ポテンシャル法によるパイプ内面き裂形状の 外面からの検出[†]

林 眞 琴* 大 高 正 廣** 小 池 皓 允**
千 葉 矩 正** 松 本 宏 一**

Detection of Configuration of Surface Cracks at Inside Surface of a Pipe from Outside Surface by DC Potential Drop Method

by

Makoto HAYASHI*, Masahiro OHTAKA**, Terunobu KOIKE**
Norimasa CHIBA** and Koichi MATSUMOTO**

The configuration of surface cracks has been detected by Direct Current Potential Drop Method (PDM). A simplified method for determining the reverse-face crack configuration was invented based on the FEM analysis of electrical fields near the surface cracks with different aspect ratios and depth. Here, the reverse-face crack is defined as the crack existing on the opposite side of the detecting surface of structural material, while the crack detected on the same side is defined as the surface crack. The newly developed method was applied to the detection of the fatigue cracks on the inside surface of 2 inch stainless steel pipes subjected to tensile cyclic stress. The potential difference distribution near the surface cracks was measured by using many potential difference measuring electrodes placed along the reverse-face cracks on the outside surface of the pipes with the same spacing as the wall thickness. The potential difference distribution obtained by the present simplified method showed that the reverse-face crack configuration could be determined with relatively good accuracy, if the crack depths were more than 30 % of the wall thickness. Thus, the potential drop method is considered to be appropriate for an on-line monitoring system of the reverse-face cracks.

Key words : Surface crack, Reverse-face crack, Crack shape, Potential drop method

1 緒 言

大型構造部材が多い発電プラントの機器や配管の寿命診断ではき裂発生と共に、き裂進展を精度良く評価することが重要である。き裂の検出方法としては超音波探傷法を初めとして種々あるが、直流ポテンシャル法 (PDM: Potential Drop Method) は測定システムが簡単でありながら、比較的精度が良いため、2次元き裂長さの測定や3次元き裂形状の定量的検出に適用しようとする試みがなされている^{1)~3)}。直流ポテンシャル法のもう一つの利点として有限要素法、あるいは境界要素法により電場が解析できるため、電場解析結果を電場測定結果と対応させることによりき裂形状を詳細に決定できることが挙げられる^{4)~16)}。

筆者らは PDM の表面き裂形状検出への適用性を種々検討してきた^{4)~7)}。模擬表面き裂を有する平板について電場を解析すると共に、電位差分布を測定した結果によると、き裂周辺の電位差分布は電場解析により得

られた電位差分布と良く一致した。しかしながら、電位差とき裂深さの関係はき裂形状 (アスペクト比) の影響を受けるため、精度良いき裂形状の検出は電位差分布と FEM による電場解析を有機的に結合させた方が良いことが分かった。そこで実機のき裂形状測定のために 16 ビットのパーソナルコンピュータにより電場を FEM で解析し、電位差分布との比較により表面き裂形状を精度良く決定できるプログラムを開発した。しかし、FEM 解析は長時間を要するため、種々のき裂形状に対する電場解析結果を基に簡易表面形状決定法を考案した結果、短時間で精度良くき裂形状を検出できるようになった⁷⁾。

PDM を実機へ適用するに当たっての大きな課題として、配管や容器の内側にある三次元表面き裂の位置、形状、寸法の検出がある。これについては大路らが数値シミュレーションを行って可能性が十分にあることを示している¹⁷⁾。本報告では代表的な裏面き裂であるバ

[†] 本報を「電気ポテンシャル法による表面き裂計測法の開発 (第4報)」(Development of Measuring Method for Surface Crack Configuration with Electrical Potential Method, IV) とする。

原稿受理 昭和62年11月11日 Received Nov. 11, 1987

* 正 会 員 (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kantatsu-cho, Tsuchiura

** (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kantatsu-cho, Tsuchiura

パイプ内面に発生した表面き裂の形状を外面から検出する裏面き裂形状決定法を電場解析結果を基に考案し、疲労き裂に適用した結果について述べる。

2 簡易裏面き裂形状決定法

はじめに、裏面き裂形状検出における座標系等を Fig. 1 に示す。ここで、裏面き裂を表面き裂を有する部材においてき裂と反対側の面からき裂を検出する場合と定義する。逆に、き裂と同じ側の面からき裂を検出する場合は表面き裂と定義する。Fig. 1 では板材の中央に表面き裂があり、き裂と反対側の面で電位差分布を微小電位差計により測定することによりき裂形状を検出する場合の状況が示してある。ここで、 $2c$ はき裂の表面における長さ、 a は最大深さ、 t は板厚である。座標系はき裂面と平行な方向を x 、き裂面に垂直な方向を z としてある。電位差分布は測定端子間距離が $2L$ の測定端子により、端子間の中央にき裂が来るようにしてき裂面と平行な x 方向に沿って測定するものとする。

Fig. 1. Coordinate in detection of a reverse-face crack.

FEM 電場解析により得られた裏面き裂周辺の電位差比分布の一例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は円弧状のき裂をその中央に有する板幅 200 mm、長さ 200 mm、板厚 20 mm の平板の電場を解析して得られたものである。アスペクト比が $a/c=0.25$ で、測定位置はき裂を狭んで $2L=20$ mm である。き裂形状は Fig. 2 の下部に示したように円弦状である。表面き裂に比して

Fig. 2. Analyzed potential difference ratio distribution of reverse-face crack ($a/c=0.25$).

電位差比は小さく、裏面き裂の検出感度は低い⁵⁾。また、測定位置がき裂から離れているため、き裂の先端で電位差比が不連続的に増加することはない⁶⁾、緩やかに増加するので、き裂の先端を特定するのが困難である。

Fig. 3 には裏面き裂の場合の電位差比 V/V_0 と板厚 t で規格化したき裂深さ a/t の関係を示す。前述したように、検出感度が表面き裂よりも低いが、き裂が浅いときの感度が特に低いと言える。電位差比の測定精度を 1% とすれば、裏面き裂の検出限界は $a/c=0.25$ では $a/t=0.20$ 、 $a/c=0.125$ では $a/t=0.16$ である。表面き裂の場合と同様に電位差比 V/V_0 のアスペクト比依存性は大きい。例えば、 $V/V_0=1.10$ の場合 $a/c=0.125$ では $a/t=0.38$ に対して、 $a/c=1.0$ では $a/t=0.65$ と、約 1.7 倍も異なり、電位差比が得られたとしても、一義的にき裂深さが決定できないことが分かる。そこで、表面き裂の場合と同様な FEM 電場解析結果を基にした簡易裏面き裂決定法を考案した。

Fig. 3. Relation between potential difference ratio and crack depth.

以下、Fig. 4 から Fig. 9 により裏面き裂形状の決定法の詳細を述べる。簡易裏面き裂形状決定法の流れ図を Fig. 4 に示す。あらかじめ大型コンピュータで解析した数種類のアスペクト比のき裂を有する板材の電位分布がデータベースとなっている。電位分布はき裂と反対側の表面におけるき裂に垂直な z 方向の電位分布である。Fig. 5 にその一例を示す。板厚 t で規格化したき裂深さ a/t はき裂中央の最深点で 0、0.25、0.375、0.50、0.625、および 0.75 である。き裂がない ($a/t=0$) 場合には電場は均一なため、電位差はき裂からの距離 z に比例して増加する。このき裂がない場合の電位差が基準電位差である。き裂がある場合には表面き裂の場合とは異なり、 $z=0$ では電位差 V は

Fig. 4. Flow diagram of a simplified method for determining reverse-face crack configuration.

Fig. 5. Potential distribution on back surface perpendicular to crack face ($a/c=0.25$).

0であり、 z が増加すると電位差は徐々にき裂がない場合の基準電位差よりも大きくなる。 $z=10$ mm以上では電位差の増加量はほぼ一定である。電位差の絶対値が大きくなり、また、電位差比が大きいくほど、き裂の検出感度は高いことになる。Fig. 4より $z=5$ mm以下では電位差比が大きいくて感度は高いが、絶対値が小さいので、精度が悪くなる。一方、 $z=10$ mm以上では電位差の増加量はほぼ一定であることから電位差比は段々小さくなっていくので、 $z=5\sim10$ mm付近が電位差の絶対値が大きいくて、かつ、比較的検出感度が高いことからこの付近が裏面き裂検出に対して測定精度が良いことが分かる。したがって、電位差を測定する

端子間の間隔 $2L$ は板厚 t の半分ないし板厚程度とすることが望ましいと言える。

裏面き裂形状の決定に当たっては最初に、測定された電位差分布から表面き裂長さ $2c^*$ と最大電位差比 $V/V_{0\max}$ を求める。一例として FEM により電場解析して求められた Fig. 2 の $a/c=0.25$ の最大き裂深さ $a=12.5$ mm ($a/t=0.625$) のき裂について計算するものとし、その電位差比分布を Fig. 6 に示す。き裂の最深点に対応する最大電位差比は $V/V_{0\max}=1.30$ である。表面におけるき裂の先端付近で電位差比は徐々に増加するので、き裂の先端を特定するのは困難である。種々のアスペクト比のき裂について電位差比とき裂先端位置との関係を調べた結果、アスペクト比 a/c が約 0.5 より小さければ電位差比のピークの約 15~20% の箇所が表面におけるき裂先端とほぼ一致した。しかし、アスペクト比 a/c が 0.5 より大きくなると急激に高くなっていき、 $a/c=1.0$ ではき裂の先端

は電位差比のピークの約 50~60% の箇所となるのが分かった。また、き裂深さの影響も多少受けることも分かった。したがって厳密にはアスペクト比による表面のき裂長さの補正も行わなければならないが、ここではアスペクト比 a/c が約 0.5 より小さいようなき裂を対象として検討を加えた。電位差比のピークの 15% の箇所をき裂先端とすると、Fig. 5 の場合 $V/V_{0\max}=1.30$ であるので、 $V/V_0=1+0.3\times0.15=1.045$ と電位差分布曲線との交点から表面き裂長さ $2c^*$ を求めると、 $2c^*=110$ mm となる。実際には $2c^*=100$ mm であるので、多少長目の評価である。

つぎに、Fig. 5 に示した電位差分布から各種アスペクト比 a/c のき裂に対する電位差比 V/V_0 とき裂深さの関係を作成するために、電位差比 V/V_0 とアス

Fig. 6. Analyzed potential difference ratio distribution of reverse-face crack ($a/c=0.25$, $a/t=0.625$).

ベクトル比 a/c の関係を作成する。この場合 FEM による電場解析では板厚 $t=20\text{ mm}$ の平板について解析しているので、測定端子間距離 $2L$ に対応した測定位置 z における電位差比 V/V_0 とアスペクト比 a/c の関係を作成しなければならない。したがって、被測定部材の板厚 t^* で補正した $z=L \times 20/t^*$ の位置における各き裂深さに対する電位差を求めて、電位差比 V/V_0 とアスペクト比 a/c の関係を Fig. 7 のように作成する。ここでは解析結果を用いて $2L=20\text{ mm}$ の場合について計算するので、 $z=10\text{ mm}$ における電位差比が示してある。

つぎに、Fig. 7 の関係を用いてアスペクト比 $a/c=0.5$ に対する電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t の関係のマスターカーブを Fig. 8 のように作成する。このマスターカーブに Fig. 6 で得られた最大電位差比 $V/V_{\text{max}}=1.30$ を代入すると、 $a/t=0.76$ となり、き裂深さ $a^*=15.2\text{ mm}$ が得られる。ついで、板厚補正した表面き裂長さを改めて $2c^*$ とし、 $2c^*(=2c \times 20/t)=110\text{ mm}$ によりき裂のアスペクト比 a^*/c^* を求めると、 $a^*/c^*=0.276$ となる。そこで、つぎに a/c

Fig. 7. Relation between potential difference ratio and aspect ratio.

Fig. 8. Relation between potential ratio and crack depth.

Table I. Convergence of crack aspect ratio.

Aspect ratio of master curve a/c	Crack length on surface $2c^*$ (mm)	Maximum crack depth a^* (mm)	Aspect ratio of crack a^*/c^*
0.50	110	15.2	0.276
0.276		12.9	0.234
0.234		12.4	0.225
0.225		12.3	0.224

$=0.276$ に対する電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t の関係のマスターカーブを Fig. 7 から作成してき裂深さを求めると、 $a^*=12.9\text{ mm}$ が得られ、 $a^*/c^*=0.234$ となる。この手順をき裂のアスペクト比 a^*/c^* とマスターカーブのアスペクト比 a/c が一致するまで、具体的には両者の差が 0.01 以下となるまで繰返した。その結果、最終的には $a/c=0.225$ のマスターカーブで $a^*=12.3\text{ mm}$ が得られて $a^*/c^*=0.224$ となり、アスペクト比がほぼ一致した。Table I には上述したアスペクト比の収束計算結果を示した。

き裂全体の形状は以下のようにして決定する。初めに、あらかじめ作成してある標準的な電位差比とき裂深さの関係のマスターカーブにおいて、測定された電位差比と得られたき裂深さがそのマスターカーブ上に乗るように、マスターカーブの近似式の係数を変更する。すなわち、 $a/t=y$ において、標準的な電位差比とき裂深さの関係のマスターカーブが

$V/V_0 = n(m_0 + m_1y + m_2y^2 + m_3y^3 + m_4y^4 + m_5y^5)$ のように、5 次式で近似されるものとする。ここで、 $m_0 \sim m_5$ は係数であり、実験的に定められたものである。 n は倍率である。上式において、測定されたき裂中央の最大電位差比 V/V_{max} を入力して左辺と右辺が一致するように倍率 n を決め、そのマスターカーブにき裂周辺の電位差比分布を入力することによりき裂全体の形状が決定される。このようにした理由はアスペクト比 a^*/c^* と a/c が一致したときの電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t のマスターカーブに各測定位置における電位差比を入力してき裂形状を求めると、電位差比の小さいき裂先端付近においては実際のき裂よりもかなり深めになるからである。Fig. 9 に得られたき裂形状を実際のき裂形状と比較して示す。実際のき裂形状は $2c^*=100\text{ mm}$ 、 $a^*=12.5\text{ mm}$ であるが、

Fig. 9. Comparison of crack configuration obtained by PDM with actual crack configuration.

簡易形状決定法によるき裂形状は $2c^*=110\text{ mm}$, $a^*=12.3\text{ mm}$ である。表面のき裂先端近傍の精度は多少悪いが, そこを除けば良く一致している。このことは逆に表面のき裂長さ $2c^*$ に比してき裂深さ a^* が鈍感であることを示している。

3 疲労き裂への適用

簡易裏面き裂形状決定法を疲労き裂形状検出に適用した。Fig. 10 に疲労試験片の形状を示す。試験片は SUS304 2B Sch80 のパイプで, 外径 60.6 mm, 板厚 6.2 mm である。試験片内側には Fig. 10(b) に示すように表面長さ $2c=31.8\text{ mm}$, 最大深さ $a=1.4\text{ mm}$, 幅 $w=0.3\text{ mm}$ のスリットが放電加工により入れてある。疲労試験は室温大気中で行った。繰返し速度は $f=1\text{ Hz}$, 応力は最大応力一定とし, $\sigma_{\max}=20\text{ kgf/mm}^2$ (196 MPa) である。応力比は $R=0.1$ であるが, 試験途中で $R=0.5$ に変えて破面にビーチマークを形成した。

電位差測定の実験システム図を Fig. 11 に示す。煩雑となるため図中には給電端子や測定端子はそれぞれ 1 組だけ示してある。電位差測定においては直流電源を 4 台設け, き裂周辺の電場が均一になるように, 給

Fig. 10. Configuration and dimensions of fatigue test specimen.

電端子はパイプの中央から 100 mm 離れた箇所において, 周方向に 90° ごとに設け, 電流を 5 A ずつ供給した。測定端子としては SUS304 の直径 0.3 mm の細線をパイプの外側にスリットを狭んでスポット溶接により取付けた。測定端子間距離 $2L$ は板厚 t と等しくし, 周方向には 5 mm 間隔として, 全部で 11 箇所に測定端子対を取付けた。また, スリットから離れた箇所に基準電位差 V_0 を測定するための測定端子対を 1 組設けた。なお, 測定された電位差 V は基準電位差 V_0 で電流値を補正するものとして, 試験片と疲労試験機との間には絶縁を施さなかったが, 試験中にき裂がかなり進展しても試験片に流れる電流はほとんど一定であった。

電位差計は分解能 $1\text{ }\mu\text{V}$ のものを使用し, 10 回測定した平均値で評価した。電位差測定に当っては熱起電力および電位差計のドリフトを補償するため Reversing DC Potential 法を採用した。なお, 電位差測定は Fig. 11 に示したように, 電流の極性を切り換えるためのスイッチング装置, マルチプレクサを有する微小電位差計の制御とデータ処理を含めてマイクロコンピュータにより全自動で行った。

Fig. 12 に応力繰返しに伴うき裂中央における電位差比の変化を示す。応力繰返し初期のき裂が浅い段階では電位差比の変化は小さいが, き裂が進展して深くなった後半では電位差比は急増する。疲労試験中に測定したき裂に沿った電位差比分布を Fig. 13 に示す。前述したように, 測定端子は端子間距離が板厚 t に等しくなるようにスポット溶接したが, 端子間距離が $2L=6.2\text{ mm}$ と短いため, 溶接加工精度が電位差測定精度に大きく影響した。そこで, 疲労試験開始前における電位差を基準電位差として端子間距離の補正を行った。また, このとき初期き裂形状に対する電位差分布についても FEM 電場解析結果を基に補正を行った。

Fig. 13 の電位差分布について, Fig. 4 に示した手順に従ってき裂形状を求めた結果の中, 破面にビーチマークを形成させた $N=8.1\times 10^4$ と, $N=1.0\times 10^5$ の 2

Fig. 11. Data acquisition system for PDM.

Fig. 12. Changes in both potential difference ratio and crack depth during fatigue.

Fig. 13. Change in potential difference ratio distribution of reverse-face crack measured fatigue.

Fig. 14. Comparison of crack configuration obtained by PDM with actual crack configuration.

Fig. 15. Photograph of fractured surface.

ケースについての結果を Fig. 14 に示す。簡易裏面き裂形状決定法の基本のデータである種々の形状のき裂についての電場解析は平板について行っている。したがって本実験のようにパイプ内面のき裂に適用する場合にはパイプを平板に展開して、き裂形状を求めてから、改めてパイプ形状に合わせて縮小展開しなければならない。Fig. 14 にはそのようにして求めたき裂の全体の形状を示し、Fig. 12 にはき裂中央における最大き裂深さとビーチマークから求めたき裂深さを合わせて示した。Fig. 15 には破面写真を、Fig. 13 にはき裂形状の比較を示したが、簡易き裂形状決定法によるき裂形状は実際のき裂形状と比較的良好一致している。

4 結 言

直流ポテンシャル法 (PDM) による配管内面等に発生した裏面き裂形状の検出法について検討した。その結果をまとめると、以下の通りである。

(1) 各種アスペクト比のき裂形状についての有限要素法による電場解析結果を基に、配管内面等の表面き裂形状を配管外面から検出するための簡易裏面き裂形状決定法を考案した。

(2) き裂周辺における電位差分布測定は精度、感度の点から測定端子間の間隔 $2L$ を板厚 t の半分ないし板厚程度とすることが望ましい。

(3) 簡易裏面き裂形状決定法をステンレス鋼パイプ内面の疲労き裂に適用した結果、ある程度深いき裂であれば、比較的精度良くき裂形状を検出できることが分かった。

(昭和62年6月25日、第4回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) G. Baudin and H. Polisella, *Advances in Crack Growth Measurement*, p. 159 (1981).
- 2) S. Muller, *Karnforschungszentrum Karlsruhe GmbH, PNS*, **751**, 83 (1983).
- 3) T. A. Prater and L. F. Coffin, *Proc. 2nd Int. conf. on Environmental Degradation of Engineering Materials*, Virginia Polytechnic Institute, p. 59 (1981).
- 4) 坂田信二, 林 真琴, 清水 翼, 志田 茂, *材料*, **32**, 334 (1983).
- 5) 林 真琴, 坂田信二, 清水 翼, 志田 茂, *材料*, **33**, 602 (1984).
- 6) 林 真琴, 大高正廣, 榎本邦夫, 佐々木典, 菊池敏一, *材料*, **35**, 936 (1986).
- 7) M. Hayashi, M. Ohtaka, T. Shimizu and T. Takaku, *Pro. 8th Int. Conf. on NDE in the Nuclear Industry*, ASM, p. 447 (1986).
- 8) 福田俊彦, 矢川元基, *日本原子力学会58年年会要旨集*, p. 211 (1983).
- 9) 矢川元基, 福田俊彦, *日本機械学会講演論文集*, No.

- 820-11, 290 (1982).
- 10) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会講演論文集, No. 840-10, 827 (1985).
- 11) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会論文集, 51, 1818 (1985).
- 12) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 橋本 健, 第3回破壊力学シンポジウム講演論文集, p. 232 (1985).
- 13) 阿部博之, 坂 真澄, 和知 豪, 非破壊検査, 35, 326 (1986).
- 14) 三好俊郎, 中野伸一, 日本機械学会論文集, 52, 1097 (1986).
- 15) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会講演論文集, No. 85-1178 B (1986).
- 16) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 橋本 健, 山脇 弘, 日本機械学会講演論文集, No. 860-3, 309 (1986).
- 17) 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 日本機械学会第935回講演会材料力学講演概要集, p. 57 (1985).

書 評

“Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials”

K. -T. Rie (編)

(1987年, Elsevier Science Pub. 発行, 245×170 mm, 750ページ, 28,440円)

本書は1987年9月にドイツ, ミュンヘン市でドイツ材料試験学会が主催し, 世界の12学協会が共催して開催された「第2回材料の低サイクル疲労と弾塑性挙動」に関する国際会議において講演発表された論文をまとめた研究論文集である。本書には, 特別講演 L. F. Coffin 博士 (General Electric Co.) による「損傷モニタリング, 寿命推定, 延命に関する研究」ならびに飯田国広博士 (東京大学名誉教授) による「日本における最近の低サイクル疲労の研究」のレビューを始め, この分野の著名な研究者の論文113編が収録されている。

本書では(1)ミクロ組織と繰返し応力・ひずみ挙動との関係, (2)繰返し応力・ひずみ応答モデル・構成方程式, (3)高温低サイクル疲労, (4)各種環境条件下における低サイクル疲労挙動, (5)実機要素・溶接構造物, (6)設計法・寿命予測・多軸負荷, (7)き裂発生と伝ばの破壊力学的局面, (8)新材料・材料開発など8項目を基本的主題とした低サイクル疲労に係わる広範囲の分野が取り上げられている。特に, クリープ温度域における高温低サイクル疲労や低サイクル疲労における繰返し構成関係・破壊力学・材料損傷評価法(モニタリングを含む)・寿命推定法など, 近年わが国でも注目されている話題が多く収録されており, また, 超合金, 二相鋼, 複合材料などの新素材についての興味ある話題も収録されている。このように, 本書は基礎研究と応用開発のギャップを埋める国際会議の研究論文集であり, この分野の専門研究者や大学院生を始め, この方面に関心のある読者には大変参考になる。

(大阪大学基礎工学部 三好良夫)