

## 連続冷間圧延プロセスへのマッシュシーム溶接機の適用に関する研究

齋藤武彦

冷延鋼板の製造プロセスは、酸洗、冷間圧延、焼鈍、メッキ工程に大きく分類される。これらの工程では、生産性向上のため、コイル状に巻かれた鋼板の先端部と後端部を溶接し、連続的にコイルを通板処理する生産方法が積極的に導入されてきた。このような冷延鋼板の連続製造プロセスで用いられる溶接機には、フラッシュバット溶接機、レーザービーム溶接機およびマッシュシーム溶接機がある。酸洗や冷間圧延工程では、突き合わせの溶接形態を採用するフラッシュバット溶接機およびレーザービーム溶接機、焼鈍やメッキ工程では、重ね合わせの溶接形態を採用するマッシュシーム溶接機が、広く用いられてきた。

本研究の対象となるマッシュシーム溶接機は、フラッシュバット溶接機と同様の電気抵抗溶接機であるが、フラッシュバット溶接のように板幅方向全域を一気に押圧して溶融圧接するのではない。マッシュシーム溶接は、接合部を板厚程度重ね合わせ、電極輪を回転移動しながら押圧通電して溶接するのが特徴であり、設備が小規模で導入コストを低く抑えることができる。これまでマッシュシーム溶接機は、溶接部の残存段差に起因すると思われる圧延破断によって、圧下率が最大85%程度におよぶ連続冷間圧延ラインには適用されていない。しかし、マッシュシーム溶接機は、フラッシュバット溶接機またはレーザービーム溶接機のような、突き合わせ面に対する高い精度管理が不要であるため、コスト低減目的だけでなく設備管理面からも、連続冷延プロセスにマッシュシーム溶接機を適用するメリットは大きい。

コイル継ぎ用マッシュシーム溶接機には、通電しながら押圧回転する電極輪と、押圧回転だけのスウェーピングロールが一体フレームに備わっており、フレーム全体が板幅方向に走行する。溶接素材はクランプ装置によって、通板ライン内に固定される。電極輪による通電、押圧回転で、重ね合わされた部分は個々の素材よりも厚く溶接され、重ね合わせた素材の端部近傍に板厚段差が残存する。このような溶接部段差の位置や高さは、溶接条件（電流、押付力、溶接速度、クランプ間距離、重ね代）によって多少変化するが、重ね合わせの溶接形態および電極輪と溶接素材との接触抜熱のため、溶接後の段差は避けられない形状である。マッシュシーム溶接機の連続冷延プロセスへの適用を考える場合、段差の平坦化が大きな課題であり、従来のスウェーピングロールによる押圧回転だけでは、表面きずの防止と段差の平坦化を両立することが困難であった。

そこで本研究では、マッシュシーム溶接機の連続冷間圧延プロセスへの適用を目的とし、圧延による段差の変形挙動解析、変形後の段差形状から圧延破断に至るプロセスの解明、溶接後段差の平坦化機構の開発と平坦化した段差の耐圧延性の確認を行った。

本論文は、5章で構成されており、内容は以下である。

第1章では、冷延鋼板製造プロセスにおける連続化の位置づけと、コイル継ぎ用溶接機の概要と、マッシュシーム溶接機の課題について述べ、本研究の背景を示した。

2章では、溶接後に形成される段差の圧延変形挙動を調査するために、主として剛塑性有限要素法による数値解析を実施し、圧下スケジュール、総圧下率、圧延前後張力、初期段差形状、作業ロール直径などが圧延後の段差形状に及ぼす影響を明らかにした。

得られた知見は以下である。(1)段差角度 $90^\circ$ の段差上り部では、段差が第1パスで亀裂状の折れ込みきずとなり、複数パスを経ても残存する。(2)段差下り部では、段差が第1パスで凹み形状となり、複数パスで凹み形状は平坦化する。(3)折れ込みきず深さの板

厚占有比率は、圧下の進行とともに緩やかな減少傾向を示すが、ある圧下率以上になると増加に転じ、板破断の危険性が高くなる。(4)初期の段差角度を小さくすることで、段差上り部に発生する折れ込みきず深さを小さくすることが可能である。折れ込みきずの発生防止の一指標として、初期段差角度 $60^{\circ}$ を得た。

3章では、亀裂状の折れ込みきずから圧延破断に至るプロセスを明らかにするために、板厚方向に斜め亀裂を有する板材と、板厚方向に直角段差を付与した板材を圧延し、断面形状および圧延破断面の観察を行った。また、FEMを用いて、圧延中の段差折れ込みきず近傍の平均垂直応力、応力3軸度(=平均垂直応力/相当応力)、延性ダメージを算出し、圧延破断に至る段差折れ込みきずの影響を明らかにした。

得られた知見は以下である。(1)折れ込みきずから圧延破断に至る破断形態は、せん断型の延性破壊である。(2)折れ込みきずが圧延される際、ロールバイト内で平均垂直応力が引張り、応力3軸度が大きい領域があり、延性破壊しやすい状態にある。(3)折れ込みきずを起点とする圧延破断はロールバイト内で生じ、入口側または出口側に近い領域で生じやすい。(4)初期段差高さ0.5mm, 0.3mm, 初期段差角度 $90^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ の圧延後の延性ダメージパラメータの比較において、段差高さが低く、段差角度が小さい方が、圧延変形後の延性ダメージが小さく、板破断の危険が小さい。

4章では、溶接後の段差折れ込み変形を防止したマッシュシーム溶接機の開発について述べた。従来から平坦化の手法として用いられていたスウェーピングロールの上下ロールを、クロスする機構を新提案した。まず、ロールクロスによる折れ込み変形防止メカニズムについて、アルミ材による冷間スウェーピング試験、溶接と溶接直後スウェーピングの連続工程における材料の応力測定、3次元FEMによる変形解析によって解明した。次に、SPHC材をマッシュシーム溶接し、直後にクロススウェーピングした素材を繰り返して圧延に供して、耐圧延性を実証した。

得られた知見は以下である。(1)段差の折れ込み変形は、スウェーピングの初期段階に段差端面の張出変形を抑制できない場合に発生し、その方向は板表面とほぼ平行である。(2)材料内部に溶接後の高温領域が存在すると、クロススウェーピングによってせん断方向の変形が生じやすく、段差端部の折れ込み変形が防止される。(3)溶接に連動したクロススウェーピングでは、クロススウェーピングによるせん断力と溶接後の熱収縮による長手方向引張力が作用し、板厚方向圧縮時の長手方向の塑性流動性が高まり、折れ込み変形を防止する。(4)溶接直後のスウェーピングで生じる折れ込みきず防止には、スウェーピング時にロールをクロスすることが有効な手段である。(5)SPHC素材の重ね合わせ溶接部をクロススウェーピングした材料を圧延し、素材2mmのものは総圧下率93%(実用上の要求圧下率は85%程度)まで、素材6mmのものは総圧下率83%(実用上の要求圧下率は50%程度)まで溶接部破断がないことを確認した。

以上の検討結果から、重ね合わせの接合形態をとるマッシュシーム溶接機を、連続冷間圧延プロセスへ適用するために必要な溶接部の平坦化技術として、クロススウェーピングの有効性を示したと考える。