

氏 名	佐藤 康元
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 11 年 3 月 25 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) 機械知能工学専攻
学位論文題目	溶接部欠陥の高精度検出・計測のための遠隔誘導型電位差法の開発に関する研究
指導教官	東北大学教授 庄子 哲雄
論文審査委員	主査 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 高木 敏行

論文内容要旨

今日、溶接技術は産業界のあらゆる分野に普及・浸透しており、数多くの製品・構造物が溶接によって製作されている。溶接部には母材と溶着金属による材質不連続部、余盛りによる形状不連続部等が存在するため、溶接部を含む構造物において、通常最も欠陥が潜(先)在・発生しやすい部位とすることができる。溶接構造物は、溶接による形状、強度のばらつき、残留応力、潜(先)在欠陥等を考えると、欠陥の発生を防止する従来の設計概念を取り入れることは不可能に近く、損傷を許容し、それが不安定な破壊を生じないことを保証する手法を取らざるを得ない。この場合信頼性の高い高感度の非破壊検査手法が必要不可欠であるが、これらの不連続部の影響に起因した溶接部非破壊検査の信頼性を低下させる要因は極めて多く、これまで効果的検査手法が存在しないのが現状である。

本研究では、これらの現状に鑑み、計測原理・装置が簡便でありながら高感度で欠陥の検出および定量評価を行うことができる電位差法の中でも、電磁誘導現象を利用して検査対象に電流を非接触で誘導する新しい電位差法による溶接部裏面欠陥の高精度検出・計測に関する検討および手法の開発を行った。まず本研究により開発した電磁誘導現象を利用した電位差法による自動計測システムの有用性を明らかにし、電磁誘導現象を利用した電位差法の基本である集中誘導型交流電位差(以下 ICFPD)法に対して有限要素法による数値解析を実施し、電磁誘導現象を利用した電位差法への数値解析によるアプローチが可能であることを示した。次に、ICFPD 法の計測条件を系統的に変化させて母材試験片の計測面と反対側の面に導入された 2 次元欠陥の計測を実施し、ICFPD 法の計測パラメータと裏面欠陥検出感度の関係を明らかにするとともに、溶接部裏面欠陥計測を行うことで、ICFPD 法による溶接部裏面欠陥の検出限界を明らかにした。次に、溶接部裏面欠陥の検出感度向上のため、検査対象に電流を誘導する誘導線を従来の 1 本から 2 本に分割した、分離誘導型電位差法を新たに開発し、母材試験片および溶接試験片に導入された裏面欠陥を計測し ICFPD 法と比較することでその有用性を示した。さらに、一様表面はもちろん、余盛り有り溶接部などのような形状不連続部を含む検査対象に対しても高感度の検査が可能な、遠隔誘導型電位差法を新たに開発し ICFPD 法と比較することでその高い欠陥検出能力を示した。本論文は全 7 章から構成されている。以下に各章ごとの要旨をまとめる。

第 2 章では、電磁誘導現象を利用した電位差法の原理および特徴について、1 本の誘導線を試験片表面近傍に配置して電流を誘導する、ICFPD 法に基づいて概説するとともに、計測を自動化する際考慮すべき問題点を示した。

また、抽出された問題点をもとに本研究において開発された自動計測システムについて説明し、同一の検査対象に関

して手動計測および自動計測を実施し、自動計測システムの性能およびその有用性を示した。すなわち、自動計測システムを用いることでこれまで目視により行ってきた探触子位置決めが 0.05mm の精度で行えるようになり、探触子を試験片表面に常に一定の圧力で押しつけることができるようになった。この結果計測される電位差分布の無欠陥部のばらつきを 1/3 に低減させることができ、手動計測と比較して欠陥信号がより明瞭になった。さらに手動計測と比較して計測に要する時間を 1/4 に短縮させることが可能となった。

第 3 章では、電磁誘導現象を利用した電位差法の数値解析による評価の可能性検討および物理現象の定量的理解のため、1本の誘導線を試験片表面近傍に配置して電流を誘導する ICFPD 法に対して A- ϕ 法による辺要素有限要素法解析を実施した。その結果以下の知見を得た。

- (1) 数値解析により得られる表面欠陥の電位差分布は、実験と同一の形状を示す。
- (2) 常磁性体に対する解析の結果、表面欠陥端部における電位差の変化量の比は、実験結果とよく一致した。
- (3) 電位差の位相情報から浅いき裂深さを推定することが可能である。
- (4) 数値解析により得られる裏面欠陥の電位差分布は、実験と同一の形状を示す。
- (5) 電磁誘導現象を利用した電位差法に対して有限要素法による数値解析が可能である。

第 4 章では電磁誘導現象を利用した電位差法の基本といえる ICFPD 法の計測パラメータ(電位差計測端子の間隔、誘導線長さ、周波数)を系統的に変化させ、INCO718 試験片に導入された 2 次元裏面欠陥および 3 次元溶接部裏面欠陥の計測を行った。その結果以下の知見を得た。

- (1) 裏面欠陥の場合、欠陥による電位差の変化量が小さいため、特に浅い欠陥による電位差の変化量が無欠陥部における変動成分に打ち消されてしまう。このため表面欠陥に対して高感度であるとされる端子間隔が 2.5mm の探触子よりも、5mm のもののほうが裏面欠陥の計測には適している。
- (2) 長さ 40mm の誘導線を用いることで 20mm の誘導線の場合より、例えば 0.3kHz の場合、無欠陥部における電位差変動を約 30%低減し、欠陥による電位差変化量を 58%向上させることができる。その結果 S/N 比は約 2 倍となった。
- (3) 電位差計測端子のばね圧を大きくすることで、無欠陥部における電位差変動を約 10%低減させることができた。この結果標準ばね圧の端子では検出が困難であった、板厚 3.5mm の母材試験片に導入された深さ 0.5mm の裏面欠陥が明確に検出可能となった。
- (4) 無欠陥部における変動成分に埋もれている欠陥信号を明確にする場合、移動平均処理が有効である場合がある。
- (5) 本研究の範囲内では ICFPD 法は、板厚 7mm の母材試験片の場合では深さ 1mm、板厚 3.5mm の試験片では深さ 0.25mm の 2 次元裏面欠陥が検出可能である。
- (6) 溶接試験片の場合、余盛りを除去すれば深さ 1mm および 2mm の溶接部裏面欠陥近傍において欠陥信号が得られた、ただし定量的評価は困難である。

第 5 章では電磁誘導現象を利用した電位差法による余盛り有り溶接部の溶接線に沿った高精度欠陥計測を可能にするため、従来の ICFPD 法の問題点を解決する、分離誘導型電位差法を新たに考案し、その探触子すなわち分離誘導型探触子を試作開発し実験的に評価した。

はじめに、母材試験片に導入された裏面欠陥に対して分離誘導型電位差法の主要計測パラメータ(周波数、探触子の端子-誘導線間隔)と欠陥検出感度の関係を明らかにし、ICFPD 法と比較した。また溶接試験片に導入された 3 次元人工

裏面欠陥および溶接余盛りを模擬した試験片の計測を行った。その結果以下の知見を得た。

- (1) 分離誘導型電位差法により裏面欠陥の計測を行う場合、低周波数(0.3kHz)において高周波数(10kHz)と比較して無欠陥部におけるばらつきを 1/9 に低減させることができ、S/N 比が約 2 倍になる。
- (2) 探触子の端子—誘導線間隔は、分離誘導型探触子の欠陥検出感度(S/N 比)を決定する主要パラメータのひとつであり、計測条件により最適値が存在する。今回の計測条件の場合 4mm が最適値で、最も低い場合と比較して約 3 倍の S/N 比が得られた。
- (3) 欠陥信号強度は ICFPD 法の方が 2 倍ほど大きいですが、分離誘導型電位差法では無欠陥部におけるばらつきが 1/6 に低減され、その結果 S/N 比は約 3 倍になる。
- (4) 従来の ICFPD 法では検出が困難であった、余盛り除去溶接試験片に導入された深さ 2mm の裏面欠陥に対して、分離誘導型電位差法では無欠陥部におけるばらつきの約 1.5 倍の電位差が計測され明確に検出が可能である。
- (5) 分離誘導型探触子により余盛り有り溶接試験片を計測して得られる電位差分布は、余盛り表面の凹凸の影響を受けやすく計測される電位差分布は大きく変動するため欠陥の認識は困難であった。

第 6 章では、電磁誘導現象を利用した電位差法による溶接部欠陥の高精度検出・計測のため、誘導線を試験片表面から大きく離れた位置に配置する新しい手法として遠隔誘導型電位法を考案した。

はじめに遠隔誘導型電位差法の欠陥検出感度に及ぼす周波数の影響を表面欠陥に対して調査し、従来の ICFPD 法と比較した。次に裏面欠陥に対して検討を行い本研究により得られている、ICFPD 法および分離誘導型電位差法による結果と比較した。また人工欠陥のみならず自然き裂へ適用可能であることを示すため、疲労き裂が導入された試験片の計測を行った。また溶接部裏面欠陥の計測を行い、新たに開発した遠隔誘導型電位差法による溶接部裏面欠陥の検出感度について検討した。その結果以下の知見を得た。

- (1) 遠隔誘導型電位差法による表面欠陥の計測は、低周波数(1kHz)において高周波数(30kHz)と比較してノイズを 1/8 に低減させることができ S/N 比が 2 倍になる。
- (2) 遠隔誘導型探触子により得られる表面欠陥に対する最大電位差変化は、試験片と誘導線との距離を約 10%大きくしても最大で 3.5%の誤差しか生じない。
- (3) 遠隔誘導型電位差法による裏面欠陥の計測では、0.3, 1, 3, 10kHz の周波数のうち 3kHz が最適で、他の周波数のおよそ 4 倍の S/N 比を示した。
- (4) 遠隔誘導型電位差法を用いることにより、従来の ICFPD 法および分離誘導型電位差法では検出が困難であった、板厚 7mm の母材試験片に導入された深さ 0.5mm の裏面欠陥の検出が可能である。
- (5) 遠隔誘導型電位差法により自然裏面き裂(疲労き裂)の高精度・高感度の計測が可能である。
- (6) 遠隔誘導型電位差法を用いることにより、従来の ICFPD 法および分離誘導型電位差法では検出が困難であった、余盛り除去溶接試験片に導入された深さ 1mm 以上の裏面欠陥の検出が可能である。また分離誘導型電位差法による深さ 2mm の裏面欠陥に対する S/N 比と比較して、遠隔誘導型電位差法ではその 5 倍の S/N 比が得られ、検出感度・精度の大幅な向上がなされた。
- (7) 遠隔誘導型電位差法を用いることにより、従来の ICFPD 法および分離誘導型電位差法では検出が困難であった、余盛り有り溶接試験片に導入された深さ 1mm 以上の裏面欠陥において、無欠陥部の標準偏差の 3.1 倍以上の電位差変化が得られ欠陥の検出が可能となり、検出感度の大幅な向上がなされた。
- (8) 計測間隔より求められる欠陥部における電位差上昇の幅、無欠陥部におけるばらつきなどの条件を考慮したデータ処理を施すことで、欠陥部における電位差変化のみを抽出することが可能である。

審査結果の要旨

産業界のあらゆる分野において数多くの製品・構造物が溶接によって製作されているが、溶接部には材質不連続、余盛りによる形状不連続さらには残留応力等が存在し、通常最も欠陥が潜(先)在あるいは発生しやすく、一方最も欠陥の検出が困難な部位である。従って、欠陥の存在を許容し、不安定破壊を生じさせないことを保証する損傷許容工学的評価が不可欠である。本研究は、損傷許容工学において特に重要な、高感度欠陥検出および定量評価のための新しい遠隔誘導型電位差法を考案し、溶接部における欠陥の高精度検出・計測を実現した成果を纏めたものであり、全7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、電磁誘導現象を利用した電位差法の原理について述べ、計測の自動化の必要性とともに、その問題点を抽出し自動計測システムを新たに提案している。それにより無欠陥部の電位差分布のばらつきを1/3に低減させ、さらに計測時間を1/4に短縮させることに成功し、本研究における実験手法の基礎を与えている。

第3章では、汎用有限要素プログラムを用い、電磁誘導現象を利用した電位差法の数値解析をA- Φ 法により行い、き裂周辺の電位差分布を実験と比較し、その妥当性を検証するとともに、裏面欠陥を計測する上での誘導電流付与方法の指針や位相情報の有用性を明らかにし、電位差法の最適化に必要な新しい知見を得ている。

第4章では電磁誘導現象を利用した電位差法の基本といえる集中誘導型交流電位差法の計測パラメータ(電位差計測端子の間隔、誘導線長さ、周波数)を系統的に変化させ探触子の最適化を図り、インコネル718試験片に導入された2次元裏面欠陥および3次元溶接部裏面欠陥の計測に適用し、溶接試験片について余盛りを除去した場合、深さ1mmの溶接部裏面欠陥の検出が可能であることを示している。これは従来の方法に比して極めて高感度であり、有用な知見である。

第5章では、余盛り付き溶接部の溶接線に沿った高精度欠陥計測を可能にするため、新たに分離誘導型電位差法を考案し、裏面欠陥に対し低周波数(0.3kHz)において高周波数(10kHz)と比較して信号のばらつきが大幅に低減し、その結果S/N比の飛躍的向上が実現し、従来検出不可能な裏面欠陥の定量評価を可能としている。

第6章では、誘導線を試験片表面から大きく離れた位置に配置する新しい遠隔誘導型電位法を考案し、低周波数(1kHz)において高周波数(30kHz)と比較して大幅にS/N比を向上させ、分離誘導型による深さ2mmの裏面欠陥に対するS/N比と比較して、遠隔誘導型ではその5倍のS/N比が得られ、溶接部欠陥の高精度検出・計測が可能となった。これは損傷許容工学の実践において貴重な成果であり、その発展に大きな貢献をするものである。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、溶接部欠陥の高精度検出・計測のため新たに遠隔誘導型電位差法の提案を行い、その有用性を検証したものであり、損傷許容工学および機械工学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。