電磁センサ開発とその非破壊評価の適用例

Development of Electromagnetic Sensor and Its Application for NDE

菊池 弘昭^{*1}(正員), 中居 伸悟^{*1}, 清水 勇^{*1}, 岩田 圭司^{*2}

Hiroaki KIKUCHI (Mem.), Shingo NAKAI, Isamu SHIMIZU, Keiji IWATA

Magnetic hysteresis characteristics have good correlation with material degradations, and magnetic flux leakage technique detects small defects in ferromagnetic steels. Both methods use a single magnetic yoke, therefore we have a potential to evaluate simultaneously material degradation and small defects using a single magnetic measurement system. In this study, we composed an electromagnetic sensor, which can measure hysteresis curves and detect leakage magnetic flux near surface of the specimen, and tried simultaneous evaluations of degradation and sub-mm sized defects. The hysteresis curves are sensitive to material degradation, while are sensitive to small defects. Though magnetic flux leakage can detect small defects, it does not show a significant change against degradation. We successfully evaluated material degradation and small defects separately with the single measurement system.

Keywords: nondestructive evaluation, coercivity, magnetic flux leakage, material degradation, small defects.

1 緒言

橋梁、高速道路などの社会基盤構造物は、1960 年代の高度経済成長期に集中的に整備されたが、これら構造物の建替・新規建設は容易ではないことから、建設後 50 年を経過した今日もなお継続使用されているものは多い。よって、老朽化(高経年化)が進展しており、2012 年の笹子トンネル崩落事故のような重大事故のリスクが懸念されている。そのため、構造物の余寿命や健全性を把握した上で長期使用することが望まれており、健全性評価技術の高度化に対する期待は一層増している。一方、構造物には鉄鋼材が多用されており、その生産現場においては、歩留りや品質向上に加えて品質保証が重要である。これら構造物の健全性評価や鋼材の品質保証のために非破壊評価技術開発が盛んに進められている。評価手法としては、超音波、渦電流、磁粉、浸透、放射線探傷など様々存在するが、主に微小なきず、亀裂の発生検知を目的としているものが多い[1, 2]。それに対し、亀裂発生前の材質劣化の評価に有力な技術のひとつとして磁気的手法が挙げられる[3-6]。構造物の鋼材には強磁性を示すものが多用されていることによる。強磁性鉄鋼材料の磁気特性は塑性変形により生じる転位構造の変化[7, 8]や粒径[9, 10]、析出物[11, 12]等の微細組織に強く影響を受け、また材

料の機械的強度にも内部組織形態が強く反映される。その結果生じる磁気特性と機械的特性の相関を利用する。また、磁気的手法として磁束漏洩法がガスパイプライン等の配管減肉評価に用いられている[13-16]。この手法は鋼材の微小なきずや内部微小欠陥の評価にも適用し得るものと考えられる。材質劣化の評価においては磁化曲線を利用するが、非破壊評価応用においては一般的に磁気ヨークを利用して被検査材料を磁化する。磁束漏洩法においても磁気ヨークを用いて試験体を磁化する場合が一般的である。よって、磁気ヨークを用いて、磁束密度変化を測定するためのピックアップコイルと試料表面の磁束変化を測定するための磁界センサを一体化させることで材質劣化と微小なきず・欠陥の同時評価が可能になると期待できる。筆者らはこれまでに、同時評価の可能性について明らかにしてきたが[17]、本稿では一体化した電磁センサを構成し、交流励磁に基づきその動作について検討した結果、材質劣化と微小なきず・欠陥の同時評価を可能にしたので報告する。

2 実験方法

磁気ヨークを利用した計測による材質劣化と微小なきず・欠陥の同時評価の可能性を説明するため、始めに 2 次元有限要素法を用いた磁界解析を行った。Fig. 1 は、試料に微小なきず(孔)がある・なしの場合における、試料内部及びヨーク内の磁束密度の分布を計算した結果を示した図である。磁化曲線を計測する場合、磁気ヨ

連絡先： 菊池 弘昭，〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5, 岩手大学工学部マテリアル工学科，
e-mail: hkiku@iwate-u.ac.jp

^{*1} 岩手大学，^{*2} 新日鐵住金

で走査し、磁化曲線から算出した保磁力やホールセンサ電圧の位置分布を計測した。測定開始位置は孔の中心より約 6 mm 離れた位置とし、ここを $x = 0$ mm としている。また、孔は試料と磁気ヨークが接触する面に位置するようにした。

3 実験結果

3.1 磁気ヒステリシス曲線

Fig. 5 には未圧延材、圧延材の磁化曲線を示した。Fig. 5 (a), (b) は、未圧延材のそれぞれ孔あり、孔なしの試料の磁化曲線で、測定位置は $x = 0, 5.5, 6$ mm とした。孔ありの $x = 5.5, 6$ mm の位置はおおよそ孔の端部位置に相当する。いずれにおいても磁化曲線に大きな差は得られていない。Fig. 5 (c), (d) は、圧延材における孔あり、孔なしの試料の磁化曲線で、測定位置はそれぞれの試料において $x = 0, 5.5, 6$ mm とした。未圧延材の場合と同様、磁化曲線に差異はみられない。一方、未圧延材と圧延材の磁化曲線を比較すると、圧延材の方が保磁力は増加し、ループの傾きも増加しており、顕著な差がみられることから劣化診断が可能であることを示している。なお、未圧延材及び圧延材のビッカース硬度を計測したところ、それぞれ 140, 206 程度の値であった。

3.2 ホールセンサ電圧の位置依存性

Fig. 6 は未圧延材及び圧延材のホール素子電圧の時間依存性を示した図である。比較のために励磁コイルに印加した電流波形も示している。また、測定位置は $x = 0, 5.5, 6$ mm とした。孔を有する試料においては 5.5, 6 mm の位置は孔の端部近傍である。未圧延・圧延材ともに孔のない試料においては、位置に依存せず電圧波形は同様の時間依存性を示す。一方、孔を有する試料においては、位置により電圧波形に変化がみられる。位置 0 mm の波形と比較して、5.5 mm では振幅が増加し、6 mm の位置では低下する。

本来、孔がない箇所でのホールセンサ出力は時間に依存せず、一定値になると期待されるが、本研究では、孔のない位置においても励磁電流に依存した出力が検出されていることが確認される($x = 0$ mm)。すなわち、励磁電流に依存した磁界がホールセンサに印加されてオフセットを生じている。オフセットがない場合、ホールセンサ電圧の最大値は孔付近で双対のピークを生じると期待されるが、ここではオフセットに起因して最大・最小値が観測され、直流の磁束漏洩で観測され

Fig. 5 Hysteresis curves of undeformed/deformed specimens without/with a hole.

るプロファイルに似た特性を示している。本研究では、より大きな変化を得るために、ホールセンサ電圧の最大値と最小値を検知し、その差分を取って評価した。Fig. 7 には、未圧延材、圧延材におけるホールセンサ電圧の最大値、最小値を測定位置に対して示したグラフを示した。それぞれにおいて孔の有無の場合について

Fig. 6 Time dependence of output voltage of Hall sensor and applied current for specimens undeformed/deformed without/with a hole.

示している。未圧延、圧延いずれの試料においても孔の有る場合、孔付近でホールセンサ電圧に大きな変化が確認される。具体的には、最大値・最小値は 5.5 mm でそれぞれ最大・最小を示しており、6 mm では、最

Fig. 7 Position dependence on maximum and minimum value of output voltage.

小・最大を示している。一方、孔のない試料では最大値・最小値ともほぼ一定の値を示している。

3.3 保磁力・ホールセンサ電圧差分の位置依存性

Fig. 8 には、保磁力及びホールセンサ電圧の最大値と最小値の差分を測定位置に対してプロットした図を示した。いずれの場合でも未圧延材・圧延材の試料に対して孔の有無を比較して示した。保磁力においては、孔の有無には関係なく、保磁力の位置分布は一定であるが、未圧延材、圧延材との比較においてはその値に明確な差を確認できる。未圧延材では 0.6-0.7 kA/m、圧延材では 1.1 kA/m である。よって、材質の劣化には敏感であるが、位置分布には変化がないため微小欠陥の判別には向かない。一方、ホールセンサ電圧差分は、孔の有無で明確な違いを生じているため、孔の判別には有効である。孔を有する場合、5.5-6 mm 付近でホールセンサ電圧差分が最大・最小を示すのに対して、孔な

(a) coercive field

(b) leakage field

Fig. 8 Position dependence on coercive field and leakage field for specimens undeformed/deformed without/with a hole.

しの場合、差分は位置によらず一定の値となる。また、材質の違いによる明瞭な差は得られておらず、材質劣化の評価には不向きである。

3.4 励磁周波数依存性

磁束漏洩法単独の場合、励磁手法としては直流の適用も有りうるが、磁化曲線計測と一体化する場合、交流計測となる。そこで、ここでは、励磁周波数の違いによる測定結果への影響について実験的に検討した。励磁周波数は、0.1, 1 及び 10 Hz とした。測定系は Fig. 4 に示したものをを用いた。0.1, 1 Hz においてはフィルタの遮断周波数を 40 Hz とし、10 Hz では 400 Hz とし計測を行った。Fig. 9 には未圧延、圧延試料で孔ありの試料における保磁力の位置分布を測定した結果を示した。これまでに述べたとおり、孔の有無には反応しないので、一定の値を取る。一方、各励磁周波数において未圧

Fig. 9 Coercive field of undeformed/deformed specimens with a hole plotted against position when excitation frequency changed.

Fig. 10 Leakage field distribution of undeformed/deformed specimens with a hole when excitation frequency changed.

延と圧延材との違いは明確に読み取ることができる。また、周波数が増加すると渦電流損失の影響で、保磁力は増加しているのが明らかである。Fig. 10 は未圧延、圧延試料のうち孔ありの試料においてホールセンサ電圧の差分を計測位置に対して示した図である。励磁周波数、未圧延・圧延に依存することなく、孔近傍でホールセンサ電圧の変化が得られていることから、いずれの励磁周波数でも孔の判別が可能であることが明らかになった。ただし、励磁周波数を高周波化し、ローパスフィルタの遮断周波数を増加させた場合、ホールセンサ電圧では高調波ノイズ成分が乗り、SN 比が劣化する傾向が観測された。また、0.1 Hz を利用した場合、計測時間が大幅に増加した。実用化に際しては、評価に適した測定条件の選定が必要になる。

4 結言

強磁性を有する鋼材の材質劣化と微小欠陥検出を同時かつ分離して計測するために、磁化曲線と漏れ磁束を同時に検出可能な電磁センサを構築した。その電磁センサを用いて、材質劣化、微小欠陥を模擬した鋼材に対して有用性の確認を行った。磁化曲線は材質劣化のみに敏感である一方、漏れ磁束は微小欠陥のみを検出できた。このことから、材質劣化、微小欠陥の同時評価が可能となった。

参考文献

- [1] 土門 齊, 越出 慎一, やさしい非破壊検査技術, 工業調査会, 1996.
- [2] 非破壊評価工学, 日本非破壊検査協会, 1998.
- [3] D.C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hall, London UK, 1991.
- [4] J. M. Makar, B. K. Tanner, The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 222, No. 3, pp. 291–304, 2000.
- [5] K. Panda, K. Das, A. Mitra, D. Jiles, and C. Lo, Evaluation of deformation behavior of HSLA-100 steel using magnetic hysteresis technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 42, No. 10, pp. 3264–66, 2006.
- [6] S. Yamaura, Y. Furuya and T. Watanabe, The effect of grain boundary microstructure on Barkhausen noise in ferromagnetic materials, *Acta materialia*, Vol. 49, No. 15, pp. 3019–3027, 2001.
- [7] H. Kronmüller, Magnetic techniques for the study of dislocations in ferromagnetic materials, *International Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 3, pp. 315–350, 1972.
- [8] S. Takahashi, J. Echigoya, Z. Motoki, *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, No. 2, pp. 805–813, 2001.
- [9] M. J. Sablik, Modeling the effect of grain size and dislocation density on hysteretic magnetic properties in steels, *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 10, pp. 5610–5613, 2001.
- [10] J. Anglada-Rivera, L. R. Padovese, J. Capo-Sanchez, Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 231, No. 2–3, pp. 299–306, 2001.
- [11] I. Altpeter, G. Dobmann, K.-H. Katerbau, M. Schick, P. Binkele, P. Kizler, S. Schmauder, Copper precipitates in 15 NiCuMoNb 5 (WB 36) steel: material properties and microstructure, atomistic simulation, and micromagnetic NDE techniques, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 206, No. 2–3, pp. 337–350, 2001.
- [12] Y. Kamada, S. Takahashi, H. Kikuchi, S. Kobayashi, K. Ara, J. Echigoya, Y. Tozawa, K. Watanabe, Effect of pre-deformation on the precipitation process and magnetic properties of Fe–Cu model alloys, *Journal of Material Science*, Vol. 44, No. 4, pp. 949–953, 2009.
- [13] C. Edwards, S. Palmer, The magnetic leakage field surface-breaking cracks, *Journal of Physics D, Applied Physics*, Vol. 19, No. 4, pp. 657–673, 1986.
- [14] T. Suzuma, Electromagnetic simulation technique for magnetic leakage flux testing, *Journal of the Japanese Society for Nondestructive Inspection*, Vol. 47, No. 2, pp. 92–97, 1998.
- [15] Y. Zhang, G. Yan, Detection of gas pipe wall thickness based on electromagnetic flux leakage, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 43, No. 2, pp. 123–132, 2007.
- [16] H. Kikuchi, Y. Kurisawa, Y. Kamada, S. Kobayashi, K. Ara, Feasibility study of magnetic flux leakage method for condition monitoring of wall thinning on tube, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 33, No. 3–4, pp. 1087–1094, 2010.
- [17] H. Kikuchi, I. Shimizu, K. Sato, K. Iwata, Nondestructive evaluation of material degradation and sub-millimeter sized defect detection in steel using magnetic measurements, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 1, pp. 25–31, 2014.