

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

Axial force measurement of high strength bolts by using both ultrasonic longitudinal and shear waves

上野 幹二*, 山口 隆司**, 小林 昭一***

Kanaji Ueno, Takashi Yamaguchi and Shoichi Kobayashi

*工修 阪神電気鉄道(株) 工務部土木課 (〒553-8553 大阪市福島区海老江 1-1-24)

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

***工博 福井工業大学教授 工学部建設工学科 (〒910-8505 福井県福井市学園 3-6-1)

The objective of this study is to develop a new method for measuring the axial force of high strength bolts utilized in the connections of bridge structures in service condition. At first, based on the acousto-elastic effect, the measurements of ultrasonic wave velocity are carried out. As a result, it is found that the axial bolt force can be estimated by only using a longitudinal ultrasonic wave if the initial length of the bolt is known preciously. Furthermore, another measuring method is developed when speeds of both longitudinal and shear waves are measured. By using this proposed method, it will be applicable even if the initial length of the bolt is unknown in advance.

Key Words : high strength bolts, axial force measurement, ultrasonic waves, acousto-elastic effect

キーワード : 高力ボルト, 軸力測定, 超音波, 音弾性効果

1. はじめに

高力ボルト接合は、一般に橋梁等の現場接合に用いられ、トルクレンチなどにより高力ボルトに所定の軸力を与えることで接合部としての性能を発揮する。しかしながら、締め付け作業時の締め忘れや、長期間経過後の軸力抜けなどの問題から、設計時に期待されただけの軸力が正しく導入されているか否かは接合部が所要の性能を維持しているかに大きく影響し、高力ボルト接合部を有する構造物の維持・管理の面から非常に重要となる。

従来のボルト軸力測定法としては、ひずみゲージをボルトのヘッド部や軸平行部に直接貼る方法、もしくは軸心にひずみゲージを埋め込む方法などがある¹⁾。これらの方法は、主として、実験室レベルで用いられてきたのであるが、あらかじめキャリブレーション試験を必要とし、しかもボルト軸力が0の状態でのひずみ、もしくはボルト軸力が既知の状態

でのひずみを知る必要があり、締め付けたままの状態、すなわち現存するボルト軸力を解放することなく、軸力を測定することは不可能である。一方、実橋では、ボルトをハンマーでたたき、いわゆるたたき点検²⁾が軸力管理の主な手法であり、高精度な測定のためには熟練した技術者を必要とすることから、その省力化が強く求められている。また、最近では、ハンマーによる打撃後の反発力波形と加速度波形を記録し、ニューラルネットワークにより軸力を推定する新たな方法も提案されているが³⁾、高精度化のためには、十分な学習データを必要とすることなどから、高力ボルトの軸力測定法として確立されるには至っていない。

本研究では、このような状況を踏まえ、高力ボルト接合部の健全性評価の鍵となる高力ボルトの軸力を、応力の変化に伴って超音波(弾性波)の伝播速度が変化するという音弾性効果⁴⁾を利用して、高力ボルトが締め付けられたまま、なるべく簡単に

つ精度よく測定することを試みた。特に、超音波の縦波と横波の2種類の波を用いて測定を試みている点、実際の橋梁に良く用いられる高力ボルト(M22)を対象としている点、および、ボルトヘッドの表面を加工せずに、なるべく簡単に測定することに主眼を置いている点などに本研究の特徴がある。

2. 音弾性法則

一般に、応力の変化に伴って弾性波の伝播速度が変化する現象は音弾性効果として知られ、これを利用して、材料内あるいは構造要素内に存在する応力を評価・推定する技術は音弾性と呼ばれる。

高力ボルトの軸力測定を考えた場合、高力ボルトの軸部は一軸引張応力状態にあるとみなすことができる。この時、応力と伝播速度の変化は次式に示す最も簡単な一次元応力状態での音弾性法則が適用可能である。

$$\frac{\Delta V}{V_0} = K\sigma \quad (1)$$

ここに、 K は音弾性定数、 σ は応力、 V_0 は無応力時の超音波伝播速度、 V は応力を受けた時の超音波伝播速度であり、 ΔV は超音波伝播速度の差($\Delta V = V - V_0$)である。

これより、音弾性定数 K が既知であれば、超音波伝播速度の変化を計測することで応力の推定が可能であることがわかる。なお、音弾性定数 K は、あらかじめ載荷実験などにより調べておく必要があるが、ヤング率と同様に、材料に固有のものとして取り扱うことができることが知られている。

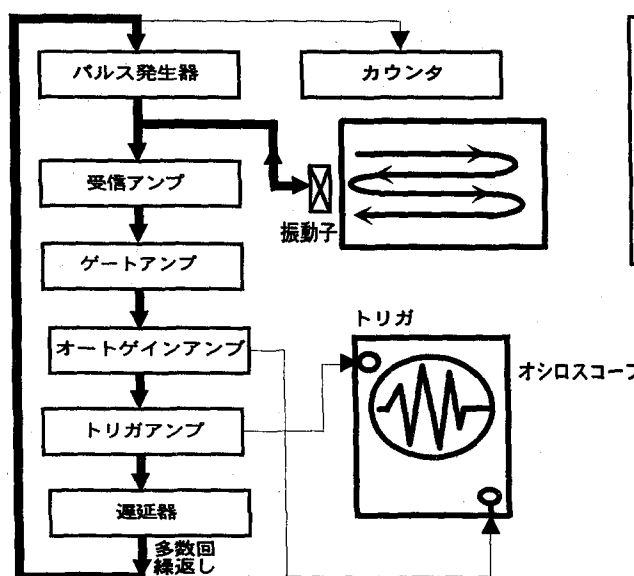


図1 シングア라운드計測装置ブロック図

3. 高精度音速測定

弾性波の伝播速度の変化から応力を評価する場合、式(1)からわかるように、いかにその伝播速度を精度良く計測するかということが重要となる。本研究では、超音波の伝播時間を高精度に測定できる方法の1つとして知られているシングア라운드法を用いることとした。シングア라운드法は、トランスデューサーによる超音波の送・受信を多数回繰り返し、そのつど得られる伝播時間の積算値から伝播時間の平均値を求める方法であり、積算値を計測し高精度化を図っている⁴⁾。また、波形の一部を取り出し、これをもとに時間計測を行うので、ボルトヘッドやナットによる波形の乱れの影響を受けない。シングア라운드装置のブロック図を図1に示す。

4. 応力作用下の超音波伝播特性

ある応力作用下での超音波の伝播特性を調べるために、引張載荷実験を行い、荷重変化に伴う超音波伝播時間をシングア라운드計測器により計測した。ここでは、既に述べたように、橋梁の現場接合部で一般的によく用いられる高力ボルトセット(M22(F10T))を対象とした。

4.1 実験概要

用いた実験システムを図2に示す。載荷は、M22高力ボルトの標準導入軸力を参考に最大240kNまで載荷することとした。本実験システムにおいては、伝播時間を計測するためのシングア라운드装置(UVM2、超音波工業製)が最も重要である。軸力

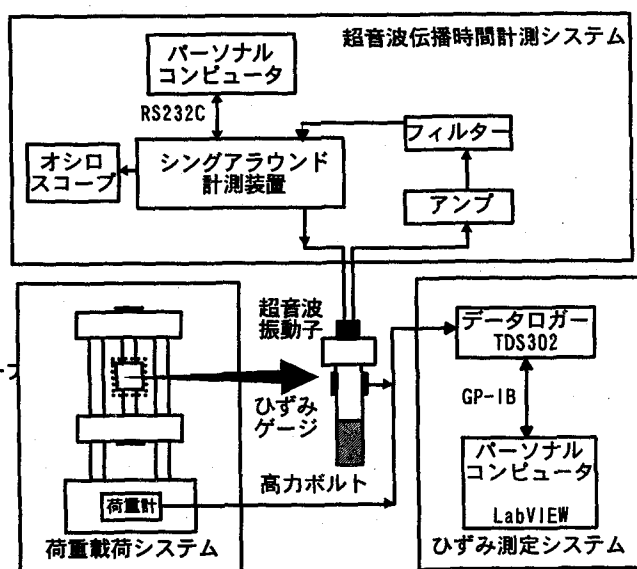


図2 実験システム

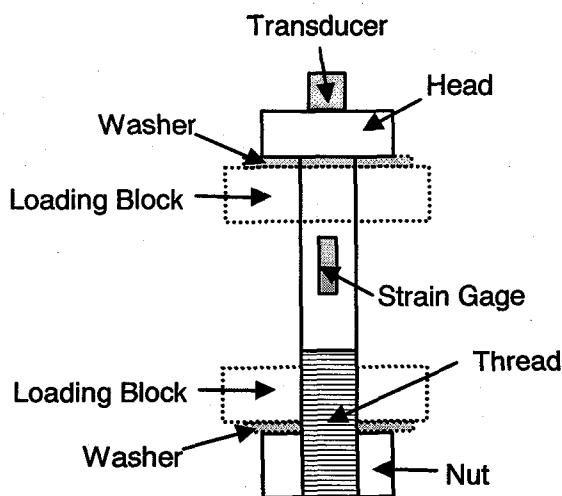


図3 ひずみゲージおよび
トランスデューサー設置位置

測定のためのひずみゲージの貼付け位置，および超音波送受信トランスデューサーの設置位置を図3に示す．なお，超音波送受信のトランスデューサーは，縦波用として5Z5ND-S（トキメック社製（5MHz））を，横波用としてS2Z8×4S（富士セラミックス社製（2MHz））を用いた．また，引張載荷実験と同時に，外気温の変化による影響を除くための温度補正用の高力ボルトの超音波伝播時間（無載荷時）も計測した．

実験供試体を表1に，実験ケースを表2に，それぞれ示す．トランスデューサーの接触条件については，比較的送信・受信が容易な縦波については，治具による押し付けのみとし，送信・受信の困難な横波については，縦波と同様の治具による押し付け以外に，高力ボルトヘッドにトランスデューサーを直接貼り付けることも試みた．なお，ボルトの余長は，すべて零とした．

4.2 キャリブレーション実験

式(1)を用いてボルトの軸力測定を行うには，無応力時の超音波伝播速度（ V_0 ）を知る必要がある．そのためには，正確な伝播時間が必要となる．しかし，シングアラウンド計測器から得られる伝播時間は，供試体中を超音波が伝播する時間以外に，トランスデューサーでの遅れ時間，ケーブルでの遅れ時間などの様々な遅れ時間を含んでおり，正確な無応力時の超音波縦波および横波の伝播速度を調べるためにはこれらの影響を除く必要がある．したがって，本研究では，首下長さの異なるキャリブレーション用

表1 実験供試体の諸元 単位：mm

供試体名	ボルトヘッド高さ	首下長さ	全長
A	13.905	100.225	114.130
B	13.910	100.265	114.175
C	13.895	100.225	114.120
D	13.870	100.085	113.955
E	14.100	110.250	124.350
F	14.200	110.700	124.900

表2 実験ケース

(a) 超音波縦波

実験ケース	L1	L2	L3	L4
使用ボルト	A	B	B	A

(b) 超音波横波

実験ケース	S1	S2	S3	S4	S5	S6
使用ボルト	E	F	C	D	B	A
接触条件	押付	押付	貼付	貼付	貼付	貼付

実験ケース	S7	S8	S9	S10	S11	S12
使用ボルト	B	A	B	B	A	B
接触条件	貼付	貼付	貼付	貼付	貼付	貼付

ボルト（首下長さ：100mm, 130mm, 150mm）を用いてキャリブレーションを行った．その結果，計測システムにおける遅れ時間は，縦波で $7.011\mu\text{sec}$ ，横波で $1.710\mu\text{sec}$ であることがわかり，M22 高力ボルトの無応力時の超音波縦波，および超音波横波の伝播速度を， 5919m/s ， 3245m/s とそれぞれ決定した．なお，これらの数値の決定には，同一ボルトに対して3回計測した結果の平均値をもとにしている．

4.3 実験結果

引張載荷実験から得られた超音波伝播時間をもとに求めた応力と超音波伝播速度変化率の関係を，実験ケースL2（縦波），S4（横波）を例に図4に示す．なお，引張荷重載荷に伴い，ねじ部と軸平行部での伸び量が異なるが，ねじ部の平均の伸びの計測結果をもとに，伝播速度を求める段階で考慮している．

図より，縦波と横波とを比較した場合，横波は縦波ほどははっきりした線形関係にないことがわかる．これは，横波が，縦波と振動方向が異なるため，送受信トランスデューサーと高力ボルトヘッドとの間でのエネルギー損失や高力ボルト内での波動の減衰が大きく，その結果，測定精度が悪くなったためと考えられる．

図中の直線の傾きは，(1)式での音弾性定数 K に相当する．したがって，最小2乗法によりこの直線の回帰直線を決定し，傾きを求め，これをM22高力ボルトの音弾性定数として決定した．求められた超音波縦波および横波の音弾性定数を図5にそれぞれ示す．縦波については，ほぼ一定の値となっているが，

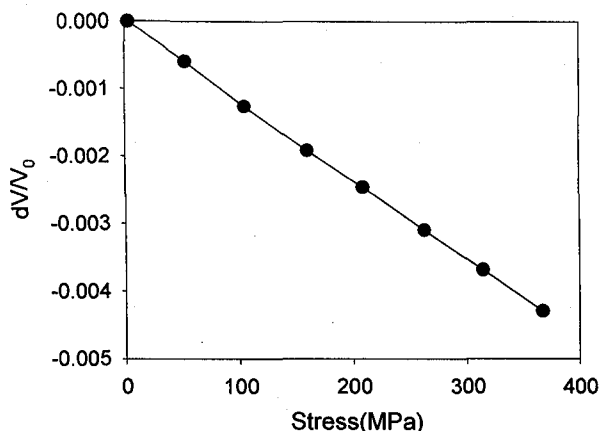


図 4 (a) 応力-速度変化率関係 (L2)

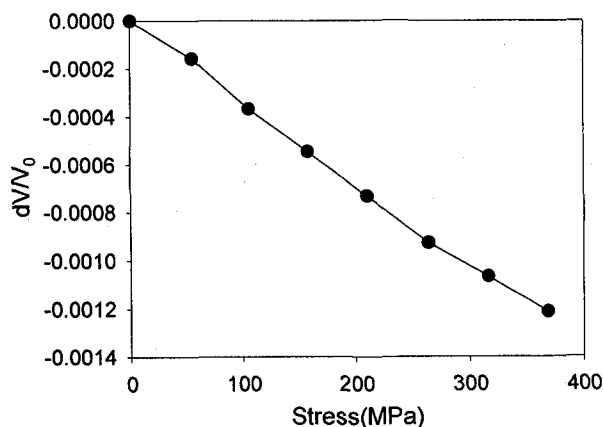


図 4 (b) 応力-速度変化率関係 (S4)

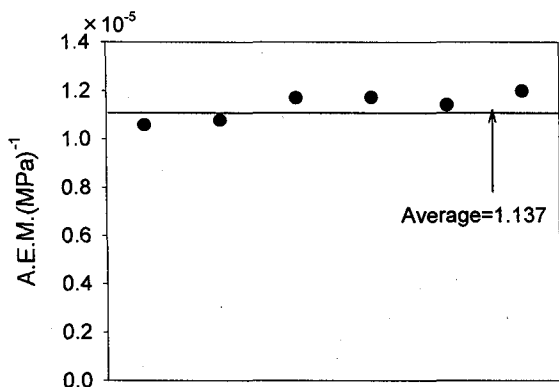


図 5 (a) 縦波の音弾性定数

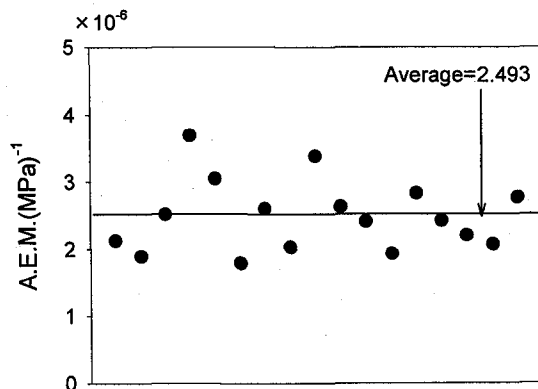


図 5 (b) 横波の音弾性定数

横波については、ややばらつきが認められる。ここでは、それぞれの平均値を音弾性定数と決定し、超音波縦波の音弾性定数を $1.1374 \times 10^{-5} (\text{MPa})^{-1}$ に、横波の音弾性定数を $2.493 \times 10^{-6} (\text{MPa})^{-1}$ とした。

5. 超音波を利用した高力ボルト軸力評価

5.1 縦波のみによる高力ボルト軸力評価

以下の方法で、超音波縦波のみを用いてボルト軸力の評価を試みた。まず、式(1)を変形して、

$$\frac{\Delta V}{V_0} = K\sigma = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\sigma}{E_{\text{eff}}} - \frac{\Delta T}{T_0}$$

さらに、 σ について整理すると、

$$\left(\frac{1}{E_{\text{eff}}} - K \right) \sigma = \frac{\Delta T}{T_0} \quad (2)$$

となる。ただし、 E_{eff} は、ナット部分のねじ部は伸びないとし、軸平行部とねじ部が一様に伸びると仮定したときの平均剛性であり、次式で表される（記号については図 6 参照）。

$$E_{\text{eff}} = \frac{L}{L_1 + L_2 \times \frac{A_1}{A_2}} \times E \quad (3)$$

この式(2)をもとに、高力ボルトの軸力の評価を行った結果の例を図 7 に示す。図の横軸は引張载荷実験での実際の応力を示し、縦軸は評価した応力を示す。ただし、初期伝播時間(T_0)は、ボルトの全長を、キャリブレーション実験で求めた超音波縦波の伝播速度で除すことによって求めた。音弾性定数についても同様に、キャリブレーション実験で求めた値を用いた。ボルトの全長については、個々のボルトにおいてばらつきが認められるが、なるべく少ない情報で軸力評価を行うという観点から首下長さの公称値を用いることとした。

図より、実際のボルトに導入される軸力が、軸平行部で約 700MPa であり、軸力の測定誤差にして約 150MPa、つまり 30% の範囲内にあり、現状のたたき点検による軸力管理の精度から考えると本評価方法は有効であると思われる。しかし、このように超音波縦波だけでボルト軸力を評価する場合、初期伝播時間(T_0)、言い換えれば、初期長さに大きく影響

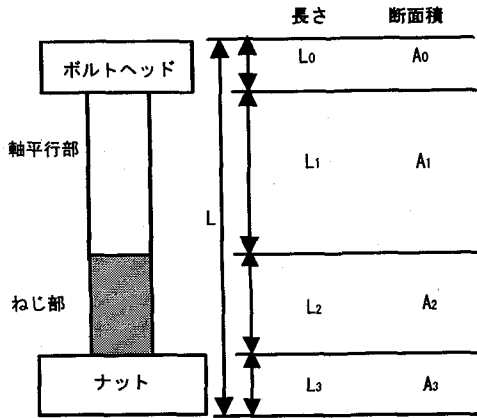


図6 高力ボルト各部の断面積と長さに関する記号

される。本実験で用いたボルトの初期長さを計測した結果、最大 0.6mm の差が確認され、これは初期伝播時間にして約 0.1μsec の差に相当し、軸力としては約 170MPa に相当する。したがって、この縦波のみによる軸力評価において、初期長さとして、公称値を用いる場合、これ以上の高精度な評価は困難であり、公称初期長さと実際の初期長さとの差が大きい場合は、さらに評価の精度は悪化することもある。

5.2 縦波・横波の2つを用いた高力ボルト軸力評価

前節の結果を踏まえ、正確なボルトの初期長さが不明でも軸力評価がより精度良く行える方法として、超音波縦波の他に、新たに超音波横波も用いた軸力評価を試みた。

式(1)より、超音波縦波、および横波については次式がそれぞれ成立する。

$$\left(\frac{1}{E_{eff}} - K_L \right) \sigma = \frac{T_L - T_{L0}}{T_{L0}} = \frac{T_L}{T_{L0}} - 1 \quad (5)$$

$$\left(\frac{1}{E_{eff}} - K_S \right) \sigma = \frac{T_S - T_{S0}}{T_{S0}} = \frac{T_S}{T_{S0}} - 1 \quad (6)$$

この2式を用いて、応力について整理すると、

$$\sigma = \frac{B - A}{A \left(\frac{1}{E_{eff}} - K_S \right) - B \left(\frac{1}{E_{eff}} - K_L \right)} = \frac{E_{eff}(B - A)}{A - B - E_{eff}K_S A + E_{eff}K_L B} \quad (7)$$

となる。ただし、

T_{L0} : 縦波の初期伝播時間 (無応力時)

T_{S0} : 横波の初期伝播時間 (無応力時)

T_L : 引張荷重載荷時の縦波の伝播時間

T_S : 引張荷重載荷時の横波の伝播時間

K_L : 縦波の音弾性定数, K_S : 横波の音弾性定数

E_{eff} : ボルト全体が一様に伸びたと仮定したときの

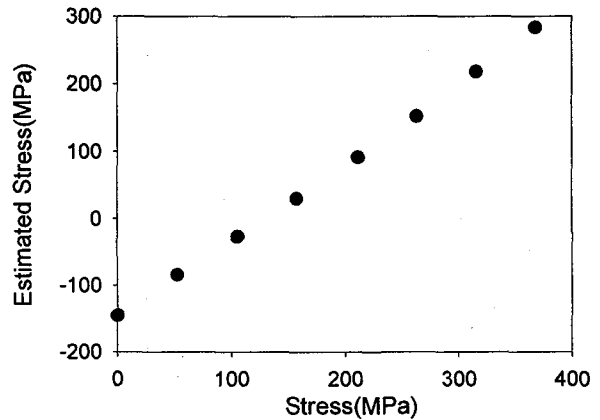


図7 縦波のみを用いた軸力評価(L3)

ヤング率 (等価ヤング率)

A : 無応力時の超音波伝播時間比

B : 載荷時の超音波伝播時間比

$$A = \frac{T_{S0}}{T_{L0}}, \quad B = \frac{T_S}{T_L}$$

なお、 E_{eff} については、前節と同様の方法で算出した。 A 、 K_L および K_S は、キャリブレーション実験で得られたデータをもとに算出した。

得られた結果の例を図8に示す。図8(a)は縦波については実験ケースL3から得られた伝播時間、横波については実験ケースS7から得られた伝播時間を用いて軸力の評価を試みた結果である。縦波・横波両方を用いて評価した方が、縦波・横波それぞれ単独で軸力を評価した結果より、真値との誤差が小さくなり、精度が改善されていることがわかる。一方、図8(b)は、縦波L2、横波S5の結果を用いて軸力評価を行った結果である。縦波単独で軸力を評価した結果より誤差が大きくなっていることがわかる。これは、縦波と横波の伝播時間比を用いることから、いずれの波についても精度良い測定が重要となるが、横波の測定精度が悪く、横波の情報を新しく加えることによって、さらに誤差が大きくなったためと考えられる。

次に、測定回数を増やし、これらを平均することで測定の精度を上げるという観点から、ボルトBに対するすべての実験ケースでの伝播時間の平均値を用いて軸力評価を行った結果を図9に示す。図より、軸力の測定誤差が最大 100MPa であり、縦波のみで評価を行った場合よりも改善されていることがわかる。

したがって、伝播時間を正確に計測すること、特に横波の伝播時間を正確に計測することができれば、ここで行ったボルト軸力評価法は、既設構造物の高力ボルト軸力管理に有効であると考えられる。

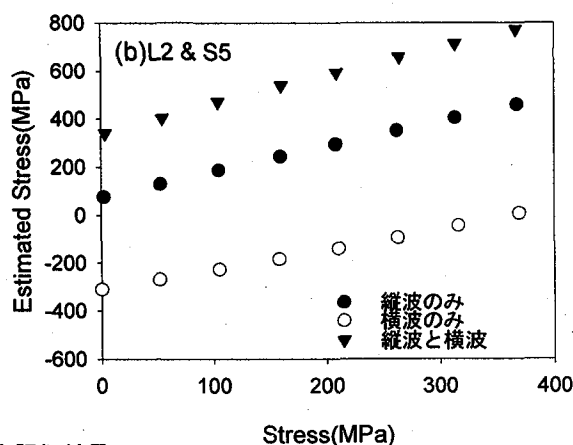
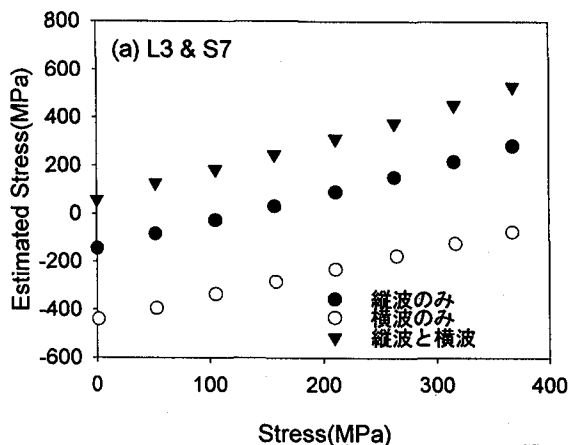


図8 軸力評価結果

6. 結論および今後の課題

本研究では、高力ボルトの軸力を、軸力を解放することなく、締められた状態のままで、なるべく簡易的に計測する方法の確立を目的として、弾性波の音弾性効果に注目した計測方法について実際に高力ボルトに引張荷重を载荷し、検討した。以下に得られた結論、および今後の課題を示す。

- 1) 高力ボルト M22(F10T)における超音波縦波の音弾性定数を $1.137 \times 10^{-5} (\text{MPa})^{-1}$ 、横波の音弾性定数を $2.493 \times 10^{-6} (\text{MPa})^{-1}$ と決定した。また、無応力状態でのボルト内における超音波縦波の伝播速度を 5919m/s、超音波横波の伝播速度を 3245m/s と決定した。
- 2) 既設構造物接合部の高力ボルトの軸力管理に対して、本研究で行った縦波と横波の2つの超音波を用いる評価法は、たたき点検などによる現状の軸力管理の精度から考えると適用可能であると考えられる。また、使用するトランスデューサーの振動数は、標準的な高力ボルトに対する適用という点からは、振動数 5MHz 以上とすることが望ましい。
- 3) 本研究では、首下長さに対して塗膜厚が非常に小さいことから、高力ボルトヘッドを無塗装で実験を行い、軸力評価を行った。しかしながら、実用化にあたっては、この塗膜厚の影響をあらかじめ評価しておく必要がある。
- 4) さらに精度の良い軸力の評価を行うには、横波の計測精度を上げる必要がある。例えば、受信波をはっきり区別できる、矩形波のようなパルス波をボルトに入射する方法などが考えられる。
- 5) 本研究で提案した計測法の実用化にあたって

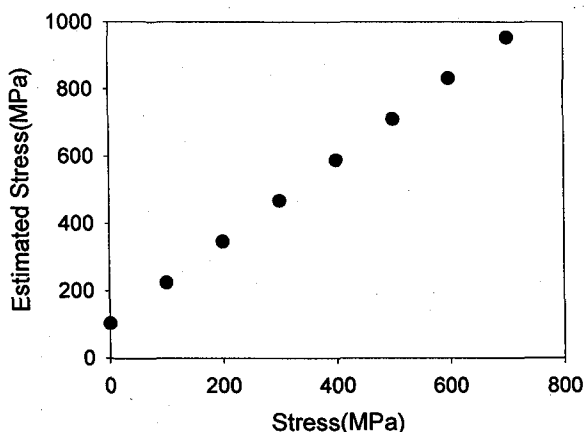


図9 軸力評価結果 (平均値)

は、計測を容易にするという観点から、縦波と横波をトランスデューサーの取り替えなしに計測できるトランスデューサーの開発が望まれる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 西岡敬治, 乙黒幸年, 矢幡健, 長沼敏彦, 吉川紀: 施工後 10 年を経過した橋梁の高力ボルト継手の維持管理に関する諸問題: 構造工学論文集 Vol.43A, pp.961-966, 1997.
- 3) 三上市蔵, 田中成典, 樋渡達也, 山浦忠彰: 鋼橋の高力ボルトの軸力推定システム, 土木学会論文集 No.549/I-37, pp.77-90, 1996.
- 4) 福岡秀和・戸田裕己・平尾雅彦: 音弾性の基礎と応用, オーム社, 1993.

(1999 年 9 月 17 日受付)