位については、A-34w の引張側 1 列目に使用した高変形能ボルトが軸平行部にて破断し、それ以外の通常の形状を有するボルトはねじ部とナット部との噛合い部付近のねじ谷より破断していた。特に、高変形能ボルトでは、軸平行部に顕著な伸び変形が認められ、ボルト特有の脆性的な破壊モードではなく、延性的な破壊モードであったと考えられる。破断したボルトの状況を写真 1 に示す。

一方、実験終了後の残留変形は、フランジ板の薄い供試体 A-22、および最もボルトを密に配置した供試体 E-34 のフランジ板に若干見られたが、その他の供試体には認められなかった。また、鋼管壁には、どの供試体も局部座屈などの残留変形は見られなかった。

3.2 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と曲率との関係

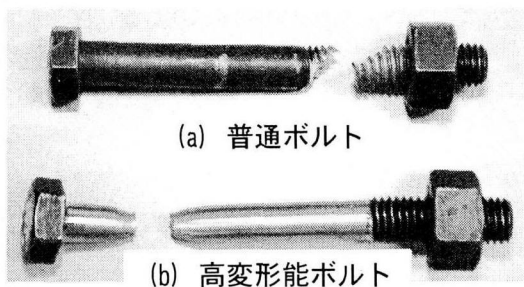


写真1 ボルトの破断状況

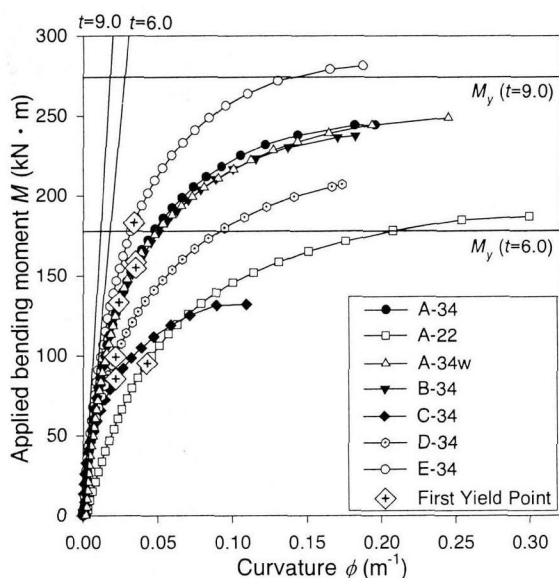


図-8 曲げモーメントー曲率曲線

表-4 曲げモーメントー離間量

供試体名	最大曲げモーメント時		ボルト降伏時	
	M(kN・m)	離間量 δ(mm)	M(kN・m)	離間量 δ(mm)
A-34	244.2	3.93	133.2	0.45
A-34w	248.8	4.93	159.1	0.66
A-22	187.3	3.61	95.4	0.52
B-34	237.5	3.68	155.1	0.70
C-34	132.3	2.19	85.6	0.42
D-34	207.2	3.44	99.2	0.40
E-34	281.1	3.79	183.2	0.68

を図-8 に、最大曲げモーメントといずれかのボルトが降伏軸力に達した時の曲げモーメント（以下、降伏曲げモーメントと言う）、および、その時の引張側最外縁における平均離間量を表-4 に、それぞれ示す。図の縦軸は曲げモーメント M を、横軸は2枚のフランジ板における平均曲率 ϕ を表している。

図中には、いずれかのボルトが降伏に至った時を継手部の降伏と定義した降伏曲げモーメント（凡例；First Yield Point）も示した。また、比較のために実験で導入した最大の引張力(392kN)を作用させた時の鋼管部材(STKC490)の公称降伏曲げモーメントおよび初期曲げ剛性を、その肉厚が6mmと9mmの2つの場合に対して示している。なお、ボルトの降伏軸力は、既に表-3 に示した。

平均曲率 ϕ は式(1)により定義し、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。

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

ここに、

ϕ : 2枚のフランジ板における平均曲率

δ_t : 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 : フランジ板厚

D : 鋼管径

$M-\phi$ 曲線の形状の比較から、フランジ板が厚い供試体および引張側にボルトが多く配置された供試体ほど、剛性および最大強度が高くなっていることがわかる。また、引張側1列目に高変形能ボルトを配置した供試体 A-34w では、配置しなかった供試体 A-34 に比べて、最大強度は低下せず、最大荷重時の曲率が大きくなっている。このことから、高変形能ボルトを用いることで、高力ボルト特有の脆性的な破壊モードを有する継手から延性的な破壊モードを有する継手部への移行が可能であることがわかる。

次に、本継手の実構造物への適用性を検討するために、肉厚 6mm の鋼管部材の接合部を想定し、曲げモーメントー平均曲率関係に注目した。その結果、フランジ板が薄い供試体 A-22 および腹板側にボルトが配置されていない供試体 C-34 は、想定した鋼管部材の公称降伏曲げモーメントを大きく下回っている。さらに、供試体 A-22 および供試体 C-34 は、継手部剛性に関しても、想定した鋼管部材の曲げ剛性を下回っている。一方、引張側にボルトを2列配置した供試体およびボルトを密に配置した供試体の継手部初期剛性は、想定した鋼管部材の曲げ剛性にほぼ相当する剛性を確保できていることがわかる。これは、ボルトの初期導入軸力に起因するフランジ板の材間圧縮力により、継手部の離間が低く抑えられているためと考えられる。したがって、フランジの厚板化、ボルトの腹板側への配置、および引張側でのボルトの2列配置により、トラス橋における斜材などの実橋構造部材の継手への本継手形式の適用は可能であると考えられる。

3.3 鋼管壁のひずみ分布

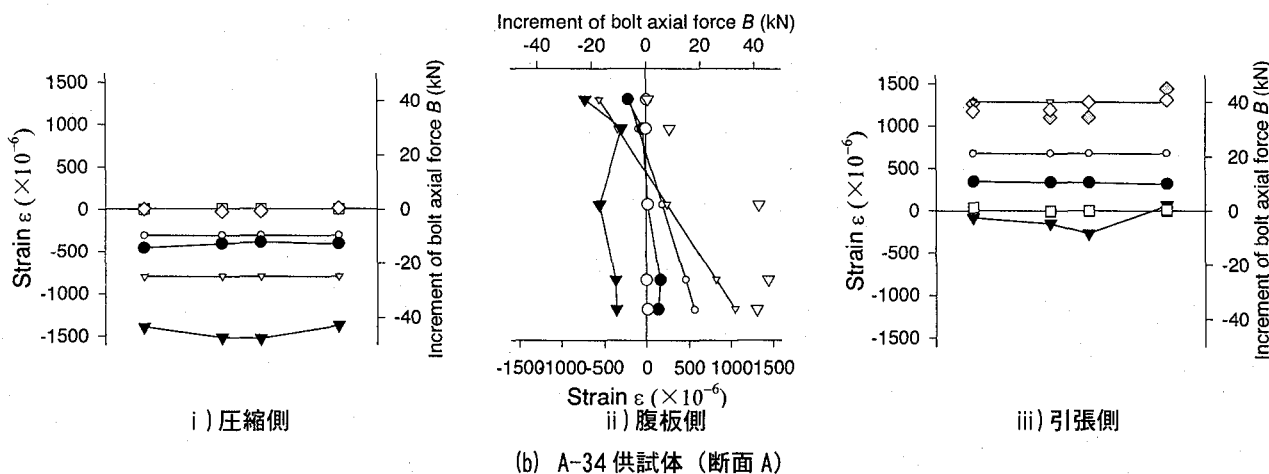
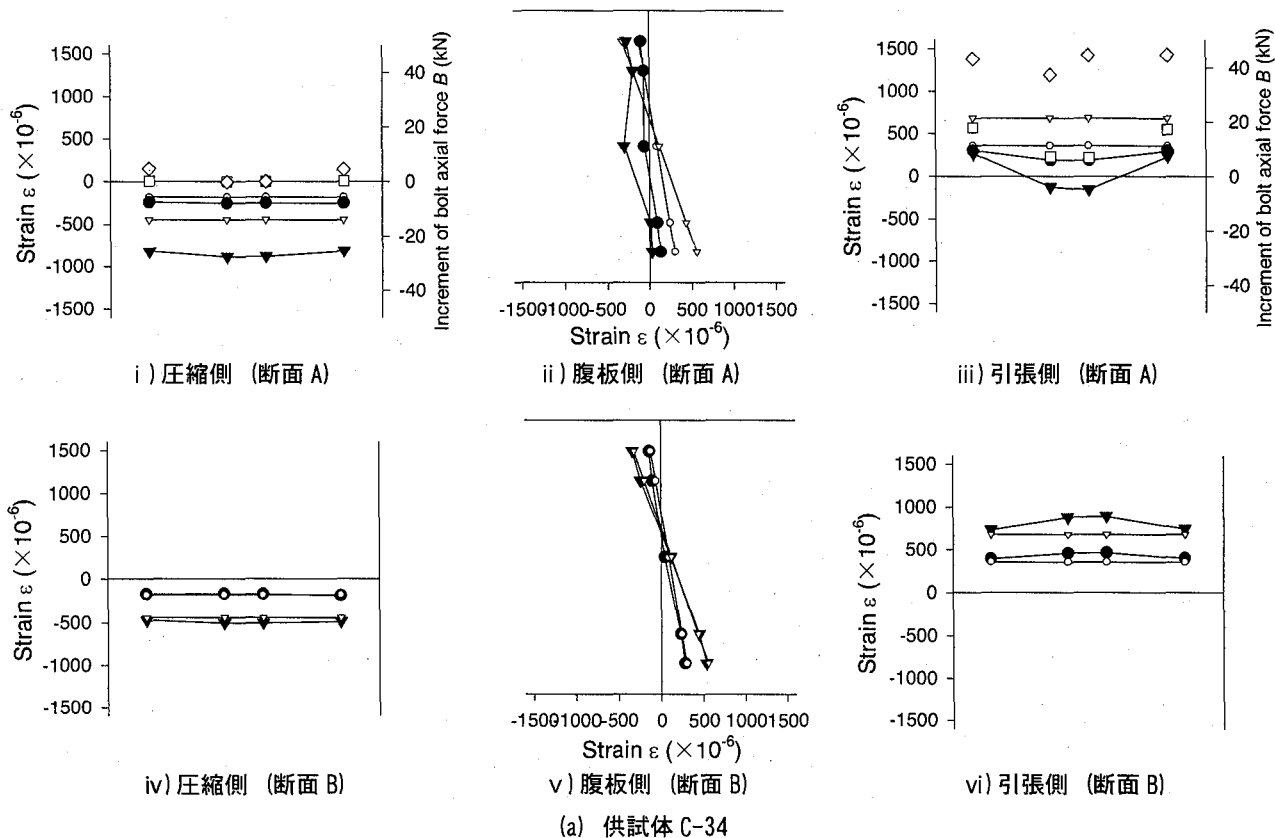
継手位置に近い断面（断面 A）での鋼管壁のひずみ分布を、供試体 A-34, B-34, C-34, および D-34 を例に図-9 に示す（測定位置および断面の名称は図-6 参照）。なお、鋼管中央部（断面 B）でのひずみ分布については、供試体間でその傾向に顕著な差異が認められず、初等梁理論から想定される平面保持を仮定したひずみ分布にほぼ一致していたことから、圧縮側と引張側のみにボルトを配置した最もシンプルな供試体 C-34 のみ、そのひずみ分布を示した。図中には、実験で載荷した引張荷重と曲げモーメントとを作用させた時のひずみの理論値を、平面保持を仮定して初等梁理論で求め、これも図示した。なお、断面 A のひずみ分布については、ボルト軸力の増加との関係を調べるために、ひずみ測定位置に対応する

高力ボルトの軸力変化量も図示した。

図-9(a)より、継手部から離れ、ほぼ鋼管中央である断面Bでは、すでに述べたように、計測されたひずみ値と理論値とがほぼ一致しており、平面保持の仮定が成立していることがわかる。

一方、すべての供試体においてフランジ板付近の断面Aでは、圧縮側第2列目ボルトが配置された付近から引

張側最外縁にかけて、ひずみ分布が理論値と異なり、引張側での鋼管ひずみが理論値よりかなり小さくなっている(図-9参照)。これは、ボルト軸力が増加しない段階、すなわち継手部に離間が発生しない段階では、継手部において圧縮力は鋼管壁を介して伝達され、引張力はボルトの初期導入軸力により発生するフランジ板間の材間圧縮力の減少と釣合って伝達される。そのため、圧縮側に



● $0.5M_{\max}$ (Experiment)	□ 1st row bolt ($0.5M_{\max}$)	○ Web bolt ($0.5M_{\max}$)
▼ $0.95M_{\max}$ (Experiment)	◇ 1st row bolt ($0.95M_{\max}$)	▽ Web bolt ($0.95M_{\max}$)
○ $0.5M_{\max}$ (Theory)	■ 2nd row bolt ($0.5M_{\max}$)	
▽ $0.95M_{\max}$ (Theory)	◇ 2nd row bolt ($0.95M_{\max}$)	

図-9 鋼管壁のひずみ分布

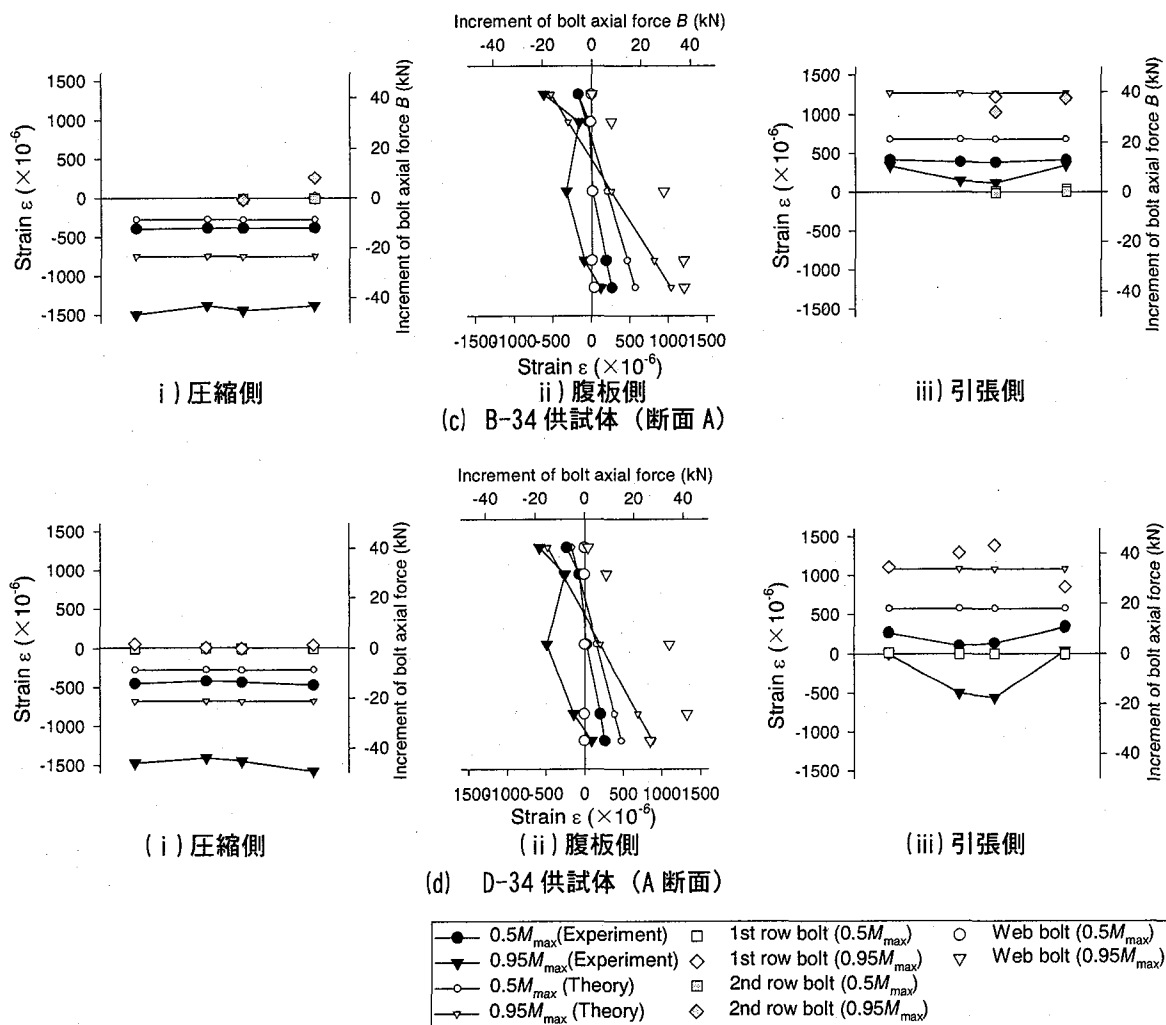


図-9 鋼管壁のひずみ分布 (続き)

比べて引張側の方が荷重伝達に関わる有効断面積が大きくなり、中立軸位置が引張側へ移動するためと考えられる。また、ボルト位置近傍で離間が発生する荷重レベルに達すると、引張力はボルトを介して伝達されるが、ボルト軸心と鋼管壁とに偏心があるため継手部に局所的な曲げモーメントが発生する。その結果、ボルトで接合されたフランジ板は極厚のためにほとんど変形せず、フランジ板に比べて肉厚の薄い鋼管壁に曲げ変形が生じ、ひずみ測定位置で局所的な圧縮ひずみが発生し、これが接合部のひずみに付加され、図のような分布形状を示したと考えられる。

3.4 高力ボルトの軸力の変化

曲げモーメントとボルト軸力との関係を供試体 A-34, A-34w, B-34, C-34, および D-34 を例に図-10 に示す。なお、すべての供試体において、ボルト軸力の変化の傾向が供試体中心面を対称にほぼ左右で似通っていたため、供試体 D-34 を除いて、右側部分に存在する高力ボルトのみ、その変化を示した。図中には、比較のため、表-3 に示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。

図-10 に示す供試体のボルト軸力の変化曲線から、各供体のそれぞれのボルト間で、初期導入軸力に差異があるが、これはトルクレンチによりトルク値を参照してボルトを締め付けたためと考えられる。導入軸力の大きさについては、設計導入軸力(55.8kN)を1割程度下回っているものも見られた。また、初期ボルト軸力のばらつきについては各供試体で同様の傾向が認められ、すべての供試体に対して同じ順序でボルト軸力を導入しており、このばらつきはボルト軸力の導入順序に起因しているのではないかと考えられる。このように、トルク値による張力管理には導入順序も関係し、導入軸力のばらつきの点で問題があると言える。しかしながら、引張継手において継手部強度はボルト自身の引張強度に支配されるため、この初期導入軸力が設計導入軸力より低いボルトが存在する影響は、継手部初期剛性に現れ、継手部の強度には無関係であると考えられ、強度を議論する上では大きな影響はないと考えられる。今後は、このばらつきが継手部剛性に与える影響を検討する必要がある。

ボルト軸力の増加の傾向については、ボルト配置の違いによる影響がほとんど見られず、圧縮側に配置された

ボルトの軸力は、曲げモーメントが増加してもほとんど変化していない。一方、引張側に配置されたボルトは、まず引張側 1 列目に配置された鋼管の腹板に最も近いボルトの軸力が増加を始め、その後引張側 1 列目の鋼管中央付近に配置されたボルトと引張側 2 列目に配置された腹板側のボルト軸力がほぼ同時に増加し始める。

このように、引張側 1 列目中央付近のボルトと引張側 2 列目最外縁のボルトとで、軸力が増加する荷重がほとんど差がないことから、ボルトの 2 列配置による効果が確認できる。さらに、引張側に配置されたボルトが降伏する直前から腹板に配置されたボルトの軸力が増加して

おり、腹板側にボルトを配置する効果が認められる。一方、高変形能ボルトを用いた供試体では、それを用いていない供試体よりも、引張側 2 列目のボルト軸力が増加を始める開始荷重が引張側 1 列目ボルトのそれに、より近づいており、高変形能ボルトの効果が確認できる。

なお、図中において、ボルト軸力がボルトの引張耐力を越えている場合が認められるが、これはボルトヘッドにひずみゲージを貼り、その主ひずみからボルト軸力を評価する軸力測定法を用いているためである。この方法では、首下部の引張曲げ変形が顕著でない場合には有効な方法と考えられるが、曲げ荷重が载荷され、ボルトヘッ

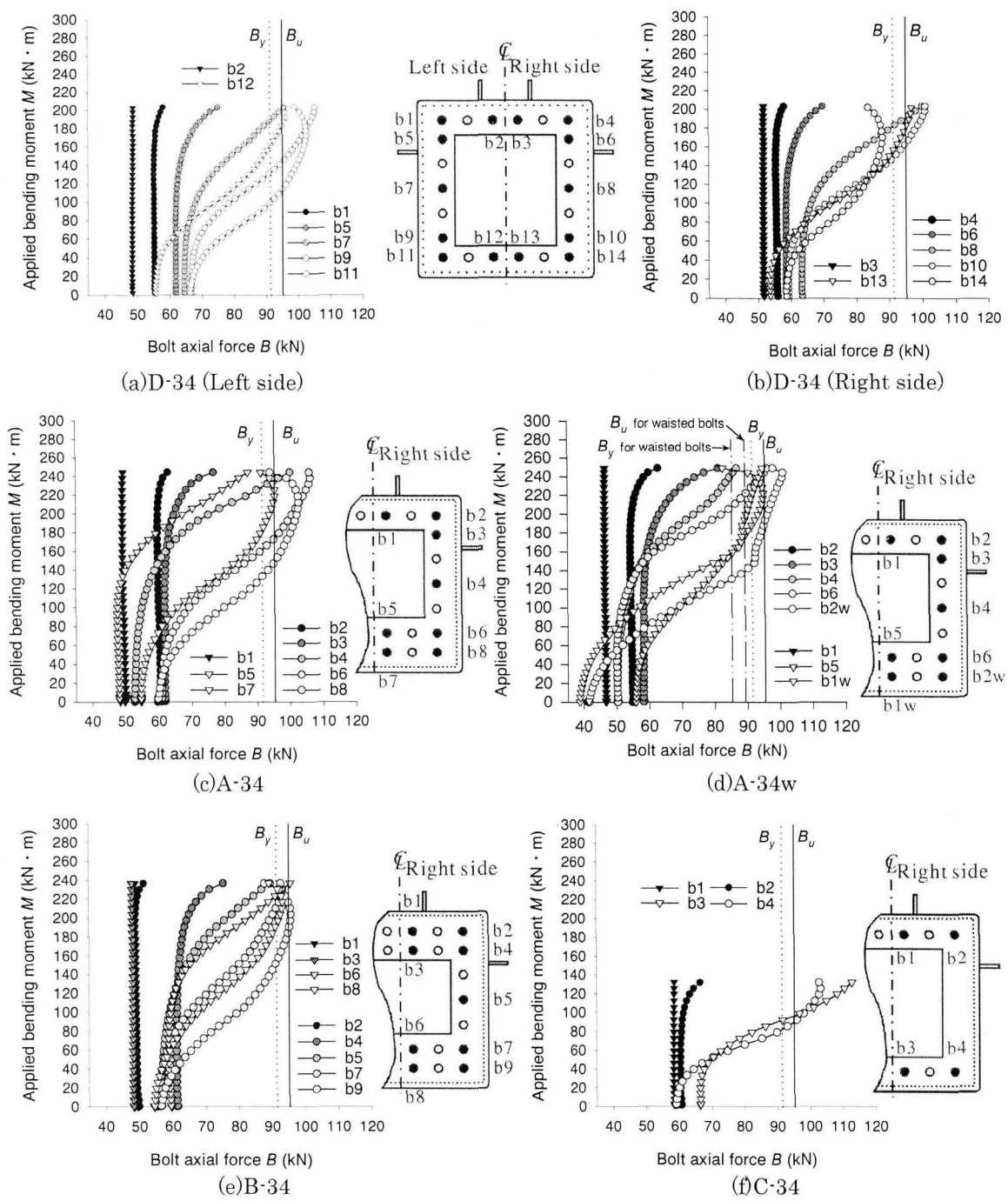


図-10 曲げモーメントーボルト軸力曲線

ドの引張曲げ変形が顕著になると、ボルトヘッド部のひずみがキャリブレーション時と異なるようになり、その結果、軸力の評価が高めになると思われる。このことはフランジ板の変形状態とも関わっており、ボルト本数が多く配置された供試体 B-34 では、ボルト軸力がほぼ正しく評価されていると考えられ、ボルト本数が最も少ない供試体 C-34 ではその傾向が顕著となっていることから確認できる。

3.5 フランジ板間の離間量

2枚のフランジ板間の離間量 δ と載荷荷重 M （曲げモーメント載荷時）との関係を供試体 A-34、C-34、および D-34 を例に図-11 に示す。図中の Sep.1 から Sep.6 は計測位置を表しており、その位置は既に図-6 に示した。なお、図中には、3.2 節で定義した降伏曲げモーメントも併せて示している。

図より、供試体間のボルト配置の違いによる離間挙動の差異はほとんど見られず、さらに、Sep.1、Sep.2、および Sep.3 での $M-\delta$ 曲線の形状もほぼ一致しており、引張側最外縁での位置による差異はほとんど見られない。すべての供試体で引張側の最外縁から離間が進行していく傾向にあり、作用曲げモーメントが降伏曲げモーメントを上回ると離間が一層進行していくことがわかる。また、降伏曲げモーメント時の離間量は最大でも 0.45mm ほどである。実際の接合部への適用を考えた場合、使用限界状態（供用限界状態）における接合部での離間量の大きさが問題となるが、ボルトの降伏に基づいて継手部の降伏限界状態を定義すれば、すなわち、降伏曲げモーメントに到達する時を降伏限界状態と定義すれば、その離間量も小さく、ボルトも弾性範囲内で外荷重に抵抗することになり、離間が残留することはない。したがって、高力ボルト引張継手の使用限界状態としては、離間量に注目し、ボルトの降伏から定義される継手部の降伏が適していると考えられる。さらに、継手部の最大耐力は、降伏耐力の 1.5~2.1 倍程度となっており、異常荷重などに対応した 2 段階設計を行う場合においても、使用限界状態と終局限界状態とのバランスのとれた継手部設計が可能になると考えられる。

3.6 強度と変形能に与える構造詳細の影響

前節までの考察をもとに、引張継手の強度とその変形能に与える構造詳細の影響について以下にまとめる。

(1) フランジ板厚の影響

供試体 A-22 と A-34 の実験結果の比較から、フランジの厚板化により、初期曲げ剛性、降伏曲げモーメント、および最大曲げモーメントが供試体 A-34 では供試体 A-22 に比べて、それぞれ 3.4 倍、1.4 倍、および 1.3 倍程度と上昇しており、フランジの厚板化による効果は大きい。

(2) 圧縮側 2 列目ボルトの効果

供試体 A-34 と B-34 の実験結果の比較から、両者の $M-\phi$ 曲線はほとんど一致しており、曲げモーメントに対しては圧縮側にボルトを複数列配置する効果は低いと考えられる。

(3) 引張側 2 列目ボルトの効果

供試体 A-34 と D-34 の実験結果の比較から、引張側のボルトを 2 列配置にすることで、継手部曲げ強度は約 18% 増加している。しかし、この強度増加は、文献 7) に示される継手部分モデルの実験結果（1 行 2 列配置で 46% 程度上昇）と比べると小さい。これは、鋼管隅角部に荷重が集中し、鋼管中央付近に配置された引張側 2 列目ボルトに効率よく荷重が分担されなかったためと考えられる。

(4) 腹板側ボルトの効果

腹板側にボルトを全く配置しなかった供試体 C-34 と腹板側にもボルトを配置した供試体 D-34 の実験結果を比較すると、供試体 D-34 では、供試体 C-34 に比べて降伏曲げモーメントで約 16%、最大曲げモーメントで約 57% 上昇している。すなわち、腹板側にボルトを配置する効果が高いことが確認できる。また、ボルトの 2 列配置の効果を考慮すると、腹板側のボルトも 2 列配置とすることで、さらに剛性および最大耐力の高い継手とすることも可能であると考えられる。

(5) 高変形能ボルトの効果

供試体 A-34 と A-34w の実験結果を比較すると、初期曲げ剛性および最大曲げモーメントに顕著な差異は認め

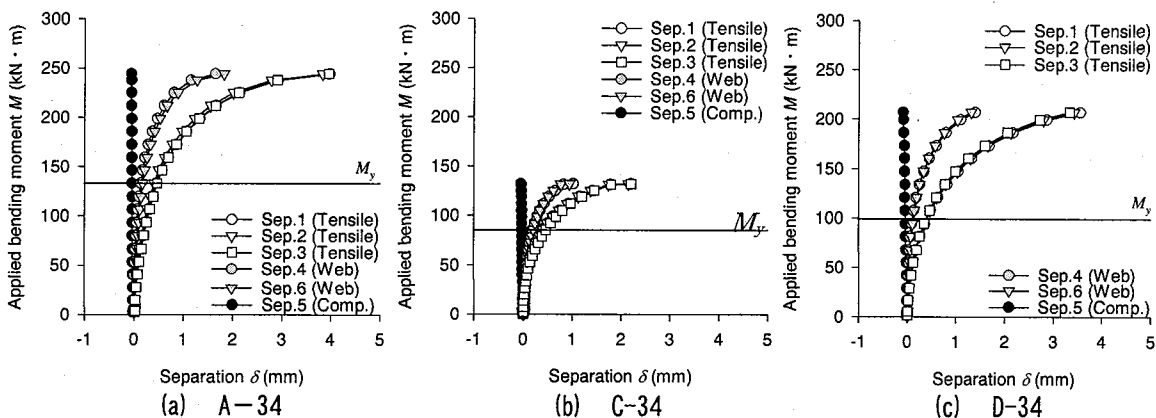


図-11 曲げモーメント-離間量関係

られない。しかし、降伏曲げモーメントや降伏曲率は、それぞれ約19%および約30%上昇しており、高変形能ボルトを用いることの効果が認められる。このような差異が認められたのは、フランジ板が十分に厚く、継手部挙動において高力ボルトの挙動が支配的であるためと考えられる。

このように、引張側の鋼管壁に最も近い1列目に高変形能ボルトを用いることで2列目ボルトも荷重伝達に効率よく関わるようになり、降伏曲げモーメントが増大し、その結果、降伏曲率も大きくなり、その効果は非常に高い。

4. 結論および今後の課題

本研究では、高力ボルト引張継手を実橋の箱型断面部材の継手に適用した場合、継手部が受けるであろう厳しい組合せ荷重の一つである、曲げと引張とを同時に載荷し、その力学的挙動を実験的に調べ、高力ボルト引張継手の実橋部材への適用性について検討した。特に、摩擦接合のようなボルトの複数配置の効果など、ボルトの配置に注目した検討を行った。以下に得られた主な成果をまとめる。

- (1) フランジ板の厚板化により、継手部剛性および継手部強度は上昇する。フランジ板厚が34mmの場合、22mmの場合に比べて、剛性および最大曲げモーメントは3.0倍および1.3倍にそれぞれ上昇する。
- (2) 圧縮側のボルトを2列配置にしても、曲げと引張との組合せ荷重に対しては、強度や変形能に及ぼす効果はほとんど見られない。一方、引張側のボルトを2列配置にすると、1列配置の場合と比較して、強度で約1.2倍、継手降伏時の割線剛性で約1.3倍増加し、その効果は高いと思われる。
- (3) 高力ボルト引張継手を用いた接合部では、高力ボルトの降伏を接合部の降伏(使用限界状態)と定義すると、引張接合で問題となる接合面での離間量が小さくなり、また、その離間は残留もしない。さらに、この降伏強度と最大強度とは約1.5~2.1倍の差があることから、使用限界状態から終局限界状態に至るまでにかなりの余裕があり、延性的な破壊を望ましいとする接合部の特性を考えると適当であると思われる。
- (4) 引張継手にとって不利となる曲げと引張との組合せ荷重が作用する箱型断面部材の接合部に高力ボルト引張継手を用いる場合、少なくとも圧縮側1列、引張側2列、および腹板側1列配置とし、引張側1列目には高変形能ボルトを使用するのが望ましい。

本研究では、作用する組合せ荷重として、曲げと引張との2つの組合せを取り上げたが、今後は、せん断が卓越するような継手への適用性についても調べる必要がある。特に、離間の進行に伴う材間圧縮力の減少とせん断耐力の減少との関係、およびこれを補うために有効なボルト配置などについて検討しておく必要がある。さらに、本研究では、静的な荷重を対象としたが、橋梁部材の継手部への採用を考えると疲労についての照査も必要であり、導入軸力の存在から、疲労に対しては問題は少ないと考えられるが、実験的に確認しておく必要がある。

参考文献

- 1) 高橋昭一, 橋 吉宏, 志村 勉 他: 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/I-40, pp.107-118, 1997.
- 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.991-1000, 1995.3.
- 3) (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.
- 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, 斉藤 浩: 多列配置引張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・短縮め形式において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) 渡邊英一, 諸岡 伸, 杉浦邦征, 山口隆司, 斉藤 浩: 軸平行部が細い高力ボルトの力学的挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第6巻, 日本鋼構造協会, pp.9-16, 1998.11.
- 9) 諸岡 伸: 高力ボルト引張継手の高強度化に関する基礎的研究, 京都大学大学院修士論文, 1999.3.
- 10) 日本建築学会: 高力ボルト接合設計施工指針, 丸善, 1993.3.
- 11) (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.

(2000年9月14日受付)