

磁気飽和 ECT による微小き裂の探傷と傷形状推定

Flaw detection for microcrack and crack shape estimation with magnetic saturation ECT

滋賀県立大学
滋賀県立大学

福岡 克弘
長谷川 諒

Katsuhiro FUKUOKA
Ryo HASEGAWA

Member
Non-member

In eddy current testing (ECT), the permeability distribution of the steel materials affects inspection results and the signal-to-noise (S/N) ratio decreases. Therefore, magnetizing the materials is required to reduce the magnetic noise. In this research, the spring steel materials that have artificial microcracks were magnetized and inspected to evaluate detection performance of a developed ECT probe. It was confirmed that the probe is able to detect the 40 μm depth crack with the S/N ratio of 3 or more. In addition, the permeability distribution around the crack in the magnetic saturation ECT was clarified with a finite element method (FEM) analysis.

Keywords: Eddy current testing (ECT), spring steel, magnetic saturation, microcrack, finite element method (FEM) analysis, magnetic noise

1. はじめに

強磁性体である鋼材に渦電流試験 (ECT : Eddy current testing) を適用した場合、鋼材中に分布する透磁率のばらつきに起因する磁気ノイズにより、探傷信号の S/N 比が低下し、微小な傷を検出できない問題点がある。そのため一般的には、試験体を磁気飽和するまで磁化することにより、磁気ノイズを低減させる磁気飽和 ECT が用いられる。先行研究では、高速な探傷に主眼を置き、貫通コイルプローブによる、ばね鋼材における微小傷の探傷を検討した。この貫通コイルプローブを用いて、放電加工 (EDM : Electro-discharge machining) により加工した深さ 70 μm の微小傷 (実現場における性能要求) を、 S/N 比 2.5 以上で検出可能であることを確認している[1]。

本研究では、ばね鋼材における深さ 50 μm の傷を十分な S/N 比 (2 以上) で検出可能な探傷システム、および探傷信号から傷形状を評価するのに有利な特徴を持つ ECT プローブの開発を検討した。開発した探傷システムおよび探傷プローブにより微小傷の探傷と探傷信号からの傷形状の推定評価を行った。さらに、有限要素法解析により傷周辺における透磁率分布を評価し、透磁率分布と探傷信号との関係についても考察したので報告する。

2. 探傷システムおよび探傷方法

Fig.1(a)に、鋼材を磁気飽和させるための磁化器と ECT

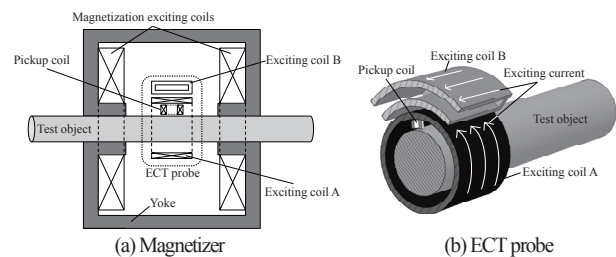


Fig.1 Magnetizer and ECT probe.

プローブの配置図を示す。磁化器の 2 個の磁化励磁コイルがプローブを挟む形で構成される。磁化は直流で行い、試験鋼材が十分な強度で磁化するように励磁電流は 1.3A とした。ECT プローブは Fig.1(b) に示すように、2 種類の励磁コイル (励磁コイル A および B) とパンケーキ型検出コイルにより構成される相互誘導型の回転コイルプローブとした。励磁コイル A は試験鋼材の外周に沿って巻き、鋼材周方向に渦電流を発生させる。励磁コイル B は励磁コイル A の外側に配置し、コイル軸を鋼材の周方向として巻いた瓦形のコイルであり、鋼材軸方向に渦電流を発生させる。この 2 種類の励磁コイルを使い分けることで、傷の長手方向に対して直交と平行の 2 種類の渦電流を発生できる。探傷周波数は 200kHz とした。

試験体は、ばね鋼材 (直径 10.4mm、長さ 395mm) の表面に、深さおよび方向の異なる人工傷 (軸方向傷 : 29, 40, 53, 58, 80, 114 μm 、周方向傷 : 51, 68, 98 μm) を放電加工して作製した (以下 EDM 傷と呼ぶ)。傷の幅は 100 μm 、長

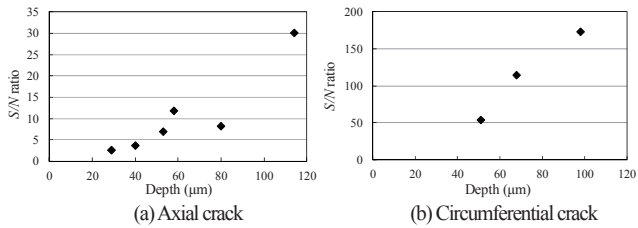


Fig.2 Crack depth and S/N ratio of signal.

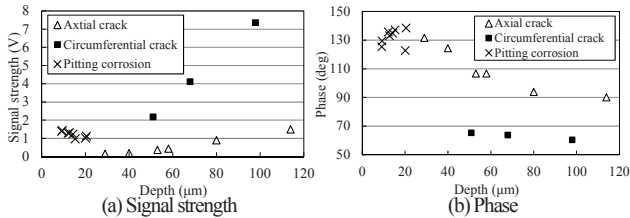


Fig.3 Signal strength and phase.

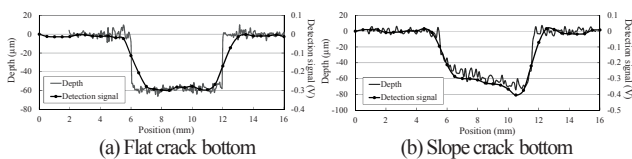


Fig.4 Detection signal distribution and crack profile.

さは6mm一定とした。軸方向傷における傷深さは、場所による変化がない傷（前述の傷深さの傷）に加えて、傷底部に傾斜があり傷深さが場所により異なる傷についても検討した。周方向傷については一様な傷深さの傷のみを検討した。さらに、EDM傷の試験体と同じ形状材質のばね鋼材に付与した錆による孔食の検出感度も評価した。

3. 探傷結果

まず、本プローブの微小傷に対する検出感度を検証した。ここでは、励磁コイルAを用いてプローブの感度を評価した。探傷結果からS/N比を評価してFig.2に示す。同じ深さの傷において、周方向傷は軸方向傷よりも高いS/N比で探傷されることが確認される。傷が深くなると、S/N比はほぼ比例して増加する。S/N比の低い軸方向傷においても、深さ40 μm の傷ではS/N比が3.7、29 μm では2.6であるため、傷深さ30~40 μm が本プローブの検出性能の限界であると判断される。ばね鋼材の生産現場における検出感度の要求は、伸線過程において発生する深さ70 μm の軸方向傷の検出であるが、本プローブは性能要求のほぼ2倍の性能を有していることが確認された。

次に、EDM傷および錆による孔食を探傷した際の、探傷信号の強度と位相を評価してFig.3に示す。孔食は、傷の深さおよび体積が異なる8個の傷を評価した。まずEDM傷に着目すると、傷深さに比例して信号強度が増加することが判る。また、傷深さが同じ場合、周方向傷の方が軸方向傷に比べて信号強度が大きい。これは、励磁

コイルAを用いた探傷では、周方向傷に対して直交方向に磁束が発生するため、傷からの漏洩磁束が多くなる。この漏洩磁束に起因した信号が、渦電流による信号に加算されるためであると考察される。孔食の信号強度は、傷の深さおよび体積による変化は少なく、各傷で同程度の値となる。また、軸方向および周方向EDM傷のいずれの直線にも乗らず、孔食の深さよりも深いEDM傷（軸方向80 μm ）と同程度の信号強度となることが確認される。つまり、孔食では錆による材料変質（導電率と透磁率の変化）が傷周辺の広範囲に及び、それに起因して渦電流分布が変化しているものと考えられる。Fig.3(b)の位相に着目すると、EDM傷に関しては深い傷ほど位相が小さくなる。また、傷深さが同じ場合、軸方向傷の探傷信号は周方向傷に比べて、位相は大きくなることが確認できる。孔食では、軸方向の浅いEDM傷とほぼ同じ位相となる。

4. 探傷信号と傷形状との関係評価

軸方向傷を励磁コイルAにより探傷した場合、傷両端部に集中する渦電流により探傷信号が出力される。一方、励磁コイルBを用いて軸方向傷を探傷した場合、傷長手方向の側面部を流れる渦電流分布に起因する探傷信号が出力される。したがって、傷の深さが一様ではない傷の場合、傷の深さに応じて実効的な傷の断面積は変化し、傷の深さに対応した強度の探傷信号が出力される。よって、傷と平行に渦電流を流した探傷信号の強度は、傷の深さ方向の輪郭と相関関係があるものと考察される。傷と平行に渦電流を流した条件での探傷信号を、レーザ変位計により測定した傷プロファイルと比較してFig.4に示す。Fig.4(a)は傷深さ58 μm の傷底部が一様な傷の結果、Fig.4(b)は傷底部に傾斜が付いた傷（平均傷深さ57 μm ）の結果である。Fig.4(a)の傷底部が一様である場合、傷部における探傷信号強度は一定となる。Fig.4(b)の傷底部に傾斜が付いた傷においては、傷の深さが深い場所では、それに応じて探傷信号が大きくなる。この探傷信号の形状は傷プロファイルとよく一致しており、傷と平行に渦電流を流した探傷結果により、傷の深さ方向の形状を推定できることが確認された。

本研究の一部は、科研費（18K03843）の研究助成を受け実施したものである。

参考文献

[1] K.Fukuoka, *Int. J. of Appl. Electromagn. Mech.*, Vol.52, No.3-4, 2016, pp.1177-1183.