

音速比音弾性法による 橋梁用高力ボルトの軸力測定

Measurement of axial stress in high tension bolts by acoustoelastic velocity-ratio method

戸田裕己*, 吉川 紀**, 矢幡 健***, 横山計次****, 呉 尚弘*****

Hiroki TODA, Osamu YOSIKAWA, Takeshi YAHATA

Keiji YOKOYAMA, Yoshihiro GO

*工博 和歌山大学システム工学部 (〒640 和歌山市栄谷930)

**工博 (財) 阪神高速道路公団管理技術センター (〒541 大阪市中央区南本町4-5-7)

*** (株) 創成コンサルタント (〒540 大阪市中央区和泉町2-1-1)

****工博 (株) 酒井鉄工所 テクノサービス部 (〒590 堺市出島西町3-1)

***** (株) 酒井鉄工所 テクノサービス部 (〒590 堺市出島西町3-1)

An acoustoelastic velocity-ratio method for estimating the axial stress in high tension bolts were studied to check the adaptability in a field measurement. A velocity-ratio acoustoelasticity constant was independent of bolt temperature and also was almost constant for some bolts produced by various makers. Although a velocity-ratio slightly depended on both a bolt temperature and a production factory, these dependences were smaller than those by other acoustoelasticity method. These facts indicate the effectiveness of the present method for nondestructive bolt axial stress measurements without demanding any preparatory checking at initial stress free state.

1. はじめに

鋼橋における現場継手の手法には、現場溶接と高力ボルトによる2工法の接合が一般的である。そのうち高力ボルト接合は現場継手の95%をしめている。高力ボルト接合で最も重要な現場締付け管理はボルト締付け機器の開発により現在では容易に管理されるようになった。しかし、ボルト締付け順序および鋼板のなじみ等によりボルトにゆれが生じているのが現状である。

一方、高力ボルトの遅れ破壊現象は、F13T級をF10T級に変更したことにより著しく減少している。使用中の高力ボルト継手の軸力は、ハンマーによるタキ点検を行っているのが一般的である。しかし、これらの方法ではボルトの緩みがある程度感知できるものの、定量的な締付け軸力（以後、軸力と記す）の検査ができない。

最近、ボルトの軸力を音弾性法を利用して測定する方法が用いられるようになり、まだ適用の困難さはあるが、定量的な軸力測定が可能になってきている^{(1)~(7)}。

音弾性法は超音波の音速が応力に依存して変化する物理現象を利用し、音速を測定して応力を評価する方法である。

市販されている音弾性ボルト軸力計では、縦波超音波をボルトの軸方向に伝ばさせる方法が採られている。超

音波の音速を直接測定する方法がないので、超音波の1往復する伝ば時間から音速を割り出す。この時、ボルトの長さの製作公差が問題になる。この公差と、わずかな材質の不均一により、軸力ゼロ時の伝ば時間がボルトごとに異なるため、予めこの値を測定しておかなければ、正しい軸力測定ができない。また、音速はボルトの温度にも依存して変化するため、ボルト継手部の、温度が正確にわからない場合には、軸力測定がさらに曖昧になる恐れがある。

本論文では、これらの問題点を克服するため、横波超音波と縦波超音波との音速比を測る音速比音弾性法⁽⁸⁾に着目し、この方法で予め軸力ゼロ時の伝ば時間を求めておくことなく、継手部のボルト軸力をその状態で評価する可能性と温度依存性の低減効果について調べた。特に実用性を重視し、数種類のボルトの表面仕上げをしない状態での測定も試みた。

2. 音速比音弾性法

ボルトを締付けると、軸力による伸び分だけ超音波の伝ば時間が長くなる。また、その応力負荷部を伝ばする超音波の音速が引張応力に比例して遅くなる音弾性効果が重畳して、さらに伝ば時間が長くなる。高力ボルトの音弾性効果による伝ば時間変化は伸びによる時間変化の

3～4倍もあるので、総伝ば時間の変化は増大し、測定が容易になる。しかし、ボルトは長さや組織の微妙な違いにより、軸力ゼロ時の超音波の伝ば時間はボルトごとに異なっている。そのため、縦波の伝ば時間だけを測る従来の超音波法では、継手部ボルトの測定だけでは軸力に相当する伝ば時間変化分が求められず、軸力を正しく評価することができない。

音速比法による現場測定の原理は次の通りである。ボルトの頭部から入射した縦波と横波は同じ距離を1往復する。そのため、2つの波の伝ば時間比から容易に2つの波の音速比が測定できる。

音速比Rとボルト軸力Nの関係は式(1)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{V_L}{V_S} = R_0 + C_R \beta \frac{N}{A_0} \\ C_R &= R_0(K_S - K_L) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 R_0 は軸力ゼロ時の音速比、 β は有効負荷長比(L_0/L)、つまり軸力のかかる軸長さのボルト全長に対する比である。 V_L と V_S は、それぞれ縦波と横波の音速、 K_L と K_S は、それぞれ縦波と横波の音弾性定数、 C_R はボルトの音速比音弾性定数である。 A_0 はボルトの横断面積である。すでに述べたように、音速を直接測定することはできないので、2つの超音波の伝ば時間を測ってその比を求める方法がとられる。ボルトの全長を L 、軸力のかかる部分の軸長を $L_0(=\beta L)$ とすると、縦波と横波の伝ば時間 T_L と T_S はそれぞれ式(2)と式(3)で与えられる。

$$T_L = \frac{2L_0(1 + \frac{N}{A_0 E})}{V_{L0}(1 - \frac{K_L N}{A_0})} + \frac{2(L - L_0)}{V_{L0}} \quad (2)$$

$$T_S = \frac{2L_0(1 + \frac{N}{A_0 E})}{V_{S0}(1 - \frac{K_S N}{A_0})} + \frac{2(L - L_0)}{V_{S0}} \quad (3)$$

ここで、 E はボルトの縦弾性係数であり、 V_{L0} と V_{S0} はそれぞれ軸力ゼロ時の縦波と横波の音速である。式(2)(3)の第1項は長さが伸びた軸力負荷がかかっている軸長部の伝ば時間であり、第2項は軸力ゼロ部の伝ば時間である。式(2)と式(3)より横波と縦波の伝ば時間比 R_T は近似的に式(4)で与えられる。

$$R_T = \frac{T_S}{T_L} \approx R_0 + \beta R_0(K_S - K_L) \frac{N}{A_0} \quad (4)$$

(4)の右辺は式(1)の第2式を使うと、式(1)の右辺と同じになる。したがって、 R_T と R は近似的に同じになり、式(5)が得られる。

$$R_T \approx R = R_0 + C_R \beta \frac{N}{A_0} \quad (5)$$

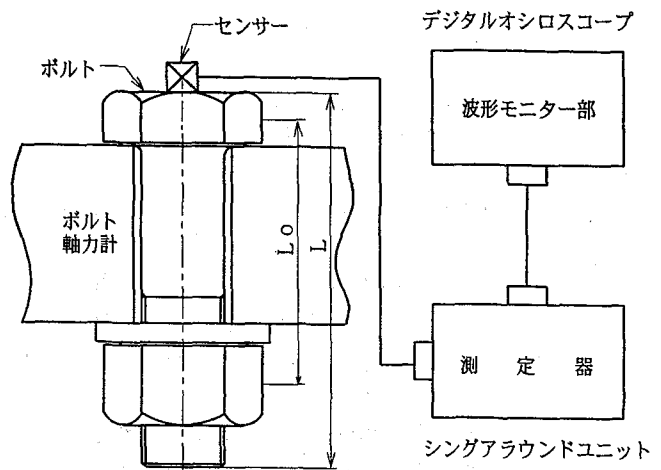


図1 測定装置概略図

軸力ゼロ時の音速比 R_0 はボルトの材質や形状、製造方法により決まる定数であり、ボルトの長さには影響されにくい。したがって、ボルトごとの軸力ゼロ時の音速比と音速比音弾性定数のばらつき、およびこれらの温度依存性が小さければ、この音速比法の軸力測定への適用の有効性が増すことになる。

3. 実験方法

3.1 測定方法

測定方法の概略図を図1に示す。高力ボルトを軸力計にセットし、軸力を段階的に増加させてボルト軸力の測定を行った。

超音波の送受信はボルトの頭部に取り付けた送・受信子で行った。送・受信子には縦波用、横波用ともに周波数5MHz、振動子サイズ0.25インチの市販の探触子を用いた。送・受信子の接触媒質にはアラルダイト接着材の主材を用いた。なお、送・受信子の押し付け力は約2kgfとした。伝ば時間の測定は、シングアラウンド音速測定装置を用いて、ボルト底面からの第1反射波のシングアラウンド周期(遅延線のみによるシングアラウンド周期を差し引いた値)を測った。また、音速比に及ぼす温度の影響を調べるため、装置を恒温室にセットして測定した。なお、細長いボルトの軸方向に伝ばする超音波の音速の測定は一般に難しく、正確さを欠くといわれている。なぜならば、超音波の音場が遠距離音場となるばかりでなく、側壁が近い上に、ネジ部で強い散乱が起こるなど、音速測定の条件が非常に悪いためである。しかし測定結果に示すように、同一形状のボルトを対象にし、同一の組み合わせの縦波、横波用の送・受信子を用いる限り、音速比の測定値は安定しており、測定の再現性は非常に良い結果が得られた。

3.2 供試ボルト

本研究の目的の1つである、高力ボルトの問題点を明

表1 供試ボルトの種類

記号	ミル メーカ	ボルト メーカ	備 考
No.1	A	イ	表面処理無
No.2	B	ロ	表面処理無
No.3	C	ハ	表面処理無
No.4	D	ニ	表面処理無
No.5	E	ホ	表面処理無
No.6	A	イ	両端面仕上げ
No.7	A	イ	メッキ (厚み:70 μm)
No.8	A	イ	塗装仕上げ (厚み:250 μm)

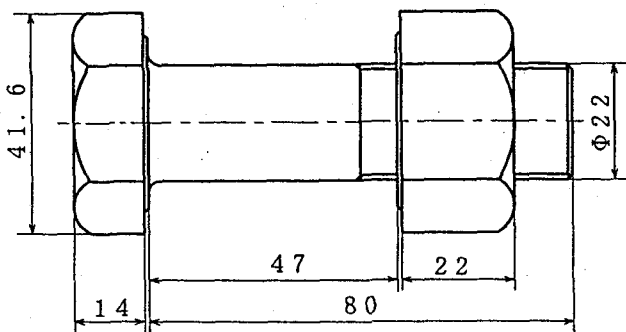


図2 ボルト形状・寸法

らかにするため、表面仕上げなどの加工を一切しないものと、表面状態の影響を調べるため、両端面仕上げ、亜鉛メッキ仕上げ、油性ペイント塗装仕上げを施したものを用意し、実験を行った。ボルトはF10TのM22で全数8本とした。ミルメーカとボルトメーカの違いをそれぞれA～Eとイ～ホと区別して表1に示す。なお、備考欄には、仕上げの種別を示す。供試ボルトのうちNo.5はボルト頭部中央部にJISマークとメーカ表示の刻印があるが、このボルト以外では、頭部の刻印が周辺部にあり、中央に直径10mm程度の平坦部がある。供試ボルトの形状・寸法を図2に示す。M22×80 (F10T)、締付け板厚は47mmである。有効負荷長比 β は0.69である。この算出では、ボルト頭部とナット部において、軸力はその厚さ方向に軸力が三角形に分布すると仮定した。

4. 実験結果

実験結果を以下に示す。No.5のボルトは頭部中央部にある刻印のため、超音波の送受信が困難で測定ができなかったため、このボルトを除く7本のボルトでの実験結果を示す。

なお、測定では、ボルトにより第2エコーが受信できないこともあり、また現場では簡単な計測の方が好まし

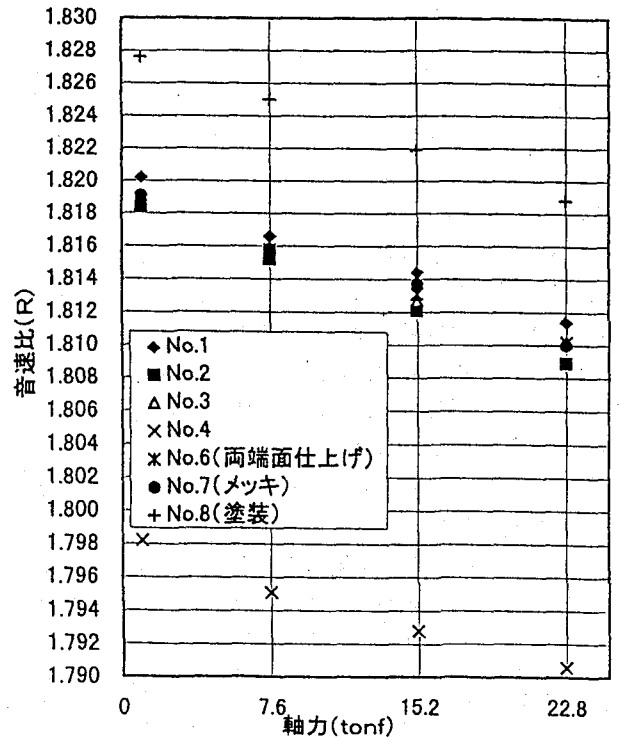


図3 軸力と音速比の関係 (温度25℃一定)

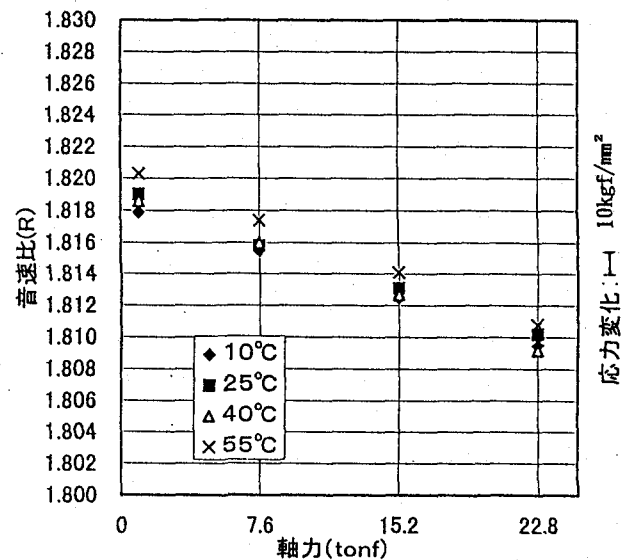


図4 軸力と温度をパラメータにした軸力と音速比の関係

いので、第1エコーのみを用いて測定した。

まず室温25℃における、負荷軸力0tonから23tonの変化に伴う音速比の変化の様子をまとめて図3に示す。全てのボルトで、音速比の変化はほぼ直線的であり、各々のデータを直線近似して得られる直線群の勾配はほぼ一定となった。この勾配から音速比音弾性定数は $(4.2 \pm 0.1) \times 10^{-4} (\text{tonf}^{-1})$ の範囲に納まっている。

ここで、No.4のデータが他のグループと離れたのは、このボルトの底部が凹面状に窪んでおり、底面での超音波の反射の際に波形がひずんだためと思われる。また、

No.8のデータも他と離れているが、このボルトは頭部に膜厚 250 μ m の油性ペイントによる塗装を施しており超音波の送受信の効率が悪くなり、波形がひずんだためと思われる。これらの2本のボルトを除外すれば、他の5本の軸力ゼロ時の音速比のばらつきは ± 0.0013 であり、このばらつきによる軸力の評価誤差は ± 3 tonfとなる。同図において No.1 とNo.6, No.7, No.8は同一メーカーのボルトであり、これらの測定結果から、塗装したボルトを除き、測定データはほぼそろっている。今回の実験では、ボルト測定本数が少なく、まだ明確ではないが、同一メーカー製のボルトでは軸力ゼロ時の音速比はほぼ一定値に納まり、両端面の仕上げの有無やメッキの有無の影響はあまり受けない結果を得た。

次に、端面を仕上げたボルトNo.6を用いてボルト温度の影響を調べた結果について述べる。

ボルト設定温度を変えて求めた、軸力に伴う音速比変化を図4に示す。同図より10℃から55℃まで変化すると、音速比の値はわずかに増加するが、音速比音弾性定数は変化せず一定である。なお、縦波と横波の各々の音速-軸力関係から求めた縦波音弾性定数と横波音弾性定数ともに温度依存性が全くない結果を得た。

軸力に対して垂直方向に伝ばする縦波と横波は共に音弾性定数が温度に依存して変化することが知られており⁽⁹⁾、このため音速変化と応力の関係が複雑になり、応力評価が難しかった。しかしボルト軸力等のように軸力と超音波の伝ば方向が平行になる場合、音速比音弾性定数は温度依存性がなくなり、音速比の測定値からの軸力評価が簡単である。

なお、音速比の値は45℃の温度上昇に対して0.0022増加する。したがって、ボルト温度の推定を10℃誤っても軸力評価誤差は1.2tonf程度に収まり、音速比音弾性法の測定ではボルト温度の影響が小さいことがわかった。

従来の縦波を用いる方法で、ボルト温度10℃の変化に対して評価軸力誤差が約3tonfであることに比べ、音速比法の優位性が明らかである。

5. まとめ

音速比音弾性法の高力ボルトの軸力測定への適用の可能性を調べ、次の結果を得た。

(1) 音速比音弾性法では、無軸力時での音速比R。の

バラツキは正常に測定できなかったボルトを除けば軸力換算で ± 3 tonf以下であった。よって、無軸力時の測定をすることなく実用上十分な精度で軸力測定が可能であることが確認できた。

(2) 音速比音弾性定数はメーカーに関係なくほぼ一定であった。

(3) 音速比音弾性定数はボルト温度に依存せず、10℃～55℃の範囲で一定であった。なお、音速比は温度依存性があるが、ボルト温度の推定を10℃間違っても、それによる軸力評価誤差は1.2tonfであった。

(4) 音速比音弾性法では、頭部に刻印のあるボルトや、底部が窪んだボルト、頭部に厚膜の油性ペイントを塗布したボルトを除けば、通常のみで軸力測定が可能である。

なお、より正確な測定をするには、音速をボルト底面からの第1エコーと第2エコーの伝ば時間の差から測定する方がよいが、ここでは通常状態のボルトでは第2エコーが減衰して得られにくいので第1エコーのみ測定した。今後の課題として、ボルト端面の簡便な処理法の工夫や、非接触で測定できるEMAT（電磁超音波素子）の利用を検討すること、現場での取扱の簡単なものとする必要がある。

参考文献

- (1) 酒井・牧野・鳥山：機会学会論文集，43-366(1977) pp723
- (2) 山本・茂木：機械学会誌，82-731(1979)，pp1166
- (3) J.S.Heyman：Experimental Mechanics.17(1977)，pp183
- (4) S.G.Joshi and R.G.Pathare：Ultrasonics，22(1984)，pp270
- (5) 岡田：音弾性研究会資料
日本非破壊検査協会No.34(1989)，pp58
- (6) 福岡・他：音弾性研究会資料
日本非破壊検査協会 No.54(1990)，pp34
- (7) 森・竹腰・八木沢・大藪・中村：
機会学会論文集，A47-413(1980)，pp102
- (8) 瓜生・戸田・福岡：音弾性研究会資料
日本非破壊検査協会 No.83(1992)，pp36
- (9) 小堀・岩清水：機械学会論文集，54-498.A，(1988)，pp245

(1997年 9月26日受付)