

2 次高調波超音波を用いたボルト締結状態の評価に関する一検討

An Evaluation Method of Fastened Bolts Using Second Harmonic Ultrasonic Pulse

○米内 巨樹*, 福田 誠*, 今野 和彦*

○Okii Yonai*, Makoto Fukuda*, Kazuhiko Imano*

*秋田大学 大学院工学資源学研究所

*Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

キーワード：2 次高調波超音波(Second Harmonic Ultrasonic Pulse), ボルト締結体(Fastened Bolts)
接触型音響非線形性(Contact Acoustic Nonlinearity), 塑性変形(Plastic Deformation)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院工学資源学研究所 電気電子工学専攻
福田誠, Tel : 018-889-2494, Fax : 018-837-0406, E-mail : mfukuda@gipc.akita-u.ac.jp

1. はじめに

ボルトは工場や橋などの多くの構造物の締結に使用されており, このボルトに緩みや疲労破壊による損傷が生じた場合, 構造物の安全性を保てなくなり重大な事故に繋がる可能性が出てくる¹⁾. このような事態を防ぐために, 様々なボルトの点検法が研究・実用化されている. 一般的に広く普及している点検方法としてトルク管理法がある. これは, トルクレンチを使用して適性トルクまで締め付ける方法であり, 簡易的にボルトの締結状態の検査ができるがトルクレンチの精度に問題が生じる場合がある²⁾. このほかにも, ボルトにロードワッシャを埋め込み軸力の変化により緩みを検出する方法があるが, 全てのボルトにロードワッシャを取り付けなければならないという問題がある³⁾. そのため, 複数のボルトを1つのシステムで点検できる手法が要求される. そこで, 超音波探傷による非破壊検査の分野で研究されている高調波を用いた探傷法に注目した. 固体の

接触面に大振幅の有限振幅超音波を伝搬させると接触面が衝突を繰り返すことにより高調波が発生することが知られている. この現象は接触型音響非線形性(CAN:Contact Acoustic Nonlinearity)と呼ばれている. 締結されたボルト-ナットのねじ山の接触面は固体の接触面と同じ状態であり, この接着面のねじ山に有限振幅超音波を送波することで CAN により高調波が発生すると考えられる. また, 過去の研究でボルトをナットで締結し, 締結状態を変化させながらボルトのヘッドに振動子を接着させ, 有限振幅超音波をボルトに伝搬させボルトの底部で伝搬してきた超音波を受波し, 2 次高調波の検出を行った例があり, ボルトの締結状態の変化に伴い, 2 次高調波が変化することが確認されている⁴⁾. このように, ボルトを締結する際に大きな締め付け力を負荷させることで, ボルトとナットが接触するねじ山部分が潰れ, 塑性変形を起こし 2 次高調波成分の発生量が増えると考えられる. しかし, ボルトのヘッ

ドの部分に振動子を接着させてしまうと、構造物の内部にボルトのヘッドが埋もれている場合もあり、測定システムの構成上 2次高調波を検出できないケースがあると予想される。

そこで、本研究では振動子をボルトのヘッドではなくナットに接着させ有限振幅超音波を送波しボルト-ナットの接触面にて発生する2次高調波成分および締め付け力の変化により塑性変形から生じる2次高調波成分を検出するとともに、締結状態における電圧変化に伴う2次高調波も検出する。そして、締め付けトルクや軸力の変化に伴う2次高調波振幅の変化および電圧変化に伴う2次高調波の変化を明らかにし、ボルトの締結状態の新たな評価法の1つとしてボルト-ナット締結体から2次高調波成分の利用の有用性について検討する。

2.2 次高調波発生原理

2-1 接触面から生じる2次高調波(CAN)⁵⁾

Fig.1 に示すように二つの物質が接触している接触面に nm オーダーの隙間がある場合、この接触面に大振幅超音波を入射すると、接触面に励起される応力により接触面が振動し、接触面が衝突を繰り返し透過波や反射波がひずむことにより高調波が発生する。

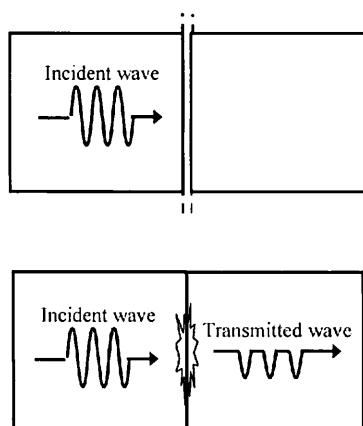


Fig.1 接触面から生じる2次高調波

2-2 CANのボルトへの応用

締結されたボルトから発生する2次高調波の一つとして Fig.2 のようなナットを締め付けたときにボルトとナットの隙間が徐々になくなり、接触面積が増加していき、ボルトとナットのねじ山の接触面に有限振幅超音波を送波することで2次高調波が生じることが考えられる。そこで、本研究ではボルト-ナットのねじ山を固体の接触面と想定し、この接触面から生じる2次高調波の検出をする。

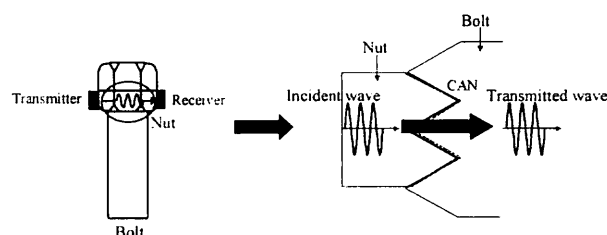


Fig.2 ボルトから発生する2次高調波

3. ボルト締結体を用いた2次高調波測定

3-1 2次高調波測定システム

ボルト-ナット締結体を用いた2次高調波測定システムを Fig.3 に示す。発振器1から出力信号(10 V_{pp}, 0.5 MHz, バーストサイン波 10 波)をバイポーラ増幅器により 100 V_{pp} まで増幅し共振周波数 0.5 MHz の振動子に印加し、ボルト・ナットを伝搬してきた超音波を共振周波数 1 MHz の振動子で受波する。受波波形をオシロスコープで観測しパソコンに取り込む。受波波形をFFTすることにより2次高調波成分を検出する。

測定の際、ボルトとナットの間にはロードワッシャを挟み込むことで軸力を観測すると共に、ナットをデジタルトルクレンチを使用して締め付けることから、軸力とトルクを同時に観測する。

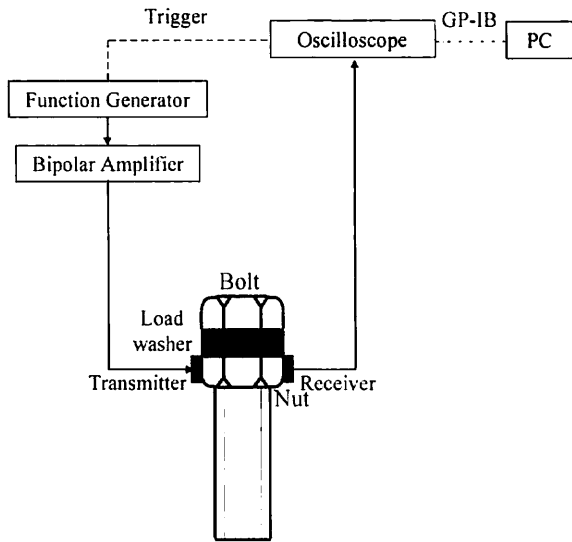
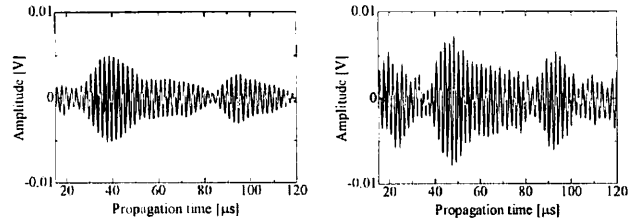


Fig.3 測定システム

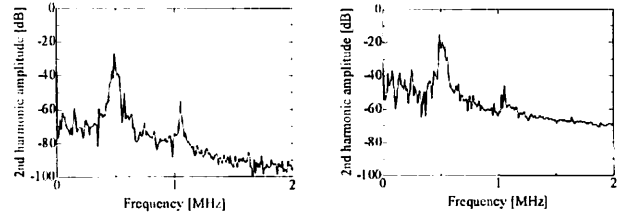
3-2 測定結果

測定結果の一例として Fig.3 の測定システムから得られた受波形を Fig.4 に、周波数スペクトルを Fig.5 に示す。また、軸力特性と締め付けトルク特性の図を Fig.6 に示す。Fig.5 の周波数スペクトルからボルトを締結していくと 2 次高調波も増加していることが確認できる。また、適正締め付けトルク 40 N・m および適正軸力 20 kN を境界に 2 次高調波の増加の傾きに変化が見られることが確認できる。これは、トルクの場合、0~40 N・m まではボルトとナットの接触面で CAN により発生する 2 次高調波が主な成分であると考えられる。しかし、適正締め付けトルクより大きなトルクで締め付けてしまうとボルトやナットが塑性変形してしまい、ボルト内部に閉口き裂が生じ 2 次高調波が発生すると考えられる。そのため、適正締め付けトルク以上の範囲では塑性変形による 2 次高調波の成分がボルトとナットの接触面で生じる 2 次高調波の成分に加わって発生していると考えられる。軸力でも適正軸力の 20 kN 以上の範囲では同様のことが考えられる。



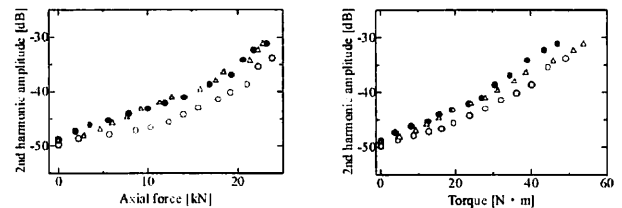
(a)軸力 2.9 kN, トルク 5.1 N・m (b)軸力 17.6 kN, トルク 37.2 N・m

Fig.4 受波波形



(a)軸力 2.9 kN, トルク 5.1 N・m (b)軸力 17.6 kN, トルク 37.2 N・m

Fig.5 周波数スペクトル



(a)軸力特性

(b)締め付けトルク特性

Fig.6 2次高調波特性

3-3 2次高調波の傾きについての検討

ここでは、3-2 で 2 次高調波の増加の傾きに変化があると述べたことについて考察する。まず、傾きに違いがあるか t 検定を用いて判断する。t 検定を行うのはトルク特性の場合、Fig.7(a)に示すように 0~20 N・m の範囲の傾きと 40 N・m 以上の範囲の傾きである。これは、20 N・m 以下の範囲はボルトを締め付けた後に緩ませても 2 次高調波が最初の緩んでいるときの値と同じ数値になり、まだ塑性変形をしていないと確認できるから

である。逆に 40 N・m 以上の範囲のトルクで締め付けると塑性変形により 2 次高調波が最初の緩んでいる値まで戻らないことが確認できるため、この 2 つの範囲の傾きで検定を行う。軸力についても Fig.8(b)に示すように 10 kN 以下と 15 kN 以上で同様に検定を行う。まず 2 つの範囲におけるボルト 15 本分の傾きを回帰直線で求め、2 つの傾きを t 検定する。その結果、1% の水準で有意差がある結果となり 2 つの傾きは等しくないことが確認できた。これらより、トルクと軸力ともに適正締め付けの値を境に 2 次高調波の増加の傾きに違いがあることを確認した。

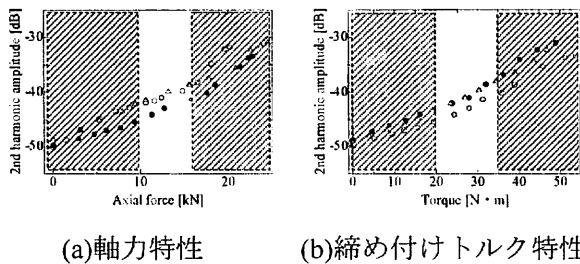


Fig.7.2 2次高調波特性

3-4 塑性変形による 2 次高調波検出量の変化

Fig.3 の測定システムの駆動条件のもとで締結状態を一度締め付ける度に緩め、徐々に締め付け力を大きくし 2 次高調波を測定する。

Fig.8 に 2 次高調波特性を示す。軸力特性、締め付けトルク特性から、締め付けトルク特性から 30 N・m までは締め付けた後に 0 N・m まで緩めても 2 次高調波の値は最初の緩んでいる状態の 0 N・m の値まで減少していることが確認できる。しかし、適正トルクの 40 N・m より大きな締め付けトルク 50 N・m では締め付けた後に緩めても最初の 0 N・m の 2 次高調波の値には戻らないことが確認できる。これは、適正トルクまでの締め付け力であればボルトは弾性変形のため元の形状に戻るが、適正トルクを超えてしまうと塑性変形してしまうことが影響だと考えられる。

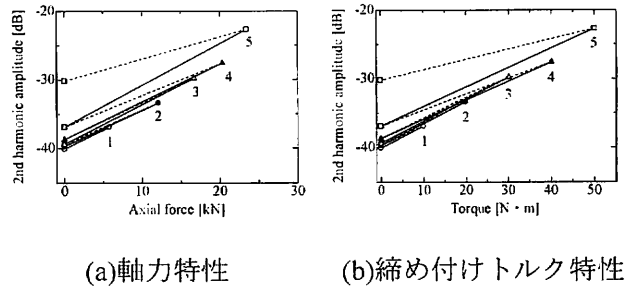


Fig.8.2 2次高調波特性

4.印加電圧の変化に伴う 2 次高調波測定

前節では締結状態を変化させたときの 2 次高調波検出において傾きに変化があることを確認した。しかし、実際の構造物などに使用されているボルトの締結状態は確認することが難しく、締結状態の変化だけで評価することは困難である。そこで印加電圧の変化による 2 次高調波の検出を行う。Fig.3 の測定システムを用いて締結状態を変化させつつ、駆動条件の印加電圧を 10~100 V_{p-p} まで 10 V_{p-p} 間隔で増加させ 2 次高調波を測定する。

4-1 測定結果および考察

Fig.9 に横軸に印加電圧、縦軸に 2 次高調波をまとめた印加電圧特性を示す。グラフでは横軸に印加電圧を変化させたときの振動速度を計測し、計算から求めた音圧を記している。Fig.9 から締め付けトルクおよび軸力が最初の緩んでいる状態 0 N・m、0 kN のときは電圧を 10~100 V まで増加させると約 9 dB の 2 次高調波の増加が確認できる。しかし、締め付けトルク 50.3 N・m、軸力 23.9 kN のときでは緩んでいる状態に対して 20 dB 程 2 次高調波は増加しているが、電圧の増加による変化は約 3 dB 増加しか確認できない。これは、最初の緩んでいる状態ではボルトとナットの接触面の CAN により 2 次高調波が発生していると考えられるため電圧を大きくするのに伴い 2 次高調波も増加すると考えられる。そして、この状態からボ

ルトを適性締め付け値以上に締め付けると塑性変形を起こし、締め付けたことによりボルト-ナット締結体から発生する2次高調波振幅は緩んでいる状態よりは大きい。ボルトとナットの接触面のCANにより発生する2次高調波は少なく塑性変形より生じる2次高調波が主な成分だと考えられる。そのため、電圧の増加による変化が少なく考えられる。以上のことから電圧の変化による2次高調波の変化はボルト-ナット締結体の締結状態に関係していると考えられる。また、電圧特性のグラフの傾きに注目すると緩んでいるときでは2次高調波の増加量が大きいため傾きも大きく、適正締め付け値よりも締め付け力が大きいと、2次高調波振幅の増加も少ないため傾きが小さいことが確認できた。

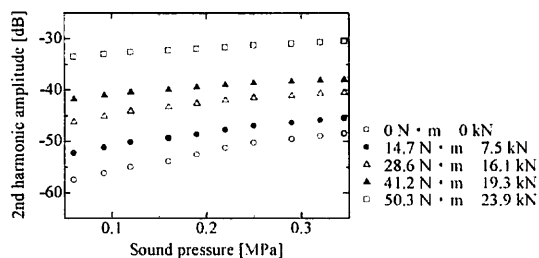


Fig.9 印加電圧特性

5.おわりに

本研究では、ボルトの締結状態および印加電圧を変化させた場合の2次高調波成分の検出を行った。その結果、締結状態の変化に合わせて印加電圧を増加させることで、2次高調波の傾きに違いがあることを確認した。よって、締め付け力および印加電圧の変化に伴う2次高調波を検出することでボルトの締結状態の評価ができる可能性を示せた。

今後は、実際の締結状態を再現しての2次高調波検出が挙げられる。

参考文献

- 1) 日本機械学会編集委員会：“機会・構造物の破損事例と解析技術” 日本機械学会，pp.60-64(1984)
- 2) 酒井 智次：“増補ねじ締結概論” 養賢堂，pp.22-26(2000)
- 3) 水口 義久，名和 輝好：“超音波による締結状態下のボルト軸力測定”，非破壊検査第54巻，7号，pp.365-371(2005)
- 4) M.Fukuda, K.Imano：“Detection of a second harmonic ultrasonic component generated from a fastened bolt using a double-layered piezoelectric transducer” IEICE Electron. Exp. Vol.6, No.20, pp.1438-1443(2009)
- 5) 奥村 毅，佐藤 雅美，川島 紘一郎：“漏洩レイリー波の非線形性を用いた閉じた亀裂の深さ測定”，非破壊検査，第53巻，3号，pp.159-164(2004)