

博士論文の概要

(2020年 11月 13日 提出)

論文題目 高強度鋼板抵抗スポット溶接継手の疲労強度向上を目的とした
テンパー通電時の入熱量制御因子に関する研究

指導教員 西川 出



大学院 工学研究科
博士後期課程 電気電子・機械工学 専攻

申請者氏名 佐藤 彰



大阪工業大学大学院

高強度鋼板抵抗スポット溶接継手の疲労強度向上を目的とした

テンパー通電時の入熱量制御因子に関する研究

博士論文の概要

本論文は、現代の社会問題を解決可能な次世代自動車車体の製造に向けて、溶接継手強度の有効な改善手法となりうるテンパー通電法を実施工に適用することを目的として、その疲労強度向上因子の明確化と疲労強度向上に最適なその施工条件を予測可能な手法の提案を行ったものである。

第1章は、緒論として本論文の目的とその意義を述べている。近年の世界的な自動車保有台数の増加に伴い、排気ガスによる環境汚染や自動車事故による死傷者数の増加が社会問題として取り上げられている。その対策として自動車の大きなコンポーネントの一つである車体においては、低燃費化による排気ガス削減に向けた軽量化と同時に、衝突時の乗員保護に向けて高強度化も試みられている。軽量化の手法として、構造部材の板厚の低減などが挙げられるものの、これらの方策では衝突安全性の確保が困難となることから、自動車車体における軽量化と高強度化は相反する目標であると言える。この課題に対して従来、部材の構造変更だけでなく材料の改善というアプローチが検討されてきた。車体構造部材において最も主要な材料である鋼においては、従来鋼と比較して強度の高い高強度鋼が開発され、同強度の構造体において板厚の低減、すなわち軽量化を可能とした。

このような材料の改善により、次世代に向けた自動車車体の開発・製造を進める一方で、依然として車体の強度には課題があることが指摘されている。車体の製造には、プレス加工により立体的に成型した板材を抵抗スポット溶接により接合する手法が多く用いられている。特に溶接を施した部分は、局所的に高温にさらされることにより母材の特性とは大きく異なる強度特性を有している。強度特性のうち特徴的なものとして、硬さと残留応力が変化することが知られている。抵抗スポット溶接は大電流を印加する

ことによる抵抗発熱を利用した溶接手法であり、電流を流すために鋼板を水冷電極で挟んでいる。そのため、溶接後の継手は急速に冷却され、マルテンサイトと呼ばれる硬質な組織が形成される。また、抵抗スポット溶接部は直径数 mm 程度と小さく、このような局所領域に常温から鋼の溶融温度（約 1500℃）までの急峻な温度勾配が生まれることによって、冷却後には残留応力が発生する。このような溶接部特性の変化に加えて、形状にも特徴的な変化が見られる。抵抗スポット溶接は鋼板間に溶融部が形成されることでシートセパレーションと呼ばれる板の浮き上がりが生じる。このシートセパレーションと溶融部の境界は非常に鋭利な切欠き形状を呈しているため、外力を負荷した場合の応力集中部となることで継手としての強度を低下させる要因となる。上記のような硬さや残留応力といった継手内部の局所特性とシートセパレーション先端のような形状的特徴の組合せによって継手の強度が決定されることが予想される。そして抵抗スポット溶接継手の強度特性の一つである疲労強度は、母材強度が向上しても上昇せず、高強度鋼板の適用を阻害する要因となっている。そこで継手の疲労強度向上手法として、硬さと残留応力を変化させるテンパー通電法が提案されている。この手法は溶接後の再通電による温度上昇により硬質なマルテンサイトが軟化する、焼戻しと呼ばれる現象を利用したものである。従来研究ではこの手法によって継手内部が軟化するほか、残留応力が圧縮方向に増大することが示唆されており、その結果疲労強度が大きく向上することが確認されている。加えて、テンパー通電法は溶接後ただちに施工することができるため、工数増加によるコストが最低限で済むというメリットも有しており、テンパー通電法を実施工へ適用することで高強度鋼板の適用拡大に大きく貢献することが可能であると考える。

ただし実施工への適用にあたっては、溶接条件や材料特性、部材形状といった外乱に対して疲労強度向上の信頼性を確保することと、疲労強度向上が可能な施工条件を簡便に決定可能であることの2点が重要となると考えられる。疲労強度向上の信頼性確保に向けては外乱に対する処置を可能にするために、その疲労強度向上メカニズムを明らかにすることが必要である。従来、疲労強度向上メカニズムとしては圧縮残留応力の増大が支配的であると示唆されているものの、従来研究では、残留応力を変化させるような破壊検査によって計測が行われており、そのメカニズムが十分に明らかにされたとは言

い難い。また施工条件を簡便に決定するためには疲労強度を向上可能なテンパー通電の施工条件の予測手法を提案することが必要であり、入熱量に基づく手法が従来提案されている。しかし、高精度な予測に向けては水冷電極による抜熱現象、すなわち電極の冷却効果の考慮や材料特性などに依存する抵抗発熱量の考慮も必要である。

そこで本研究では、テンパー通電の実施工への適用に向けてその疲労強度向上に及ぼす硬さと残留応力の影響を検討したほか、材料の発熱現象と電極の冷却効果を考慮に入れてテンパー通電の最適な施工条件を決定可能な因子を提案した。

第2章では、テンパー通電の施工条件に加えて母材の強度特性を変更して硬さと残留応力を制御した継手を作製し、これらの継手に対して疲労荷重の負荷方向を変更して疲労試験を実施した。さらには疲労負荷過程におけるき裂の発生タイミングやき裂の発生箇所における応力の取得を行うことで、溶接部特性が疲労強度向上に及ぼす影響を考察した。まず継手のせん断方向に荷重を負荷した場合、母材特性にかかわらず疲労寿命が硬さと対応したことから、せん断負荷により疲労き裂の起点に生じる応力は硬さと概ね対応すると考えた。そこで数値シミュレーションにより応力を計算した結果、テンパー通電を施さなかった継手と比較してテンパー通電を施した継手で応力が小さくなっていることが明らかとなった。そして疲労き裂の発生タイミングもテンパー通電を施した継手で増大しており、これが疲労寿命を向上させた原因であることが明らかとなった。

さらにはく離方向に荷重を負荷した場合には母材強度によって疲労寿命と硬さに対応が見られず、これは残留応力の影響であることが示唆された。疲労寿命が変化した原因として、継手の破断形態、すなわち疲労き裂の進展方向が変化していることが考えられた。疲労寿命の大きい、母材強度の高い継手では疲労き裂はその発生点から板厚方向へ向かっている一方で、疲労寿命の小さい母材強度の低い継手では疲労き裂は界面方向に進展していた。このようなき裂進展方向に及ぼす残留応力の影響を明らかにするために、数値シミュレーションを実施した。その結果、鋼板強度に比例して引張残留応力が増大したものの、この残留応力の違いが疲労き裂の進展方向に及ぼす影響は小さいことが示唆され、残留応力は継手の疲労強度向上に及ぼす影響は比較的小さいことが示唆された。

第3章では、疲労強度向上に最適なテンパー通電の施工条件予測手法を提案すること

に先立って、疲労強度向上に対する影響について溶接部特性の比較を行った。最適な施工条件予測手法を提案するためには、第2章で示したように、溶接部特性、疲労き裂の起点における応力、疲労き裂の発生タイミング、そして疲労寿命それぞれの関係式を構築することが必要である。しかし、各因子を種々変化させ実験を行うことは困難であるため、本研究では疲労強度向上に支配的な溶接部特性を一つに絞ったうえで、その溶接部特性とテンパー通電の施工条件の関係式のみを提案することとした。そして本章では、支配因子を明らかにするために硬さと残留応力を独立して制御することが可能なプレス加工法について検討を行った。プレス加工法はテンパー通電を施した継手に対して数tfの荷重を負荷することで継手の残留応力を変化させる手法である。この手法ではプレス荷重を大きくすることで、継手内部に塑性変形による加工硬化を生じさせることも可能であり、硬さと残留応力両方の影響を検討することが可能である。そこでまず、テンパー通電のみを行った継手とテンパー通電後に3.0tfでプレス加工を施した継手について硬さと残留応力、そして疲労寿命を取得した。その結果、テンパー通電のみの継手と比較してプレス加工も施した継手では、硬さは同一であったものの圧縮残留応力が生じており、疲労寿命は上昇した。この結果から、圧縮残留応力は疲労強度を向上させる効果を有することが明らかとなった。そのうえで次に、プレス加工において3.0tfの荷重を負荷した継手と4.0tfの荷重を負荷した継手について比較した。その結果、4.0tfを負荷した継手において硬さが高い値を示したほか、圧縮残留応力が増大していることが示唆された。そして疲労寿命は4.0tfの継手で小さい値を示した。このことから、硬さの増大は疲労強度を低下させることが示されたことに加えて、圧縮残留応力の増大よりもその効果は大きいことが明らかとなった。テンパー通電法においては、テンパー通電の施工によって硬さは低下し、引張残留応力は増大する。このとき引張残留応力は疲労強度を低下させる効果を有するものの硬さの低下がそれ以上に大きく影響を及ぼすことで疲労強度が向上することを明らかにした。

第4章では、疲労強度向上に最適なテンパー通電の施工条件に及ぼす電極の冷却効果と材料の発熱現象の影響を明らかにするために、疲労強度向上に最適な硬さ分布が得られるときのテンパー通電の入熱量と通電時間の組合せを明らかにした。予測手法の提案には、疲労強度の支配因子である硬さ分布と施工条件との関係式が必要であると考えた。

疲労強度向上に最適な硬さ分布は、疲労試験と硬さ試験の結果から継手の中心部が最も軟化した条件であった。この硬さ分布は継手中心部が焼戻し温度である 750℃程度まで加熱されたことを示しており、これはテンパー通電時の入熱量と電極の冷却効果、そして材料の発熱現象によって決定されたと考えた。入熱量はテンパー通電の電流値と通電時間が因子となり、特に電極の冷却効果は電極と継手の接触時間、すなわち通電時間に依存することが予想された。そこでこの硬さ分布が得られるテンパー通電の施工条件について、まず電流値と通電時間を変更して検討を行った。その結果、所定の硬さ分布が得られるテンパー電流値は通電時間の増大に伴って現象した。さらに電流値を入熱量に相当する値に換算すると、入熱量は通電時間に線形的に比例することが明らかとなった。電極の冷却効果が通電時間と対応することから、この線形関係の傾きが電極の冷却効果を表していることを示した。さらに線形関係の切片は電極による冷却がない場合に、継手を焼戻し温度まで加熱させるために必要な入熱量、すなわち材料の発熱量と言える。以上の結果から、疲労強度向上に最適なテンパー通電の入熱量は電極の冷却による抜熱量と継手の発熱量の和で表されることを明らかにした。

第5章では、溶接条件に依存しないテンパー通電の施工条件予測手法を提案するために、電極の冷却効果と材料の発熱量を材料定数で表すことでその予測指標を提案した。電極の冷却効果は電極と継手の間での熱伝達現象であると言えるため、その接触面積に比例すると考えられる。また材料の発熱量は抵抗発熱現象であり、加熱する部分の質量、すなわち体積に比例すると考えた。そこで接触面積を変化させるため、溶接条件としてナゲット径、すなわち溶接電流値を変更した。また加熱部の体積を変化させるため継手の板枚数を変更し、入熱量と通電時間の線形関係を取得した。その結果、ナゲット径を変化した場合には傾きが、板枚数を変更した場合には切片が変化した。このことから、ナゲット径の変更により電極の冷却効果が、板枚数の変更により材料の発熱量が変化したと言える。そして電極と継手の熱伝達現象と材料の発熱現象について、溶接条件によって変化する因子と変化しない定数に分けて考察を行った。その結果、電極の冷却効果は熱流束が、材料の発熱量は材料の密度と比熱が溶接条件に依存しない定数となることが明らかとなった。以上の検討から、疲労強度向上に最適なテンパー通電条件の予測が可能になる指標を提案することができたと考える。