

電磁加振による共振測定を用いた ボルトゆるみ検査法の検討

中国職業能力開発大学校 専門課程 電子技術科¹⁾ 後 藤 雄 治
 中国職業能力開発大学校 専門課程 生産技術科²⁾ 野 村 龍 司
 岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 技術開発部長)³⁾ 田 中 穰
 岡山県玉島工業会(センサ・システム(株) 代表取締役)⁴⁾ 矢 野 博 明

Examination of Inspection Method to Measure Slack of a Bolt Using the Resonance Measurement of Electromagnetic Vibration

Yuji GOTOH¹⁾, Ryuji NOMURA²⁾, Minoru TANAKA³⁾, Hiroaki YANO⁴⁾

要約 自動車や高架橋には数多くのボルトが使用されている。これらのゆるみは直接大事故に結びつく可能性があり、ゆるみ検査は重要視されている。現在、ボルトのゆるみの検査手法としては、点検ハンマーによる打撃検査法や、締付けにより伸びたボルトの長さを計測する超音波法等が上げられる。前者は長年の熟練を必要とし、かつ定量的評価が難しい。後者は、現在最も信頼性の高い測定手法として位置付けられているが、ボルトの錆やベンキ等によるコーティングが存在する場合や、刻印などによる凹凸の激しいボルトの検査には適応が難しく、また多くの測定時間を必要とする。

そこで本稿では高速でかつ簡便に締付け力を測定する手法の開発を目的とし、電磁共振測定式ボルト軸力検査の検討を行なった。この手法はボルト頭部に永久磁石と交流励磁コイルを配置し、静磁場と渦電流から電磁力を発生させ、ボルト頭部に振動を与え、同時にボルトの締付け力により変化する共振周波数を振動センサーで測定する手法である。

本稿ではまず、有限要素法の近似的電磁界解析により、本検査プローブの振動発生メカニズムを示した。次に実験からボルト軸力の増加に伴い、全体の共振周波数が非線形的に増加する現象を確かめ、検査原理の究明を試みた。

その結果、プローブをボルト頭部に接触させるだけで、高速簡便にボルトのゆるみが検査できることが分かった。

なお本手法は、平成12年度に鉄鋼及び機械加工業等を中心とした岡山県内異業種企業で構成された玉島工業会に対し、能力開発セミナーとして実施した技術支援内容であり、工業会内のセンサ・システム(株)で平成13年度に「電磁式ボルト軸力計BT-201B」として商品化に成功し、平成13年11月に(社)日本プラントメンテナンス協会より、2001年度プラントメンテナンス優秀製品賞(PM賞)の開発賞を受賞したものである。

I はじめに

自動車部品や高架橋には数多くのボルトが使用されている。これらのボルトは施工時の締付け方法や鋼板のなじみ具合等によりゆるみが生じる。ボルトのゆる

みの検査手法としては、点検ハンマーによる打撃検査法や、締付けにより伸びたボルトの長さを計測する超音波法等が上げられる¹⁾²⁾。前者は、長年の熟練を必要とし、かつ定量的評価が難しい。後者は、現在最も信頼性の高い測定手法として位置付けられているが、

ボルトの錆やペンキ等によるコーティングが存在する場合や、刻印などによる凹凸の激しいボルトの検査には適応が難しく、また多少の測定時間を必要とする。そこで本能力開発セミナーでは電磁気現象を利用し、高速でかつ簡便に測定可能な、電磁力による共振を用いたボルトゆるみ検査法⁽¹⁰⁾の検討を行った。これはボルト頭部に永久磁石と交流励磁コイルを配置し、静磁場と渦電流から電磁力を発生させ、ボルト頭部に振動を与え、同時にボルトの締付け力により変化する共振周波数を振動(AE)センサーで測定する手法である⁽¹⁰⁾。

本稿ではまず、有限要素法の近似的電磁界解析により、本検査プローブの振動発生メカニズムを示した。次に、ボルトの締付け力の増加に伴い、全体の共振周波数が非線形的に高くなる現象を実験によって確かめた。さらに、この現象を理解するために、2自由振動等価モデルを提案し、計算による検討を行うとともに実験値との比較を行った。

II 近似的電磁力解析

本能力開発セミナーで開発を行ったボルト締付け力測定プローブは、交流励磁用コイル、静磁場発生用の永久磁石およびボルトの振動を測定するAEセンサーの3点により構成される。測定プローブの外観図をFig. 1に示す。これはボルト頭部に直径の異なる二つのリング状の永久磁石と円形の交流励磁コイル、およびAEセンサーを配置したものである。このプローブの締付け力測定の原理は次のとおりである。まず、交流励磁用コイルによりボルト頭部周回方向に渦電流を発生させ、同時に永久磁石によりボルト内部に一定方向の磁界を作る。するとボルト内部では永久磁石による静磁場と渦電流からフレミングの法則により、ボルト軸と平行方向に電磁力が生じる。これによって、交流励磁用コイルの周波数に応じた振動が発生する。振動発生原理をFig. 2に示す。図は上下方向に電磁力が発生する場合における静磁場および渦電流の向きを示している。渦電流の発生する向きは励磁周波数によって変化するため、電磁力の発生方向も渦電流の流れる向きによって上下に変化する。

励磁周波数を様々に変化させ、それにより得られた振動をボルト頭部に設置したAEセンサーで計測し、共振周波数を測定することにより締付け力を評価した。本能力開発セミナーでは、このプローブに対し、有限

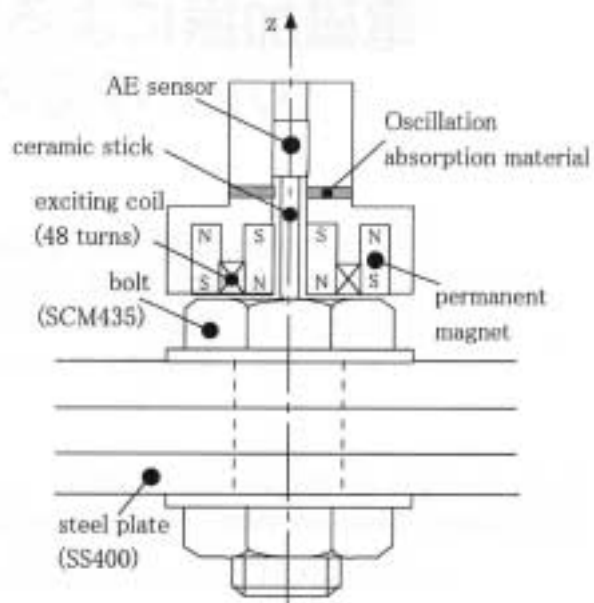


Fig. 1 Schematic diagram of the electromagnetic resonance measurement probe.

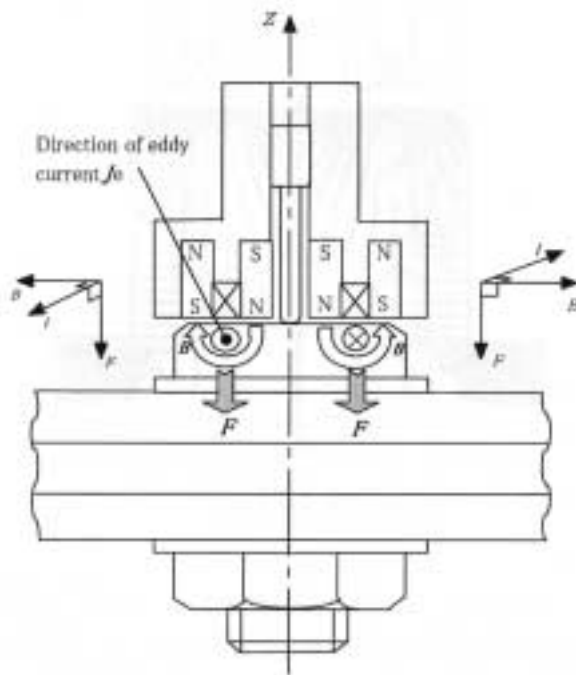
要素法の電磁界解析を用いて振動発生源となる電磁力分布の近似解析を行った。

1. 解析手順

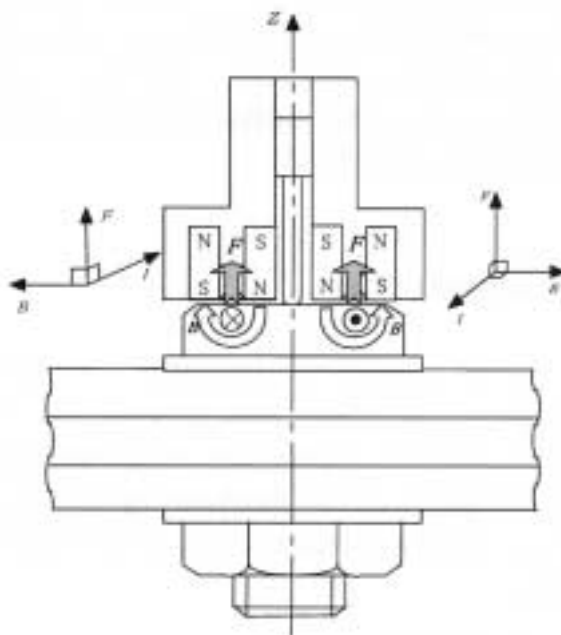
ボルト内部に発生する電磁力を評価するには、永久磁石による静磁場と、渦電流を発生させる交流磁場の二つを考慮する必要がある。そこで、ここでは解析の容易性を考え、ボルトおよび鋼材の磁化特性は線形(各材質の最大比透磁率を用いた)と仮定し、静磁場線形解析⁽¹⁶⁾および $j\omega$ 法⁽¹⁶⁾による交流線形渦電流解析を併用し、定常状態における近似的電磁力解析を行った。なお、解析は軸対称三次元有限要素法を用いた。解析条件をTable 1に、そして解析モデルをFig. 3にそれぞれ示す。

まず静磁場線形解析により永久磁石による全空間の磁気ベクトルポテンシャル A を求めた。次に、交流励磁コイルにより材料内部に発生する渦電流密度 J を、交流線形渦電流解析を用いて求め、同時に交流磁化による全空間の磁気ベクトルポテンシャル A の実数成分に静磁場により得られた磁気ベクトルポテンシャル A を加えて全要素における磁束密度 B を求めた。この磁束密度 B と渦電流密度 J からボルト内部に発生する電磁力 F の算出を行った。電磁力 F の基本方程式を式(1)に示す⁽¹⁷⁾。

$$\vec{F} = \iiint_V \vec{J} \times \hat{B} dV \quad (1)$$



(a) When magnetic force is the lower part



(b) When magnetic force is the upper part

Fig. 2 Principle generation oscillation.

ここで F : 力 (N)、 V : 材料領域 (m^3)、 J : 電流密度 (A/m^2)、そして B : 磁束密度 (T) である。本解析に式 (1) をあてはめると、電流密度 J は材料内部に発生する渦電流密度 J_e 、そして磁束密度は交流励磁コイルおよび永久磁石により発生する磁束密度の総和と考えることができる。

Table 1 Conditions for analysis

Parmanent magnet	0.48T (magnetic surface)
Exciting coil	40kHz, 1A (rms), 48turns
Bolt and Nut (SCM435)	Permeability $\mu_s=435(\times \mu_0)H/m$ Conductivity $\sigma=4.73 \times 10^6 S/m$
Steel plate (SS400)	Permeability $\mu_s=3000(\times \mu_0)H/m$ Conductivity $\sigma=7.51 \times 10^6 S/m$
Number of nodes and elements	13778, 13530

2. 解析結果および考察

ボルトの締付け力測定プローブ内部に配置する永久磁石の残留磁束密度が大きいほど、大きな電磁力を発生させることができる。そこで本能力開発セミナーでは Fig. 3 に示す形状で汎用性があり、かつ残留磁束密度の高い希土類磁石を使用した。実験および解析に用いた磁石は、ボルトおよび鋼材が存在しない状態で、各磁極表面の磁束密度 $|B|$ が 0.48T の値を有するものを使用した。また解析に用いたボルトは M24 をモデルとし、ボルト頭部およびナットの直径は $\phi 40$ の円柱形と仮定し、厚さを 20mm 一定とした。交流励磁周波数は 40kHz、そして電流は 1A (rms) とし、磁束密度、渦電流密度および電磁力分布の近似的定常解を求めた。結果を Fig. 4 ~ 6 にそれぞれ示す。Fig. 4 は、永久磁石によるボルト近傍における磁束密度(静磁場)分布を示す。Fig. 5 は z 軸を中心軸とし、周回方向に発生する渦電流密度の絶対値を等高分布で示している。なお同図には渦電流の瞬間的に流れる向きも示した。励磁周波数が 40kHz での渦電流の浸透深さは浅く、ボルト

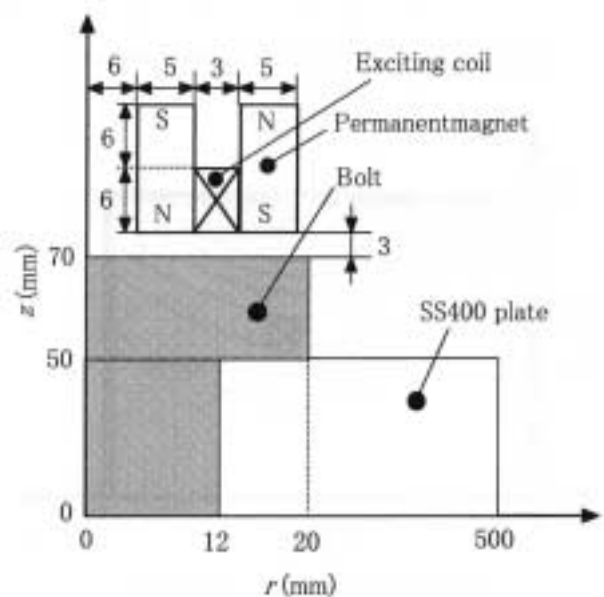


Fig. 3 Model of FEM analysis (1/4 area).

頭部表層に集中する様子が理解できる。Fig. 4 の磁束密度とFig. 5 の渦電流密度から発生する電磁力の解析結果をFig. 6 にベクトルで示す。

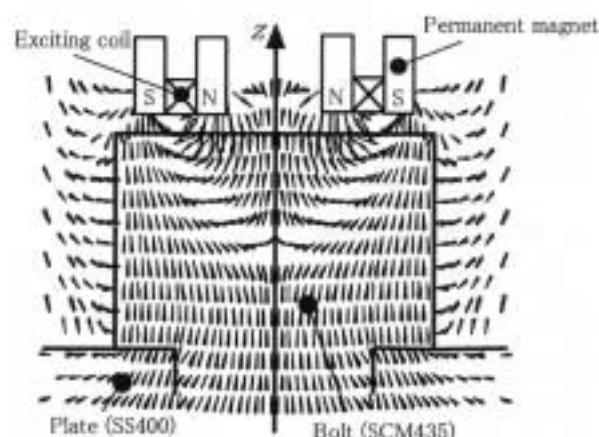
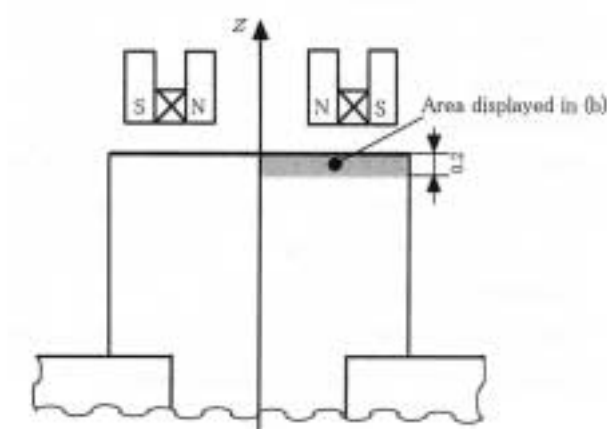
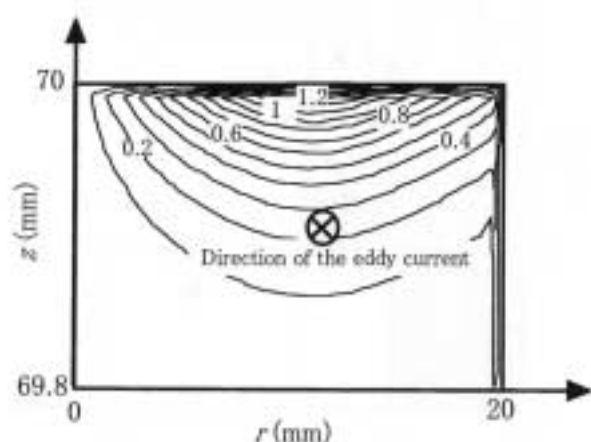


Fig. 4 Distribution of static flux density (Maximum density in the material:0.35T).



(a) Analyzed region of eddy current density



(b) Contour line of $J_e (\times 10^7 \text{A/m}^2)$

Fig. 5 Contour line of equi-eddy current density (Maximum: $1.22 \times 10^7 \text{A/m}^2$, skin depth:0.07mm).

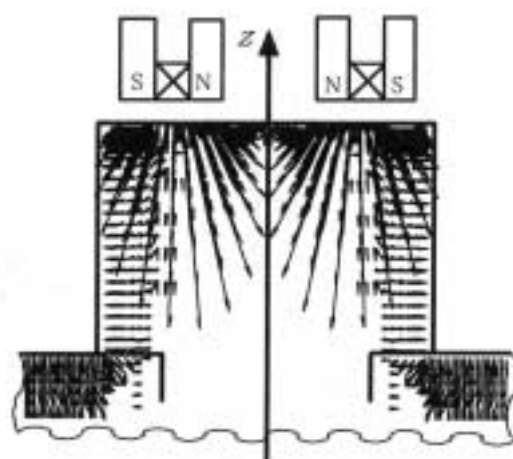


Fig. 6 Distribution of electromagnetic force (Maximum: $18.6 \times 10^{-3} \text{N}$).

Fig. 4 から、永久磁石の磁力線はボルト頭部で平板鋼材と平行方向(r 方向)に、内周永久磁石から外周永久磁石の方向へ向けて分布する。一方、交流励磁コイルはボルト頭部周回方向に渦電流を発生させるため (Fig. 5 参照)、電磁力はフレミングの法則から交流励磁コイル直下部のボルト表層で鉛直方向(z 方向)に最も大きく分布することがFig. 6 から理解できる。この結果から、ボルト頭部には励磁周波数に対応した縦振動が発生することが分かる。

Ⅲ 共振周波数測定

Fig. 1 に示した検査プローブを使用し、ボルト締付け力と共振周波数の関係を実験により求めた。ボルトの軸部にひずみゲージを埋め込み、ゲージの伸びから締付け力を測定し、同時に共振周波数の測定を行った。

ボルト締付け力の目標値 P_s は次式(2)で表すことができる¹⁰⁾。

$$P_s = 0.6 \sigma_s A_s \quad (2)$$

ここでは、 P_s : 締付け力の目標値(N)、 σ_s : 降伏点応力(P_s)、 A_s : ボルトの有効断面積(m^2)である。本稿では各ボルトを P_s で締付けた状態を“標準締付け”と定義する。

1. 振動測定波形

本能力開発セミナーで検討した締付け力測定手法は、電磁力での振動周波数を0Hzから徐々に高くし、同時に各周波数での振動振幅を、100kHz帯域までフラットに測定可能なAEセンサで測定し、最も振動振幅が

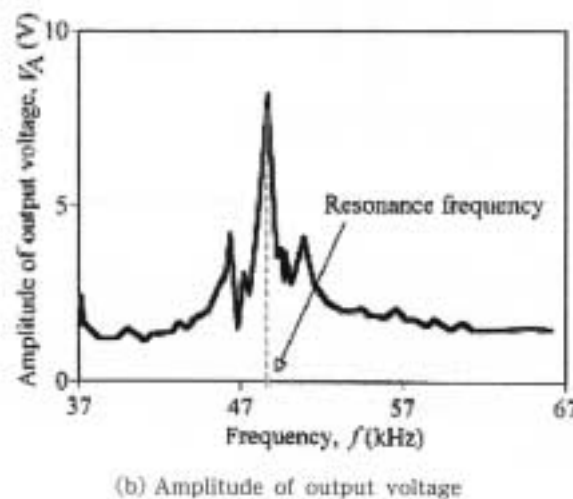
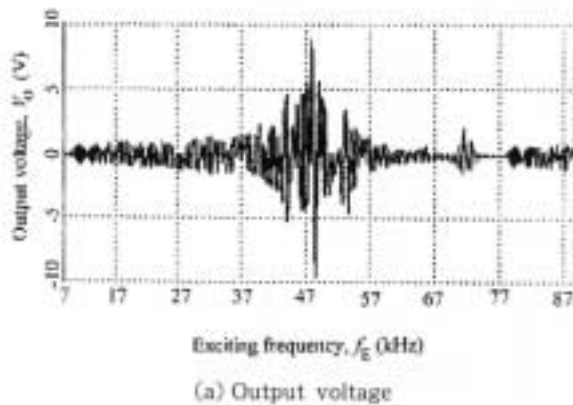


Fig. 7 Measured result of resonance frequency.

大きく現れる共振周波数を求めるものである。測定例をFig. 7 (a)および、(b)に示す。同図はM12ボルトを10kNで締付けたとき、振動励磁周波数を10Hzピッチで高くした際の、各周波数でAEセンサに得られる振動を測定した結果を示している。Fig. 7 (a)はAEセンサからの振動を出力電圧で表した図を示し、Fig. 7 (b)はFig. 7 (a)のピーク値のみを表した図である。結果から47kHzを超えたあたりで最も振動振幅が大きく発生していることが分かる。この周波数を共振周波数と定めた。そして、ボルトの締付け力を変化した場合に対する共振周波数の測定を行った。

実験では、4本のM12ボルトが等間隔で隣接して締付け可能な平板鋼材(SS400、縦210mm、横350mm)を、厚さ9mmと16mmの2枚作製し、M12ボルト4本で締付け、本測定プローブで締付け力が共振周波数に及ぼす影響を求めた。締付け鋼材形状の寸法図をFig. 8に示す。また評価を行なったボルトをFig. 8の①～④に示す。実験ではボルト②～④については標準締付けのままとし、ボルト①については、締付け力を30kNおよび56kNと変化させたときの共振周波数を測定した。

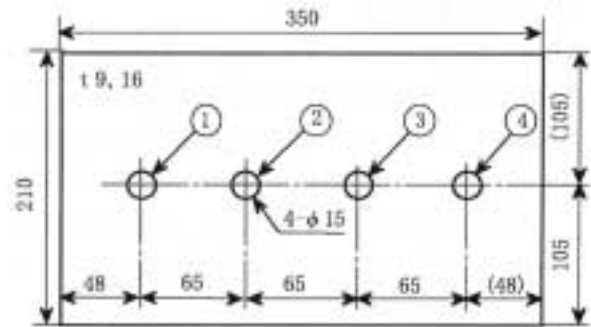


Fig. 8 Shape and dimensions of the steel plates were all used.

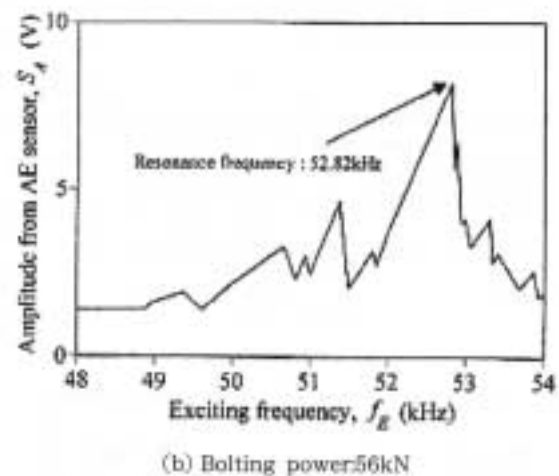
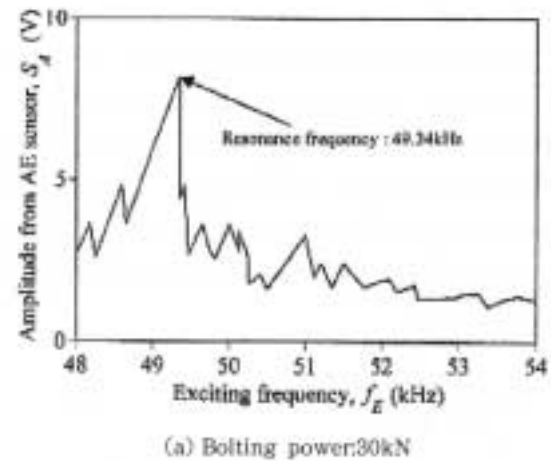


Fig. 8 Measured results of oscillating amplitude.

ボルト①の締付け力を固定し、振動励磁周波数を48kHzから54kHzまで10Hzピッチで変化させた時、各周波数でAEセンサに得られた振動振幅ピーク値の測定結果を出力電圧としてFig. 9 (a)および(b)に示す。Fig. 9 (a)は締付け力を30kNとした時、そしてFig. 9 (b)は56kNにした時の結果である。締付け力が30kNでは、49.34kHzで共振が発生しているのに対し、締付け力が56kNでは、52.82kHzで共振が発生している。すなわち、ボルトの締付け力が増加するに伴い、共振周波数は高くなることが分かった。

2. プローブの評価

Ⅲ章1節で得られたボルトの締付け力が共振周波数に影響を及ぼす現象の信ぴょう性を確認するため、本検査プローブを用いて、正しく測定物の共振周波数が測定できるか検証を行った。中央部にφ14のドリル穴をあけた平板鋼材(SS400、縦75mm、横75mm、厚み9mm)を作製し、厚み方向のばね定数を式(3)および(4)により計算で求めた。

$$\frac{P}{A} = E \frac{\lambda}{l} \quad (3)$$

$$P = k\lambda \quad (4)$$

ここで、 P ：荷重(N)、 A ：断面積(m²)、 k ：ばね定数(N/m)、 E ：ヤング率(2.0×10⁵MPaとした)、 λ ：変形量(m)、そして l ：ボルトの元の長さ(m)である。

次に、本検査プローブを鋼材表面に当て、鋼材の共振周波数を測定し、その値から式(5)を用いてばね定数を求め、式(3)および(4)により得られた計算値との比較を行った。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

ここで、 f ：周波数 (Hz)、 m ：質量 (kg)、 k ：ばね定数(N/m)である。

Table 2 Comparison of spring constant calculated with the one measured

Calculated value	1.25×10 ¹¹ N/m
Measured value	1.24×10 ¹¹ N/m
Error	0.78%

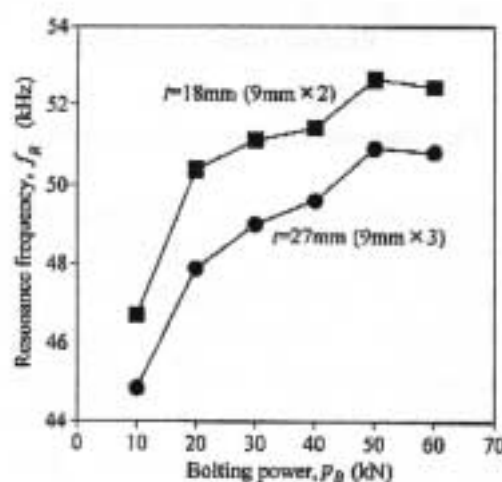


Fig.10 Relation between resonance frequency and bolting power for M12.

Electro magnetic force

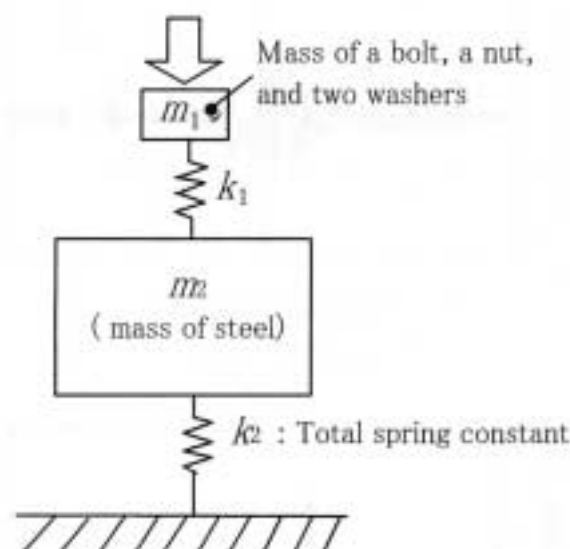


Fig.11 Two free oscillating equivalent model.

得られた比較結果をTable 2に示す。結果から、計算値が実測値に比べて0.78%大きく評価されたが、これは誤差の範囲内であり、本検査プローブが測定物そのものの固有振動数を正しく評価できることが確認できた。

3. 単一ボルトにおける評価

3.1 板厚変化による影響

始めに本能力開発セミナーでは現象理解を容易にするため、単一ボルトによる評価を試みた。Ⅲ章2節で述べた鋼材を3枚作製し、M12ボルトと六角ナットで締付けた時、締付け力が共振周波数に及ぼす影響を検討した。鋼材が2枚のときと3枚のときの測定結果をFig.10に示す。結果から、締付け力が増えるに伴い共振周波数は非線形的に高くなるのが分かる。また、鋼材の厚さが増すと、共振周波数は全体的に低くなった。

3.2 2自由振動等価モデル

Fig.10に示したように、本実験ではボルトの締付け力を増加させると、非線形的に共振周波数が高くなる結果を得た。しかし、フックの法則から、弾性領域では、鋼材およびボルト・ナット等の各部の弾性係数や固有振動数は一定であり、これらがボルトの締付け力により変化するとは考えられない。そこで本能力開発セミナーでは、実験により得られた共振周波数の変化は、鋼材・ボルト・ナット・ワッシャーの各部の接触面等に関わる影響と考え、これら全体のモデルをFig.11

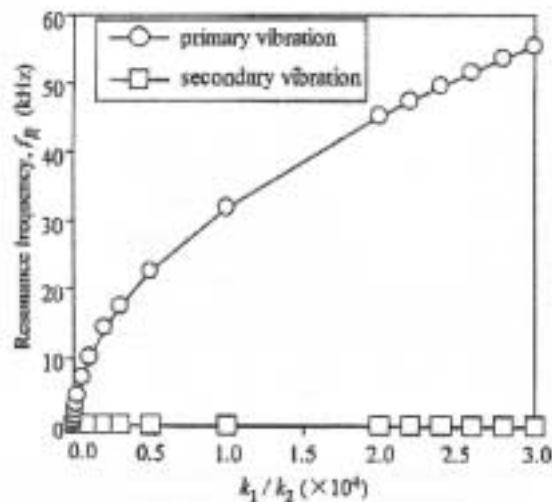


Fig.12 Relation between resonance frequency and the parameter k_1/k_2 (M12, board thickness:18mm (9mm×2)).

に示す2自由振動等価モデルに置き換え、この現象についての検討を試みた。

Fig.11では、ボルトとナット、ワッシャーの総質量を m_1 、締付け鋼材の総質量を m_2 、鋼材とボルト・ナット・ワッシャーの総合的な合成ばね定数を k_2 と表し、これらは値が変化しない固定値とした。

本稿では一つの直方体の、鉄の塊を削り、彫刻のように、M12ボルトで板厚18mmの鋼材を締付けた形状と、質量および外観形状は全く同じに仕上げた鉄の塊を想定し、この共振周波数を、式(3)~(5)を使用して計算した。その結果、共振周波数は約677Hzであった。しかし、Fig.10から実際の締付け共振周波数は数十kHzオーダーであり、外観や質量が全く同じ鉄の塊に比べて格段に大きく表れることが分かった。

そこで、本能力開発セミナーでは締付け力が変化すると、各部の接触剛性等が微妙に変化し、これらが構成するばね定数が生まれ、その値が変化することによって共振周波数も変化すると考え、このばね定数を“見かけのばね定数 k_1 ”と仮定し、この k_1 の値を変化させたときの全体の共振周波数を計算により求めた。なお評価にはM12ボルト、板厚18mm(第三章2節で述べた鋼材2枚)を使用した。計算結果をFig.12に示す。なお、Fig.12の横軸は k_1/k_2 を示している。2自由振動モデルでの共振周波数は二つ現れる。2次振動数は88.1Hzに収束するが、1次振動数は k_1 の増加に伴い非線形的に高くなることが分かる。ボルトと鋼材が完全に密着された状態では、この k_1 もある一定値をとるため、共振周波数もある値で収束すると考えられる。またこの結果から、見かけのばね定数 k_1 の値は、全

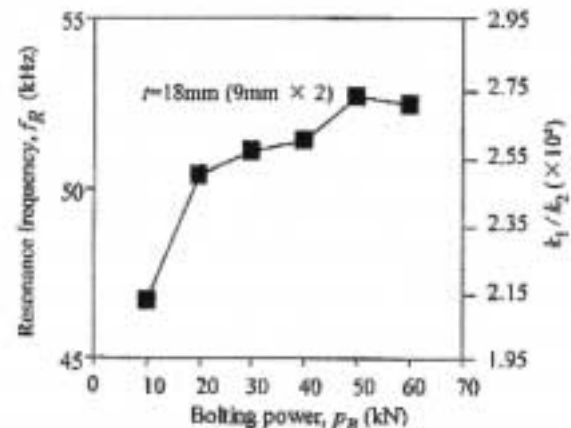


Fig.13 Relation between resonance frequencies, bolting power and parameter k_1/k_2 (board thickness:18mm (9mm×2)).

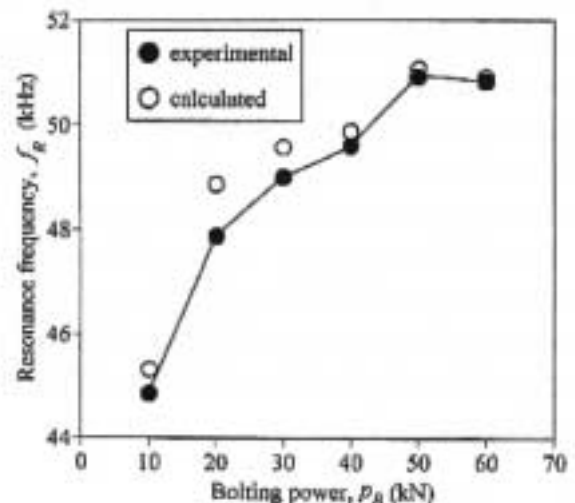


Fig.14 Comparison of experimental and calculated values of the relation between resonance frequency and bolting power (board thickness:27mm (9mm×3mm)).

体の合成ばね定数 k_2 の 10^4 倍もの値を示すことが分かる。材料のばね定数は式(3)および(4)から、材料の元の長さ l に対して反比例する。ここでの k_1 は、各部の接触面の凹凸(摩擦等)が構成するばね定数の合成を意味している。これらが振動に影響する縦振幅の距離や元の長さは、各鋼材やボルト等の厚みに比べて非常に小さい。そのため、各部の接触面が作る見かけの合成ばね定数 k_1 の値は、各鋼材そのもののばね定数の値に比べると、非常に値が大きくなると考えられる。

3.3 計算値と実験値との比較

本能力開発セミナーでは、M12ボルト、板厚18mmを使用し、Fig.11のモデルで計算したFig.12の一次振動数を利用して、実験値との比較を試みた。Fig.12と同条件下の実験結果(Fig.10内の板厚18mm)は、共振

周波数がおよそ45~53kHzの範囲内である。一方、Fig. 12では、この共振周波数45~53kHzの範囲では、共振周波数対 k_1/k_2 の関係がほぼ線形であることが分かる。そこで、Fig.10内の板厚18mmの結果とFig.12から、各締付け力に対する共振周波数と k_1/k_2 の関係を一つのグラフにまとめることができる。その結果をFig.13に示す。図の横軸は締付け力を示し、縦軸左にはFig.10の共振周波数を、縦軸右にはFig.12で得られた k_1/k_2 を示した。この結果を使用し、板厚を27mmに変化させたときの、2自由振動等価モデル1次振動数の計算結果と、Fig.10の実験結果の比較を行った。Fig.11の2自由振動等価モデルでの m_1 、 m_2 、 k_2 に板厚27mmのときの値を入れ、各締付け力により変化する k_1 の値は、Fig.13で得られた板厚18mmのときの値を与えて1次振動数の計算を行い、実験値との比較をした結果をFig.14に示す。実験と計算の誤差は、締付け力が20kNのときが最大で2.1%となったものの、全体として良い対応が認められた。この結果から、締付け力に伴って「見かけのばね定数 k_1 」の値が変化することにより、共振周波数が変化することが理解できた。

本能力開発セミナーでは、この k_1 の変化は、締付け力による各部の接触剛性の変化だと仮定したが、具体的な k_1 の発生メカニズムや物理現象の解明等については、今後さらに深い検討が必要であり、今後の検討課題にしたいと考えている。

3.4 リフトオフの影響

M12単一ボルトの締付け力を10kNに固定し、プローブとボルトとの距離(リフトオフ)による影響を検討した。

まず振動センサはボルト頭部に接触させた状態で、永久磁石および交流励磁コイルのリフトオフ(E-Lo)を変化させた場合における測定結果をFig.15に示す。結果から、リフトオフ(E-Lo)が変化するに伴い、電磁力が弱まるため全体的な振幅は小さくなるが、共振の発生する周波数は変化せず、48.7kHzを維持する様子が理解できる。

次に、永久磁石および交流励磁コイルのリフトオフ(E-Lo)を3mm一定とし、ボルト頭部に厚さ0.1mmのセロファンテープを重ね、振動センサとボルトの間にペンキ等のコーティングを有する状態を模擬して、テープの厚み(t-Lo)変化による影響を検討した。結果をFig.16に示す。結果から、テープの厚み(t-Lo)が増すにつれて全体的な振幅は指数的に小さくなるものの、共振の発生する周波数に変化は見られず、48.7

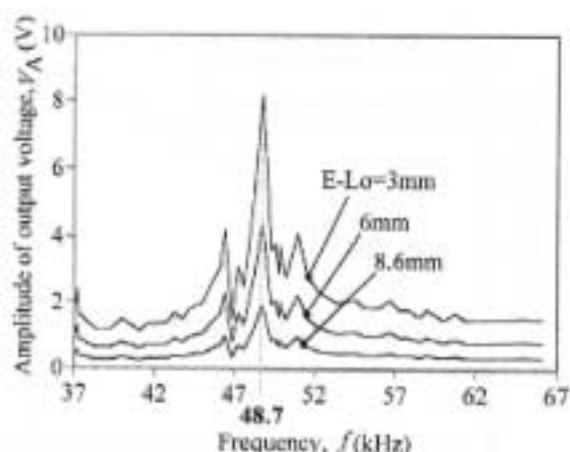


Fig.15 Influence of lift-off of the excitation coil and the permanent magnet (M12, bolting power:10kN).

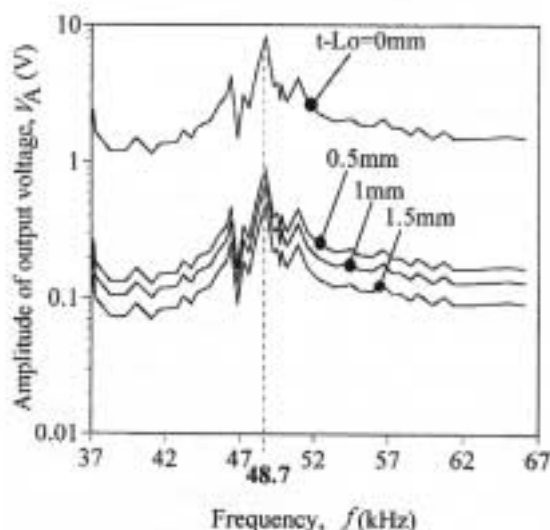


Fig.16 Influence of lift-off of the AE sensor (M12, bolting power:10kN).

kHz一定となる様子が理解できる。テープは鋼材等と比べるとばね定数は格段に小さいため、共振が発生する周波数に影響は与えないことが理解できる。

これらの結果から、本測定手法ではボルト頭部の状態やリフトオフ変化による影響は少ないことが理解できる。

4 隣接ボルトにおける検討

Fig. 8 に示した同一鋼材内に位置の異なる4本のボルトが隣接するモデルを使用し、締付け力が共振周波数に及ぼす影響を検討した。まずボルトをM12、鋼材の厚さを25mm(9mm+16mm)とし、Fig. 8のボルト④については標準締付けのままとした。残りのボルト①~③については、ボルト①~③の内の2本は標準締付けのままとし、残り1本の締付け力を変化させ、各

締付け力に対する共振周波数の測定を行なう。この実験をボルト①～③について順に、合計3回行なった。得られた結果をFig.17に示す。ボルトが隣接している状態下でも、①～③のボルト3本ともほぼ同じ結果を得ることができた。この結果から、板厚およびボルトの大きさが同一の場合では、締付け位置による測定誤差の影響は少ないといえる。

次にボルトをM24に取り替え、4本のボルトが等間隔に隣接する鋼材(縦210mm、横350mm)で、ボルト4本のうち3本を標準締付けとし、残り1本の締付け力を変化させ、各締付け力に対する共振周波数の測定を行った。この実験では、板厚の変化(50mmおよび66mm)が共振周波数に与える影響を検討した。得られた結果をFig.18に示す。M24の場合にもM12と同様に、厚さが増えるに連れて共振周波数は全体的に低くなることが分かった。これらの結果から、ボルトの大きさや長さ、締付け鋼材の厚みや大きさが変化すると

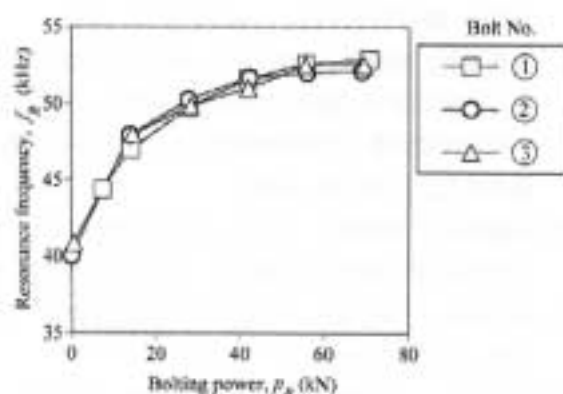


Fig.17 Influence of bolt positions on the relation between resonance frequency and bolting power (M12, board thickness:25mm).

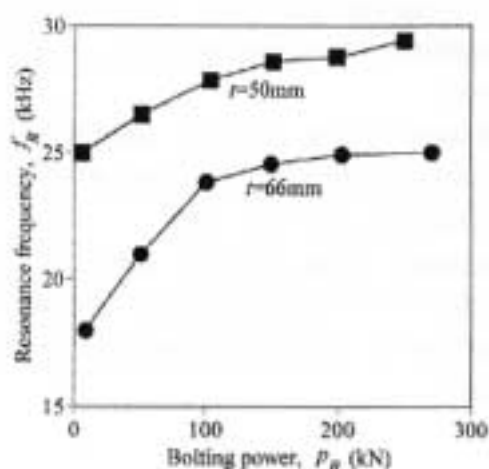


Fig.18 Influence of board thickness on the relation between resonance frequency and bolting power for M24 bolt.

共振周波数も変化することが分かる。しかし、どの条件下でも締付け力が大きくなるに従って共振周波数は非線形的に高くなるため、ボルトの大きさや締付け鋼材が一定である場合の締付け力検査には、この手法は適用可能であることが分かった。

IV 商品化および受賞

本能力開発セミナーで行った内容は商品化に結び付けることができた。その商品概要の一例(軸力計BT-201B)をFig.19に示す。これは、ボルト頭部の塗装などを剥離することなく、センサプローブをボルト頭部に軽く接触させるだけで容易にボルトの軸力が測定可能となる測定器である。この検査原理は、本稿で示してきたように、電磁力でボルト頭部を加振させ、その共振周波数を検出するものであるため、温度変化に強く、超音波方式と違い、油などの信号媒体が不要である。また、この軸力計BT-201Bはセンサプローブが小型で、M8～M24までのボルトに対応が可能であり、バッテリーを内蔵しているため、持ち運びに便利である。

本開発製品は平成13年11月に(社)日本プラントメンテナンス協会より、2001年度プラントメンテナンス優秀製品賞(PM賞)の開発賞を受賞した(Fig.19参照)。

また、本能力開発セミナーに参加し、新製品の開発に携わった、岡山県玉島工業会(センサ・システム(株))技術開発スタッフの受賞を喜ぶ姿をFig.20に示す。



Fig.19 The outline of the developed new product. (<http://www.sensor-system.co.jp/>).



(左から、玉島工業会センサ・システム(株)、田中技術開発部長、矢野社長、吉村研究員、酒井副社長、筆者)

Fig.20 Technical development staff.

V 結論

- (1) 近似的電磁界解析から、本検査プローブはボルト頭部に励振周波数に対応した縦振動を発生させることができ、また同時にばね定数の計算値との比較から、材料の共振周波数を測定できることを明らかにした。
- (2) ボルト締付け力が共振周波数に影響を及ぼしていることを2自由振動等価モデルにより示した。
- (3) 締付け鋼材やボルトの大きさが変化すると、共振が現れる周波数は変化するが、締付け力が大きくなるに従って共振周波数が非線形的に高くなる傾向は同じである。また同一鋼材上では、ボルトの締付け位置変化による測定誤差の影響は少ない。
- (4) 本手法は多少のリフトオフ変化やボルト頭部のペンキ等によるコーティングに影響されずに検査が可能であるため、高架橋や大型構造物等、一定鋼材上に同一ボルトが隣接する場合には、短時間でかつ簡便にゆるみ検査が行える可能性がある。

VI 今後の検討課題

本能力開発セミナーでは、ボルトの締付け力により共振周波数が変化する現象を、各部の接触面の影響(摩擦やガタツキ等による接触剛性の変化、弦で考えると、弦を支える支点による影響)と仮定し、2自由振動等価モデルを提案して検討を行なった。

しかし本稿では、この現象の具体的な原因説明には触れていない。この現象の説明に関しては、今後さら

に深く検討を続ける必要があり、今後の検討課題にしたいと考えている。

謝辞

本能力開発セミナーを進めるにあたり日頃貴重なご助言を頂いております岡山大学工学部高橋則雄教授と高橋研究室の皆様方、職業能力開発総合大学校橋本光男教授、前岡山職業能力開発短期大学校長(現、北九州市立大学国際環境工学部教授)濱本嘉輔先生に深く感謝致します。

【参考文献】

- (1) 池ヶ谷靖：超音波によるボルト軸力計、検査技術、第3巻1号、日本工業出版、pp.14-19、1998
- (2) 北川茂：磁化を利用した材料評価、熱処理、26巻4号、pp.289-291、1985
- (3) 石崎嘉明、藤田洋佐、田中穰：高力ボルト軸力の簡易測定器の開発、第22回日本道路会議、一般論文(B)、維持管理部会、pp.1074-1075、1997
- (4) 後藤雄治、田中穰、矢野博明：電磁共振測定を使用した高力ボルト締め付け検査の実験による検討、平成12年度秋季大会講演概要集、(社)日本非破壊検査協会、pp.21-24、2000
- (5) 河瀬順洋、伊藤昭吉：最新三次元有限要素法による電気・電子機器の実用解析、森北出版(株)
- (6) 田中高義、高橋則雄：電気工学の有限要素法 第2版、森北出版(株)
- (7) 戸川隼人：有限要素法による振動解析、サイエンスライブラリー情報電算機、(株)サイエンス社
- (8) 山本晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂
- (9) 後藤雄治、田中穰、矢野博明：高力ボルトの電磁トルク軸力測定手法の検討、第15回岡山職業能力開発短期大学校研究発表講演予稿集、pp.10-11、2000
- (10) 後藤雄治、田中穰、矢野博明：電磁共振を利用した高力ボルト軸力測定、第8回職業能力開発研究発表講演会、pp.91-92、2000
- (11) 後藤雄治、田中穰、矢野博明：電磁力による共振を用いたボルトゆるみ検査法の検討、非破壊検査、第51巻1号、(社)日本非破壊検査協会、pp.24-31、2002