

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560591

研究課題名(和文) エネルギー吸収デバイスとしての高力ボルト継手の開発

研究課題名(英文) Development of the joint for friction type as energy-asorption-device

研究代表者

三ツ木 幸子 (MITSUGI, Yukiko)

石川工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：20581169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋で用いられている鋼板の最低板厚9mmの摩擦接合継手(縁端距離40mm)では、すべり後のせん断支圧抵抗はすべり荷重より小さい。したがって、この継手においてすべり後の耐力向上を期待するには縁端距離を60mmにすることを提案した。さらに荷重方向2本ボルトの高力ボルト継手をエネルギー吸収デバイスとして開発する場合、提案した方法で終局状態における各ボルトによる分担伝達力を概算し、ボルトの破断が母材の破断に先行して起こらないよう継手形状を決定する手法を示した。

研究成果の概要(英文)：To use the the bolted joint, with 2 bolts on the line of load direction, as the device absorbing the energy, we should design the bolted joint to make break the base plate before breaking out the bolt by shearing. We propose the calculating method the tranferred force by each bolt. Bolted joint for friction type, it is recommended to use 60mm as the end distance especially for the plate with thickness of 9mm in order to increase the pefoemance of deformation and load capacity.

研究分野：鋼構造および補修補強設計

キーワード：高力ボルト継手 終局挙動 エネルギー吸収 せん断支圧抵抗 変形性能 ボルト軸力 耐荷力

1. 研究開始当初の背景

東北大地震では、津波によって、これまでの設計では設定していなかった荷重を受け、甚大な災害が発生した。一方コスト削減や環境負荷軽減が課題となっている。これからの社会は、このような確率的に捉えなければならない大きい荷重（異常気象）に対して、コスト削減や環境負荷低減の要求に応えながら命を守り、リスクを最小化していくことが要求されている。

2. 研究の目的

既存構造を利用して、エネルギー吸収デバイスを開発するため、高力ボルト継手のすべりおよびその後の耐荷特性、特に、変形性能に着目し、その特性を地震時などの異常時荷重に対して効果的に用いることによって、コスト削減および環境負荷低減を図り、さらに、地震時などの異常時のリスク最小化を図るため、以下の3つの目的を持って本研究を行った。

- ①摩擦接合のすべり後の終局耐荷特性の解明
- ②すべり後の終局耐荷特性を考慮した設計法の提案
- ③すべり後のエネルギー吸収特性を活かした構造の提案

3. 研究の方法

(1) 試験体概要

高力ボルト摩擦接合継手のすべり後の終局耐荷特性を解明するべく、既に行った母材厚を9mmとした場合の実験に対して、19mm, 28mmの高力ボルト継手の試験を行った。どの板厚においても、主なパラメータをボルト軸力の有無と縁端距離 e とし、図1に示す片側ボルト配置が1行1列と1行2列の試験体を採用した。

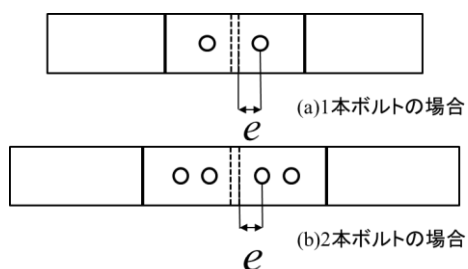


図1 試験体図



写真1 引張載荷

(2) 試験方法

試験体を写真1のように万能試験機に設置して破断するまで引張荷重を行い、終局耐力（最大荷重）を記録した。軸力有の試験体の摩擦抵抗について検討するため、最初に起きたすべり荷重とすべりを起こした後の荷重の極小値（以下「すべり極小値」と呼ぶ）を記録した。

ボルト部での母材と添接板の相対変位量を把握するため、ボルト部の鋼板のコバ面に基準線を描き、この線のズレを目視で0.1mmの精度でスケールを用いて計測した。この変位を用いて、吸収エネルギーの検討を行った。

試験後は、試験体のボルトを外して解体し、変状を観察し、写真で記録するとともに破断部位を確認し、母材と添接板の未破断孔の孔径をノギスで計測した（写真2）。この孔径の増分を用いても吸収エネルギーの計算を行い、相対変位から求まる吸収エネルギー量と比較検討した。

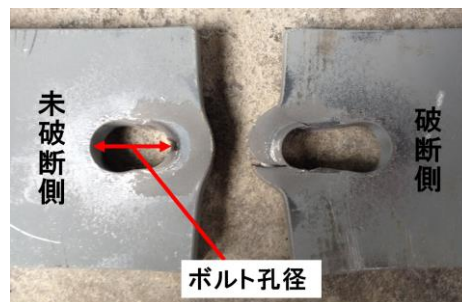


写真2 ボルト孔変形量

4. 研究成果

(1) 縁端距離の確保

母材厚9mmの実験結果のうち、片側ボルト本数が1本、縁端距離が40mmと60mmの荷重-変位曲線を図2に示す。

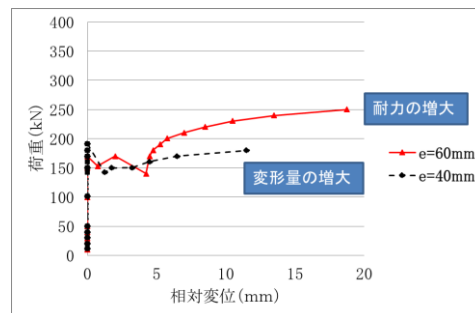


図2 荷重-変位曲線

縁端距離60mmの試験体では、すべり後、支圧状態に至り、荷重の増加とともに、塑性変形を起こし破断するのに対して、縁端距離40mmの試験体では、すべり後、荷重の増加なしで、すべり荷重以下で破断する結果となった。また、両者の荷重-相対変位曲線からエネルギー吸収量を計算すると、40mmの試験体は約1,900J、60mmの試験体は、約7,600Jとおよそ4倍となった。

これらのことから、板厚9mmとなる場合のすべり後の耐荷性能と変形性能を期待する

には、縁端距離を確保する必要があると考えられる。本試験結果より得られたボルト孔周辺の変形能、また、材間の密着性や防食の視点から道路橋示方書に規定されている最大縁端距離を考慮し、母材および添接板が 9mm となる場合の高力ボルト継手においては、縁端距離を 60mm 程度確保することが望ましいと考えられる。¹⁾

(2) 母材のせん断降伏によるボルトの荷重分担力の差異

母材厚 19mm、片側ボルト配置が 1 行 2 列、縁端距離が 40mm の試験体において、設計では、純断面の引張破断と予測されたが、結果は、母材のせん断破断もしくは、ボルトのせん断破断と異なる部位で、かつ、最大荷重は得られた破断部位の設計破断荷重より低下していた。

このことを母材の縁端とボルトピッチ間のせん断降伏により、ボルトの荷重分担力の不均等が生じると仮定し、計算を行った。ボルト分担力の推移例を図 3 に示す。

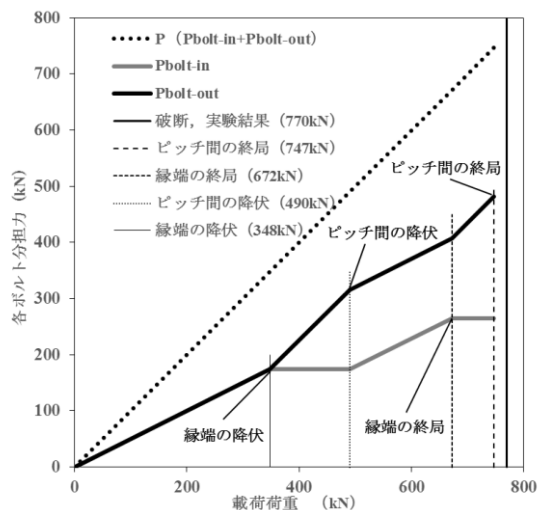


図-3 ボルト分担力の推移例

計算の結果、実験で得られた破断部位と最大荷重をほぼ推定できた。

本研究で採用した継手は、片側ボルト配置が 1 行 2 列は、ボルトの分担力の差が最も厳しいものである。このボルトの分担力の不均等については、今後、実験ケースを増やし確かめていく必要がある。しかしながら、このような、すべり後から破断に至るまでの複雑な耐荷挙動を把握することは、確実に破断までの耐力向上、変形能を期待した設計法を提案する上で不可欠なデータであると考えられる。

(3) 高力ボルト継手の破壊時の挙動の違い

今回の高力ボルト継手の破断形態として、大きく分けて、母材のせん断破断、母材の引張破断、ボルトのせん断破断が現れた。2 本ボルト継手では、母材のせん断破断とボルトのせん断破断の両方が生じる形態も観察さ

れた。この破断形態の違いは、単に破断する部位が異なるというものだけではなく、破断時の挙動も違いが現れ、その違いは、継手の耐荷力とエネルギー吸収能に直結する重要なものであると考えられる。

それぞれの破断時の特性として、ボルトがせん断破断するとボルトによる拘束がなくなるばかりでなく、ボルトは勢いよく飛ぶ。ことに、片側 1 本ボルトで、両側のボルトがほぼ同時にせん断破断すると添接板も飛び散った。これに対して、純断面の引張破断と母材のボルトからの支圧によるせん断破断では、比較的大きい塑性変形を伴って破断する。このように壊れ方に違いがあるため、終局耐力を期待して設計する場合、これを考慮して、ボルトでは破断させない設計を行う必要があると考えられる。

また、引張破断では、板厚が減少するためボルトによる拘束力が減少し、摩擦抵抗が期待できなくなる。2 本ボルト試験体において、母材がせん断破断する場合、母材縁端側の内側ボルト部は、添接板の純断面（最大引張応力断面）となるため、内側ボルトでも外側ボルトでも、終局荷重付近になるとボルトによる拘束力は減少し、摩擦抵抗も減少する。ここで、添接板は、母材のように両側から拘束されていないため、内側ボルトの方がその拘束力の減少は大きく、減少速さも速い。これらの現象について検討した実験データである母材厚 19mm、縁端距離 60mm、軸力有のものを図 4 に示す。

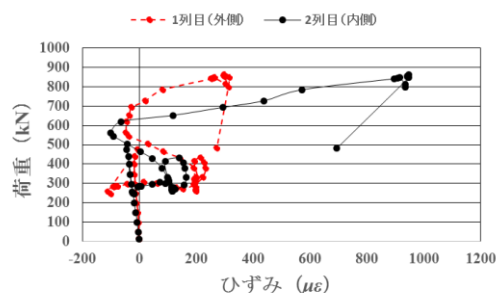


図 4 荷重-ひずみ曲線

添接板断面は母材断面より大きいいため、母材の純断面の応力は添接板の応力よりも高くなるが、ひずみの伸びは添接板の方が大きくなる。これは、母材は、添接板に拘束されているのに対して、添接板は座金やボルトで拘束されているものの、剛性は低いことが考えられる。

(4) エネルギー吸収量の算定法

母材厚 9mm と 19mm の片側ボルト配置が 1 行 1 列の実験結果を用いて高力ボルト継手部における、エネルギー吸収量をボルト部での母材と添接板の相対変位量と引張載荷試験後のボルト孔変形量から推定した。

本推定では、実験で得られるデータと実際の現象との違いを補うため、それぞれの変位量や荷重値を補正し、エネルギー吸収量の計

算を行った。

今回、対象としたケースでは補正後のボルト位置の相対変位から求めたエネルギー吸収量と未破断孔径から求めたエネルギー吸収量に対する比率の平均値は、ばらつきを1割以内に抑えて求めることができた。縁端距離などの変数で、ボルト孔径の変化量から求めた吸収エネルギーの基準値に対する比率は変化するが、本係数を検討して傾向把握することで、未破断孔の孔径計測結果を用いて、ボルト部での吸収エネルギーを推定できる可能性があるものと考えられる。

また、ボルト孔変形量は、主にボルト軸による支圧変形、縁端あるいは、ボルトピッチ間のせん断変形、純断面部での引張変形で構成されるものと考えられる。これらの応力を継手形状や予測破断形態より求め、破断時の孔変形量を推定することが出来れば、設計の段階で継手部のエネルギー吸収量を把握できることが可能になり、異常時荷重時のリスクの軽減に繋がるものと考えられる。²⁾

(5) すべり後のボルト軸力の耐力への影響

すべり後のボルトから支圧を受ける縁端部の状態をボルト軸力の有無に着目して縁端のコバ面に貼付したひずみゲージの値を用いて検討を行った。ここでは、母材厚19mm、片側ボルト配置が1行1列、縁端距離40mmの試験体の軸力有(破線)と無(実線)とを比較したものを図5に示す。

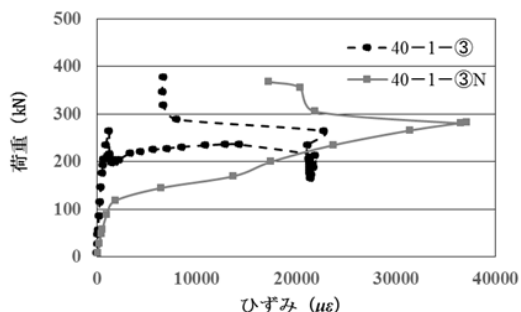


図5 荷重-ひずみ関係
(母材端部)

図5より、ひずみ値が5,000 $\mu\epsilon$ 程度(すべり後の初期の支圧状態)までは、同ひずみ値での荷重がボルト軸力を導入した場合の方が高いことが分かる。このことから、常時荷重に対して採用可能性のある、すべり後の初期の支圧状態では、支圧抵抗にボルト軸力を導入したことによる摩擦抵抗を加味して、剛性や耐疲労性能を評価することが可能であると考える。

<引用文献>

- ① 高井俊和, 山口隆司, 三ツ木幸子, 西川真未: 高力ボルト継手の終局挙動における孔変形に着目した2, 3の考察, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 694-702, 2014. 3
- ② 大河滉典, 舟山耕平, 山口隆司, 高井俊

和, 三ツ木幸子: 高力ボルト継手の変形性能評価に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第22巻, pp. 307-314, 2014. 11

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 大河滉典, 舟山耕平, 山口隆司, 高井俊和, 三ツ木幸子: 高力ボルト継手の変形性能評価に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 査読有り, 第22巻, pp. 307-314, 2014. 11
- ② 高井俊和, 山口隆司, 三ツ木幸子, 西川真未: 高力ボルト継手の終局挙動における孔変形に着目した2, 3の考察, 構造工学論文集, 査読有り Vol. 60A, pp. 694-702, 2014. 3

[学会発表] (計6件)

- ① 三ツ木幸子: Behavior of Bolted Joint for Friction Type After Slip, The 8th Taiwan-Japan Workshop on Structural and Bridge Engineering, 2015. 4. 4, 京都大学
- ② 大河滉典, 舟山耕平, 山口隆司, 高井俊和, 三ツ木幸子: 高力ボルト継手の変形性能評価に関する研究, 日本鋼構造協会 鋼構造シンポジウム, 2014. 11. 13, 東京ファッションタウンビル
- ③ 三ツ木幸子, 舟山耕平, 大河滉典, 山口隆司, 高井俊和: Experimental Study on the Ultimate Load and Deformation for High Strength Bolted Joint after Slip, 10th Japanese German Bridge Symposium, 2014. 09. 17. ミュンヘン軍事大学
- ④ 舟山耕平, 三ツ木幸子: 高力ボルト継手の終局挙動に及ぼす板厚の影響に関する研究, 土木学会全国大会, 2014. 09. 12, 大阪大学
- ⑤ 大河滉典, 三ツ木幸子, 山口隆司, 高井俊和, 松並翔吾, 高力ボルト継手の終局挙動における変形性能に関する研究, 土木学会全国大会, 2014. 09. 12, 大阪大学
- ⑥ 高井俊和, 山口隆司, 三ツ木幸子, 西川真未: 高力ボルト継手の終局挙動における孔変形に着目した2, 3の考察, 土木学会 構造工学シンポジウム, 2014. 4. 26, 京都大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三ツ木 幸子 (MITSUGI, Yukiko)
石川工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：20581169

(3) 連携研究者

山口 隆司 (YAMAGUCHI, Takashi)
大阪市立大学大学院・都市系専攻・教授
研究者番号：50283643