

超音波法によるボルト軸力測定に及ぼす曲げ変形の影響*

荒居 善雄*¹, 土田 栄一郎*¹, 桜田 英治*²Effect of Bend Deflection on Measurement of Axial Load
in Bolts by Ultrasonic MethodYoshio ARAI*³, Eiichiro TSUCHIDA and Eiji SAKURADA³ Saitama University, Dept. of Mechanical Engineering, 255 Shimo-Ohkubo, Urawa, Saitama, 338-8570 Japan

Effect of bend deflection on measurement of axial load in bolts by ultrasonic method are studied experimentally. External loading test with changing the tensile-bend ratio were conducted using long steel bolts. A ray tracing analysis were also conducted to simulate the effect of bend deflection. It is cleared that the change of reflection angle of the ultrasonic wave on the bottom surface of the bolts is the controlling factor for the effect of bend deflection on the measurement of axial load in bolts. A new method to evaluate the axial load accurately under the deflection is proposed and its validity is conformed experimentally.

Key Words: Bolt, Stress Measurement, Ultrasonic Inspection, Nondestructive Inspection, Stress Wave, Bending

1. 緒 言

石油精製設備等のフランジ継手からのガス漏えいを防止するには、ガスケットと接触する面を適正な力で強固に、かつ均一に密着させる必要がある。現在、ボルトの軸力管理に主として用いられるトルクレンチ法は、ねじ部の摩擦係数のばらつきが大きい場合、締付けトルクを一定にしてもボルトに発生する軸力が一定にならないという問題がある。この問題を解決する方法として超音波を使用したボルト軸力管理が用いられており⁽¹⁾、短小ボルトについて、非線形変形の考慮や、締付け状態のみで軸力を算出する方法が検討されている⁽²⁾⁽³⁾。一方、長いボルトにフランジ角度の傾きやずれ等に起因した曲げ変形が生ずると、測定される軸力の精度が低下する問題がある⁽⁴⁾。本研究では、超音波軸力測定に及ぼす曲げ変形の影響を明らかにするとともに、軸荷重と曲げモーメントを受けるボルトにおける超音波軸力算出方法を新たに提案し、実験によってその有効性を示した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験方法 供試材は、構造用鋼 SS 400 である。その力学的性質を表 1 に、ボルト形状の諸元を図 1 に示す。ここで、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比、 σ_{ys} は降伏応力、 σ_B は引張強さである。無負荷時のボルト長 $L=260$ mm、ボルト外径 31.75 mm である。ボルト中央に、ネジ山を削った平行部分を作り ($D=26.7$ mm)、円周上に 120° 間隔でひずみゲージを貼付した。ひずみの測定結果から中立軸の方向を決定し、軸力 F と曲げモーメント M を計算した。ボルトの負荷試験は、基本的には、JIS-B 1051 に準拠して行った。試験片とジグの取付け状態を図 2 に示す。曲げモーメントはくさびを用いて負荷した。各荷重において、シングア라운드音速測定装置により伝搬時間を測定した。シングア라운드法の測定条件は、サンプルサイズが 10 000、固定遅延時間が 254.9 μ s である。用いた超音波探触子は、縦波型で中心周波数は 5 MHz、直径 6.4 mm である。ボルト頭部に、磁石を利用して探触子を設置した。接触媒質として白色ワセリンを用いた。

2.2 超音波による軸力評価方法 材料内に応力が発生すると、超音波の伝搬速度は変化する。両者の

* 原稿受付 2000 年 6 月 19 日。

¹ 正員、埼玉大学工学部(☎338-8570 浦和市下大久保 255)。² 埼玉大学大学院。

E-mail: yarai@mech.saitama-u.ac.jp

関係は次式で表されるように直線関係にある⁽⁶⁾⁽⁹⁾。

$$V_1 = V_0(1 + K \cdot \sigma) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ は軸力 F とボルト等価断面積⁽²⁾ A より $\sigma = F/A$ で表される軸応力、 V_1 は軸応力 σ における伝搬速度、 V_0 は無負荷時の伝搬速度、 K は音弾性定数である。この関係を利用して、ボルト軸力測定は縦波を軸力方向に伝搬させ、無負荷時とボルト締結時における伝搬時間の差から軸力を測定するものである。曲げ変形を考慮しない場合、超音波により測定される軸力 F^u は次式で得られる。

$$F^u = \frac{\Delta T_1}{k \delta} \dots\dots\dots (2)$$

$$k = \frac{2(1 - KE)}{V_0} \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta = \frac{l}{EA} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ΔT_1 は軸力負荷に伴う第一反射波の伝搬時間変化、 E は縦弾性係数、 l は図1に示すように、軸力のかかる範囲の長さ(等価応力長さ⁽²⁾)である。

ボルトの無負荷時における超音波の一往復の伝搬時間 $2T_0$ は、次式で表される。

$$2T_0 = \frac{2L}{V_0} \dots\dots\dots (5)$$

曲げ変形が生じていない場合、ボルト締結時における中心軸上の超音波の一往復の伝搬時間 $2T_F$ は次式で表される。

$$2T_F = \frac{2(L-l)}{V_0} + \frac{2(l+L_F-L)}{V_1} \dots\dots\dots (6)$$

$$= 2(T_0 + \Delta T_F) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ΔT_F は伸び変形による伝搬時間変化であり、次式で表される。

$$\Delta T_F = -\frac{l}{V_0} + \frac{l+L_F-L}{V_1} \dots\dots\dots (8)$$

式(6)の第1項は、軸力がかかっていない部分の伝搬時間、第2項は軸力がかかっている部分の伝搬時間である。ボルトに軸力 F と曲げモーメント M がかかり、伸び変形と曲げ変形が生じている場合の超音波の一往復の伝搬時間 T_M は、ボルト内の応力こう配による伝搬速度の不均一性の影響を無視すれば、次式で表される⁽¹⁾。

$$T_M = T_F + \frac{T_F}{\cos 2\theta} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 θ は図3に示すようにボルト端におけるたわみ角である。 $1/\cos 2\theta$ の項はたわみによる伝搬経路の増加を表す。伸び変形と曲げ変形が生じている場合の超音波の二往復の伝搬時間 T_{M2} は、次式で表される。

$$T_{M2} = T_F + 2\frac{T_F}{\cos 2\theta} + \frac{T_F}{\cos 4\theta} \dots\dots\dots (10)$$

T_M と同様に $1/\cos 2\theta$ の項はたわみによる伝搬経路の増加を表し、二往復めの復路では、たわみ角の4倍が伝搬経路の増加に寄与している。負荷に伴う第一反射波の伝搬時間変化を ΔT_1 、第二反射波の伝搬時間変化を ΔT_2 とする。 $1/\cos 2\theta \approx 1 + 2\theta^2$ 等と近似すれば、伝搬時間変化に及ぼす曲げモーメントの影響を定量的に表す次式が得られる。

Table 1 Mechanical properties

E	ν	σ_{ys}	σ_B
GPa		MPa	MPa
206	0.3	289	428

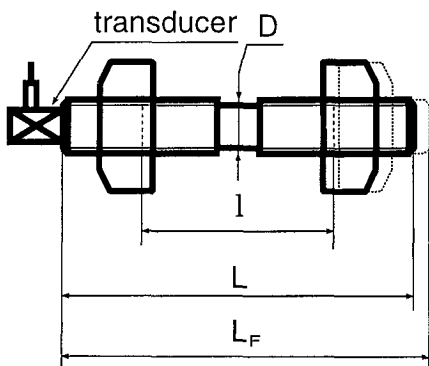


Fig. 1 Specimen configuration

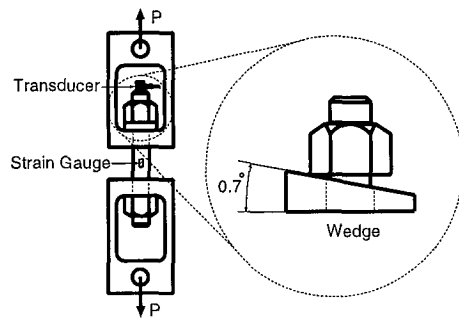


Fig. 2 Specimen, fixture and wedge

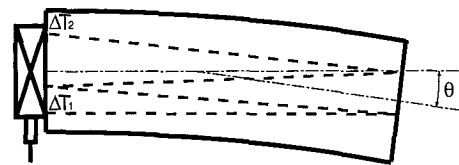


Fig. 3 Directions of incident and reflected waves

$$\Delta T_1 = T_M - 2T_0 \approx 2\Delta T_F + 2(T_0 + \Delta T_F)\theta^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\Delta T_2 = T_{M2} - 4T_0 \approx 4\Delta T_F + 12(T_0 + \Delta T_F)\theta^2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

式(11), (12)より, ΔT_1 と ΔT_2 を組合わせて, たわみ角の項を消去できる. 軸力と一義的な関係にある超

音波パラメータ ΔT_{1c} を次式で定義する.

$$\Delta T_{1c} = 3\Delta T_1/2 - \Delta T_2/4 \approx 2\Delta T_F \quad \dots\dots\dots(13)$$

同様に, たわみ角の二乗と一義的な関係にある超音波パラメータ ΔT_d を次式で定義する.

$$\Delta T_d = \Delta T_2 - 2\Delta T_1 \approx 8(T_0 + \Delta T_F)\theta^2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

たわみ角の変化による ΔT_1 と ΔT_{1c} の変化を図4

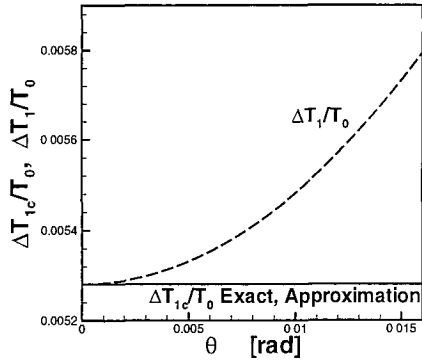


Fig. 4 Effect of deflection angle on change in flight time

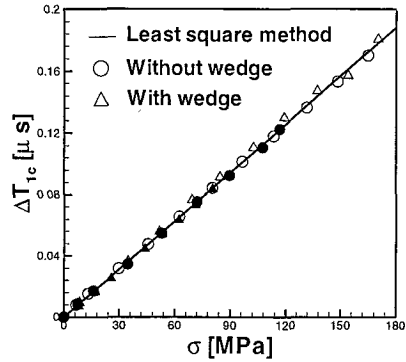


Fig. 7 Relation between proposed parameter, ΔT_{1c} , and axial stress

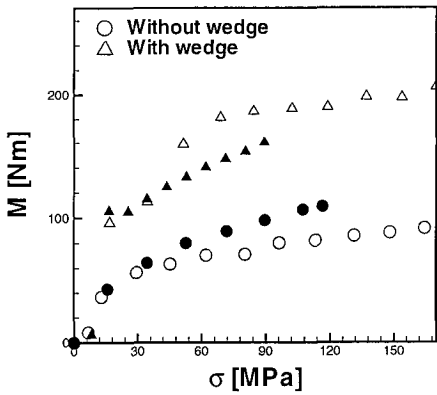


Fig. 5 Change of bending moment during loading

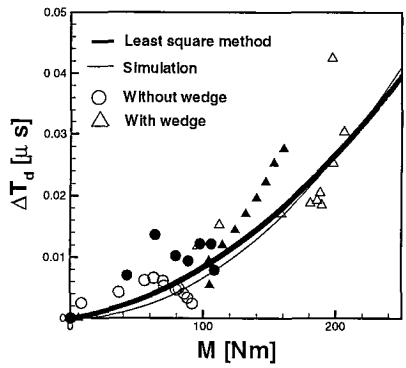


Fig. 8 Relation between difference of flight time with multi-reflection, ΔT_d , and bending moment

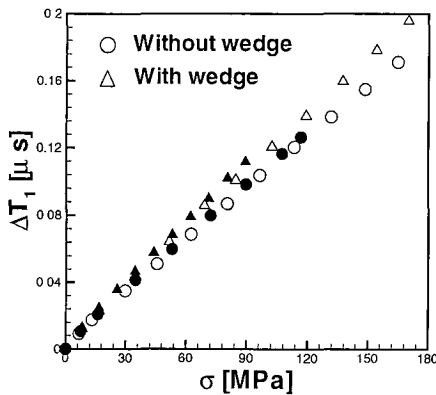


Fig. 6 Relation between change in flight time, ΔT_1 , and axial stress

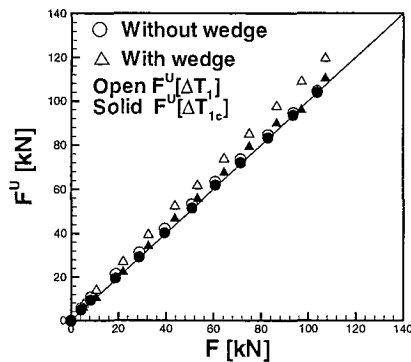


Fig. 9 Correlation between axial load estimated using ultrasonic parameters, F^U , and actual axial load F

に示す。ボルト形状、材料特性は供試材のものを用い、等価応力長さ $l=230$ mm として計算した。 ΔT_1 はたわみ角 θ の増加に伴い、その初期値に対して 10% 程度増加している。実際には軸力が低くても、曲げ変形の影響で見かけ上軸力が高くみなされる可能性がある。 $0 < \theta < 0.018$ rad の範囲では、 ΔT_{1c} は曲げ変形に不敏感である。近似式 [式(13)の第3項、図中の Approximation] は厳密な式 [式(13)の第2項、図中の Exact] と重なっており、このたわみ角の範囲では、近似式は有効である。

3. 実験結果

ひずみゲージで実測した曲げモーメント M と軸応力 σ の関係を図5に示す。丸印はくさびを用いない結果 (without wedge)、三角印はくさびを用いた結果 (with wedge)、白抜き印と黒塗り印は異なる試験日の結果を示す。くさびを用いることによって、軸力と曲げモーメントの割合を変化させることができている。伝搬時間変化 ΔT_1 と軸応力の関係を図6に示す。伝搬時間変化 ΔT_1 と軸応力 σ の関係は、ほぼ比例関係であり、その傾きは、くさびを用いた結果のほうが、くさびを用いない結果よりも約 10% 程度大きい。すなわち、曲げモーメントの増加は、軸力と伝搬時間変化の関係の傾きの増加をもたらす。以上の曲げモーメント M と伝搬時間変化 ΔT_1 に関する異なる試験日の結果は、互いに一致しており、実験の再現性を示している。

図7に、伝搬時間変化 ΔT_{1c} と軸応力 σ の関係を示す。伝搬時間変化 ΔT_{1c} は、軸力と曲げモーメントの割合にかかわらず、軸応力と一義的な関係にある。

ΔT_d と曲げモーメント M の関係を図8に示す。細い実線は式(14)によるシミュレーション結果、太い実線は実験結果の最小二乗法による近似曲線である。 ΔT_d は曲げモーメント M の増加に伴い増加するが、同一の M に対する ΔT_d の変動は大きい。 ΔT_d による M の定量的評価方法については、今後の課題とする。

式(2)により、超音波伝搬時間変化 ΔT_{1c} 、 ΔT_1 から、それぞれ算出した軸力 F^U とひずみゲージを用いて実測した軸力 F の関係を図9に示す。提案した超

音波パラメータ ΔT_{1c} による軸力 F^U (黒塗り印) は、軸力と曲げモーメントの割合にかかわらず $F^U = F$ の同一直線上にある。一方、従来用いられている ΔT_1 による軸力 F^U (白抜き印) は、曲げモーメントが大きい場合、軸力を 10% 程度、過大評価している。すなわち、提案した超音波パラメータ ΔT_{1c} を使用することにより、曲げ変形に影響されずに軸力を精度良く評価することができる。

4. 結 言

本研究では、軸力と曲げモーメントの割合を変えた負荷試験を行い、それぞれの超音波伝搬時間変化を比較することで、超音波軸力測定に及ぼす曲げ変形の影響を明らかにした。さらに、軸荷重と曲げモーメントを受けるボルトにおける超音波軸力算出方法を新たに提案し、実験によってその有効性を示した。得られた結果を要約すれば以下のとおりである。

(1) 曲げモーメントの増加は、軸力と伝搬時間変化の関係の傾きの増加をもたらす。伝搬時間変化に及ぼす曲げモーメントの影響を定量的な式で示した。

(2) 曲げモーメントに影響されず、軸力と一義的な関係にある伝搬時間変化 ΔT_{1c} を提案した。 ΔT_{1c} を用いて軸力評価を行うことにより、曲げ変形に影響されず、軸力を精度良く評価可能なことを実験的に確認した。

(3) 曲げモーメントの増加に伴い、伝搬時間変化 ΔT_d が増加した。これは、伝搬時間変化 ΔT_d より、曲げモーメントを推定できる可能性を示している。

文 献

- (1) 酒井智次・牧野孝之・鳥山晴彦, 超音波を利用したボルト軸力の測定, 機論, 43-366, A (1977), 723-728.
- (2) 安井一・田中宏和・藤井郁也・川嶋紘一郎, 非線形性を考慮した短小ボルトの超音波軸力測定, 機論, 64-618, A (1998), 345-352.
- (3) 安井一・川嶋紘一郎, 仮想音速比法による音弾性ボルト軸力測定, 機論, 66-642, A (2000), 390-396.
- (4) 高圧ガス保安協会編, 石油精製業保安対策に関する報告書, (1995-3), 高圧ガス保安協会.
- (5) 福岡秀和, 音弾性入門(その1 音弾性の理論), 非破壊検査, 33-9 (1984), 633-640.
- (6) 福岡秀和, 音弾性入門(その2 音弾性の実験), 非破壊検査, 33-10 (1984), 769-775.