赤外線サーモグラフィによる内部欠陥の3次元形状評価に関する基礎的研究 ～欠陥の厚さの検討～

Evaluation on 3-Dimension shape of Internal Defect with Infrared Thermography ～ Examination of Thickness of Defect ～

○ 平田俊信 (関西大院) 正 新家 昇 (関西大) 正 宅間正則 (関西大)

Toshinobu HIRATA, Graduate School, Kansai University, 3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680

Noboru SHINKE, Kansai University

Masanori TAKUMA, Kansai University

Abstract: This study describes a method to evaluate the 3-D shape of the internal defect with infrared thermography. The temperature distributions of the surface of the test piece with an internal defect are measured by infrared thermography, while partly heating and stop heating from its back. From the experiments, the characteristic points derived from the 3-D shape of the defect were extracted by analyzing the temperature distributions from heating start to measuring finish. So by analyzing the time fluctuation of characteristic points, it was shown that the shape (i.e. width, depth, and thickness) of the defect was quantitatively able to evaluate.

Key Words: Infrared Thermography, Non-destructive Testing, Internal Defect, Quantitative Evaluation, Insulation Method

1. 緒言 機器・構造物の経年劣化による破壊事故が多数報告され、深刻な問題となっている。このようなことから、機器・構造物の維持管理の整備が急務となり、構造物を壊すことなく欠陥を検出する非破壊検査が注目されている。

非破壊検査法の一つである赤外線サーモグラフィ法は、非接触で広範囲な計測が可能であるなどの利点を有する。これまでの研究では、欠陥の幅や深さに対する定量的な評価が報告されているが、欠陥の厚さに関する定量的な評価法は報告されていない。そこで本研究では、欠陥の厚さに対して断熱温度場法を用いて定量的に評価する手法を提案し、その手法が欠陥の幅と深さに対しても適用可能かを検討した結果について報告する。

2. 研究概要 Fig.1 は本研究で用いた試験片形状を、Fig.2 は研究の概略を示したものである。

Fig.2 Experimental system and analysis process

試験片には炭素鋼を用い、黒色塗料で塗布した2枚の板を組み合わせて内部欠陥を模擬した。2枚の板の接触面には接触熱抵抗を抑えるために真空グリスを塗布し、欠陥には断熱材を挿入した。

実験には、加熱プレートにアルミニウム板、断熱プレートに断熱材を用いた。そして、それぞれをホットプレート(アズワン製、HHP-412)上に配置したのち、アルミニウム板の上に試験片底面の半分の領域(Fig.1に示した領域ABCDを参照)が接するように置いた。この際、試験片とアルミニウム板の接触面には、試験片を固定するために真空グリスを塗布し、両者を密着させた。そして、一定温度(40[°C])からホットプレートを120[s]間加熱し、加熱過程と加熱停止後における試験片表面の温度分布を赤外線サーモグラフィ(NEC 三栄製、TH3102MR)で239[s]間測定した。その際、1[pixel]を0.469[mm]とし、0.005[s]間隔でライン計測(Fig.1の赤線)を行った。このようにして得られた温度分布に対し、加熱開始直後から239[s]までの試験片表面の温度分布を解析する。そして、欠陥形状との間で相関が認められる特徴的な点を抽出し、その特徴点の変動に着目して、欠陥形状の定量的な評価を試みた。

3. 解析手法と結果 本研究では、得られたデータに対して

- I. 加熱時の温度分布
- II. 加熱停止後の温度分布
- III. 欠陥形状と相関のある特徴点間の時間変動波形
- IV. 特徴点の存在する位置

によるデータ解析を行い、欠陥形状を定量的に評価するためのパラメータを抽出する。なお、測定データには雑音が含まれており、これを除去するために、各時間に対する前後100点を積算平均化処理することと、各瞬間のデータに対する3点移動平均を施すことで、雑音を低減している。

初期温度の違いを補正するために、加熱開始から238[s]までの1[s]ごとの温度分布から加熱開始直後の温度分布を差分し、それぞれの温度上昇の分布を求めた。また、欠陥を含む試験片の温度上昇分布 T から欠陥を含まない試験片の温度上昇分布 T_n を差分することにより、欠陥による温度上昇分布の違いを強調した。この際、欠陥を含まない試験片は基準データとして用いるので、数回の実験データを積算平均化処理したものを基準データとして用いた。

上述のようにして得られた結果に対して隣り合う位置の勾配値 $\partial(T - T_n)/\partial x$ を求めると、Fig.3のようになる。同図から、欠陥形状に起因した特徴的な点①と②を見つけ出すことができた。その特徴点①と②の差 h を測定開始から238[s]までの1[s]ごとに調べた。Fig.4はその時間変動を示したもので、提案する欠陥の3次元形状評価に関するパラメータについて、以下に述べる。

Fig.3 Differential process

Fig.4 Time fraction of h (Method III)

3.1 加熱時の温度分布(解析方法 I) 測定開始 30[s] 後から加熱停止の 120[s] の間の h の時間変化に着目し、欠陥形状との相関を調べた。その結果を示したものが Fig.5 で、欠陥の幅と深さを一定にした状態では、欠陥の厚さによる違いは観られなかったが、欠陥の深さに対する違いが観られた。これは、観測面からの欠陥の位置(深さ)の違いと欠陥形状の特徴が、熱の拡散に影響を与えた結果、変化したものと推察される。

Fig.5 Relationship between dh/dt and the defect shape

3.2 加熱停止後の温度分布(解析手法 II) Fig.4 に示した特徴点の時間変動において、加熱停止から 118[s] 後の h の値に着目し、欠陥形状との相関を調べた。その結果を示したものが Fig.6 で、欠陥の幅や深さを一定にした状態で、欠陥の厚さによる相関が観られた。これは、観測面から見たときの欠陥の側面(厚さ)に蓄積された熱が欠陥によって断熱されており、非加熱部への熱の流入を妨げた結果であると推察される。したがって、蓄積される熱量は欠陥の厚さに依存することになる。

Fig.6 Relationship between h and the defect shape

3.3 h の時間変動波形(解析手法 III) Fig.4 に示した h の時間変動波形に対してフーリエ級数展開を行い、このときのフーリエ係数 b_1 に着目し、欠陥形状との相関を調べた。その結果を示したものが Fig.7 で、フーリエ係数 b_1 は波形の振幅によって決まるので、振幅が大きいくほど b_1 の絶対値は大きくなる。ここで、波形の振幅とは h の値であり、 h は欠陥の厚さと深さに依存したパラメータであることから、 R^2 値を考慮すると、 b_1 は欠陥の深さに対する影響は弱い、欠陥の厚さを評価するのに有効であるといえる。

フーリエ級数展開：

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2n\pi t}{T} dt, b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2n\pi t}{T} dt$$

$0 \leq n \leq N-1$ N : 抽出点数

Fig.7 Relationship between b_1 and the defect shape

3.4 特徴点の存在する位置(解析手法 IV) 加熱による熱がアルミニウム板との接触面から試験片に流入することで、欠陥には部分的に熱負荷が掛かっている (Fig.3 を参照)。したがって、加熱側の特徴点①は欠陥の一端であり、特徴点①の位置と中央の位置 (Fig.3 の黄線) との差 w_x を 2 倍することにより、欠陥の寸法を算出することができる。ここで、加熱停止後の 150[s] から測定終了までの特徴点①の位置に着目し、前述の計算方法によって算出された値を平均することにした。その結果を示したものが Fig.8 で、欠陥の幅を定量的に算出できることがわかる。

Fig.8 Evaluation on width of defect

4. 結 言 本研究で提案した手法により、加熱停止後の温度分布と特徴点より算出された h の時間変動から、欠陥の幅と深さが一定の場合において、欠陥の厚さを定量的に評価できることがわかった。また、欠陥の深さや幅についても、定量的に評価することができた。以上のことから、本研究で提案した手法を 3 次元形状評価に適用できる可能性を示すことができた。

参考文献

- 例えば、阪上隆英:破壊の発生・進展とその評価および抑制 4. 赤外線計測に基づく非破壊評価, 材料, 53-8, (2004), pp.930-935.
- 日本非破壊検査協会: 非破壊評価工学, (1998).
- 庄司正弘: 伝熱工学, 東京大学出版会, (1995).
- 中村尚五: デジタルフーリエ変換, 東京電機大学出版局, (1989).
- 中村士郎, 阪上隆英, 久保司郎: 改良ロックイン赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 26 巻, 第 1 号, (2004), pp.1851-1862.