

交流誘起プローブによる強磁性体の欠陥検出・評価

Low-Frequency Electromagnetic Testing of Cracks in Ferromagnetic Structures

(一財)発電設備技術検査協会 程 衛英 Weiyang CHENG Member

Abstract. In the low-frequency electromagnetic nondestructive testing of cracks in ferromagnetic structures, both the magnetic flux leakage and eddy current perturbation coexist and the pickup signal is the combination of the two effects: signals arise from flux leakage effects when the crack orients transversal to the flux, and signals arise from eddy current perturbation when the crack orients transversal to the eddy currents. Numerical simulations are carried out to analyze the signals and the phase angles of the signals are applicable to the depth sizing.

Keywords: electromagnetic nondestructive testing, eddy current effect, magnetic flux leakage, phase angle, depth sizing

1. 諸言

強磁性である鉄鋼材料は高速道路や橋梁、パイプラインなどの社会インフラや産業インフラに幅広く使われているが、経年劣化に伴って発生する腐食や欠陥などによる破断が深刻な問題になる。これらの構造物の健全性を確保するために、定期的な検査が必要であり、有効な非破壊検査・評価法が要求される。超音波、放射線、打音検査などの非破壊検査法が開発され、現場に使われているが、それぞれの長所と短所があり、また、構造物の裏面や内面に発生する損傷はアクセスしにくいため特に検出困難である。電磁気法は非接触、高速検査可能などの特徴があり、構造物の裏面や内面などアクセスしにくい箇所に適用可能と考えられ、これらの損傷の検出・評価に期待される。

通常の電磁気検査方法は、被検体に磁界を印加させ、被検体に損傷があることによって、磁界あるいは関係物理量に変化が現れ、その変化を捉えることによって損傷を検出する方法である。様々な磁界印加方式のなか、通電コイル、即ち、励磁コイルを用いた磁界印加がよく使われており、直流や交流、パルス電流などによる磁界印加方式の電磁気非破壊検査法が開発された。また、交流誘起においては、検査対象や検出方式などによって、渦電流探傷法(ECT: Eddy Current Testing)、交流漏洩磁束法

Remote Field)、交流電磁場測定法(ACFM: Alternating Current Field Measurement)などが開発された。渦電流探傷法は名前の通り、渦電流効果を用いて損傷検出を行うが、交流励磁である交流漏洩磁束法や交流電磁場測定法においても渦電流が発生しており、その物理現象を利用することによって損傷検出を行う。通常の渦電流探傷法は常磁性導体の表面欠陥検査、交流漏洩磁束法は強磁性体の表面や表面近辺の欠陥検査、交流磁場探傷法は強磁性試験体にある表面開口欠陥の検出・評価に適用されると考えられる。リモートフィールド法が強磁性の管やパイプの裏面や内面欠陥検査に適用されているが、検出感度は十分とは言えない。いずれにしても、強磁性鉄鋼材料の裏面や内面欠陥の検出技術は十分とは言えない。

本研究では、強磁性体の裏面欠陥を対象に、交流磁界が印加された場合の検出信号を解析し、その特徴を分析することによって、電磁気法による強磁性体裏面欠陥検出の適用性を検討する。

2. 強磁性体における欠陥信号の特徴

交流磁界が強磁性体試験体に印加される場合、被検体に印加磁界と直交する渦電流が発生する。欠陥が渦電流の流れを妨げる場合に、渦電流探傷信号が得られる。一方、欠陥の長手方向が渦電流の流れと一致している場合、渦電流の流れが妨げられなく、渦電流信号がほとんど得られないが、欠陥が磁束と直交しているため、漏洩磁束が発生する。この漏洩磁束の検出によって、欠陥が検出できる。即ち、強磁性体の場合、渦電流効果と漏洩効果の何れも欠陥検出に利用可能である。

連絡先: 〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町 14-1、(一財)発電設備技術検査協会、溶接・非破壊検査技術センター
E-mail: cheng-weiyang@japeic.or.jp

(MFL: Magnetic Flux Leakage)、リモートフィールド法(RF:

ここでは、Double-D コイルプローブを用いて、6 mm厚強磁性体板（導電率 4.1M/s, 比透磁率 300）の表面及び裏面に発生する欠陥を検査することをシミュレーションする。Double-D 型コイルは対称に 2 個並べられ逆向きの電流を流す D 字型のコイルで構成される。隣あう D 字の直線部分に同じ向き電流が流れ、試験体の上に配置すると、両コイルの間に下方に同じ向き電流を発生させる。Fig. 1 に解析に用いた Double-D 型コイルプローブを示す。両励磁コイルは平均直径 120 mm、径方向幅 4 mm、高さ 10 mm の半円である。2 個の D 字コイルの間（D 字の直線部分）の距離は 78 mm である。超伝導 SQUID センサを用いて検出することを想定し、超伝導線で巻かれた検出コイルが両 D 型励磁コイルの間の中心上に設置されると仮定し、シミュレーションを行う。コイルの平均直径は 52.5 mm、径方向幅は 5 mm、高さは 11 mm、巻き数は 20 である。検出コイルの中心は励磁コイルの中心と同じ高さであり、向き（検出コイルの法線方向）はそれぞれ X 方向と Z 方向である。プローブが空气中に配置されるとき、X 方向検出コイルと Z 方向検出コイルを通る磁束はともに 0 であるため、プローブが試験体上に配置されたとき検出コイルがピックアップした信号は全て試験体によるものである。即ち、このプローブは 'self-nulling' である。

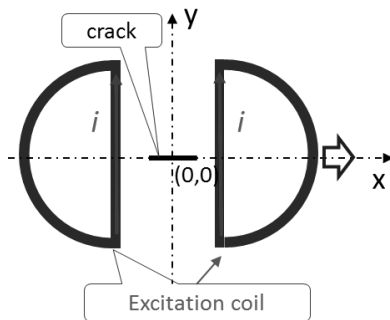
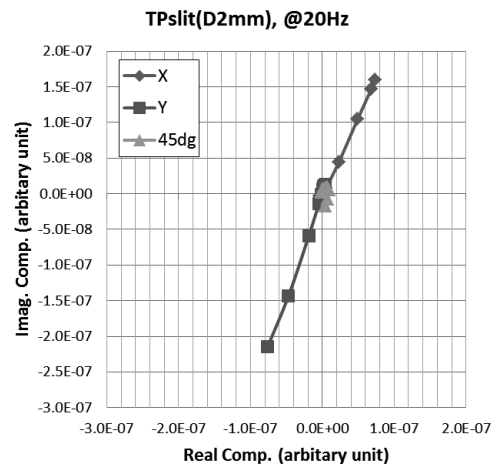


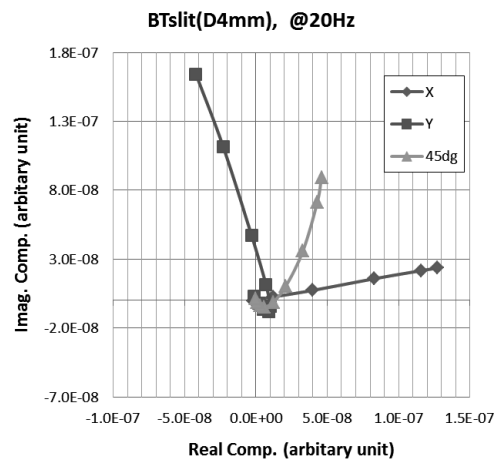
Fig. 1 Double-D coil and the crack

十分大きな厚さ 6 mm の被検体の中心に長手が X 軸方向（渦電流と直交）の長さ 50 mm、幅 0.4 mm の欠陥が存在すると仮定した。欠陥の深さは 4 通りでそれぞれ表面・裏面 1 mm、2 mm、4 mm、5 mm と仮定した。同じ欠陥に対し、3 方向の走査を行うことをシミュレーションした。まず、プローブが欠陥中心（X=0, Y=0）から長手の X 方向へ 10 mm ピッチで走査することをシミュレーションし、各走査点の X と Z 方向検出コイルが得る信号を計算した。欠陥が渦電流の流れと直交しているため、渦電流は欠陥

の側面と底面に回り込み、X と Z 方向検出コイルはそれぞれの渦電流の流れの変化による信号をピックアップした。次に、プローブを 90° 回転させ、欠陥中心から欠陥と直交方向に 10 mm ピッチで走査させる。渦電流の流れは欠陥の長手方向と同じであるため、渦電流の流れがほぼ変化しない。ところで、欠陥が磁束の流れ（Y 方向）を横切るため、漏洩磁束が発生する。検出コイルは Y 方向と Z 方向を向いているため、検出コイルは Y 方向と Z 方向の漏洩磁束をピックアップした。最後に、プローブ 45° を回転させ、欠陥中心から 45° の方向へ 10 mm ピッチで走査する。この場合、欠陥は渦電流の流れも妨げるし、磁束の流れも部分的に切られる。即ち、渦電流効果と漏洩



(a) Surface crack (D=2mm)



(b) Back-side crack (D=4mm)

Fig. 2 Signals taken by the three directional scans (X: signals due to eddy current effect ; Y : signals due to magnetic flux leakage effect ; 45dg: signals of 45 degree crack)

磁束効果が共存する。検出信号はこの二つの効果の合成である。

Fig. 2 は表面 2 mm 欠陥と裏面 4 mm 欠陥の 2 方向走査の X と Y 方向信号のリサージュ図である (励磁周波数 20 Hz)。表面欠陥において、渦電流による信号と漏洩効果による信号はほぼ 180° ずれており、 45° ななめの欠陥において、渦電流効果と漏洩効果の信号が相殺されるため、最終的に得られた信号は 0 に近い。プローブを X 軸の中心から $0^\circ \sim 45^\circ$ 回転させると、渦電流による信号 (Fig. 2 に X で示す) がだんだん小さくなり、 45° の位置で信号が一番小さくなる。それから 90° の方向へ回すと、漏洩磁束による信号 (Fig. 2 に Y で示す) が最大になる。X 方向と Y 方向の欠陥が共に高感度で検出可能が、 45° ななめ欠陥がほぼ検出不可能である。一方、裏面欠陥に対し、渦電流による信号と漏洩効果による信号の位相差は 180° ではない。また、 45° ななめの欠陥に対しても、渦電流効果と漏洩効果が全部相殺されないため、一定の値の信号が現れた。いずれにも、 45° ななめ欠陥の検出感度は低い。

Z 方向の検出信号の位相にも同じ傾向を示した。また、励磁周波数が 50 Hz を設定した場合の信号にも同じ傾向が現れた。

3. 欠陥深さ評価

Fig. 3 に表面欠陥信号の位相がほぼ欠陥深さの線形関数であることを示した。裏面欠陥に置いて、X 方向や Y 方向信号自体は欠陥深さの線形関数ではないが、渦電流による信号 (B_x) と漏洩効果による信号 (B_y) の位相差を取り、位相差と欠陥深さとの関係をまとめてみると、欠陥深さはほぼ位相差の線形関数であることが示された (Fig. 4)。また、X と Y 方向走査における Z 方向信号の位相差も同じことを示した。更に、50 Hz 励磁の場合の位相差は 20 Hz の場合より大きい。即ち、周波数が高くなるほど、位相差が大きくなる。信号の位相または 90° 直交の二方向走査信号の位相差により強磁性試験体表面や裏面にある欠陥を深さ評価可能と考えられる。

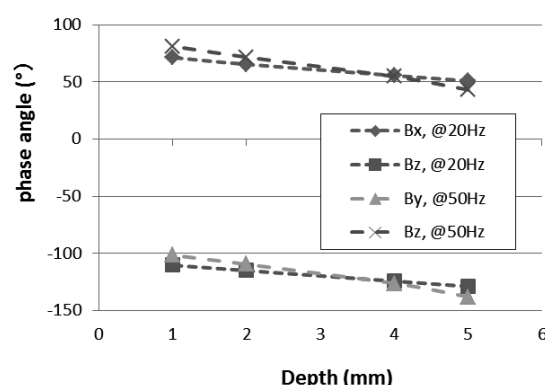


Fig. 3 Depth of surface crack and the phase angles of signals

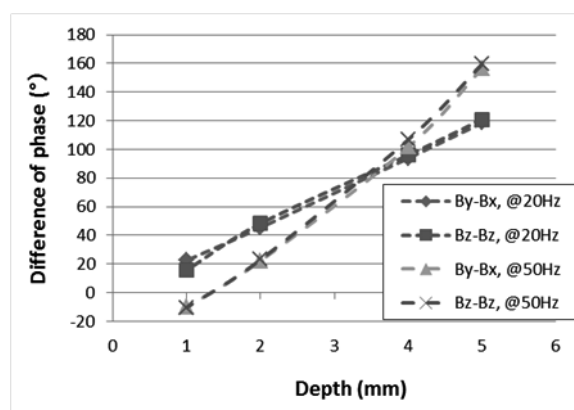


Fig. 4 Depth of back-side crack and the difference between the phases of X- and Y-direction scan signals

4. まとめ

低周波交流励磁プローブを用いて強磁性体試験体に存在する欠陥を検出する場合、渦電流効果と漏洩磁束効果が共に存在しており、検出信号はこの二つの効果の合成である。欠陥の検出感度は欠陥と渦電流の流れや磁束の流れの方向に依存する。検出信号の位相を分析することによって欠陥深さサイジング可能である。

