直流電気ポテンシャルによる半だ円表面き裂の寸法測定法[†]

大 路 清 嗣* 久 保 司 郎* 阪 上 隆 英**
安 田 章 二*** 藤 下 健 一****

A D. C. Potential Method for Measuring Sizes of Semi-Elliptical Surface Cracks

by

Kiyotsugu OHJI*, Shiro KUBO*, Takahide SAKAGAMI**
Shoji YASUDA*** and Ken-ichi FUJISHITA****

A simple method was proposed for determining the length and depth of a semi-elliptical surface crack embedded in a conductive body from several D. C. potential readings. This method was based on the comparison between measured potential values and calculated potential values obtained by boundary element electric field analyses. For each measured potential value a characteristic line could be calculated, which represented the possible combinations of crack shape parameters, *i. e.* the length and depth of the semi-elliptical surface crack. These crack shape parameters were estimated on a least squares basis from the intersections of the characteristic lines corresponding to several potential readings. A sensitivity matrix was introduced to predict errors involved in the estimation from errors in the potential measurements. The evaluation of this matrix enabled us to determine the optimum combination of locations of measuring probes for the estimation. This method was applied to the monitoring of the length and depth of surface cracks propagating under fatigue loadings. It was found that the present method was quite useful for the estimation of the length and depth of surface cracks. The sensitivity matrix was also found to be useful for evaluating the errors of the estimation.

Key words : Non-destructive testing, D. C. potential method, Surface crack, Inverse analysis, Boundary element method, Sensitivity analysis

1 緒 言

破壊力学的手法を用いて、構造物の破壊強度を定量的に評価する際には、破壊力学パラメータ（応力拡大係数、J 積分など）の値が必要となる。この破壊力学パラメータの計算には、構造物中に存在するき裂の位置、形状および寸法の測定結果が不可欠である。しかし、き裂の存在位置が不明であることが多く、またき裂の3次元性もあって、き裂の位置、形状および寸法の定量測定は必ずしも容易ではない。そのため、き裂の定量測定が可能な非破壊検査法に対する関心が高まっており、種々の測定法の使用が提案・検討されている。

直流電気ポテンシャル法は、通電された試験体の幾何学的な変化に対応する電位差の変化を測定することにより、き裂を検出し定量的に測定しようとする方法である。この方法は、必要な計測システムが簡単であるため、オンライン計測に適しており、実験室レベル

での貫通き裂の寸法測定に有用性を發揮している。表面き裂の同定に電気ポテンシャル法を適用した研究もいくつかある^{1)~6)}。著者らは表面き裂や内部き裂の位置、形状および寸法の測定法として電気ポテンシャル CT 法を提案し、その有効性を数値シミュレーションならびに実験により調べた^{7)~10)}。この種の方法では、き裂同定のために多数の点における電気ポテンシャル値が必要である。しかし、問題を表面き裂の深さおよび表面長さの推定に限定すれば、少数の電気ポテンシャル値を用いるだけでき裂同定が可能になるものと考えられる。

そこで本報告では、少数の電気ポテンシャル測定値に対応してき裂深さと長さの組合せを与える特性線を境界要素法などにより求め、この特性線の交点より物体中にある半だ円表面き裂の深さと表面長さを同時に推定する方法を提案する。さらにこの測定法を、平板試験片中を進展する3次元疲労き裂に対し適用し、その有効性の実験的検証を行った結果について述べる。

[†] 原稿受理 平成元年11月6日 Received Nov. 6, 1989

* 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田丘, Faculty of Engineering, Osaka University, Yamadaoka, Suita

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町, Faculty of Engineering Science, Osaka University, Machikaneyama-cho, Toyonaka

*** (株)神戸製鋼所 神戸市中央区脇浜町, Kobe Steel, Ltd., Wakihamacho, Chuo-ku, Kobe

**** 川崎重工業(株) 明石市川崎町, Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki-cho, Akashi

2 測 定 法

2.1 測定法の原理

測定原理の模式図を Fig. 1 に示す。半円表面き裂の形状は、き裂開口部半長 b とき裂深さ a により表現できる。これら b と a を数点の電気ポテンシャルの読みより推定することを考える。いま、半円表面き裂を有する物体に通電し、き裂との相対位置が異なる複数の測定点 (I), (II), ... において電気ポテンシャル値を測定したものとす。測定点 (I) の電気ポテンシャルがある値に一致するような b と a の組合せを境界要素計算などにより求め、これをつなげば、Fig. 1(a) のような 1 本の等ポテンシャル b - a 組合せ特性線 (以下では組合せ特性線という) が得られる。電気ポテンシャル値を変えて同じことを行えば、その値に対応する組合せ特性線を描くことができる。

Fig. 1. Principle of the present estimation.

同様に、(I) と異なる位置にある測定点 (II) の電気ポテンシャル値に対しても、組合せ特性線が得られているものとする。Fig. 1(c) に示すように、測定点 (I) および (II) で測定されたポテンシャル値に対応する組合せ特性線 (Fig. 1(a) および (b) の破線) を描くと、これらの組合せ特性線の交点がき裂開口部半長 b およびき裂深さ a を与える。

2.2 感度解析手法を取り入れた測定法¹¹⁾

ここでは上記の測定法に、残留応力分布同定に関連して提案された、感度解析手法を導入する。いま、多数のポテンシャル測定点の中から、 n 個の測定点からなる組合せを作る。 i 番目の電気ポテンシャル測定値を p_i 、これに含まれる測定誤差を e_i で表し、 p_i および e_i からなるベクトルを $\{p\}$ および $\{e\}$ で表す。板厚を T として、両対数軸 ($\ln(a/T)$, $\ln(b/T)$) 上に組合せ特性線を描いたとき、それらの交点近傍で組合せ特性線が直線で近似できるものとする、 n 個の組合せ特性線は、

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \\ \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ln(a/T) \\ \ln(b/T) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

あるいは、

$$[C] \begin{Bmatrix} \ln(a/T) \\ \ln(b/T) \end{Bmatrix} + \{e\} = \{p\} + \{\alpha\} \quad (2)$$

と表される。ただし、対数軸は、直線近似の成立を容易にするために導入した。係数マトリックス $[C]$ および定数ベクトル $\{\alpha\}$ の成分 C_{ij} および α_i は、組合せ特性線の勾配、位置と間隔より決定できる。

式 (2) より、誤差の二乗和を最小にするという基準を用いると、 $\{\ln(a/T), \ln(b/T)\}$ は次式により決定できる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \ln(a/T) \\ \ln(b/T) \end{Bmatrix} &= [S] [\{p\} + \{\alpha\}] \\ &= \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \end{bmatrix} [\{p\} + \{\alpha\}] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $[S]$ は次式で定義される。

$$[S] = [C]^T [C]^{-1} [C]^T \quad (4)$$

このマトリックス $[S]$ は、感度マトリックスと呼ぶことができる。ポテンシャル測定誤差の標準偏差を σ_0 で表すと、 $\ln(a/T)$ および $\ln(b/T)$ の推定誤差はそれぞれ $\sqrt{\sum_j S_{1j}^2} \sigma_0$ および $\sqrt{\sum_j S_{2j}^2} \sigma_0$ で与えられる。

したがって、 $[S]$ の成分 S_{ij} ($i=1, 2, j=1, 2, \dots, n$) の値が大きければ、き裂形状パラメータ a および

b はポテンシャル測定値に含まれる誤差に敏感となり、 a および b を精度よく決定することが困難となる。感度マトリックス $[S]$ を評価することにより、誤差が最も小さく抑えられるような、最適なポテンシャル測定点の組合せを選ぶことができる。このような最適の組合せを用いて、き裂形状パラメータ b および a を決定した。なお、3 個以上のパラメータの推定に対しても上記の手法をそのまま拡張することができる。

3 測定対象

本実験では、Fig. 2 に示すような、SUS304 鋼の平板試験片中に存在する表面き裂の形状・寸法の測定を行った。き裂存在面は既知であるものとした。この試験片の中央に半だ円状の初期き裂を放電加工により導入し、応力比 $R=0.2\sim0.3$ の 4 点曲げ繰返し荷重によ

Fig. 2. Specimen geometry.

りき裂を進展させた。なお、電位測定時には最大荷重の 80% の静荷重を負荷した。また、破断後に測定時のき裂形状がわかるように、電位測定のたびに、応力比 R を 0.5 に変えて破面にピーチマークを導入した。

測定対象は、4 本の試験片を用いて得られた、15 通りのき裂形状である。き裂形状をトレースしたものを Fig. 3 に実線で示す。Fig. 3 中の斜線部は初期き裂を表している。これらの測定をき裂形状により次のふたつの場合に分類した。

- (i) 半だ円状表面き裂の測定 (Fig. 3(a): SMPM01, Fig. 3(b): SMPM02, Fig. 3(c): SMPM03)
- (ii) き裂開口部が内側に入り込んだ (ターンバック) 表面き裂の測定 (Fig. 3(d): SMPM04)

4 き裂形状・寸法の推定

4・1 電気ポテンシャルの測定方法

本実験に用いた電気ポテンシャル測定システムを Fig. 4 に示す。直流安定化電源から 90A の一定電流を試験片に供給した。給電端子は、試験片両端部に 3 個ずつ設け、試験片両端の電位が比較的均一になるようにした。試験片 SMPM02 および SMPM03 について

Fig. 3. Actual and estimated crack shapes.

は、極性切換装置を用いて電流の極性を切り換えることにより熱起電力の影響を除去した。き裂開口側面におけるポテンシャル測定位置は、Fig. 5(a) に (・) 印で図示した 14 点である。ポテンシャル測定プローブとしては、熱起電力の影響を小さくするため、試験片と同じ SUS304 の鋼線 (直径 0.1 mm) をスポット溶接したものを用いた。各点のプローブを、スキャナを介してデジタルナノボルトメータに接続した。これ

Fig. 4. D. C. potential measuring system.

Fig. 5. Locations of measuring probes.

らの装置をパーソナルコンピュータを用いて制御することにより多点のポテンシャルの自動測定を行った。なお、各測定点のポテンシャル測定値 ϕ は、24 番および 30 番のプローブの測定値 $\phi(24)$ および $\phi(30)$ を用いて次式により無次元化されている。

$$\phi(i) = \frac{\phi(i) - \phi(24)}{\phi(30) - \phi(24)} \quad (i=1, 2, \dots, 22) \quad (5)$$

ポテンシャル測定プローブの取付け位置の測定は、測定顕微鏡（分解能 $0.1 \mu\text{m}$ ）を用いて行った。

4.2 き裂形状の推定方法

4.2.1 境界要素解析 実際の試験片のポテンシャル測定点に対する組合せ特性線を求めるため、境界要素解析を行った。解析領域は、試験片の $1/4$ 領域であり、長さ L を No. 30 の測定点の z 座標と一致

Table I. Values of b and a used in boundary element analyses.

a/T	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750
b/T	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750
	0.875	1.000	1.125	1.250	1.375	1.500

Fig. 6. Boundary element discretization.

させた。解析対象は、Table I に示すような板厚に対するき裂開口部半長の比 (b/T) の 12 個、および板厚に対するき裂深さの比 (a/T) の 6 個のき裂形状パラメータを組み合わせた 72 通りの半円もしくは半だ円き裂である。これらの計算結果を内挿することにより、任意のポテンシャル値に対応する組合せ特性線を作成した。境界要素解析に用いた要素分割の一例を Fig. 6 に示す。 xz 面に関する問題の対称性を利用して、 xz 面上の要素分割を不要にする定式化を用いた。

4.2.2 推定方法 まず、き裂形状パラメータ a あるいは b の決定に用いる電気ポテンシャル測定点の組合せを与える。4.2.1 で述べた 72 通りの境界要素解析の結果をもとに、これらの測定点における測定値について、 a と b の組合せを与える組合せ特性線を内挿により求め、これをスプライン関数で近似する。つぎに、解析で扱っている $\ln(b/T)$ の全範囲をいくつかの小範囲に分割し、それぞれの小範囲で組合せ特性線を直線により近似する。この直線の勾配と組合せ特性線の疎密より、係数マトリックス $[C]$ を計算する。この係数マトリックス $[C]$ を用いて式 (4) により感度マトリックス $[S]$ を求め、誤差の二乗和が最小となるき裂形状パラメータを式 (3) より求める。このようにして求められた $\ln(b/T)$ が直線近似を行った当該の小範囲内であれば、交点を中心に小範囲を設定しなおし、き裂形状パラメータを再計算する。このような計算を測定点の組合せを変えて行い、 $[S]$ を用いた感度解析より誤差が最も小さく抑えられる組合せを求め、この組合せに対して得られたき裂形状パラメータを推定値とする。

5 推定結果

半だ円き裂形状を示した試験片 SMPM01~03 について、き裂寸法の推定を行った。まず、測定点 No. 1~6 の中の 3 点の組合せよりき裂開口部左側き裂半長 b_L を、No. 6~11 の中の 3 点の組合せよりき裂開口部右側き裂半長 b_R を求めた。これらの左側および右側

Table II. Comparison of crack sizes estimated from potential readings with actual ones (semi-elliptical crack shapes).

(a) SMPM01.

	I	II	III	IV
b_A/T	0.609	0.764	0.966	1.195
b_{EP}/T	0.565	0.758	0.950	1.202
a_A/T	0.364	0.442	0.507	0.557
a_{EP}/T	0.336	0.426	0.470	0.526
$S_{c,A}$	0.066	0.102	0.147	0.209
$S_{c,EP}$	0.060	0.101	0.140	0.199

(b) SMPM02.

	I	II	III
b_A/T	0.764	1.120	1.531
b_{EP}/T	0.745	1.081	1.356
a_A/T	0.444	0.544	0.604
a_{EP}/T	0.422	0.525	0.571
$S_{c,A}$	0.110	0.191	0.296
$S_{c,EP}$	0.099	0.178	0.243

(c) SMPM03.

	I	II	III
b_A/T	0.803	0.971	1.229
b_{EP}/T	0.760	0.988	1.250
a_A/T	0.435	0.504	0.546
a_{EP}/T	0.426	0.480	0.528
$S_{c,A}$	0.114	0.164	0.218
$S_{c,EP}$	0.102	0.149	0.207

き裂半長の平均値をき裂開口部半長 b とした。また、測定点 No. 1~11 の中の 3 点の組合せよりき裂深さ a を決定した。

半だ円状表面き裂の推定結果を Table II に示す。表中の b_A および a_A は、それぞれ破面より実測されたき裂開口部半長およびき裂深さを、 b_{EP} および a_{EP} は、それぞれ本法により推定されたき裂開口部半長およびき裂深さを表している。また、 $S_{c,A}$ は実き裂面積と板断面（き裂存在面）の面積の比、 $S_{c,EP}$ は本法により推定されたき裂面積と板断面の面積の比である。き裂形状の推定結果を、Fig. 3(a), (b) および (c) に破線で示す。

半だ円状表面き裂の推定に関しては、熱起電力を除去しない場合（試験片 SMPM01）と除去した場合（試験片 SMPM02, SMPM03）に対して測定を行った。しかし、電位測定プローブに試験片と同材の SUS304 鋼を用いているため熱起電力はほとんど生じておらず、ふたつの場合の推定結果にほとんど差はなかった。

Table II および Fig. 3 よりわかるように、き裂開口部半長 b は、試験片 SMPM02 のき裂形状 III を除いて、

Table III. Comparison of crack sizes estimated from potential readings with actual ones (crack shapes with turnbacks: SMPM04).

	I	II	III	IV	V
b_A/T	0.433	0.612	0.797	0.941	1.179
b_{EP}/T	0.440	0.607	0.819	0.999	1.296
$b_{A,max}/T$	0.433	0.633	0.829	1.005	1.247
a_A/T	0.395	0.482	0.525	0.597	0.623
a_{EP}/T	0.448	0.505	0.562	0.601	0.626
$S_{c,A}$	0.054	0.093	0.131	0.176	0.231
$S_{c,EP}$	0.062	0.096	0.145	0.189	0.256

比較的精度よく推定されている。板厚 T (=15 mm) に対する推定誤差は 4 % 程度以下であった。試験片 SMPM02 のき裂形状 III については、17 % 程度の大きい誤差がでた。この原因は、実き裂の開口部半長が、境界要素解析で扱った範囲 ($0.125 < (b/T) < 1.5$) を越えたことにあるものと思われる。

き裂深さ a についても、板厚に対する誤差は 4 % 以下となっており、比較的精度よい推定がなされている。感度解析結果より、感度マトリックス $[S]$ の成分は比較的小さく、感度よい推定が可能であることがわかった。

き裂投影面積については、試験片 SMPM02 のき裂形状 III の結果を除けば、板断面に対して評価した推定誤差は 2 % 程度以下となっている。

試験片 SMPM04 より得られたターンバック状表面き裂の推定結果を Table III に示す。また、本法により推定されたき裂形状を Fig. 3(d) に破線で示す。

Table III および Fig. 3(d) よりわかるように、き裂開口部半長 b の推定誤差は、最大で 12 % 程度あった。このことには、き裂形状が半だ円からはずれ、内部に入り込んでいることの影響がでているものと判断される。そこで比較のため、き裂開口部方向の最大長さ $b_{A,max}$ を求め、Table III に併せて示した。Table III よりわかるように、寸法の大きい形状 III, IV および V のき裂では、推定値はき裂開口部半長 b_A よりき裂開口部方向の最大長さ $b_{A,max}$ に近い。このように、本推定法では、ターンバックしたき裂のき裂開口部方向の最大長さを推定する傾向があることがわかる。

き裂深さについては、き裂形状が半だ円からはずれなかったことの影響は小さく、比較的精度よい推定が行われている。誤差は 5 % 程度以下となっている。き裂投影面積も、ターンバックの有無にかかわらず、比較的精度よく推定されることがわかる。

以上の 4 本の試験片に対する結果より、き裂投影面積も良好な精度で推定できることがわかった。村上ら¹²⁾の研究によれば、応力拡大係数 K_I は、負荷応力とき裂の投影面積によりほぼ評価される。したがって、き

Table IV. Errors of the estimation and their comparison with predicted errors (SMPM01).

Crack shape		Error/T (%)	
		By experiment	By sensitivity matrix
I	Half length (left)	-1.2	±5.7
	Half length (right)	-7.6	±7.4
	Depth	-2.8	±4.3
II	Half length (left)	+1.3	±2.8
	Half length (right)	-2.4	±3.5
	Depth	-1.6	±2.7
III	Half length (left)	-1.2	±2.1
	Half length (right)	-2.0	±2.3
	Depth	-3.7	±1.4
IV	Half length (left)	-2.4	±2.6
	Half length (right)	+3.8	±3.1
	Depth	-3.1	±1.6

裂投影面積が比較的精度よく推定されるという事実は、測定法によるき裂推定結果に基づき構造物の余寿命評価などを行う上で有用であると考えられる。

電気ポテンシャル測定値の変動は測定値の0.1%程度であった。この値を用いて感度マトリックス[S]により推定誤差を見積った。推定結果と実験結果の比較の例として、試験片SMPM01に対する検討結果をTable IVに示す。Table IVより、[S]により誤差評価が可能となっているものと判断される。

以上では、最もよい推定結果を与えると予想されるポテンシャル測定点の組合せを、感度解析により個々のき裂形状に対して求め、採用した。感度解析で全き裂形状に対して第1位となる組合せはなかったが、番号(2, 4, 6)あるいは(6, 8, 10)の組合せはつねに上位にあった。これらの組合せによる試験片SMPM01のき裂寸法の推定結果をTable Vに示す。Table VとTable II(a)の比較よりわかるように、適当な電気ポテンシャル測定位置の組合せを採用すれば、精度をほとんど損なうことなく全き裂形状を推定することができた。

推定に用いる測定点数(n)を4点に増やして推定を行った。一例として、試験片SMPM01に対する推定結果をTable VIに示す。Table VIとTable II(a)

Table V. Crack sizes estimated from potential readings at fixed points (SMPM01).

	I	II	III	IV
b_A/T	0.609	0.764	0.966	1.195
b_{EP}/T	0.535	0.769	0.954	1.221
a_A/T	0.364	0.442	0.507	0.557
a_{EP}/T	0.375	0.423	0.469	0.518
$S_{C,A}$	0.066	0.102	0.147	0.209
$S_{C,EP}$	0.063	0.102	0.141	0.199

Table VI. Crack sizes estimated from the optimum combination of four potential readings (SMPM01).

	I	II	III	IV
b_A/T	0.609	0.764	0.966	1.195
b_{EP}/T	0.567	0.767	0.949	1.201
a_A/T	0.364	0.442	0.507	0.557
a_{EP}/T	0.342	0.422	0.470	0.523
$S_{C,A}$	0.066	0.102	0.147	0.209
$S_{C,EP}$	0.061	0.102	0.140	0.197

より、 n を4点に増やしたことの効果は小さく、3点の組合せでも十分であることがわかる。

6 結 言

物体中にある半円状の表面き裂の寸法を、少数の電気ポテンシャル測定値より求める手法を提案した。ポテンシャル測定位置の良好な組合せを選択するため、感度解析手法を導入した。さらに、実際に平板中を進展する3次元疲労き裂に対しこの方法を適用した。その結果、実用上十分な精度でき裂開口部半長およびき裂深さが推定でき、本手法が有効であることが明らかとなった。

本研究に対し、文部省科学研究費補助金の援助をうけた。記して謝意を表す。

(平成元年9月26日 第5回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) G. M. Wilkowski and W. A. Maxey, ASTM STP 791, II-266 (1983).
- 2) 林 眞琴, 坂田信二, 清水 翼, 志田 茂, 材料, **35**, 936 (1986).
- 3) 林 眞琴, 大高正廣, 小池皓允, 千葉矩正, 松本宏一, 材料, **37**, 964 (1988).
- 4) R. A. Smith and A. D. Cameron, Advances in Fracture Research (Fracture 84), **5**, 3371 (1986).
- 5) L. F. Coffin, J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, **108**, 241 (1986).
- 6) 三好俊郎, 中野伸一, 日本機械学会論文集, A-52, 1097 (1986).
- 7) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会論文集, A-51, 1818 (1985).
- 8) 久保司郎, 阪上隆英, 大路清嗣, 橋本 健, 松室義隆, 日本機械学会論文集, A-54, 218 (1988).
- 9) S. Kubo, T. Sakagami and K. Ohji, Computational Mechanics '88, **1**, 12. i. 1 (1988).
- 10) 阪上隆英, 久保司郎, 大路清嗣, 山本賢治, 中塚顕二, 日本機械学会論文集, A-56, 27 (1990).
- 11) 久保司郎, 辻 昌宏, 大路清嗣, 日本機械学会論文集, A-54, 892 (1988).
- 12) 村上敬宜, 石田 誠, 日本機械学会論文集, A-51, 1050 (1985).