

頭部ひずみと軸部ひずみに基づく高力ボルトの軸力測定精度

宇都宮大学 学生員 ○ 佐藤祐輔
宇都宮大学大学院 正会員 鈴木康夫

1. はじめに

高力ボルト接合継手の力学挙動を検討する際には、ボルト軸力を精度良く評価することが重要である。高力ボルトの軸力を測定する方法には、座金型の軸力計を用いる方法、超音波¹⁾や磁気を利用した軸力計を用いる方法など様々な方法があるが、ボルト軸平行部表面やボルト軸心部のひずみを計測する方法²⁾、あるいはボルト頭部表面のひずみを計測する方法が³⁾簡易で一般的である。

これらの方法により軸力を測定する場合でも、対象となる全てのボルトに対してキャリブレーションを行うのが一般的であるが、ボルト頭部表面のひずみに基づいて軸力を測定する場合、ボルト頭部の変形状態が必ずしもキャリブレーション時と同じではなく、引張ボルト接合など、ボルトに曲げが作用する際にはボルト軸力が実際より高めに評価される可能性があることが指摘されている⁴⁾。また、ボルト頭部のひずみに基づいて軸力を測定する場合と軸部のひずみに基づいて軸力を測定する場合のいずれの方法による場合においても、ボルト軸力とひずみとの関係が既知であれば、全てのボルトに対してキャリブレーションを行う必要はなくなり、より容易にボルト軸力を測定することが可能と考えられる。

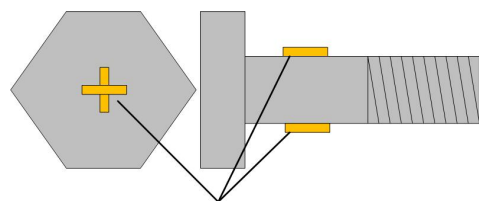
そこで、本研究では、まず、頭部表面と軸平行部表面にひずみゲージを貼付したボルトを用いてキャリブレーション試験を行い、純引張状態下におけるボルト軸力測定精度と再現性を確認した。次に、曲げ引張状態下におけるキャリブレーション試験も行い、ボルトに曲げが作用した場合の軸力測定誤差も確認した。

2. 純引張状態下におけるボルト軸力測定精度

(1) 実験方法

本研究では、まず、ボルトのキャリブレーション試験を行い、ボルト個体間の結果の差異およびキャリブレーション試験結果の再現性を確認した。キャリブレーション試験には、首下長さ 95mm (10 本)、110mm (5 本)、および 165mm (5 本) の高力ボルト M24(F10T) を用いた。キャリブレーション試験は、各ボルト (計 20 本) に対してそれぞれ複数回実施し、その際、ボルトとボルト孔および座金との位置関係が異なるように設置した。

計測項目は、載荷荷重 (ボルト軸力)、ボルト頭部のひずみ、およびボルト軸平行部のひずみとし、図-1 に示すように、頭部には中心に 2 軸ひずみゲージを、軸部には 1



ひずみゲージ
図-1 ゲージ貼付位置

軸ひずみゲージを対面に 2 枚貼付した。なお、ひずみゲージのゲージ長は、頭部および軸部ともに 5mm とし、ボルト頭部にひずみゲージを貼付する際は、旋盤を用いて頭部表面の刻印および黒皮を切削し、頭部中央部に貼付できるようハイトゲージを用いて貼付位置を正確に罫書いた。

なお、載荷には、写真-1 に示す治具を用いた。

(2) キャリブレーション試験結果

a) ボルト個体間の結果の差異

純引張状態におけるキャリブレーション試験の結果として、荷重 (ボルト軸力) と軸部ひずみの関係および荷重 (ボルト軸力) と頭部ひずみの関係を、それぞれ図-2 および図-3 に示す。また、キャリブレーション試験より求めた荷重とひずみの校正係数を表-1 にまとめる。

図の縦軸および横軸は、それぞれ載荷荷重 (ボルト軸力) およびひずみを表しており、頭部のひずみはボルトヘッド表面に貼付した 2 軸ひずみゲージによる計測値の平均値であり、軸部のひずみは、軸平行部表面に対面に貼付した 2 枚の 1 軸ひずみゲージによる計測値の平均値である。図中の凡例の最初の数字 (95, 110, および 165) はボルトの首下長さを、ハイフンに続く数字はボルトの個体番号を表している。なお、ここでは、それぞれのボルトに対して複数回行ったキャリブレーション試験の結果の平均を表しており、凡例中の 95-Ave, 110-Ave, および 165-Ave は、それぞれ首下長さ 95mm, 110mm, および 165mm の全てのボルトのキャリブレーション試験結果の平均を表している。

図-2 および表-1 より、ボルト軸部で計測したひずみは、首下長さにかかわらず、ボルト個体間の差異はほとんどみられないことがわかる。その差異は各首下長さのボルトの平均値に対して $\pm 3\%$ 以下であり、軸部のひずみは軸部断面積 ($A = 452.3\text{mm}^2$) と材料試験から求めた弾性係数 ($E = 210\text{GPa}$) を用いて算出した理論値との誤差も 3.3% 以下であった。したがって、ボルト軸平行部表面に貼付したひずみゲージを用いる場合には、全てのボルトに対してキャリブレーションを実施しなくても $\pm 5\%$ 程度の精度でボルト軸力を測定できると言える。

一方、図-3 に示すボルト軸力と頭部のひずみの関係を



写真-1 載荷治具

Key Words: 高力ボルト, 軸力測定精度, 頭部ひずみ, 軸部ひずみ, キャリブレーション試験

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210

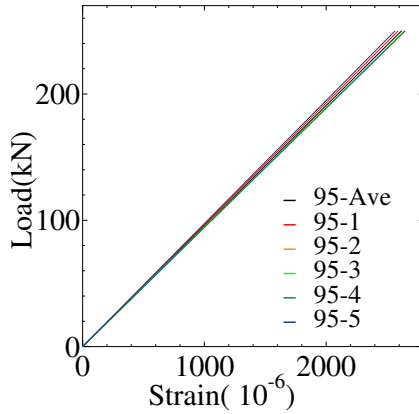


図-2-a 首下長さ：95mm

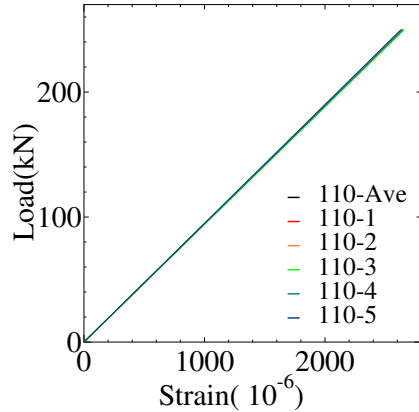


図-2-b 首下長さ：110mm

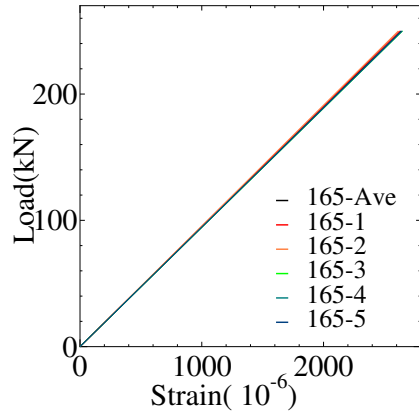


図-2-c 首下長さ：165mm

図-2 荷重と軸部ひずみの関係

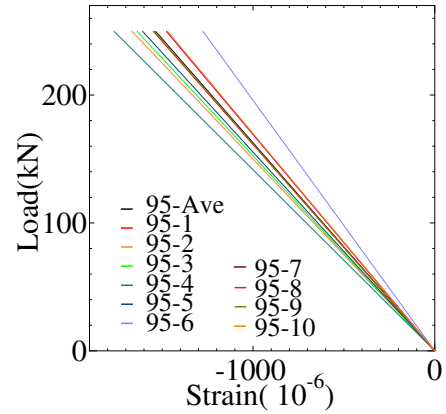


図-3-a 首下長さ：95mm

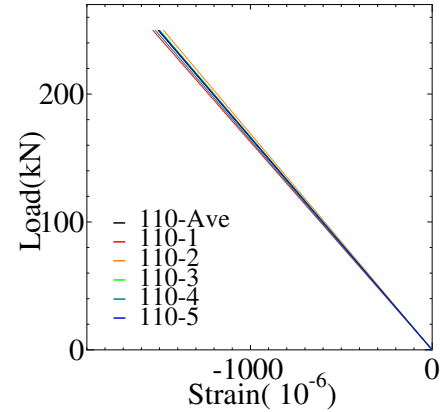


図-3-b 首下長さ：110mm

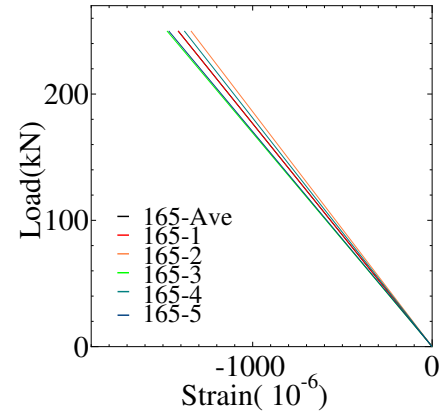


図-3-c 首下長さ：165mm

図-3 荷重と頭部ひずみの関係

見ると、首下長さ 110mm の場合のボルト個体間の差異は、平均値に対して-2.0%~1.9%程度とほとんどみられないが、首下長さ 95mm の場合のボルト個体間の差異が平均値に対して-20.4%~13.0%と大きいことがわかる。なお、首下長さ 165mm の場合の個体間の差異は平均値に対して-5.3%~4.2%であり、長さ 95mm の場合ほどではないが、110mm の場合より幾分個体間の差異が大きい。

このように首下長さ 95mm のボルトに個体間のばらつきが大きく生じた原因は、ボルト軸心位置とボルト頭部中心とのずれや、ボルト頭部の傾きなどの初期不整の影響と考えられる。そこで、JIS B 1186 (摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット) ⁶⁾に基づいてボルト軸部の片寄り量を計測した。各ボルトの軸部のずれ量計測結果を表-2に示す。表-2中の $a-b$ および $c-d$ は、図-5に示す位置で計測したずれ量である。

表-2より、ボルト軸部のずれ量とその標準偏差は、首下

長さ 95mm, 165mm, 110mm の順に大きく、ボルト頭部ひずみの個体間誤差の大小関係と整合していることがわかる。したがって、ボルト頭部のひずみは、ボルト軸部のずれ量に影響されると言え、ずれ量が多いボルトを使用する際には、それぞれのボルトに対してキャリブレーションを実施する必要があると考えられる。因みに、JIS⁶⁾では、M24 の高力ボルトに対して $|a-b| \leq 1.2$ と規定されており、本研究で用いた高力ボルトは規格値を満足していた。

b) キャリブレーション結果の再現性

本研究では、キャリブレーション結果の再現性を確認するため、それぞれのボルトに対して 3~10 回ずつ载荷を行った。結果の例として、首下長さ 95mm のボルト (試験体 95-1) の荷重-ひずみ関係の傾きを表-3にまとめる。

表-3より、軸部および頭部ともに、载荷回数による差異はほとんどみられないことがわかる。その他のボルト

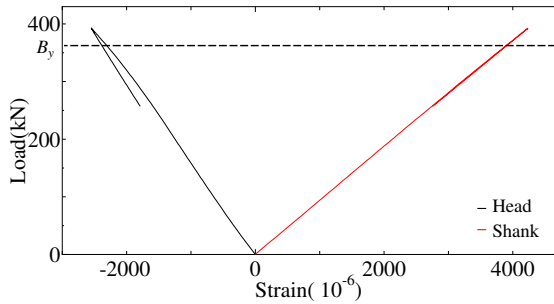


図-4 荷重とひずみの関係の例 (破断試験, 110-1)

表-1 キャリブレーション結果一覧

試験体名	頭部ひずみ		軸部ひずみ	
	校正係数 (kN/ $\mu\epsilon$)	平均値 (kN/ $\mu\epsilon$)	校正係数 (kN/ $\mu\epsilon$)	平均値 (kN/ $\mu\epsilon$)
95-1	-0.161	-0.163	0.0965	0.095
95-2	-0.150		0.0943	
95-3	-0.152		0.0945	
95-4	-0.142		0.0944	
95-5	-0.155		0.0974	
95-6	-0.196		-	
95-7	-0.169		-	
95-8	-0.169		-	
95-9	-0.162		-	
95-10	-0.169		-	
110-1	-0.163	-0.166	0.0947	0.095
110-2	-0.169		0.0946	
110-3	-0.167		0.0940	
110-4	-0.164		0.0944	
110-5	-0.166		0.0950	
165-1	-0.166	-0.176	0.0952	0.095
165-2	-0.177		0.0956	
165-3	-0.186		0.0944	
165-4	-0.181		0.0944	
165-5	-0.170		0.0946	

についても載荷回数による差異はほとんどなく、首下長さ 95mm のボルトでは、頭部のひずみは平均値に対して-2.4~2.7%、軸部は平均値に対して-3.9~3.2%程度のばらつきしか認められなかった。また、首下長さ 110mm のボルトでは、頭部で-2.4~2.9%、軸部で-1.0~1.4%、首下長さ 165mm のボルトでも、頭部で-3.2~4.9%、軸部で-0.5~0.8%程度のばらつきしか認められなかった。したがって、ボルトとボルト孔および座金の位置関係（設置条件の違い）による計測誤差は、首下長さにかかわらず 5%未満と小さく、ボルトが降伏する前までは純引張状態下においてはキャリブレーションの再現性は高いと言える。

また、破断にいたるまでのボルト軸部と頭部のひずみの挙動を確認するため、最後に破断試験を行った。破断試験の例として首下長さ 110mm の破断まで載荷したときの

表-2 ボルトヘッドと軸中心位置のずれ量 (単位: mm)

試験体名	$a - b$	$c - d$	ずれ量	標準偏差
95-1	0.19	0.35	0.40	0.695
95-2	0.91	0.18	0.93	
95-3	0.22	0.03	0.22	
95-4	0.38	0.03	0.38	
95-5	0.26	0.10	0.28	
95-6	0.21	0.05	0.22	
95-7	0.19	0.33	0.38	
95-8	0.11	0.55	0.56	
95-9	0.03	0.08	0.09	
95-10	0.35	0.08	0.36	
110-1	0.00	0.13	0.13	0.043
110-2	0.08	0.02	0.08	
110-3	0.03	0.07	0.08	
110-4	0.02	0.10	0.10	
110-5	0.06	0.09	0.11	
165-1	0.21	0.25	0.33	0.169
165-2	0.20	0.08	0.22	
165-3	0.10	0.29	0.31	
165-4	0.11	0.03	0.11	
165-5	0.20	0.10	0.22	

表-3

回数	軸部ひずみ	頭部ひずみ
1 回目	0.0977	-0.158
2 回目	0.0979	-0.160
3 回目	0.0979	-0.160
4 回目	0.0992	-0.165
5 回目	0.0976	-0.161
6 回目	0.0960	-0.160
7 回目	0.0969	-0.157
8 回目	0.0941	-0.163
9 回目	0.0938	-0.164
10 回目	0.0938	-0.165
平均	0.0965	-0.1613
標準偏差	0.0020	0.0029

荷重と頭部、軸部ひずみの関係を図-4 に示す。図-4 より、軸部では最大荷重を経てボルト軸力が低下しても同じ軸力に対するひずみの値は変わらないことがわかる。しかし、頭部では、最大荷重を経てボルト軸力が低下すると同じ軸力に対するひずみの値は大きくなった。これは、軸力が低下しても頭部の曲げ変形によるひずみが残留したためと考えられる。したがって、頭部ひずみに基づいて軸力を測定する場合、最大軸力以後の挙動は正確に把握できない可能性がある。

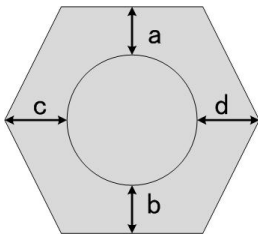


図-5 ボルト軸心ずれ量の計測位置

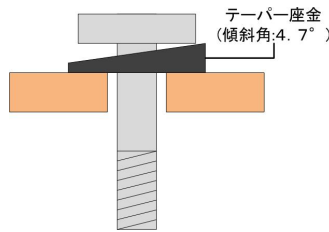


図-6 テーパー座金の設置位置

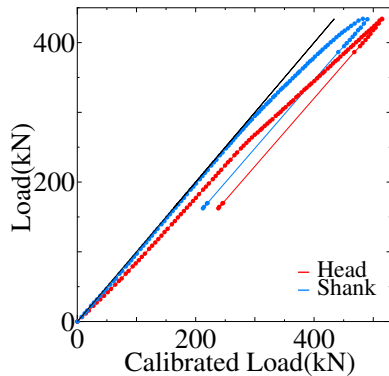


図-7 荷重と計測ボルト軸力の関係（傾斜角4.7°）

3. 曲げ引張状態下におけるボルト軸力測定精度

(1) 実験方法

ボルトに曲げが作用した場合の軸力測定誤差を確認することを目的として、図-6に示すようにボルト頭部側に傾斜のついたテーパー座金（傾斜角：4.7°）を用いた状態でキャリブレーション試験を実施した。

使用ボルトは、首下長さ165mmとし、前章のキャリブレーション試験で用いた165-1および165-3を使用した。

計測項目は、前章のキャリブレーション試験時と同様に、載荷荷重（ボルト軸力）、ボルト頭部のひずみ、およびボルト軸平行部のひずみとした。

(2) 実験結果

曲げ引張状態における荷重と計測ボルト軸力との関係を図-7に示す。図の縦軸は、載荷荷重（ボルト軸力）を表しており、横軸は、ボルト頭部および軸部表面の測定ひずみと純引張状態下におけるキャリブレーション結果を用いて算出した換算軸力を表している。なお、図中の黒色実線は、純引張状態下における荷重と換算軸力を示しており、赤丸と青丸のプロットはそれぞれ曲げ引張状態下におけるボルト頭部および軸部表面の測定ひずみに基づく換算軸力を示している。

図-7より、約250kNまでは軸部表面で計測されたひずみに基づいて換算したボルト軸力は、純引張状態におけるキャリブレーション結果とほとんど差異がないのに対し、頭部で計測されたひずみに基づいて換算したボルト軸力は、差異が大きいことがわかる。純引張状態における換算軸力と曲げ引張状態における換算軸力の差異は、250kN内で軸部で1.2%、頭部で11.5%であった。

軸平行部には、対面に1軸ゲージを貼付しているため、それらの測定値の平均を用いることで曲げ成分の影響を受けなくなるが、ボルト頭部では、曲げ変形にともなって付加的なひずみが生じるため換算軸力が高く評価される。したがって、文献⁴⁾でも指摘されているように、引張ボルト継手などのようにボルトの曲げ変形が顕著となる場合には、

ボルト頭部に貼付したひずみゲージにより計測される軸力の精度は、軸部に貼付したひずみゲージにより計測される軸力の精度と比べて低くなると考えられるが、その軸力測定誤差と曲げ変形量との関係については、FEMなどにより定量的に検討する必要がある。また、荷重が250kNを越えたあたりから軸部で換算された軸力も高く評価されていることがわかる。これは、曲げ変形にともなって、軸部でも局部的に降伏したためである。

4. おわりに

本研究では、ボルト頭部とボルト軸平行部表面に貼付したひずみゲージにより軸力を測定する際の測定精度を実験的に確認した。本研究で得られた主な成果と今後の課題を以下にまとめる。

1. キャリブレーション試験の結果、軸部表面で計測されたひずみはボルト個体間の誤差が小さく、軸部断面積とヤング率で算出される理論値と5%程度しか差異がみられなかった。一方、ボルト頭部で計測されるひずみは、ボルト軸心位置とボルト頭部中心とのずれやボルト頭部の傾きなど、初期不整の影響により個体間のばらつきが大きく生じることがわかった。したがって、ボルト軸心位置のずれ量が大きいボルトに対してボルト頭部のひずみに基づいて軸力を測定する際には、それぞれのボルトに対してキャリブレーションを実施する必要があると考えられる。
2. 軸部および頭部ともに、載荷回数による差異はほとんどみられなかった。したがって、ボルトとボルト孔および座金の位置関係（設置条件の違い）による計測誤差は小さく、純引張状態下におけるキャリブレーションの再現性は高いと言える。
3. 引張ボルト継手のようにボルトの曲げ変形が顕著となる場合には、ボルト頭部に貼付したひずみゲージにより計測される軸力の精度は、軸部に貼付したひずみゲージにより計測される軸力の精度と比べて低くなると考えられるが、その軸力測定誤差と曲げ変形量との関係については、FEMなどにより定量的に検討する必要がある。
4. 破断試験の結果、軸部で計測したひずみは最大ボルト軸力以後も線形挙動を示すが、頭部のひずみは非線形となった。したがって、ボルト頭部のひずみに基づいて軸力を計測する場合、最大ボルト軸力以後の測定精度は軸部と比べて低くなる可能性がある。

参考文献

- 1) 上野幹二, 山口隆司, 小林昭一: 超音波縦波および横波を用いた高力ボルト軸力測定に関する基礎的研究: 構造工学論文集, Vol. 46A, 土木学会, pp.1147-1152, 2000.3.
- 2) 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.
- 3) 新田 勇, 松崎良男, 阿部正信, 宮島敏郎: ボルト頭部頂面の変形に基づいた軸力測定方法の基礎研究 日本機械学会論文集 (C編), 73巻, 733号, pp.200-206, 2007.9.
- 4) 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.
- 5) 藤谷健二, 渡邊英一, 杉浦邦征, 山口隆司, 葛西俊一郎: ねじ部を考慮した高力ボルトの有効応力-ひずみ関係に関する考察, 鋼構造年次論文報告集, 第3巻日本鋼構造協会, pp.281-288, 1995.11.
- 6) 日本規格協会: JIS B 1186 摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット, 2007.3.