

電磁現象を用いた応力腐食割れと疲労割れの非破壊的識別

Electromagnetic Nondestructive Approach to Distinguish Stress Corrosion Cracking and Fatigue Cracks

株式会社 I I U	ステファン ペラン	Stephane Perrin	
株式会社 I I U	遊佐 訓孝	Noritaka Yusa	Member
株式会社 I I U	宮 健三	Kenzo Miya	Member

This study develops a computational algorithm to distinguish stress corrosion cracking and fatigue cracks from signals measured electromagnetic-nondestructively. The algorithm utilizes k-nearest neighbour method, and distinguishes the two types of crack on the basis of five-dimensional features vector extracted from the signals. Experimental verification are performed using 82 specimens including 45 artificial stress corrosion cracking and 37 artificial fatigue cracks. The results demonstrates that the algorithm can correctly classify almost all the cracks.

Keywords: Eddy Current, Classification, Clustering, k-Nearest Neighbor

1. 緒言

耐圧部等の原子力プラント内の重要な機器に割れが発見された場合、現在の安全規制は早期の補修もしくは機器の交換、さらに再発防止のために割れの発生の原因調査を義務付けている。供用前検査において溶接不良などの初期欠陥が存在しないということは保証されるため、プラント内で発見される割れの大部分は応力腐食割れかもしくは疲労割れであるが、両者の発生メカニズムは全く異なるものである。そのため、原因調査および補修において取るべき措置も、割れが応力腐食割れか疲労割れかによって大きく異なったものとなる。よって早期に迅速かつ正確に発生した割れが応力腐食割れであるか疲労割れであるかの判別を行うことは、原子力プラントの停止による経済的損失を避けるためにも非常に重要である。現状では、割れの発生した部位を切り出した上で各種検査を行い、全ての試験結果に整合性が認められたことをもって割れが応力腐食割れであるか疲労割れであるかの判断がなされている。しかしながら、このような手法ではトラブル対応の時間が長くなることは避けることができないという問題点がある。よって、原子力プラントの保全活動に対する貢献という観点から、応力腐食割れと疲労割れとを非破壊的かつ確実に判別することが出来る手法

の開発の意義は大きいものがある。

著者らは以前の研究において、導体内に流れる電流を乱す様子に関して、応力腐食割れと疲労割れとの間には有意な差異が存在し、それを利用することで両者を非破壊的に判別することが可能であるということを見出した[1]。そこで提唱された手法は、いわゆる一様渦電流型の渦電流プローブを用いて割れ近傍に指向性の強い渦電流分布を実現し、割れに対して電流が平行に流れている時に測定される信号と垂直に流れている時に測定される信号との比の値をもって、割れが応力腐食割れであるか疲労割れであるかを判別するというものであった。この手法は極めて単純であるにもかかわらずその有効性は高く、適切な閾値を設定することで9割近くの場合について割れの判別を正しく行うことができるということが、その後の研究により明らかとなっている。しかしながら、いかにして適切に閾値を設定するかについては数多くの試験データが必要になること、また実用上は応力腐食割れと疲労割れとを確実に判別できることが要求されることを考慮すると、手法の更なる高度化は強く要求される場所である。

本研究においては、電磁現象を利用した応力腐食割れと疲労割れの非破壊的判別法の高度化を目的とし、k-Nearest Neighbor法に基づく自動判別アルゴリズムの構築を試みた。以下、その原理および性能健勝試験結果について述べる。

連絡先: 遊佐訓孝、〒110-0008 東京都台東区池之端
2-7-17-7 階、株式会社 I I U、電話: 03-5814-5350、
e-mail:yusa@iiu.co.jp

2. 電磁現象を利用した割れの判別

2.1 割れのモデリング

電磁非破壊検査の観点からは、対象とする割れの微細構造までを考慮する必要は無く、割れ全体を包絡するような単純形状領域にある適当な電磁気的特性を与えることで実用上十分なモデル化ができるとされている[2-4]。一般的に応力腐食割れは粒界に沿って複雑に進展するため、割れの開口自体は小さいものの、割れ全体を包絡する領域の幅は比較的広いと考えられる。また、割れ破面の部分的な接触のため、割れ領域には0ではない電氣的導電率を与える必要がある。一方、疲労割れはほぼ一直線に進展するため、割れの開口の幅が割れ全体を包絡する領域の幅にほぼ等しく、また破面の接触の度合いが小さいため、割れ領域内部の導電率は応力腐食割れのものとは比べると低い。本研究における応力腐食割れと疲労割れの判別は、基本的にはこのように両者のモデルに幅と導電率の差異が存在することに起因する非破壊検査信号の変化を利用するものである。

2.2 判別アルゴリズムの構築

「幅が広く、導電率の高い」領域としてモデル化されるきずに対し、指向性の強い電流分布を実現するプローブを用いた渦電流探傷試験を行った場合、これらの特徴に起因するいくつかの特徴が探傷信号に認められることがある。その一つは前述の渦電流プローブ信号の比の値[1]であるが、差動型プラスポイントプローブを用いた探傷試験にて得られる信号においても、きず中央直上における信号の微弱化やきず端部における微小信号ピークという特徴が観測されることがある。本研究においては、これら2つの特徴を信号最大値で規格化した値、きずを横切る方向での最大強度の90%および50%信号の幅、そして渦電流プローブ信号の比の値の5つの特徴量からきずの自動判別を行う。

前述の5つの特徴量を5次元ベクトルとして取り扱い、このベクトルの値からきずが応力腐食割れであるか疲労割れであるかを自動判別することを試みる。判別のためのアルゴリズムはk-nearest neighbor法に基づいて構築し、応力腐食割れからのものであるか疲労割れからのものであるかが既に判明しているベクトルの値との類似度をもって、未知信号からの割れ判別を行うこととする。類似度としては最も単純なユークリッド

距離を用いた。

2.3 検証試験結果

判別アルゴリズムの性能評価試験のため、応力腐食割れもしくは疲労割れを人工的に導入した平板試験体計82体を準備した。試験体の材質はインコネル600、SUS304、SUS316、そしてNIC-70Aであり、応力腐食割れは3点曲げで応力を加えつつ腐食液中に浸漬することで、疲労割れは繰り返し3点曲げ試験を行うことで導入したものである。導入された応力腐食割れの性状に著しい偏りが生じないように、ポリチオン酸、テトラチオン酸、塩化マグネシウムの3種類の腐食液、および人工ノッチ、疲労割れ、引っかき傷の3種類の予き裂を用いて応力腐食割れの導入を行った。

Lave-One-Out Cross-Validationを行った結果をTable 1に示す。表中 K_{min} および K_{max} が k-Nearest Neighborにおいて考慮した近傍領域の最小および最大値、 M と T が判断の際の閾値、そして P_c と $Abstention$ とあるのが正答率と信頼性不足として棄却されたデータの割合である。ほぼ全ての場合について、割れが応力腐食割れであるか疲労割れであるかの判別が正しく行われていることが確認できる。

Table 1 Results of k-Nearest Neighbor Simulations

k_{min}	k_{max}	M	T	P_c	abstention
10	21	0.9	0.9	0.9867	0.0854
10	21	0.9	1.0	1.0000	0.1219
5	10	0.8	1.0	0.9872	0.0488
5	10	0.8	1.0	1.0000	0.0854

3. 結言

電磁非破壊検査において得られた信号より、対象とする割れが応力腐食割れであるか疲労割れであるかを自動判別するアルゴリズムの構築を行った。人工的に応力腐食割れ及び疲労割れを導入した平板試験体を用いた検証試験の結果、このアルゴリズムは割れが母材部に発生したかインコネル系の溶接金属部に発生したかによらず、100%に近い精度で割れの判別を行うことができるということが明らかになった。今後アルゴリズムの更なる高度化と検証試験、そして本手法に基づく割れの自動判別装置の製作を予定している。

謝辞

本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構「原子力安全基盤調査研究の公募研究」として実施した。

参考文献

- [1] L. Janousek, Z. Chen, N. Yusa, and K. Miya. A novel non-destructive method for distinguishing between fatigue and stress corrosion cracks using electromagnetic induction, Proceedings of the 13th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE13-50205 (in CD-ROM), 2005/05/16-20
- [2] Z. Badics, Y. Matsumoto, K. Aoki, F. Nakayasu, and A. Kurokawa, Finite element models of stress corrosion cracks (SCC) in 3-D eddy current NDE problems, Nondestructive Testing of Materials, R. Collins, W.D. Dover, J.R. Bowler and K. Miya (Eds.). IOS Press, 1995, pp. 21-29.
- [3] K. Ohshima and M. Hashimoto. Research on numerical analysis modeling of SCC on eddy current testing, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 10, 2002, pp. 384-388
- [4] N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, T. Uchimoto, and T. Takagi. Large-scale parallel computation for the reconstruction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals. NDT&E international, Vol. 36, 2003, pp. 449-459.