

X線回折を用いたスポット溶接材の 3次元残留応力評価

小川 雅
工学院大学

1 はじめに

抵抗スポット溶接は自動車の製造技術として広く使われているが、接合時に発生する残留応力が疲労き裂の進展速度に比較的大きな影響を及ぼすことが知られている。そのため、部材全域の3次元残留応力を非破壊評価することができれば、製品の余寿命を予測する上で重要な手掛かりとなる。現在、3次元残留応力を非破壊に評価する手法として中性子回折法があるが、この方法は深さ数十ミリ程度までの残留応力を離散的に計測する方法であり、比較的多くの時間を要す。そこで、Korsunskyらは、中性子回折法により計測した離散的な弾性ひずみの値から固有ひずみ理論^{1),2)}を用いて部材全域の3次元残留応力分布を求める方法を開発した^{3),4)}。しかし、中性子は専用の照射施設においてのみ利用可能であるため、自動車の製造現場においては現場利用可能な3次元残留応力の非破壊手法が求められている。そこで、X線回折法と固有ひずみ理論を用いた3次元残留応力推定法⁵⁾（以下、本手法と呼ぶ）の実用化が求められている。本研究では、抵抗スポット溶接材に対する本手法の有効性を実証するための基礎的な検討を数値解析により行う。

2 研究方法

2.1 対象とする配管モデル

本数値解析で資料したFEMモデルを図1に示す。こ

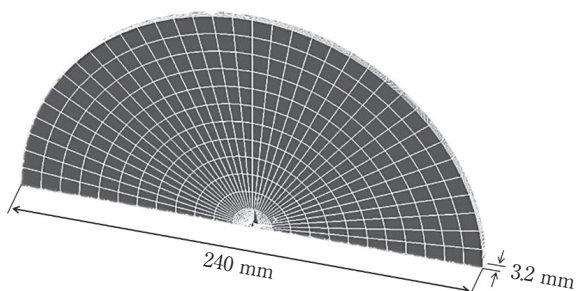


図1 抵抗スポット溶接材の有限要素モデル（1/2軸対称モデル）

のモデルは、半径120mm、厚さ3.2mmの周囲に拘束のない円板の1/2の軸対称モデルである。ヤング率は200GPa、ポアソン比は0.3、節点数と要素数はそれぞれ4,630、3,600である。解析には、有限要素解析ソフトであるANSYS Ver.19.0（CYBERNET SYSTEMS CO., LTD., Japan）を用いた。

2.2 数値解析方法

本手法では、表面弾性ひずみの計測値から直接的に残留応力を求めるのではなく、残留応力の原因となる非弾性ひずみとしての固有ひずみを推定する。そして、その推定した3次元の固有ひずみを強制ひずみとして有限要素モデルに負荷することにより、部材全域の残留応力分布を取得する。本数値解析では、次の手順により、この方法の抵抗スポット溶接材に対する推定精度を検証する。まず、実際の溶接接手に対してひずみゲージを張り付けて切断し、推定された固有ひずみ分布⁶⁾をもとに決定した図2の固有ひずみを、対象とする図1のモデルに入力して正解残留応力分布を設定する。次に、その部材の片面の表面弾性ひずみの値から本手法により固有ひずみ分布を推定し、残留応力を求める。そして、計測した面とは反対側の面において、残留応力の正解の値と推定値とを比較し、本手法の推定精度を評価する。

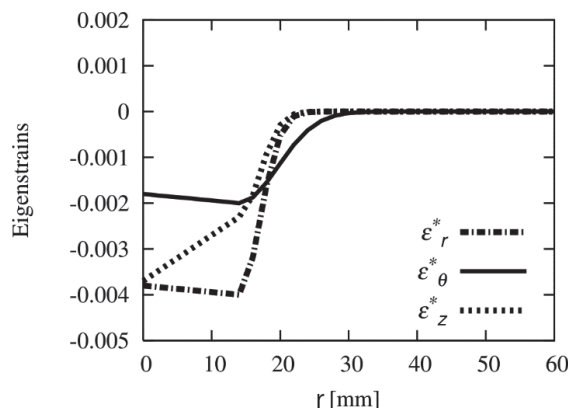


図2 正解固有ひずみ分布

2.3 計測位置

本数値解析においては、X線回折法による弾性ひずみの計測位置を部材表面の片側、ここでは $z = 3.2\text{mm}$ における全節点の位置とした。ここでは、手法の原理的な検証を行うため、各節点において r 方向成分と θ 方向成分の弾性ひずみの値を精度よく計測できたものとして、本手法による推定を実施した。

2.4 固有ひずみの関数近似による未知数の削減

一般に、溶接により生じる非弾性ひずみは、入熱条件に起因することが知られており、抵抗スポット溶接の場合には、溶接部ほど固有ひずみが大きく、そこから半径方向に遠ざかるにつれて小さくなる傾向であることが考えられる。そこで、本研究では1～6次までのチェビシェフ多項式にガウス関数を掛け合わせた関数により固有ひずみを近似する。ここで、ガウス関数の分布形状を 3σ の分布範囲として変数 d で表現し、任意の d の値に対する弾性ひずみの計測値と推定した固有ひずみから求めた計測値との差のノルム（残差ノルム）が最小となるように、応答曲面法により決定した。応答曲面は図4の通

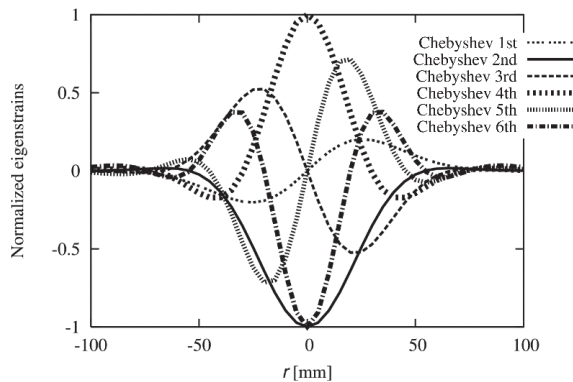


図3 固有ひずみの近似関数 ($d = 77\text{mm}$)

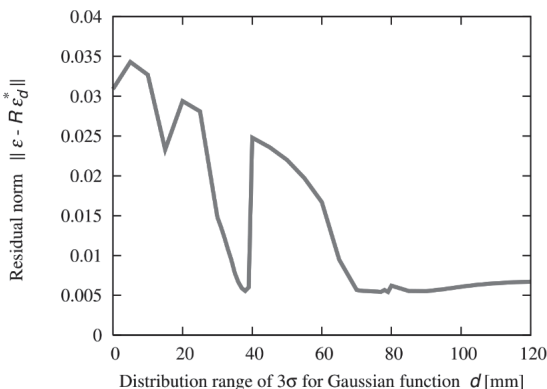


図4 ガウス関数の分布幅 d に対する残差ノルム

りとなり、 d の値が 77mm のとき残差ノルムが最小となった。なお、本数値解析では、簡単のため正解の固有ひずみが周方向（ θ 方向）と厚さ方向（ z 方向）に均一であり、その傾向が既知であるものとして固有ひずみを推定した。

3 主な研究成果

代表的に、 $\theta = 0\text{degree}$, $z = 0\text{mm}$ における σ_r と σ_θ の正解の残留応力と本手法により推定した残留応力との比較を示す。とりわけ、抵抗スポット溶接部（ $r = 0\text{mm}$ ）の付近で比較的高い推定精度が得られていることがわかる。

4 おわりに

抵抗スポット溶接部の疲労寿命を非破壊に予測できるようにするために、本研究ではX線回折と固有ひずみ理論を用いた3次元残留応力評価法の抵抗スポット溶接材に対する適用性についての基礎検討を行った。本数値解析により比較的精度よく残留応力を推定できることがわかったが、本研究では比較的単純なモデルを用い、正解の残留応力場も単純であった。今後は、実際の抵抗スポット溶接材に対する実証実験により本手法の推定精度を示すことが重要である。

参考文献

- 1) Mura, T., (1987), pp.1-15, Martinus Nijhoff Publishers.
- 2) 藤本二男, 溶接学会誌, Vol.39, No.4 (1970), pp.236-252.
- 3) A.M.Korsunsky, Journal of Mechanics of Materials and Structures, Vol.1, No.2 (2006), pp.259-277.
- 4) F. Uzun and A.M.Korsunsky, Finite Elements in Analysis and Design, Vol.155, (2019), pp.43-51.
- 5) 小川雅, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.815 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0195.
- 6) 上田幸雄, 麻寧緒, 溶接学会論文集, Vol.11, No.1 (1993), pp.189-195.

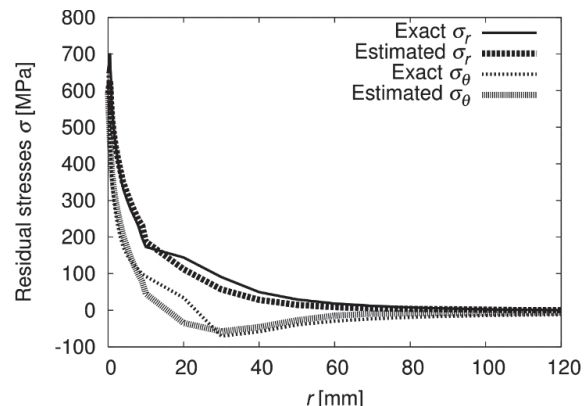


図5 残留応力の正解と本手法による推定値との比較