

電磁超音波を用いた接着系アンカーの健全性評価

東京工業大学 長谷部 和彦・水野 洋輔・中村 健太郎

1. はじめに

接着系アンカーは、土木分野において広く利用されている。特に、トンネル内の送風機や照明の固定などに多用されており、それらの健全性評価法の開発が課題になっている。現在では主に、熟練工による目視や打音などによって健全性が評価されている。非破壊検査手法として、これまでに電磁超音波振動子 (EMAT) でボルトに振動を励振し、ボルトのたわみ振動や縦振動をレーザードップラー振動計 (LDV) で測定する手法⁽¹⁾や、コンクリート表面に漏れる振動をアコースティックエミッション (AE) センサによって測定する手法⁽²⁾が提案されている。また、AEセンサによって損傷が進行する際に生じるAEを観測する手法⁽³⁾や、圧電振動子でボルトにガイド波を励振し、そのエコーを用いる手法が提案されている^{(4)~(6)}。しかし、いずれの手法においても、振動の励振、検出に圧電振動子やAEセンサ、LDVを用いているため、対象との接触や精密な位置合わせが必要であった。

非接触での励振、検出を可能とするものとしてEMATを用いた手法が挙げられる^{(7)~(10)}。一般に、静磁場下で導電性の物体に動磁場を生じさせると、物体表面に渦電流によるローレンツ力が生じる。よって、周期的な動磁場を用いることで、物体を振動させることができる。受信はこの逆の過程で行われる。すなわち、振動している物体を静磁場下に置くと、物体表面に渦電流が生じ、それによって動磁場が生じる。この動磁場を測定することで、振動を検出することができる。

非接触という特徴から、従来の超音波検査で必要であったカップリング剤や平滑加工が不要であり、

高温下でも利用可能であるということからEMATを用いた超音波検査は数多く提案されてきた^{(11)~(14)}。主な欠点として信号強度が低いことが挙げられるが、励振周波数を掃引して対象に共鳴を生じさせることで信号対雑音比の改善が可能である⁽¹⁵⁾。

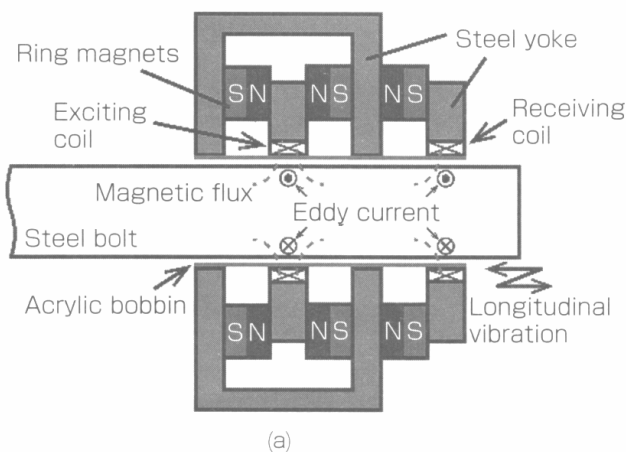
本研究では、EMATを用いてボルトを縦振動で共振させ、その振動を同一のEMATで検出することで、接着系アンカーの健全性を評価する手法を提案する。非接触で精密な位置合わせが不要であるため、実用的な健全性評価手法としての実用化が期待できる。接着剤の量と劣化が共振周波数とQ値に及ぼす影響を調査する。

2. 実験

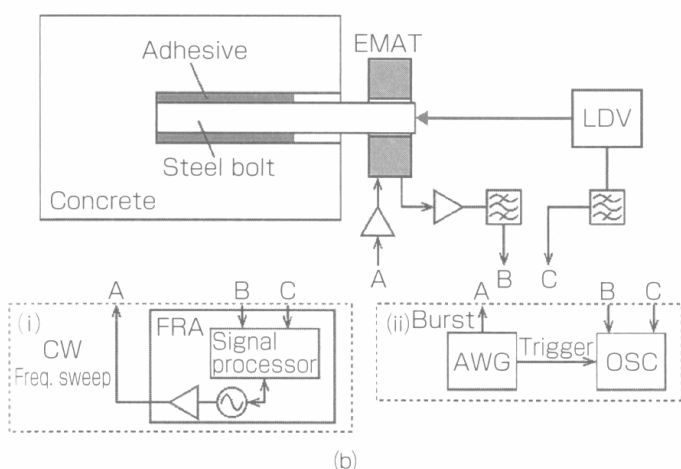
2-1 実験構成

ボルトの縦振動を励振、検出するのに用いたEMATの断面図を第1図(a)に示す。EMATは3つのリング型ネオジウム磁石と鉄のヨーク、励振コイル (30回転)、検出コイル (30回転)、アクリルポピンで構成される。ボルトとコイルの間隔は約0.5 mmである。励振コイルに交流電流を流すと、交流磁場が生じ、ボルト表面に渦電流が生じる。静磁場と渦電流の相互作用によりローレンツ力が生じ、ボルトの縦振動が発生する。ボルトが縦振動すると、静磁場との相互作用によりボルト表面に渦電流が生じる。この渦電流による磁場変化を検出コイルにより検出する。

長さ100 mmの鉄のボルト (M8) を、直径100 mm、高さ250 mmのコンクリートに開けた直径9 mm、深さ70 mmの孔に接着剤で固定した4つの試料を用いて測定を行った。接着剤としては、ケミカルアンカ



(a)



(b)

第1図

(a) 電磁超音波振動子 (EMAT) の断面模式図

(b) 測定系

AWG: 任意波形発生器、FRA: 周波数特性分析器、

LDV: レーザードップラー振動計

一(旭化成、EA-500S)を用いた。接着剤の量を1.15 g、2.30 g、4.50 g、4.50 gとした(4.50 gは、孔が接着剤で満たされた状態である)。4.50 gの一方については、加熱によって接着状態を劣化させた。ボルト固定後に、ボルトを誘導加熱により220度で2時間加熱し、空冷により室温に戻した後、再び同様の加熱と冷却を行った(付録を参照)^{(16)~(19)}。

測定系を第1図(b)に示す。まず、同図(i)の構成でボルトの縦振動の周波数特性を測定し、1次の共振周波数を求めた。周波数特性分析器(FRA NF Co., FRA5097)からの連続波出力をEMATに入力し、EMATの検出信号を同じFRAによって測定した。EMATへの印加電圧は8 V_{p-p}とし、連続波は周波数8~28 kHz、32 Hzステップで掃引した。検出信号は約70dB増幅し、バンドパスフィルタ(BPF、1~100 kHz)に入力した。また、測定の有効性を確認するため、LDVとBPF(1~100 kHz)を用いて

ボルトの縦振動の直接測定を行った。次に(ii)の構成で、1次の共振周波数における縦振動の減衰振動を取得し、Q値を求めた。任意波形発生器からのバースト波出力をEMATに入力し、EMATの検出信号をオシロスコープで測定した。EMATへの印加電圧は8 V_{p-p}とした。検出信号は約70dB増幅し、BPF(10~100 kHz)に入力した。また、LDVによる振動速度測定も行った。

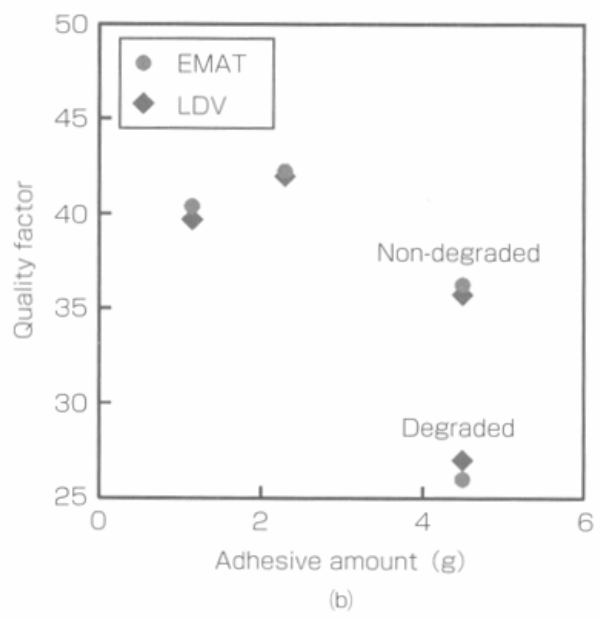
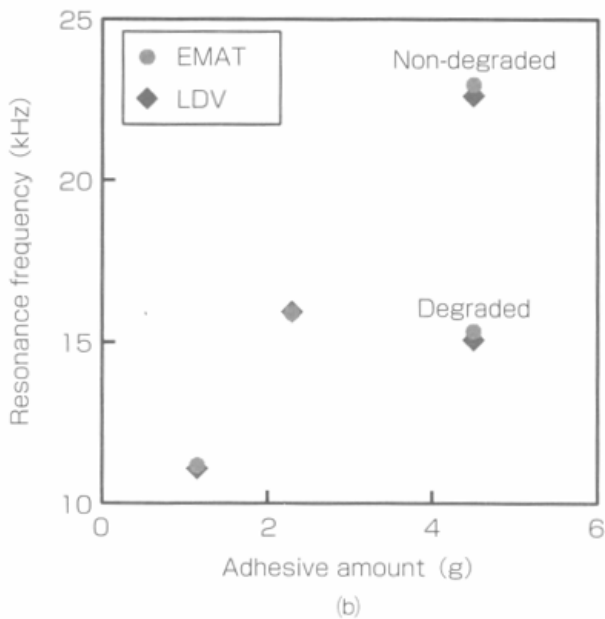
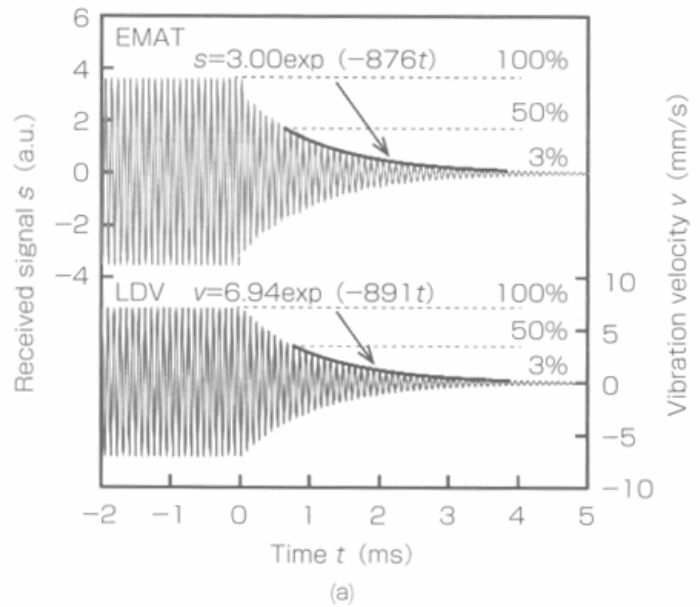
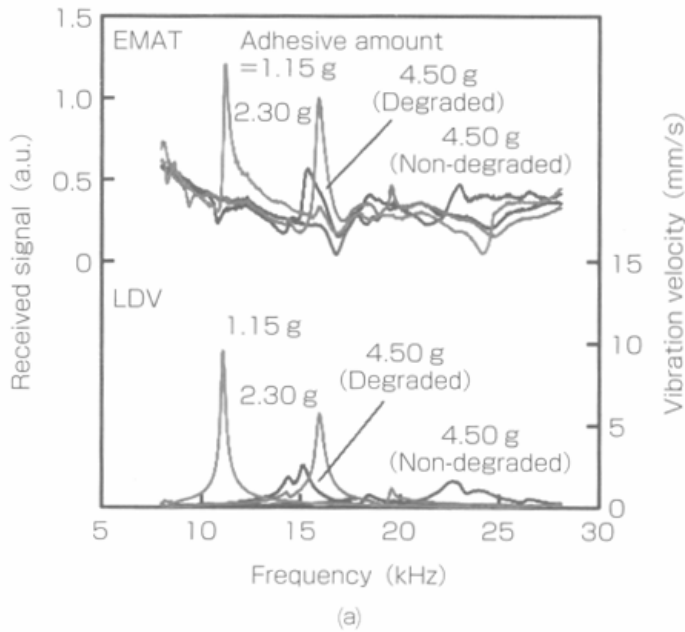
2-2 実験結果

LDVを用いて測定したボルトの振動速度と、EMATで検出した信号の大きさの周波数特性を第2図(a)に示す。EMATの信号は、アンプの利得の周波数特性で除した。鉄の縦波音速は5120 m/s⁽²⁰⁾であるので、長さ100 mmの鉄の片端固定の条件での1次の共振周波数は約10.3 kHzとなると考えられる。同図において概ね予想した周波数でピークをみることができる。第2図(b)に接着剤の量と共振周波数との関係を示す。接着剤の量が増えるにつれて、共振周波数が高くなることが明らかになった。また、加熱による劣化によって共振周波数が低下することが示唆された。LDVとEMATの誤差は最大でも1.7%であり、EMATによる測定の信頼性を確認できた。

次に、第3図(a)にEMATの検出信号と振動速度の、励振中と励振停止後の時間変化の一例(接着剤の量1.15 g)を示す。励振コイルへの電圧印加停止を0 sと定義した。0 s以降、検出信号の振幅sは振動速度vと同様に指数関数的に減衰した。また、EMATの検出信号は停止直後に励振コイルに流れ続ける電流の影響を受けた。この影響を除去するため、振幅が励振中の50%から3%となる範囲で測定結果の最大点の指数関数近似を計算した。さらに、次式を用いてQ値を求めた⁽²¹⁾⁽²²⁾。

$$Q = -\frac{\omega_0}{2a} \quad \dots(1)$$

ここで、 a は指数関数近似における t の係数、 ω_0 は共振角周波数である。第3図(b)に接着剤の量とQ値との関係を示す。接着剤の量に関わらず、Q値は概ね一定であった。しかし、加熱による接着剤の劣化により、Q値は低下した。また、LDVとEMATによる測定誤差は3.7%未満であり、EMATの信頼性は高いといえる。以上の結果から、共振周波数やその共振のQ値によってアンカーの施工不良による接着



第2図

(a) EMATの検出信号と振動速度の周波数特性
 (b) 接着剤の量と共振周波数の関係

第3図

(a) 励振停止前後のEMAT検出信号と振動速度の時間変化の例
 (b) 接着剤の量とQ値の関係

剤の不足や、経年等による劣化の評価の可能性が提示された。また、LDVを用いなくとも、電磁的な非接触手法で十分に健全性を診断できることが明らかになった。

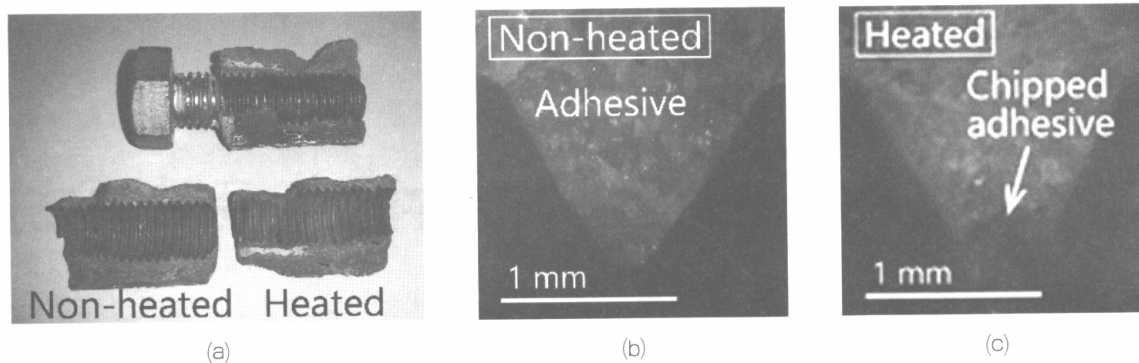
3. おわりに

EMATを用いたボルトの縦振動の励振と受信による、接着系アンカーの非接触での健全性評価手法を提案した。接着剤の量が増えるにつれて、共振周波数は増加、Q値は概ね一定であった。また、加熱による接着剤の劣化に伴い、共振周波数とQ値はと

もに低下することが明らかになった。本手法は、精密な位置合わせや接触を必要としないため、接着系アンカーの施工不良や経年劣化を評価する上での強力なツールとなることが期待される。

付録

加熱による接着剤の劣化の原因として、材料自体の劣化¹⁶⁻¹⁸や、金属と接着剤の熱膨張係数の不一致による欠損等¹⁹が考えられる。ここでは、ボルト固定後の加熱により接着剤がどのように劣化するかを調べた。長さ48 mmの六角ボルト (M12) に接着剤



第4図

(a) 接着剤とボルトの写真
(b)、(c) 未加熱試料と加熱試料の接着剤とボルト境界の顕微鏡写真

(EA-500S) を端部から30 mmまで付着させた試料を2つ用意した。一方の試料を約200度で1時間加熱し、空冷で室温に戻した。続いて、2つの試料の接着剤を割り(第4図(a))、接着剤とボルトの境界を顕微鏡で観察した。加熱していない試料(第4図(b))と異なり、加熱した試料(第4図(c))には加熱による劣化と解釈できる多くの欠損が観測された。

<参考文献>

- (1) H.Maekawa, S.Ushida, T.Kawada and H.Miyata: "Evaluation methods for soundness of adhesive portion around post-installed anchor bolts in concrete based on electromagnetic pulse", *Proc. Jpn. Concr. Inst.*, **37**, 1693-1698 (2015) [In Japanese]
- (2) T.Kimura, S.Uchida, H.Miyata and T.Kamada: "Non-destructive evaluation methods for soundness of adhesive anchoring portion in concrete by electromagnetic pulse", *Proc. Jpn. Concr. Inst.*, **36**, 2116-2121 (2014) [In Japanese]
- (3) P.Rizzo, A.Spada, S.Degala and G.Giambanco: "Acoustic emission monitoring of chemically bonded anchors", *J. Nondestruct. Eval.*, **29**, 49-61 (2010)
- (4) M.D.Beard and M.J.S.Lowe: "Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves", *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, **40**, 527-536 (2003)
- (5) M.D.Beard, M.J.S.Lowe and P.Cawley: "Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts", *J. Mater. Civ. Eng.*, **15**, 212-218 (2003)
- (6) J.Yu, M.Bae, I.Lee and J.Lee: "Nongrouted ratio evaluation of rock bolts by reflection of guided ultrasonic waves", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **139**, 298-307 (2013)
- (7) P.K.Larsen and K.Saermark: "Helicon excitation of acoustic waves in aluminium", *Phys. Lett.*, **24A**, 374-375 (1967)
- (8) E.R.Dobbs: "Electromagnetic generation of ultrasonic waves in metals", *J. Phys. Chem. Solids*, **31**, 1657-1667 (1970)
- (9) R.B.Thompson, G.A.Alers and M.A.Tennison: "Application of direct electromagnetic Lamb wave generation to gas pipeline inspection", *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, pp.91-94 (1972)
- (10) W.D.Wallace, J.R.Houck, R.Bowers, B.W.Maxfield and M.R.Gaertner: "Transducerless method for ultrasonic flaw testing in metals", *Rev. Sci. Instrum.*, **39**, 1863-1864 (1968)
- (11) M.Hirao and H.Ogi: *EMATs for Science and Industry: Non-contacting Ultrasonic Measurements* (Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 2003), p.1
- (12) K.Nakamura: *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications* (Woodhead Publishing, Cambridge, 2012), p.392
- (13) F.Hernandez-Valle and S.Dixon: "Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet", *NDT&E Int.*, **43**, 171-175 (2010)
- (14) S.E.Burrows, Y.Fan and S.Dixon: "High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers", *NDT&E Int.*, **68**, 73-77 (2014)
- (15) M.Hirao, H.Ogi and H.Fukuoka: "Resonance EMAT system for acoustoelastic stress measurement in sheet metals", *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 3198-3205 (1993)
- (16) S.R.Hartshorn: *Structural Adhesives: Chemistry and Technology* (Springer Science & Business Media, 2012) p.91
- (17) M.Yamashita and K.Suganuma: "Degradation mechanism of Ag-epoxy conductive adhesive/Sn-Pb plating interface by heat exposure", *J. Electron. Mater.*, **31**, 551-556 (2002)
- (18) X.Buch and M.E.R.Shanahan: "Thermal and thermo-oxidative ageing of an epoxy adhesive", *Polym. Degrad. Stabil.*, **68**, 403-411 (2000)
- (19) J.K.Nelson: *Dielectric Polymer Nanocomposites* (Springer Science & Business Media, New York, 2009), p.172
- (20) National Astronomical Observatory of Japan, *Chronological Scientific Tables* (Maruzen Publishing Co., Ltd, Tokyo, 2013), p.435 [In Japanese]
- (21) M.Kutz, *Handbook of Measurement in Science and Engineering, Vol.1* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2013), p.370
- (22) L.Cai: *Fundamentals of Mechanical Vibrations* (John Wiley & Sons, West Sussex, 2016), p.114

【筆者紹介】

長谷部 和彦

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所 修士課程修了

水野 洋輔

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所 助教

中村 健太郎

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所 教授