

まつもと たかのり
氏 名 松本 貴則
授与学位 博士(工学)
学位授与年月日 平成31年3月27日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械機能創成専攻
学位論文題目 渦電流磁気指紋法による炭素鋼の残留ひずみ評価
指導教員 東北大学教授 内一 哲哉
論文審査委員 主査 東北大学教授 内一 哲哉 東北大学教授 高木 敏行
東北大学教授 小川 和洋 東北大学教授 祖山 均

論文内容要旨

近年、新潟県中越沖地震や東北地方太平洋沖地震などの巨大地震が発生し、原子力発電設備において低サイクル疲労強度を低下させる残留ひずみの評価が求められている。現在は残留ひずみ評価として硬さ試験が採用されているが、膨大な測定回数や測定者および測定箇所によるばらつきが課題となっている。一方電磁非破壊評価の分野では、増分透磁率法を用いた残留ひずみ評価が注目されている。増分透磁率法とは、材料にメジャーループを描かせるための低周波磁場を印加し、更に高周波の微小磁場を渦電流試験コイルにより重ね合わせた際の渦電流試験コイルのインピーダンスを測定する手法である。増分透磁率は他の電磁非破壊試験法と比較して信号が安定しており、低領域の残留ひずみに敏感である。しかし、圧延や熱処理等による材料組織変化に依存するため、材料や組織が不明な状態において残留ひずみ情報を正確に抽出することが困難であるという課題がある。

本論文は原子力発電設備で使用されている低炭素鋼における残留ひずみ評価のために、増分透磁率法を応用した新しい電磁非破壊評価手法である渦電流磁気指紋法を提案し、その適用可能性を検討することを目的とする。渦電流磁気指紋法とは、増分透磁率法における渦電流試験コイルのインピーダンスが位相平面上で図示できることを利用して、印加磁場に応じて変動する位相平面上のコイルインピーダンスの軌跡を評価に用いる試験法のことである。渦電流磁気指紋は保磁力周辺の印加磁場においてループ形状の軌跡を描くという特徴を有している。

第1章は緒言であり、本研究の背景、渦電流磁気指紋法の原理および手法の提案、目的および構成を述べている。

第2章では、提案した渦電流磁気指紋法による残留ひずみ評価の適用可能性について検討を行い、更に渦電流磁気指紋法のメカニズム検証について述べている。ボイラ及び圧力容器用炭素鋼SB410の引張試験片を作製し、渦電流磁気指紋と残留ひずみの関係性を調べた結果、大きく分けて次の傾向が確認された。残留ひずみを付与することで渦電流磁気指紋が大きく変化、残留ひずみの増加に伴い渦電流磁気指紋の大きさが減少、ループの位相角が増加、軌跡の進行方向が残留ひずみ0%から2%の間で反転することが明らかになった。増分透磁率の変化の

傾向も渦電流磁気指紋と同様であり、0%から2%の間で急激に変化を示し、その後なだらかな変化を示した。渦電流磁気指紋の周波数依存性を調べた結果、50 kHz のような比較的高周波において顕著な現象であることを確認した。

残留ひずみ0%から2%までの領域に存在する渦電流磁気指紋の特異点について詳細な調査を行った結果、渦電流磁気指紋は3つのグループに分類することができることが明らかになった。残留ひずみが弾性限を超え降伏までの範囲のひずみ領域(領域 I)では、渦電流磁気指紋は右側にループを生じ、軌跡の進行方向は反時計回りであった。リューダース帯が発生・伝播するひずみ領域(領域 II)では、渦電流磁気指紋はループが閉じて直線状になった。そして加工硬化後のひずみ領域(領域 III)では、ループが左側に生じ、軌跡の進行方向は時計回りであった。

応力が渦電流磁気指紋に与える影響について調べるために領域 I、領域 II、領域 III の代表的な試験片を用いて弾性引張応力を与えながら渦電流磁気指紋を測定した結果、領域 I の試験片では、引張応力の増加に伴ってループ長さが増大するとともにループが傾斜して細長くなる傾向を示した。その後除荷すると引張前の状態に戻る傾向を示した。全ての応力状態において軌跡の進行方向は反時計回りであった。領域 II と領域 III の試験片も領域 I と同様の傾向を示すことを明らかにするとともに、ひずみ付与による渦電流磁気指紋の変化の原因は、引張試験により生じた圧縮残留応力である可能性を示した。更にこの結果により渦電流磁気指紋が残留ひずみだけでなく残留応力を評価できる可能性を示唆した。

渦電流磁気指紋のメカニズムを検討するために通常の渦電流解析の支配方程式を用いて数値解析を行い、実験結果との比較を行ったところ、渦電流磁気指紋を再現するには材料の比透磁率だけでなく導電率も変化しなければならないことが判明した。しかし、材料の導電率が保磁力程度の印加磁場で変化することは物理的な説明が困難である。そこで、磁性体の磁壁周辺に流れるマイクロ渦電流が導電率変化に寄与していると推察し、磁壁周辺に流れるマイクロ渦電流を考慮した構成関係式を通常の渦電流解析の支配方程式に導入して新たに解析を行った。解析結果と実験結果を比較した結果、マイクロ渦電流の効果を表す追加項の係数が印加磁場および残留ひずみにより変化することを明らかにした。

第3章では、渦電流磁気指紋法の測定システム及び測定条件の検討について述べている。渦電流磁気指紋法および増分透磁率法では渦電流試験コイルにより増分磁場を励磁磁場に重ね合わせている。しかしながら、この増分磁場の方向と印加磁場の方向の関係は測定システムによって異なり、増分磁場と印加磁場が平行な場合と垂直な場合に分類される。渦電流磁気指紋法で使用する励磁磁場と増分磁場の方向依存性及び渦電流試験コイル周波数について系統的に調査を行った。その結果、励磁磁場と増分磁場が垂直となるシステムの方が、残留ひずみによる渦電流磁気指紋の変化が明瞭であり、測定システムとして適していることを明らかにした。渦電流試験コイル周波数は、残留ひずみへの感度と表皮深さの観点から 50 kHz が適切であることを明らかにした。

渦電流磁気指紋の信号が静的磁化過程および動的磁化過程に依存するか不明であるため、直流バイアスによる励磁磁場と連続した三角波による励磁磁場を用いて静的磁化過程および動的磁化過程が渦電流磁気指紋に与える

影響について調査した。その結果、励磁周波数が 0.05 Hz のような低周波であれば動的磁化過程と静的磁化過程の増分透磁率および渦電流磁気指紋は一致することがわかり、渦電流磁気指紋のループは磁化過程によらず存在することが証明された。

第 4 章では、渦電流磁気指紋法の非破壊評価手法としての適用範囲について述べている。ヒートの異なる 2 種類の SB410 鋼材を用いて引張方向と圧延方向が平行または垂直となる引張試験片を作製し、渦電流磁気指紋の圧延方向依存性について調査した結果、圧延方向と引張方向が垂直な試験片においては、無ひずみ状態や 0.05% の微小ひずみ領域における渦電流磁気指紋のループ形状が平行な場合と異なることを示した。一方で、第 2 章で述べた残留ひずみによる渦電流磁気指紋の減少、位相角の変化や軌跡の反転現象ならびに残留ひずみ領域による分類は、圧延方向および鋼材のヒートに依存しないことを確認した。

炭素鋼試験片の厚さおよび化学組成が渦電流磁気指紋に与える影響について調査した。圧延方向と引張方向が平行・垂直になるよう引張試験片を作製し、圧延依存性も同時に調べた。無ひずみ状態の渦電流磁気指紋は試験片の厚さによってループ形状が変化した。SB410 より炭素含有量が多くパーライト率の高い SB450 鋼材の渦電流磁気指紋は、SB410 と比較してフェライト率が低いため渦電流磁気指紋の大きさが減少し、ループ面積も減少した。一方で、残留ひずみによる渦電流磁気指紋の減少、位相角の変化や軌跡の反転現象ならびに残留ひずみ領域による分類は試験片の厚さおよび炭素含有量に依存しないことを明らかにした。

ヒートの異なる 2 種類の SB410 および SB450 のビッカース硬さを測定し、残留ひずみとの関係性について調査した結果、パーライト率の高い SB450 において、SB410 と比較してビッカース硬さの値が大きく残留ひずみに対する増加率が小さいため硬さ試験の精度が減少する一方で、渦電流磁気指紋の残留ひずみに対する変化は鮮明であり、硬さ試験に対する優位性を示した。

渦電流磁気指紋法の再現性について検討を行った。無ひずみ試験片を用いて複数回渦電流磁気指紋を測定したところ、渦電流磁気指紋の大きさにばらつきが確認できたが、良好な軌跡の再現性を確認できた。残留ひずみ 2% 試験片においては、非常に高い再現性を確認できた。また、無ひずみ試験片および残留ひずみ 2% 試験片を複数用意して渦電流磁気指紋を測定したところ、無ひずみ試験片ではループ形状に若干ばらつきを確認し、2% 試験片では軌跡は概ね一致していることを確認した。従って、渦電流磁気指紋は無ひずみ状態よりも残留ひずみ付与後の方が高い再現性を有していることが明らかになった。

通常の渦電流試験では信号がコイルのリフトオフに依存するため、渦電流磁気指紋法における渦電流試験コイルのリフトオフの影響について調査を行った。リフトオフ増加に伴い渦電流磁気指紋の大きさおよびループ面積が減少する傾向を確認した。しかし、残留ひずみ付与による渦電流磁気指紋の位相角変化はリフトオフに依存せずロバスト性を有していることが明らかになり、渦電流磁気指紋法の非破壊評価手法としての優位性を示した。

鋼材の製造過程で発生した酸化膜が渦電流磁気指紋に与える影響について調査を行った。酸化膜が存在しない場合の渦電流磁気指紋と比較して酸化膜が存在する場合、渦電流磁気指紋の軌跡は直線形状に近づきループ形状

は細長くなるとともに位相角および大きさが増加した。そのため、酸化膜が存在する場合、正確な残留ひずみ測定は困難となることが示された。酸化膜同様、渦電流磁気指紋は機械研磨の影響も受けることを確認したが、軌跡の進行方向は機械研磨により変化せず、軌跡の反転現象から塑性変形の有無は判別可能であることを明らかにした。

強磁性体を磁化した際に発生する磁歪現象と渦電流磁気指紋の関係性を調査した。渦電流磁気指紋のループ周辺において磁歪変化が顕著になり、印加磁場増加に伴い磁歪変化が減少することから、渦電流磁気指紋のループの発生原因に磁歪が影響していることが明らかになった。

渦電流磁気指紋法による残留ひずみの定量的評価を検討するため、渦電流磁気指紋の代表的なパラメータと残留ひずみの関係性を調査したところ、渦電流磁気指紋における原点からループ先端までの最大距離は残留ひずみの増加に伴って指数関数的に減少すること、ループ面積は加工硬化開始以降の残留ひずみ値により減少することを明らかにし、渦電流磁気指紋法による残留ひずみの定量的評価の可能性を示した。また、渦電流磁気指紋の軌跡の進行方向指標化したところ、鋼材のヒート、圧延方向、厚さ、化学組成の違いに依存せず塑性変形の有無を判別可能であることを示した。

第5章は結言であり、本論文を総括する。渦電流磁気指紋法は低炭素鋼の残留ひずみ評価として有用な手法であることを示し、渦電流磁気指紋の軌跡の進行方向は材料組織変化に依存しない絶対的な指標であることを明らかにすることで、材料や組織が不明な場合においても非破壊検査手法として有効である可能性を示した。

論文審査結果の要旨

地震荷重を受けた原子力発電所では、構造材料に生じた残留ひずみにより低サイクル疲労強度が低下するため、残留ひずみを硬さ試験により評価することが定められている。一方で、硬さ試験は測定者や測定箇所によるばらつきが課題であり、硬さ試験に代わる簡便かつ高精度な残留ひずみ評価手法が求められる。本研究の目的は原子力発電所の配管に使用されている低炭素鋼の残留ひずみを対象とした新しい電磁非破壊評価手法の提案である。従来の電磁非破壊評価手法とは異なる渦電流磁気指紋法が提案され、残留ひずみと渦電流磁気指紋信号の変化との関係を明らかにするとともに、本手法のメカニズムについて議論されている。さらに渦電流磁気指紋の軌跡の進行方向を用いて塑性変形の有無を判別する方法についても提案されている。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編5章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、渦電流磁気指紋法の原理および方法の提案、目的および構成を述べている。

第2章では、提案した渦電流磁気指紋法による残留ひずみ評価の適用可能性について検討を行い、さらに渦電流磁気指紋法のメカニズムについて検討している。引張試験により付与した残留ひずみと渦電流磁気指紋信号の関係から渦電流磁気指紋法による残留ひずみ評価の可能性を示している。特に、渦電流磁気指紋信号の軌跡形状が、残留ひずみにおける弾性限から降伏までの領域、降伏後の不均一変形領域、加工硬化開始後領域の各々に対応して変化することを明らかにし、塑性変形の有無を判別可能であることを示している。弾性応力を付与した渦電流磁気指紋の測定結果により、渦電流磁気指紋は圧縮残留応力が渦電流磁気指紋発生の原因であることを明らかにしている。さらに渦電流磁気指紋法のメカニズムを議論するために通常の渦電流解析の支配方程式に磁壁周辺に誘導されるマイクロな渦電流を考慮した新たな支配方程式を導出して数値電磁場解析を行い、解析結果と実験結果との比較からマイクロな渦電流が渦電流磁気指紋信号の変化に寄与していることを明らかにしている。これらは渦電流磁気指紋による残留ひずみ評価に根拠を与える知見である。第3章では、渦電流磁気指紋法の測定システムおよび測定条件の検討について述べている。渦電流磁気指紋法で使用する励磁磁場と増分磁場の方向依存性および渦電流試験コイル周波数について系統的に調査を行い、励磁磁場と増分磁場の方向が垂直となる測定システムが適していること、および渦電流試験コイルの最適な周波数を示している。更に渦電流磁気指紋は動的磁化過程および静的磁化過程に依存しないことを示している。これは渦電流磁気指紋法による残留ひずみ評価の計測の信頼性を裏付ける知見である。

第4章では、渦電流磁気指紋法の適用範囲について述べている。鋼材のヒート、圧延方向、厚さおよび化学組成の異なる試験片に対して渦電流磁気指紋の測定を行い、渦電流磁気指紋法はこれらに依存せず適用可能であることを示している。さらに渦電流磁気指紋法が高い再現性を有することを実験結果により示している。渦電流磁気指紋法の代表的なパラメータを使用することで残留ひずみを定量的に評価可能であることを示すと同時に、異なるパラメータを用いることで、鋼材のヒート、圧延方向、厚さおよび化学組成に依存せず塑性変形の有無を判別可能であることを示している。これは渦電流磁気指紋法を実用化する上で重要な知見である。

第5章は結論であり、本論文を総括している。

以上要するに本論文は、低サイクル疲労強度を低下させる残留ひずみを評価する新しい電磁非破壊評価手法の適用可能性について述べているものであり、機械機能創成および非破壊評価の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。