

熱疲労割れの直流電位差法による測定及び分析

Nondestructive Testing and Evaluation of Artificial Thermal Fatigue Cracks using Direct Current Potential Drop Method

東北大院・工学研究科	遊佐 訓孝	Noritaka YUSA	Member
東北大院・工学研究科	王 晶	Jing WANG	
東北大院・工学研究科	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member
Trueflaw Oy	Iikka VIRKKUNEN		
Trueflaw Oy	Mika KEMPPAINEN		

Abstract. This study reports the results of nondestructive testing and evaluation of artificial thermal fatigue cracks using direct current potential drop method. Six artificial thermal fatigue cracks, introduced into type 304L austenitic stainless steel plates with a thickness of 25 mm, are prepared; and potential drops across the cracks are measured using a direct current source of approximately 80A. The specimens are then served to destructive tests to reveal the true profiles of the cracks. Finite element simulations on the basis of the results of the destructive tests are then carried out to evaluate the electrical conductivity of the cracks, whose results provide good agreement between the experimental signals and simulated ones when the cracks are modeled as a nonconductive region.

Keywords: electromagnetic nondestructive evaluation, finite element method, numerical simulation, conductivity, numerical modeling

1. 緒言

原子力プラントにて発生しうる割れの一つとして熱疲労割れが挙げられる。熱疲労割れは高低温水合流部等の温度ゆらぎの存在する部位における熱疲労により生ずる割れであり、機械的疲労に起因する割れと比べ、き裂先端が鋭く、また開口幅が狭い等の特徴を有するため[1]検出及びサイジングが必ずしも容易では無いとされている。

熱疲労割れに関しては、2000年代前半に人為的に高精度でその性状を制御しつつ各種金属材料に導入する技術が確立され[2]、主として超音波探傷信号及びき裂断面性状の観点から、当該技術により製作された熱疲労割れに対する各種検討が行われてきた[3][4]。しかしながらその一方、超音波以外の非破壊検査の観点からの検討に関しては、報告が乏しい。近年、超音波技術に立脚した非破壊検査信号と超音波以外、特に電磁気的現象を用いた非破壊検査技術により得られる信号の融合による信頼性向上が積極的に議論されており[5]、よって電磁非破壊検査の観点からの熱疲労割れに関する詳細検討を行うことは、今後の原子力プラントの保全活動の議論に資するところが大であると考えられる。

以上の観点より、本研究においては、電磁非破壊検査の一種である直流電位差法の観点からの、熱疲労割れの

評価及び分析を行った。

2. 材料と方法

2.1 熱疲労割れ試験体

本研究において用いた試験体を Table 1 に示す。いずれも厚さ 25mm の SUS304L 平板に対して、人工的に熱疲労割れを導入したものである。材料の引張強さは 591 N/mm²、硬さ(HRB)は 79 である。熱疲労割れは、電磁誘導コイル(周波数 300kHz)による局所加熱と、加熱面に水を噴射することによる冷却により、試験体に繰り返し熱ひずみを与えることで導入されている。導入に際して予き裂は用いておらず、同一材料を用いた予備試験結果に基づいて、最大温度及び熱ひずみ付与回数は決定した。尚、Table 1 にはき裂の表面開口長さとも最大深さも併せて示しているが、これらは破壊試験により明らかとなったものである。

Table 1 Thermal fatigues considered in this study

TP ID	Flaw ID	Length*	Max. Depth*
W286	230BAB1161	14.4	4.1
W316	357BAB1215	9.7	3.5
	359BAB1216	20.1	6.5
	016BAB1227	22.1	6.5
W318	003BBB1219	11.7	4.1
	028BBB1239	6.5	3.1

*unit: mm

連絡先: 遊佐訓孝、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-1、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻

E-mail: noritaka.yusa@qse.tohoku.ac.jp

2.2 直流電位差法試験

直流電位差法試験は、銅電極を試験体表及び裏面に取付け、直流安定化電源（株式会社ニッケテクノシステム社製 PSF-800L）を用いて約 80A の電流をきずに対して垂直に流した際の、きずをまたいだ端子間の電位差を、DC 電圧測定用データロガー（Agilent Technologies 社製 34972A）を用いて測定することで行った。端子には先端 $\phi 0.19\text{mm}$ のコンタクトプローブ（株式会社ミスミ製 NP45S3SF-C）を用い、端子間隔は 5mm とした。

2.3 有限要素法解析

有限要素法解析には、汎用有限要素法解析ソフトウェア Comsol Multiphysics 4.2a 及びその追加モジュールである AC/DC モジュールを用いた。解析体系図を Fig. 1 に示す。計算に必要な資源を考慮して平板の大きさは $80\text{mm} \times 80\text{mm}$ とした。電流は平板側面より一様に与え、電流導入面と反対側の面において電位=0V の境界条件を課した。きずは平板中央に配置し、その幅は 0.2mm の一定値、内部導電率は一様、輪郭形状は破壊試験結果に基づき、制御点 0.8mm 間隔のベジェ曲線にて表現した。平板の導電率は 1.35MS/m 、用いた要素は 4 面体要素である。

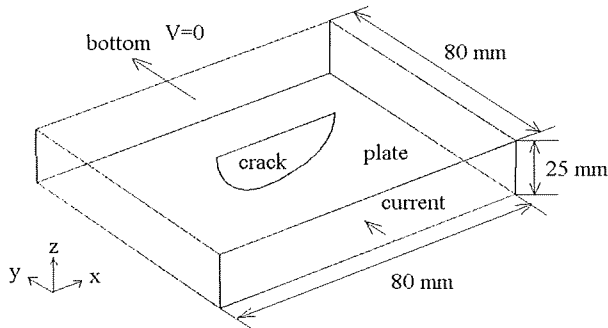


Fig. 1 Numerical configuration

3. 結果と考察

測定及び数値解析の結果得られたきずをまたぐ端子間電位差を Table 2 にまとめる。両方で電流値などが異なるため、表にはきずから十分離れた箇所における測定値で規格化した値を示している、また表中の σ_0 は母材導電率に対する比で表したきず内部の導電率である。表より、いずれのきずに対しても、きず内部の導電率を 0 としたときに、数値解析結果は測定結果を最もよく再現していることが確認できる。

Table 2 Results of the experiments and simulations

Flaw ID	Exp.	Simulation		
		$\sigma=0\%$	$\sigma=0.1\%$	$\sigma=0.2\%$
230BAB1161	1.6	1.58	1.46	1.38
357BAB1215	1.4	1.39	1.32	1.27
359BAB1216	2.0	2.05	1.75	1.59
016BAB1227	2.4	2.07	1.76	1.9
003BBB1219	1.6	1.52	1.42	1.35
028BBB1239	1.2	1.23	1.20	1.18

4. 結言

SUS304L 平板に人工的に導入した熱疲労割れの直流電位差法測定及び有限要素法解析による測定結果の分析を実施した。有限要素法解析の結果は、きず内部を空気領域とした時に測定結果を最もよく再現するものであり、電磁非破壊検査において絶縁壁として振る舞うことを示唆する結果が得られた。

尚、本研究にて用いた熱疲労割れ試験体は保全学会ラウンドロビン試験[6]にて用いられたものであり、詳細仕様及び完全な破壊試験結果は保全学会当該試験特設ページにて公開を行なっている。

参考文献

- [1] J. Wale, "Crack characterisation for in-service inspection planning – an update", SKI Report 2006:24, 2006.
- [2] M. Kemppainen, et al., "Advanced flaw production method for in-service inspection qualification mock-ups", Nucl. Eng. Des., Vol. 224, 2003, pp. 105-117.
- [3] M. Kemppainen, et al., "Comparison of realistic artificial cracks and in-service cracks", The e-Journal of Nondestruct. Testing & Ultrasonics, Vol. 8, 2003, pp. 1-6.
- [4] M. Kemppainen, I. Virkkunen, "Importance of crack opening in UT inspection qualification", Proc. 6th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, pp. 93-104.
- [5] D. Horn and W.R. Mayo, "NDE reliability gains from combining eddy-current and ultrasonic testing", NDT&E Int., Vol. 33, 2000, pp. 351-362.
- [6] N. Yusa et al., "A project aiming at the enhancement of NDT&E of stress corrosion cracking". Int. J. Appl. Electromagn. Mech., Vol. 33, 2010, pp. 1587-1590.