

固有ひずみ理論に基づく密着き裂検出手法の スポット溶接ナゲット径の推定への応用

小川 雅
工学院大学 工学部

1 はじめに

近年、自動車の燃費向上のために、車体の軽量化に対する要求が高まっているが、安全性確保のためには十分な強度が求められる。抵抗スポット溶接においては、ナゲット径とよばれる接合部の寸法が継手の強度に関係しているため、ナゲット径を非破壊に評価することが重要である。一般的に、超音波による非破壊検査が行われることが多いが、密着部は超音波を透過させてしまうという問題がある。本研究では、申請者が独自に開発した未溶着部などの超音波をほとんど透過させてしまう密着き裂も検出する方法¹⁾を応用し、ナゲット径を非破壊に評価する方法（以下、本手法と呼ぶ）について数値解析によりその有効性を検証する。

2 研究方法

2.1 本提案手法の原理

このナゲット径の評価手法はX線回折法と固有ひずみ理論²⁾を用いて部材全域の3次元残留応力分布を推定する手法³⁾を応用した方法である。X線回折を用いた3次元残留応力推定法では、既知の寸法の部材に対して表面応力を計測することにより、部材全域の固有ひずみを推定する。固有ひずみとは、残留応力の原因となる非弾性ひずみのこと^{4),5)}であり、この3次元分布が分かれば、その値を有限要素モデルに負荷することで部材全域の残留応力を算出することができる。つまり、寸法、表面応力、3次元固有ひずみのうち、どれか2つが分かれば残りの一つを決定できる関係にある。そのため、3次元固有ひずみが既知である場合には部材表面の応力分布から内部欠陥も含め、その形状を特定することができる（図1参照）。

抵抗スポット溶接部のナゲット径を評価する手順としては、まず特定の材質の部材に対して、抵抗スポット溶

接条件と発生する固有ひずみ分布との関係を求めておく。次に、実際の抵抗スポット溶接材に対してX線回折法により表面残留応力を計測する。そして、実際の抵抗スポット溶接条件を参照することで決定した3次元固有ひずみ分布を種々の形状の有限要素モデルに入力し、その中で実際の表面残留応力分布に一番近いモデルを寸法の最確値として決定する。

2.2 本手法の推定精度の評価方法

本研究では、本手法の推定精度を数値解析により検証するため、まず正解の固有ひずみ分布を設定し、正解の残留応力分布場を決定した。本研究では、ナゲット部の中心ほど大きく、そこから遠ざかるにつれて小さくなる傾向の固有ひずみを正解固有ひずみとして設定した。次に、それらの正解固有ひずみを有限要素モデルに負荷し、正解残留応力分布を生成した。そのうち部材表面の半径方向成分と円周方向成分の残留応力分布を残留応力の計測値として模擬した。計測誤差を模擬するために、正規分布に従う乱数により決定した値をその正解の表面残留応力の値に加えた。本数値解析では、ナゲット径が $r = 4 \text{ mm}$ の時を正解として、この半径を変化させたときの応力差を求め、計測誤差がある場合の推定精度について検証を行った。ここで、応力差は二乗平均平方根（RMS）により残留応力の計測値と推定値との差を評価し、その差が小さくなる際のナゲット径を推定値とした。

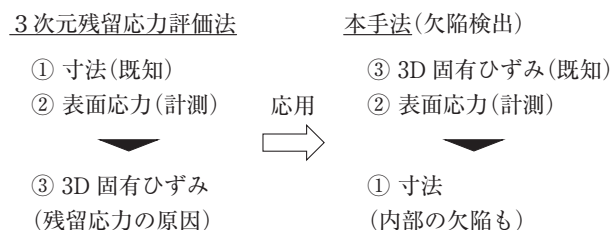


図1 本提案手法の原理

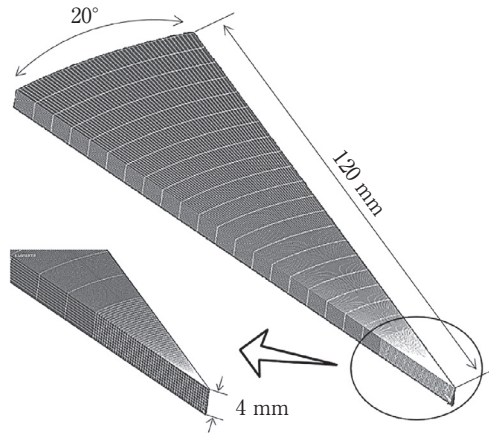


図2 有限要素モデル（軸対称1/18モデル）

2.3 有限要素モデル

本研究で用いた有限要素モデルを図2に示す。このモデルの半径は120mm、厚さ2mmの板を二枚重ねて合計4mmとしたものである。0~20°の扇形をした柱のモデルであるが、軸対称の境界条件を設定しているため、本来は円板である。材質はSUS430を想定しており、ヤング率200GPa、ポアソン比0.3である。 $r=0$ mmの位置に一点のスポット溶接を行うこととし、その固有ひずみ分布は円周方向に一定とした。節点数は42,392、要素数は35,000である。

3 主な研究成果

まず、正解固有ひずみが生じた際、ナゲット径の違いによる残留応力分布の変化を調査した。図3はナゲット径の違いに対する半径方向成分の表面応力の変化を示しており、ナゲット径の違いにより表面応力が敏感に変化していることが分かる。なお、図3の横軸が溶接部 ($r=0$ mm) から半径方向座標、縦軸が残留応力である。

そして、表面残留応力の r 方向成分と θ 方向成分の値を算出し、異なる溶着半径の場合とのRMSを取ることで図4の応答曲面を作成した。計測誤差がない場合には、実線で示すように、ナゲット径が4mmのときにRMSの値がゼロとなり、そこから r 方向に遠ざかるにつれて値が大きくなる傾向を確認することができた。また、計測誤差として標準偏差20MPaの正規分布に従う誤差を乱数により決定し、部材表面 ($z=4$ mm) における半径方向成分と円周方向成分のそれぞれの値に負荷してRMSを算出した。その場合でも、図4の破線で示すように、ナゲット径が4mmの際に極小値をとり、正しく推定することができた。これにより、本手法により

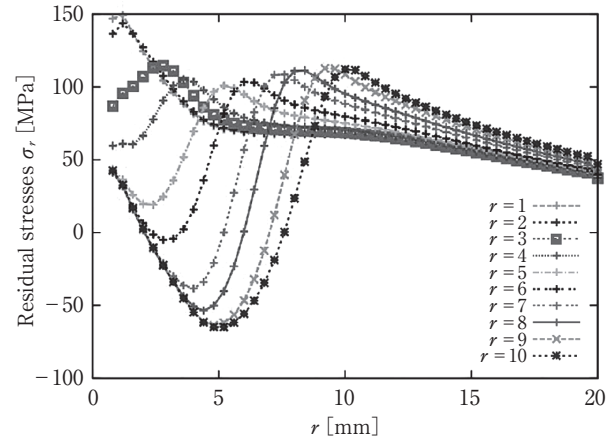


図3 ナゲット径の違いと表面残留応力の変化

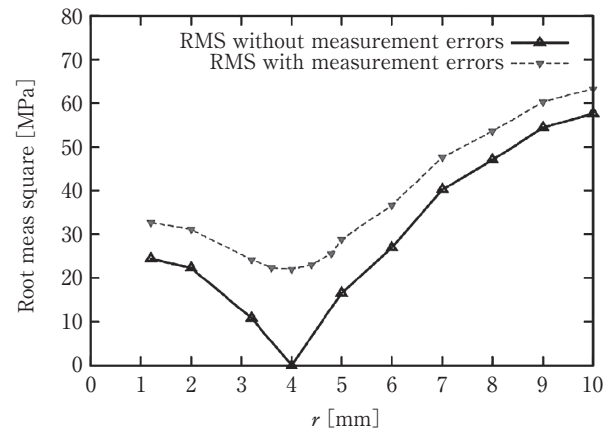


図4 ナゲット径の違いに対するRMSの値

溶着面積を決定するアプローチの有効性を数値解析により示すことができた。

4 おわりに

固有ひずみ理論とX線回折法を応用し、抵抗スポット溶接部のナゲット径を評価する方法について提案した。数値解析により本手法の推定精度を評価したところ、計測誤差がある場合にも、本手法により比較的精度よく溶着半径を推定することができることを明らかにした。今後、本手法の実証実験を行い、実用化を目指す。

参考文献

- 1) 小川雅, 内部欠陥の検出方法及び内部欠陥の検出装置, 2023年6月5日, 特許第7290213号.
- 2) A. M. Korsunsky, Journal of Mechanics of Materials and Structures, Vol.1, No.2(2006), pp.259-277.
- 3) 小川雅, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.815 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0195.
- 4) Mura, T., (1987), pp.1-15, Martinus Nijhoff Publishers.
- 5) 藤本二男, 溶接学会誌, Vol.39, No.4(1970), pp.236-252.