

渦電流に対する応力腐食割れの等価的抵抗値に関する検討

Discussion on the Minimum Resistance of Stress Corrosion Cracking From the Viewpoint of Eddy Current Nondestructive Evaluation

東北大学大学院
東北大学大学院

遊佐 訓孝
橋爪 秀利

Noritaka Yusa
Hidtoshi Hashizume

Member
Member

This study evaluates stress corrosion cracks appearing in austenitic stainless steel from the viewpoint of its resistance to eddy currents. Eddy current signals due to artificially introduced stress corrosion cracks are analyzed using finite element simulators to discuss its resistance. The results showed that the width and conductivity to model a stress corrosion crack vary significantly and furthermore depend on exciting frequency adopted. In contrast, however, the resistance of a crack, which is defined as the width divided by conductivity, is affected much less

Keywords: Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Finite Element Analysis, Numerical Modeling, Stress Corrosion Cracking

1. 緒言

渦電流探傷法は表面きずに対して高感度、非接触で高速探傷を行うことができるなど、実用上優れた特性を有する非破壊検査手法である。渦電流探傷法によって得られる探傷信号はきずの形状に関する情報を直接的には与えるものではないが、近年数値解析を援用により渦電流探傷信号からきずの形状を定量的に評価する試みが数多くおこなわれてきており、それは人工的に加工したノッチに対してはかなりの程度成果を挙げている[1]。しかしながら、実際に構造物に発生するきず、特に応力腐食割れに対しては、いくつかの成功報告もあるものの[2]-[6]十分な精度できず形状推定を行うことは依然として困難であるとされている。

ノッチと比較して応力腐食割れの形状推定が著しく困難である理由の一つとして、数値解析におけるきずモデルが確立されていないということがあげられる。応力腐食割れは渦電流に対して完全な絶縁壁としては振舞わず、誘導された渦電流の一部は割れを横切って流れることが知られており、そのような電流を考慮するために、応力腐食割れは内部にある程度の導電率を有する領域としてモデル化される必要があるとはされている[7][8]。しかしながら、適切なモデル化のために与えるべき導電率の値については明確な知見は得られていない。さらに近年、内部導電率のみならずきずの等価的な幅についても検討が必要であることも明らか

となった[9]。即ち、ノッチを対象としたサイジングがきずの長さや深さを考慮するものであるとするならば、応力腐食割れを対象とした場合には、さらに加えて内部導電率と幅を考慮する必要がある、これが逆問題の不適切性を著しく悪化させているものと考えられる。

このような問題を解決するためには、応力腐食割れのモデル化に関して改めて詳細に検討し、実際のきずが取りうる内部導電率および幅の値についての知見に基づき、逆解析時にこれらの値に関する制約条件を課すことが必要である。しかしながら、これまでに報告されている応力腐食割れの導電率および幅の値は大きくばらついており、実際上の制約条件とすることは困難である。さらに、これらの値はあくまで数値解析における等価的なものであり、例えば同一のきずに対しても用いる周波数やプローブによって異なったものとなることが知られている[10]。

しかしながら近年著者らは、従来の導電率と幅というパラメータではなく、後者を前者で除した、いわばきずの等価的な抵抗ともいえる値に関しては、このような問題は小さく、有意な制約条件となりうることを見出した[10]。即ち、このきずの等価的な抵抗値に関しては探傷条件への依存性が小さく、さらにこれまで得られているデータは、下限値の存在を示唆するものとなっている。本稿においては、このきずの等価的抵抗に関する検討をさらに進めることを目的として実施した研究の結果を報告する。

2. 応力腐食割れの等価的抵抗値の分析

本研究においては、厚さ 25mm の SUS304 平板に人工的に導入した応力腐食割れ 4 体を対象とし、それらの等価的な導電率と幅、そして抵抗値を評価した。

応力腐食割れはいずれも試験体の熱処理の後 4 点曲げで試験体表面に引っ張り応力を加えた状態で腐食液中に浸漬することで導入されたものである。導入試験中は電位差測定によりその進展をモニタリングし、導入試験終了後に浸透探傷試験を行うことで本研究のために十分な長さの割れが導入されたことの確認を行った。

渦電流探傷試験に用いた 4 体の探傷プローブを Fig. 1 に示す。自己誘導絶対値型のパンケーキプローブ 2 体と自己誘導差動型のプラスポイントプローブ 2 体であり、各々低周波用(LF)のものと高周波用(HF)のもの 1 体ずつとした。探傷試験においてはこれらの探傷プローブを PC により制御された自動 XYZ ステージに取り付け、渦電流探傷装置 aect2000S を用いてプローブの励磁と信号検出を行い、検出された信号を AD 変換器を通じて PC によりリアルタイムで収集した。探傷に用いた周波数は、低周波用のプローブでは 25, 50, 100 kHz、高周波用のプローブでは 100, 200, 400 kHz である。

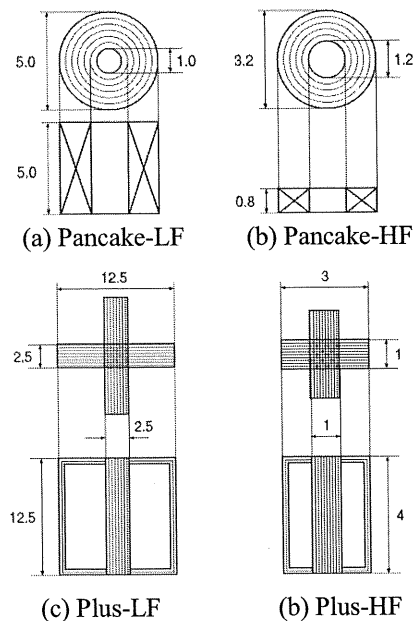


Fig. 1 Four eddy current probes utilized

探傷試験終了後、真の形状確認のための破壊試験を実施した。破壊試験においては必ずの 3 次元的形状を

評価するための複数断面における金相試験と、輪郭形状を評価するための引き裂き試験を併せて実施した。試験の結果、本研究において対象とした応力腐食割れはいずれも内部での 3 次元的分岐は少なく、また輪郭形状はほぼ矩形であったことが確認された。4 体の割れの最大長さおよび深さは Table 1 にまとめる。

探傷および破壊試験終了後、破壊試験結果に基づいて割れを一定の幅を有する有限要素領域としてモデル化し、内部導電率と幅に関するパラメータサーベイを有限要素-境界要素併用法に基づく数値解析によって実施した。パラメータサーベイ時に用いた値は、内部導電率については母材の 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 2.0, 4.0, 7.0, 10, 15, 20 % であり、幅については 0.01, 0.02, 0.04, 0.07, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 mm である。解析終了後、内部導電率に関してはさらに得られた探傷信号の線形に内挿することで、有効数字 3 桁まで評価した。

以上の試験及び解析により評価された応力腐食割れの等価的内部導電率と等価的幅、そして後者を前者で除した等価的抵抗値を Table 2、Table 3 にまとめる。得られた結果から、等価的内部導電率と等価的幅に関しては周波数依存性が大きく、同一のプローブに対しても用いる周波数により値が異なること、それに対して等価的抵抗値は周波数依存性が有意に小さいことが確認できる。しかしながら、等価的内部導電率、幅、抵抗値のいずれも使用プローブには依存したものであることが確認できる。表には今回対象とした 4 体の応力腐食割れの中で最も深かったものと最も浅かったものに対する結果のみを示したが、他の 2 体についても同様の結果であった。

Table 1 Dimension of the cracks

	Max. Length	Max. Depth
SCC1	33	11.3
SCC2	35	10.3
SCC3	50	7.8
SCC4	40	4.5

本研究にて得られたきずパラメータの値を、前述の参考文献中におけるサイジングもしくはモデル化において用いられているものと併せて示したものが Fig. 2 である。図より、等価的抵抗値および等価的幅の取りうる値の範囲は大であることが確認でき、これらを独

Table 2 Evaluated crack parameters of SCC1

Probe	Freq.*	σ **	w ⁺	R ⁺⁺
Pancake-LF	25	10.1	1.20	0.119
	50	10.0	1.20	0.120
	100	4.51	0.60	0.133
Pancake-HF	100	0.720	0.04	0.556
	200	0.216	0.10	0.463
	400	0.199	0.10	0.503
Plus-LF	25	0.113	0.01	0.089
	50	0.415	0.04	0.096
	100	0.937	0.10	0.107
Plus-HF	100	2.14	1.00	0.467
	200	1.67	0.50	0.299
	400	0.769	0.20	0.260

* exciting frequency, kHz, ** conductivity with respect to base material's one (%)

+ width (mm), ++ equivalent resistance, w divided by σ

Table 3 Evaluated crack parameters of SCC4

Probe	Freq.*	σ **	w ⁺	R ⁺⁺
Pancake-LF	25	20.2	1.20	0.060
	50	19.1	1.20	0.063
	100	17.7	1.20	0.068
Pancake-HF	100	9.46	0.90	0.095
	200	9.19	0.90	0.098
	400	6.37	0.70	0.110
Plus-LF	25	0.25	0.01	0.040
	50	0.22	0.01	0.045
	100	0.19	0.01	0.052
Plus-HF	100	3.58	1.20	0.335
	200	3.00	0.60	0.200
	400	2.58	0.50	0.194

* exciting frequency, kHz, ** conductivity with respect to base material's one (%)

+ width (mm), ++ equivalent resistance, w divided by σ

立な未知変数として逆解析を行うことは困難さが大きいと考えられる。しかしながらその一方、図中破線で表されている等価的抵抗値に関しては、下限値の存在を強く示唆するものとなっており、これを制約条件として課すことで、逆問題解析の高精度化等を図ることができるものと期待される。これらのデータは様々な渦電流探傷プローブおよび励磁周波数における結果である

が、使用渦電流探傷プローブごとに異なるデータの拡充を行うことにより、この下限値をより定量的に評価することができるようになり、さらには応力腐食割れの電氣的抵抗に関するメカニズム解明にもつながるものと期待される。

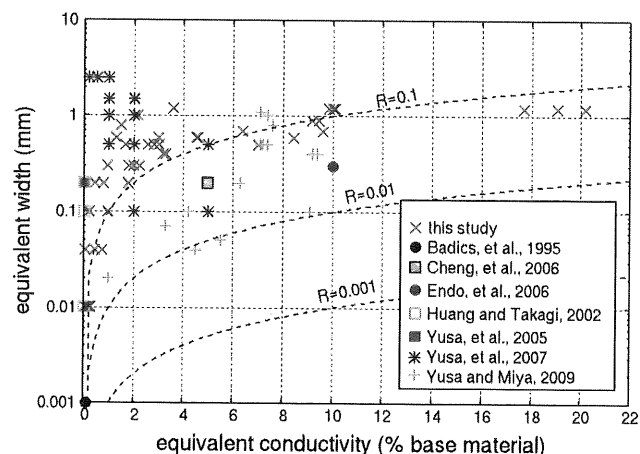


Fig. 2 Equivalent conductivity and width of cracks

3. 結言

応力腐食割れを対象とした渦電流探傷法の高度化を目的として、応力腐食割れの数値解析におけるモデル化についての検討を実施した。SUS304 平板に人工的に導入された応力腐食割れに対して渦電流探傷試験及び破壊試験結果に基づく数値解析を実施し、その等価的な導電率、幅、そして抵抗値を評価した。評価の結果、等価的導電率と幅については使用探傷プローブのみならず励磁周波数によっても大きく変化してしまうが、抵抗値の励磁周波数依存性は小さいことが明らかとなった。また、きずが大であるほど抵抗値も大となる傾向が有意に確認されたが、導電率および幅に関してはそのような関係は不明瞭であった。

本研究にて得られたデータおよび公表文献における値の分析により、従来用いられていた内部導電率と幅というパラメータを独立に用いることは必ずしも適当とは言えず、後者を前者で除した等価的抵抗値の考慮が必要であることを強く示唆する結果を得た。今後標準プローブを用いたデータの蓄積により、更なる定量的評価が可能になるものと考えられる。

参考文献

- [1] B.A. Auld and J.C. Moulder. Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation, *J. Nondestr. Eval.* 18 (1999), 3-36.
- [2] H. Huang and T. Takagi. Inverse analyses of natural and multicracks using signals from a differential transmit-receive ECT probe. *IEEE Trans. Magn.* 38 (2002), 1009-1012.
- [3] N. Yusa et al. Quantitative profile evaluation of natural cracks in a steam generator tube from eddy current signals. *Int. J. Appl. Electrom. Mech.* 12 (2000), 139-150.
- [4] W. Cheng et al. Sizing of partial-contact stress corrosion cracks from ECT signals. *NDT&E Int.* 39 (2006), 374-383.
- [5] H. Endo et al. Natural crack sizing based on eddy current image and electromagnetic field analyses. *Rev. Prog. QNDE* 25 (2006), 720-727.
- [6] N. Yusa, Z. Chen, and K. Miya. Sizing of stress corrosion cracking on austenitic stainless piping in a nuclear power plant from eddy current NDT signals. *Nondestr. Test. Eval.* 29 (2005), 103-114.
- [7] Z. Badics et al., Finite element models of stress corrosion cracks (SCC) in 3-D eddy current NDE problems. *Nondestructive Testing of Materials*, R. Collins et al. (eds.), IOS Press, 1995, pp. 21-29.
- [8] 大島、橋本. 渦電流探傷試験における SCC の数値解析モデル化の検討. *日本 AEM 学会誌* 10 (2002), 384-388.
- [9] N. Yusa, S. Perrin, K. Mizuno, K. Miya, Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations. *NDT&E Int.* 40 (2007), pp. 577-583.
- [10] N. Yusa and K. Miya. Discussion on the equivalent conductivity and resistance of stress corrosion cracks in eddy current simulations. *NDT&E Int.* 42 (2009), 9-15.