漏洩磁束探傷法による欠陥寸法の予測方法の提案*

寺崎 俊夫^{*1}, 秋山 哲也^{*2}, 清水 一典^{*3}

Estimation of Defect Sizes by Magnetic Leakage Flux Method

Toshio TERASAKI, Tetsuya AKIYAMA and Kazunori SHIMIZU

We consider how to predict defect sizes, depth and width, from wave forms of the leakage flux obtained by the magnetic leakage flux method. Measurements of leakage flux were carried out using plane specimens with various values of depth and width of the defect and the lift off which is the distance between the specimen surface and the probe, and a quasi-weld reinforcement specimen. The absolute value of maximum leakage flux was affected by the plate thickness or the shape of reinforcement not but by the defect shape. Therefore the absolute value method used by many researchers is not suitable for estimating the sizes of defect in a joint in which the average flux is not known. However, the wave form of leakage flux is almost unaffected by factors other than the defect sizes. The depth and width of the defect are estimated by the proposed method that the two feature points of the wave form, for example the maximum leakage flux and one-tenth of the maximum value, of experimental value are combined to the above feature points of the wave form calculated from the dipole modeling.

Key Words: Nondestructive Inspection, Welded Joint, Notch, Magnetic Leakage Flux Method, Dipole Model

1. 緒言

漏洩磁束探傷法は強磁性体の表面欠陥を非破壊で検出する検査方法であり, 表面欠陥を自動探傷する有効な試験方法として古くから研究されている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾. 特に, 欠陥寸法と漏洩磁束密度の関係を扱った報告が多くなされている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾. しかし, 欠陥寸法を系統的に変化させた漏洩磁束密度の実験値と計算値を比較検討して, 欠陥寸法を予測する方法を報告した論文はまだ少ないようである⁽¹⁰⁾. 欠陥寸法が変化したときの漏洩磁束密度の実験値は白石⁽⁴⁾やLoadら⁽¹¹⁾によって研究されているが, 当時の測定器具の測定精度などの限界により, 欠陥寸法の予測に有効な実験値の情報が十分に得られていないようである. 従って, 最新の器械で欠陥寸法による漏洩磁束密度の特徴を明らかにする実験は意義がある.

一方, 著者らは欠陥による漏洩磁束密度の特徴を有限要素法による数値解析および双極子モデルで詳細に検討し, 漏洩磁束密度の絶対値を計算で予測することの困難さを指摘した⁽¹¹⁾. そして, 漏洩磁束密度の絶対値の情報から欠陥寸法を予測することは非常に難しいことを示唆した.

本報告では"漏洩磁束密度の絶対値の情報から欠陥寸法を予測することの困難さ"を明らかにするとともに,

"漏洩磁束密度の波形を用いると欠陥寸法の予測が可能であること"を明らかにした.

2. 実験

2. 1 実験方法 Fig.1 に漏洩磁束の実験に使用した電磁石, 試験片およびホール素子を示す. ホール素子は樹脂で保護されており, 試験片表面に接触した状態でも表面から 0.2 mm の位置にあり, リフトオフ h は最小で 0.2 mm となった. 実験ではリフトオフを一定にするために, ガラス板を欠陥の表面に置いた. ガラス板の有無により漏洩磁束密度が変化しないことは確認している⁽¹¹⁾. 実験値はA/D変換器を通してパソコン

(a) Magnet and specimen

(b) Hall probe

Fig.1 Apparatus for magnetic leakage flux method

* 原稿受付 1996 年 6 月 3 日.

^{*1} 正員, 九州工業大学 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1).^{*2} 九州工業大学.^{*3} 九州工業大学学生.

Fig.2 Shape of specimen and defect

ン入力し、ホール素子の移動を自動制御して、同じ点で5回測定した平均値をパソコン処理して出力している。そして、波形がほぼ同じデータが2回得られた実験値を採用した。

2. 2 試験片 試験片の材料は板厚 22mm の溶接構造用圧延鋼材SM490であり、Fig.2 に示すように長さ 245 mm、板幅 47 mm の欠陥を設けた平滑試験片と擬似余盛り試験片を実験に使用した。欠陥は2次元欠陥であり、放電加工機で試験片幅方向に一樣な形状に製作した。平滑試験片は板厚 t を 13, 18 mm、欠陥幅 b を 0.4, 0.9, 1.9 mm、欠陥深さ d を 1.0, 2.3, 5.0 mm と変化させた。擬似余盛り試験片は Fig.2(b) に示す形状に製作した。

3. 欠陥による漏洩磁束密度

Fig.3 Leakage flux due to magnetic pole

Fig.4 Leakage flux

3. 1 磁極による漏洩磁束密度 Fig.3 に欠陥の存在しない平滑試験片の漏洩磁束密度の実験値を示す。横軸の原点は電磁石の磁極間の中央点である。電磁石の磁化電流は $I=0.62$ A の直流である。図より試験片表面に垂直な漏洩磁束密度 B_N は点対称であり、電磁石の両極から漏洩していることを示唆している。図中の破線は B_N を原点を通る直線で近似している。原点から 20 mm 以内の B_N は直線で近似できている。

3. 2 欠陥による漏洩磁束密度 Fig.4 は欠陥深さ 5 mm、欠陥幅 0.4 mm の欠陥を持った平滑試験片でのリフトオフ 0.2 mm 上の漏洩磁束密度 B_N の測定値（破線）と磁極による影響を次の考えにより取り除いた欠陥のみによる B_N （実線）を示している。著者らの実験装置では磁極からの漏洩磁束が存在するため、欠陥のみによる漏洩磁束を Fig.5 及び以下に説明する方法で求めた。

(1) 欠陥による漏洩磁束密度 B_N は点対称であり、

Fig.4 に一例を示すように点対称点から距離 約 10 mm

Fig.5 Leakage flux by defect and pole

以内に存在している。

(2)磁極による漏洩磁束密度は距離 10 mm 以内では Fig.3 に示すように、直線 ($P(x)$ とする) で近似できる。

(3)任意座標 X での極値 C, D 点の情報 $C(X_C, B_C)$, $D(X_D, B_D)$ から中点 $o'(X_o, B_o)$ を計算する。 C, D 点の漏洩磁束密度にノイズが載っていないければ、求めた o' 点が点対称点になる。一般にはノイズが載っているから、 o' 点は点対称点でない。しかし、点対称点 o と o' 点の位置の差は非常に小さいと考えられるため、 o' 点を x 軸の原点と仮定して、漏洩磁束密度の x 軸上の積分値が零となる条件 (点対称の条件) で点 $o(X_o, B_o)$ を決める。

(4)点対称点から距離 10~20 mm の範囲にあるデータすべてから傾きを計算してノイズの影響を受けない磁極による漏洩磁束密度 $P(x)$ を求め、実測値から取り除く。

以上の手順で求めた結果の一例が Fig.4 の実線である。欠陥のみによる漏洩磁束密度がほぼ点対称になっており上記の手法が使えることが分かる。

3. 3 欠陥による漏洩磁束密度の大きさ Fig.2 に示す 2 次元の理想的な欠陥について、漏洩磁束密度に影響を与える因子を考えると次のようになる。

(1)欠陥の幅 b と欠陥の深さ d が漏洩磁束密度の主因子となる。

(2)板内部を流れる磁束は板厚 t と電磁石の電流 I の影響を受けるため、 t, I は漏洩磁束密度の因子となる。

(3)漏洩磁束密度をホール素子で測定する場合にはホール素子の大きさや測定位置が漏洩磁束密度の因子となるため、試験片に垂直な漏洩磁束密度 B_N はホール素子の幅 w とリフトオフ h (試験片表面とホール素子との距離) の影響を受ける。

(4)溶接継手のように余盛り止端部に欠陥が存在する場合には、余盛り形状が漏洩磁束密度に影響を与える可能性がある。

Fig.6 に同じ欠陥寸法を持った擬似余盛りを設けた試験片と平滑試験片の漏洩磁束密度 B_N を示す。板厚を同じにして板厚内の平均磁束密度 B_{av} を一定にしている。横軸の原点は欠陥幅の中央の位置である。図より余盛り形状が B_N の大きさに影響を与えていることが分かる。

以上より溶接部の余盛り止端部に存在する欠陥を対象にする場合には、漏洩磁束密度 B_N に影響を与える因子は次式となる。

Fig.6 Leakage flux of plain and weld specimens

$$B_N = B_N(b, d, I, t, h, w, \text{余盛り形状の因子}, \dots) \quad (1)$$

Fig.7 に欠陥寸法が同じで板厚のみが異なる平滑試験片の漏洩磁束密度の実験値を示す。実験室で実験できたため、板厚部の平均磁束密度 B_{av} を同じ値 0.6 T にできた。実験値より、 B_{av} が同じであっても漏洩磁束密度が一定でないことが分かる。一般には、欠陥を検出する板の板厚に応じて、 B_{av} を一定にするように電磁石の電流を変化させることは不可能に近い。従って、平滑試験片であっても式(1)の余盛り形状以外の因子は B_N に影響を与える因子となる。

以上をまとめると、漏洩磁束密度の大きさは式(1)に示す欠陥以外の因子の影響を受けるため、漏洩磁束密度の大きさの情報から欠陥寸法を予測することは困難となる。

Fig.7 Comparison between leakage fluxes produced in two specimens with different thicknesses

Fig.8 Dipole model

4. 欠陥による漏洩磁束密度の波形

Load⁽¹⁾, Forster⁽²⁾らの研究をまとめると, "Zatsepin⁽³⁾の提案した双極子モデルを用いて, 実験値と計算値を一致させるように磁気量を決めても, 欠陥寸法の変化による漏洩磁束密度の大きさの変化は予測できない"ことが導かれる. 一方, 白岩⁽⁴⁾, 植竹⁽⁵⁾らの研究に注目すると, 双極子モデルにより計算された欠陥による漏洩磁束密度の波形が実験値と一致することが期待できる. そこで, 種々の欠陥寸法および擬似余盛り試験片で漏洩磁束密度の測定を行い, 実験値と計算値を比較検討した.

Fig.8 に計算に使用した2次元欠陥(幅 b , 深さ d)の双極子モデルを示す. 板表面に xy 面を取り, 欠陥幅の中心に原点を取っている. 欠陥の側面 $x = \pm b/2$ に $\pm m$ の磁気量を与えている. 2次元の欠陥漏洩磁束密度 B_N は次式で与えられる.

$$\frac{B_N}{(m/4\pi)} = \frac{1}{w} \{F(x+w/2) - F(x-w/2)\} \quad (2)$$

ただし, $F(x) = \int \log\{[(x-b/2)^2 + (z+d)^2]\}[(x+b/2)^2 + z^2]dx - \int \log\{[(x+b/2)^2 + (z+d)^2]\}[(x-b/2)^2 + z^2]dx$

Fig.9 Comparison of experimental data and calculation value

Fig.10 Comparison of experimental data and calculation value

$$+z^2]dx - \int \log\{[(x+b/2)^2 + (z+d)^2]\}[(x-b/2)^2 + z^2]dx$$

Fig.9 に平滑材に欠陥が存在する場合の実験値と計算値を示す. 計算値の定数は漏洩磁束密度の極値が実験値と計算値で一致するように決めている. 図より漏洩磁束密度の波形は計算で予測できていることが分かる.

Fig.10 に余盛り試験片の止端部に欠陥が存在する場合の実験値と計算値を示す. Fig.9 と同様に極値を一致させている. 図より漏洩磁束密度の実験値の波形が計算で予測できている.

Figs.9,10 より漏洩磁束密度の波形に注目して双極子モデルを用いれば, 欠陥寸法の予測が可能であると思われる.

5. 欠陥寸法の予測方法

5.1 欠陥寸法の予測方法 リフトオフ h 上の漏洩磁束密度は式(2)に $z=h$ を代入すると求められる. 式(2)が欠陥寸法 b, d の2変数を未知数にした式であるから, 次のステップに示すように方程式が2つあれば未知数2個が導かれる.

(1) B_N の極値の点 (x_M とする) は式(2)を使用して, $\partial B_N / \partial x = 0$ を計算することより決定される. すなわち, 次式が成り立つ.

$$F'(x_M + w/2) - F'(x_M - w/2) = 0 \quad (3)$$

(2) 式(3)から導かれた x_M を式(2)に代入することにより極値 $B_N^{\max}$ が計算できる. 漏洩磁束密度が $B_N^{\max}$ の $1/n$ の点 ($x_{1/n}$ とする) は $B_N / B_N^{\max} = 1/n$ を式(2)を使用して決定できる. すなわち, 次式が成り立つ.

$$\frac{F(x_{1/n} + w/2) - F(x_{1/n} - w/2)}{F(x_M + w/2) - F(x_M - w/2)} = \frac{1}{n} \quad (4)$$

(3)実験値から極値点 x_M と $x_{1/n}$ 点を読みとり、上記の式(3)、(4)の式に代入すると未知数である欠陥寸法 b, d が決定できる。数値計算は2元ニュートン法を用いて計算するとパソコンで瞬時に求められる。

5. 2 欠陥寸法の予測 欠陥予測において式(4)の $1/n$ の最適値がいくらであるかは現在のところ不明であり、今後の重要な問題であると思われる。本論文では波形による予測方法の妥当性を検討するために $n=10$ として欠陥寸法を予測する。Table 1 に欠陥寸法を5種類変化させた平滑試験片と擬似余盛り試験片（*のついたデータ）の欠陥寸法 b, d 、漏洩磁束の波形から読みとった漏洩磁束密度の最大値 $B_N^{\max}$ の位置 x_M と $B_N / B_N^{\max} = 1/10$ の位置 $x_{1/10}$ 、および欠陥寸法の予測値 $\hat{b}, \hat{d}$ を示す。リフトオフが 0.2, 0.35 mm であるとき、欠陥深さ d は約40%の誤差で予測できているが、欠陥幅 b の予測精度は悪い。しかし、実用上で重要な欠陥寸法は深さであり、しかもアングカッは深さが重要である。リフトオフ 0.2mm はホール素子を試験片表面に接触して動かした状態であり、これ以上小さなリフトオフの実験はできない。リフトオフ 0.35, 1.5mm の実験値はガラス板で高さを一定にして測定した結果である。 $h=1.5\text{mm}$ のデータから予測された欠陥寸法の値が誤差を多く含んでいるのは、漏洩磁束密度の実測値が小さいため、ノイズの影響を受け鮮明な曲線が得られなかったためである。

れなかったためである。

*のデータは擬似余盛り試験片での結果であり、リフトオフ $h=0.35\text{ mm}$ の漏洩磁束密度の波形から予測している。欠陥深さが平滑試験片と同程度の誤差で予測できていると思われる。

6. 結論

本報告では二次元の欠陥による漏洩磁束密度の実験を系統的に行い、漏洩磁束密度の波形による欠陥寸法の予測方法を提案した。得られた主な結論を以下に示す。

- (1)欠陥の予測を漏洩磁束密度の大きさ（絶対値）から行うことは非常に問題がある。
- (2)漏洩磁束密度の波形に注目して、双極子モデルの理論式から欠陥寸法を予測する手法を提案した。
- (3)実験を行った結果、リフトオフが 0.35 mm 以内であるとき、欠陥深さが約40%の誤差で予測できた。しかし、欠陥幅の予測には問題がある。

参考文献

- (1) W.Load, J.M. Bridges, W.Yen and R. Palanisamy, Residual and Active Leakage Fields Around Defects in Ferromagnetic Materials, Materail Evalution, 36(1978), 47-54
- (2) F.Forster, New findings in the field of non-destructive magnetic leakage field inspection, NDT Int., 19(1986), 3-14
- (3) G. Dobmann, G. Walle and P.Holler, Magnetic leakage flux testing with probes: physical principles and restrictions for application, NDT Int., 20(1987), 101-105
- (4) 白石, 広島, 棒鋼および鋼管の自動磁気探傷法 (I), 非破壊検査, 21(1972), 166-176
- (5) 植竹, 伊藤, 漏洩磁束探傷法におけるリフトオフ効果と欠陥寸法評価方法, 33(1984), 788-797
- (6) 植竹, 伊藤, 斎藤, 漏洩磁束探傷におけるセンサの寸法効果について (第1報), 非破壊検査, 40(1991), 291-297
- (7) N.N. Zatsepin and V.E. Scherbinin, Calculation of the magneto-static field of surface defect. I. Field Topography of defect models, Defectoskopiya, (1966), 50-59
- (8) 田辺, 松藤, 四辻, 安藤, 西藤, 稲葉, 漏洩磁束探傷法による薄板板内部微小欠陥検出技術, 鉄と鋼, 96(1993), 841-846
- (9) 植竹, 漏洩磁束探傷試験法, 非破壊検査, 43(1994), 621-628
- (10) 加藤, 迎, 西尾, 橋本, 漏洩磁束探傷法による欠陥の幅及び深さの推定のシミュレーション, 非破壊検査, 33(1984), 59-67
- (11) 寺崎, 秋山, 塩津, 溶接欠陥による漏洩磁束に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, 55 (1994), 384

Table 1 Defect sizes and predictive values

b (mm)	d (mm)	h (mm)	x_M (mm)	$x_{1/10}$ (mm)	$\hat{b}$ (mm)	$\hat{d}$ (mm)
0.4	1.0	0.2	0.25	1.39	0.21	0.67
0.4	2.3	0.2	0.30	2.35	0.35	2.09
0.4	5.0	0.2	0.23	3.13	0.00	3.29
0.9	5.0	0.2	0.45	3.72	0.75	4.80
1.9	5.0	0.2	0.88	4.48	1.69	4.45
0.4	1.0	0.35	0.40	2.09	0.48	0.82
0.4	2.3	0.35	0.45	2.92	0.56	1.82
0.4	5.0	0.35	0.40	4.30	0.27	4.73
0.9	5.0	0.35	0.53	4.95	0.73	5.70
1.9	5.0	0.35	0.98	5.43	1.82	4.74
0.4	1.0	1.5	0.90	8.25	0.00	4.57
0.4	2.3	1.5	1.03	8.35	0.00	13.00
0.4	5.0	1.5	1.28	7.16	0.69	2.25
0.9	5.0	1.5	1.23	7.39	0.00	2.68
1.9	5.0	1.5	1.60	7.22	2.96	2.24
*0.4	5.0	0.35	0.45	4.62	0.49	5.28